

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et technologies Filière : Automatique
Spécialité : Automatique et informatique industriel

THÈME

**Étude et réalisation de la commande d'un moteur universel
monophasé à base d'un microcontrôleur.**

Préparé par :

- **BABEKER HADJ OMAR**
- **HARBOUCHE ZAKARIA YAHIA**

Devant le Jury :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. OUARED Rahel	MCB	Président
Mr. MORSLI SEBAA	Pr	Encadrant
Mr. DJILALI NASRI	Pr	Co-Encadrant
Mr. KOUADRIA Mohamed	MCA	Examineur
Mr. BENASLA Mokhtar	MCB	Examineur

PROMOTION 2024 /2025

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'achèvement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Morsli SEBAA**, enseignant à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour m'avoir encadré avec rigueur et bienveillance tout au long de ce projet. Son expertise, ses conseils pertinents et sa disponibilité ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères vont également à **Monsieur NASRI Djilali**, enseignant à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour son co-encadrement, ses orientations précieuses et son accompagnement tout au long de cette recherche.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et d'y apporter leur regard critique.

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet par leur soutien moral, technique ou intellectuel.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères à nos cœurs.

À mes très chers parents, véritables piliers de notre vie, pour leur patience, leurs prières et leur amour inconditionnel. À ma mère, source inépuisable de tendresse et de soutien, et à mon père, dont les sacrifices constants sont la base même de notre réussite. Que Dieu les récompense pleinement pour tout ce qu'ils nous ont donné.

À mes deux frères, pour leur présence rassurante, leur encouragement et leur soutien dans toutes les étapes de ma vie.

À toute ma famille, et plus particulièrement aux familles **BABEKER** et **KABOUCHE**, pour leur présence rassurante et leurs encouragements sincères.

Au **groupe TAWAT n°6**, avec qui nous avons partagé des instants inoubliables empreints de fraternité, d'entraide et de respect.

Au **Bureau des Étudiants Mozabites à Tihert**, pour leur accompagnement fraternel, leur engagement et leur rôle essentiel dans notre parcours académique.

À l'équipe de la **boutique BARAKA Pièces**, pour leur appui, leur compréhension et leur motivation tout au long de cette étape.

À **toute ma promotion de 2^e année Master Auto**, pour les souvenirs partagés, la solidarité et l'ambiance studieuse qui ont marqué ces années d'études.

Puisse Dieu les préserver tous, et leur accorder bonheur, réussite et bénédictions ici-bas et dans l'au-delà.

HADJ OMAR BABEKER

Dédicace

JE DÉDIE CE MÉMOIRE

A MA MÈRE.....

ET A MA MÈRE

ET AUSSI A MA MÈRE

POUR TOUS CES SACRIFICES, SON AMOUR, SA
TENDRESSE, SON SOUTIEN ET CA PRIERE TOUT AU LONG DE MES
ETUDES

A MON PÈRE QUE JE RESPECTE

BEAUCOUP....

A MA SŒUR Z'HOR

ET MES FRÈRES MOHAMED ET HOUARI ET KADI
POUR LEUR APPUI ET LEURS ENCOURAGEMENTS

PERMANENTS

ET LES AMIS PROCHES HAMEL ET
MOHAMED ET MOSTAPHA ET TOUT AMIS

SANS EXEPTIONS

HARBOUCHE ZAKARIA YAHIA

Sommaire

<i>Dédicace</i>	3
<i>Dédicace</i>	4
La liste de figures	4
Introduction général	1
Chapitre I	3
Etude de gradateur monophasé	3
I.1. Introduction	4
I.2. Gradateurs	4
I.2.1 Définition	5
I.2.2 Constitution d'un gradateur	5
I.2.3 Types de gradeurs []	6
I.2.4 Application des gradateurs	7
I.2.5 Avantages et inconvénients	7
I.3. Les Thyristor []	8
I.3.1 Fonctionnement	8
I.3.2 Caractéristique statique d'un thyristor	9
I.4. Triac:	9
I.4.1 Définition	9
I.4.2 Les caractéristiques des triacs	10
I.5. Gradateur monophasé commandé en retard de phase [4]	12
I.5.1 Charge résistive	12
I.5.2 Principe	12
I.5.3 Partie théorique	13
I.6 Gradateur monophasé avec charge résistive inductive (RL) [4]	14
I.6.2 Partie théorique	15
I.7. Simulation des gradateurs	18
I.7.1 Gradateur Monophasé charge R	18
I.7.2 Gradateur Monophasé avec une charge RL	20
I.8. Conclusion	23
Chapitre II	24
Moteur universel	24
II.1. Introduction	25
II.2. Moteur universel contrôlé par angle de phase	25
II.3 Que sont les moteurs universels	26

II.4. Pièces d'un moteur universel []	27
II.5. Types de moteurs universels []	28
II.6. Fonctionnement en tension alternative	28
II.7. Effets sur la vitesse et le couple	29
II.8 Fonctionnement en courant continu	30
II.9 Effet sur le couple et vitesse [9]	31
II.10. Modélisation de moteur à courant continu à excitation série [4]	32
II.11. Équation électrique :	33
II.11.1 Équation de Vitesse de rotation (Ω)	33
II.11.2 Équation de couple $C_U(I)$	34
II.12 Représentation schématique:	35
Conclusion	35
Microcontrôleur PIC 16F877	36
III) Introduction:	37
III.1 Généralités sur les PICs :	37
III.1.1 Définition :	37
III.1.2 Les Familles de Microcontrôleurs :	37
III.1.3 Les différentes familles des PIC :	38
III.1.4 Identification du PIC :	38
III.1.5 Choix d'un microcontrôleur 16F877:	38
III.2 Etude microcontrôleur PIC16F877 :	39
III.2.1 Les PINS de 16F877 :	40
III.3 Architecture interne d'un microcontrôleur 16f877 est	41
III.3.2 Les particularités des ports	42
III.3.3 Les mémoires du PIC 16F877 []	42
III.3.4 Les TIMERS :	43
III.3.5 Le convertisseur :	44
III.3.6 Les interruptions []	47
IV) Conclusion:	50
Chapitre IV	51
Les résultats expérimentaux	51
IV.1 Introduction :	52
IV.2 Réalisation	52
IV.3 La partie de commande	53
IV.3.1 Le circuit de détecteur du passage par zéro.	53

IV.1.2 Le principe de fonctionnement	53
IV.2 Photo triac	55
IV.2.1 Commande du TRIAC par Optotriac (MOC3021)	53
IV.2.2 Description fonctionnelle du_circuit.....	53
IV.2.3 Commande du triac de puissance via MOC3021 :.....	56
IV.2.4 Commande de puissance côté alternatif :	56
IV.3 Fonctionnement global	56
IV.4 La Partie de commande	59
Conclusion	63
Conclusion général	64
Annexes	66

La liste de figures

Chapitre I

Figure 1. 1: Principe de fonctionnement d'un gradateur à commande de phase	5	
Figure 1. 2: Structure d'un gradateur monophasé	5	
Figure 1. 3: Amorçage du gradateur monophasé a train d'onde.....	7	
Figure 1. 4: Représentation schématique d'un thyristor.....	8	
Figure 1. 5: Caractéristique statique d'un thyristor.....	9	
Figure 1. 6: Configuration d'un Triac	Figure 1. 7 Configuration d'un Triac	10
Figure 1. 8: Caractéristique courant-tension d'un triac	10	
Figure 1. 9: Fonctionnement du TRIAC dans les quatre quadrants selon la polarité de MT2 et du courant de gâchette (G).....	11	
Figure 1. 10: Gradateur monophasé utilisant des thyristors.....	12	
Figure 1. 11: Gradateur monophasé (gradateur bidirectionnel) utilisant TRIAC	13	
Figure 1. 12: Forme d'onde d'un gradateur monophasé.....	13	
Figure 1. 13: Gradateur monophasé avec charge RL.....	14	
Figure 1. 14: Forme d'onde d'un gradateur monophasé avec charge RL.....	15	
Figure 1. 15: Gradateur plein d'onde avec charge RL.....	17	
Figure 1. 16: schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge.....	19	
Figure 1. 17: La tension de source, la tension et le courant de charge.....	19	
Figure 1. 18: La tension de source, la tension et le courant de charge.....	20	
Figure 1. 19: La tension inverse.....	20	
Figure 1. 20: schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive inductive.....	21	
Figure 1. 21: La tension de source, la tension et le courant de charge.....	21	
Figure 1. 22: La tension inverse du thyristor	22	
Figure 1. 23: La tension de source, la tension et le courant de charge.....	22	
Figure 1. 24: La tension inverse du thyristor	23	

Chapitre II

Figure 2.1: schéma commande de moteur.....	25
Figure 2.2: Schéma de commande d'un moteur par TRIAC et illustration du contrôle à l'angle de phase	26
Figure 2. 3 : Le schéma du moteur universel	27
Figure 2. 4: Modèle électrique du moteur à excitation série	33
Figure 2. 5: Caractéristique de vitesse d'un moteur série (le moteur s'emballé à vide).....	34
Figure 2. 6: Caractéristique de couple-vitesse d'un moteur série (le moment du couple est maximal au démarrage).....	34
Figure 2. 7: schéma de principe d'un moteur universel.....	35

Chapitre III

Figure 3. 1: Brochage du PIC 16F877.....	39
Figure 3. 2: Architecture interne d'un microcontrôleur 16f877.....	41

Figure 3. 3: module du convertisseur	44
Figure 3. 4: Schéma descriptive ADCON1	46
Figure 3. 5: synoptique des modes d'interruptions	49
Figure 3. 5: synoptique des modes d'interruptions	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3. 6: Etapes de génération d'un programme écrit en langage C.	49

Chapitre IV

Figure 4.1 : schéma globale du circuit sur ISIS.....	52
Figure 4.2: Circuit détecteur de passage par zéro.	53
Figure 4.3: les signaux d'entrée et de sortie du détecteur de passage par zéro.	54
Figure 4.4: les signaux du détecteur de passage par zéro et les impulsions sortant de RB1	54
Figure 4.5 :Photo triac.....	55
Figure 4.6: Circuit de Photo triac	55
Figure 4.7: signal de commande a angle de phase.....	56
Figure 4.8: les signaux de la carte de commande et de puissance avec $\alpha=0$	57
Figure 4.9: La variation de l'angle α par potentiomètre $\alpha=45$	57
Figure 4.10: La variation de l'angle α par potentiomètre $\alpha=90$	58
Figure 4.11: La variation de l'angle α par potentiomètre $\alpha=140$	58
Figure 4.12 : vue générale de circuit du projet.....	59
Figure 4.13:Angle $\alpha=0$	59
Figure 4.14 :Angle $\alpha=90$	60
Figure 4.15:Angle $\alpha=180$	60
Figure 4.16 : la tension de charge résistive $\alpha=0$	60
Figure 4.17 : la tension de charge résistive $\alpha=90$	61
Figure 4.18 : la tension de charge résistive $\alpha=180$	61
Figure 4.19 : la tension de charge inductive $\alpha=45$	61
Figure 4.20 : la tension de charge inductive $\alpha=90$	62
Figure 4.21: la tension de charge inductive $\alpha=170$	62
Figure 4.22 : Circuit de notre projet dans proteus	67
Figure 4.23 : Circuit de notre projet avec LCD dans proteus	67
Figure 4.24: circuit de passage par zéro dans PCB proteus.....	68
Figure 4.25: La carte de circuit passage par zéro dans PCB	68
Figure 4.26: La carte de microcontrôleur pic16f877 proteus	69
Figure 4.27 : La carte de microcontrôleur pic16f877 dans PCB	69
Figure 4.28 circuit de puissance proteus.....	70
Figure 4.29 : circuit de puissance pcb.....	70

Introduction général

Les nouvelles applications industrielles de contrôle, de commande et de communication sont devenues des systèmes qui reposent sur l'utilisation des systèmes embarqués basés sur des circuits à bas prix tels que les microcontrôleurs.

Notre projet a pour objectif qui consiste à commander un gradateur monophasé en utilisant le microcontrôleur PIC 16F877 qui génère les signaux synchronisés avec la tension d'alimentation sinusoïdale de notre gradateur, qui permet la variation de la vitesse d'un moteur universel.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons étudié théoriquement les gradateurs monophasés en détail, le TRIAC composant essentiel d'un gradateur est aussi étudié.

Chapitre 2 est consacré à l'étude du moteur universel en présentant son principe de fonctionnement, ses caractéristiques ainsi que le domaine d'utilisation.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude détaillée sur les microcontrôleurs en présentant leur architectures et l'organisation. On s'est intéressé uniquement aux fonctionnalités (entrées, sorties LCD) du microcontrôleur PIC16F877 utilisés ultérieurement dans notre projet.

Dans le dernier chapitre nous présentons le circuit final de notre projet ainsi que les résultats de simulation et de réalisation.

Ce manuscrit est terminé par une conclusion générale qui résume les résultats trouvés ainsi que les perspectives pour améliorer ce travail.

Chapitre I

Etude de gradateur monophasé

I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons définir les gradateurs monophasés, les présenter et les simuler à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, présenter et interpréter les résultats de simulation pour les charges de type ohmique et inductive.

I.2. Gradateurs

Les gradateurs permettent de commander et de régler le courant délivré par une source alternative vers une charge alternative, en contrôlant la valeur efficace sans modifier la fréquence. Cette régulation se fait par découpage de la tension grâce à un interrupteur statique.

On distingue principalement deux types de fonctionnement :

- **Le gradateur à train d'ondes**, souvent utilisé en électrothermie, notamment pour les fours.
- **Le gradateur à angle de phase**, plus courant pour la commande des moteurs universels et l'éclairage.

Aujourd'hui, la majorité des gradateurs fonctionnent selon le principe de la commande de phase. Cela consiste à déclencher l'interrupteur statique avec un retard ajustable, puis à le laisser se bloquer naturellement lors du passage par zéro du courant. L'interrupteur doit être bidirectionnel : pour cela, on utilise généralement un triac pour les faibles puissances, ou deux thyristors montés tête-bêche pour les puissances plus élevées. Le courant délivré est donc continu dans le temps, sans interruption.

Puisqu'un gradateur se compose, par phase, d'un simple interrupteur en série avec la charge, la nature de cette dernière a une influence directe sur le fonctionnement. Comme en courant alternatif haché, il est nécessaire d'analyser chaque cas particulier. Pour simplifier, on se limitera ici aux situations les plus courantes : les circuits résistifs et inductifs en monophasé, et les circuits résistifs en triphasé [1]

I.2.1 Définition

Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de **valeur efficace réglable**.



Figure 1. 1: Principe de fonctionnement d'un gradateur à commande de phase

Le fonctionnement des gradateurs consiste à varier le débit du courant alternatif qui circule dans le récepteur, ce qui permet de régler l'intensité du courant que la source débite dans le récepteur. C'est pourquoi on les appelle aussi variateurs de courant alternatif, car il n'y a pas de conversion, Il est le plus souvent constitué de deux thyristors en antiparallèles ou des triacs pour les faibles puissances [1].

I.2.2 Constitution d'un gradateur

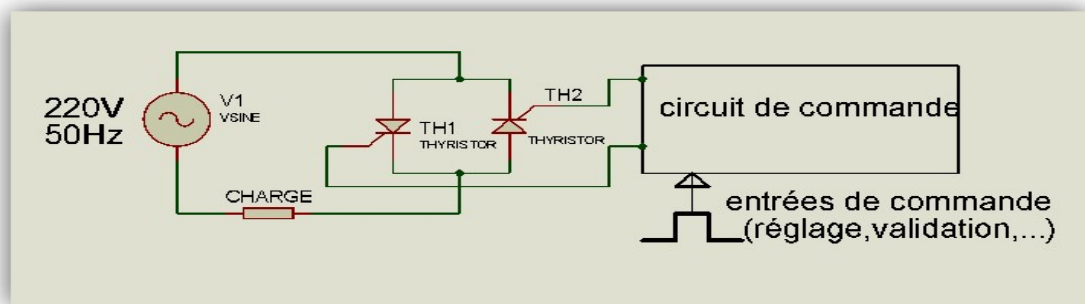


Figure 1. 2: Structure d'un gradateur monophasé

Cet appareil se comporte donc comme un interrupteur commandé, il établit ou interrompt la liaison entre la source et la charge. Il se compose d'une partie puissance et d'une partie commande intégrées dans le même bloc.

La partie puissance : est constituée de deux Thyristors montés « tête-bêche » pour les fortes puissances (> 10 kW) ou d'un triac pour les puissances inférieures.

La partie commande : est constituée de divers circuits électroniques permettant d'élaborer les signaux de commande des thyristors à partir d'un ordre de commande extérieur. Suivant les types de gradateur, ce signal de commande sera de type Tout Ou Rien ou bien analogique. La tension aux bornes de la charge évolue suivant la séquence de commande [2].

I.2.3 Types de gradeurs [3]

La tension aux bornes de la charge varie selon la séquence de commande appliquée. Cette caractéristique permet de classifier les gradateurs en deux grandes catégories.

I.2.3.1 Gradateur à angle de phase

• Principe de fonctionnement

Le gradateur à angle de phase repose sur le principe de commande différée des thyristors. Le thyristor T_1 est amorcé durant l'alternance positive de la tension secteur, avec un angle de retard déterminé par rapport au passage par zéro. De manière analogue, le thyristor T_2 est amorcé au cours de l'alternance négative avec un angle de retard identique. Ce mode de fonctionnement permet de contrôler précisément l'énergie délivrée à la charge.

• Domaine d'application

Ce type de gradateur trouve principalement son application dans les domaines suivants :

- Le chauffage électrique.
- L'éclairage, notamment pour la variation d'intensité lumineuse.
- La variation de vitesse des moteurs asynchrones de faible puissance, tels que ceux utilisés dans les perceuses, les aspirateurs ou d'autres équipements électroportatifs d'une puissance de quelques centaines de watts.

I.2.3.2 Gradateur à train d'onde

• Principe de fonctionnement

Dans ce type de gradateur, les thyristors T_1 et T_2 sont commandés de manière continue pendant une durée appelée **T_{on}** (temps de conduction). À l'issue de cette phase, ils sont bloqués jusqu'à la fin de la période de modulation **T_c**. Ce mode de fonctionnement engendre, aux bornes de la charge, une tension composée de trains d'ondes successifs, séparés par des périodes sans conduction, comme illustré à la figure :

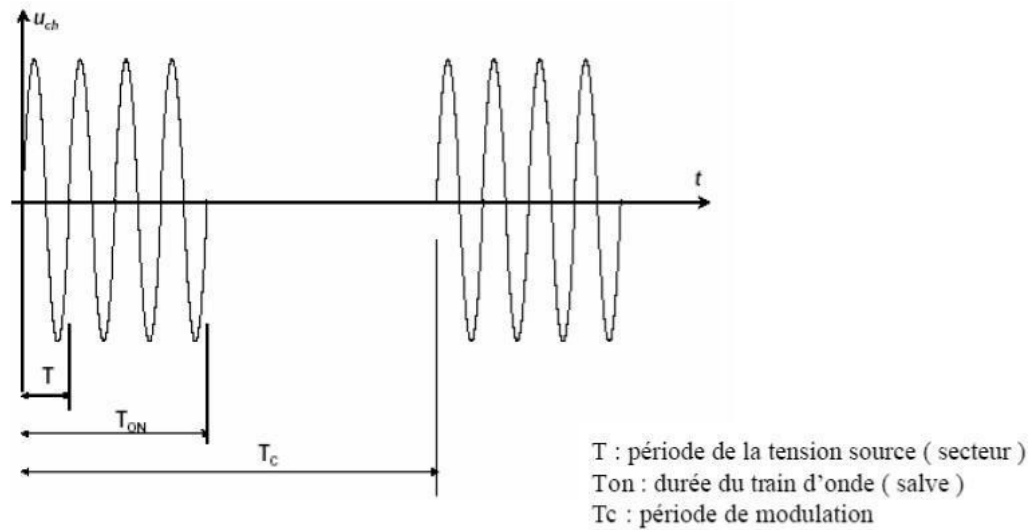


Figure 1. 3: Amorçage du gradateur monophasé à train d'onde

• Domaine d'application

Les gradateurs à train d'ondes sont principalement utilisés dans :

- Les systèmes de chauffage électrique ;
- Les applications présentant une forte inertie thermique, telles que les fours industriels, les plaques chauffantes ou les radiateurs à accumulation, où les variations de puissance rapides n'affectent pas la stabilité thermique du système.

I.2.4 Application des gradateurs

Les gradateurs constituent des convertisseurs relativement simples à réaliser. Ils sont couramment utilisés dans diverses applications, notamment :

- Le contrôle et la régulation de l'éclairage dans les circuits d'alimentation en courant alternatif.
- Le chauffage par induction.
- Le chauffage industriel ainsi que le chauffage domestique.
- Le changement de prises sur les transformateurs de puissance (adaptation du rapport de transformation en fonction de la charge).
- La régulation de la vitesse des moteurs asynchrones (à induction).
- Le pilotage des électroaimants alimentés en courant alternatif [3].

I.2.5 Avantages et inconvénients

Les avantages de l'interrupteur statique sont nombreux :

- Absence de risque de rebondissement des contacts.
- Établissement du courant à un instant précis du cycle de la tension.
- Ouverture du circuit avec un retard maximal limité à une demi-période.
- Ouverture sans rupture du courant, ce qui évite la génération de surtensions.
- Possibilité de cadences de fonctionnement très élevées, permettant de ne laisser passer le courant que pendant quelques alternances, ce qui est particulièrement avantageux pour des applications telles que le soudage par points.

Cependant, cet interrupteur présente également certaines limites :

- Il est plus sensible aux surcharges que les interrupteurs électromécaniques traditionnels.
- Il ne permet pas d'assurer une coupure « visible » du circuit.
- Il engendre une chute de tension au niveau du contact nettement plus élevée que celle d'un interrupteur mécanique [4].

I.3. Les Thyristor [5]

Le thyristor, c'est un interrupteur électronique à semi-conducteurs qu'on peut commander pour l'allumer, mais pas pour l'éteindre. Il est fait de quatre couches de silicium, dopées en alternance positivement et négativement, ce qui lui donne une structure en P-N-P-N. Pour mieux le comprendre, on peut le voir comme une combinaison de deux transistors : un de type PNP et un autre de type NPN.

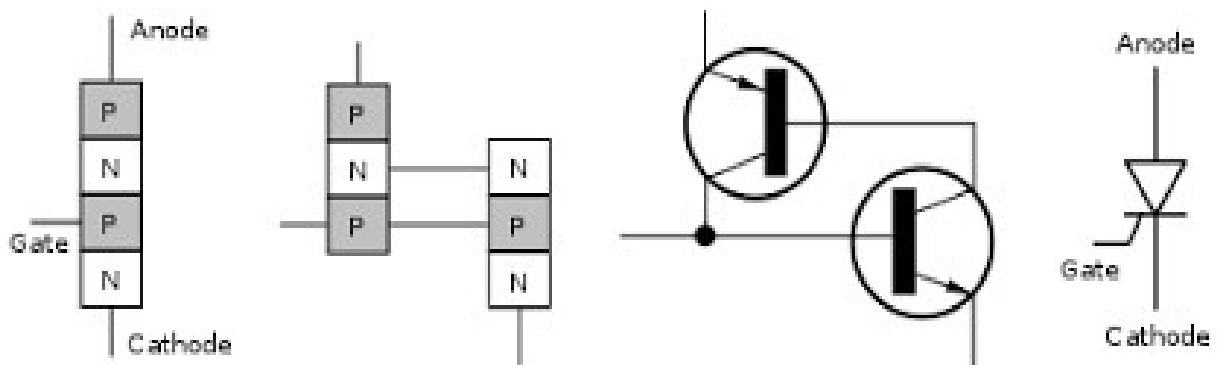


Figure 1. 4: Représentation schématique d'un thyristor

I.3.1 Fonctionnement

- V_{AK} , tension de seuil entre l'anode et la cathode du thyristor.
- I_{AK} , courant considéré comme positif lorsque traversant le thyristor de l'anode vers la cathode.

- I_G , courant considéré comme positif lorsque rentrant sur la gâchette.

