

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA**

**Faculté des Sciences de Technologie**  
**Département d'Electronique**



**Domaine : Sciences technologiques**  
**Filière : Electronique**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Option : Instrumentation**

**Thème :**

**Commande d'un Onduleur de Tension Monophasée  
à 7 niveaux à base du Microcontrôleur pic16F877A**

**Réalisé par :**

- BENAMRA Khadidja**
- KERROUCHE Nouara**

**Encadré par :**

- Pr. MEZACHE Amar**
- Pr. OUDIRA Houcine**


**Année universitaire : 2020/2021**



## *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord ALLAH tout puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience afin de pouvoir accomplir ce travail.*

*Tout d'abord il faut souligner que ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide de nos encadreurs Pr. Mezache Amar et Pr. Oudira Houcine envers qu'ils nous sont agréable de présenter nos profondes gratitudes et reconnaissances. Ils ont été toujours disponibles pour nous assister dans les différentes situations auxquelles nous nous sommes confrontés. Leurs conseils et remarques depuis les orientations initiales ont été pour nous un encouragement décisif, qu'ils trouvent ici notre remerciements les plus humbles et sincères.*



*Nous tenons à remercier Mr le chef de département de l'électronique et tous les enseignants qui ont contribué à notre cycle de formation et aussi tout le personnel du Hall de Technologie pour leur serviabilité.*




## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

- + A mon cher père ALI et ma chère mère SAKHRIA .*
- + A mes chers frères KAMEL ,NASER, ABDELLAH, ABASS  
et mes chères sœurs KALTOUM, ZOHRA, HAYAT,  
WARDA, ABLA.*
- + A mes amis proches: WIDAD, RACHDA, WRIDA.*
- + A mon meilleur ami KERROUCHE NOUARA*
- + A toute ma famille BENAMRA.*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à  
tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de  
l'humanité.*





## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

- + A mon cher père AISSA et ma chère mère KAMRA .*
- + A mes chers frères MEFTAH et DRADJI et ma sœurs SAIDA.*
- + Spécialement MABROUK.*
- + Aussi a mon meilleur ami BENAMRA KHADIDJA.*
- + A mes amis proches: RACHDA, WIDAD.*
- + A toute ma famille KERROUCHE.*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité*



## Table des matières :

Remerciements

Dédicas

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale .....	1
1. Introduction .....	1
2. Travaux du mémoire .....	2
3. Organisation du mémoire .....	2

### **Chapitre 1**

1.1 Introduction .....	5
1. 2 Convertisseur continue-alternative .....	5
1. 3 Stratégies de commande de l'onduleur monophasé .....	7
1. 4 Onduleurs multi niveaux .....	12
1. 5 Topologies des onduleurs multi niveaux classiques .....	13
1. 5. 1 Onduleur de tension à structure NPC .....	13
1. 5. 2 Onduleur de tension à condensateurs flottants .....	13
1. 6 Elimination des harmoniques de l'onduleur à 7 niveaux .....	15
1. 6. 1 Principe de fonctionnement .....	15
1. 6. 2 Système d'équations à optimiser .....	17
1.7 Conclusion.....	20

### **Chapitre 2**

2.1. Introduction .....	22
2. 2 Identification du PIC .....	22
2. 2. 1 Caractéristiques du PIC 16F877A .....	23
2. 2. 2 Brochage du pic16F877A .....	24
2. 3 Architecture externe et interne .....	25
2. 4 Organisation du pic16F877A .....	26

2. 4. 1 Les ports.....	26
2. 4. 2 Les interruptions .....	27
2. 4. 3 Les TIMERS .....	28
2. 5 Les principaux registres du PIC 16F877A .....	31
2. 5. 1 Le registre « Status » .....	31
2. 5. 2 Le registre « Option » .....	31
2. 5. 3 Le registre « INTCON » ( Interrupt Control ) .....	33
2. 5. 4 Le registre du travail « W » .....	34
2. 5. 5 Le registre PIE1 .....	34
2. 5. 6 Le registre PIR1 .....	34
2. 5. 7 Le registre PIE2 .....	34
2. 5. 8 Le registre PIR2 .....	34
2. 5. 9 Le registre « ADCON0 » .....	34
2. 5. 10 Le registre « ADCON1 ».....	34
2. 5. 11 Le registre « PORTx et TRISx» .....	34
2. 5. 12 Le registre « ADRESL et ADRESH » .....	35
2. 5. 13 Le convertisseur analogique numérique .....	35
2. 6 Conclusion .....	36

### **Chapitre 3**

3. 1 Introduction .....	38
3. 2 Simulations Matlab .....	38
3. 2. 1 Angles de commutation .....	38
3. 2. 2 Formes d'ondes de la tension et du courant .....	41
3. 3 Simulations Proteus .....	46
3. 3. 1 Circuit de commande et de puissance .....	46
3. 3. 2 Résultats de simulations du mode # 1 .....	49
3. 3. 3 Résultats de simulations du mode # 2 .....	49
3. 3. 4 Résultats de simulations du mode # 3 .....	49
3. 4 Conclusion.....	53

### **Chapitre 4**

4. 1 Introduction .....	55
4. 2 Configuration des modules .....	55
4. 2. 1 Module ADC .....	55
4. 2. 2 Configuration du module Timer2 .....	46

4. 2. 3 Configuration du module LCD .....	46
4. 2. 4 Réglage de la tension efficace .....	57
4. 2. 5 Réglage de la fréquence des signaux de commande .....	57
4. 3 Conception matérielle .....	58
4. 3.1 Carte d'alimentations .....	58
4. 3. 2 Carte de puissance.....	60
4. 3. 3 Carte de commande .....	64
4. 3. 4 La charge inductive .....	67
4. 4 Résultats expérimentaux .....	68
4. 4. 1 Visualisation des signaux d'alimentations .....	69
4. 4. 2 Visualisation des signaux de commande .....	69
4. 4. 3 Visualisation des signaux de sortie .....	69
4. 5 Conclusion.....	81

Références

Annexes

Résumé

## Liste des Figures :

### Chapitre 1

Figure. 1. 1 : Schéma de principe de l'onduleur .....	6
Figure. 1. 2 : Onduleur en pont monophasé .....	7
Figure. 1. 3 : Commande adjacente simultanée .....	8
Figure. 1. 4 : Commande décalée .....	9
Figure. 1. 5 : Commande MLI deux niveaux .....	10
Figure. 1. 6 : Commande MLI à trois niveaux .....	11
Figure. 1. 7: Les Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux .....	12
Figure. 1. 8: Onduleur de structure NPC à 3 niveaux .....	13
Figure. 1. 9 : Onduleur à condensateur flottants a 3 niveaux .....	14
Figure. 1. 10 : Onduleur en cascade à 3 niveaux .....	14
Figure. 1. 11: Structure d'onduleur à 7 niveaux.....	15
Figure. 1. 12: Schéma général de l'onduleur monophasé à $n$ niveaux .....	16
Figure. 1. 13 : Organigramme de l'AG à codage réel .....	20

### Chapitre 2

Figure. 2. 1 : Brochage du pic16F877A .....	24
Figure. 2. 2 : Architecture Interne du PIC16F877A .....	25
Figure. 2. 3 : Schéma du Timer 0. ....	29
Figure. 2. 4 : Schéma descriptive du timer 1 .....	30
Figure.2. 5 : Schéma descriptive du timer 2. ....	30
Figure. 2. 6 : Les différents bits de registre Status .....	31
Figure. 2. 7 : Les différents bits de registre Option.....	32
Figure. 2. 8 : Les différents bits de registre INTCON Bit .....	33
Figure. 2. 9 : Schéma fonctionnel du convertisseur analogique numérique.....	35

### Chapitre 3

Figure. 3. 1 : Solutions du système (1.6) par l'algorithme génétique à codage binaire .....	39
Figure. 3. 2 : Schéma blocks de l'onduleur à 7 niveaux monophasé.....	40
Figure. 3. 3 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 25$ , $\alpha_2 = 85$ et $\alpha_3 = 88$ .....	42
Figure. 3. 4 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 11$ , $\alpha_2 = 41$ et $\alpha_3 = 85$ .....	43
Figure. 3. 5 : Signaux de commande pour $\alpha_1 = 9$ , $\alpha_2 = 29$ et $\alpha_3 = 54$ .....	44
Figure. 3. 6 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 9$ , $\alpha_2 = 29$ et $\alpha_3 = 54$ .....	45
Figure. 3. 7 : Circuit électrique conçu pour la simulation Proteus. ....	48

Figure. 3. 8 : Signaux de simulation Proteus pour le cas de l'onduleur à 3 niveaux .....	50
Figure. 3. 9 : Signaux de simulation Proteus pour le cas de l'onduleur à 5 niveaux .....	51
Figure. 3. 10 : Signaux de simulation Proteus pour le cas de l'onduleur à 7 niveaux.....	52

#### **Chapitre 4**

Figure. 4. 1 : Carte des alimentations +15V .....	60
Figure. 4. 2 : Diagramme de pins du driver IR2112 avec le PIC et le bras de l'onduleur .....	62
Figure. 4. 3 : Concept de la carte de puissance. ....	63
Figure. 4. 4 : Concept de la carte de commande .....	66
Figure. 4. 6 : Charge inductive .....	67
Figure. 4. 7 : Le projet réalisé (Assemblage des cartes réalisées).....	68
Figure. 4. 8 : L'une des trois tensions alternatives fournit par les transformateurs .....	70
Figure. 4. 9 : Tension continue à la sortie du filtre. ....	71
Figure. 4. 10 : Signaux de commande complémentaires du premier bras du pont en H (Hin1 & Lin1) .....	71
Figure. 4. 11 : Signaux de commande Hin1, Hin2, Hin3 & Hin4 pour le mode de la commande à 3 niveaux .....	72
Figure. 4. 12 : Signaux de commande Hin1, Hin2, Hin3 & Hin4 pour le mode de la commande à 5 niveaux .....	73
Figure. 4. 13 : Signaux de commande Hin1, Hin2, Hin3 & Hin4 pour le mode de la commande à 7 niveaux .....	74
Figure 4. 14 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 3 niveaux.....	75
Figure 4. 15 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 5 niveaux.....	76
Figure 4. 16 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 7 niveaux.....	77
Figure 4. 17 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 3 niveaux.....	78
Figure 4. 18 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 5 niveaux.....	79
Figure 4. 19 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 7 niveaux.....	80

#### **Liste des tables :**

Table. 1. 1: Table logique de la commande des interrupteurs .....	16
Table. 2. 1 : Caractéristiques du pic16F877A.....	24
Table. 2. 2 : Configuration des bits (PS0 : PS2) de registre option pour effectuer les prés diviseurs.....	32
Table. 3. 1 : Angles en degrés de commutation trouvés par l'algorithme génétique .....	39
Tableau. 3. 2 : Liste du circuit de commande et de puissance à base du pic16F877A .....	47

Table. 3. 3 : Angles de commutation optimaux .....	49
Table. 4. 1 : Carte des alimentations +15V .....	58
Table. 4. 2 : Stratégies de la commande en pleine onde .....	61
Table. 4. 3 : Carte de puissance.....	61
Tableau. 4. 4 : Liste des composants de la carte de commande. ....	64

# *Introduction Générale*

## **1. Introduction**

Dans un contexte où l'économie d'énergie est le mot d'ordre, la qualité de l'énergie est un enjeu qui implique tous les maillons du réseau de distribution d'électricité. Mais au fait, la qualité de l'énergie : qu'est-ce que c'est ?

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs que sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service. La continuité d'alimentation recouvre les coupures ou interruptions du réseau. On distingue les coupures très brèves (entre 1 seconde et 3 minutes) des coupures longues (supérieures à 3 minutes) [1]. La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions impulsionnelles, les variations de fréquence, les papillotements, etc.

Pour palier les problèmes cités ci-dessus dus aux conditions du réseau électrique, on fait appelle à exercer des convertisseurs AC/DC (redresseurs non commandés) puis DC/AC (onduleurs multi-niveaux) d'énergie électrique à l'aide des dispositifs électroniques menés par des commandes électroniques sophistiquées. En plus, s'agissant des mesures correctives, on recourt à l'utilisation de filtres actifs ou passifs anti-harmoniques pour résoudre les problèmes de pollutions harmoniques assez courantes sur le réseau. Une autre mesure: la mise en place de variateurs de fréquence ou de démarreurs progressifs qui permettent un appel progressif de charge sur les machines industrielles [1].

À l'heure actuelle, l'Electronique de puissance est plutôt utilisée pour la moyenne et la forte puissance. La commande des interrupteurs statiques est réalisable grâce aux systèmes numériques comme microcontrôleurs, DSP, dSPACE et FPGA. Le concept d'utilisation des onduleurs à plusieurs niveaux de tensions a été breveté par un chercheur du MIT, il y a une trentaine d'années [2]. Dans les domaines de la moyenne et de la forte puissance, les convertisseurs multi-niveaux, avec des topologies naturelles ou hybrides, présentent des options maintenant largement éprouvées. A part leurs applications citées précédemment, on

peut les utiliser pour des objectifs comme : les variateurs de vitesse des machines électriques, le domaine médical, les alimentations de secours, les alimentations sans interruption, les filtres actifs, la soudure, les alimentations des lampes fluorescentes basse consommation et des lampes dites « à cathode froide », ou les applications des systèmes photovoltaïques. Les onduleurs multi-niveaux sont connus pour la bonne qualité du courant en raison de diminution des harmoniques par rapport à un onduleur classique. De plus, un onduleur multi-niveaux inclut un bon comportement en compatibilité électromagnétique (CEM), surtout vis-à-vis de la tension homopolaire, et une diminution des contraintes aux bornes des interrupteurs statiques. En revanche, cette technique impose l'utilisation d'un plus grand nombre de semi-conducteurs de puissance, une plus grande complexité de la commande et l'équilibrage de tensions aux bornes des condensateurs [2]. Pour diminuer le THD (Totale Harmonic Distortion) des grandeurs de sortie, on peut utiliser les trois méthodes suivantes :

- ✚ Augmentation de la fréquence de découpage ;
- ✚ Augmentation de l'inductance de la charge ;
- ✚ Augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur.

## 2. Travaux du mémoire

Les objectifs de ce mémoire sont les suivants :

- ✚ Etude de principe de fonctionnement de l'onduleur de tension monophasé à 7 niveaux.
- ✚ Elaboration du code CCSPICC pour la génération en temps réel des signaux de commande à partir d'une fréquence de référence et d'un réglage désiré de la tension efficace.
- ✚ Obtention et comparaison des résultats de simulations Matlab et Proteus.
- ✚ Réalisation de l'onduleur à 7 niveaux après un branchement de trois étages distincts à savoir le circuit d'alimentations, le circuit de puissance et le circuit de commande à base du microcontrôleur pic16F877A.
- ✚ Etude de conformité des résultats expérimentaux mesurés à ceux obtenus en simulations Matlab et Proteus.

## 3. Organisation du mémoire

Le manuscrit est organisé comme suit :

- ✚ **Le Chapitre 1** présente en premier temps les onduleurs multi-niveaux et nous énumérerons également leurs types de base. Puis, il aborde le principe de la

commande MLI pré-calculée appliquée aux onduleurs monophasés. Ensuite, la commande par élimination d'harmoniques est expliquée pour le réglage de la fréquence et de la valeur efficace de la tension ondulée à la sortie de l'onduleur monophasé à 7 niveaux. Le THD et la technique d'optimisation des angles sont présentées à la fin de ce chapitre.

- ✚ **Le Chapitre 2** définit d'une manière générale les micromoteurs avec leurs familles et leurs classifications. Après, il montre les caractéristiques et les modules du microcontrôleur pic16F877A que nous allons l'utiliser en simulation Proteus et en pratique dans les chapitres 3 & 4 respectivement. Ce type de microcontrôleur nous permet d'obtenir une commande en pleine onde avec des fréquences variables. Le module PWM n'est pas utilisé dans la commande de l'onduleur multi-niveaux.
- ✚ **Le Chapitre 3** a pour objectif d'effectuer les simulations Matlab et Proteus de trois modes de fonctionnement à savoir la commande à 3 niveaux, la commande à 5 niveaux et la commande à 7 niveaux à partir de la théorie de la structure d'onduleur multi-niveaux présentée dans le chapitre 1. Ceci est accompli après la création de nos codes Matlab et CCS. L'optimisation des angles de commutation est une tâche indispensable dans ce chapitre menant une atténuation du taux de distorsion harmoniques.
- ✚ **Le Chapitre 4** valide pratiquement la théorie et les résultats de simulations trouvés dans le Chapitre 3. A cet effet, cette phase englobe deux parties essentielles; la réalisation des différentes cartes (i.e., Alimentations, puissance et commande) et les mesures en temps réel des signaux via un oscilloscope numérique. Quelques configurations importantes des modules du microcontrôleur pic16F877A sont aussi expliquées au début de ce chapitre. Une conclusion et des commentaires des résultats expérimentaux trouvés ici sont également exprimés.
- ✚ Une **conclusion générale** qui résume notre projet est présentée.
- ✚ Enfin, deux **Annexes A et B** sont donnés à la fin de ce mémoire qui présentent les codes Matlab et CCSPICC dédiés pour la commande de l'onduleur monophasé à 7, 5 ou 3 niveaux.

# Chapitre 1

## Généralités sur les Onduleurs Multi-niveaux

### Résumé :

*Dans ce chapitre, nous définissons les onduleurs multi-niveaux et nous énumérerons également leurs types de base. Nous allons aussi aborder le principe de la commande MLI pré calculée appliquée aux onduleurs monophasés. Puis, la commande par élimination d'harmoniques est expliquée pour le réglage de la fréquence et de la valeur efficace de la tension ondulée à la sortie de l'onduleur monophasé à 7 niveaux. Le THD et la technique d'optimisation des angles sont présentées à la fin de ce chapitre.*

- **Sommaire du chapitre :**

1. 1 Introduction.
1. 2 Convertisseur continue-alternative.
1. 3 Stratégies de commande de l'onduleur monophasé.
1. 4 Onduleurs multi niveaux.
1. 5 Topologies des onduleurs multi niveaux classiques.
1. 6 Elimination des harmoniques de l'onduleur à 7 niveaux.
1. 7 Conclusion.

## 1. 1 Introduction

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande (voir [Figure. 1. 1](#)). Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou PWM (Pulse With Modulation) [3, 4].

Dans les dernières décennies, l'évolution croissante des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs de puissance a incité le marché des convertisseurs statiques de puissance spécialement dédiés aux applications de moyennes et de fortes puissances, l'apparition ainsi de nouvelle topologie des convertisseurs technologies utilisées en développement et en fabrication des interrupteurs de puissance. Tels que les onduleurs multi-niveaux qui ont contribué à l'évolution à conversion d'énergie électrique dans les applications haute, moyenne et basse puissance, car ils présentent les avantages d'une faible distorsion harmonique, et une plus grande efficacité par rapport aux onduleurs classiques [6, 8].

Le concept d'onduleur multi-niveaux avait commencé en 1975 pour surmonter l'inconvénient des onduleurs à deux niveaux (onduleur de source de tension qui produisent une sortie à deux niveaux, c'est-à-dire +E et -E ayant plus de contenu d'ondulation) et aussi réduire les ondulations de la tension de sortie. Ce type d'onduleur (à deux niveaux) présente quelques inconvénients le plus remarquable est que la tension de sortie est très riche en harmoniques, ce qui entraîne un mauvais fonctionnement de la charge, et engendre quelques inconvénients tels que l'échauffement supplémentaire, la diminution du facteur de puissance et le vieillissement rapide de la machine [14]. Un autre inconvénient est que ces onduleurs sont limités en tension et en puissance. Afin de palier à ces limitations, les onduleurs multi-niveaux ont été introduits dans le domaine des puissances fortes [14, 18].

## 1. 2 Convertisseur continue-alternative

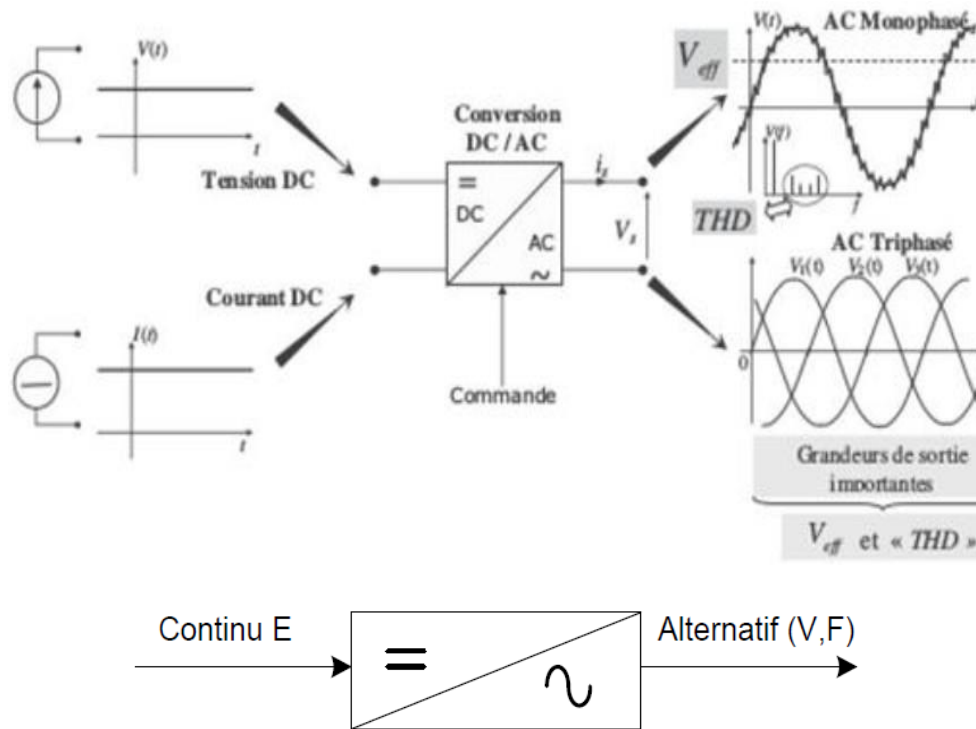
La conversion continue-alternative permet, à partir d'un signal de tension continue, d'obtenir un signal de tension alternative, d'amplitude et de fréquence désirée. Cette conversion est assurée par un convertisseur appelé onduleur figure (I.1). Ce dernier est utilisé:

- Soit pour fournir des tensions ou courants de fréquences et d'amplitudes variables.

**Exemple :** C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable.

- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

**Exemple :** alimenter un système alternatif à partir d'une source continue (batterie).



**Figure. 1. 1 :** Schéma de principe de l'onduleur [18]

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminée ou permettant des performances recherchées, on distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [11, 16].

On distingue deux types d'onduleurs ; Onduleur non autonome et onduleur autonome. Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont Gratz) qui, en commutation naturelle assisté par le réseau auquel il est raccordé, permet un Fonctionnement en onduleur. Les thyristors sont commandés juste à la fermeture et la Commutation est naturelle contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs alternatifs de très forte puissance [3, 6].

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des interrupteurs dans ce cas nous commandons la fréquence, la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types [3, 9] :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

On peut aussi classer les onduleurs selon la nature du signal de sortie (monophasé, Triphasé...) et la forme du montage symétrique des interrupteurs de puissance. (À pont Complet et en demi pont).

### 1. 3 Stratégies de commande de l'onduleur monophasé

Dans ce type d'onduleur (Figure. 1.2), on utilise quatre interrupteurs. Coté commande : il existe trois types

- Onduleur à commande pleine d'onde (commande symétrique).
- Onduleur à commande décalée.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) [16].