3.2 Caractéristique statique d'un thyristor

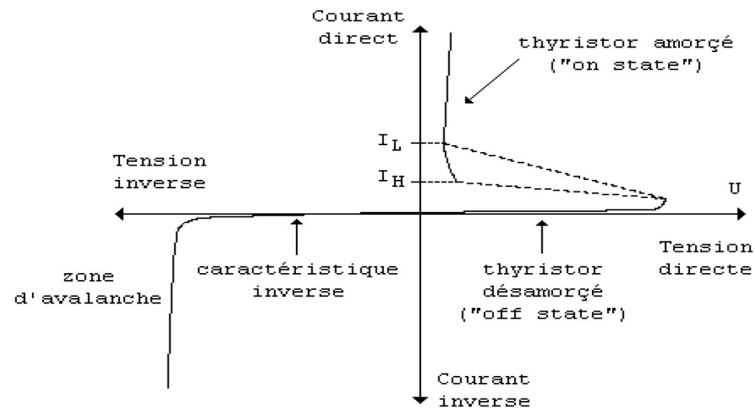


Figure 1. 5: Caractéristique statique d'un thyristor

I.3.2.1 1^{er} Cas (commande classique) :

- ✓ la tension $V_{AK} >$ tension de seuil (quelques V),
- ✓ Injection d'un courant I_G positif sur la gâchette.

Une fois ces deux conditions respectées le thyristor est passant et se comporte comme une diode. Le courant I_{AK} traverse le thyristor de l'anode vers la cathode et sa tension V_{AK} est légèrement au-delà de la tension de seuil

I.3.2.2 2^e cas (à éviter) : si le thyristor est à l'état bloqué et la tension V_{AK} dépasse un niveau élevé appelé Tension de retournement, le thyristor devient passant et sans commande sur la gâchette.

I.3.2.3 3^e cas (à éviter) : si la variation de tension V_{AK} est trop rapide et cela même si la tension est inférieure à la tension de retournement.

I.4.Triac:

I.4.1 Définition

Un triac (Triode Alternating Current), est un dispositif semi-conducteur à trois bornes pour commander le courant. Est contrairement au thyristor SCR, ce composant bidirectionnel, peut laisser passer le courant dans les deux sens. Et comme le thyristor, ce composant possède trois électrodes : deux électrodes principales appelées A1 et A2 (pour Anode 1 et Anode 2) ou MT1 et MT2 (pour Main Terminal 1 et Main Terminal 2, Main Terminal signifiant ici Terminaison principale), et une électrode de commande G (pour Gâchette) qui permet d'amorcer (de déclencher) plus facilement la conduction

du courant entre les deux électrodes principales A1 (MT1) et A2 (MT2). Dans les lignes qui suivent, les appellations A1 et A2 seront utilisées pour désigner les deux électrodes principales. On peut le décrire aussi comme deux thyristors montés tête bêche comme le montre la figure 1.07.[6]

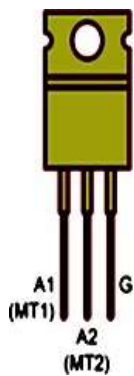


Figure 1. 6 : Configuration d'un Triac

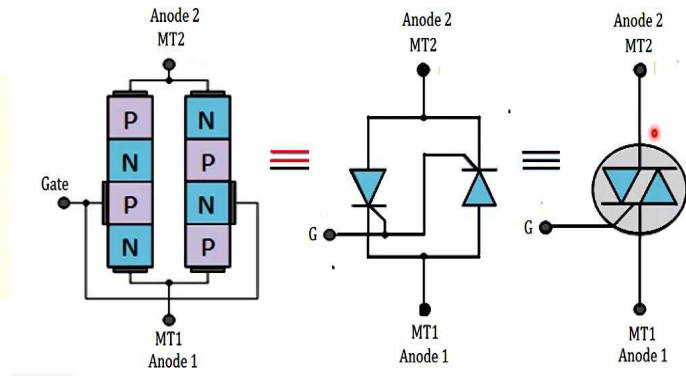


Figure 1. 7 Architecture interne d'un TRIAC

I.4.2 Les caractéristiques des triacs

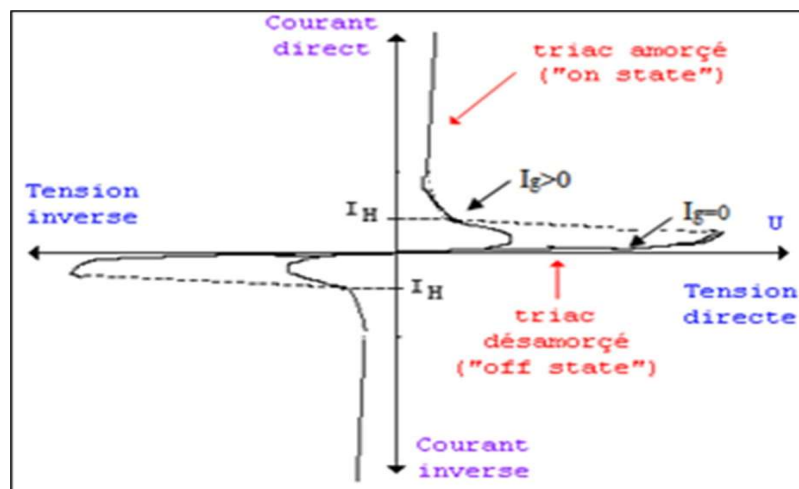


Figure 1. 8: Caractéristique courant-tension d'un triac

D'après la caractéristique courant-tension du triac, on constate que ce dernier peut être amorcé par deux méthodes principales :

- **Amorçage par tension** : Le triac peut être amorcé en augmentant progressivement la tension jusqu'à atteindre une valeur critique, spécifiée par le constructeur. Cette tension critique permet au triac de devenir passant, à condition que le courant dans la charge dépasse le courant de maintien I_h (également donné par le constructeur). Cependant, cette méthode est rarement utilisée en

pratique, car la tension d'amorçage est souvent supérieure à celle des charges courantes (comme les moteurs ou les résistances chauffantes).

- **Amorçage par courant de gâchette** : Le triac peut également être amorcé par des tensions réduites grâce à l'application d'un courant de gâchette ig ou $ig \neq 0$

Les conditions nécessaires à l'amorçage du triac sont les suivantes :

$$V_{ak} \neq 0$$

$$I_c \geq I_h$$

Le courant de maintien I_h (current hold) qui est défini par le constructeur, doit être respecté. En conséquence, l'amorçage du triac exige une synchronisation des impulsions de courant de gâchette avec les alternances positives et négatives du signal sinusoïdal, ce qui nécessite des circuits électroniques pour réaliser cette synchronisation.

Il existe quatre combinaisons possibles pour amorcer un TRIAC standard. Ce dernier peut être déclenché par une impulsion de courant de gâchette positive, où le courant est injecté dans la gâchette, ou par une impulsion de courant négatif, où le courant est extrait de la gâchette, indépendamment de la polarité de A2 par rapport à A1.



Figure 1. 9: Fonctionnement du TRIAC dans les quatre quadrants selon la polarité de MT2 et du courant de gâchette (G)

- ✓ Quadrant 1 : A2 est positif par rapport à A1, le triac est amorcé par une impulsion positive par rapport à A1.
- ✓ Quadrant 2 : A2 est positif par rapport à A1, le triac est amorcé par une impulsion négative par rapport à A1.
- ✓ Quadrant 3 : A2 est négatif par rapport à A1, le triac est amorcé par une impulsion négative par rapport à A1.
- ✓ Quadrant 4 : A2 est négatif par rapport à A1, le triac est amorcé par une impulsion positive par rapport à A1.

positive par rapport à A1. [6]

I.5. Gradateur monophasé commandé en retard de phase [4]

I.5.1 Charge résistive

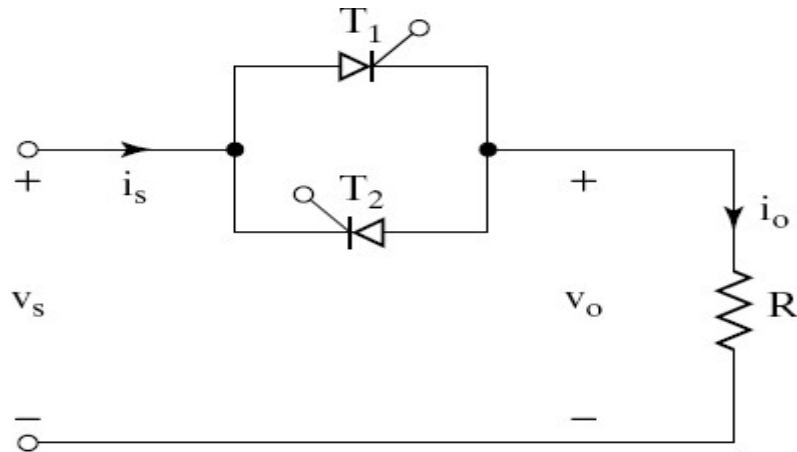


Figure 1. 10: Gradateur monophasé utilisant des thyristors

I.5.2 Principe

Les thyristors $T1$ et $T2$ sont installés en configuration tête-bêche et peuvent être remplacés par un triac unique.

Pendant le demi-cycle positif de la tension d'entrée, le thyristor $T1$ est en polarisation directe. $T1$ est activé avec un angle de retard noté α ($0 \leq \alpha \leq \pi$ radians). En considérant $T1$ comme un commutateur idéal ouvert, la tension de l'alimentation d'entrée se manifeste à travers la résistance de charge R et la tension de sortie $V_0 = V_s$ pendant l'intervalle de $\omega t = \alpha$ à π radians. Le courant de charge circule à travers $T1$ et traverse la résistance de charge R durant la période de conduction de $T1$, soit de $\omega t = \alpha$ à π radians. À $\omega t = \pi$, au moment où la tension d'entrée diminue à zéro, le courant dans le thyristor (qui passe par la résistance de charge R) devient nul, entraînant l'extinction naturelle de $T1$. Aucun courant ne circule alors dans le circuit de $\omega t = \pi$ à $(\pi + \alpha)$. Le thyristor $T2$, quant à lui, est en polarisation directe durant le demi-cycle négatif de l'alimentation d'entrée. Lorsque $T2$ est activé avec un angle de retard $(\pi + \alpha)$, la tension de sortie suit le demi-cycle négatif de l'entrée sur l'intervalle $\omega t = (\pi + \alpha)$ à 2π . Quand $T2$ est activé, le courant de charge circule dans la direction opposée (vers le haut) à travers $T2$ de $\omega t = (\pi + \alpha)$ à 2π radians. Un écart de temps (espacement) de π radians ou 180° est maintenu entre les impulsions de déclenchement des portes de $T1$ et $T2$. À $\omega t = 2\pi$, la tension d'entrée retombe à zéro, ce qui fait également chuter le courant de charge, provoquant l'extinction

naturelle du thyristor T_2 . Plutôt que d'installer deux SCR parallèles, un triac peut être employé pour contrôler la tension alternative en pleine onde.

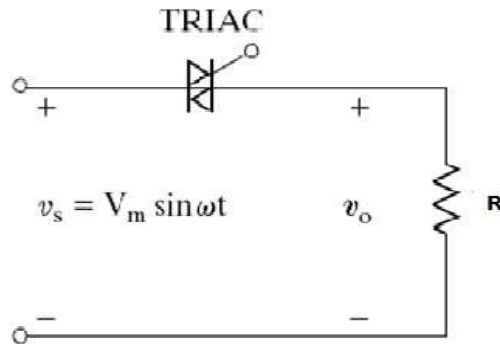


Figure 1. 11: Gradateur monophasé (gradateur bidirectionnel) utilisant TRIAC

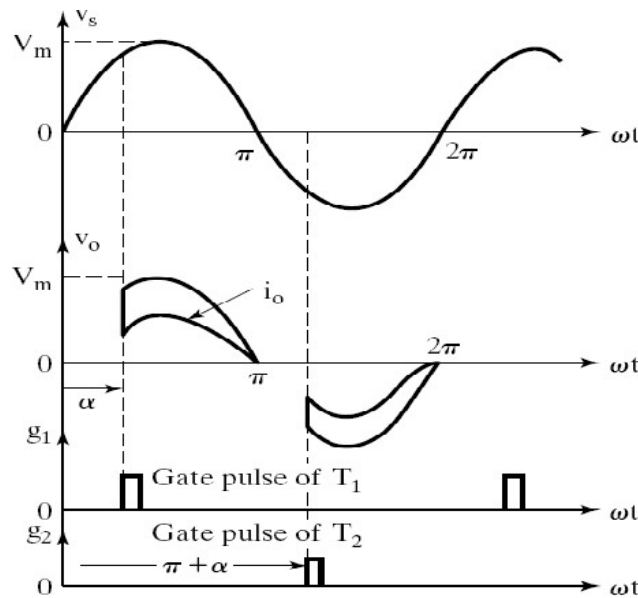


Figure 1. 12: Forme d'onde d'un gradateur monophasé

I.5.3 Partie théorique

La tension efficace de la charge

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \tag{I.1}$$

$$V_{0eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T V_s^2 d\omega t \tag{I.2}$$

$$V_{0eff}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_s^2 d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_s^2 d\omega t \tag{I.3}$$

$$V_{0eff}^2 = \frac{2V_m^2}{2\pi} \left(\int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \right) d\omega t \right) \tag{I.4}$$

$$V_{0eff}^2 = \frac{v_m^2}{2\pi} \left[\omega t - \frac{1}{2} \sin(2\omega t) \right]_{\alpha}^{\pi} \quad (I.5)$$

$$V_{0eff}^2 = \frac{v_m^2}{2\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right) \quad (I.6)$$

$$V_{0eff}^2 = \frac{v_m^2}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2\alpha) \right) \quad (I.7)$$

$$V_{0eff} = \frac{v_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2\alpha) \right)} \quad (I.8)$$

Le courant efficace de la charge

En appliquant loi d'ohm $V=RI$

$$i_a = \frac{v_m}{\sqrt{2}R} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2\alpha) \right)} \quad (I.9)$$

La puissance active dans la charge s'écrit simplement :

$$P=RI^2$$

$$P = \frac{v_m^2}{2R} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2\alpha) \right) \quad (I.10)$$

I.6 Gradateur monophasé avec charge résistive inductive (RL) [4]

I.6.1 Principe

En réalité, la majorité des charges sont inductives dans une certaine mesure. La figure suivante montre un gradateur monophasé à onde entière avec une charge RL :

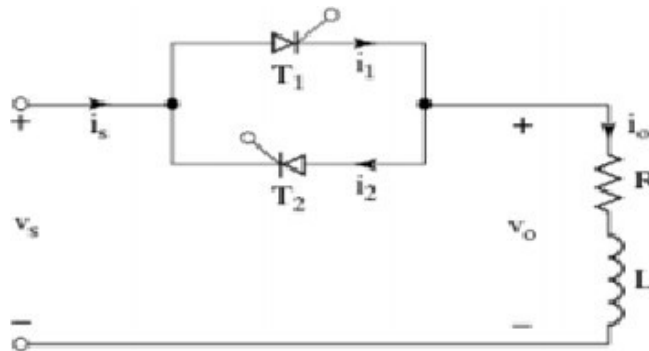


Figure 1. 13: Gradateur monophasé avec charge RL

Imaginons que le thyristor $T1$ soit activé durant la phase positive, et qu'il gère le courant de charge. En raison de l'inductance présente dans le circuit, le courant à travers le thyristor $T1$ ne s'établira pas à zéro lorsque ωt atteint π , moment où la tension d'entrée commence à devenir négative. $T1$ continuera à conduire jusqu'à ce que le courant $i1$ atteigne zéro, ce qui se produira à $\omega t = \beta$. L'angle de conduction

pour le thyristor T1 est noté $\delta = \beta - \alpha$, cet angle étant fonction de l'angle de retard alpha ainsi que de l'angle de facteur de puissance de la charge θ .

Les formes d'onde concernant le courant du thyristor, les impulsions de déclenchement, ainsi que la tension d'entrée sont présentées dans la figure suivante :

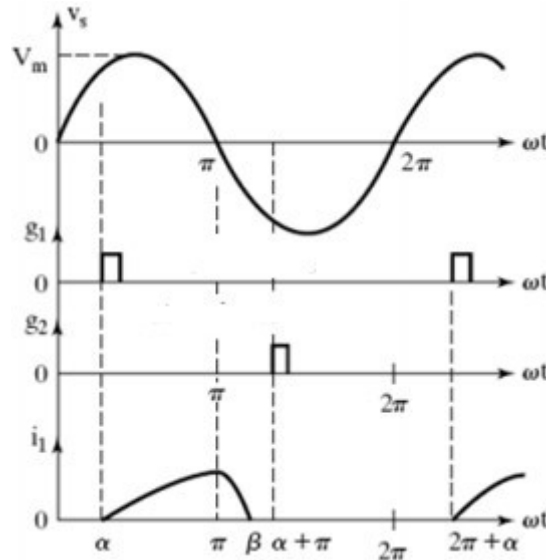


Figure 1. 14: Forme d'onde d'un gradateur monophasé avec charge RL

I.6.2 Partie théorique

Si $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ est la tension d'entrée instantanée et l'angle du thyristor **T1** est α , le courant i_1 de thyristor peut être trouve à partir de :

$$L \frac{di_1}{dt} + R i_1 = \sqrt{2}V_s \sin \omega t \tag{I.11}$$

La solution d'équation (1) est de la forme :

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{2} \sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \tag{I.12}$$

Où l'impédance de charge $z = [R^2 + (\omega L)^2]^{\frac{1}{2}}$ et angle de charge $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ La constante **A1** peut être déterminé à partir de la condition initiale :

À $\omega t = \alpha, i_1 = 0$

De l'équation (5) A_1 est trouvé comme :

$$A_1 = -\frac{\sqrt{2}V_s}{z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}\right)} \quad (\text{I.13})$$

Substitution d' A_1 à partir de l'équation (11) dans l'équation (10) donne :

$$i_1 = -\frac{\sqrt{2}V_s}{z} [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega-t}\right)}] \quad (\text{I.14})$$

L'angle β , lorsque le courant i_1 tombe à zéro et que le thyristor $T1$ est bloqué, peut être trouvé à partir de la condition $I_1 = (\omega t = \beta) = 0$ dans Eq (12) est donné par la relation :

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-\beta}{\omega}\right)} \quad (\text{I.15})$$

L'angle β , également connu sous le nom d'angle d'extinction, peut-être à partir de cette équation transcendante est nécessite itérative de résolution. Une fois l'angle β est connu, l'angle de conduction δ du thyristor $T1$ peut être trouvé :

$$\delta = \beta - \alpha \quad (\text{I.16})$$

La tension efficace de sortie :

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.17})$$

$$V_0 = \left[\frac{4V_s^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.18})$$

$$V_0 = V_s \left[\frac{1}{\pi} (\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.19})$$

Le courant efficace du thyristor peut être trouvé à partir de l'équation (I.14) comme :

$$i_r = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\beta}^{\alpha} i_1^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.20})$$

$$i_r = \frac{V_s}{z} \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \{ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \}^2 e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-t}{\omega}\right)} d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.21})$$

Et le courant efficace du thyristor peut être déterminé en combinant le courant efficace de chaque thyristor comme :

$$i_0 = (i_r^2 + i_r^2)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}i_r \quad (\text{I.22})$$

La valeur moyenne du courant de thyristor peut également être trouvée à partir de l'équation (I.14) comme :

$$i_a = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_1 d(\omega t) \quad (I.23)$$

$$i_r = \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi z} \int_{\alpha}^{\beta} \{ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \} e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega-t}\right)} d(\omega t) \quad (I.24)$$

Les signaux qui provoquent l'activation d'un thyristor peuvent prendre la forme de brèves impulsions, par exemple pour un gradateur avec des charges résistives. Cependant, ces impulsions courtes ne conviennent pas aux charges inductives. Cette situation peut être comprise par rapport à la **Figure I.13**.

Lorsqu'on déclenche le thyristor **T2** à $\omega t = \pi + \alpha$, le thyristor **T1** reste conducteur en raison de l'inductance de la charge. À un moment donné, lorsque **T1** tombe à zéro et s'éteint à $\omega t = \beta = \alpha + \delta$, la porte du thyristor **T2** se trouve déjà interrompue, ce qui signifie que **T2** ne s'allumera pas. [7]

De ce fait, seul le thyristor **T1** sera en fonctionnement, entraînant des formes d'onde de tension et de courant de sortie qui sont asymétriques. Pour remédier à ce problème, il est possible d'utiliser des signaux de porte constants d'une durée de $(\pi - \alpha)$, comme le montre la **Figure I.14** ci-après :

Lorsque le courant **T1** atteint zéro, le thyristor **T2** (comme montré sur la **Figure 1.15**) se met en

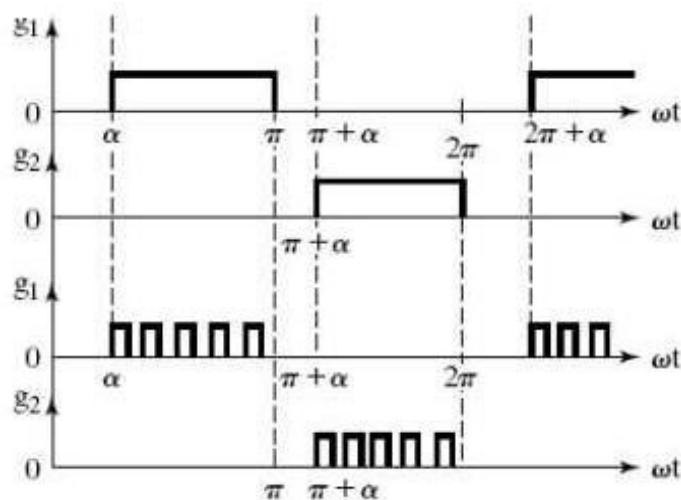


Figure 1. 15: Gradateur plein d'onde avec charge RL

marche grâce à des impulsions de gâchette. Cependant, une impulsion de gâchette continue augmente les pertes lors de la commutation des thyristors et requiert un transformateur d'isolement plus grand pour le circuit de déclenchement. En pratique, on utilise généralement un train d'impulsions courtes, comme illustré sur la **Figure 13**, pour résoudre ces problèmes. L'équation (12) montre que la tension de charge et le courant seront sinusoïdaux si l'angle de retard α est inférieur à l'angle de charge θ . Si α dépasse θ , le courant de charge deviendra discontinu et ne sera pas sinusoïdal. [8]

Remarque :

- Si $\alpha = \theta$, de Eq (13) $\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) = 0$ (I.25)
- et $\beta - \alpha = \delta = \pi$ (I.26)
- si l'angle de conduction, δ ne peut pas dépasser π et que le courant de charge doit passer par zéro, l'angle de retard α ne peut pas être inférieur à θ et l'intervalle de contrôle est : $\theta \leq \alpha \leq \pi$ (I.27)
- Si $\alpha \leq \theta$ et les impulsions de gâchette des thyristors sont de longue durée, le courant de charge ne changerait pas avec α , mais les deux thyristors conduiraient pour π . Le thyristor **T1** s'allume $\omega t = \theta$ et Le thyristor **T2** s'allume à $\omega t = \pi + \theta$

I.7. Simulation des gradateurs

MATLAB/SIMULINK constitue un excellent outil d'analyse des conditions de fonctionnement souhaitées pour divers types de circuits. Il nous offre la possibilité d'observer de façon réaliste des phénomènes électriques et physiques tels que le couple, la vitesse, la tension et le courant.

I.7.1 Gradateur Monophasé charge R

Résultat et les graphes de simulation : Les données : $R=100 \Omega$, $V_{effs} = 90 \text{ V}$

- Pour $\alpha = 0^\circ$ $V_{effch} = 92 \text{ v}$, $I_{effch} = 0.92 \text{ A}$, $I_{effT1} = 0.62 \text{ A}$.
- V_{effch} (La tension efficace de charge) I_{effch} (Le courant de charge efficace)
- I_{effT1} (Le courant efficace du thyristor 1).

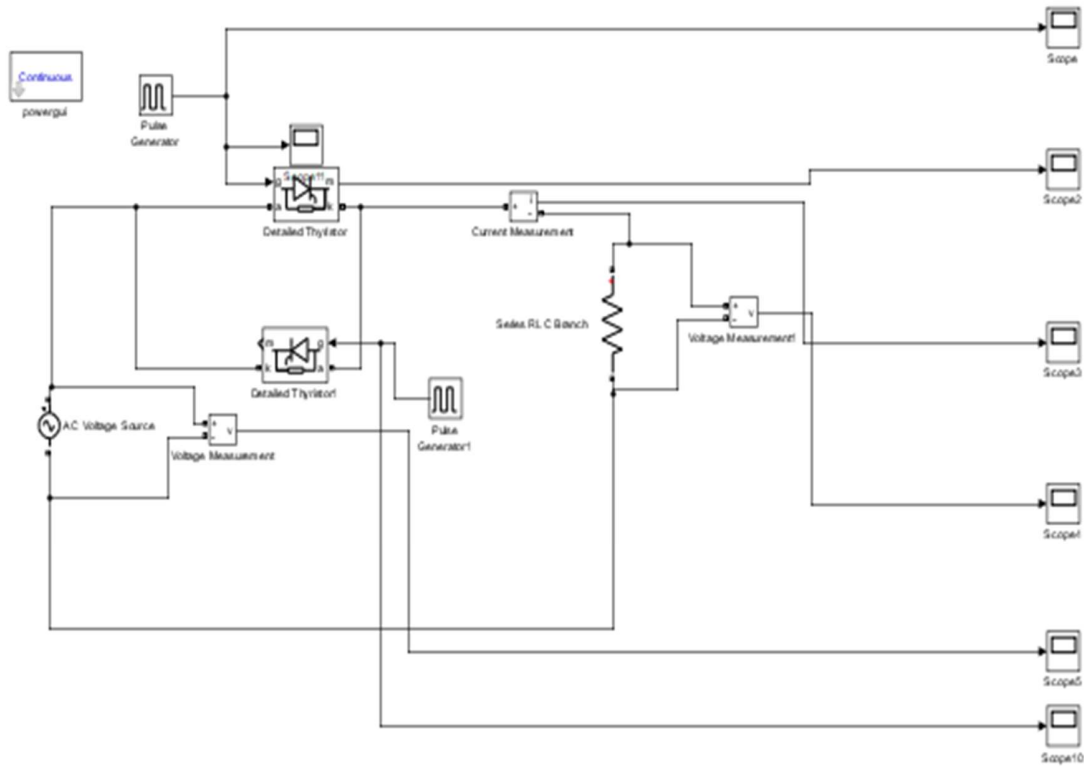


Figure 1. 16: schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge

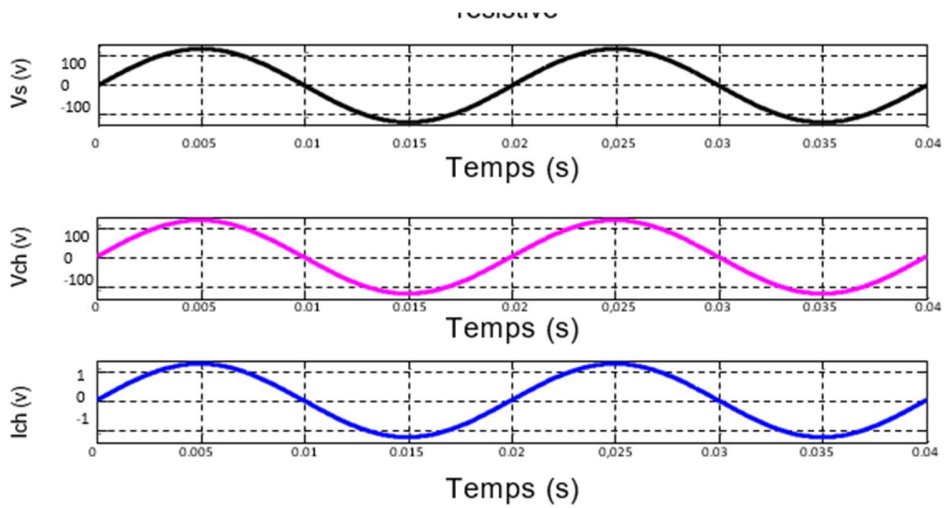


Figure 1. 17: La tension de source, la tension et le courant de charge

Pour $\alpha = 30$

$$V_{effch} = 91 \text{ v}, \quad I_{effch} = 0.91 \text{ A}, \quad I_{effT1} = 0.61 \text{ A}$$

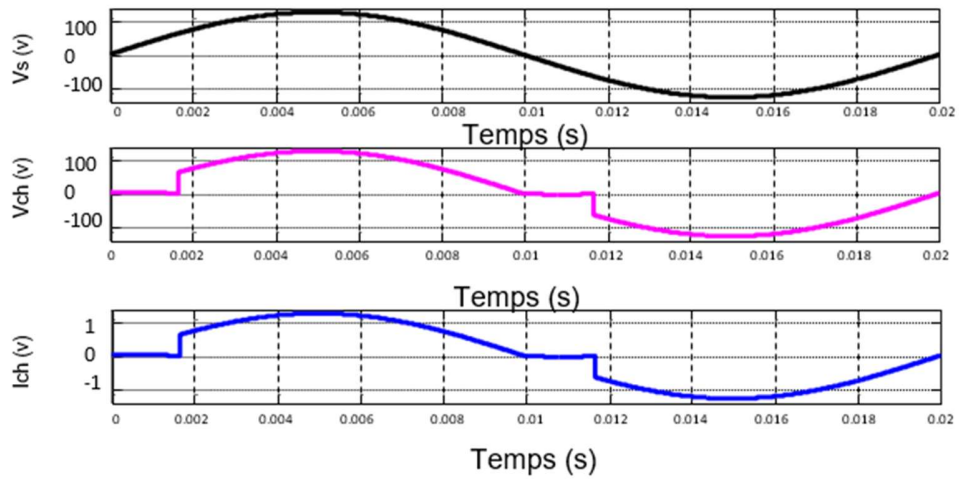


Figure 1. 18: La tension de source, la tension et le courant de charge

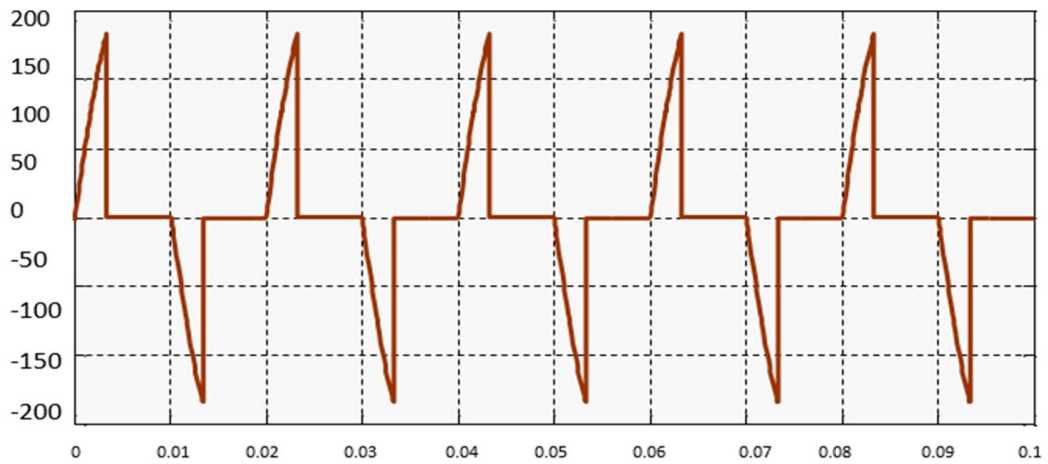


Figure 1. 19: La tension inverse

I.7.2 Gradateur Monophasé avec une charge RL

Pour $\alpha = 30^\circ$

$$V_{effch} = 92.02 \text{ v}, \quad I_{effch} = 0.92 \text{ A}, \quad I_{effT1} = 0.63 \text{ A}$$

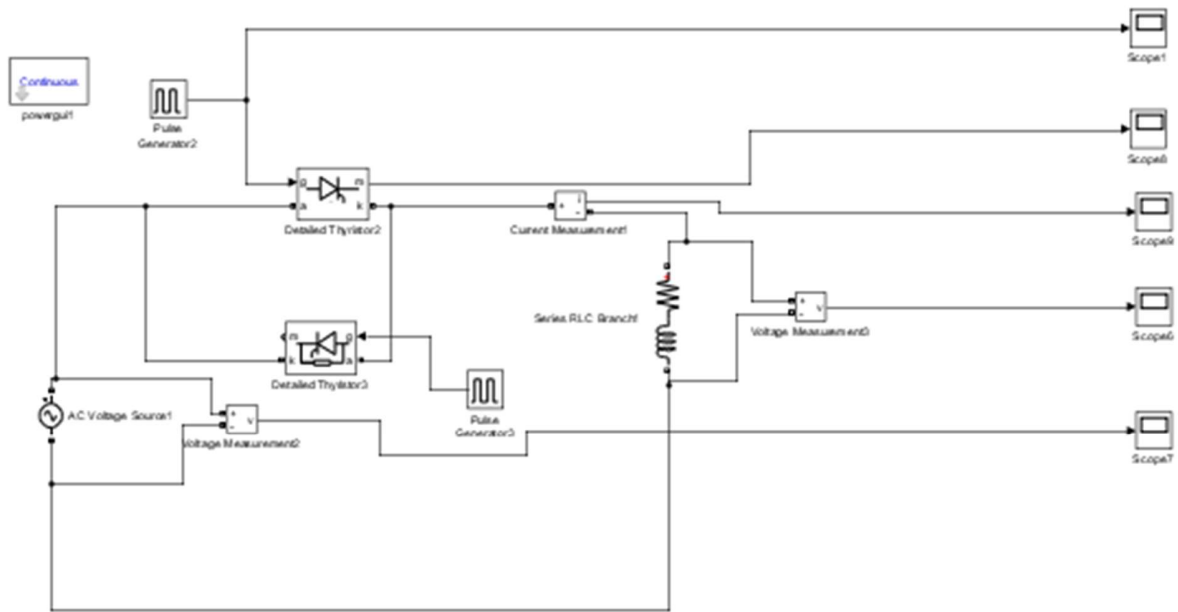


Figure 1. 20: schéma bloc de simulation d'un gradateur monophasé avec une charge résistive inductive.

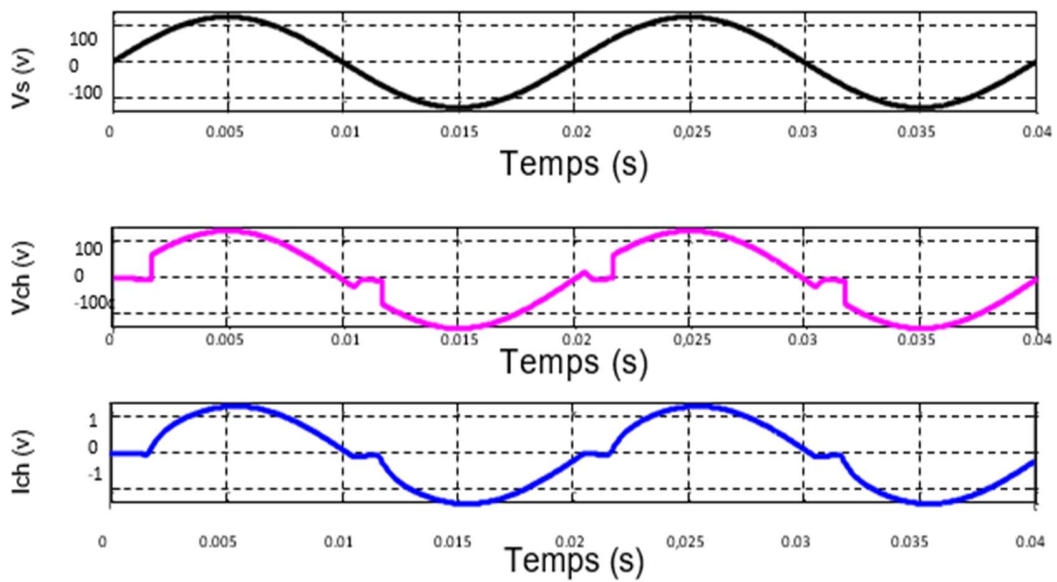


Figure 1. 21: La tension de source, la tension et le courant de charge.

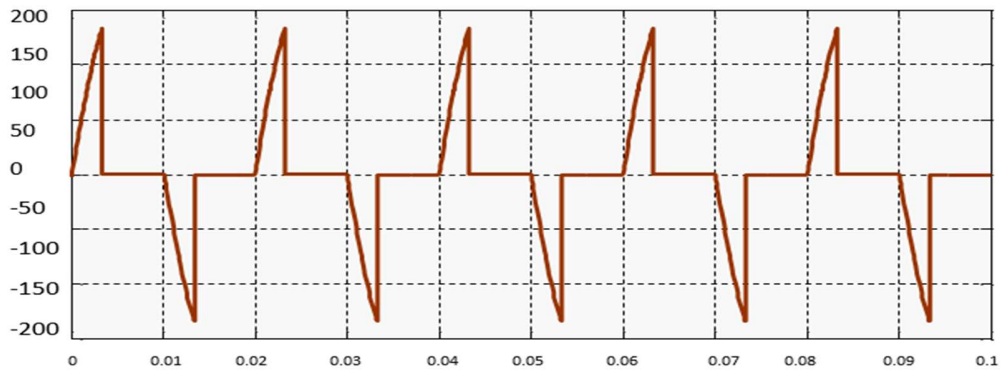


Figure 1. 22: La tension inverse du thyristor

Pour $\alpha = 30^\circ$

$$V_{effch} = 92.02 \text{ v}, \quad I_{effch} = 0.92 \text{ A}, \quad I_{effT1} = 0.63 \text{ A}$$

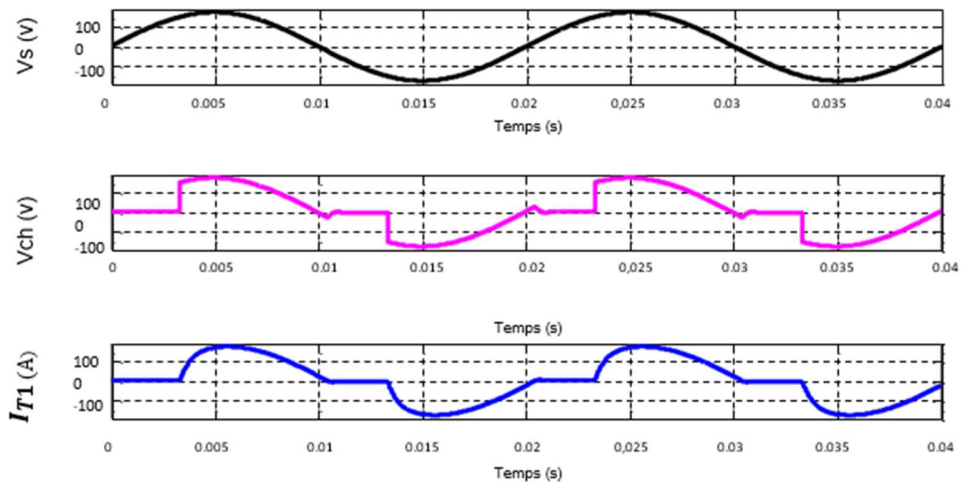


Figure 1. 23: La tension de source, la tension et le courant de charge

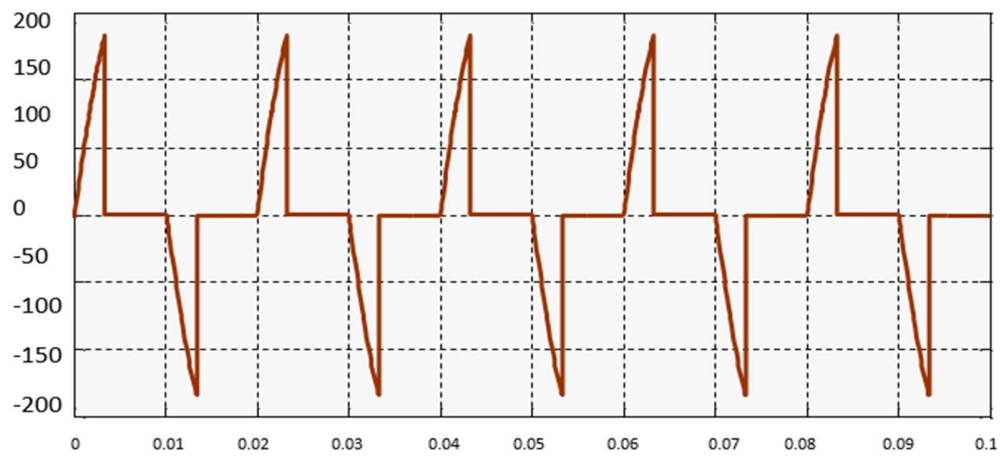


Figure 1. 24: La tension inverse du thyristor

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée sur le circuit gradateur, le composant électronique de base qui est le TRIAC et étudié aussi en détail.

Chapitre II

Moteur universel

II.1. Introduction

Le moteur universel est un type de moteur électrique qui peut fonctionner aussi bien avec du courant continu qu'avec du courant alternatif monophasé. C'est pourquoi ils sont appelés universels.

Ces appareils électromécaniques sont utilisés dans diverses applications, des appareils électroménagers aux outils électriques. Leur polyvalence et leur efficacité en font un choix populaire dans de nombreux secteurs

En général, ce sont des moteurs très simples et économiques qui offrent un excellent couple de démarrage et peuvent atteindre des vitesses de rotation très élevées.

Dans ce chapitre nous présentons, sur la définition, principe de fonctionnement, caractéristique d'utilisation du moteur universel. La figure 1 décrit le variateur de vitesse d'un moteur universel (monophasé). [8]

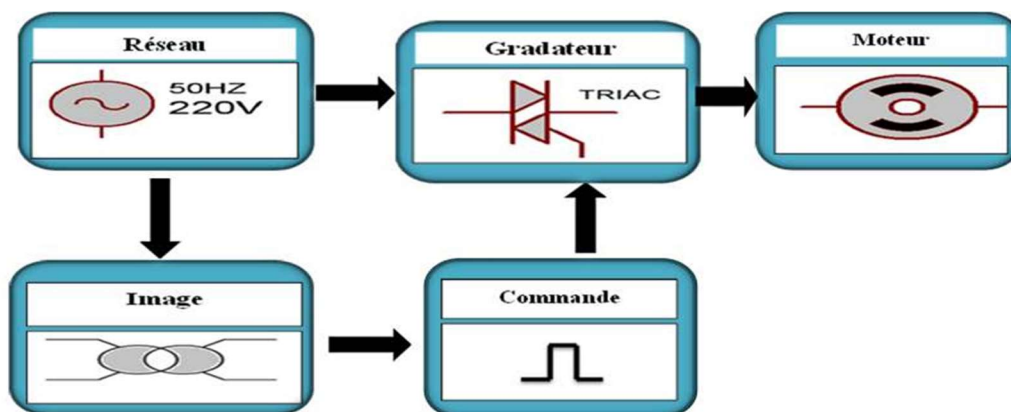


Figure 2.1: schéma commande de moteur

II.2. Moteur universel contrôlé par angle de phase

La commande d'un moteur universel par angle de phase à l'aide d'un triac permet une commande efficace à vitesse variable. Elle est largement répandue. Le courant qui passe à travers le moteur est identique à celui extrait du réseau, il s'agit d'un courant alternatif de valeur crête à crête significative. Il va également engendrer des pertes significatives dans le fer ; Quand la conduction n'est pas en pleine onde, le courant contient de nombreuses harmoniques basses fréquences dont l'intensité peut dépasser les seuils autorisés par les normes [8] .

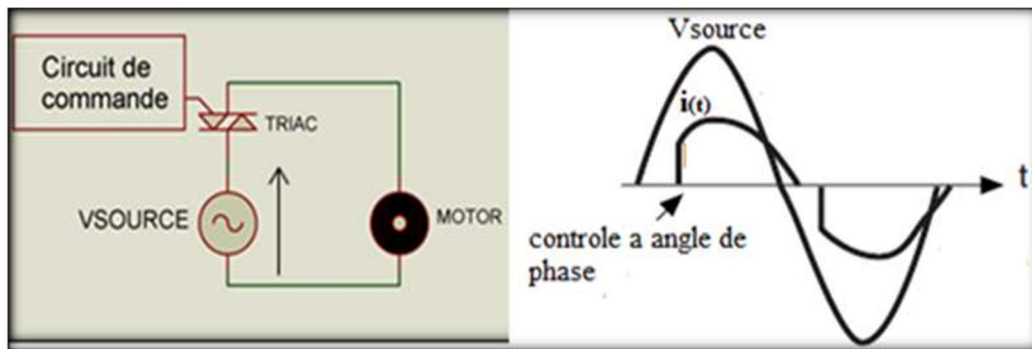


Figure 2.2: Schéma de commande d'un moteur par TRIAC et illustration du contrôle à l'angle de phase

Le fonctionnement du moteur universel est peu influencé par une déformation de la forme d'onde: C'est principalement la valeur efficace de sa tension d'alimentation qui conditionne son fonctionnement (rappelons que le couple est fonction du carré du courant efficace). Il est donc possible de le contrôler de manière économique en utilisant un triac, où seule une partie de chaque alternance de tension est appliquée au moteur. On utilise souvent ce mécanisme dans certains modèles de lave-linge (il permet d'avoir différentes vitesses pour le lavage et l'essorage) [9].

II.3 Que sont les moteurs universels

Un moteur universel est un type de moteur électrique qui peut fonctionner au courant continu (DC) ou au courant alternatif (AC).

Contrairement aux autres moteurs, les moteurs universels sont conçus pour fonctionner avec tout type de courant électrique. Cela les rend adaptés à un large éventail d'applications, des appareils électroménagers aux outils industriels [10].

II.4. Pièces d'un moteur universel [11]

Les moteurs universels se composent de plusieurs éléments clés qui fonctionnent ensemble pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Ces pièces comprennent :

Stator : Le stator (ou inducteur) est la partie fixe du moteur et entoure le rotor. Il contient des aimants permanents ou des enroulements de fil qui génèrent un champ magnétique lorsque l'énergie électrique est appliquée. Ce champ magnétique interagit avec celui du rotor, provoquant sa rotation.

Rotor : Le rotor (ou induit) est la partie tournante du moteur. Composé d'un arbre en acier supportant des tôles magnétiques et des bobines de fil, il tourne sous l'effet de l'interaction entre les champs magnétiques du stator et du rotor.

Balais : Les balais sont des pièces conductrices (généralement en carbone) en contact avec le collecteur. Ils transmettent le courant électrique de l'alimentation vers le rotor via le collecteur, assurant ainsi la rotation.

Armature : L'armature désigne l'ensemble des bobines et noyau magnétique du rotor, où se produit la conversion de l'énergie électrique en force mécanique.

Collecteur (Commutateur) : Monté sur le rotor, ce dispositif inverse périodiquement le sens du courant dans les bobines du rotor pour maintenir une rotation continue et unidirectionnelle.

Connexions électriques : Ces éléments relient les balais, le stator et l'alimentation externe, permettant la circulation du courant nécessaire au fonctionnement du moteur.

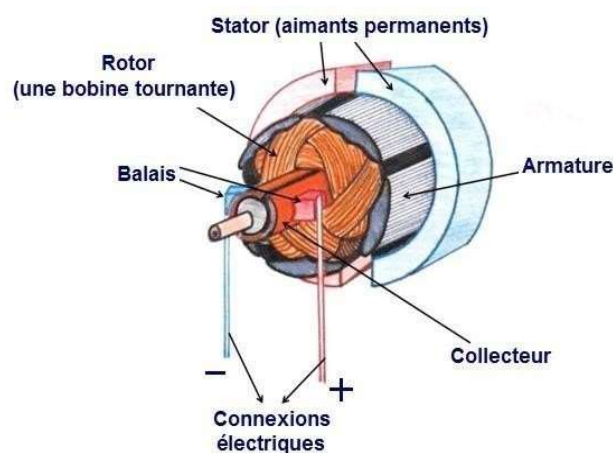


Figure 2. 3 : Le schéma du moteur universel

II.5. Types de moteurs universels [12]

Bien que tous les moteurs universels partagent des caractéristiques fondamentales, il en existe différents types en fonction de leur conception et de leurs applications spécifiques. Certains des types les plus courants comprennent :

• Moteurs universels série

Ces moteurs possèdent une structure en série, le rotor et le stator sont reliés l'un à l'autre en série

Ils conviennent aux applications nécessitant un couple élevé et des vitesses variables, comme c'est le cas avec les outils électriques.