Pour que la source de tension  $E$  ne soit pas mise en court-circuit et que le récepteur de courant il ne soit pas mis en circuit ouvert, il faut que

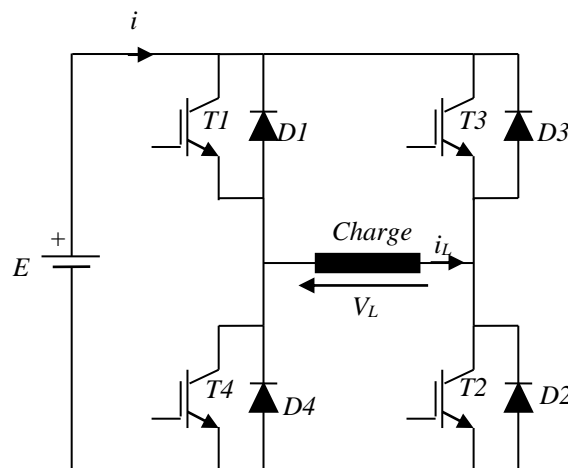


Figure. 1. 2 : Onduleur en pont monophasé

Les interrupteurs  $k_1$  et  $k_4$  d'une part,  $k_2$  et  $k_3$  d'autre part soient complémentaires. C'est-à-dire ( $I_{T1} = \bar{I}_{T4}$ ) et ( $I_{T3} = \bar{I}_{T2}$ ). Via des commandes adoptées aux interrupteurs, on peut obtenir une tension de sortie à deux niveaux (commande adjacente), trois niveaux (commande disjointe),

MLI deux niveaux et MLI trois niveaux. On considère ci-dessous une charge inductive. Dans ce cas, le courant de charge,  $i_L$ , ne s'inverse pas rapidement et la tension soit une onde carrée.

### a) Commande à pleine onde à deux niveaux

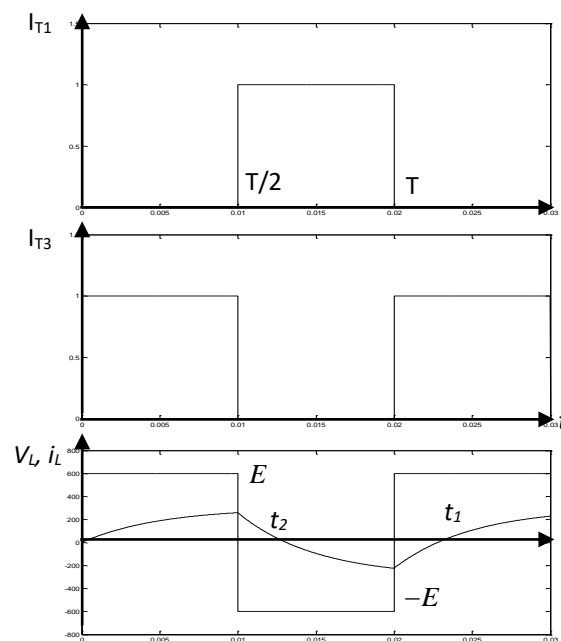
A partir de la **Figure. 1. 2**, la commande est effectuée pendant une période de temps,  $T$

\* Pour  $0 < t < T/2$ , on amorce  $T_1$  et  $T_2$

$i_L$  augmente exponentiellement, en fin d'alternance,  $V_L > 0$  et  $i_L > 0$ ,  $V_L = E$  et  $i = i_L$

\* Pour  $T/2 < t < T$ , on amorce  $T_3$  et  $T_4$

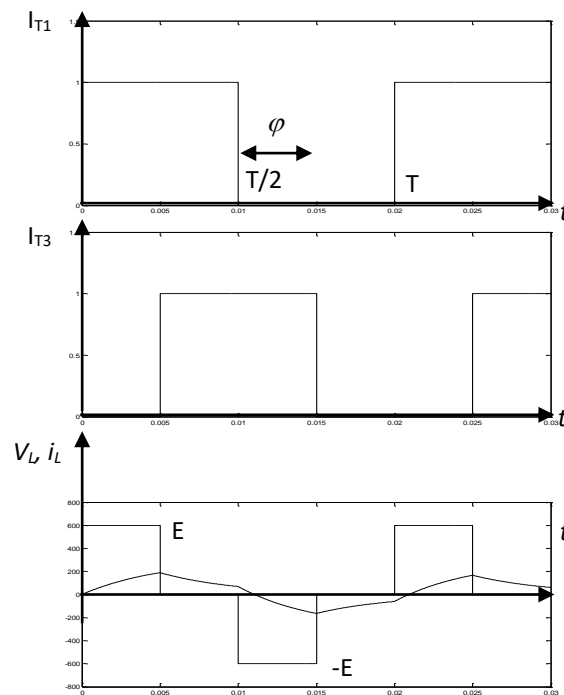
Les transistors  $T_3$  et  $T_4$  sont déclenchés pour bloquer  $T_1$  et  $T_2$ . La tension de charge s'inverse mais le courant reste positif alors  $D_3$  et  $D_4$  prennent le seul chemin du courant de charge jusqu'à  $i_L = 0$ . La source,  $E$  est raccordée à la charge avec une tension inversée, et l'énergie inductive stockée dans la charge est ramenée à la source jusqu'à  $i_L = 0$ ,  $V_L = -E$  et  $i = -i_L$ . Les résultats de simulation de cette commande sont présentés par la **Figure. 1.3**. Dès cet instant d'annulation,  $T_3$  et  $T_4$  conduisent et alimentent la charge et le courant de charge décroît exponentiellement. Les séquences de conduction sont :  $(T_1, T_2)$  puis  $(D_3, D_4)$  puis  $(T_3, T_4)$  puis  $(D_1, D_2)$  puis  $(T_1, T_2)$



**Figure. 1. 3** : Commande adjacente simultanée

### b) Commande à pleine onde à 3 niveaux

On peut aussi commander la tension de charge en introduisant des intervalles nulles dans l'onde carrée. En avançant les instants respectifs d'amorçage de la paire complémentaire des transistors  $T_1, T_4$  comparativement aux  $T_2, T_3$ . Les séquences de conduction sont :  $(T_1, T_2)$  puis  $(D_3, T_1)$  puis  $(D_3, D_4)$  puis  $(T_3, T_4)$  puis  $(T_4, D_2)$  puis  $(D_1, D_2)$  puis  $(T_1, T_2)$ . On a toujours  $(I_{T_1} = \bar{I}_{T_4})$  et  $(I_{T_3} = \bar{I}_{T_2})$ . Les résultats de simulation de cette commande sont présentés par la **Figure. 1.3**.



**Figure. 1. 4** : Commande décalée

### c) Commande MLI à deux niveaux [12, 13]

Les signaux de commande sont générés comme mentionnés par la **Figure. 1. 5**.

Avec :

$S_d(t)$  : signal sinusoïdal basse fréquence désiré

$V_d$  : amplitude désirée

$\omega_d$  : fréquence désirée

$\text{Tri}(t)$  : signal triangulaire de haute fréquence

$V_p$  : amplitude de la porteuse

$\omega_p$  : fréquence de la porteuse

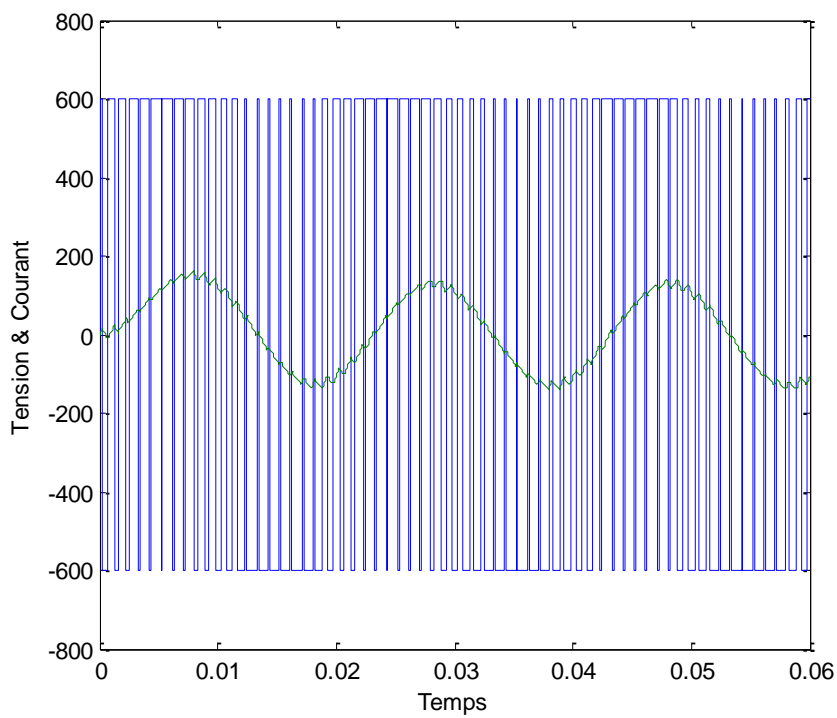
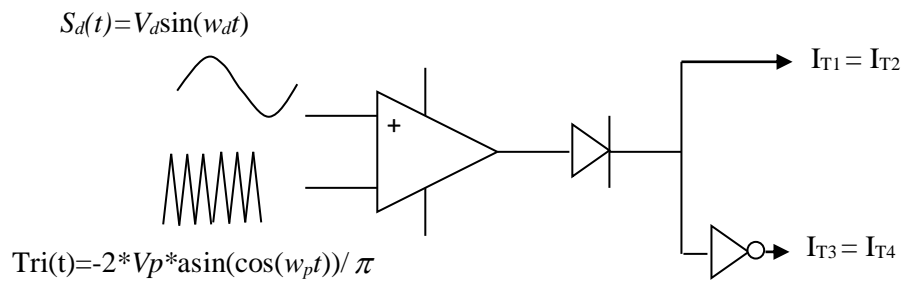


Figure. 1. 5 : Commande MLI deux niveaux

*d) Commande MLI à 3 niveaux*

Les signaux de commande sont générés comme mentionnés par la [Figure. 1. 6](#).

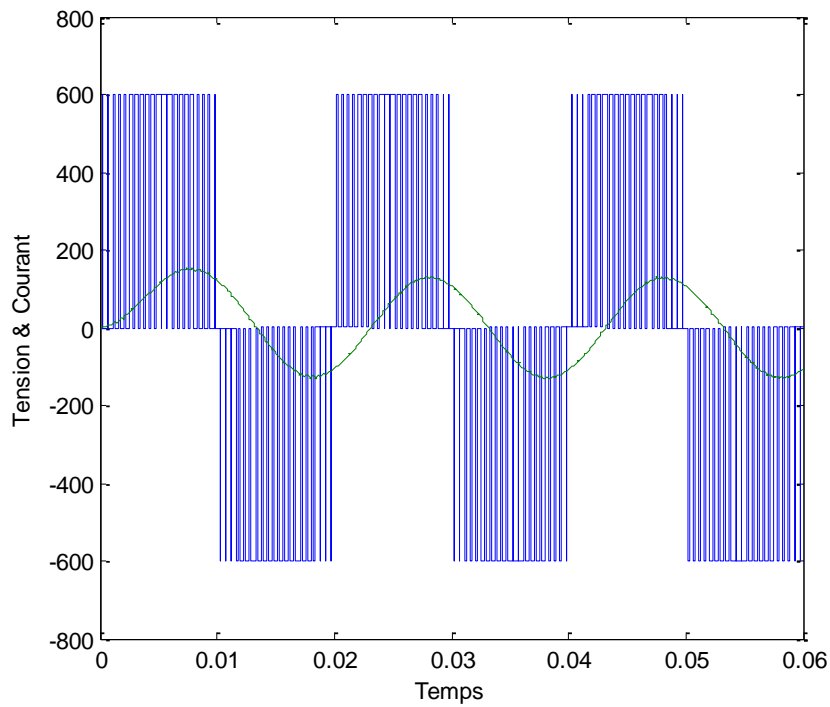
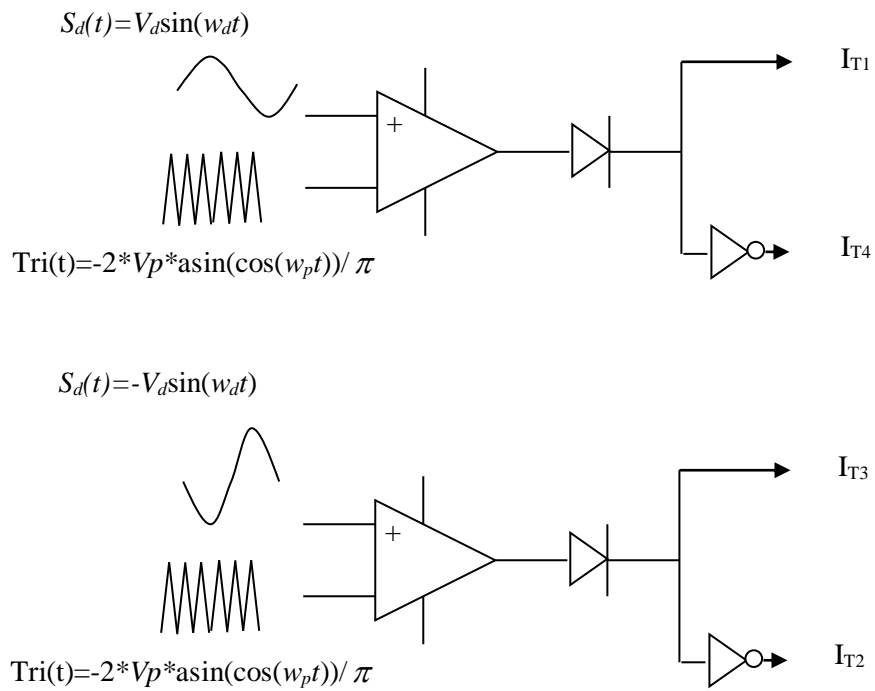


Figure. 1. 6 : Commande MLI à trois niveaux

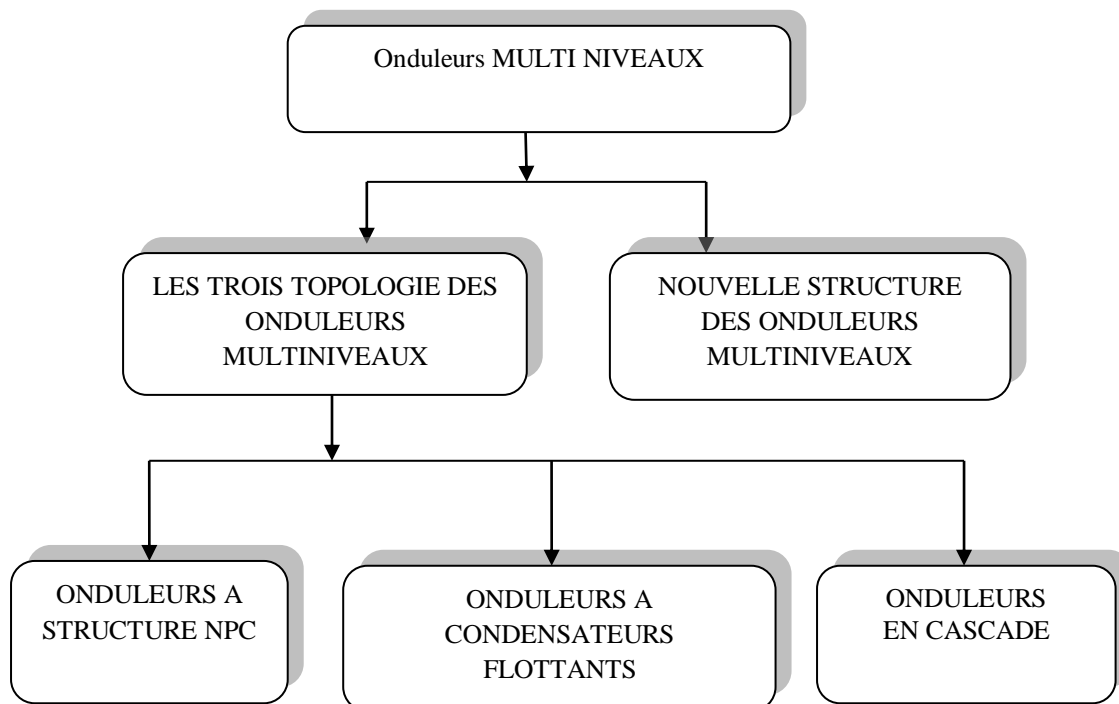
## 1. 4 Onduleurs multi niveaux

Par définition, l'onduleur de tension multi niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. En général, les onduleurs de tension multi niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets. Les principaux avantages de cette approche sont récapitulés comme suit :

1. La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans influencer sur la tension statique et dynamique.
2. Les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi niveau sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux.
3. Les formes d'onde des grandeurs de sorties d'un onduleur multi veau limitent naturellement le problème des sur tensions dues aux réflexions sur les câbles, qui peuvent en dommage les enroulements du moteur.

Puisque le choix de la meilleure topologie d'onduleurs multi niveaux, pour chaque application donnée, n'est pas souvent clair, ces derniers font sans cesse l'objet et de nombreuses publications [18].

La **Figure. 1. 7** représente les topologies des onduleurs multi niveaux les plus récentes.



**Figure. 1. 7:** Les Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

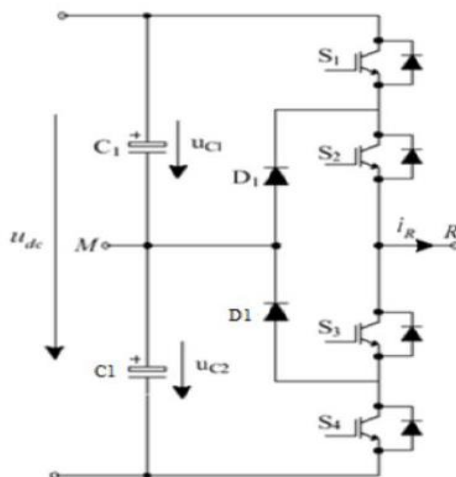
## 1. 5 Topologies des onduleurs multi niveaux classiques

L'objectif de cette partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi niveaux a s'avoir la topologie a structure NPC , la topologie a condensateurs flottant et la topologie en cascade, on va prendre ci-dessous par exemple le cas de trois niveaux [16, 18].

### 1. 5. 1 Onduleur de tension à structure NPC

La première topologie la plus pratique pour un onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutra-Point-Clampe). Elle a été proposée, la première fois en 1981, par Nabae. L'onduleur NPC à trois niveaux est donné par la **Figure. 1.8**.

Cette topologie peut être généralisée et les principe employée dans la topologie d'onduleur a trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologie avec n'importe quel nombre de niveaux et aussi elle exige des diode de bouclage a ivresse de commutation élevée qui doivent être capables de supporter le courant de la pleine charge [18].



**Figure. 1. 8:** Onduleur de structure NPC à 3 niveaux

### 1. 5. 2 Onduleur de tension à condensateurs flottants

La topologie de l'onduleur multi niveau a condensateurs flottants (flying capacitor multilevel inverter), donnée par la **Figure. 1. 9**, a été proposée en 1992 .elle est considérée comme l'alternative la plus sérieuse a la topologie de l'onduleur NPC. L'avantage de cette topologie est l'élimination du problème des diodes de bouclages qui se présentent dans les topologie des onduleurs NPC multi niveaux .en plus, cette topologie limite naturellement les contraintes en tension imposés aux composants de puissance et introduit des états commutation

additionnelles qui peuvent être utilisées pour aider à maintenir l'équilibre des charges dans les condensateurs.

La topologie de l'onduleur à condensateurs flottants a assez d'états de commutation pour contrôler l'équilibre des charges dans chaque bras d'onduleur ayant n'importe quel nombre de niveaux, ce qui n'est pas le cas dans l'onduleur NPC [14, 18].

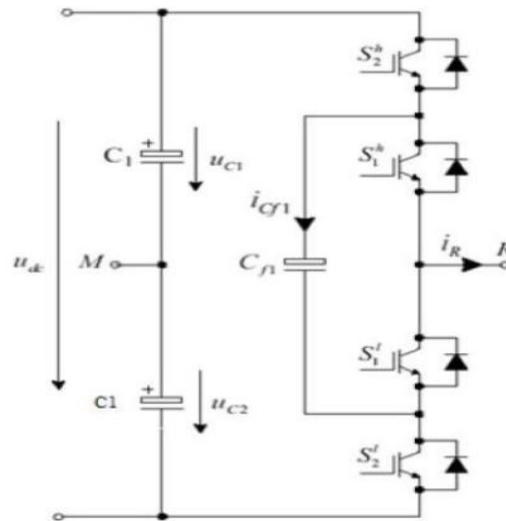


Figure. 1. 9 : Onduleur à condensateur flottants a 3 niveaux

La topologie de l'onduleur multi niveau à condensateurs flottants peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC. De plus, il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circulent à travers de ces condensateurs.

### I. 5. 3 Onduleur de tension en cascade

La topologie de l'onduleur multi niveau en cascade est donnée par la Figure. 1. 10.

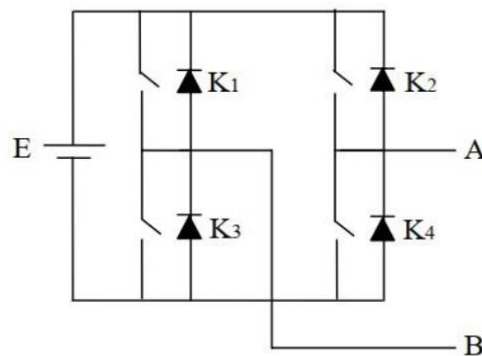


Figure. 1. 10 : Onduleur en cascade à 3 niveaux

L'onduleur multi niveau en cascade est une nouvelle structure de convertisseur d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.

### 1. 6 Elimination des harmoniques de l'onduleur à 7 niveaux

L'idée de cette stratégie a été introduite pour la première fois par Trumbull en 1967, puis développée par Patel et Hoft en 1973. Son principe consiste d'abord à formuler l'expression générale de l'amplitude des harmoniques, en se basant sur le développement en série de Fourier. L'expression obtenue est une fonction des angles,  $i$  de commutation. Ensuite, un système d'équations non linéaire est obtenu, en imposant la valeur désirée du fondamental et en annulant certains harmoniques. La résolution de ce système non linéaire permet de déterminer les angles  $\theta_i, i=1, \dots, n$  par conséquent les instants de commande des interrupteurs [5].

#### 1. 6. 1 Principe de fonctionnement

Pour obtenir un onduleur à 7 niveaux, on doit installer trois sources d'alimentation DC, comme montré dans la Figure. 1. 11. Ce genre d'assemblage est considéré pour chaque deux niveau supplémentaire comme montré dans la Figure. 1. 12 représentant un modèle général de la structure d'onduleur multi niveau [5].

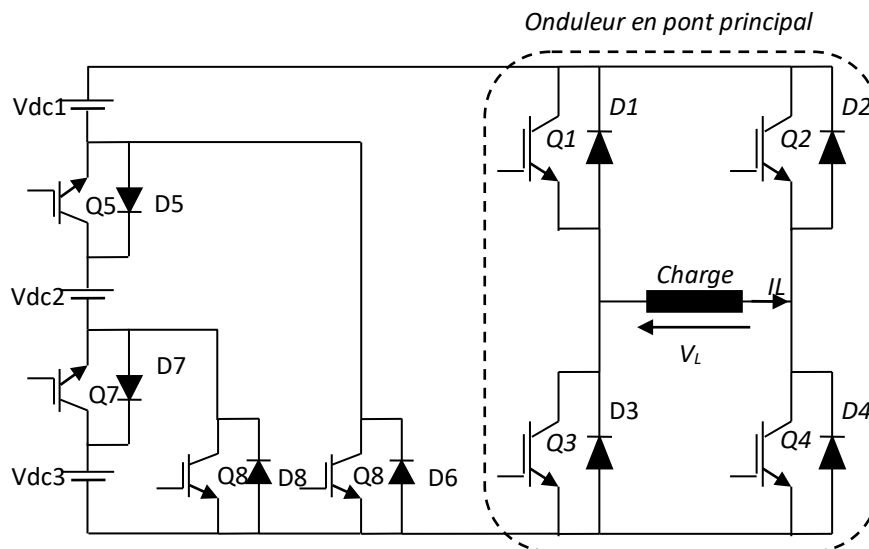
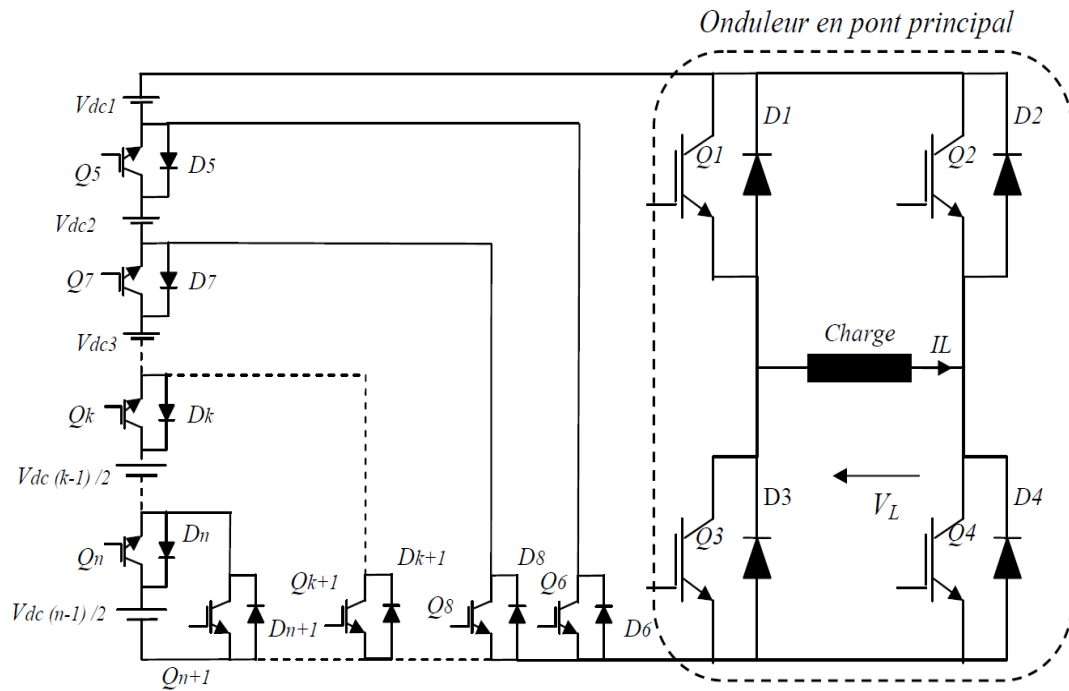


Figure. 1. 11: Structure d'onduleur à 7 niveaux.



**Figure. 1. 12:** Schéma général de l'onduleur monophasé à  $n$  niveaux

Le nombre de sources devient  $(n-1)/2$  et le nombre de commutateurs auxiliaires est,  $n+1$ , où  $n$  est le nombre de niveaux. Le principe de fonctionnement de l'onduleur de la **Figure. 1. 11** caractérisé par les états des interrupteurs sont donnés dans la **Table. 1. 1**.

**Table. 1. 1:** Table logique de la commande des interrupteurs

Q1	Q2	Q5	Q7	$V_L$	$I_L$	Mode de fonction
O	O	-	-	O	+ou -	Récupération d'énergie selfique
F	F	-	-	O	+ou -	Récupération d'énergie selfique
F	O	F	O	$+ V_{DC1}+V_{DC2}$	+	Récepteur
O	F	F	F	$-V_{DC1}+V_{DC2}+V_{DC3}$	-	Récepteur
F	O	F	F	$+V_{DC1}+V_{DC2}+V_{DC3}$	+	Récepteur
O	F	F	O	$- V_{DC1}+V_{DC2}$	-	Récepteur
F	O	O	O	$+ V_{DC1}$	+	Génératrice
O	F	O	O	$-V_{DC1}$	-	Génératrice

**N.B :** F : Interrupteur fermé et O : Interrupteur ouvert.

### 1. 6. 2 Système d'équations à optimiser

Les séries de Fourier sont des séries de fonctions périodiques. L'objectif est de décomposer un signal périodique en somme de sinus et de cosinus. Ceci peut être exprimé d'une manière mathématique par la relation suivante [5]:

$$)1.1( \quad V_L(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2n\pi f_0 t) + b_n \sin(2n\pi f_0 t))$$

Les paramètres  $a_0$ ,  $a_n$  et  $b_n$  appelés: coefficients de Fourier, on note aussi que  $f_0$  est la fréquence du fondamental (fréquence des signaux de commande). On sait que la tension de sortie est une fonction périodique impaire, les coefficients,  $a_0$ ,  $a_n$  et  $b_n$  sont déterminés en considérant la symétrie par rapport à une demi-période et à un quart de période.

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt = 0 \\ a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(2n\pi f_0 t) dt = 0 \quad \forall n > 0 (n \text{ pair ou impair}) \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(2n\pi f_0 t) dt = 0 \quad \forall n > 0 (n \text{ pair}) \end{cases} \quad (1.2)$$

L'équation (1.2) devient

$$\begin{aligned} V_L(t) &= \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \sin(n\omega t) \\ &= \underbrace{b_1 \sin(\omega t)}_{\text{Fondamentd}} + \underbrace{b_3 \sin(3\omega t) + b_5 \sin(5\omega t) + \dots}_{\text{Harmoniques}} \end{aligned} \quad (1.3)$$

avec  $n = 1, 3, 5, \dots$

A partir de (1.2),  $b_n$  devient

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_L(t) \sin(2n\pi f_0 t) dt \\ &= \frac{4E}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) + \dots] \end{aligned} \quad (1.4)$$

Dans le cas de l'onduleur à 7 niveaux, nous avons seulement la possibilité de commander ou varier l'amplitude du fondamental  $b_1 = V_1$  et d'éliminer les amplitudes des harmoniques d'ordre 3 et 5, i.e.,  $b_3 = 0$  et  $b_5 = 0$ . D'où

$$\begin{cases} b_1 = V_1 = \frac{4E}{\pi} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3)] \\ b_3 = 0 = \frac{4E}{3\pi} [\cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3)] \\ b_5 = 0 = \frac{4E}{5\pi} [\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3)] \end{cases} \quad (1.5)$$

Le système d'équation (1.5) est réécrit comme suit

$$\begin{cases} \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) = \frac{\pi V_1}{4E} = m \\ \cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3) = 0 \\ \cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) = 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

Le système (1.6) a une caractéristique non-linéaire. A cet effet, les méthodes d'optimisation numérique sont appelées. Dans la littérature, on trouve plusieurs approches de minimisation de la fonction d'erreur quadratique nommée la fonction objective ou la fonction fitness donnée par

$$\begin{aligned} Fitness(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = & \left( \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) - \frac{\pi V_1}{4E} \right)^2 + (\cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3))^2 \\ & + (\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3))^2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

Pour tester la performance d'onduleur, le THD (Total Harmonics Distorsion) est considéré comme une mesure de pollution harmonique sur le signal de sortie. Etant donné les coefficients de Fourier (amplitudes des harmoniques et le fondamental) [5]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} H_n^2}}{H_1} \quad (1.9)$$

Où  $H_1$  est l'amplitude de la composante fondamentale, dont la pulsation est  $\omega_0$ .  $H_n$  est l'amplitudes de l'harmonique de rang  $n$ , dont la pulsation est  $n\omega_0$ . D'où

$$H_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{K=1}^N \cos(n\alpha_K) \quad (1.10)$$

$$H_1 = \frac{4E}{\pi} \sum_{K=1}^N \cos(\alpha_K) \quad (1.11)$$

et

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{K=1}^N \cos(n\alpha_K) \right)^2}}{\sum_{K=1}^N \cos(\alpha_K)} \quad (1.12)$$

### 1. 6. 3 Optimisation par l'algorithme génétique

L'algorithme génétique (AG) a montré une large application pour l'optimisation des systèmes physiques et électrique très complexe. La plupart des AGs utilisent les opérateurs génétiques binaires. Les AGs à codage binaire (ou à codage classique) sont moins efficaces dans le cas où ils seraient appliqués à des problèmes multidimensionnels de grande précision ou des problèmes continus. Dans ce type de codage, les variables (les gènes) dans le chromosome sont en binaires (une chaînes composée des "0" et des "1") ce qui nécessite à chaque fois de décoder ces chaînes pour calculer leurs valeurs réelles avant de calculer les valeurs de la fonction coût. Cette conversion se fait alors pour chaque individu et à chaque génération menant un temps de calcul considérable. En effet, dans les AGs à codage réel, les variables réelles apparaissent directement dans le chromosome et sont exploitées par des opérateurs génétiques simples et spéciaux (expressions mathématiques). Dans ce type de codage, les opérateurs de la recombinaison génétique agissent d'une façon différente à celle de codage binaire [14].

Soit :

$r \in [0,1]$  est un nombre aléatoire (suit la distribution uniforme),

$t=0, 1, 2, \dots, T_g$  est le numéro de la génération.

$S_w$  et  $S_v$  sont les chromosomes sélectionnés par l'opérateur génétique,

$k \in \{1, 2, \dots, N\}$  est la position d'un élément dans le chromosome.

$v_k^{max}$  et  $v_k^{min}$  sont respectivement les limites inférieure et supérieure de l'élément dont la position dans le chromosome est  $k$ .

La description génétique d'un AG à codage réel peut être exécutée selon les fonctions suivantes:

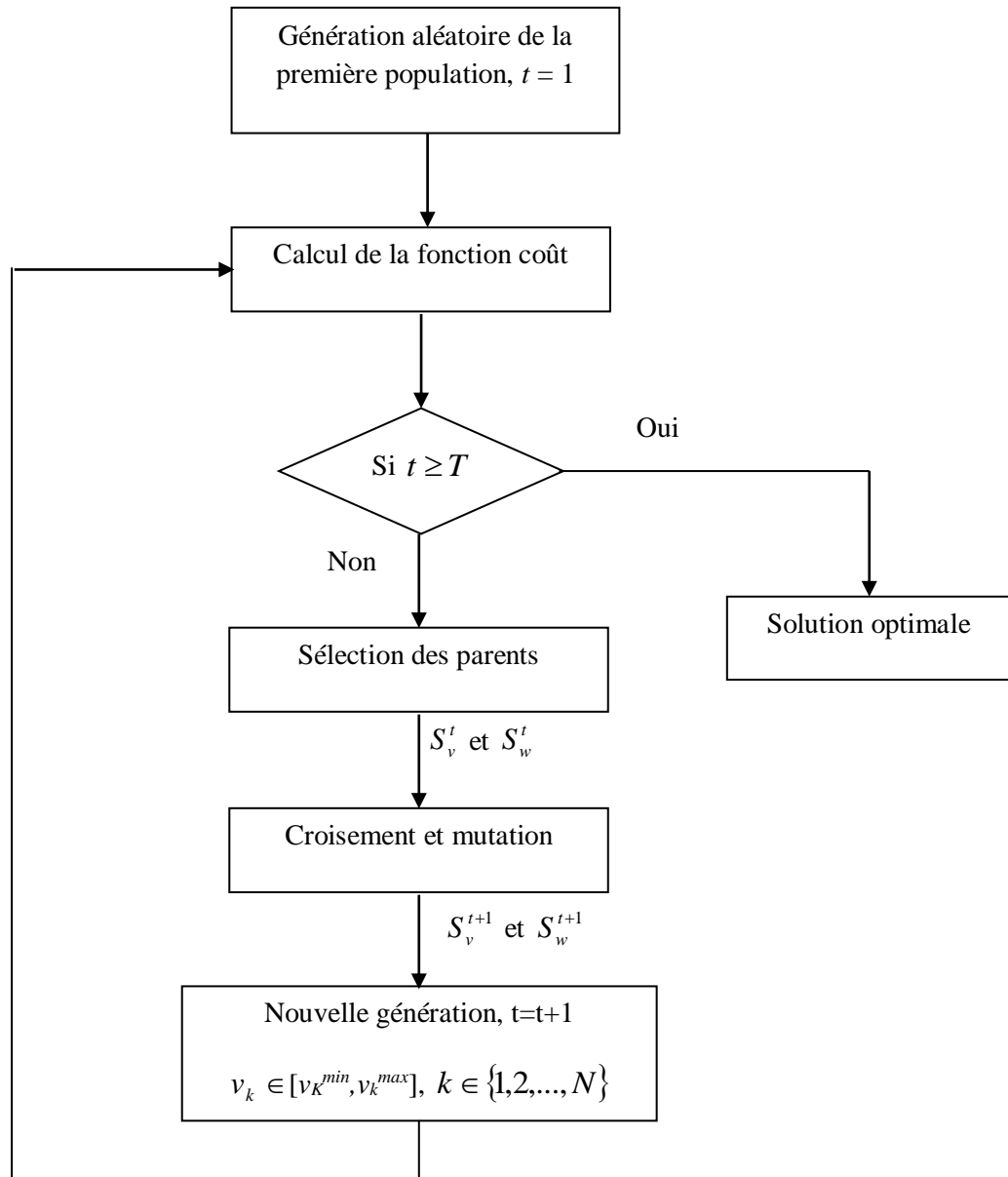


Figure. 1. 13 : Organigramme de l'AG à codage réel

## 1. 7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes topologies des onduleurs multi niveaux, nous avons étudié l'onduleur à sept niveaux de la nouvelle structure avec sa commande à pleine onde. Ensuite, le système d'équations à optimiser est donné et l'expression explicite du calcul de THD à partir des mesures des signaux de sortie est aussi présentée. Enfin, nous avons présenté l'algorithme génétique à codage réel pour trouver les angles optimaux de commutation. Dans le Chapitre 2 on va présenter le microcontrôleur PIC16F877A qui représente l'organe principal de notre plate forme matérielle.

# Chapitre 2

## Microcontrôleur PIC16F877A

### Résumé :

*Dans ce chapitre, nous définissons d'une manière générale les micromoteurs avec leurs familles et leurs classifications. Après, nous intéressons à montrer les caractéristiques et les modules du microcontrôleur pic16F877A que nous allons l'utiliser en simulation Proteus et en pratique dans les chapitres 3 & 4 respectivement. Ce type de microcontrôleur nous permet d'obtenir une commande en pleine onde avec des fréquences variables. Le module PWM n'est pas utilisé dans la commande de l'onduleur multi-niveaux.*

- **Sommaire du chapitre :**

- 2. 1 Introduction.
- 2. 2 Identification du PIC.
- 2. 3 Architecture externe et interne.
- 2. 4 Organisation du PIC16F877A.
- 2. 5 Les principaux registres du PIC 16F877A.
- 2. 6 Conclusion.

## 2.1. Introduction

Un microcontrôleur est un circuit intégré qui rassemble les éléments essentiels d'un ordinateur : processeur, mémoires « mémoire morte pour le programme, mémoire vive pour les données », unités périphériques et interfaces d'entrées-sorties. Les Microcontrôleurs se caractérisent par un plus haut degré d'intégration, une plus faible Consommation électrique « quelques milliwatts en fonctionnement, quelques nano watts en Veille », et un coût réduit par rapport aux microprocesseurs polyvalents utilisés dans les ordinateurs personnels. Par rapport à des systèmes électroniques à base de microprocesseurs et autres composants séparés, les microcontrôleurs permettent de diminuer la taille, la consommation électrique et le coût des produits. L'utilisation de l'informatique dans le domaine d'industrie pour la commande et le contrôle.

Des systèmes, les microcontrôleurs sont fréquemment utilisés dans les systèmes embarqués, comme les contrôleurs des moteurs automobiles, les télécommandes, les appareils de bureau, l'électroménager, les jouets, la téléphonie mobile, etc [6, 7].

Les PICs sont des composants RISC (*Reduce Instructions Construction Set*), ou encore composant à jeu d'instructions réduit. L'avantage est que plus on réduit le nombre d'instructions, plus facile et plus rapide en est le décodage, et plus vite le composant fonctionne [10].

La famille des PICs est subdivisée en 3 grandes familles : La famille **Base-Line**, qui utilise des mots d'instructions de 12 bits, la famille **Mid-Range**, qui utilise des mots de 14 bits (et dont font partie du pic16F877A), et la famille **High-End**, qui utilise des mots de 16 bits.

Les PICs sont des composants STATIQUES, Ils peuvent fonctionner avec des fréquences d'horloge allant du continu jusqu'à une fréquence max spécifique à chaque circuit. Un pic16F877A peut fonctionner avec une horloge allant du continu jusqu'à 20MHz [10].

## 2. 2 Identification du PIC

Pour identifier un PIC, on utilise simplement son numéro. Les 2 premiers chiffres indiquent la catégorie du **PIC**, **16** indique un **PIC Mid-Range**.

Vient ensuite parfois une lettre **L** : Celle-ci indique que le **PIC** peut fonctionner avec une plage de tension beaucoup plus tolérante. Ensuite, on trouve :

- ✓ **C** indique que la mémoire programme est une **EPROM** ou plus rarement une **EEPROM**
- ✓ **CR** pour indiquer une mémoire de type **ROM**.

✓ **F** pour indiquer une mémoire de type **FLASH** [15].

Nous allons maintenant s'intéresser à la structure interne du pic16F877A, avec lequel nous avons travaillé. Le pic16F877A est un microcontrôleur de la MICROCHIP, fait partie intégrante de la famille des **Mid-Range** (16) dont la mémoire programme est de type flashe (F) de type 877A et capable d'accepter une fréquence d'horloge maximale de 20MHz [17].

### 2. 2. 1 Caractéristiques du PIC 16F877A

Le microcontrôleur pic16F877A est un circuit intégré à 40 broches dont les caractéristiques générales peuvent être résumées comme suit :

- Vitesse d'exécution allant jusqu'à 20MHz permettant l'exécution rapide du programme, une instruction en cycle d'horloge de 200ns.
- Une mémoire vive « **RAM** » de 368 octets, répartie sur 4 banque 0, 1, 2, 3 « mémoire de données ».
- Une mémoire **EEPROM** pour sauver des paramètres de 256 octets « mémoire de données ».
- Une mémoire morte « **ROM** » mémoire programme de type FLASH de 8ko « 1mot=14bit ».
- **33** Entrées/Sorties programmables multiplexés.
- 8 entrées « canaux » du module de conversion analogique numérique 10 bits.
- **2** Comparateurs analogiques programmables avec une référence de tension, programmable également.
- Conservation des informations en mémoire vive jusqu'à 1.5v.
- Une plage d'alimentation de 2.0V à 5V.
- Module de capture **MLI** programmable permettant de capturer un signal « logique » en fonction du temps, ou d'offrir un signal **MLI (PWM)**.
- De nouvelles fonctionnalités, comme les gestions de ports « Série ».

Le pic16F877A parmi les plus puissants microcontrôleurs de la gamme « Mid-range » chez Micro-chip.

Dans notre travail, on s'intéresse au convertisseur analogique/numérique et au Timer0 pour la génération de l'interruption interne qui nous aide à déterminer l'angle de retard souhaité pour la commande [10].

Voici la table récapitulative des principales caractéristiques du 16F877A (voir **Table. 2. 2**) :

Table. 2. 1 : Caractéristiques du pic16F877A

Caractéristiques	16F877A
Broches	40
I/O	33
Flashe	8KO
EPPROM	256 O
CAN	7
PWM	2 DE 10 BITS
TIMER	3
Comparateurs	2
Interruption	14
Oscillateur	28 MHz MAX
Port série	USRT/SSP/PSP

### 2. 2. 2 Brochage du pic16F877A

Le diagramme des pins est éclairé dans la Figure. 2. 1. Chaque signification des pins dans cette figure désigne une application particulière.

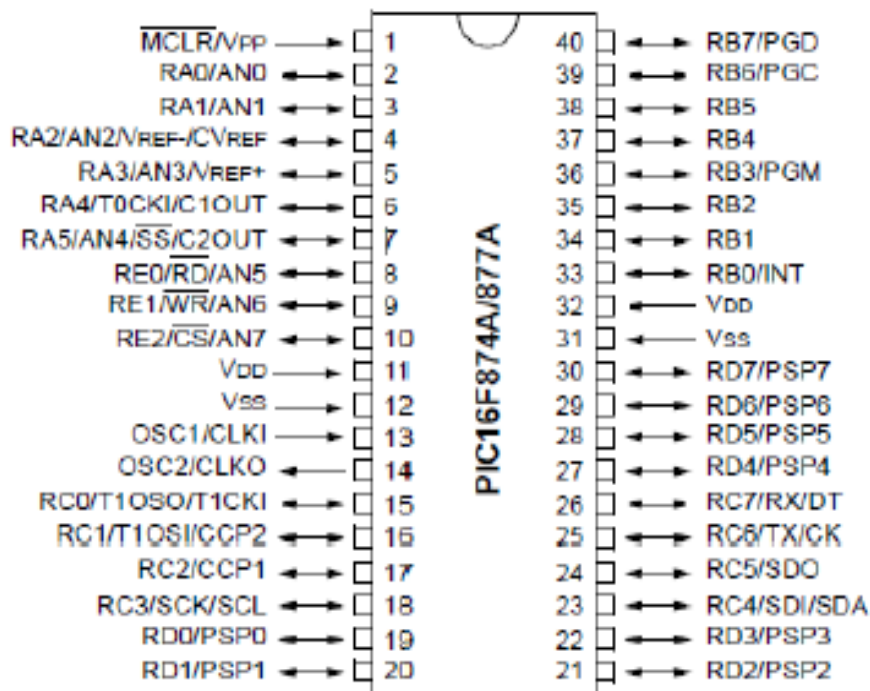
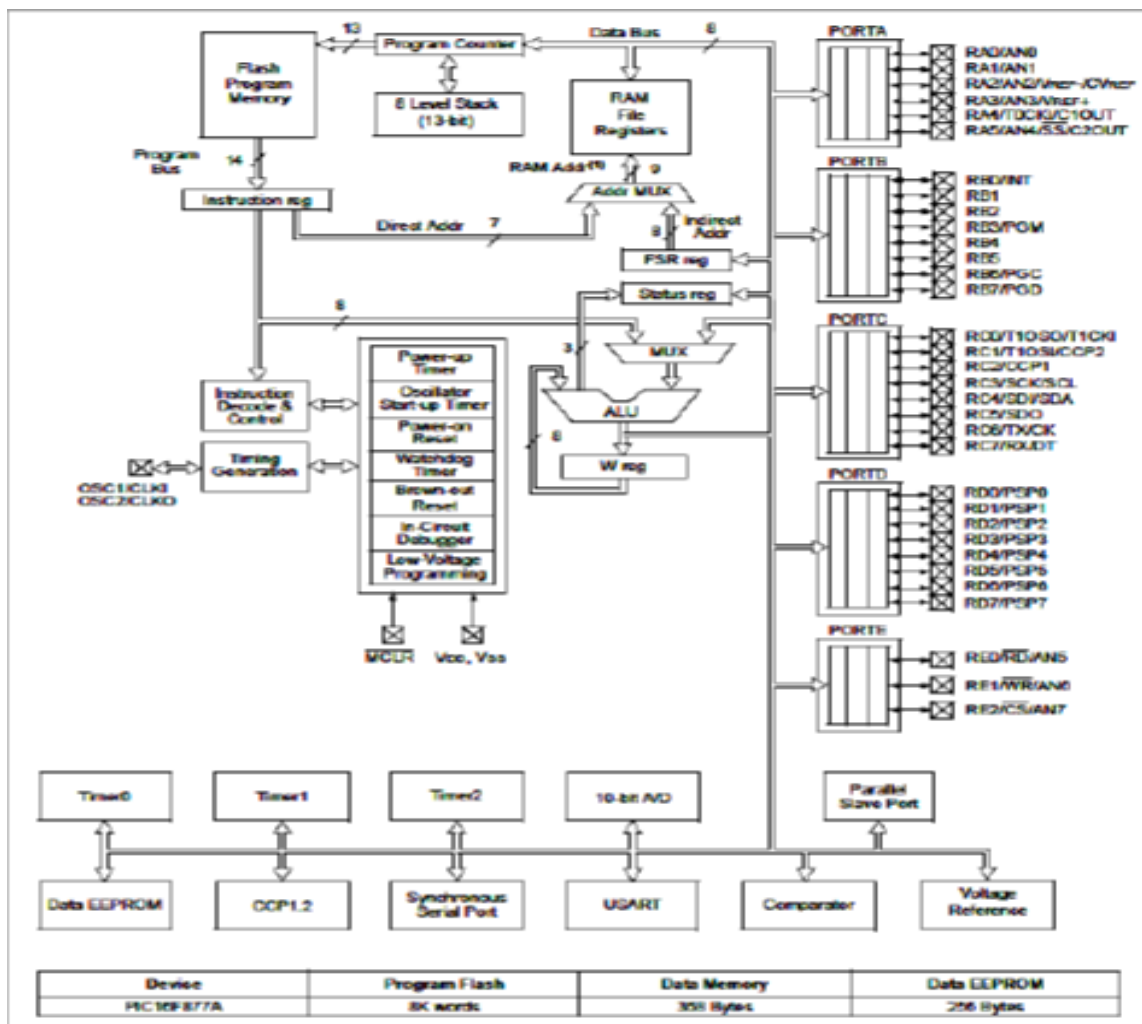


Figure. 2. 1 : Brochage du pic16F877A

### 2. 3 Architecture externe et interne

- Le boîtier du pic16F877 décrit par la **Figure. 2. 1** comprend 40 pins : 33 pins d'entrées/sorties, 4 pins pour l'alimentation, 2 pins pour l'oscillateur et un pin pour le reset (MCLR).
- La broche MCLR sert à initialiser le  $\mu\text{C}$  en cas de la mise sous tension, de remise à zéro externe, de chien de garde et en cas de la baisse de tension d'alimentation.
- Les broches VDD et VSS servent à alimenter le PIC.