• Moteurs universels shunt

Ces moteurs possèdent le rotor et le stator reliés en parallèle (shunt). Ils conviennent parfaitement aux applications qui exigent des vitesses constantes, comme les ventilateurs de plafond et les mixeurs.

• Moteurs universels composés

Les moteurs composés combinent des éléments du moteur en série et du moteur shunt.

Ils offrent un bon compromis entre vitesse et couple et sont employés dans des dispositifs comme les ventilateurs et les machines de couture.

• Moteurs universels à collecteur électronique

Certains moteurs universels modernes utilisent des commutateurs électroniques plutôt que mécaniques pour inverser le sens du courant. Cela optimise l'efficacité et diminue l'usure des composants mécaniques.

II.6. Fonctionnement en tension alternative

Lorsque le moteur universel est alimenté en courant alternatif, il produit toujours couple unidirectionnel. Parce que l'enroulement d'induit et l'enroulement de champ sont connectés en série, ils sont dans la même phase. Par conséquent, lorsque la polarité de l'AC change périodiquement, le sens du courant dans les enroulements d'induit et de champ s'inverse en même temps.

Ainsi, la direction du champ magnétique et la direction du courant d'induit s'inverse de telle sorte que la direction de la force subie par les conducteurs d'induit reste la même. Ainsi, quelle que soit l'alimentation CA ou CC, le moteur universel fonctionne sur le même principe que le moteur

série DC [13].

II.7. Effets sur la vitesse et le couple

Le contrôle d'un moteur universel en courant alternatif par le biais d'un triac offre la possibilité de réguler simultanément la vitesse et le couple du moteur.

C'est ainsi que cela se passe :

• Relation entre la vitesse et la fréquence du courant alternatif

La fréquence f du courant alternatif fourni est directement proportionnelle à la vitesse de rotation N du moteur :

$$N = kf \cdot f \quad (\text{II.1})$$

Où :

N : la vitesse de rotation du moteur (en tours par minute).

kf : est une constante dépendant des caractéristiques du moteur et de son chargement.

f : est la fréquence du courant alternatif fourni au moteur (en hertz).

• Relation entre la vitesse et la tension du courant alternatif

La vitesse de rotation N du moteur est également influencée par la tension efficace V_{eff} du courant alternatif

$$N = kV \cdot V_{eff} \quad (\text{II.2})$$

N : est la vitesse de rotation du moteur (en tours par minute).

kV : est une constante dépendant des caractéristiques du moteur et de son chargement.

V_{eff} : est la tension efficace du courant alternatif fourni au moteur (en volts).

Ces équations montrent comment la vitesse du moteur universel en courant alternatif peut être influencée par la fréquence et la tension du courant alternatif fourni, ce qui peut être modulé à l'aide d'un triac pour contrôler la vitesse du moteur dans différentes applications.

B) Effet sur le couple

Le couple d'un moteur universel est généralement proportionnel au carré du courant qui le traverse. [Ainsi, en modifiant la quantité de courant alternatif alimentant le moteur grâce au triac, on peut aussi contrôler son couple de sortie. Plus le courant alternatif fourni est élevé, plus le couple généré par le moteur sera grand, et vice versa. Cela signifie que le moteur universel peut fournir un couple élevé à basse vitesse lorsque le courant alternatif fourni est élevé, et un couple réduit à haute vitesse lorsque le courant alternatif fourni est réduit [14].

Voici quelques équations pertinentes :

•Loi du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique T_{em} généré par le moteur universel dépend du flux magnétique Φ à travers le bobinage et du courant I traversant le bobinage :

$$T_{em} = k_{em} \cdot \Phi \cdot I \quad (II.3)$$

Où :

T_{em} : est le couple électromagnétique (en newton-mètre).

k_{em} : est une constante de proportionnalité.

Φ : est le flux magnétique à travers le bobinage (en Weber).

I : est le courant traversant le bobinage (en ampères).

•Relation entre le couple et la vitesse :

Le couple mécanique C_m développé par le moteur est également lié à la vitesse de rotation N du moteur :

$$C_m = k_m \cdot N \quad (II.5)$$

Où :

C_m : est le couple mécanique développé par le moteur (en newton-mètre).

k_m : est une constante de proportionnalité

Ces équations démontrent de quelle manière le couple d'un moteur universel alimenté en courant alternatif peut être affecté par :

- le champ magnétique qui traverse l'enroulement,
- le courant qui parcourt l'enroulement
- la vitesse de rotation du moteur.

En ajustant le courant alternatif alimentant le moteur grâce à un triac, il est possible de gérer efficacement le couple du moteur dans diverses conditions d'exploitation. Pour faire simple, grâce à la gestion de la quantité de courant alternatif accessible au moteur universel par le biais d'un triac, on peut moduler tant sa vitesse de rotation que son couple de sortie, apportant ainsi une large souplesse dans la régulation des performances du moteur pour diverses applications.

II.8 Fonctionnement en courant continu

Voici comment fonctionne un moteur universel avec un courant continu :

• Bobine de champ et rotor

Tout moteur électrique, y compris un moteur universel, se compose d'une bobine de champ fixe (stator) et d'un rotor. Le stator comprend des enroulements fixes qui génèrent un champ magnétique, alors que le rotor représente la composante mobile.

• Collecteur et balais

Un collecteur et des balais sont généralement présents sur le rotor d'un moteur universel. Le collecteur se compose de segments conducteurs qui sont indépendants les uns des autres, alors que les balais constituent des contacts qui créent une liaison électrique avec le collecteur par friction.

- **Interaction champ magnétique et courant électrique**

Quand un courant électrique est appliqué aux enroulements du stator, cela génère un champ magnétique. Ce champ magnétique interagit avec le flux de courant dans les bobines du rotor, produisant ainsi un couple électromagnétique qui entraîne la rotation du rotor.

- **Contrôle de vitesse**

On peut réguler la rapidité de rotation du moteur universel en modifiant la tension ou l'intensité du courant alimentant le moteur, ce qui influence l'intensité du champ magnétique dans le stator et par conséquent, la vitesse de rotation du rotor.

- **Fonctionnement du thyristor**

Dans un moteur universel, le thyristor joue un rôle crucial en tant que dispositif de contrôle électronique de la puissance. Alimenté par une source de courant continu, le moteur reçoit une tension de fonctionnement. Le thyristor agit comme un interrupteur électronique, modulant le moment où la puissance est fournie au moteur. En ajustant le moment d'activation du thyristor, la quantité de puissance électrique atteignant le moteur peut être variée, ce qui permet de réguler à la fois la vitesse de rotation et le couple du moteur. Une activation précoce du thyristor augmente la puissance et accélère le moteur, tandis qu'une activation plus tardive diminue la puissance et ralentit le moteur.

Ce contrôle précis de la puissance offre plusieurs avantages, notamment une régulation précise de la vitesse et du couple du moteur, une réponse rapide aux changements de charge et une meilleure efficacité énergétique. En résumé, le thyristor permet un contrôle électronique efficace de la puissance dans un moteur universel, offrant ainsi une solution flexible et performante pour une variété d'applications [15].

II.9 Effet sur le couple et vitesse [9]

A) Effet sur le couple

Dans un moteur universel à courant continu, l'effet sur le couple peut être décrit par l'équation du couple électromagnétique C en fonction du courant électrique I traversant le moteur et de la constante de couple C_t . Cette équation est :

$$C_{em} = C_t * I \quad (II.6)$$

Dans cette équation :

I : est le courant électrique qui circule à travers les enroulements du moteur, en ampères (A).

C_t : est la constante de couple du moteur, exprimée en Newton-mètre par ampère (Nm/A).

C_{em} : représente le couple électromagnétique généré par le moteur, mesuré en Newton-mètre (Nm).

Cette équation montre que le couple du moteur est directement proportionnel au courant électrique qui le traverse. Par conséquent, en augmentant le courant électrique à l'aide du thyristor, on peut augmenter le couple du moteur, et inversement.

B) Effet sur la vitesse

Dans un moteur universel à courant continu, la vitesse de rotation est directement proportionnelle à la tension appliquée et inversement proportionnelle à la charge mécanique. Plus précisément, la relation entre la vitesse de rotation (ω), la tension (V), le couple (C), et la constante de couple (K_t) est donnée par l'équation suivante :

$$\omega = \frac{V}{C_t} - \frac{C}{C_t * R_a} \quad (\text{II.7})$$

Dans cette équation :

Ω : représente la vitesse de rotation du moteur, en radians par seconde (rad/s).

V : est la tension appliquée au moteur, en volts (V).

C : est le couple électromagnétique généré par le moteur, mesuré en Newton-mètre (Nm).

C_t : est la constante de couple du moteur, exprimée en Newton-mètre par ampère (Nm/A).

R_a : est la résistance électrique totale du moteur, mesurée en ohms (Ω).

Cette équation montre que la vitesse de rotation du moteur dépend de la tension appliquée et du couple électromagnétique généré. L'effet du courant sur la vitesse est indirect, car le courant électrique affecte à la fois le couple et la chute de tension interne du moteur ($I \cdot R_a$), qui influence la vitesse

II.10. Modélisation de moteur à courant continu à excitation série [4]

Dans un moteur à excitation série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit. Ce type des moteurs à un couple élevé diminue avec la vitesse on les trouve dans les engins de levage et la traction électrique

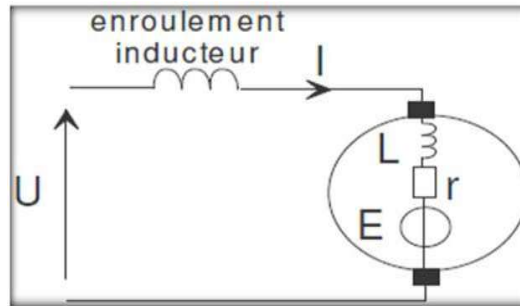


Figure 2. 4: Modèle électrique du moteur à excitation série.

II.11. Équation électrique :

En appliquant la loi de Kirchhoff :

$$R_t = R + r \quad (\text{II.8})$$

$$U = E + R_t * I \quad (\text{II.9})$$

$$E = K * \Phi * \Omega \quad (\text{II.10})$$

- **E** représente la force contre électromotrice du moteur,
- **Φ** le flux du champ magnétique créé au stator,
- **I** le courant
- **K** une constante propre au moteur.

II.11.1 Équation de Vitesse de rotation (Ω)

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la vitesse de rotation (Ω) et de l'intensité du courant (I). Donc la vitesse de rotation (Ω) est proportionnelle à la tension (U) et au courant (I) d'alimentation du moteur [16].

$$\Phi = K' * I \quad (\text{II.11})$$

$$E = K * K' * I * \Omega = U - R_t * I \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Avec : } K'' = K * K'$$

$$E = K'' * I * \Omega = U - R_t * I \quad (\text{II.13})$$

$$\Omega = \frac{U - R_t * I}{K'' * I} = \frac{U}{K'' * I} - \frac{R_t}{K''} \quad (\text{II.14})$$

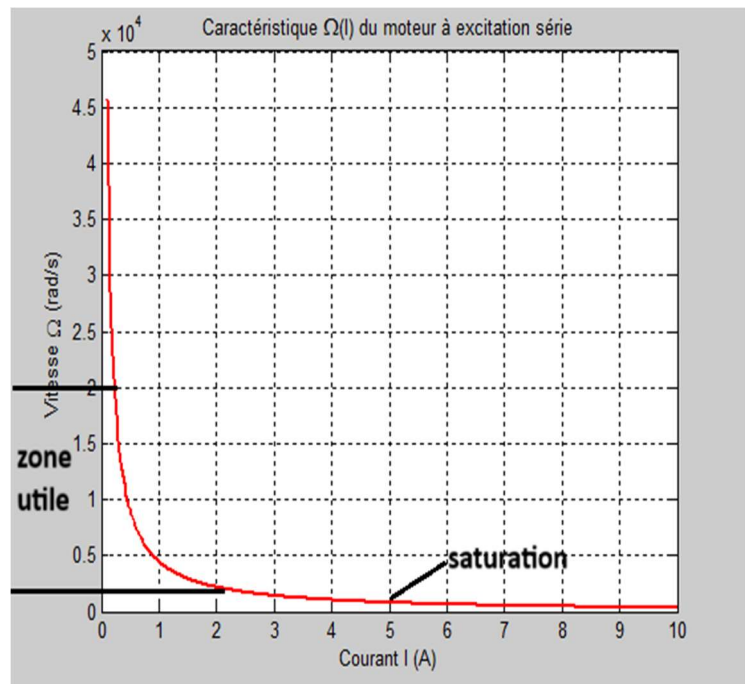


Figure 2. 5: Caractéristique de vitesse d'un moteur série (le moteur s'emballé à vide)

II.11.2 Équation de couple $C_U(I)$

Si (Ω) est proportionnelle à (U) et à (I) cela signifie que le couple (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I^2) :

$$U = K \cdot K' \cdot I \cdot \Omega - R_T \cdot I \tag{II.15}$$

$$I = \frac{U}{K''\Omega + R_T}$$

$$C_U = K'' \cdot I^2 - C_P = \frac{K''U^2}{(K''\Omega + R_T)^2} - C_P \tag{II.16}$$

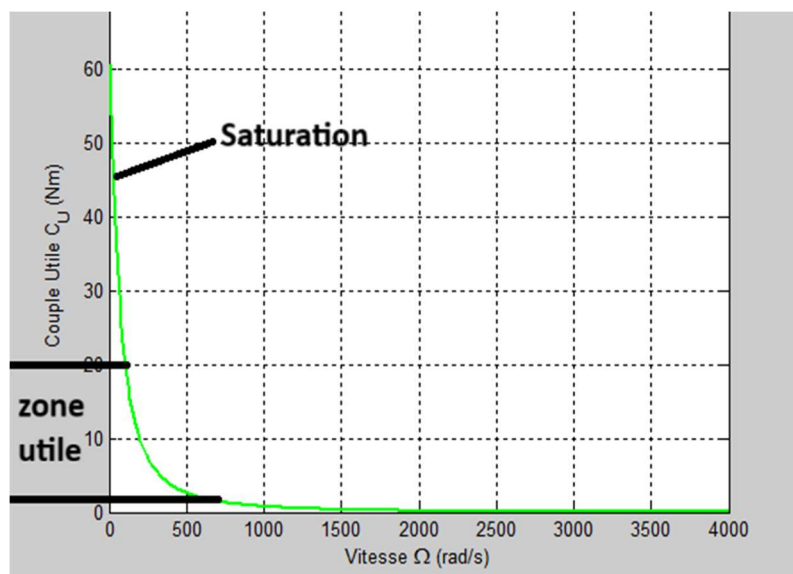


Figure 2. 6: Caractéristique de couple-vitesse d'un moteur série (le moment du couple est maximal au démarrage)

II.12 Représentation schématique:

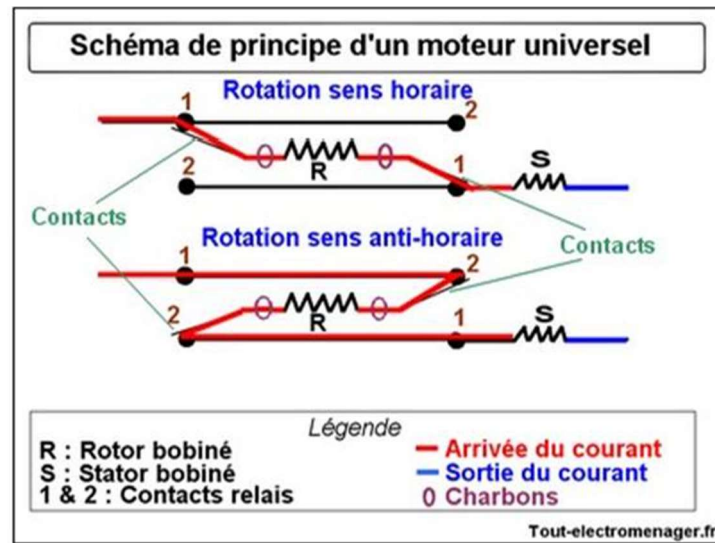


Figure 2. 7: schéma de principe d'un moteur universel

Voici la représentation schématique d'un moteur universel en action. Initialement, les contacts sont placés sur « 1 », le rotor est alimenté de gauche à droite et l'arbre du moteur tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

Dans un second temps, et après une courte pause entre "1" et "2", les contacts s'inversent simultanément. La rotation du moteur est inversée lorsque le rotor est alimenté de droite à gauche, entraînant un mouvement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Les inverseurs de contact sont de petits interrupteurs qui sont actionnés par une bobine magnétique. On désigne généralement cet ensemble inverseur par le terme relais [17].

•Avantages

Coûts de fabrication très faibles.

Grande facilité de variation de vitesse.

•Inconvénients

Mauvais rendement (de 20 % à 40 %).

Usure des balais alimentant le rotor, comme dans toute machine à courant continu.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, dans un premier temps, une description de la constitution du moteur universel ainsi que son utilisation. Ensuite, nous avons présenté les équations régissant le fonctionnement de ce moteur. Afin de compléter notre étude nous allons présenter dans le chapitre suivant le microcontrôleur 16F877 qui est le cœur du circuit de comman

Chapitre III

Microcontrôleur

PIC 16F877

III) Introduction:

Le microcontrôleur est un objet technique, intégrant de l'électronique, fait souvent apparaître des fonctions ayant pour rôle le traitement d'information : opérations arithmétiques (Addition, multiplication...) ou logiques (ET, OU...) entre plusieurs signaux d'entrée permettant de générer des signaux de sortie.

Ces fonctions peuvent être réalisées par des circuits analogiques ou logiques. Mais, lorsque l'objet technique devient complexe, et qu'il est alors nécessaire de réaliser un ensemble important de traitements d'informations, il devient plus simple de faire appel à une structure à base de microcontrôleur

Dans ce chapitre est présente les caractéristiques du microcontrôleur PIC 16f877 de la société Américaine Micro chip Technologie a mis au point dans les années 90

III.1 Généralités sur les PICs :

Un microcontrôleur est un circuit intégré qui rassemble tous les composants d'un petit ordinateur. C'est un des éléments les plus couramment utilisés dans différents secteurs, il est principalement présent dans les systèmes intégrés. On pourra donc le trouver dans divers objets tels que les télécommandes, les appareils électroménagers et les moteurs de voitures, et les autres applications [18].

III.1.1 Définition :

Un PIC (Programmable Interface Contrôler) est un microcontrôleur, d'autre terme, c'est une unité de traitement d'informations de type microprocesseur à laquelle on a ajouté des périphériques internes, permettant de réaliser des montages sans nécessiter l'ajout de composants externes. Ainsi que, le PIC sont des composants dits **RISC** (Reduced Instructions Set Computer), ou encore (composant à jeu d'instructions réduit)

Les PIC existent dans plusieurs versions :

- Les UVPROM qui sont effaçable par une source de rayonnements ultraviolets
- Les OTPROM programmable une seule fois
- Les EEPROM et flash EPROM qui sont effaçables électriquement [21]..

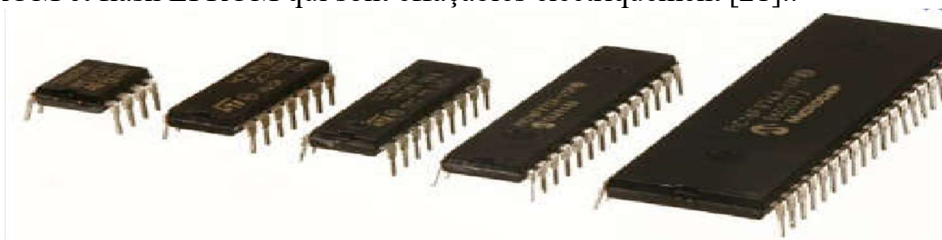


Figure 1: Image du Microcontrôleur

III.1.2 Les Familles de Microcontrôleurs :

Nous distinguons plusieurs familles de microcontrôleurs, les plus connues sont :

- Atmel: AT; familles AT89Sxxxx, AT90xxxx.
- Motorola: famille 68HCxxx.

- Microship: PIC; familles 12Cxxx, 16Cxxx, 16Fxxx, 18Fxxx.
- Intel : famille 80C186XX.

Nous allons nous intéresser dans le cadre de notre étude à la famille Microchip PIC (Programmable Integrated Circuit) de moyenne gamme (MIDRANGE) [19].

III.1.3 Les différentes familles des PIC :

Il y en a trois grandes familles de PIC :

-La famille **Base Line**, qui utilise des mots d'instructions de 12 bits.

-La famille **Mid-Range**, qui utilise des mots de 14 bits.

-La famille **High-End**, qui utilise des mots de 16 bits.

Toutes les PIC Mid-Range ont un jeu de 35 instructions, stockent chaque instruction dans un seul mot de programme, et exécutent chaque instruction (sauf les sauts) en un cycle. On atteint donc des très grandes vitesses, et les instructions sont de plus très rapidement assimilées [20].

III.1.4 Identification du PIC :

Généralement le PIC identifié par une référence, on découvre sur le boîtier un suffixe de la forme : **xx(L)XXyy-zz** tel que

xx : famille du composant, actuellement « 12, 14, 16, 17 et 18 ».

L : tolérance plus importante de la plage de tension

XX : type de mémoire programme

C : EPROM ou EEPROM

CR : PROM

F : Flash

Yy : Identificateur.

Zz : vitesse maximale du quartz de guidage [21] .

Exemple : 16 F 877

16 : indique la catégorie du PIC, c'est un Mid-range.

F : Type de mémoire (FLASH)

877: Identité

III.1.5 Choix d'un microcontrôleur 16F877:

Il existe plusieurs microcontrôleurs fabriqués par : INTEL, MOTOROLA, HITACHI, NECTEXAS etc.

Le choix est utiliser le microcontrôleur 16f877 dépend de plusieurs critères

- Les nombreux périphériques d'E/S
- Une mémoire programme de type EEPROM flash de 8K mots de 14 bits
- Une RAM donnée de 368 octets
- Une mémoire EEPROM de 256 octets

- Trois ports d'entrée sortie, A (6 bits), B (8 bits), C (8 bits)
- Convertisseur Analogiques numériques 10 bits à 5 canaux
- USART, Port série universel, mode asynchrone (RS232) et mode synchrone
- SSP, Port série synchrone
- Trois TIMERS avec leurs Prescalers, TMR0, TMR1, TMR2
- Deux modules de comparaison et Capture CCP1 et CCP2
- Un chien de garde
- 13 sources d'interruption
- Générateur d'horloge, à quartz (jusqu' à 20 MHz) ou à Oscillateur RC
- Fonctionnement en mode sleep pour réduction de la consommation
- Programmation par mode ICSP (In Circuit Serial Programming) 12V ou 5V
- Possibilité aux applications utilisateur d'accéder à la mémoire programme
- Tension de fonctionnement de 2 à 5V
- Jeux de 35 instructions [22].

III.2 Etude microcontrôleur PIC16F877 :

Dans ce projet nous allons utiliser le PIC16F877, est un circuit intègre contenu dans un boîtier nommer « DIL 40 », il présente 40 broches, 20 de chaque côté. Les broches sont virtuellement numérotées de 1 à 40. La 1ere broche est placé dans le coin situé à gauche de l'encoche de repérage

Caractéristiques générales :

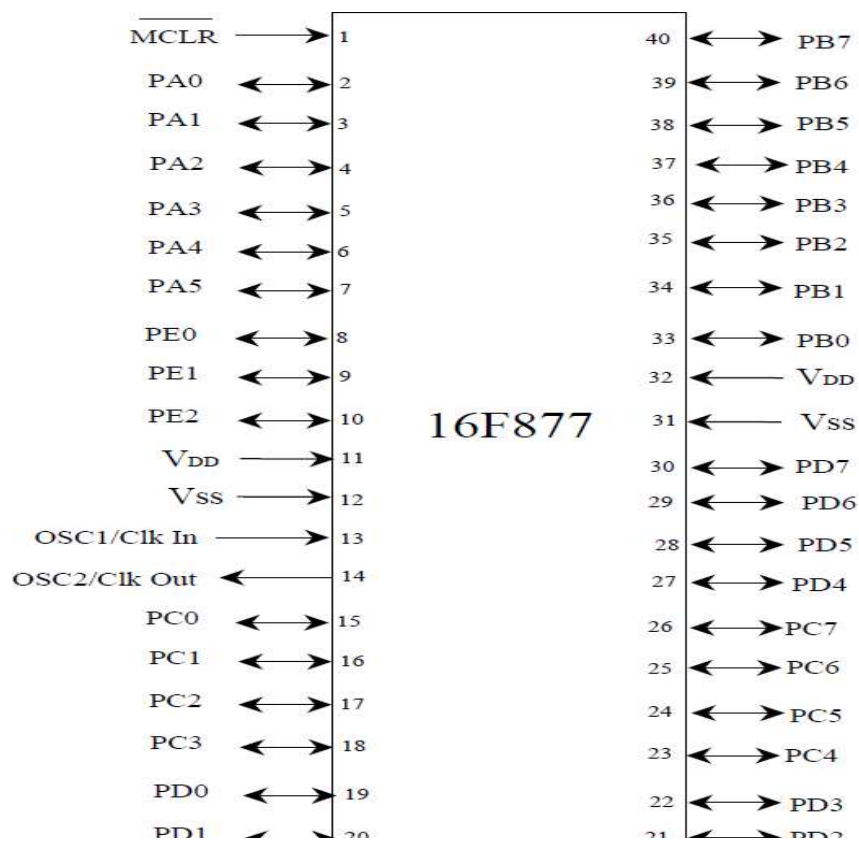


Figure 3. 1 : Brochage du PIC 16F877

III.2.1 Les PINS de 16F877 :

III.2.1.1 MCLR :

Cette broche sert à initialiser le microcontrôleur. Un front montant sur MCLR déclenche l'initialisation du microcontrôleur.