On remarque qu'on a 2 connections "VDD" et 2 connections "VSS". La présence de ces 2 pins s'explique pour une raison de dissipation thermique. Les courants véhiculés dans le pic sont loin d'être négligeables du fait des nombreuses entrées/sorties disponibles [17, 18]. L'architecture interne du pic16F877A est montrée par la **Figure. 2. 2**.



**Figure. 2. 2 :** Architecture Interne du PIC16F877A [17]

## 2. 4 Organisation du pic16F877A

La mémoire du pic16F877A est divisée en 3 parties. Pour mieux la connaître regardons de près son schéma fonctionnel.

- **La mémoire programme** : La mémoire programme est constituée de 8K mots de 14 bits. c'est dans cette zone que nous allons écrire notre programme.
- **La mémoire EEPROM** : La mémoire EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory), est constituée des 256 octets que nous pouvons lire et écrire depuis notre programme .Ces octets sont conserver des paramètres semi-permanents.
- **La mémoire RAM** : La mémoire RAM est celle que nous allons sans cesse utiliser . Toutes les données qui y sont stockée sont perdues lors d'une coupure de courante.

La mémoire RAM disponible du pic176F877A est 368 octets. Elle est répartie de la manière suivante :

- ✓ 80 octets en banque 0, adresses 0x20 à 0x6F
- ✓ 80 octets en banque 1, adresses 0xA0 à 0xEF
- ✓ 96 octets en banque 2, adresses 0x110 à 0x16F
- ✓ 96 octets en banque 3, adresses 0x190 à 0x1EF
- ✓ 16 octets communs aux 4 banques, soit 0x7F = 0XF0 à 0xFF  
0x17F = 0X1F0 à 0x1FF [7].

Le pic16F877A comporte quatre ports entrées / sorties :

### 2. 4. 1 Les ports

#### a) Port A

C'est un port d'entrée sortie, il contient 6pin d'entrées /sorties de RA0 à RA5 répartie sur deux registres : le registre port A et le registre tris A. Le bit 6 et7 ne sont pas implémente, ils seront lus comme 0.

Au moment de reset on doit forcer une valeur dans le registre ADCON1, pour pouvoir utiliser ce port en entrée/sortie de type générale.

#### b) Port B

Le pin RB0 qui, en configuration d'entrée, est de type << trigger de Schmitt >> quand elle est utilisée en mode interruption << INT >>. La lecture simple de RB0 se fait, elle, de façon tout à fait classique, en entrée de type TTL.

**c) Port C**

C'est un port qui n'existait pas sur le pic16F84. Voyons donc, toujours au niveau de son utilisation classique, quel que soit les caractéristiques.

La mise sous tension du PIC, ou reset, force tous les bits utiles de TRISx à 1, ce qui place toutes les pins en entrée.

**d) Port D**

Ce port n'est présent que sur le pic16F877. Il fonctionne d'une façon identique aux autres, dans son mode de fonctionnement général.

Le registre TRISD comporte donc les 8 bits de direction.

Les 8 pins I/O, en mode entrée, sont de type « trigger de Schmitt ».le fonctionnement de ce port dépend de la valeur placée dans TRISE, qui concerne, a première vue, le port E. Mais au moment de mise sous tension, la valeur placée dans TRISE configure le PORTD en port I/O de type général.

**e) Port E**

Ce port n'est présent que sur les pic16F877. Il ne comporte que 3 pins, RE0, RE1 et RE2 contrairement aux autres ports, les bits non concernés de TRISE sont implémentées pour d'autres fonctions.

On remarque que les pins REx peuvent être utilisés comme pins d'entrées analogiques. C'est le registre ADCON1 qui détermine si ce port sera utilisé comme port I/O ou comme port analogique.

Au niveau électronique, les REx utilisées en entrée seront, une fois de plus, du type « trigger de Schmitt » [7].

**2. 4. 2 Les interruptions**

Le pic16F877A possède 15 sources d'interruptions. Les plus importantes à connaître, car ce sont les plus utilisées en pratique, sont :

- TMR0I : Dépassement du TIMER0 « débordement le passage de 255 à 0 »
- TMR1I : Dépassement du TIMER1 « débordement le passage de 65535 à 0 »
- TMR2I : Contenu du PR2 du TIMER2 « débordement le passage de la valeur qui contient dans le registre PR2 à 0 »
- INT : Interruption extérieure RB0
- RBI : Changement d'état du port B « RB7 : RB4 »

- PSPI : Lecture / Ecriture sur le port parallèle
- ADI : Convertisseur Analogique / Numérique
- TXI : Emission sur le port RS232
- RCI : Réception sur le port RS232
- SSPI : Bus SPI / I<sup>2</sup>C
- CCP1I : Capture / Compare / PWM
- CCP2I : Capture / Compare / PWM
- EEI : Ecriture dans EEPROM
- CMI : Comparateur
- BCLI : Collision sur Bus [7].

### 2. 4. 3 Les TIMERS

Un Timer est un registre interne au microcontrôleur, celui-ci s'incrémente aux grés d'une horloge, ce registre peut servir par exemple pour la réalisation des temporisations ; ou bien encore pour faire du comptage (par l'intermédiaire d'une broche spécifique : RA4/TOKI). Le pic16F877A possède trois timers sur 8 bits (il compte jusqu'à 256) configurable par le logiciel CCSPICC par exemple [7].

#### a) TIMER0

Il peut être incrémenté par des impulsions extérieures via la broche « TOCKI/RA4 » ou par l'horloge interne « Fosc/4 » [7]. L'architecture de Timer 0 est schématisée par la **Figure. 2. 3**.

#### b) TIMER1

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.

#### ❖ Le mode Timer

Dans ce mode, TMR1 est incrémenté par l'horloge système Fosc/4 éventuellement pré-divisée.

Le bit de synchronisation n'a pas d'effet car l'horloge Fosc/4 est toujours synchronisée sur l'horloge système.

### ❖ 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 T1OSCEN à 1 et de brancher un quartz entre les broches RC0 et RC1.

En mode compteur, RC0 et RC1 sont automatiquement configurés en entrée, on n'a pas besoin de configurer les bits TRISC, 0 et TRISC, 1 [7, 10]. Le schéma descriptif du timer 1 est donné par la Figure. 2. 4.

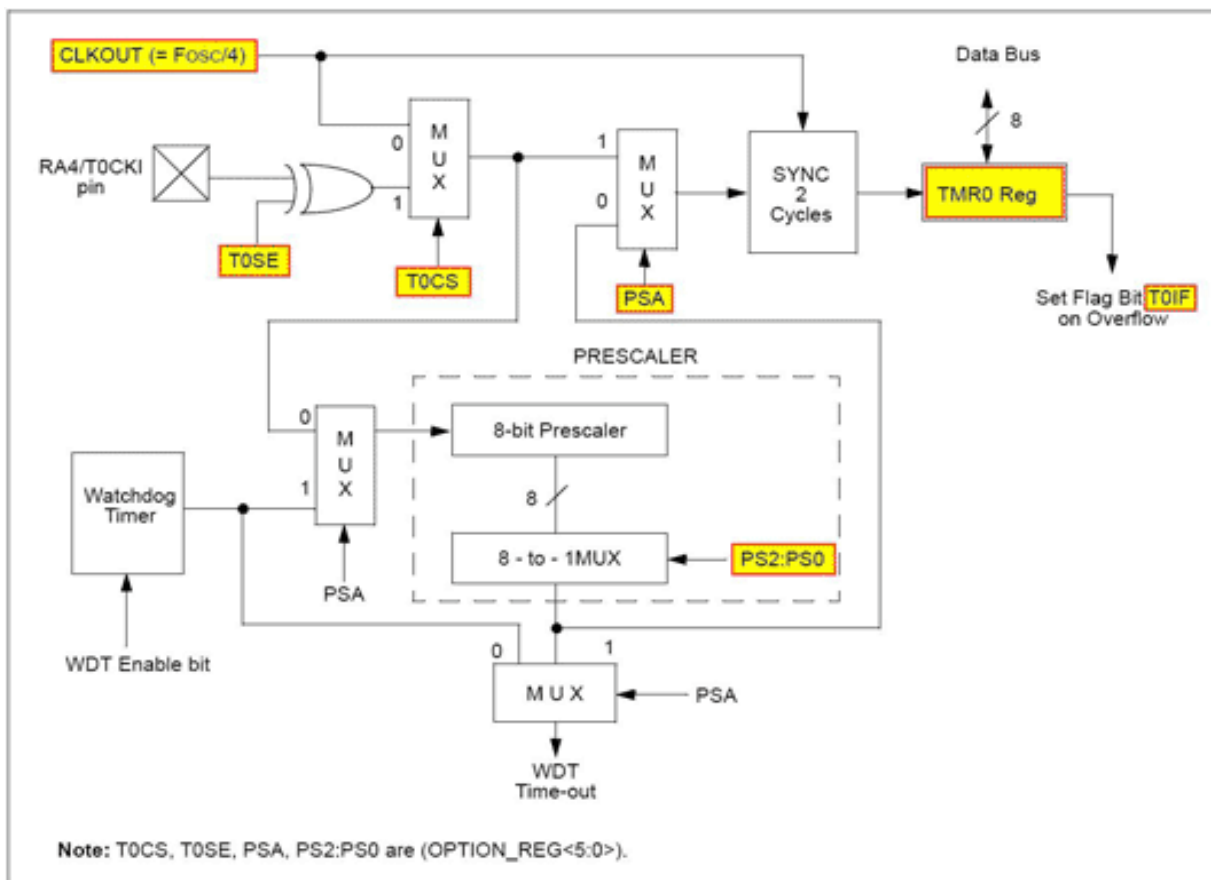


Figure. 2. 3 : Schéma du Timer 0.

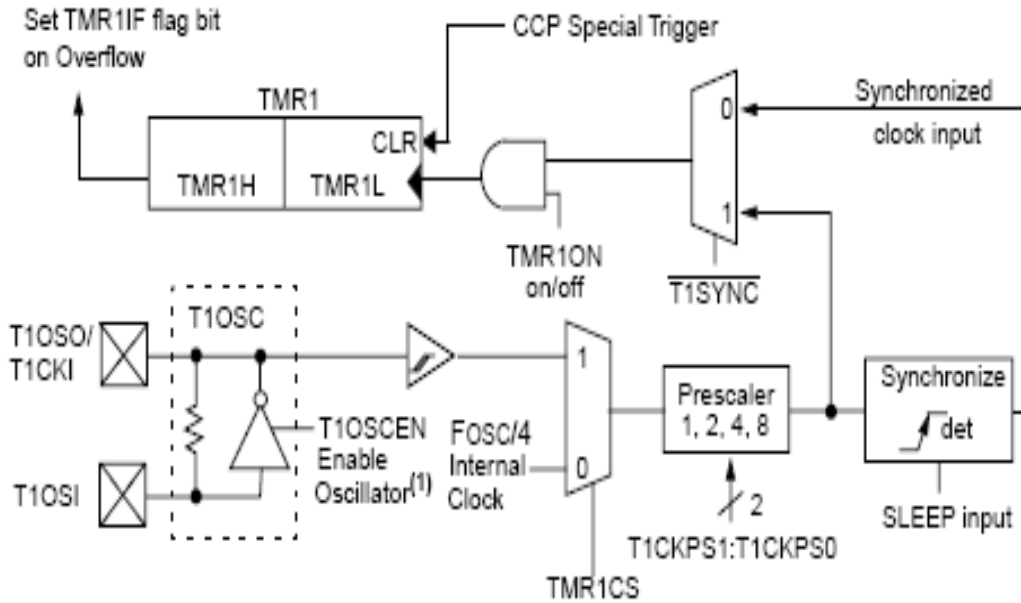


Figure. 2. 4 : Schéma descriptive du timer 1

c) **TIMER2**

Il est incrémenté par l'horloge interne, celle-ci peut être pré divisée. Tous ces timers peuvent déclencher une interruption interne, s'ils ont été autorisés [7, 15]. Le schéma descriptif du timer 1 est donné par la Figure. 2. 5.

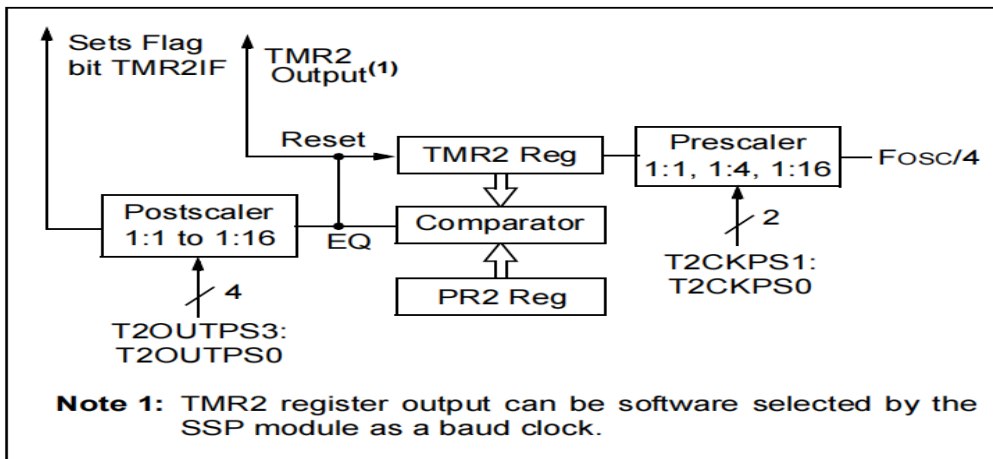
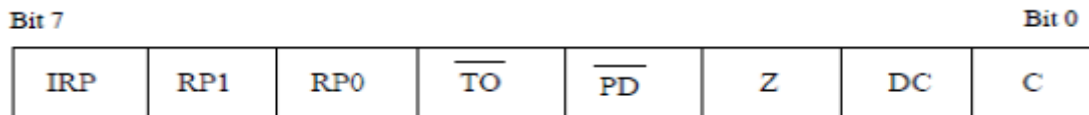


Figure.2. 5 : Schéma descriptive du timer 2.

## 2. 5 Les principaux registres du PIC 16F877A

### 2. 5. 1 Le registre « Status »

C'est un registre dont chaque bit a une signification particulière. Il est principalement utilisé pour tout ce qui concerne les tests. On accède indifféremment à ce registre par une quelconque de ces 4 adresses (voir [Figure. 2. 6](#)).



**Figure. 2. 6 :** Les différents bits de registre Status

**Au reset :** STATUS = 00011XXX

**Bit 7 :** IRP = permet la sélection des pages en adressage indirect. Pour la PAGE 0 (de 00 à 7F) et la PAGE 1 (de 80 à FF) ce bit doit être laissé à "0". Mis à "1" il permettra d'atteindre la PAGE 3 (de 100 à 17F) et la PAGE 4 (de 180 à 1FF).

**Bits 6 et 5 :** RP1 et RP0 permettent la sélection des pages en adressage direct.

**Bit 0:** C : Carry (report), ce bit est en fait le 9ème bit d'une opération. Par exemple, si une addition de 2 octets donne une valeur >255, ce bit sera positionné à 1.

**Bit 1:** DC : Digit Carry, ce bit est utilisé principalement lorsque l'on travaille avec des nombres BCD : il indique un report du bit 3 vers le bit 4.

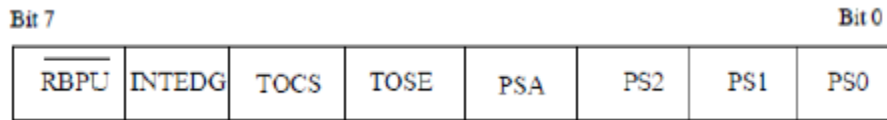
**Bit 2:** Z : Zéro, ce bit est positionné à 1 si le résultat de la dernière opération vaut 0.

**Bit 3:** PD : Power down, indique quel événement a entraîné le dernier arrêt du PIC (instruction sleep ou dépassement du temps du watchdog).

**Bit 4:** TO : Time-Out bit, ce bit indique (si 0), que la mise en service suit un arrêt provoqué par un dépassement de temps ou une mise en sommeil. Dans ce cas, PD effectue la distinction [7, 17].

### 2. 5. 2 Le registre « Option »

Ce registre en lecture écriture permet de configurer le pré diviseurs du Timer et du Watchdo, la source du Timer, le front des interruptions et le choix du Pull up sur le Port B (voir [Figure. 2. 7](#)).



**Figure. 2. 7 :** Les différents bits de registre Option

**Au reset :** OPTION = 11111111

**Bit 7 :** RBP $\overline{\text{U}}$  = Pull up Enable bit on Port B. 1 = Pull up désactivé sur le Port B. 0 = Pull up activé.

**Bit 6 :** INTEDG = Interrupt Edge select bit. 1 = Interruption si front montant sur la broche PB0/IRQ (pin 6). 0 = Interruption si front descendant sur PB0/IRQ.

**Bit 5 :** TOCS = Timer TMR0 Clock Source select bit. 1 = L'horloge du Timer est l'entrée PA4/Clk (pin 3). 0 = Le Timer utilise l'horloge interne du PIC.

**Bit 4 :** TOSE = Timer TMR0 Source Edge select bit. 1 = Le Timer s'incrémente à chaque front montant de la broche PA4/Clk. 0 = Le Timer s'incrémente à chaque front descendant de la broche PA4/Clk.

**Bit 3 :** PSA = Prescaler Assignment bit. 1 = Le pré diviseur est affecté au Watchdog.. 0 = Le pré diviseur est affecté au Timer TMR0..

**Bits 2 à 0 :** PS2 PS1 PS0 = Prescaler Rate Select bits [7, 15].

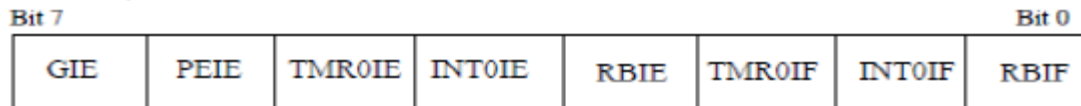
La configuration des bits (PS0 :PS2) de registre option pour effectuer les prés diviseurs est donnée par la [Table. 2. 2](#).

**Table. 2. 2 :** Configuration des bits (PS0 : PS2) de registre option pour effectuer les prés diviseurs

PS2	PS1	PS0	Prédiv TIMER	Prédiv Watchdo
0	0	0	2	1
0	0	1	4	2
0	1	0	8	4
0	1	1	16	8
1	0	0	32	16
1	0	1	64	32
1	1	0	128	64
1	1	1	256	128

### 2. 5. 3 Le registre « INTCON » (Interrupt Control)

Ce registre en lecture écriture permet de configurer les différentes sources d'interruption (voir [Figure. 2. 8](#)).



**Figure. 2. 8 :** Les différents bits de registre INTCON Bit

**Au reset :** INTCON = 0000000X

**Bit 7 :** GIE = Global Interrupt Enable bit. 1 = Autorise toutes les interruptions non masquées.  
0 = Désactive toutes les interruptions.

**Bit 6 :** PEIE = Peripheral Interrupt Enable bit. 1 = Autorise les interruptions causées par les périphériques. 0 = Désactive les interruptions causées par le périphériques.

**Bit 5 :** TMR0IE = Timer TMR0 Overflow Interrupt Enable bit. 1 = Autorise les interruptions du Timer TMR0. 0 = Désactive les interruptions du Timer TMR0.

**Bit 4 :** INT0IE = RB0/Int Interrupt Enable bit. 1 = Autorise les interruptions sur la broche : PB0/IRQ (pin6). 0 = Désactive les interruptions sur la broche : PB0/IRQ (pin6).

**Bit 3 :** RBIE = RB Port Change Interrupt Enable bit. 1 = Autorise les interruptions par changement d'état du Port B (PB4 à PB7). 0 = Désactive les interruptions par changement d'état du Port B (PB4 à PB7).

**Bit 2 :** TMR0IF = Timer TMR0 Overflow Interrupt Flag bit. 1 = Le Timer à débordé. Ce flag doit être remis à zéro par programme. 0 = Le Timer n'a pas débordé.

**Bit 1 :** INT0IF = RB0/Int Interrupt Flag bit. 1 = Une interruption sur la broche PB0/IRQ (pin 6) est survenue. 0 = Pas d'interruption sur la broche PB0/IRQ (pin 6).

**Bit 0 :** RBIF = RB Port Change Interrupt Flag bit. 1 = Quand au moins une entrée du port B (de PB4 à PB7) a changé d'état. 0 = Aucune entrée de PB4 à PB7 n'a changé d'état.

**NB:** Ce flag doit être remis à zéro par programme. Ceci n'est possible qu'après une lecture du Port B [6, 7].

#### 2. 5. 4 Le registre du travail « W »

C'est un registre fondamental, utilisé par les pics pour réaliser toutes sortes de calculs. La destination d'un résultat peut en général être un emplacement RAM (f) ou le registre de travail (W) [6, 7].