- **EXTERNAL RESET** (Mise à l'état bas de MCLR). Remise à zéro extérieure. Il faut appliquer un niveau bas sur l'entrée RESET pendant au moins $2\mu\text{S}$ pour que l'initialisation soit prise en compte.

- **WDT**: Chien de garde (Watch dog timer).

Si le WDT arrive à la fin du temps de garde sans avoir été rafraîchi il y aura alors une initialisation du microcontrôleur.

- **BOR**: Baisse de l'alimentation.

Si la tension **VDD** chute en dessous de **4V** pendant **100 μS** au moins, le microcontrôleur peut générer un **RESET**.

III.2.1.2 Oscillateur OSC1 et OSC2 ou CLKIN et CLOUT :

L'horloge système peut être réalisée soit avec un quartz, soit avec une horloge extérieure, soit avec un circuit RC. Dans ce dernier cas, la stabilité du montage est limitée.

Le PIC 16F877 peut sous les mêmes modes classiques que les 16F84 ou 16F628, c'est-à-dire :

- **Mode LP** : Avec des quartz de fréquence basse (200 KHz max).
- **Mode XT**: Avec des quartz de fréquence max 4 MHz.
- **Mode RC**: Avec un condensateur et une résistance extérieure
- **HS**: Avec des quartz de fréquence max 20 MHz [23].

III.2.1.3 Alimentation VDD et VSS :

Ce sont les broches d'alimentation du circuit. Les tensions qui peuvent être appliquées vont :

- De **4,5V à 6V** pour la gamme standard **F**.
- De **2 à 6V** pour la gamme étendue **LF**. L'intensité du courant consommé peut aller de **1 μA à 10mA**.

La consommation du microcontrôleur sera fonction de :

- La tension d'alimentation.
- La fréquence interne.
- Le mode de fonctionnement.

III.3 Architecture interne d'un microcontrôleur 16f877 est

Comme pour tous les circuits intègre, chacun de ses broches à une ou plusieurs fonctions qui sont résumées par un sigle mnémotechnique. Ce microcontrôleur présente une architecture Harward, les données sont placées dans une mémoire de type RAM de 368 bytes. La mémoire de programme est constituée de mot de 14 bytes, est type FLASH (non volatile). Ces ressources sont donc précieuses, en comparaison de celles d'autres composants. Le 16F877 possède encore 5 ports (A à E) et 3 temporisateurs (timers), ce diagramme bloc présente les composantes du 16F877 :

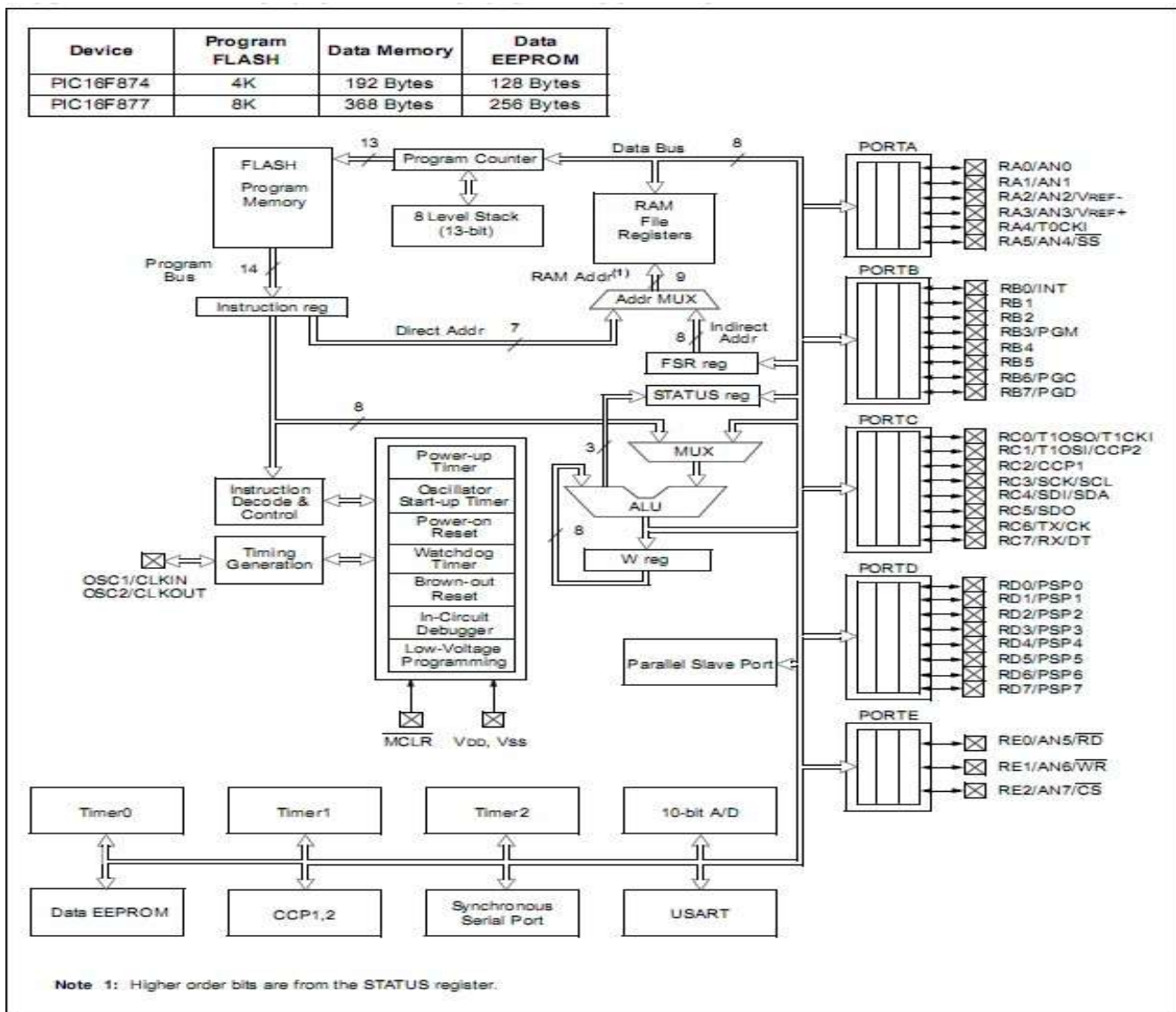


Figure 3. 2: Architecture interne d'un microcontrôleur 16f877

III.3.1.1 Un microprocesseur(CPU)

Qui va prendre en charge la partie traitement des informations et envoyer des ordres. Il est lui-même composé d'une unité arithmétique et logique(UAL) et d'un bus de données. C'est donc lui qui va exécuter le programme embarqué dans le microcontrôleur [24] .

III.3.1.2 Unité Arithmétique et Logique

(UAL) ou ALU en anglais. UAL est chargée effectuer toutes les opérations arithmétiques de base (addition, soustraction, etc.) ainsi que les opérations logiques de base (ET, OU logique, etc.) dans un format de données 8 bits, ces opérations sont effectuées entre le registre de travail W et une opérande provenant d'un registre de la RAM.

III.3.1.3 BUS d'Adresse

Permet d'activer le circuit pour lequel les données sont envoyées ou lues.

III.3.1.4 BUS de Données

Contient l'information binaire devant être traité par l'ALU ou le circuit adressé

III.3.2 Les particularités des ports

Les 5 ports sont d'entrées sorties (input/output), ils sont bidirectionnels :

- Le port A (6 bits) I/O pure et/ou convertisseur analogique et/ou TIMER 0.
- Le port B (8 bits) I/O pure et/ou programmation in situ ICSP/ICD, RB0 est entrée d'interruption externe.
- Le port C (8 bits) I/O pure et/ou SPI/I2C et/ou USART.
- Le port D (8 bits) I/O pure et/ou port parallèle 8 bits associé au port E.
- Le port E (3 bits) I/O pure et/ou pilotage du port E RE0/R, RE1/WR et RE/CS.

III.3.3 Les mémoires du PIC 16F877 [25]

Les mémoires sont de trois types différents :

III.3.3.1 La mémoire FLASH :

C'est une mémoire programme de taille 8K octets. Chaque case mémoire unitaire est de taille 13 bits. Cette mémoire est de type mémoires stable, c'est-à-dire qu'on peut réécrire dessus à volonté, car le 16F877 est caractérisé par la possibilité d'écrire des données.

La zone mémoire est caractérisée par une adresse de 13 bits, alors ceci nous impose donc pour l'adressage les registres **EEAR** et **EEADRH**. De même, nous aurons pour les données, les registres **EEDATA** et **EEDATH**.

III.3.3.2 La mémoire RAM :

Cette mémoire de taille 368 octets est une mémoire d'accès rapide et elle est volatile (les données seront perdues lorsqu'elle n'est plus sous tensions). Elle contient tous les registres de configuration du PIC ainsi que les différents registres de données. Elle contient également les variables utilisées par le programme. La RAM est la mémoire la plus utilisée. Toutes les données qui y sont stockées sont perdues lors d'une coupure de courant.

La RAM est subdivisée de plus en deux parties dans chacune on trouve des « cases mémoire spéciales » appelée REGISTRES SPECIAUX et des cases mémoire « libre » dont on peut se servir provoque un fonctionnement spécial du PIC ou la mise en service d'une fonction particulière.

III.3.3.3 L'EPROM Interne :

Le pic 16F877 contient également la mémoire électriquement effaçable, réécrivable et stable. Ce type de mémoire est d'accès plus lent. Pour gérer cette EEPROM on a besoin de quatre registres, à savoir EEDR, EEDATA, EECON1 et EECON2. Le registre EEADR est utilisé pour placer l'adresse relative en EEPROM, tandis que le EEDATA contient la donnée à lire ou à écrire. L'adresse relative de l'accès EEPROM est donc comprise entre 0000 et 00FF ce qui nous permet d'utiliser un registre de huit bit pour définir cette adresse.

III.3.4 Les TIMERS :

Le microcontrôleur PIC16F877 comporte trois Timers, chacun deux peut générer une interruption.

III.3.4.1 TIMER 0 :

Dans le passé, le Timer 0 s'appelait RTCC. C'est un compteur 8 bits (0 à 255) simple, qui compte des impulsions soit internes, soit d'une source externe. On peut par ailleurs lui appliquer une pré division programmable entre 1 et 256.

On peut librement lire ou écrire dans le registre de comptage associé. On peut donc le pré charger Avec une valeur, à partir de laquelle il comptera jusqu'à atteindre 255.

III.3.4.2 TIMER 1 :

Le Timer1 fonctionne sur le même principe que le Timer0, mais avec un registre de comptage plus gros : 16 bits au lieu de 8, ce qui étend notablement ces capacités de comptage. De plus, il possède un mode de fonctionnement particulier : on peut l'utiliser en association avec un des modules CCP (modules de capture et de comparaison, voir plus loin). Voyons rapidement le mode « capture » : lorsqu'un événement survient sur l'entrée du module CCP, la valeur du Timer1 est lue.

A) Le mode Timer :

Dans ce mode, TMR1 est incrémenté par l'horloge système $F_{osc}/4$ éventuellement pré-divisée. Le bit de synchronisation n'a pas d'effet car l'horloge $F_{osc}/4$ est toujours synchronisée sur l'horloge système.

B) Le mode Compteur :

Dans ce mode, TMR1 est incrémenté à chaque front montant de l'horloge externe T1CKI (RC0) ou l'horloge dédiée générée par l'oscillateur T1OSC à condition de positionner le bit T1OSCE à 1 et de brancher un quartz entre les broches RC0 et RC1.

En mode compteur, RC0 et RC1 sont automatiquement configurées en entrée, on n'a pas besoin de configurer les bits TRISC, 0 et TRISC, 1.

III.3.4.3 TIMER 2 :

Le Timer2 a un fonctionnement différent des Timer0 et Timer1. C'est un compteur 8 bits avec pré-diviseur et post-diviseur. On s'en sert pour générer des signaux carrés, ou, en association

avec le module CCP, des signaux PWM.

PWM étant l'acronyme de « Pulse Width Modulation » ou, en français, Modulation de Largeur D'Impulsion (MLI).

III.3.5 Le convertisseur :

Le CAN est un périphérique intégré destiné à mesurer une tension et la convertir en nombre binaire qui pourra être utilisé par un programme. Notre 16F877 travaille avec un convertisseur analogique/numérique qui permet un échantillonnage sur 10 bits. Le signal numérique peut donc prendre 1024 valeurs possibles. On sait que pour pouvoir numériser une grandeur, nous devons connaître la valeur minimale qu'elle peut prendre, ainsi que sa valeur maximale, Les pics considèrent par défaut que la valeur minimale correspond à leur V_{ss} d'alimentation, tandis que la valeur maximale correspond à la tension positive d'alimentation V_{dd} [26] .

Le module de conversion utilise registres disposés comme suit :

A) Registre 0 de Contrôle (ADCON0) :

Ce registre permet de définir l'horloge de conversion (bit $ADCS1$ et $ADCS0$), le canal à convertir ($CHS2$, $CHS1$ et $CHS0$) et $ADON$; bit de mise en fonctionnement

B) Registre 1 de Contrôle (ADCON1) :

Il permet de déterminer le rôle de chacune des pins $PA0$, $PA1$, $PA2$, $PA3$ et $PA4$, et les 2 dernières sur le Port B en $PB6$ et $PB7$. Il permet donc de choisir si un pin sera utilisé comme entrée analogique, comme entrée/sortie standard, ou comme tension de référence.

C) Registres « ADRESL et ADRESH » :

Le convertisseur donne un résultat sur 10 bits, ce résultat sera sauvegardé dans deux registres $ADRESL$ et $ADRESH$. Ces deux registres contiennent 16 bits, et que nous n'en utilisons que 10 bits, on peut soit justifier le résultat à gauche ou à droite. Le choix de la méthode s'effectue à l'aide du bit 7 du registre $ADCON1$ [24] .

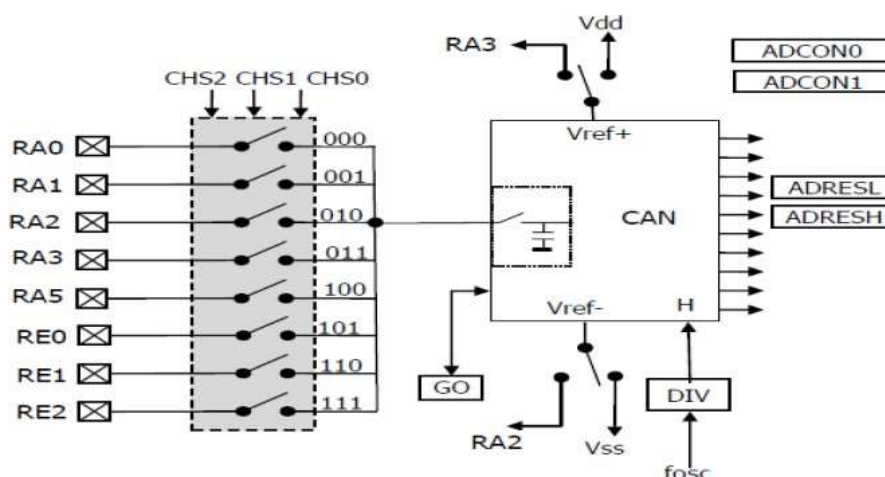


Figure 3. 3: module du convertisseur

III.3.5.1 Configuration de la conversion :

A)ADCON0 : (h'1F' : page 0) :

Bit 7

Bit 0

ADSC1	ADSC0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/Done		ADON
-------	-------	------	------	------	---------	--	------

Au reset : ADCON0 = 00000000

Bit 7 et bit 6 : **ADSC1 et ADSC0** = Clock Select

bits. Ces 2 bits permettent de choisir la vitesse de conversion :

00= Fosc/2. Pour fréquence maximale 1,250 MHz

01= Fosc/8. Pour fréquence maximale 5,000 MHz

10= Fosc/32. Pour fréquence maximale 20,000 MHz

11= Oscillateur RC interne. Si >1 MHz

Le temps de conversion d'un bit est TAD. Pour une conversion totale des 10bits il faut: 12.TAD.

Pour que la conversion soit correcte il faut que TAD soit au minimum de **1,6µs**.

Avec l'oscillateur interne RC on a : TAD = 4 µs typique (entre 2 et 6 µs). Bit 5 bit4 et bit 3 : **CHS2 CHS1 et CHS0** = Channel Select bits.

Ces 3 bits permettent de choisir l'entrée qui va être convertie.

Canal	CHS2	CHS1	CHS0	PORT
0	0	0	0	PA ₀
1	0	0	1	PA ₁
2	0	1	0	PA ₂
3	0	1	1	PA ₃
4	1	0	0	PA ₅

Bit 2: **GO/DONE**: Status bit is ADON=1.

1 = Démarre la conversion A/D. Ce bit est remis à "0" par hard.

0 = La conversion A/D est terminée.

Bit 1 : **Bit non implanté.**

Bit 0 : **ADON** : A/D on bit.

1= Convertisseur A/D en service.

0 = Convertisseur A/D à l'arrêt.

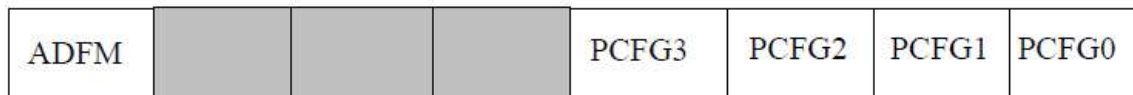
Temps de conversion TAD en fonction du Quartz et des bits du Clock select :

QUARTZ	CLOCK	T _{AD}	12.T _{AD}	Ne convient pas si T _{AD} <1,6µs
4 MHz	F _{osc} /2 = 2 MHz	0,5 µs	6 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /8 = 500 KHz	2 µs	24 µs	OK
	F _{osc} /32 = 125 KHz	8 µs	96 µs	OK
8 MHz	F _{osc} /2 = 4 MHz	0,25 µs	3 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /8 = 1 MHz	1 µs	12 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /32 = 250 KHz	4 µs	48 µs	OK
12 MHz	F _{osc} /2 = 6 MHz	0,16µs	1,92 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /8 = 1,5 MHz	0,66 µs	8 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /32 = 375 KHz	2,6 µs	32 µs	OK
16 MHz	F _{osc} /2 = 8 MHz	0,125µs	1,5 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /8 = 2 MHz	0,5 µs	6 µs	Ne convient pas
	F _{osc} /32 = 500 KHz	2 µs	24 µs	OK

B)ADCON1 : (h'9F' : page 1) :

Bit 7

Bit 0



Au reset : ADCON1 = 00000000

Bit 7 : **ADFM** = A/D Result format.

1 = Justifié à droite. ADRESH ne contient que les 2 MSB du résultat. Les 6MSB de ce registre sont lus comme des "0".

0 = Justifié à gauche. ADRESL ne contient que les 2 LSB du résultat. Les 6 LSB de ce registre sont lus comme des "0".

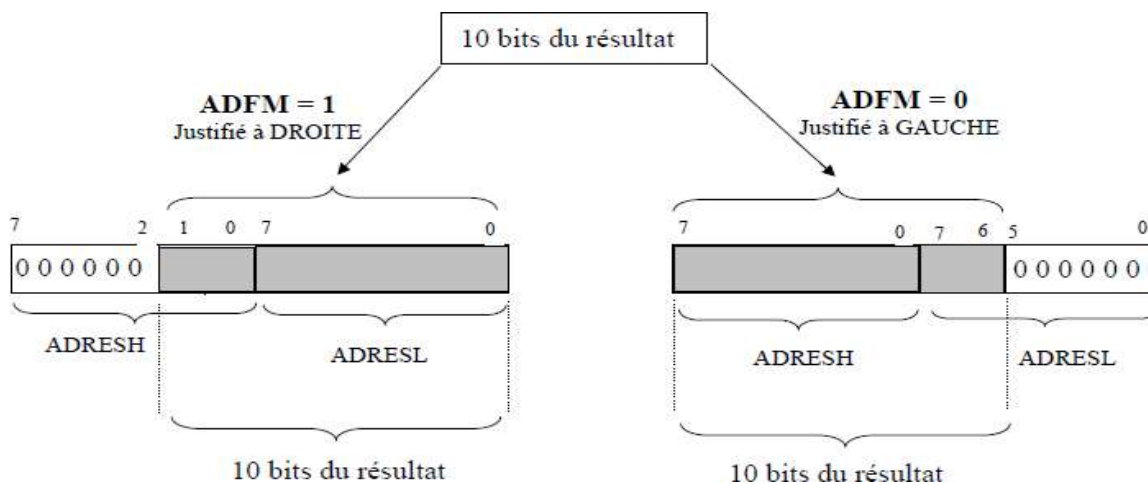


Figure 3. 4:Schéma descriptive ADCON1

Req : Bit 6 bit 5 et bit 4 : **Bits non implémentés.**

Bit 3 bit 2 bit 1 et bit 0 : PCFG3 PCFG2 PCFG1 et PCFG0

Bits de contrôle de la configuration des Ports.

Ces bits permettent de choisir le partage entre entrées analogiques et digitales sur les PORTS A et E.

Ils permettent également de choisir pour VREF+ entre VDD et PA3 et pour VREF- entre VSS et PA2.

Configuration des PORTS en fonctions des 4 bits PCFG:

A = Entrée Analogique. D = I/O Digitale

4 Bits PCFG	N°7 PE ₂	N°6 PE ₁	N°5 PE ₀	N°4 PA ₅	N°3 PA ₃	N°2 PA ₂	N°1 PA ₁	N°0 PA ₀	VREF ⁺	VREF ⁻
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	V _{DD}	V _{SS}
0001	A	A	A	A	VREF ⁺	A	A	A	PA ₃	V _{SS}
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	V _{DD}	V _{SS}
0011	D	D	D	A	VREF ⁺	A	A	A	PA ₃	V _{SS}
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	V _{DD}	V _{SS}
0101	D	D	D	D	VREF ⁺	D	A	A	PA ₃	V _{SS}
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	V _{DD}	V _{SS}
1000	A	A	A	A	VREF ⁺	VREF ⁻	A	A	PA ₃	PA ₂
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	V _{DD}	V _{SS}
1010	D	D	A	A	VREF ⁺	A	A	A	PA ₃	V _{SS}
1011	D	D	A	A	VREF ⁺	VREF ⁻	A	A	PA ₃	PA ₂
1100	D	D	D	A	VREF ⁺	VREF ⁻	A	A	PA ₃	PA ₂
1101	D	D	D	D	VREF ⁺	VREF ⁻	A	A	PA ₃	PA ₂
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	V _{DD}	V _{SS}
1111	D	D	D	D	VREF ⁺	VREF ⁻	D	A	PA ₃	PA ₂

↑ Ces entrées n'existent pas sur le 16F876 (boîtier 28 pins).

Remarque :

Au reset le registre ADCON1 est initialisé à h'00'. Cela signifie que les 5 bits du Port A et les 3 bits du Port E sont configurés en entrées analogiques.

Pour récupérer le 5 bits du Port A et les 3 bits de Port E en tant que I/O digitales il faut écrire la valeur h'06' dans ADCON1.

III.3.6 Les interruptions [26]

Une interruption provoque l'arrêt du programme principal pour aller exécuter une procédure d'interruption. A la fin de cette procédure, le microcontrôleur reprend le programme principal à l'endroit où il l'a laissé. A chaque interruption sont associés deux bits, un bit de validation et un drapeau. Le premier permet d'autoriser ou non l'interruption, le second permet au programmeur de savoir de quelle interruption il s'agit

Sur le 16F876/877, l'es interruptions sont classées en deux catégories, les interruptions primaires et les interruptions périphériques. Elles sont gérées par les registres.

Le microcontrôleur dispose de plusieurs sources d'interruptions.

- Une interruption externe, action sur la broche **INT/RB0**.
- Débordement du **TIMER0**.
- Changement d'état logique sur une des broches du **PORTB (RB4 à RB7)**.
- Une interruption d'un des périphériques (**PEIE**).
- Fin de programmation d'une case mémoire de l'**EEPROM**.
- Changement d'état sur le **PORTD (PSPIE)**.
- Fin de conversion analogique numérique (**ADIE**).
- Réception d'une information sur la liaison série (**RCIE**).
- Fin d'émission d'une information sur la liaison série (**TXIE**).
- Interruption **SPI** ou **I2C** du module **MSSP (SSPIE)**.
- Interruption du registre de capture et/ou de comparaison 1 (**CCPI1E**).
- Interruption du registre de capture et/ou de comparaison 2 (**CCPI2E**).
- Débordement du **TIMER1 (TMR1E)**.
- Débordement du **TIMER2 (TMR2E)**.
- Collision de BUS (**BCLIE**)

INTCON:	GIE	PEIE	TOIE	INT E	RBIE	TOIF	INTF	RBIF
PIE1 (bk1):	PSPI E	ADIE	RCI E	TXI E	SSPI E	CCP1I E	TMR2I E	TMR1I E
PIR1 (bk0):	PSPI F	ADIF	RCIF	TXIF	SSPI F	CCP1I F	TMR2I F	TMR1I F
PIE2 (bk0):				EEIE	BCL IE			CCP2I E
PIR2 (bk1):				EEIF	BCLI F			CCP2I F
OPTION_REG(bk 1) :		INTED G						

III.3.6.1 Mécanisme générale d'une interruption

Nous pouvons dire, sans nous tromper de beaucoup, qu'une routine d'interruption est un sous-programme particulier, déclenché par l'apparition d'un événement spécifique. Cela a l'air un peu ardu, mais vous allez voir que c'est très simple

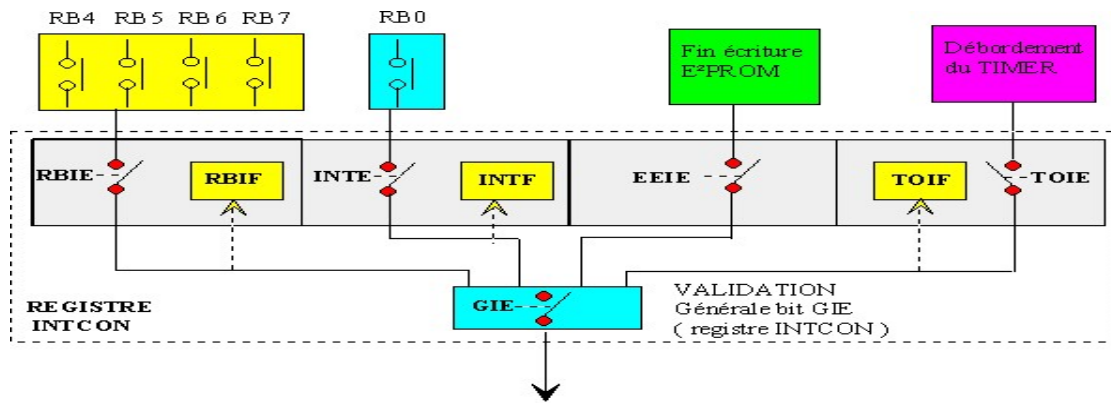


Figure 3. 5: synoptique des modes d'interruptions

Partie de programmation du PIC

Pour programmer le PIC par exemple il y a certains logiciels : MPLAB, Micro-c, CCS Compile, flow code, IC-PROG,...etc. Pour notre application on a choisi d'utiliser le logiciel compilateur C de CCS, dont l'adresse du site internet est tout simplement www.ccsinfo.com qui présente les principales caractéristiques, le compilateur C de la société CCS (Custom Computer Services) est un compilateur 8C9 adapté aux microcontrôleurs PIC, il supporte l'intégration avec l'environnement de développement MPLAB permettant d'utiliser le simulateur contenu dans ce dernier pour la mise au point des programmes écrits en C.[27]

Les bibliothèques de fonctions compatibles de tous les PIC supportés pour ce qui est des interfaces RS232, I2C, etc.

Notre choix s'est porté vers le langage C pour sa simplicité d'utilisation, un texte C peut contenir des séquences de bas niveau (proches du matériel) en assembleur

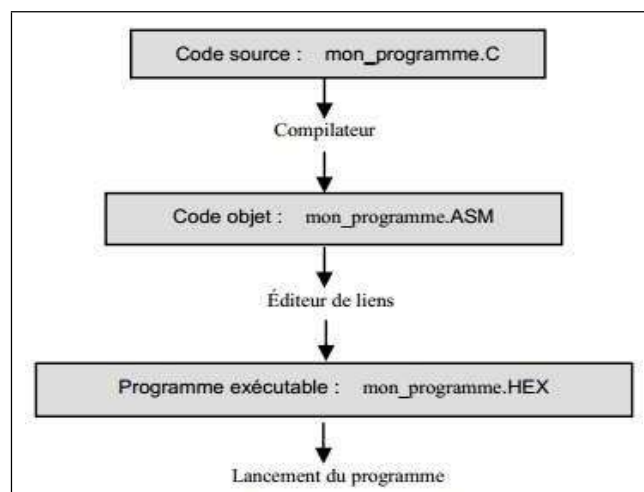


Figure 3.6: Etapes de génération d'un programme écrit en langage C.

Chaque programme compilé doit être téléchargé sur le pic à l'aide d'un programmeur qui nécessite une interface graphique pour la transmission de ce dernier.

IV) Conclusion:

Ce chapitre a permis de présenter le microcontrôleur **PIC16F877**, en détaillant ses caractéristiques, son architecture interne, ses ports, mémoires, convertisseur analogique-numérique, timers et interruptions. Nous avons justifié son choix pour notre application grâce à sa polyvalence et ses nombreuses fonctionnalités intégrées. L'étude de ces éléments constitue une base essentielle pour la mise en œuvre de la commande électronique de notre moteur universel, qui sera abordée dans le chapitre suivant

Chapitre IV

Les résultats expérimentaux

IV.1 Introduction :

Après avoir étudié les principes théoriques des gradateurs, les caractéristiques du moteur universel et le microcontrôleur PIC16F877, ce chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique de notre système de commande.

Nous présentons d'abord la partie commande, qui inclut la détection de passage par zéro, la génération des impulsions de commande synchronisées et le rôle du microcontrôleur dans le traitement des signaux. Ensuite, nous détaillons la partie puissance, notamment le circuit à base de TRIAC pour le contrôle de la tension appliquée au moteur.

Enfin, nous exposons les résultats de simulation ainsi que les essais réalisés, illustrant le fonctionnement du système selon différents angles de déclenchement (α), aussi bien pour des charges résistives que pour des charges inductives. Ces résultats valident la faisabilité de notre approche et confirment le bon comportement du système global.

IV.2 Réalisation

La figure 1 présente le schéma de principe de notre circuit, qui consiste à commander un gradateur monophasé en utilisant le microcontrôleur PIC 16F877, qui génère les signaux synchronisés avec la tension d'alimentation sinusoïdale de notre gradateur, deux façons distinctes peuvent contrôler l'angle d'amorçage par action sur un potentiomètre branché sur le pin RA0 du PIC. Deux parties distinctes formant notre circuit, partie commande et partie puissance.

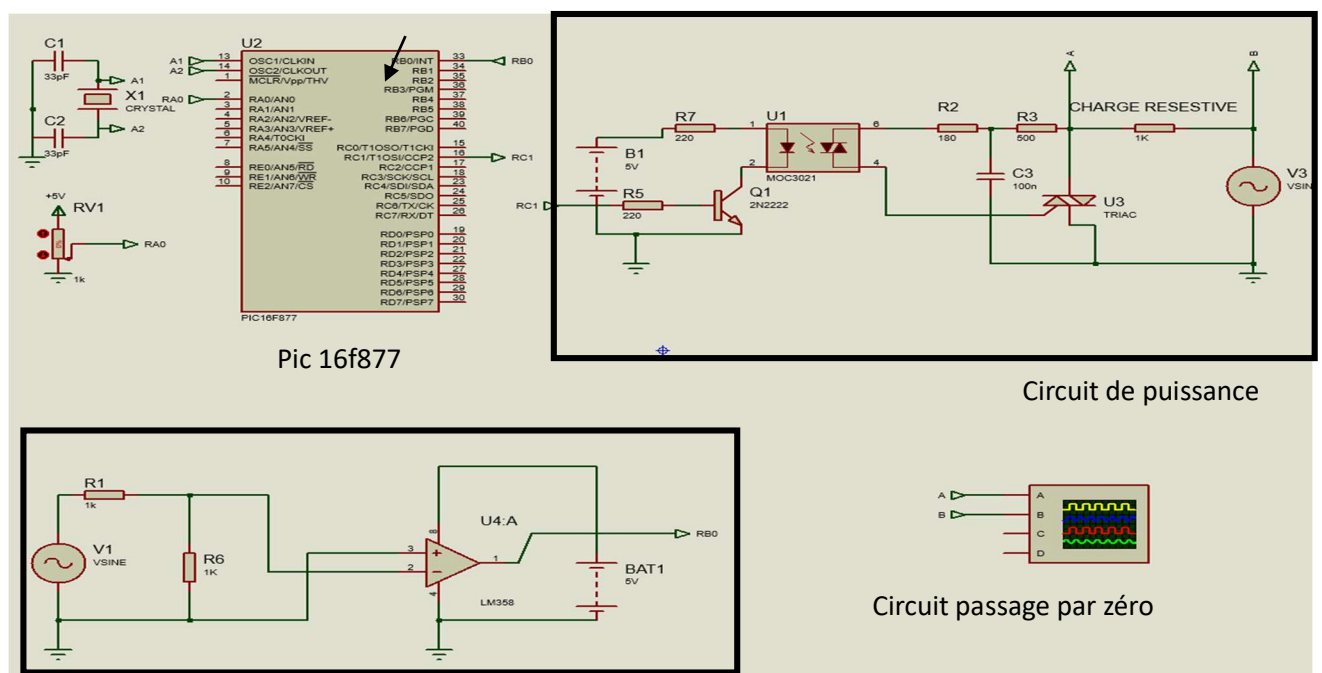


Figure 4.1 : schéma globale du circuit sur ISIS.

IV.3 La partie de commande

IV.3.1 Le circuit de détecteur du passage par zéro

Le **passage par zéro** d'un signal sinusoïdal correspond au moment où la tension instantanée du signal traverse la valeur zéro volts, soit dans le sens positif (croissant) ou dans le sens négatif (décroissant). Cette information est cruciale dans le contrôle de l'alternatif, notamment pour :

- Synchroniser des signaux de commande (comme les impulsions de TRIAC).
- Réduire les interférences électromagnétiques.
- Garantir un déclenchement précis au bon moment dans un cycle alternatif.

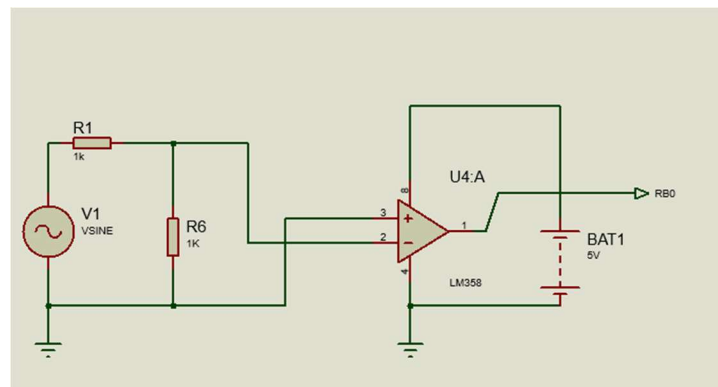


Figure 4.2: Circuit détecteur de passage par zéro.

Ce circuit comporte :

- Deux résistances.
- Un amplificateur opérationnel LM358.
- Batterie 5V.

IV.1.2 Le principe de fonctionnement

Le circuit utilisé dans notre réalisation est basé sur un **amplificateur opérationnel LM358** configuré en **comparateur**. Voici le fonctionnement détaillé :

- Le signal sinusoïdal alternatif (V1) est atténué à travers un pont diviseur (R1 et R6) pour le rendre compatible avec l'entrée de l'ampli-op.
- L'entrée non-inverseur (+) du comparateur reçoit ce signal.
- L'entrée inverseur (-) est reliée à la masse (0V), jouant le rôle de référence.

Lorsque la tension d'entrée sinusoïdale devient **supérieure à 0V**, la sortie du comparateur devient **haute** (niveau logique 1).

Lorsque la tension est **inférieure à 0V**, la sortie passe **basse** (niveau logique 0).

Ainsi, chaque transition du signal d'entrée à travers 0V provoque un **changement d'état de sortie**, ce qui permet de détecter précisément chaque passage par zéro.

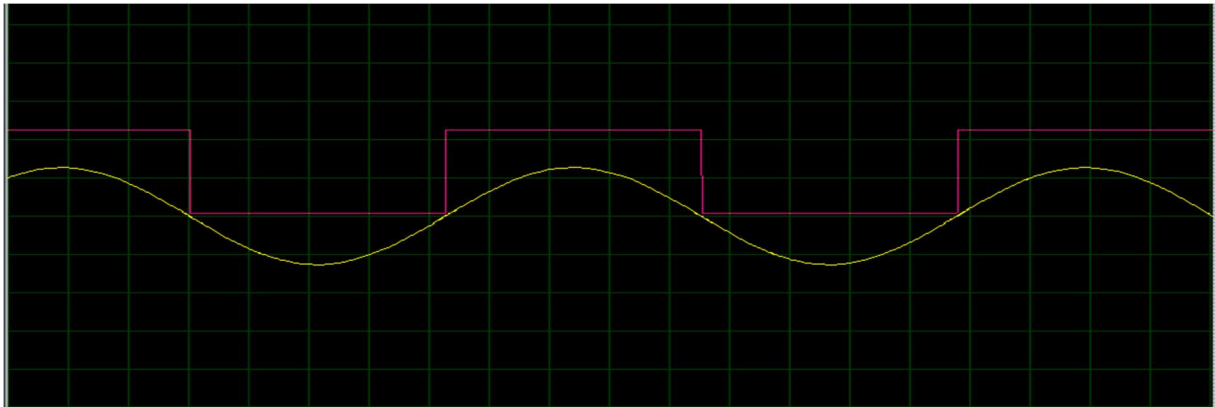


Figure 4.3: les signaux d'entrée et de sortie du détecteur de passage par zéro.

Le programme de simulation ISIS illustre les signaux d'entrée et de sortie du détecteur de passage à zéro dans la figure 4.3, où l'on observe un niveau élevé pour l'alternance positive et un niveau réduit pour l'alternance négative.

On transfère le signal émis par le détecteur à l'entrée RB0 du microcontrôleur 16F877, qui représente l'entrée d'interruption et génère des impulsions à chaque croisement avec zéro.

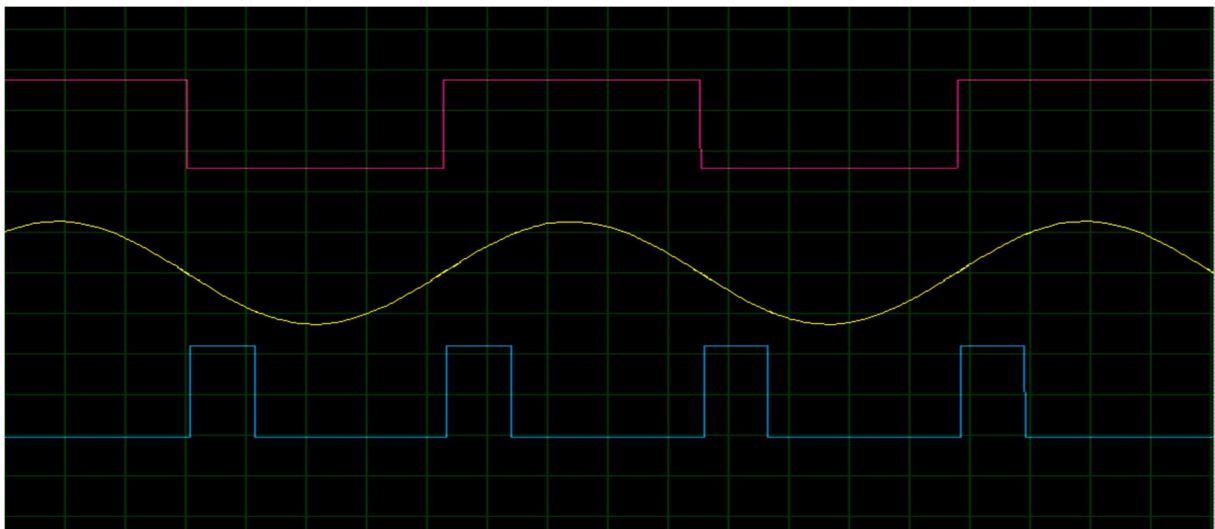


Figure 4.4: les signaux du détecteur de passage par zéro et les impulsions sortant de RB1

Channel A : le signal alternatif du réseau.

Channel B : les impulsions sortant de RB1.

Channel C : le signal carré, est la sortie de détecteur de passage par zéro.

La figure 4.4 montre les signaux d'entrée et de sortie du détecteur de passage par zéro obtenus par le logiciel de simulation ISIS. Le signal de sortie du pic (signal de commande du gradateur) est aussi présenté sur cette figure.

IV.2 Photo triac

Un photo-triac est constitué d'un Triac dont la gâchette est sensible à la lumière et d'une diode électroluminescente (LED). Lorsqu'un courant direct I_F (généralement fourni par un microcontrôleur) circule à travers la LED, celle-ci émet des photons qui sont transmis vers la jonction du Triac. Si ce courant dépasse le courant de déclenchement de la LED I_{FT} , le Triac se met en conduction (état « on »). Il reste alors conducteur tant que le courant traversant le Triac I_T reste supérieur au courant de maintien I_H . Une fois que le courant descend en dessous de ce seuil, le Triac retourne à son état bloqué (non conducteur).



Figure 4.5 : Photo-triac

IV.2.1 Commande du TRIAC par Optotriac (MOC3021)

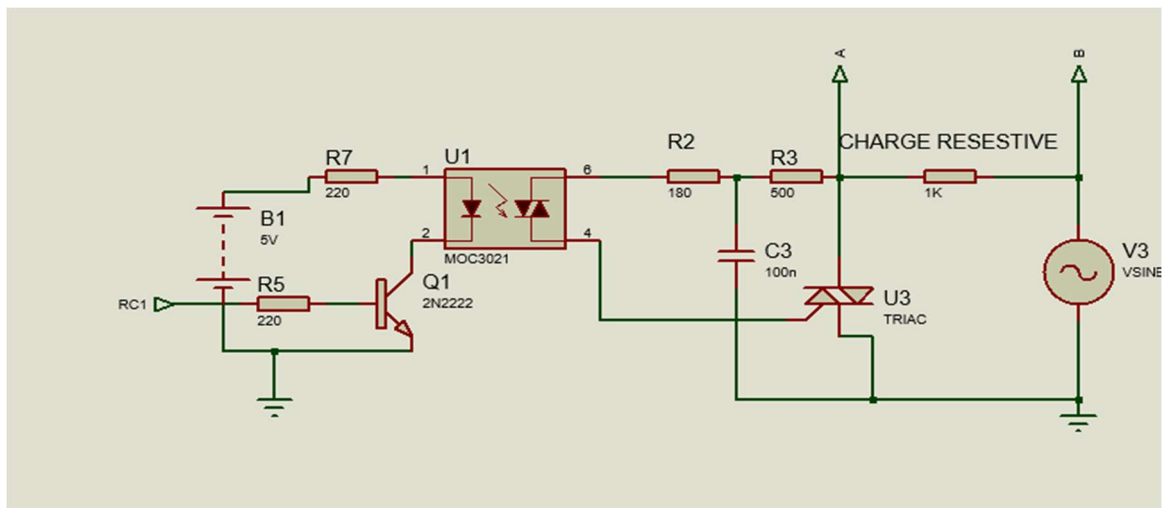


Figure 4.6: Circuit de Photo triac

IV.2.2 Description fonctionnelle du circuit

- Alimentation et commande côté basse tension :
- B1 (12V) : Source d'alimentation continue.
- Q2 (2N2222) : Transistor NPN utilisé comme interrupteur de commande pour activer la LED interne de l'optotriac.

- R5 et R7 (220 Ω) : Résistances de limitation du courant pour la base du transistor Q2 et pour la LED du MOC3021.

Lorsque Q2 est saturé (commandé par une logique issue d'un microcontrôleur par exemple), le courant circule dans la LED interne du MOC3021 (U4), ce qui émet de la lumière vers le triac interne photo détecteur.

IV.2.3 Commande du triac de puissance via MOC3021 :

- U4 (MOC3021) : Optotriac sans détection de passage par zéro, déclenche le triac de puissance U6. Il offre une isolation galvanique entre la partie commande (basse tension) et la puissance (AC).
- La sortie du MOC3021 (broches 4 et 6) est connectée à la gâchette du TRIAC U6, via :
- R8 (180 Ω) : Résistance de limitation de courant de gâchette.
- R9 (500 Ω) + C4 (100 nF) : Réseau snubber (protection contre les surtensions transitoires, surtout pour charges inductives).

IV.2.4 Commande de puissance côté alternatif :

- U6 (TRIAC) : Composant de puissance assurant la commutation de la charge alternative (ex. lampe, moteur).
- R6 (1 k Ω) : Résistance de charge (ou utilisée ici pour simuler une charge).
- V2 (V_SINE) : Source alternative (réseau 220V/50Hz en pratique ou signal alternatif simulé dans Proteus).

IV.3 Fonctionnement global

- Le microcontrôleur (ou une logique) applique un signal à la base de Q2.
- Q2 sature \rightarrow courant dans la LED du MOC3021 \rightarrow émission lumineuse.
- Le photo triac interne du MOC3021 se déclenche \rightarrow alimente la gâchette du TRIAC U6.
- Le TRIAC U6 devient conducteur \rightarrow la charge alternative est alimentée.