#### 2. 5. 5 Le registre PIE1

Ce registre contient les bits individuels d'autorisation pour les Interruptions des Périphériques. Le bit 6 d'INTCON (PEIE) doit être mis à "1" pour autoriser une Quelconque IT de périphérique.

#### 2. 5. 6 Le registre PIR1

Ce registre contient les FLAG associés aux interruptions des périphériques. Ces Flag passent à "1" quand une IT correspondante survient et que le bit d'autorisation est bien positionné. Ces Flag doivent être remis à "0" par Soft.

#### 2. 5. 7 Le registre PIE2

Ce registre contient les bits individuels d'autorisation pour les Interruptions de l'EEPROM en écriture.

#### 2. 5. 8 Le registre PIR2

Ce registre contient le flag pour les Interruptions de l'EEPROM en écriture Bit 7.

#### 2. 5. 9 Le registre « 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.

#### 2. 5. 10 Le registre « 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.

#### 2. 5. 11 Les registre « PORTx et TRISx »

Tous les ports sont pilotés par deux registres :

- ✚ Le registre de PORTx, si le PORTx ou certaines lignes de PORTx sont configurées en sortie, ce registre détermine l'état logique des sorties.

- ✚ Le registre TRISx, c'est le registre de direction. Il détermine si le PORTx ou certaines lignes de port sont en entrée ou en sortie. L'écriture d'une 1 logique correspond à une entrée (1 comme Input) et l'écriture d'une 0 logique correspond à une sortie (0 comme Output). Les registres TRISx appartiennent à la banque 1 des SFR.

### 2. 5. 12 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.

### 2. 5. 13 Le convertisseur analogique numérique

L pic16F877A travaille avec un convertisseur analogique/numérique qui permet un échantillonnage sur 8 bits, 10 bits ou 16bits (voir [Figure. 2. 9](#)). Il se compose de :

- Un multiplexeur analogique 5 voies « pic16F877A ».
- Un échantillonneur bloqueur. Un convertisseur analogique numérique de 10 bits.

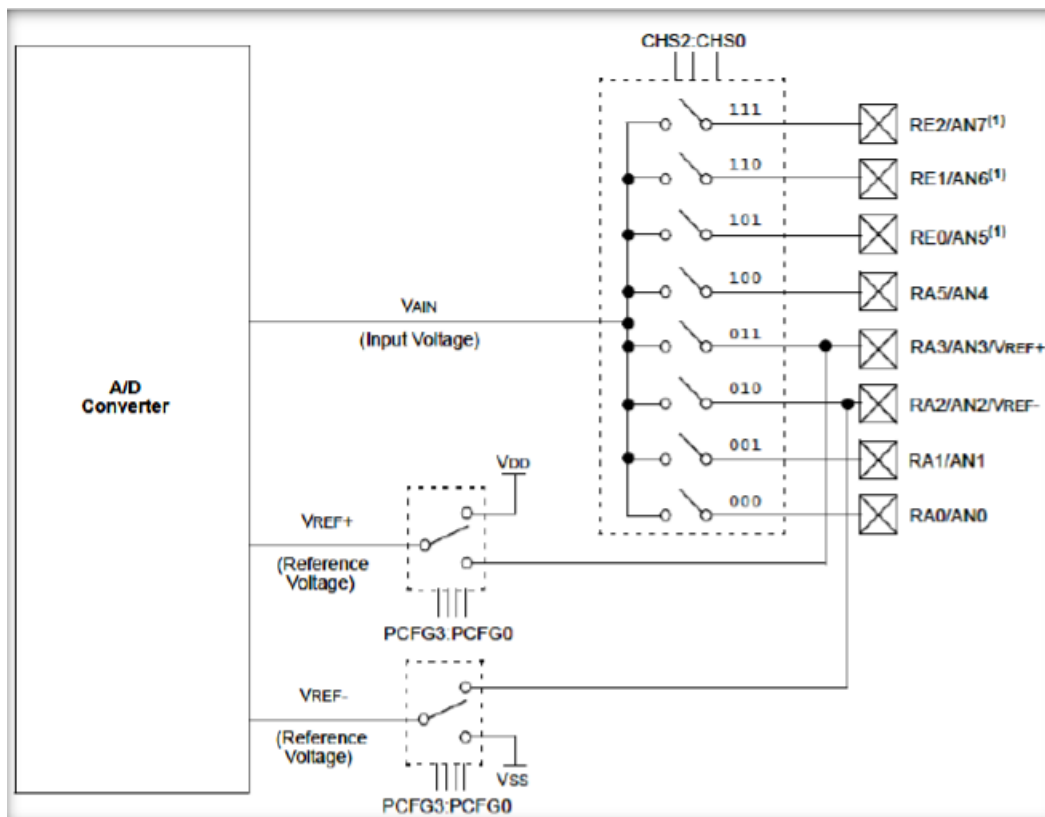


Figure. 2. 9 : Schéma fonctionnel du convertisseur analogique numérique.

## **2. 6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé en premier lieu les définitions, les familles et la classification des microcontrôleurs. En particulier, nous avons opté le microcontrôleur pic16F877A comme un outil de commande de l'onduleur multi-niveaux, car les caractéristiques et les modules internes que dispose ce dernier s'adaptent mieux au notre projet. Cette cible qu'elle offre de modules dédiés pour la commande en boucle ouverte des moteurs électriques, mais elle reste insuffisante pour cadencer des stratégies de commande en boucle fermée des machines électriques.

# Chapitre 3

## Simulations de l'Onduleur Multi-niveaux

### Résumé :

*A partir de la théorie de la structure d'onduleur multi-niveaux présentée dans le chapitre 1, le rôle de ce chapitre est d'effectuer les simulations Matlab et Proteus de trois modes de fonctionnement à savoir la commande à 3 niveaux, la commande à 5 niveaux et la commande à 7 niveaux. Ceci est accompli après la création de nos codes Matlab et CCS. L'optimisation des angles de commutation est une tâche indispensable dans ce chapitre menant une atténuation du taux de distorsion harmoniques.*

- **Sommaire du chapitre :**

3. 1 Introduction

3. 2 Simulations Matlab

3. 3 Simulations Proteus

3. 5 Conclusion

### 3. 1 Introduction

La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par l'onduleur, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés à l'onduleur. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions impulsionnelles, les variations de fréquence, les papillotements, etc. La qualité de la tension de sortie d'un onduleur dépend fortement de sa structure et de la technique de commande utilisée telles que la commande MLI et la commande à pleine onde multi-niveaux. S'agissant des mesures correctives, on recourt à l'utilisation de filtres anti-harmoniques pour résoudre les problèmes de pollutions harmoniques assez courantes sur le réseau. Bien que ces paramètres partagent un impact très important sur la qualité des grandeurs de sortie mais la performance d'un onduleur reste affectée par la pollution harmonique et qui ne peut pas être filtrée par la charge [1].

Pour bien comprendre la fonctionnalité du convertisseur schématisé par la **Figure. 1.11**, nous allons élaborer par la suite plusieurs formes de la tension et du courant de sortie utilisant nos codes développés par les logiciels Matlab, CCSPIC et Proteus.

### 3. 2 Simulations Matlab

Nous avons mentionné dans le Chapitre 1 que l'onduleur multi-niveaux demande une optimisation sérieuse des angles de commutations des transistors. Le Matlab est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires et non-linéaires, etc. Le Matlab est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple, il peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées. Aussi, il possède de bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications. Il peut être intégré avec d'autres langages à savoir C, FORTRAN, VHDL, etc. Il fonctionne dans plusieurs environnements tels que l'UNIX/X, le Windows et le Macintosh [18].

#### 3. 2. 1 Angles de commutation

La commande de l'onduleur à 7 niveaux est basée sur le réglage de la fréquence et de l'amplitude du fondamental de la tension de sortie. La fréquence de cette dernière est contrôlée par la période des signaux de commande générés tandis que le réglage de

l'amplitude est lié aux changements des combinaisons des angles de commutation des transistors de puissance (solution du système d'équations donné par (1.6)).

Par la suite, en se basant sur les angles de commutation déjà optimisés dans le travail présenté dans [5, 18] pour l'illustration des signaux de sortie (tension et courant). Le spectre (analyse FFT) qui calcule le THD est aussi considéré dans cette série de simulations pour chaque grandeur de sortie. Dans cette partie, on a considéré seulement le cas de la commande de l'onduleur à 7 niveaux. A cet effet, la Figure. 3. 1 et la Table. 3. 1 offrent les angles pour chaque réglage de l'amplitude du fondamental  $V_1$ . On observe que les allures des angles ont des caractéristiques non-linéaires. Puisque le convertisseur d'énergie est un système rapide, l'optimisation est alors exécutée en mode « off-line ».

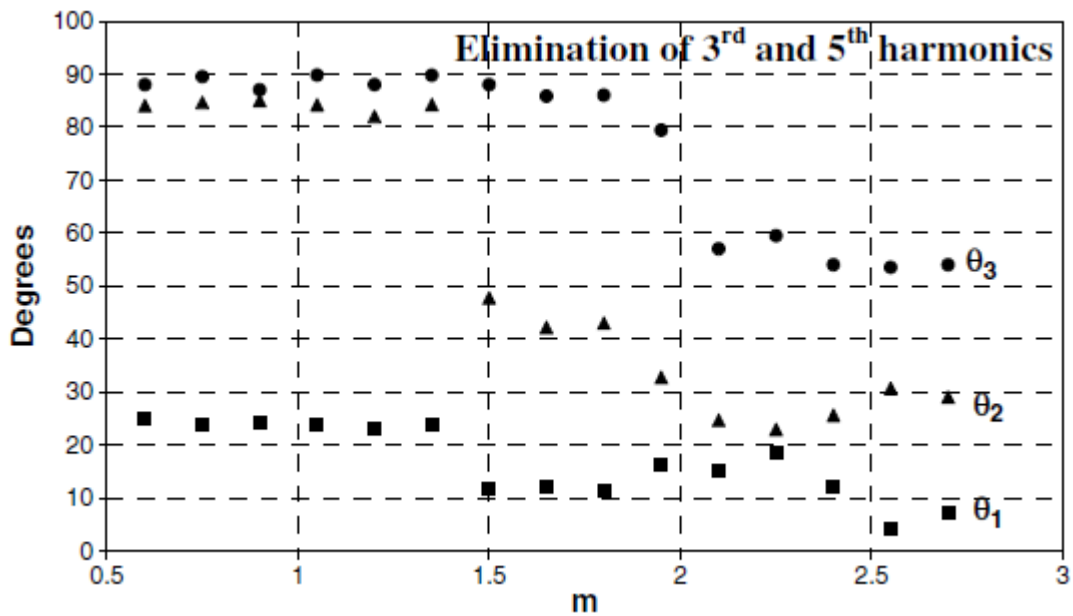


Figure. 3. 1 : Solutions du système (1.6) par l'algorithme génétique à codage binaire [5]

Table. 3. 1 : Angles en degrés de commutation trouvés par l'algorithme génétique

$m = \frac{V_1}{2E}$	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2	1.35	1.5	1.65	1.8	1.95	2.1	2.25	2.4	2.55	2.7
$\theta_1$	25	24	24	24	21	22	11	11	10	18	16	19	11	5	9
$\theta_2$	85	85	85	84	81	83	49	41	42	31	24	22	27	30	29
$\theta_3$	88	89	87	89	88	89	88	85	85	80	58	60	54	53	54

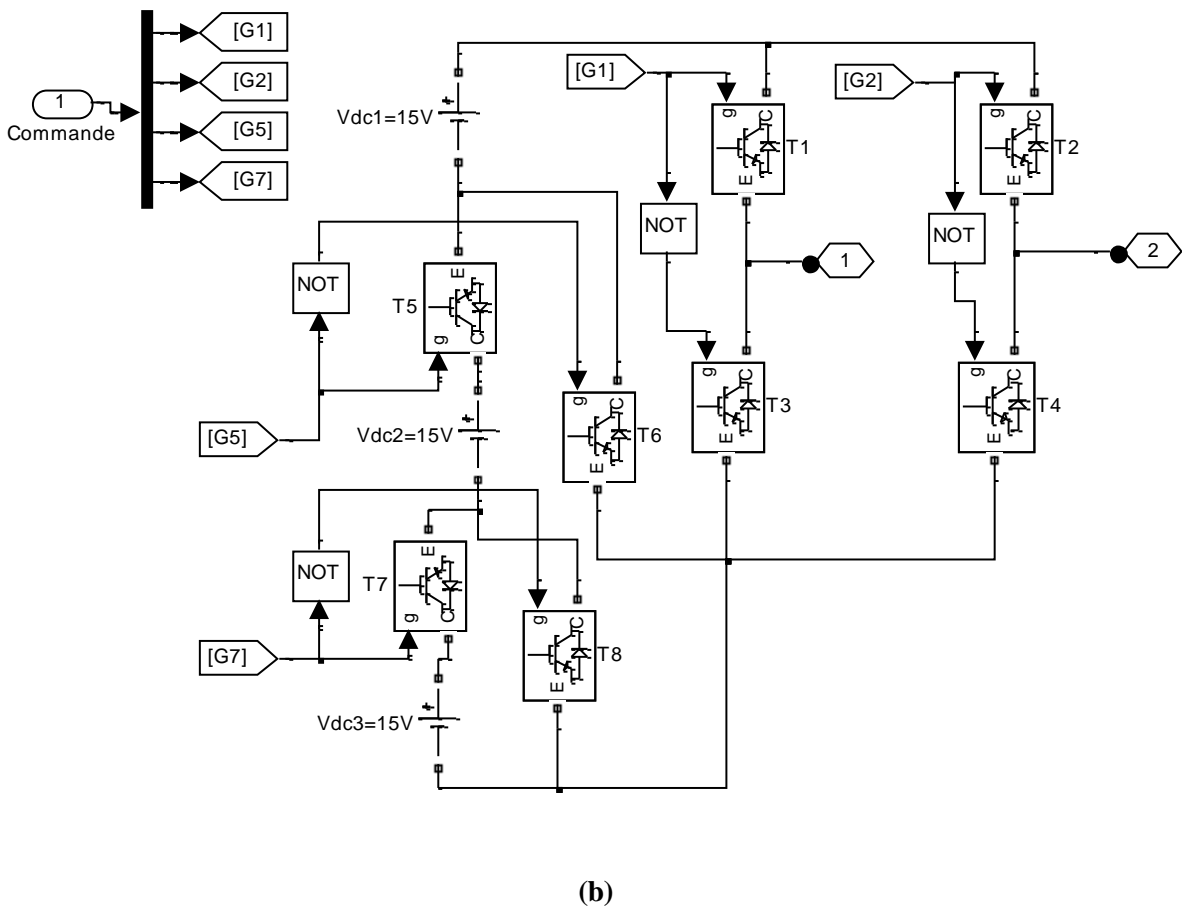
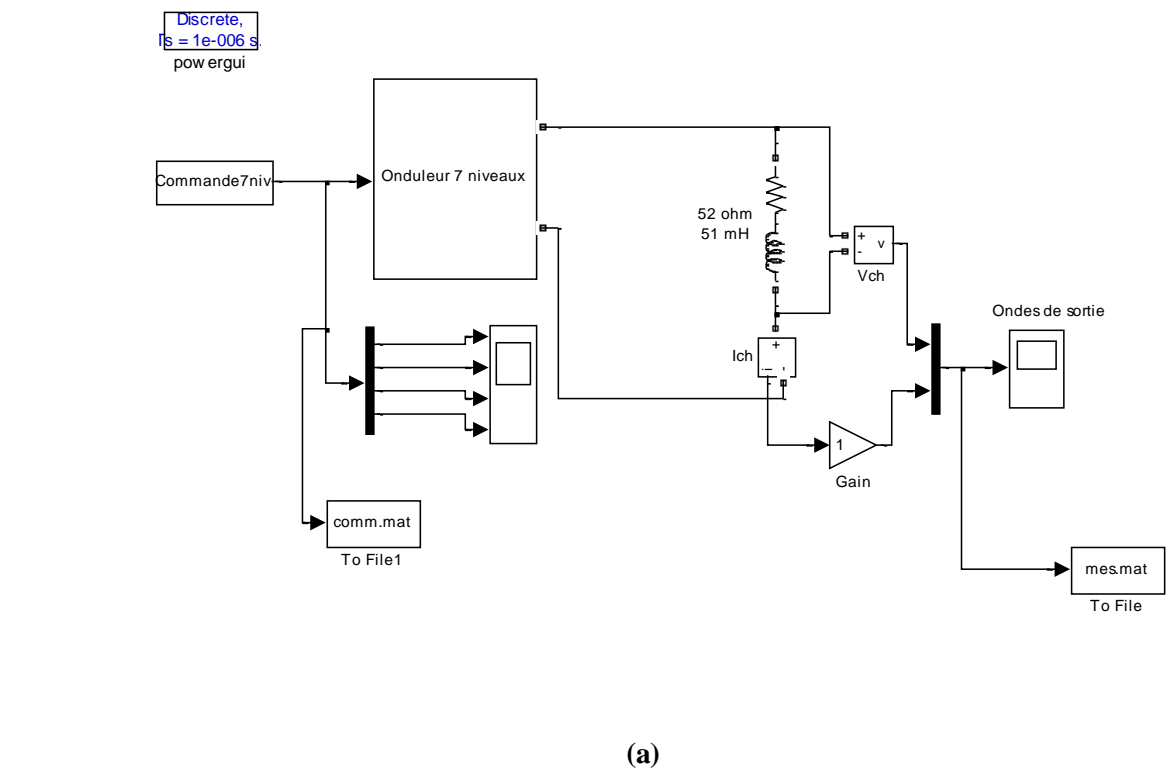


Figure. 3. 2 : Schéma blocks de l'onduleur à 7 niveaux monophasé.

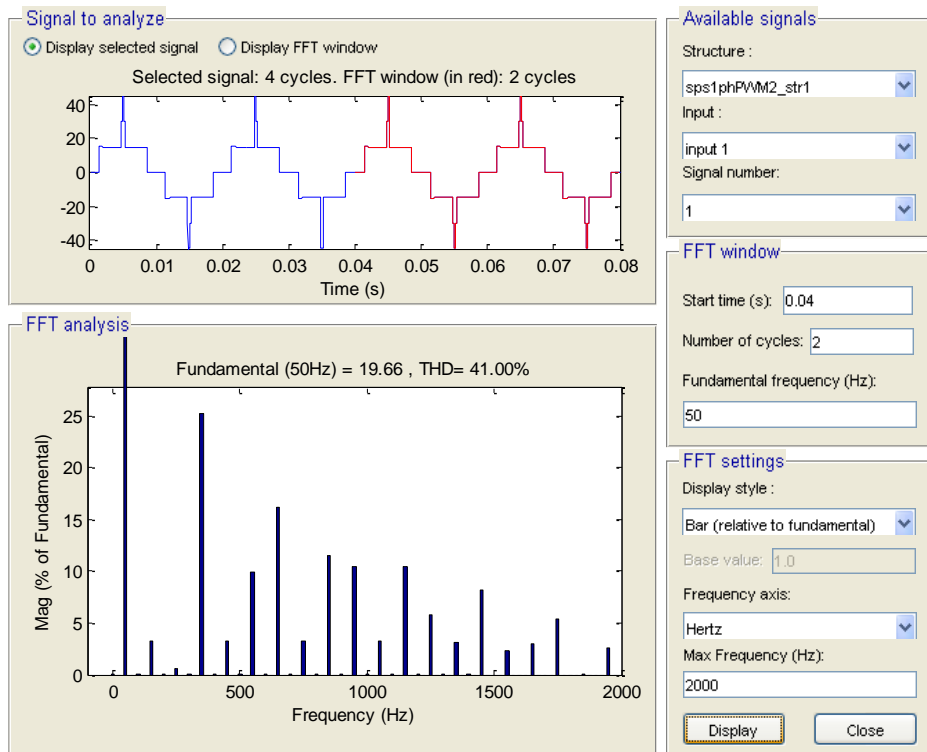
### 3. 2. 2 Formes d'ondes de la tension et du courant

Nous avons schématisé l'onduleur à 7 niveaux par le Simulink du logiciel Matlab (voir la [Figure 3. 2](#)). Nous avons utilisé la fonction 'S-function' pour le calcul des différents chronogrammes des signaux de réglage. Les simulations de l'onduleur à 3 et 5 niveaux ont déjà fait dans le travail de mémoire de Master présenté dans [\[18\]](#). Par la suite, nous allons exploiter notre code Matlab offert dans l'Annexe A.

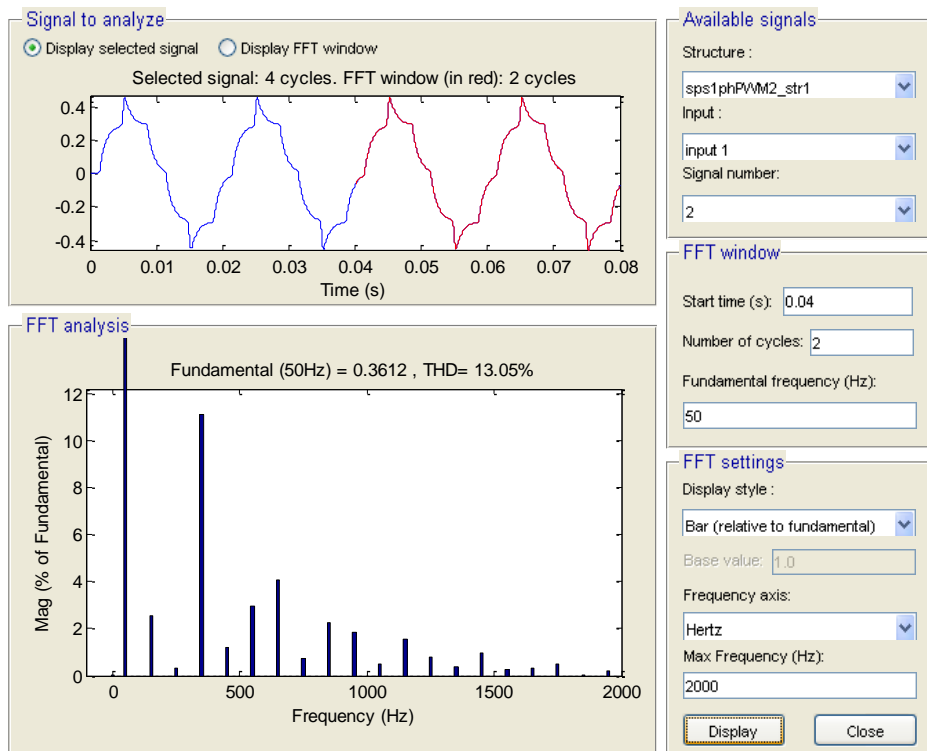
Pour  $R = 52\Omega$  et  $L = 51$  mH de la charge inductive, nous avons lancé en premier temps la simulation avec une fréquence de commande de 50Hz,  $\theta_1 = 25^\circ$ ,  $\theta_2 = 85^\circ$  et  $\theta_3 = 88^\circ$ . Les sources des tensions continues sont fixées à  $E_1 = E_2 = E_3 = +15V$ . Les résultats de la tension et du courant de charge avec ses spectres sont illustrés dans la [Figure. 3. 3](#). Les 7 niveaux sont effectivement obtenus lors des instants des commandes imposés. On remarque qu'il y a une incertitude d'optimisation puisque nous avons obtenu un THD de la tension environ de 41%.