Oscilloscope :

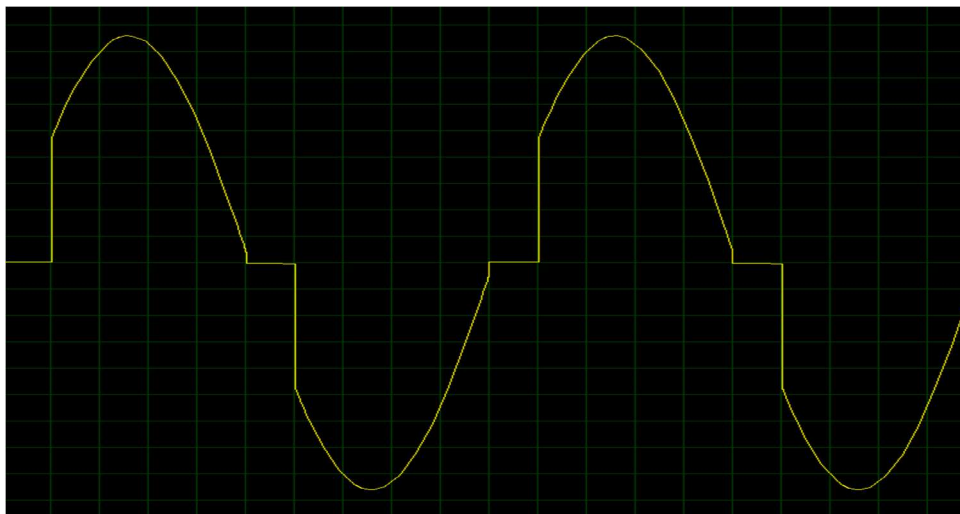


Figure 4.7: signal de commande a angle de phase

- Les signaux de la carte de commande et de puissance avec angle $\alpha=0$

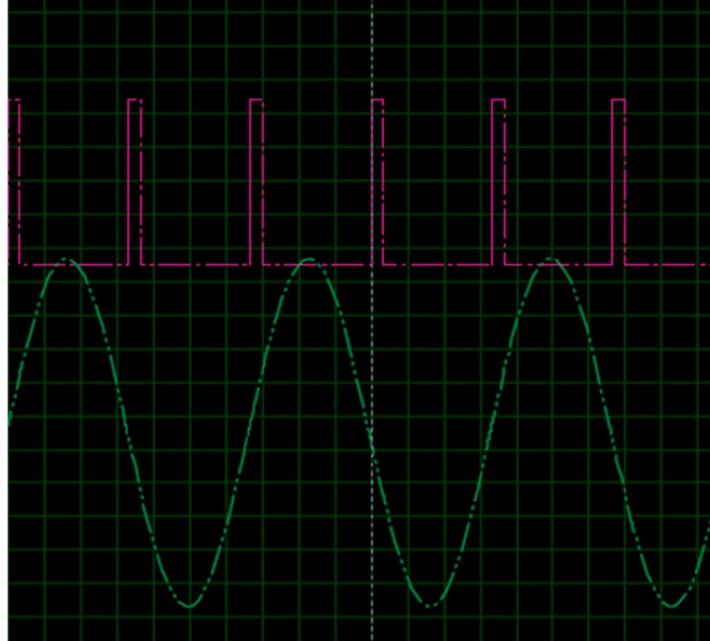


Figure 4.8: les signaux de la carte de commande et de puissance avec $\alpha=0$

La commande de la carte de puissance (gradateur) se fait via un potentiomètre ou une interface graphique par une impulsion qui va varier l'angle d'amorçage du TRIAC et réduire la puissance délivrée par le gradateur.

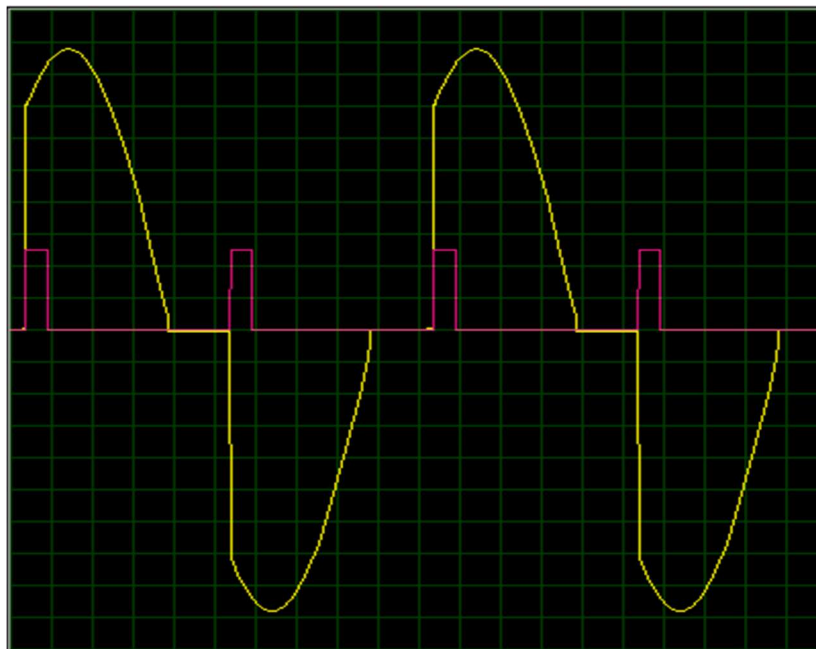


Figure 4.9: La variation de l'angle α par potentiomètre $\alpha=45$

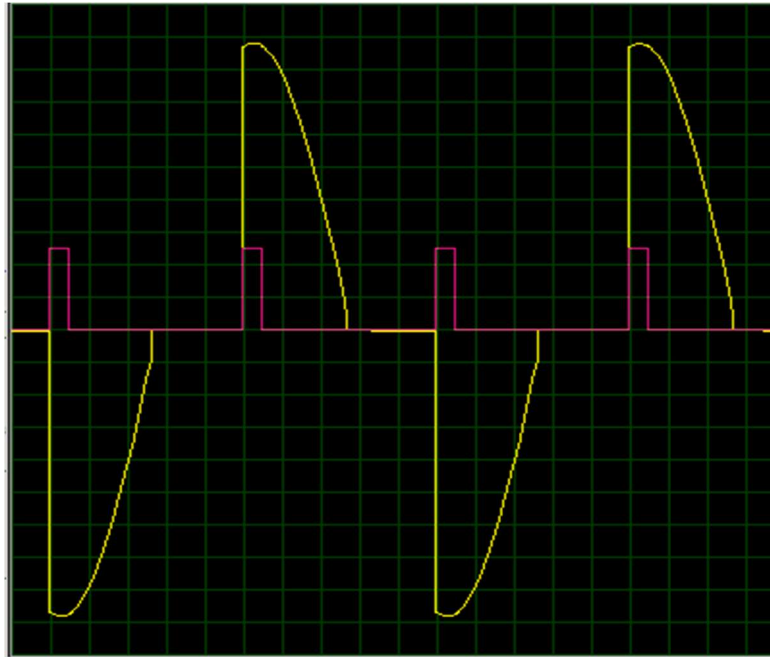


Figure 4.10: La variation de l'angle α par potentiomètre $\alpha=90$

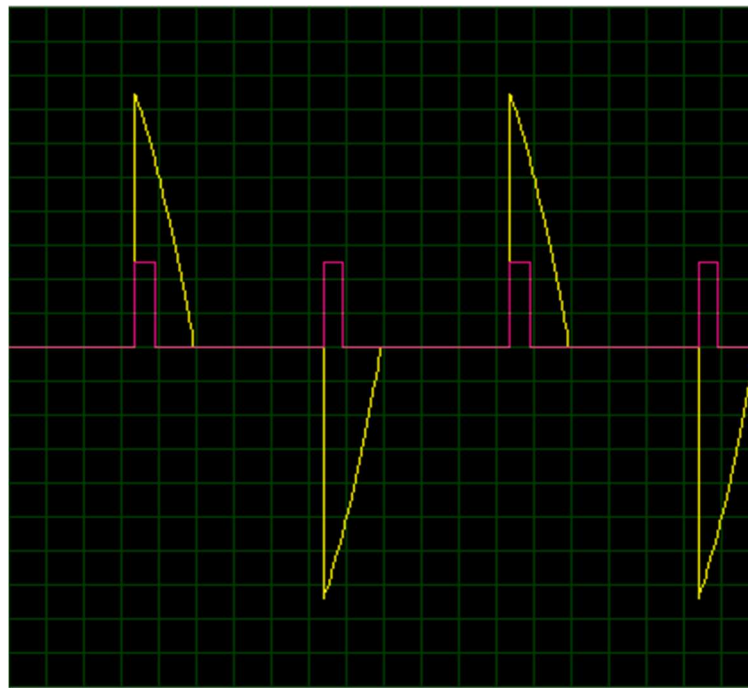


Figure 4.11: La variation de l'angle α par potentiomètre $\alpha=140$

Les résultats expérimentaux :

Le circuit global réalisé dans notre travail est bien illustré sur la figure 4.12. Avec un autotransformateur pour alimenter le circuit de puissance, deux alimentations de +5V et -5V, pour alimenter notre circuit de commande, un oscilloscope pour visualiser les différents signaux de commande et de puissance.

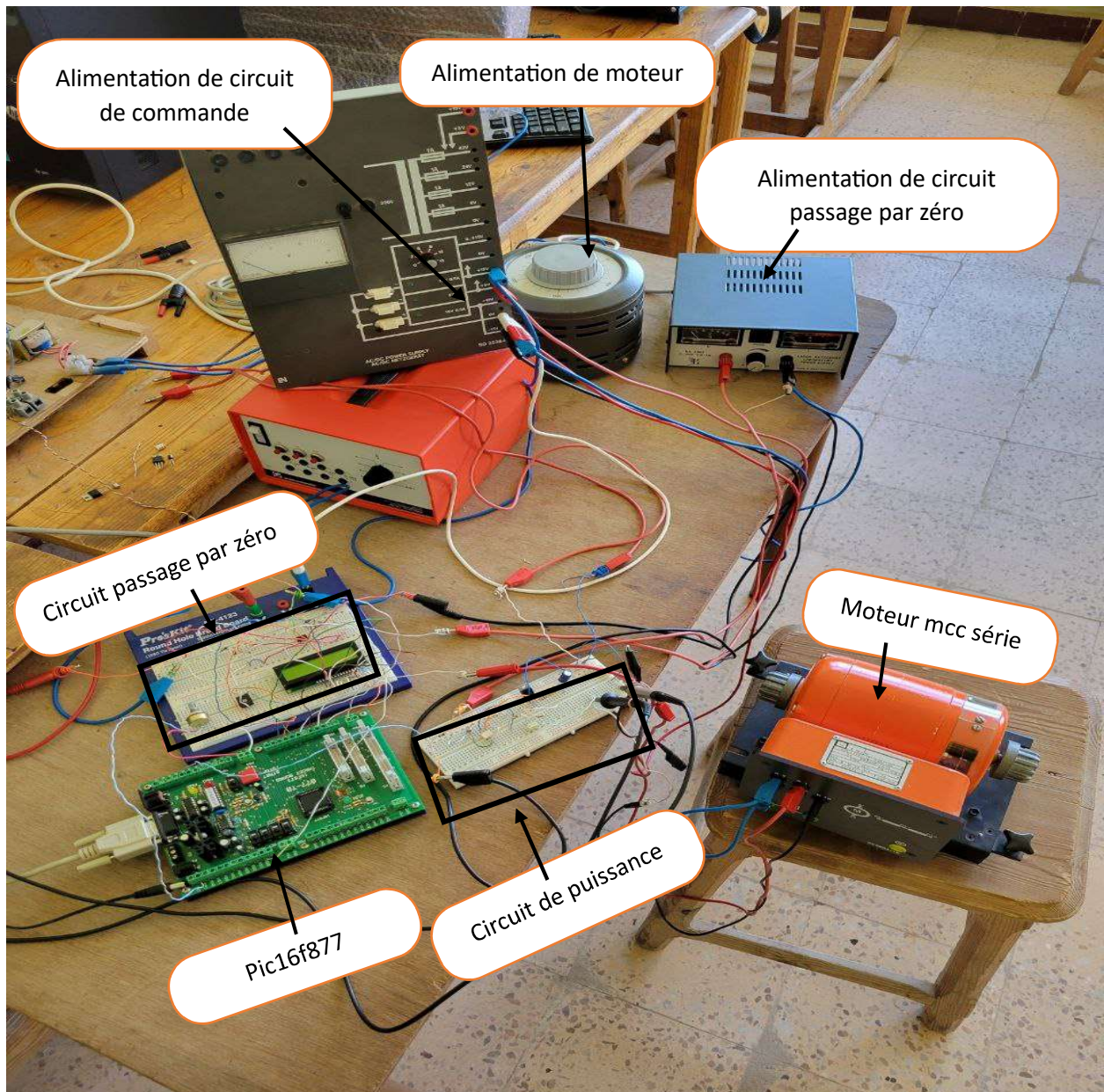


Figure 4.12 : vue générale de circuit du projet

IV.4 La Partie de commande

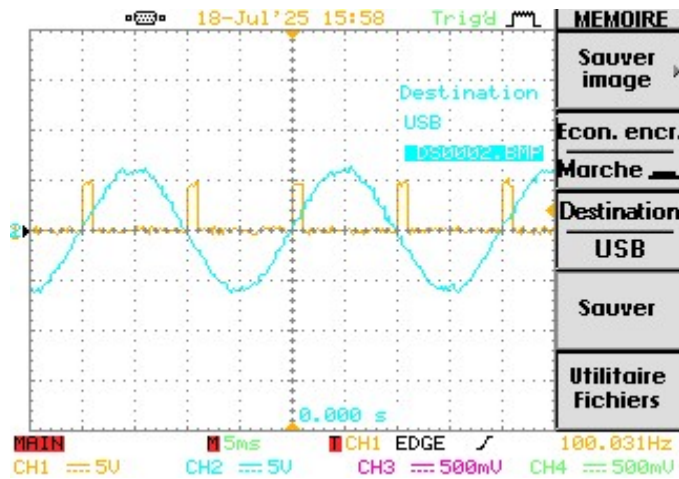


Figure 4.13: Angle $\alpha=0$

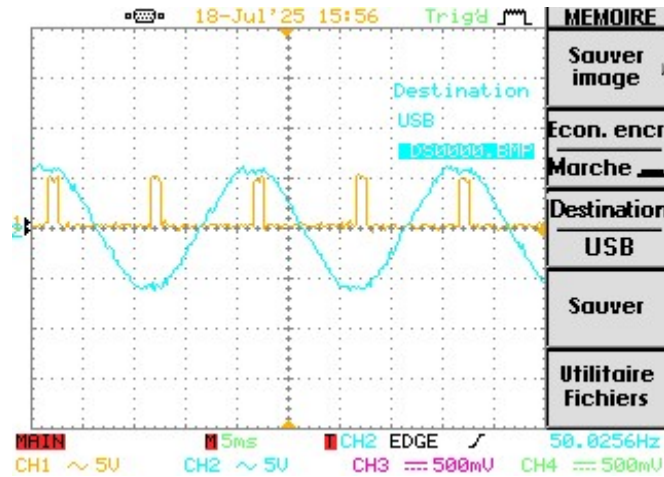


Figure 4.14 : Angle $\alpha=90$

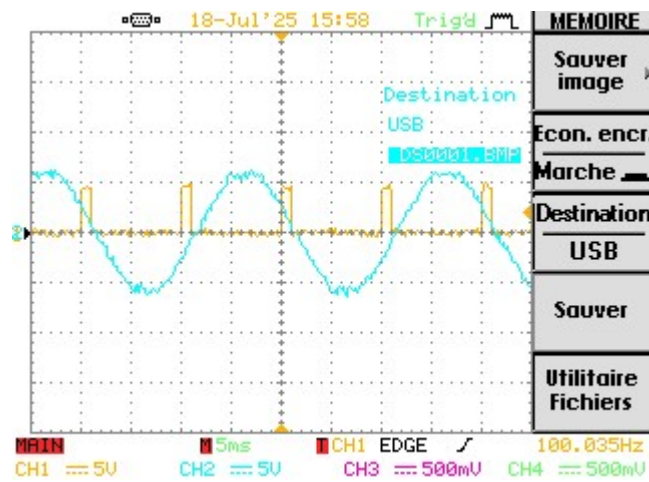


Figure 4.15: Angle $\alpha=180$

Les résultats expérimentaux de la partie commande (signaux d'entrée et sortie du détecteur de passage par zéro, ainsi que l'impulsion retardée de commande du gradateur) sont bien illustrés sur les ci-dessus, toute fois les résultats sont en concordance avec la théorie.

La partie puissance

- La charge résistive

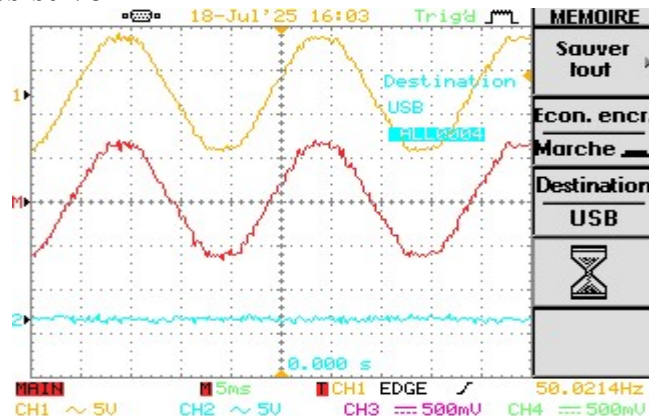


Figure 4.16 : la tension de charge résistive $\alpha=0$

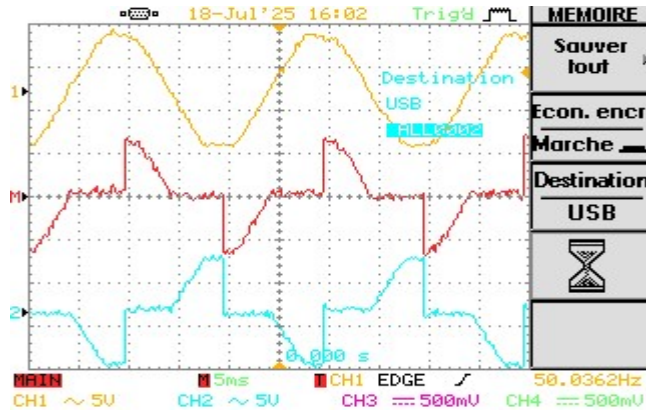


Figure 4.17 : la tension de charge résistive $\alpha=90$

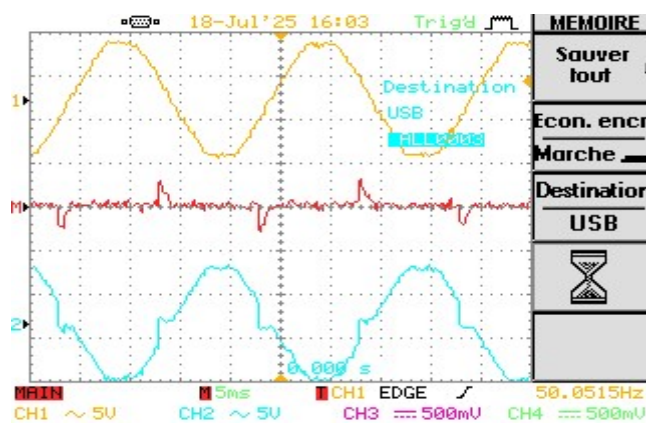


Figure 4.18 : la tension de charge résistive $\alpha=180$

Les figures 14.16 à 14.18 représentent les tensions de sortie du gradateur pour une charge résistive, pour différents angle d’amorçage, il est tout à fait claire que les courbes de sorties correspondent bien de point de vue à ceux de la simulation traités dans le paragraphe précédent.

- **La charge inductive (Circuit RL)**

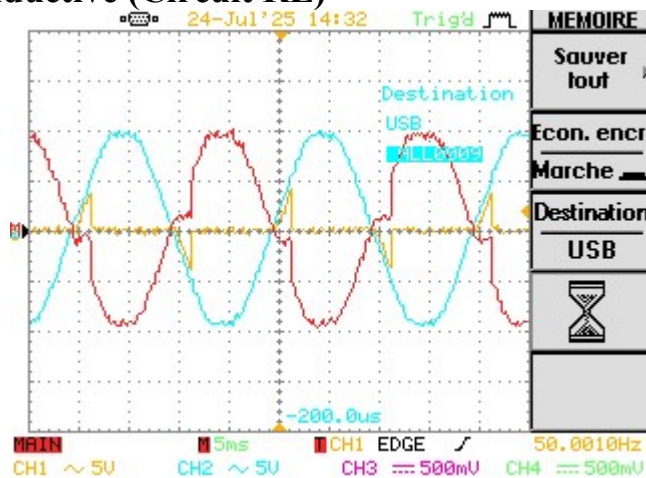


Figure 4.19 : la tension de charge inductive $\alpha=35$

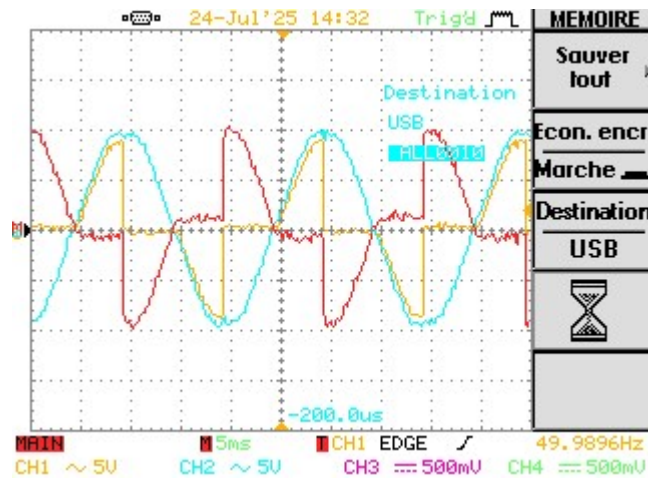


Figure 4.20 : la tension de charge inductive $\alpha=90$

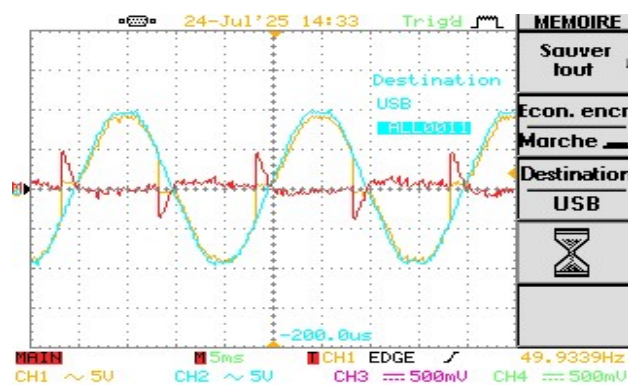


Figure 4 21: la tension de charge inductive $\alpha=170$

Les figures 14.19 à 14.21 représentent les tensions de sortie du gradateur pour une charge inductive, pour différents angle d’amorçage, il est tout à fait claire que les courbes de sorties correspondent bien de point de vue à ceux de la simulation traités dans le paragraphe précédent.

- **Charge inductive (Moteur universel)**

Les figures 14.22 à 14.24 représentent les tensions de sortie du gradateur pour une charge inductive cas moteur universel, pour différents angle d’amorçage,

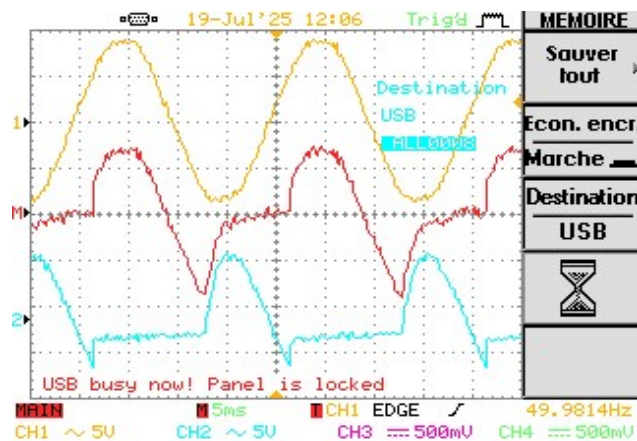


Figure 4. 22 la tension de la charge $\alpha=35$

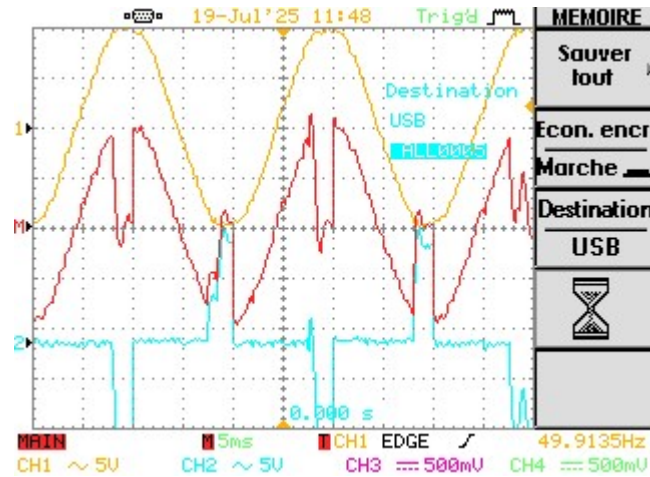


Figure 4. 23 la tension de la charge $\alpha=90$

Il est tout à fait claire que les courbes de sorties correspondent bien à ceux de la théorie.

Le montage réalisé sous sa forme finale peut bien être exploité comme support didactique de travaux pratiques du module électronique de puissance.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats de simulation et expérimentaux qui illustrent le fonctionnement du système selon différents angles de déclenchement (α), aussi bien pour des charges résistives que pour des charges inductives. Ces résultats valident la faisabilité de notre approche et confirment le bon comportement du système global.

Conclusion général

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons étudié et réalisé un système de commande d'un moteur universel monophasé basé sur un microcontrôleur PIC16F877, utilisant la technique de commande en retard de phase. L'objectif principal était de réguler la puissance appliquée au moteur par variation de l'angle de conduction, en synchronisation avec le signal alternatif d'alimentation.

Les travaux ont été structurés autour de l'analyse théorique des gradateurs monophasés, de l'étude des composants de puissance tels que le TRIAC, de la modélisation du moteur universel, ainsi que de l'implémentation de la commande à l'aide du microcontrôleur. L'ensemble du système a été simulé et validé par des résultats expérimentaux obtenus sous Proteus, mettant en œuvre la détection du passage par zéro et la commande via optotriac (MOC3021).

Les résultats obtenus confirment la faisabilité et l'efficacité de la méthode proposée. Le système permet un contrôle satisfaisant de la vitesse du moteur, tout en offrant une flexibilité dans le réglage de l'angle de phase.

Ce projet constitue une base solide pour des applications industrielles similaires, et ouvre la voie à des perspectives d'amélioration telles que l'intégration d'une régulation automatique en boucle fermée, ou l'utilisation de microcontrôleurs plus performants.

Annexes

Circuit de notre projet sans LCD dans Proteus :

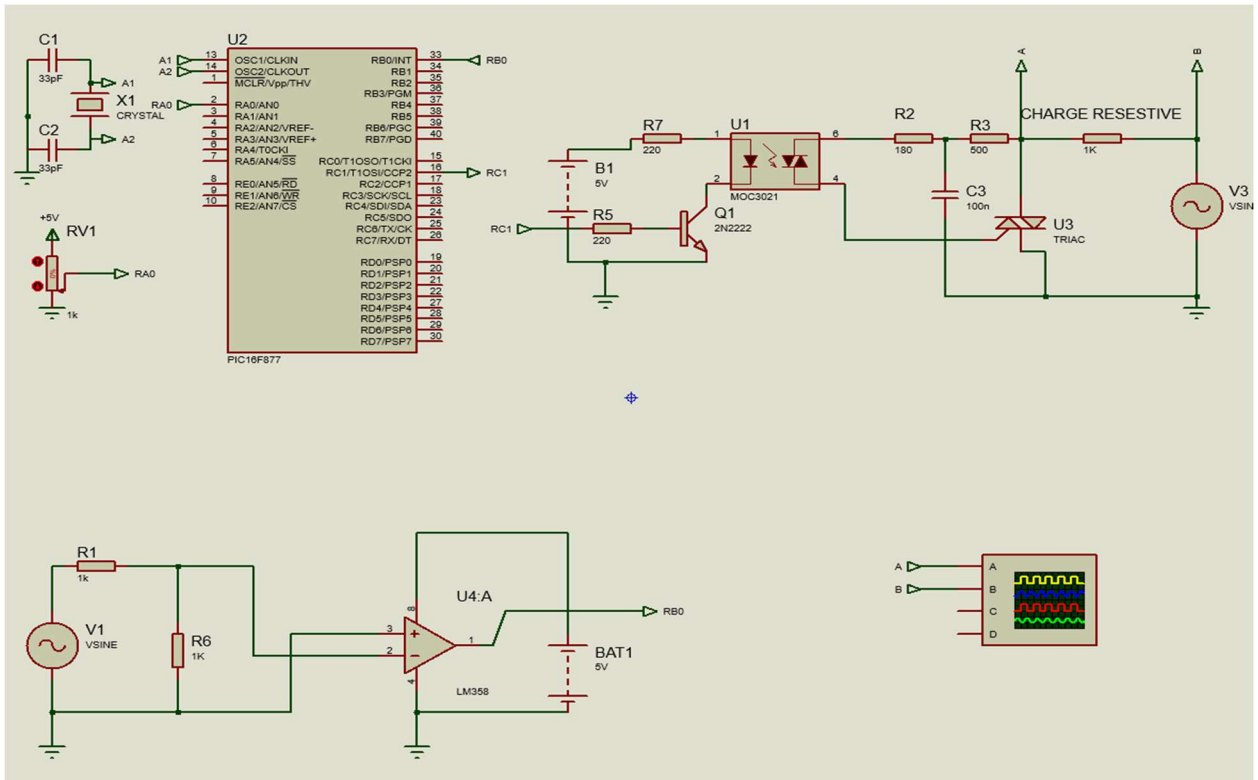


Figure 4.22 : Circuit de notre projet dans Proteus

Circuit de notre projet avec LCD dans Proteus :

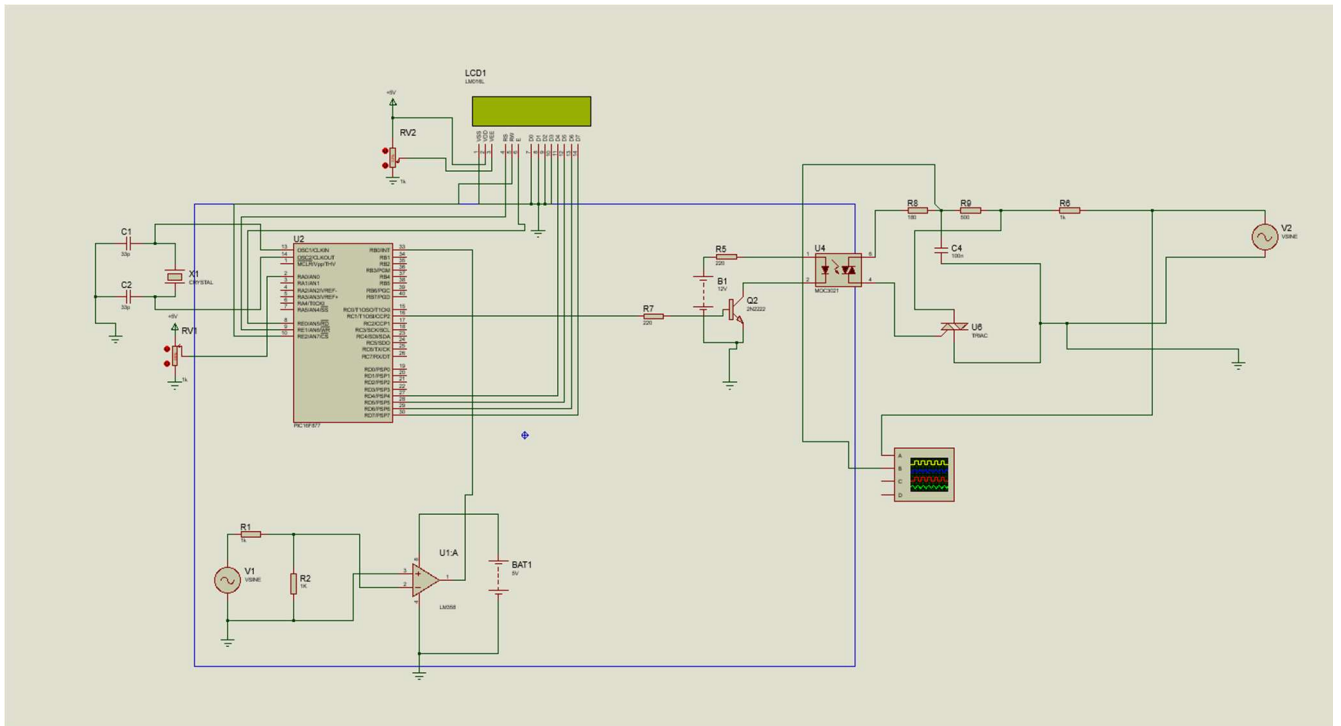


Figure 4.23 : Circuit de notre projet avec LCD dans proteus

La carte de circuit passage par zéro dans PCB

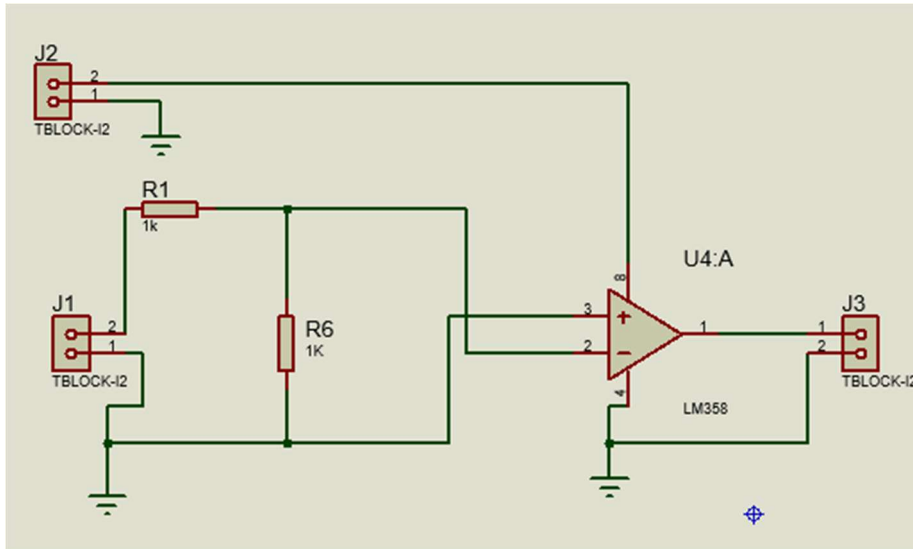


Figure 4.24: circuit de passage par zéro dans PCB proteus

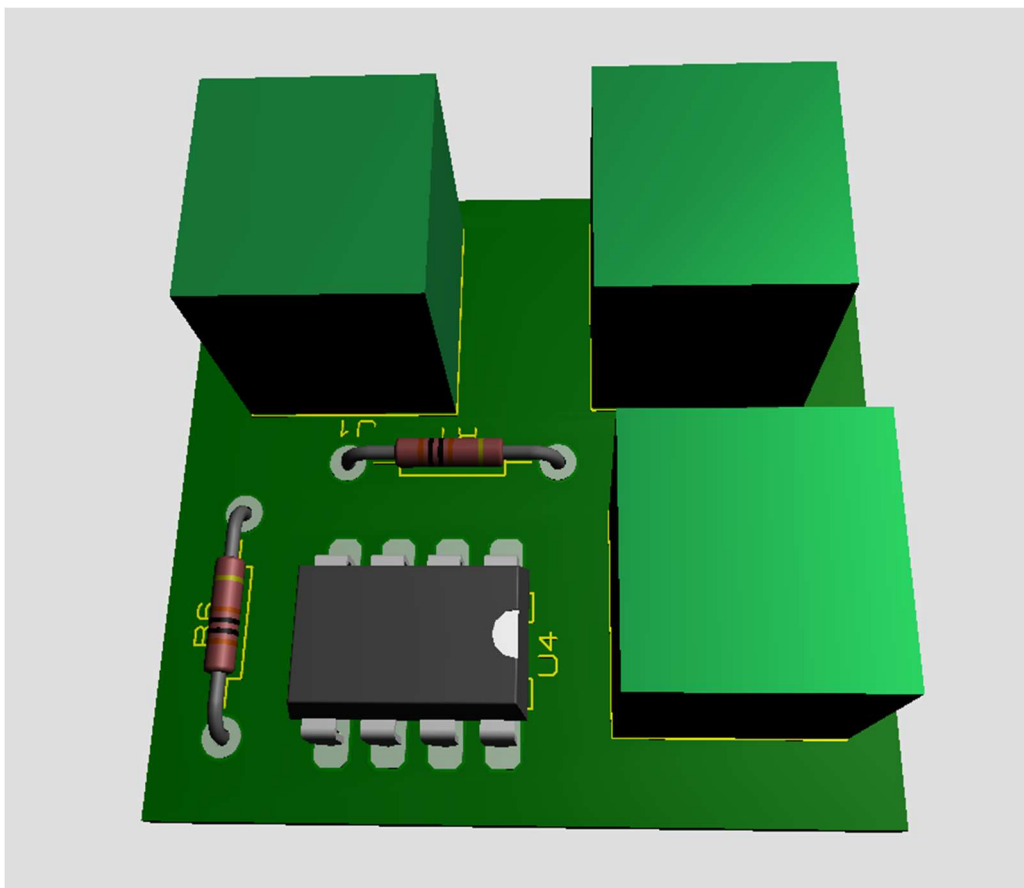


Figure 4.25: La carte de circuit passage par zéro dans PCB

La carte de microcontrôleur pic16f877 dans PCB proteus

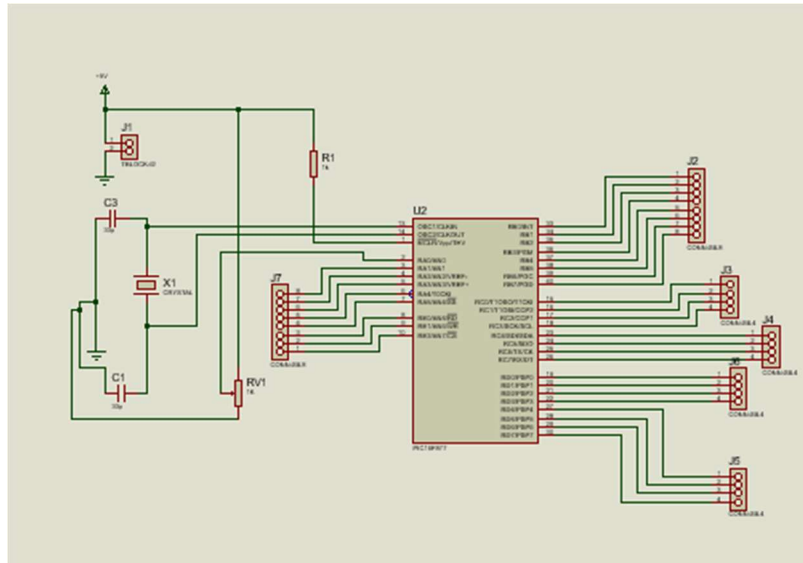


Figure 4.26: La carte de microcontrôleur pic16f877 proteus

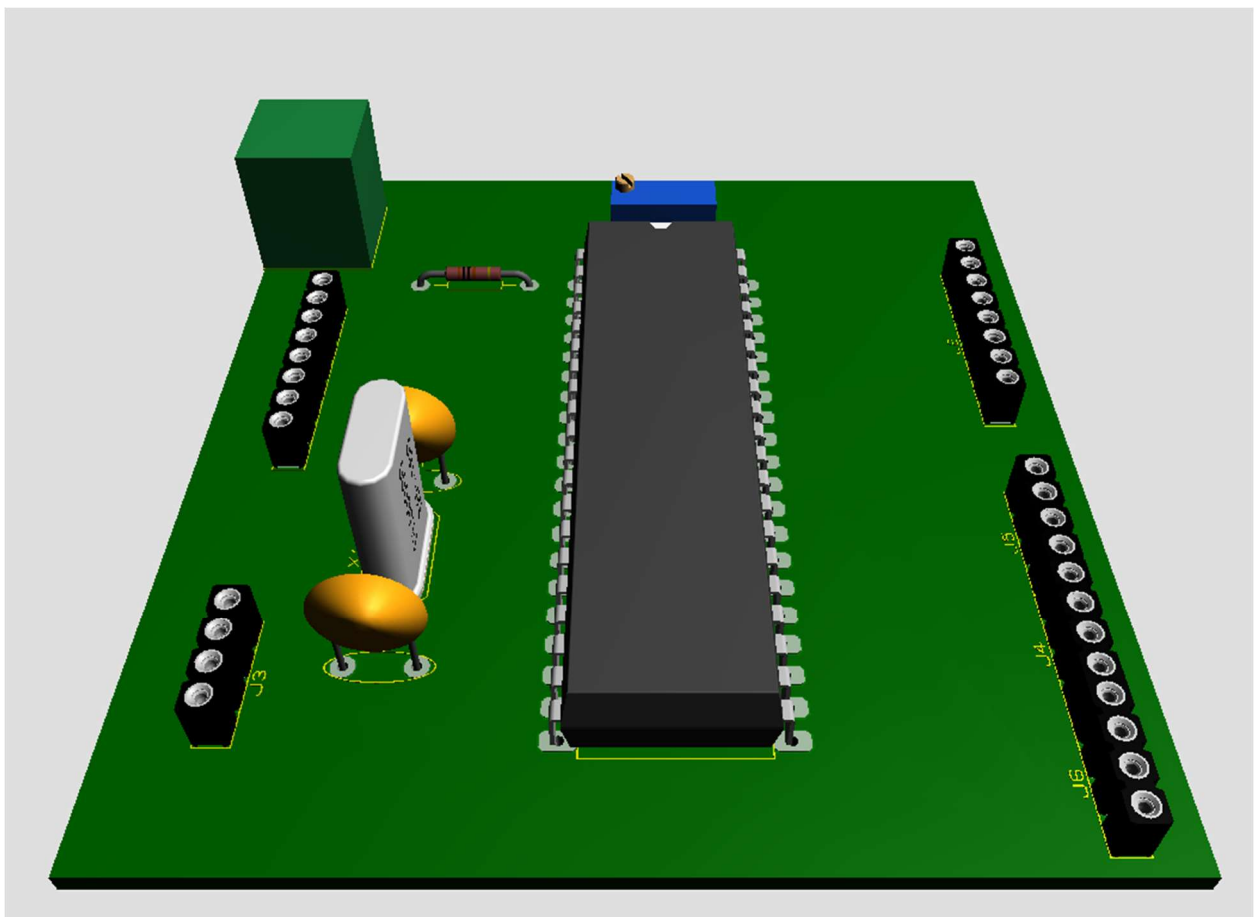


Figure 4.27 : La carte de microcontrôleur pic16f877 dans PCB

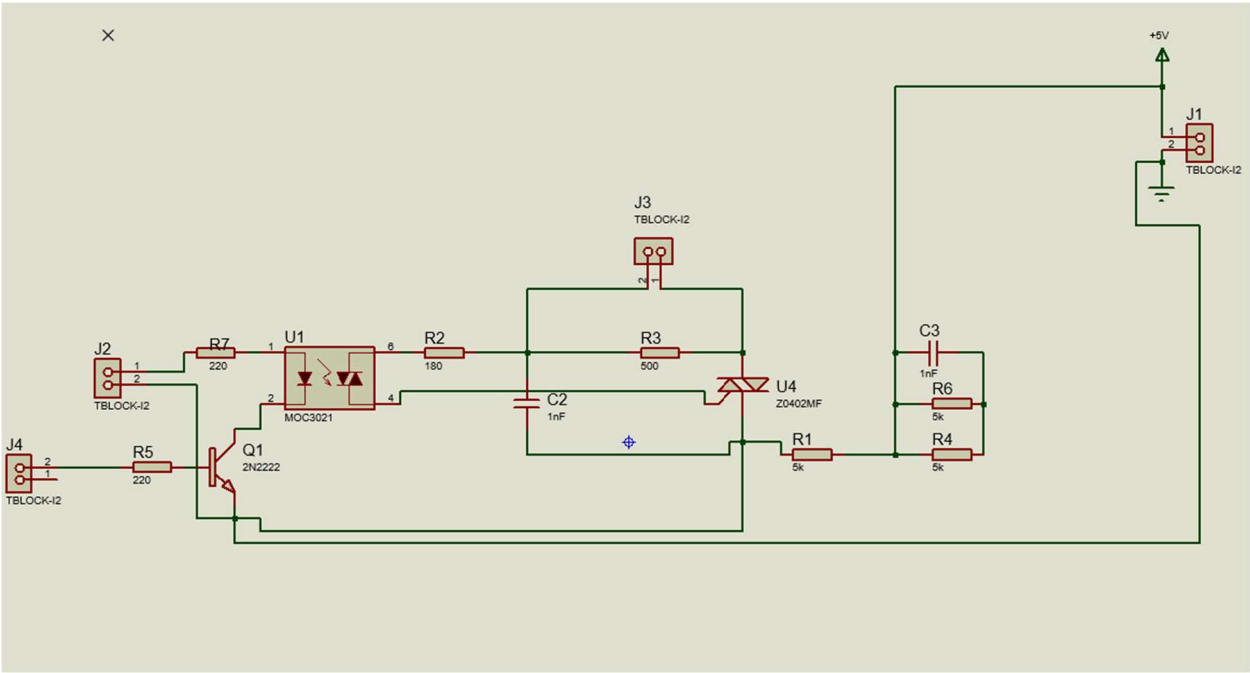


Figure 4 28 circuit de puissance proteus



Figure 4.29 : circuit de puissance pcb

Référence :

- [1] Ourabi Lassaad, *Électronique de puissance*, Support de cours, Institut Supérieurs des Etudes Technologiques de Bizerte.
- [2] Mammar Khaled, *cours d'électronique de puissance & Application avec SimPowerSystems (Matlab/Simulink)*, Support de cours, Université de Bechar.
- [3] M. Lahbabi, *Électronique de puissance*, support de cours, Université sidi mohamed ben abdellah, Alger.
- [4] Guy Seguier, Philippe Delarue, Francis Labrique, *Électronique de puissance Structures, commandes, applications*, Dunod, 10^{ème} édition, 2015.
- [5] R. Chauprad, F. Milsant, *Électronique de puissance*, Tome 2 : Commande des moteurs à courant continu, Eyrolles, 1990.
- [6] Bounabi Mousaab, *Cours Electronique de puissance*, Support de cours, université Betna2, 2021.
- [7] Bouali Mohamed Lamine, *Etude théorique et expérimentale d'un gradateur triphasé commandé*, mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2018.
- [8] E. Gaucheron, *Les moteurs électriques ... pour mieux les piloter et les protéger*, Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° 207.
- [9] E. Matagne, *Électronique de puissance*, Université catholique de Louvain, 2012.
- [10] Oriol Planas, *moteurs-électriques : moteur-universel*, Ingénieur Technique Industriel à Demotor, 2017.
- [11] Y. Morel, *La machine à courant continu (Cours et Exercices)*, Eyrolles, 2004
- [12] Gérard Guihéneuf, *Les moteurs électriques expliqués aux électroniciens, Réalisations : démarrage, variation de vitesse, freinage*. Publitronic Elektor, 2014.
- [13] M. Rezig, *Cours Machines Spéciales*, Support de cours, Université de Biskra.
- [14] Abd Essemmed. Rachid, *Modélisation et simulation des machines électrique*. Université de Batna, 1997.
- [15] Austin Hughes & Bill Drury, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications* (4th ed.). Newnes, Oxford, Royaume-uni 2013.
- [16] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. *Electric Machinery* (6th ed.). McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2002.
- [17] Ouggada Mohamed Salah, Ouahrani Yacine, *Etude et réalisation de la commande d'un moteur alternatif monophasé à base d'un microcontrôleur*, mémoire de fin d'étude, université de Tiaret, 2018.

Références

- [18] Smail Soufiane, *Commande de l'éclairage public et mesure de la température*, mémoire de fin d'étude, université de Biskra, 2015.
- [19] Hamlaoui. Abdelkader et Djebaberi Ali, *Etude et réalisation d'une couveuse simulation à base du PIC 16F876A on utilisant le bus I2C*, mémoire de fin d'étude, université de Khemis-Meliana, 2017.
- [20] Sakli, M. *Régulation Industrielle de Processus, Système de Régulation de niveau d'eau, Interface à base de PIC 16F877, Commande et Régulation avec LabVIEW*. Projet de fin d'études, Université de Gabès, Tunisie. 2007.
- [21] *PIC16F87X Data Sheet 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers*, Microchip Technology Inc., 2001.
- [22] BALI Chaher eddine ABAIDI Hakim. *Réalisation d'un robot mobile avec évitement d'obstacles et trajectoires programmé*, mémoire de fin d'étude, université de Biskra, 2012.
- [23] V.Tourtchine, *Cours de programmation en mikro C. Application pour les microcontrôleurs de la famille PIC*. Université de Boumerdès. 2012.
- [24] Joscelyn Oudry, *la robotique*, édition de l'université de marne-la-vallée, 2000.
- [25] T. Ben haddada, m. hamam, r. mahjoub. *Un robot suiveur de ligne*, projet de fin d'étude, Université Tunis-El Manar, 2009.
- [26] M. KADDOUR, N. SAIDI, *Réalisation d'un robot mobile avec évitement d'obstacles*, Mémoire d'ingénieur d'état en électronique, Université Biskra, Juin 2011.
- [27] Christian Tavernier, *Programmation en C des PIC*, Collection Technique et ingénierie - EEA, 2005.