Maintenant, à titre d'exemple en changeant la combinaison des angles,  $\theta_1 = 11^\circ$ ,  $\theta_2 = 41^\circ$  et  $\theta_3 = 85^\circ$ . Les résultats de simulation sont reportés à travers de la [Figures. 3. 4](#) qui montrent l'évolution de la tension et du courant aux bornes de la charge. Les spectres obtenus montrent une réduction du THD par rapport au cas de la [Figure. 3. 3](#). Ici, les harmoniques sont minimisées qui donne une forme de courant rapprochée vers une sinusoïde.

On augmente maintenant le coefficient de réglage qui correspond aux angles  $\theta_1 = 9^\circ$ ,  $\theta_2 = 29^\circ$  et  $\theta_3 = 54^\circ$ . Les signaux de commande sont représentés par la [Figure. 3. 5](#). Le THD est aussi amélioré par rapport au cas de la [Figure. 3. 4](#) comme montré par la [Figure. 3. 6](#) (THD = 11.78% pour le cas de la tension). On peut aussi conclure que le THD ne reste jamais constant lors du changement de la tension efficace de sortie.



(a)

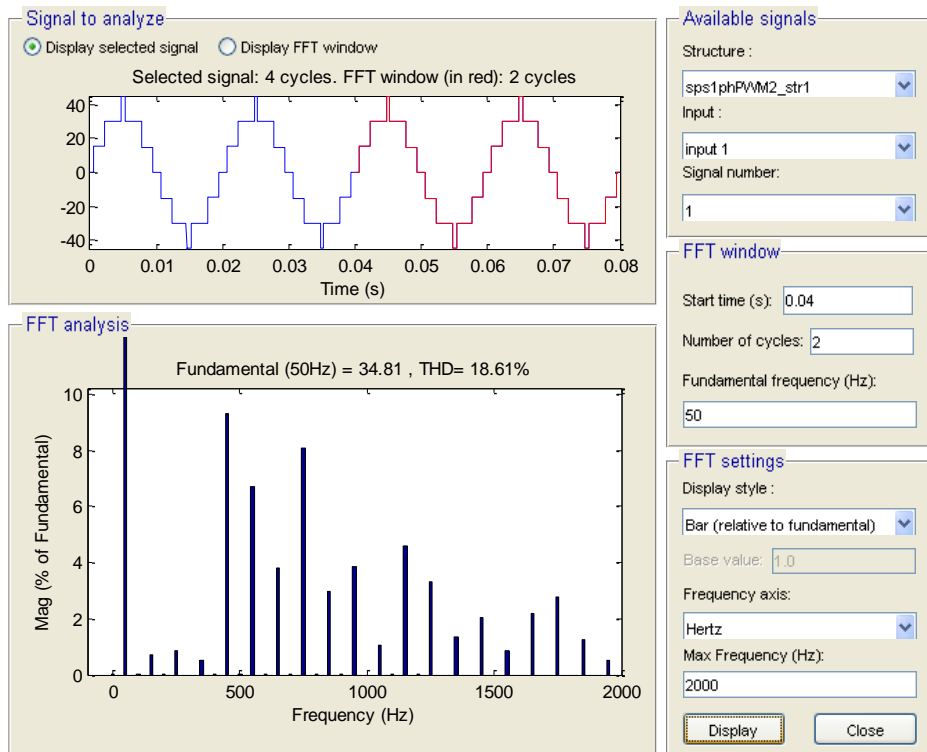


(b)

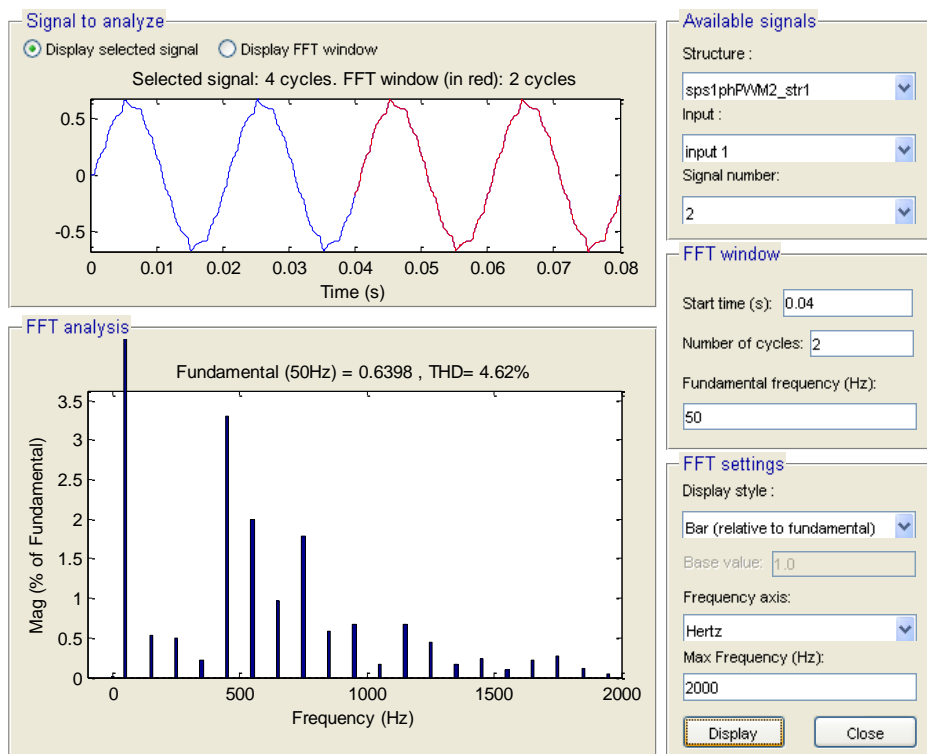
Figure. 3.3 : Signaux de sortie pour  $\theta_1 = 25$ ,  $\theta_2 = 85$  et  $\theta_3 = 88$

(a) Tension et son spectre

(b) Courant et son spectre



(a)

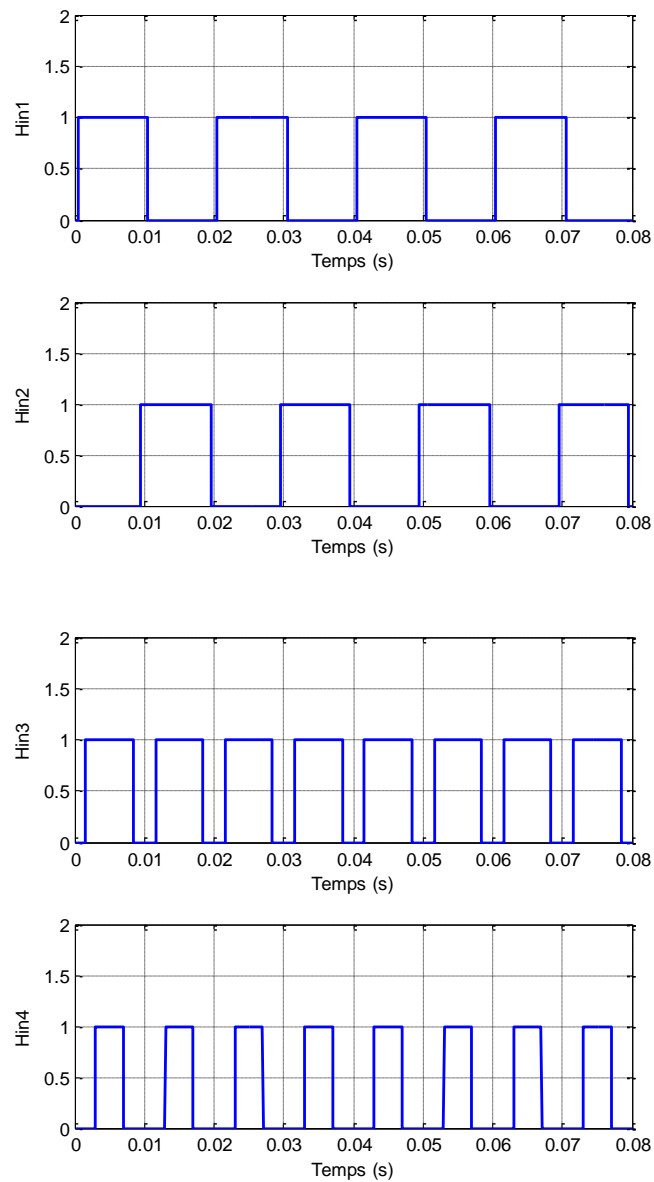


(b)

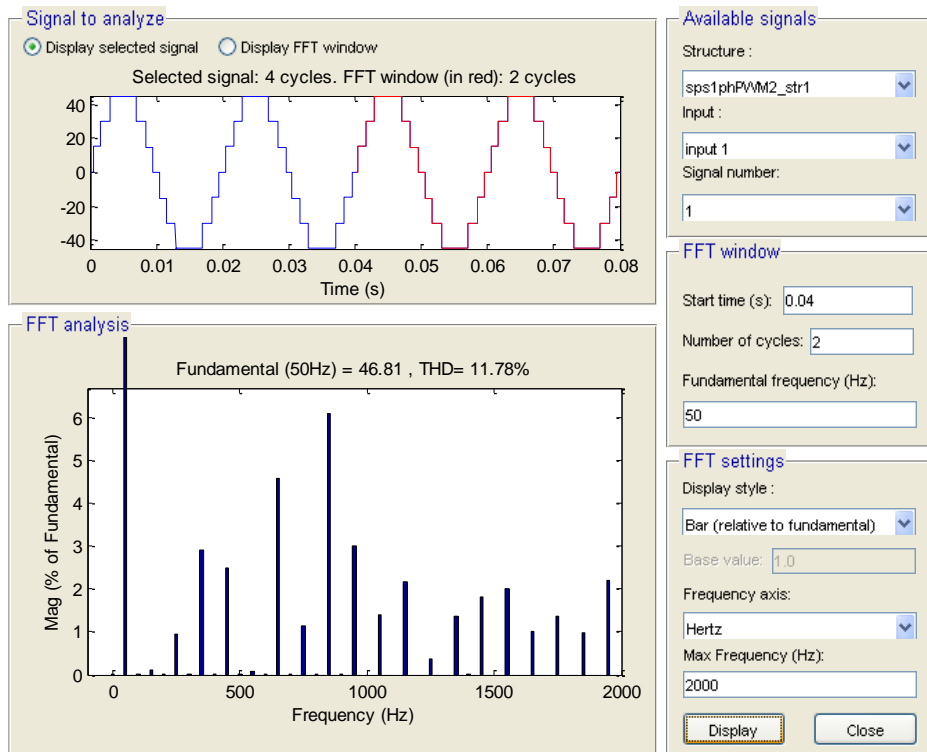
Figure. 3. 4 : Signaux de sortie pour  $\theta_1 = 11$ ,  $\theta_2 = 41$  et  $\theta_3 = 85$

(a) Tension et son spectre

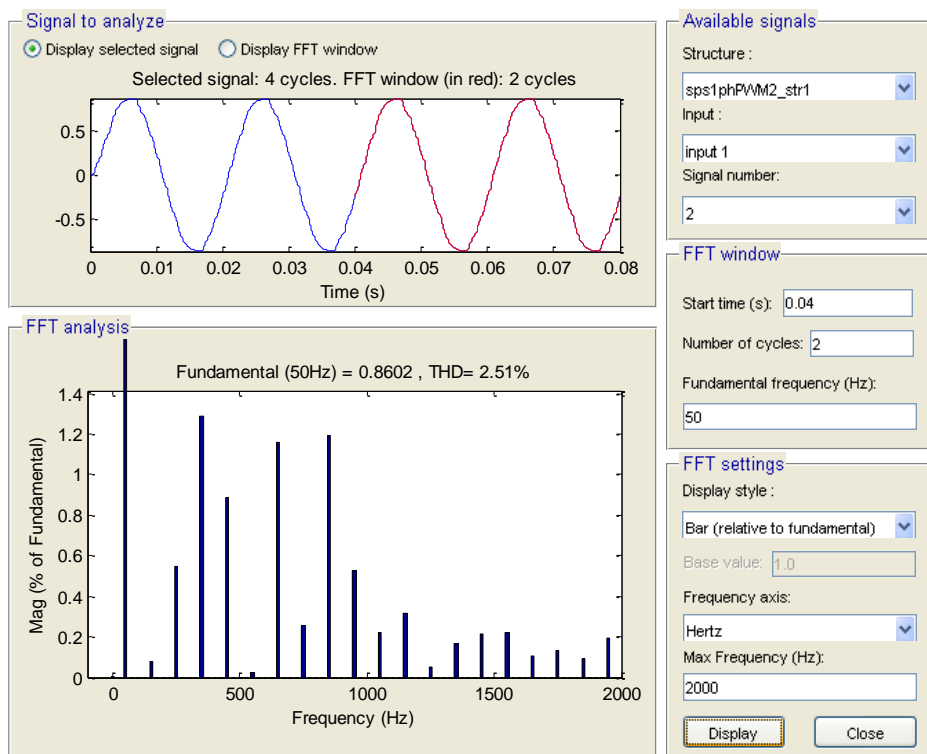
(b) Courant et son spectre



**Figure. 3.5 :** Signaux de commande pour  $\theta_1 = 9$ ,  $\theta_2 = 29$  et  $\theta_3 = 54$



(a)



(b)

Figure. 3. 6 : Signaux de sortie pour  $\theta_1 = 9$ ,  $\theta_2 = 29$  et  $\theta_3 = 54$

(a) Tension et son spectre

(b) Courant et son spectre

### 3. 3 Simulations Proteus

Proteus est actuellement la seule CAO (conception assistée par ordinateur) électronique qui permet la conception d'un système électronique complet et de le simuler, y compris avec le code des microcontrôleurs. Pour ce faire, elle inclut un éditeur de schéma (ISIS), un outil de placement-routage (ARES), un simulateur analogique-numérique, un environnement de développement intégré pour microcontrôleurs, un module de programmation par algorigrammes ainsi qu'un éditeur d'interface pour smartphone afin de piloter à distance des cartes Arduino ou Raspberry. Proteus est composé de différents packages qui sont: Proteus PCB pour le circuit imprimé, Proteus VSM pour la simulation, Proteus Visual Designer/IoT Builder pour Arduino/Raspberry pour développer des projets comparables à ceux conçus avec des outils tels que Scratch et App inventor [19].

Avant de réaliser la plate forme matérielle de notre projet, il est préférable de tester d'abord le code CCS développé. Ceci est accompli par la programmation du pic16F877A et le branchement de différents composants électroniques des deux circuits électriques à savoir le circuit de commande et le circuit de puissance. Dans cette partie de notre travail, nos simulations ont été réalisées à l'aide de l'utilisation de trois logiciels (CCSPICC, MPLAB et ISIS Proteus).

- L'environnement CCSPIC est utilisé pour la création et la compilation du code C développé.
- L'environnement MPLAB est exploité pour le calcul du temps d'exécution et la programmation du pic16F877A via le programmeur PICKit 3
- L'environnement ISIS Proteus est fait pour la réalisation du circuit électrique et l'illustration des signaux simulés au moyen de l'oscilloscope virtuel ou autres.

#### 3. 3. 1 Circuit de commande et de puissance

Dans le but d'obtenir les résultats de simulation Proteus, on se base sur la liste des composants du circuit de commande comme donnée par la **Table. 3. 2**. Nous avons deux potentiomètres, l'un est utilisé pour la commande de la fréquence des signaux et l'autre sert à changer le taux de réglage (c'est-à-dire la valeur efficace de la tension de sortie). Dans ce projet, trois modes de fonctionnement sont assurés par un seul bouton poussoir.

- Mode 1 : Onduleur monophasé à 3 niveaux.

- Mode 2 : Onduleur monophasé à 5 niveaux
- Mode 3 : Onduleur monophasé à 7 niveaux.

Le circuit électrique qu'on a conçu pour la simulation Proteus est schématisé dans la **Figure. 3. 5**. Pour effectuer les simulations Proteus dans le cas de l'onduleur à 3 et 5 niveaux, les angles de commutation appropriés sont présentés dans la **Table. 3. 3**. Par la suite, nous allons exploiter notre code CCSPICC donné dans l'annexe B.

**Tableau. 3. 2 :** Liste du circuit de commande et de puissance à base du pic16F877A

Ordre	Désignation	Référence	Quantité
1	Microcontrôleur	pic16F877A	1
2	Afficheur LCD	LCD 2x16	1
3	Oscilloscope	virtuel	2
4	Potentiomètre	10k	2
5	Bouton poussoir	active	2
6	Résistance	4.7k	1
7	Résistance	2.2k	4
8	Résistance	1.2k	4
9	Transistor	BC547	7
10	Driver	IR2112	4
11	Transistor de puissance	IRF740	8
12	Diode	1N4544	4
13	Condensateur	220uF	4
14	Charge inductive	R=52 $\Omega$ et L=51mH	1



**Table. 3. 3 :** Angles de commutation optimaux [18]

$\theta$ en degrés pour l'onduleur à 3 niveaux														
175	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
$\theta_1$ & $\theta_2$ en degrés pour l'onduleur à 5 niveaux														
25	85	80	22	21	19	18	16	15	13	12	10	9	7	5
88	85	82	81	79	78	76	75	73	72	70	69	67	65	63

### 3. 3. 2 Résultats de simulations du mode # 1

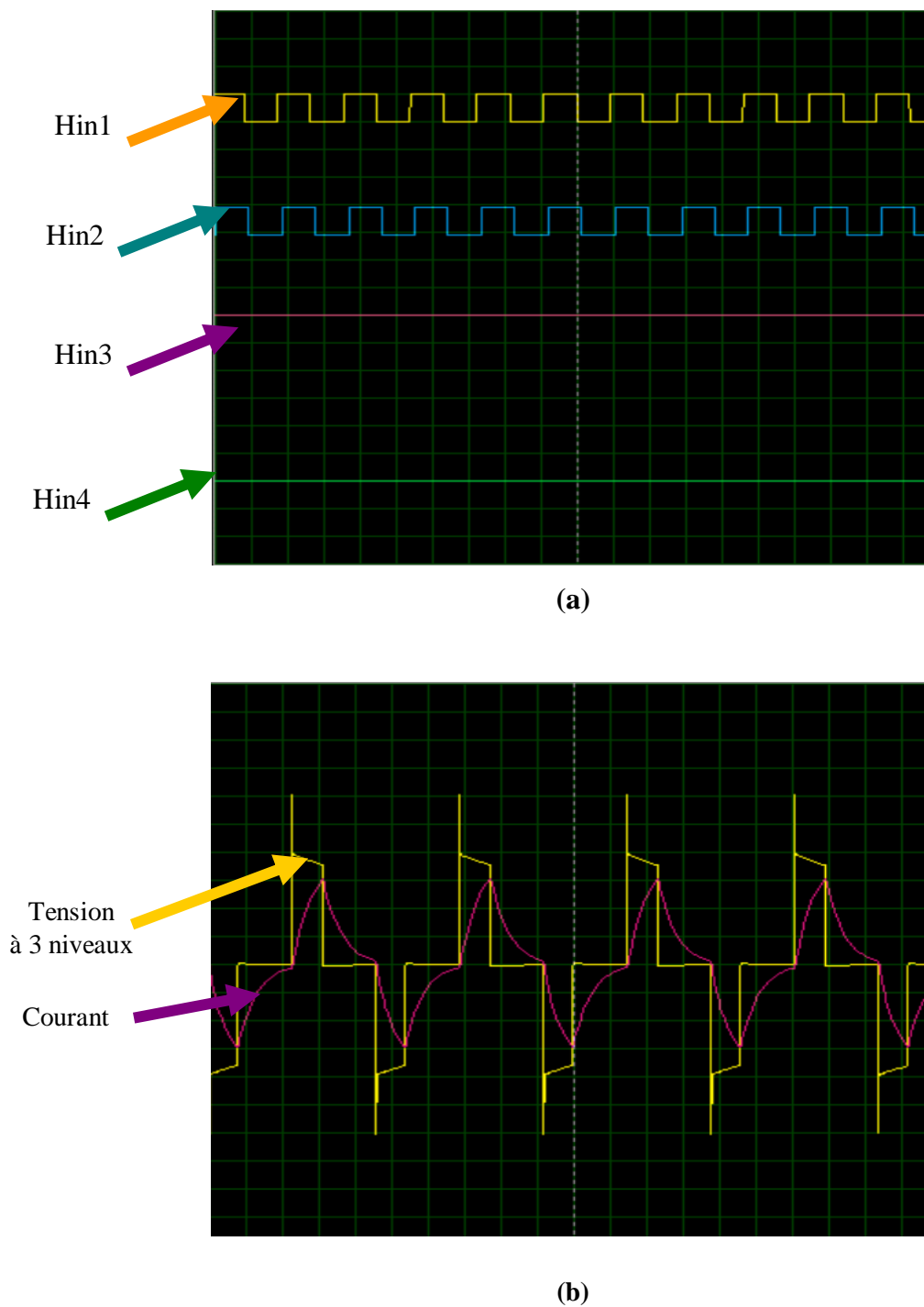
A partir du circuit électrique de la [Figure. 3. 7](#), on a exécuté la simulation Proteus utilisant les mêmes paramètres que précédemment (Section 3. 2). La [Figures. 3. 8](#) illustre les formes d'ondes des commandes et les grandeurs de la charge (tension et courant). Hin1, Hin2, Hin3 et Hin4 représentent les signaux de commande des transistors en haut (high-side) des bras 1, 2, 3 et 4 de l'onduleur respectivement. Nous avons trouvé les mêmes formes d'onde de courant et de la tension. Ceci confirme que notre code CCS développé est juste. En outre, les commandes générées par le pic16F877A ont des formes en fonction des angles de commutation. Il est bien noté que la commande du transistor  $Q_5$  et  $Q_7$  sont toujours désactivées car l'onduleur fonctionne à 3 niveaux.

### 3. 3. 3 Résultats de simulations du mode # 2

Maintenant, on doit activer la commande du transistor  $Q_5$ , pour obtenir un onduleur à 5 niveaux. La commande de  $Q_7$  reste désactivée et les chronogrammes des signaux de réglage sont bien illustrés dans la [Figure. 3. 9](#). La forme en escalier à 5 niveaux de la tension de sortie est bien observée.

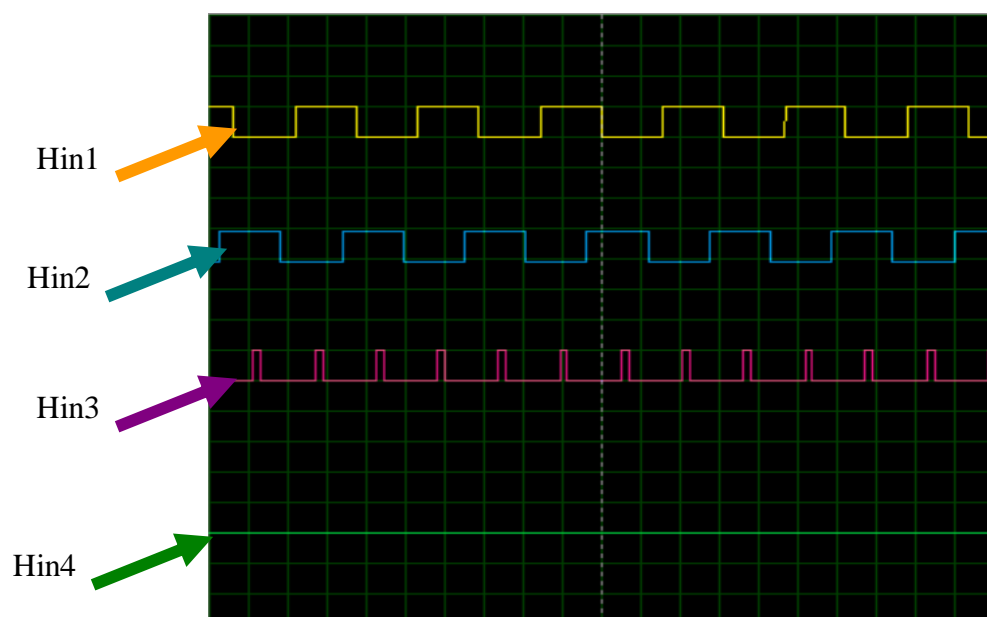
### 3. 3. 4 Résultats de simulations du mode # 3

L'activation des transistors  $Q_5$  et  $Q_7$  est obligatoire pour achever le mode de fonctionnement de l'onduleur à 7 niveaux. Les signaux de commande et les signaux de la charge sont reportés dans la [Figure. 3. 10](#). Dans ce cas, la forme de courant est améliorée puisque nous avons un nombre de niveaux supérieur par rapport aux cas des [Figures. 3. 8-3. 9](#).

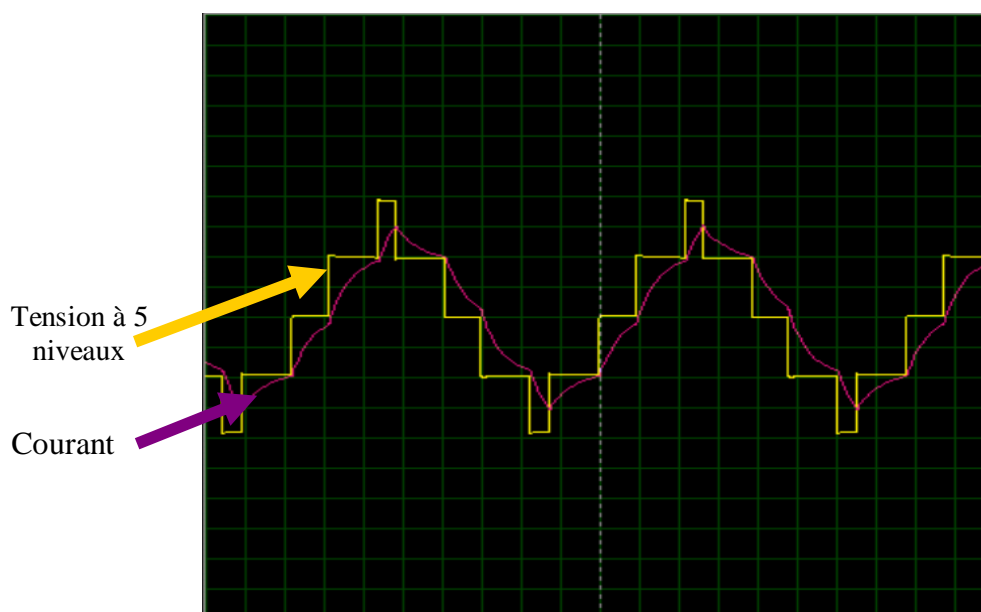


**Figure. 3. 8 :** Signaux de simulation Proteus pour le cas de l'onduleur à 3 niveaux

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge



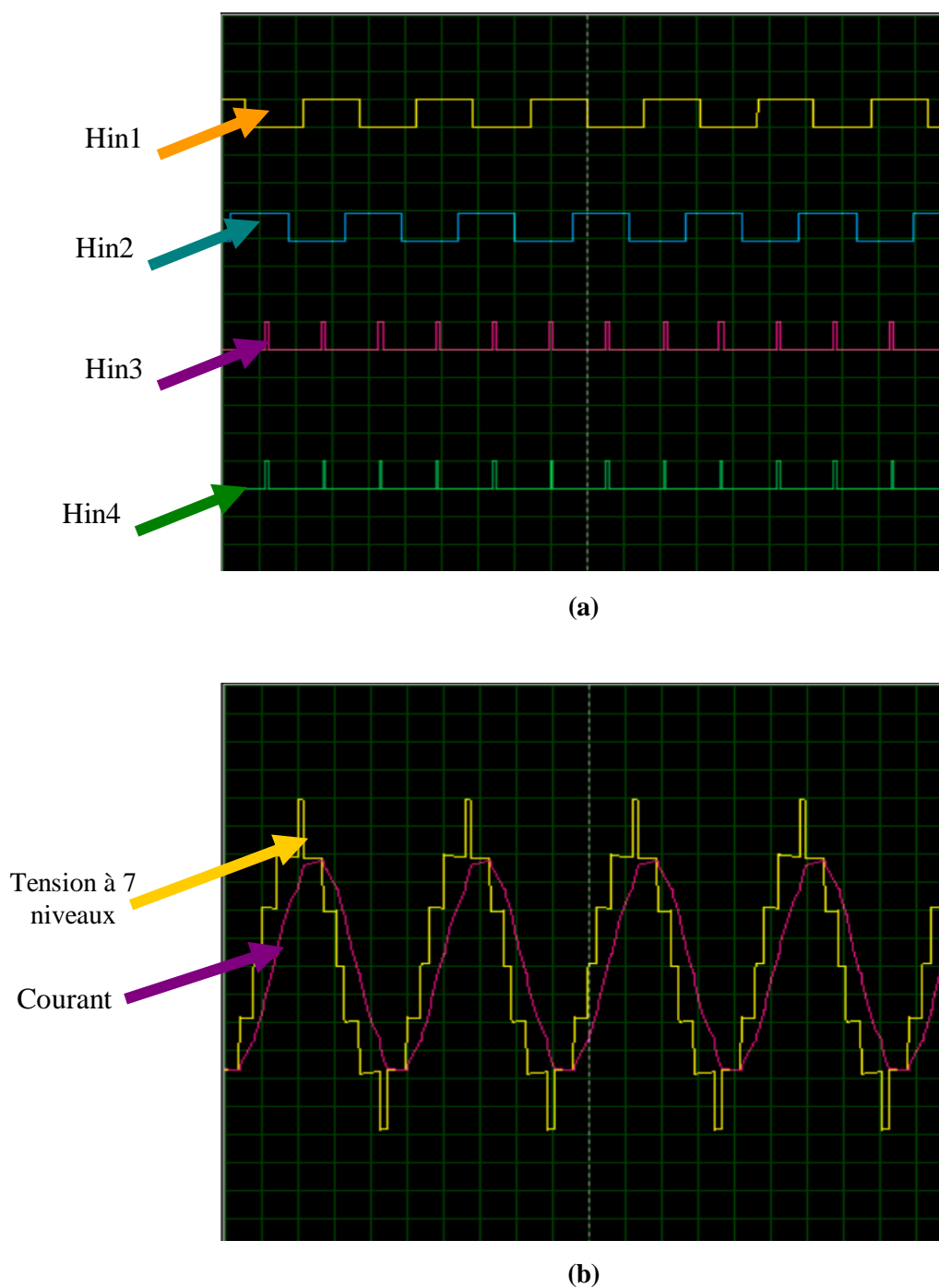
(a)



(b)

**Figure. 3.9 :** Signaux de simulation Proteus pour le cas de l'onduleur à 5 niveaux

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge



**Figure. 3. 10 :** Signaux de simulation Proteus pour le cas de l'onduleur à 7 niveaux

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge

### 3. 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux sortes de simulations de l'onduleur monophasé à commande pleine onde possédant 3, 5 et 7 niveaux. Pour améliorer la qualité des signaux de sortie, nous avons utilisé des angles de conduction optimisés en fonction du taux de réglage. La simulation Matlab et la simulation Proteus offrent des résultats quasiment similaires, ce qui nous confirme la justesse de notre code CCS développé. Le fichier hexadécimal de ce dernier sera chargé dans le pic16F877A (objectif du Chapitre 4) pour la création en temps réel les 8 chronogrammes des signaux de commande, Hin1, Lin1, Hin2, Lin2, Hin3, Lin3, Hin4 et Lin4 (High-side and low-side).

# Chapitre 4

## Résultats et Discussions

### Résumé :

*Dans ce chapitre, nous allons valider pratiquement de ce que nous avons trouvé en simulations dans le chapitre 3. A cet effet, cette phase englobe deux parties essentielles; la réalisation des différentes cartes (i.e., Alimentations, puissance et commande) et les mesures en temps réel des signaux via un oscilloscope numérique. Quelques configurations importantes des modules du microcontrôleur pic16F877A sont aussi expliquées au début de ce chapitre. Une conclusion et des commentaires des résultats expérimentaux trouvés ici sont également exprimés.*

- **Sommaire du chapitre :**

- 4. 1 Introduction.
- 4. 2 Configuration des modules.
- 4. 3 Conception matérielle.
- 4. 4 Résultats expérimentaux.
- 4.5 Conclusion.

## 4. 1 Introduction

En rappelant que le chapitre 3 a présenté l'optimisation des angles de commutation pour le contrôle de la tension d'onduleur monophasé à 7 niveaux. L'objectif de cette optimisation, en l'occurrence de la commande d'amplitude du fondamental ainsi que les taux de distorsion harmoniques (THD) de la tension et du courant de charge faibles sont atteints. Dans ce chapitre 4, nous commençons par donner un aperçu global sur la configuration de quelques modules du pic16F877A et les diagrammes des pins de certains composants permettant ainsi, à la fois d'une synthèse aisée de ce présent onduleur de tension à 7 niveaux. Avant d'effectuer les démarches pour la réalisation, les listes des composants électroniques sont fournies. La plateforme matérielle sur laquelle nous comptons implémenter notre commande comporte les blocks suivants :

- Un étage de trois alimentations isolées de +15VDC.
- Un étage de puissance à 4 bras avec 8 transistors de puissance IRF740.
- Un étage de commande contenant le microcontrôleur pic16F877A.

A partir des résultats de simulations, le bon fonctionnement des trois modes de contrôle de l'onduleur monophasé à 7 niveaux est validé grâce aux résultats expérimentaux.

## 4. 2 Configuration des modules

Dans cette section, nous donnons à partir de notre code CCS présenté dans l'Annexe B un peu de détails sur la configuration de quelques modules.

### 4. 2. 1 Module ADC

Le module ADC (analogue-to-digital converter) convertit les sorties des deux potentiomètres analogiques en 8 bits. Ces derniers représentent les consignes du taux de réglage et la fréquence de la tension de sortie. L'erreur de chaque incrément devient  $5/256 = 0.019V$ . Le compilateur CCS PICC offre les instructions suivantes utilisant les pins 'AN0' et 'AN1'.

```
#device ADC=8
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_4);
setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);
```

### 4. 2. 2 Configuration du module Timer2

La mise à jour de la commande à pleine onde qui est le temps d'échantillonnage est contrôlé par le temps de l'interruption interne. Nous avons choisi le timer2 dont le temps d'exécution des instructions à l'intérieur de cette interruption doit être inférieur au temps d'échantillonnage qui a été fixé à  $T_e = 0.1\text{ms}$ . En se basant sur la fréquence du cristal qui est 20MH, la configuration de timer2 est la suivante :

```
setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,24,5);  
enable_interrupts(INT_TIMER2);  
enable_interrupts(GLOBAL);
```

Avec les paramètres ci-dessus, le temps d'échantillonnage,  $T_e$  devient,

$$T_e = \frac{4.4(24 + 1)5}{20.1000} = 100\mu\text{s} \quad (4.1)$$

L'application 'stopwatch' du logiciel MPLAB fournit un temps de calcul de la commande de  $35\mu\text{s} < 100\mu\text{s}$  avec 175 cycles d'instructions.

### 4. 2. 3 Configuration du module LCD

L'affichage des modes de la commande et la fréquence de la tension de sortie est assuré par le périphérique LCD 16x2. Ce dernier consomme 7 sorties numériques du microcontrôleur 16F877A. On peut utiliser n'importe quel pin du pic16F877A pour obtenir un circuit imprimé assez simple avec moins de courts circuits. La bibliothèque 'lcd.c' doit être appelée pour cette application.

```
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_B4  
#define LCD_RS_PIN PIN_B6  
#define LCD_RW_PIN PIN_B5  
#define LCD_DATA4 PIN_B3  
#define LCD_DATA5 PIN_B2  
#define LCD_DATA6 PIN_B1  
#define LCD_DATA7 PIN_B0  
#include <lcd.c>
```

#### 4. 2. 4 Réglage de la tension efficace

Pour la commande de l'onduleur à 7 niveaux, nous avons inséré dans notre code CCS les trois **Tables. 3.1 et 3.3** donnés dans le Chapitre 3. La commande de la tension efficace est obtenue à partir du pin 'AN0' en changeant l'indice de ces tables qui correspond une combinaison particulière des angles de commutation,  $\theta_i$ ,  $i = 1, 2$  et 3. L'instruction 'ceil' est utilisée pour approximer le rapport  $V1/15$  à une valeur entière la plus proche.

```
set_adc_channel(0);
delay_us(10);
v1=read_adc();
i=ceil(v1/17);
if(i>15) i=15;
t1=0.002777*theta1[i]*v2;
t2=0.002777*theta2[i]*v2;
t3=0.002777*theta3[i]*v2;
```

On fait la même chose pour la commande à 3 niveaux (i.e., un seul angle de commutation) et la commande à 5 niveaux (i.e., deux angles de commutation).

#### 4. 2. 5 Réglage de la fréquence des signaux de commande

Dans notre projet, nous avons choisi une plage de fréquences entre 38Hz à 196Hz de la tension et du courant de charge. A cet effet, nous avons calculé une valeur  $V2$  dans la boucle infinie du programme principal en fonction de l'entrée analogique au niveau du pin 'AN1'.

```
set_adc_channel(1);
delay_us(10);
v2=51+0.8*read_adc();
```

La période en ms des signaux de commande devient

$$T = 0.1V2 \quad (4.2)$$

Puisque  $0 < \text{read\_adc}() < 256$ , les fréquences min et max fournies par l'onduleur sont données par

$$\begin{cases} f_{\max} = 1000 / 51 \times 0.1 \approx 196 \text{ Hz} \\ f_{\min} = 1000 / (51 + 0.8 \times 256) \times 0.1 \approx 38 \text{ Hz} \end{cases} \quad (4.3)$$








### 4.3 Conception matérielle

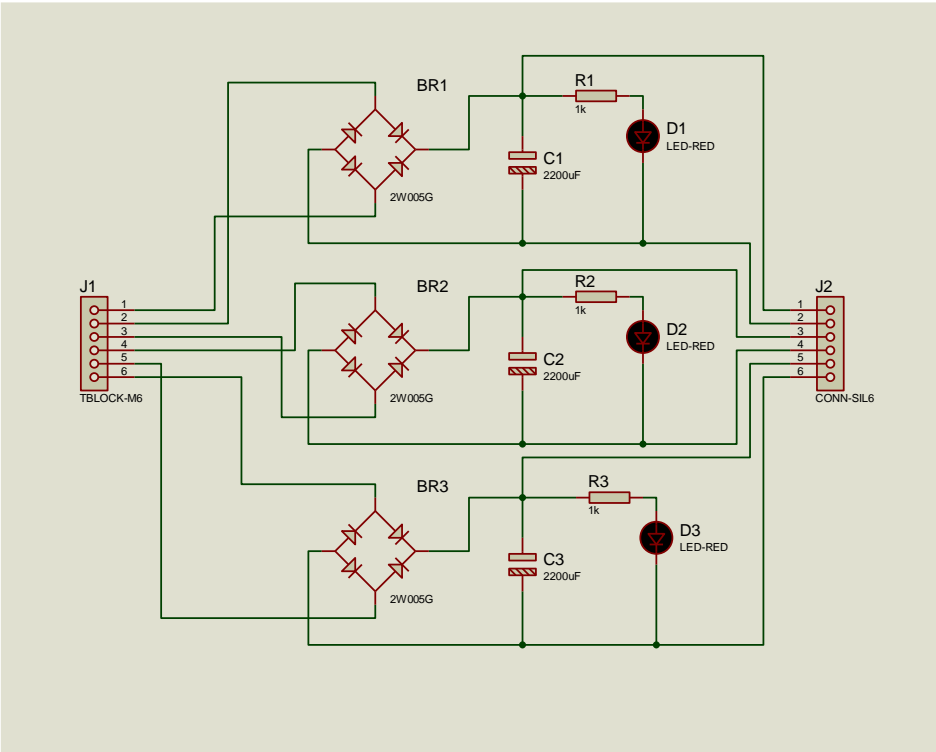
Dans ce projet, nous avons réalisé trois cartes qui sont reliées via des tresses connectées par des connecteurs de type ‘SIL’ et ‘T-block’. Les détails de conception matérielle de chaque étage sont présentés ci-dessous.

#### 4.3.1 Carte d'alimentations

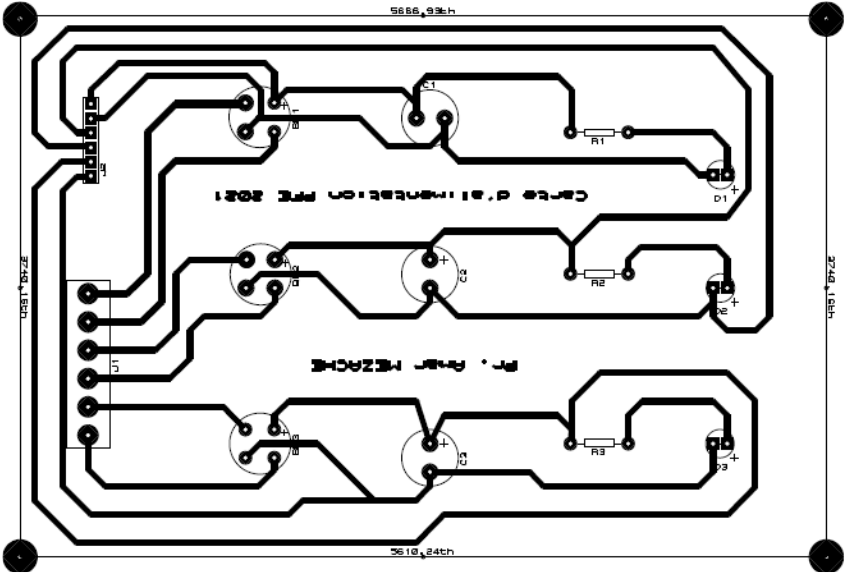
Dans cette carte, nous avons installé trois sources DC de +15V. Ces alimentations sont complètement isolées par l'utilisation de trois transformateurs externes 220V/12VAC, 10W. La liste des composants est montrée par la [Table. 4. 1](#). Le circuit électrique développé par le logiciel Proteus, le circuit imprimé et la carte finale sont montrés par la [Figure. 4.1](#).

**Table. 4. 1 :** Carte des alimentations +15V

Ordre	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Transformateur	220V/12V, 10W	03	
02	Connecteur	SIL-6	01	
03	Connecteur	T-block 6	01	
04	Pont de diode	W005G-502H	03	
05	Condensateur	470uF, 25V	03	
06	Résistance	1K	10	
07	Led	Rouge	3	



(a)



(b)



Table. 4. 2 : Stratégies de la commande en pleine onde

Onduleur	Bras	Signal de commande	Etat
7 niveaux	1	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	2	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	3	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	4	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
5 niveaux	1	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	2	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	3	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	4	Hin1 Lin1	0 1
3 niveaux	1	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	2	Hin1 Lin1	0 ou 1 1 ou 0
	3	Hin1 Lin1	0 1
	4	Hin1 Lin1	0 1

Table. 4. 3 : Carte de puissance

Ordre	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Transistor	IRF740, 600V, 3A	08	-
02	IR2112	10MHz	04	-
03	Condensateur	220uF	04	Chimique
04	Diode	1N4148	04	-
5	Connecteur	SIL08	01	-
6	Connecteur	SIL03	01	-
7	Connecteur	SIL06	01	-

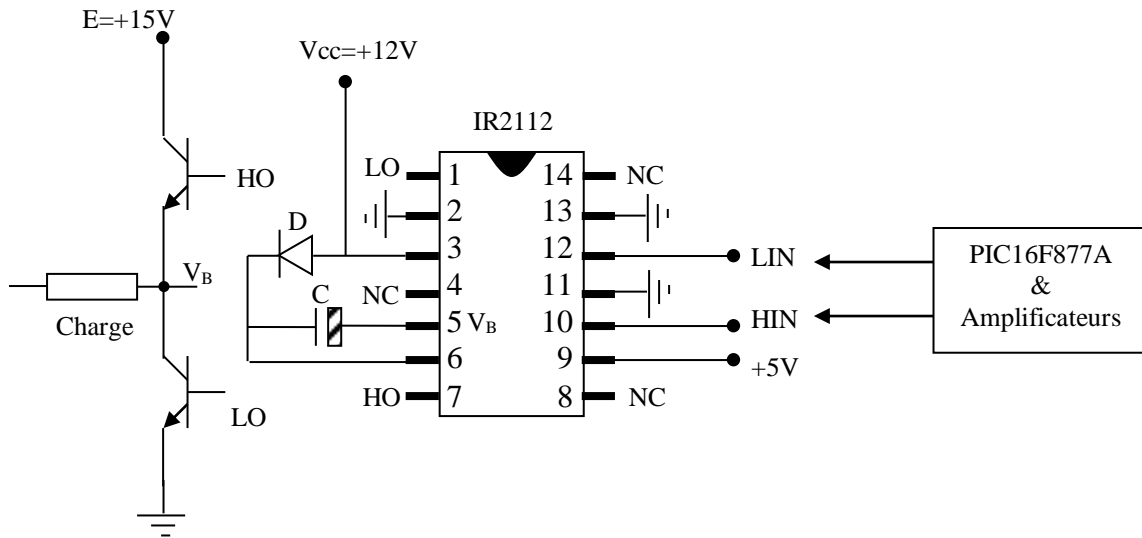
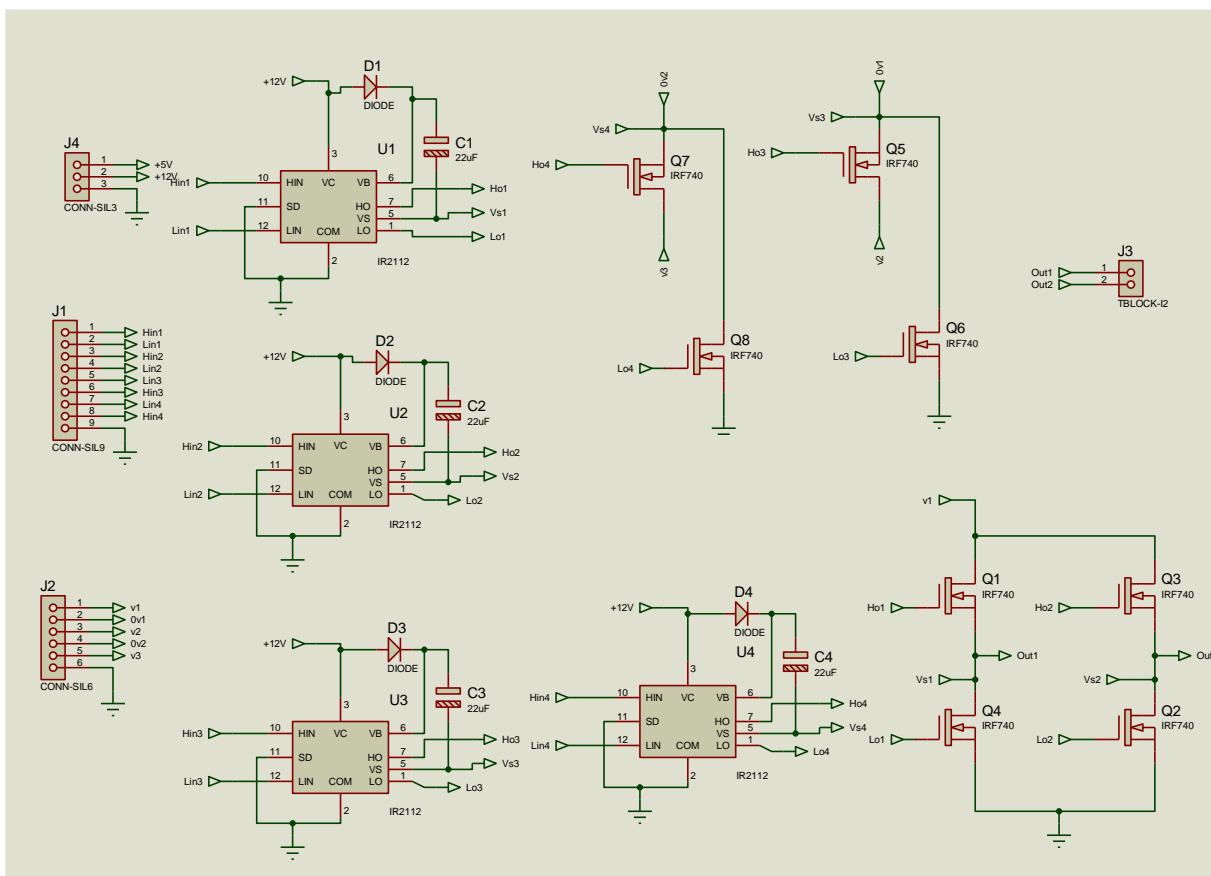
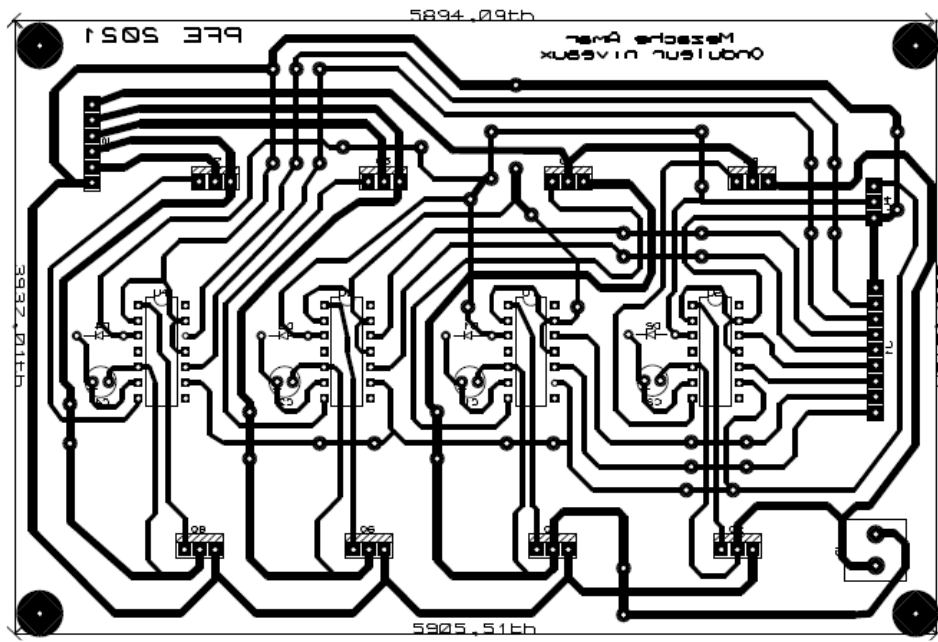


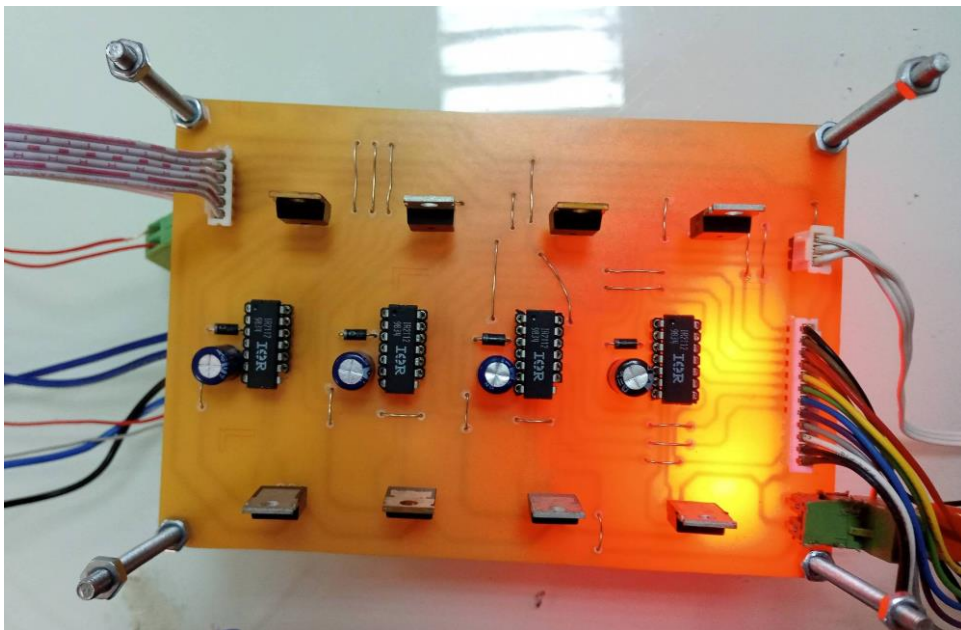
Figure. 4. 2 : Diagramme de pins du driver IR2112 avec le PIC et le bras de l'onduleur [20]



(a)



b)



(c)

**Figure. 4. 3 :** Concept de la carte de puissance.

a) Circuit électrique

b) Circuit imprimé

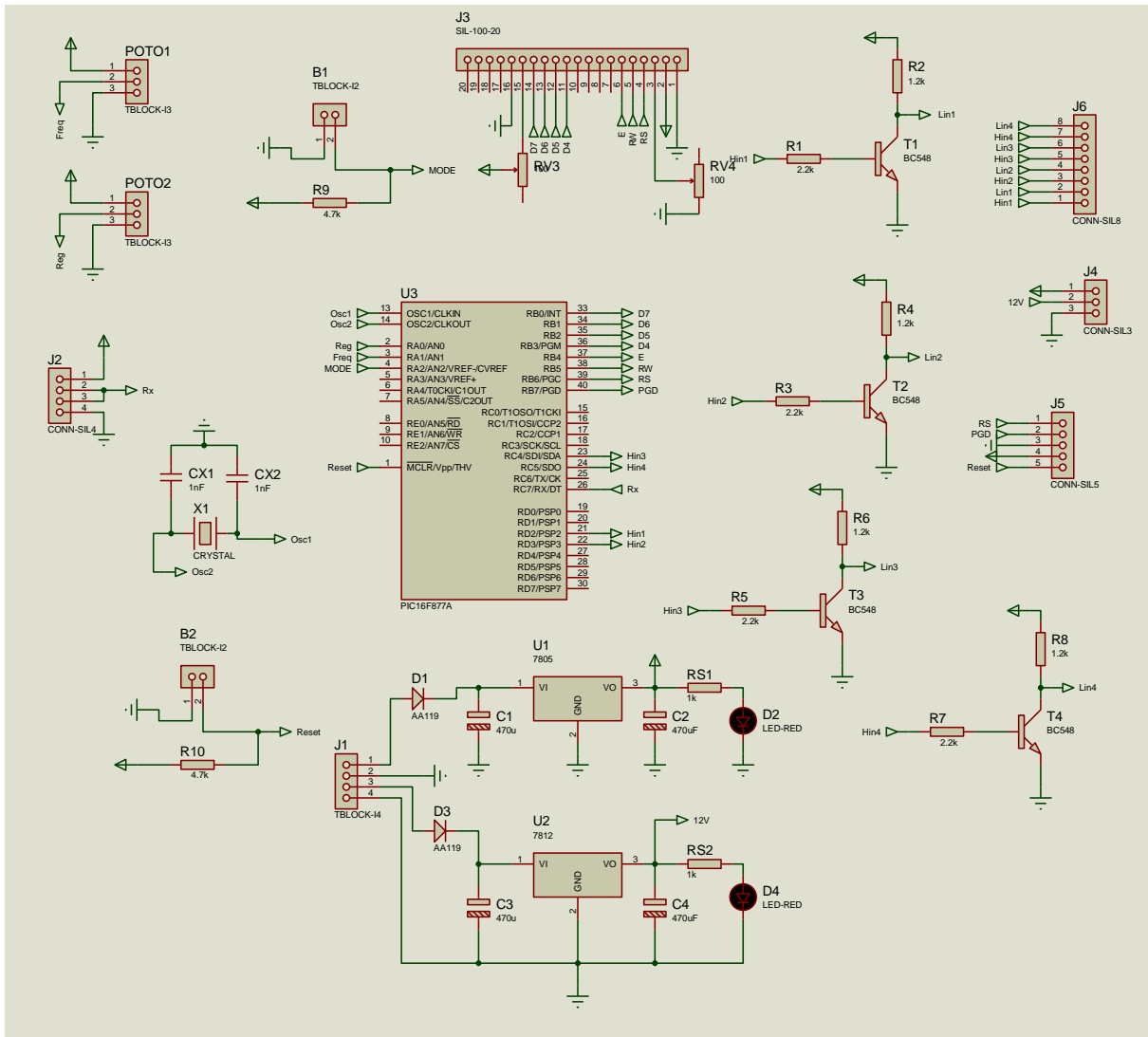
(c) Carte finale

### 4. 3. 3 Carte de commande

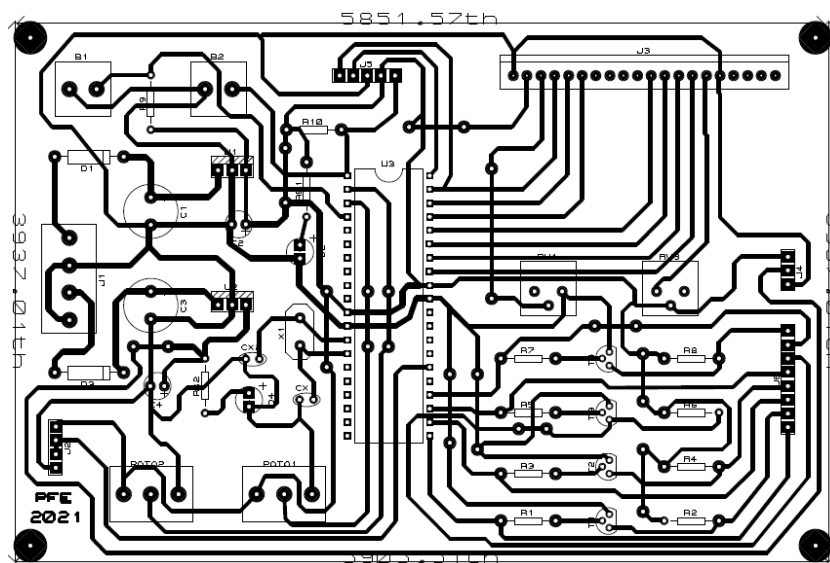
Le pic16F877A est un organe essentiel dans la carte de commande puisque à partir des signaux analogiques d'entrée, il prépare des formes carrées des signaux de commande avec des largeurs différentes. Les composants électroniques utilisés pour obtenir les 8 signaux de commande sont montrés par la [Table. 4. 4](#).

**Tableau. 4. 4 :** Liste des composants de la carte de commande.

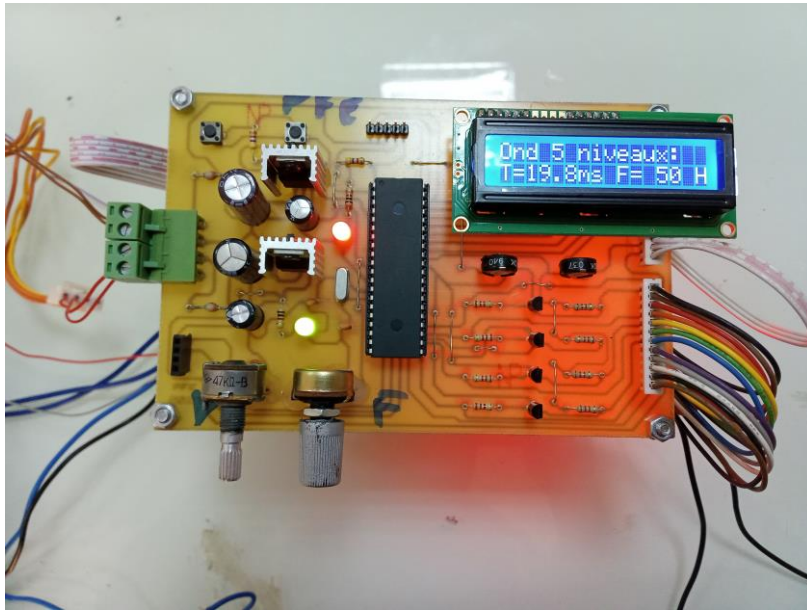
Ordre	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Microcontrôleur	Pic16F877A	01	-
02	Crystal	20MHz	01	-
03	Condensateur	22pF	02	Céramique
04	Afficheur LCD	2x16	01	-
05	Diode	1N4148	02	-
06	Bouton poussoir	NO	02	-
07	Resistance	4.7k $\Omega$	02	-
08	Potentiomètre	10K	02	-
09	Régulateur de tension	N7805	01	-
10	Condensateur	470uF, 16V	02	Chimique
11	Resistance	1.2k $\Omega$	04	-
12	Resistance	2.2k $\Omega$	04	-
13	Resistance	1k $\Omega$	02	-
14	Connecteur	SIL08	01	-
15	Connecteur	SIL05	01	-
16	Connecteur	SIL03	01	-
17	Connecteur	T-block04	01	-
18	Transistor	BC547	04	-
19	Potentiomètre	4.7K	02	-
20	Afficheur LCD	16x2	01	-
21	Led	Rouge	02	-



a)



b)

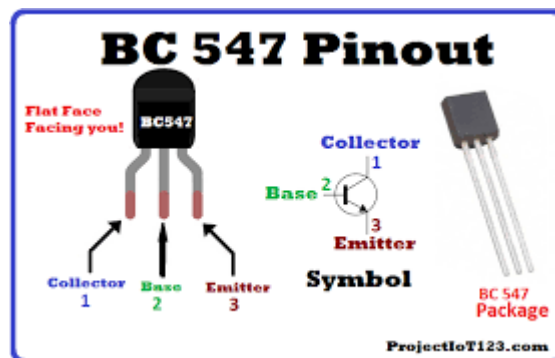


(c)

**Figure. 4. 4 :** Concept de la carte de commande

- a) Circuit électrique
- b) Circuit imprimé
- c) Circuit final

Le concept de la carte de commande est schématisé par la **Figure. 4. 4**. Le circuit de commande fonctionne avec une tension de +5V obtenue à travers du régulateur de tension N7805. Le pic16F877A, les boutons poussoirs et les potentiomètres sont tous alimentés par cette tension. Pour inverser les quatre signaux de commande, nous avons utilisé quatre transistors BC547. La **Figure 4. 5** montre le brochage du transistor BC547. Une tension de +12V est aussi préparée dans cette carte pour alimenter les drivers IR2112.

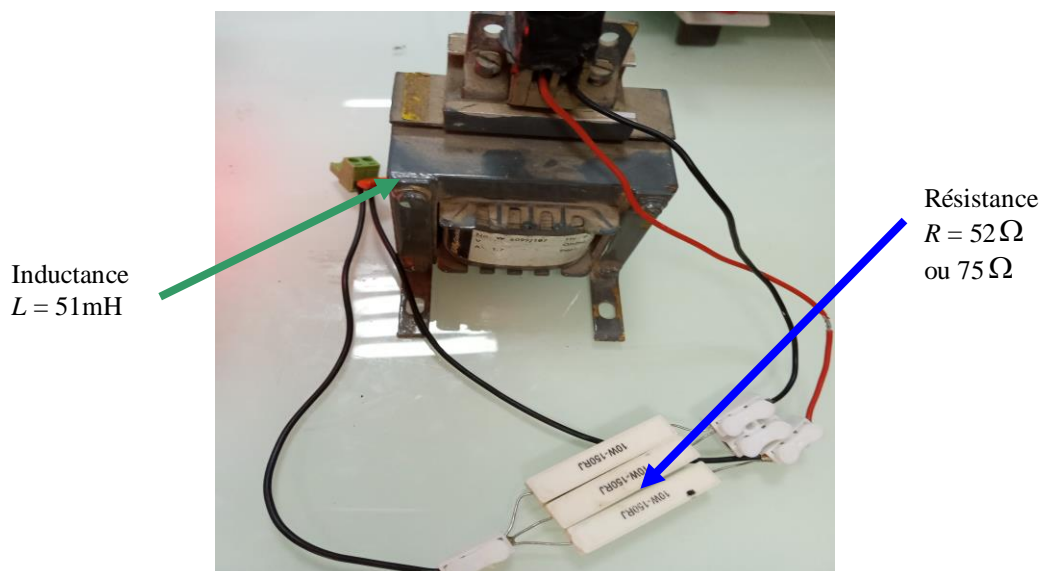
**Figure. 4. 5 :** Diagramme de pins du transistor BC547.

#### 4. 3. 4 La charge inductive

Le récepteur est constitué d'une inductance de 51mH en série avec une résistance de  $52\Omega$  ou  $75\Omega$  comme indiqué dans la **Figure. 4. 6**. Ces valeurs permettent de visualiser clairement l'évolution d'une façon exponentielle du courant de charge pour des fréquences entre 39 et 196 Hz. Nous avons utilisé le programmeur 'PICkit3' de Microship pour charger le code en 'hexa' obtenu après la compilation du fichier CCS développé. Les 5 pins de programmation du pic16F877A sont les suivants :

- MCLR (pin 1).
- VDD (pins 11 et 32).
- VSS (pins 12 et 31).
- PGD (pin 40).
- PGC (pin 39).

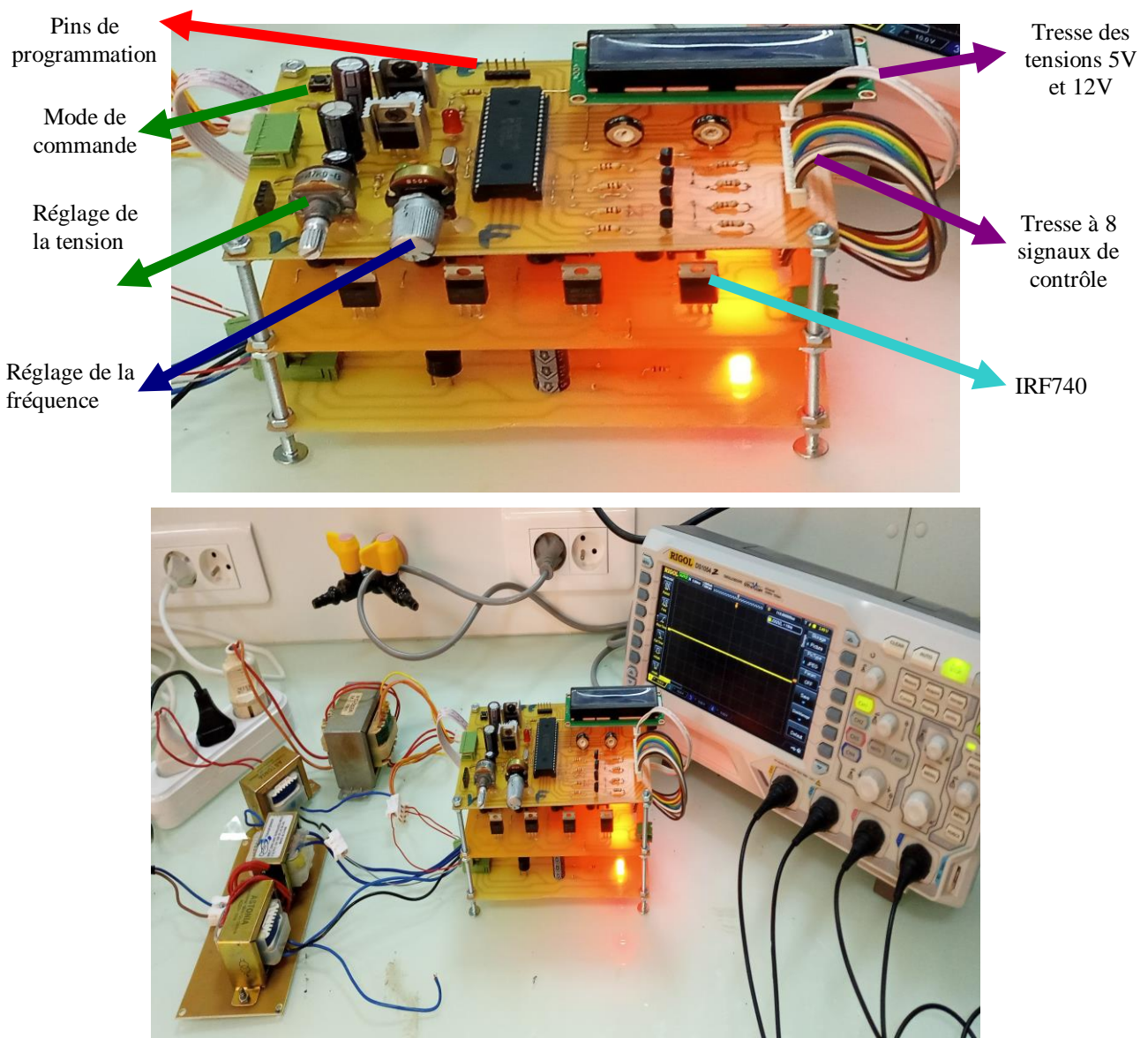
Un oscilloscope numérique 'RIGOLE DS1054' à quatre sondes est utilisé dans les phases de tests et de mesures. Il consiste de plusieurs modes de mesures et de stockage.



**Figure. 4. 6 :** Charge inductive

#### 4. 4 Résultats expérimentaux

Notre projet est finalement assemblé, le pic16F877A est programmé et la charge est connectée comme donné dans la **Figure. 4. 7**. Par la suite, nous prenons via l'oscilloscope des formes des allures de la tension et du courant de sortie. En jouant sur les positions angulaires des deux potentiomètres pour obtenir les réglages de la fréquence et de la valeur efficace des grandeurs du récepteur. Le mode de fonctionnement est assuré par un bouton poussoir. Ces mesures sont comparées à celles obtenues en simulations Matlab et Proteus présentées dans le Chapitre 3.



**Figure. 4. 7 :** Le projet réalisé (Assemblage des cartes réalisées)

#### 4. 4. 1 Visualisation des signaux d'alimentations

Trois signaux alternatifs sont délivrés par trois transformateurs comme montré par la [Figure. 4. 8](#). On remarque que la tension AC contient des harmoniques (déformation de la forme sinusoïdale). Ceci est dû aux caractéristiques non linéaires des transformateurs ainsi que les perturbations du réseau électrique puisque il alimente réellement des charges non-linéaires. La [Figure. 4. 9](#) visualise la tension filtrée mais après un redressement double alternance et un filtrage par un condensateur de  $800 \mu F$ , 25V.

#### 4. 4. 2 Visualisation des signaux de commande

Nous avons confirmé tous que nous avons programmé dans le pic16F877A les signaux de commande illustrés dans les [Figures. 4. 10 - 4. 13](#). Ces signaux reflètent effectivement la [Table. 4. 2](#). La conformité entre les signaux de commande présentés en théorie et en simulation Matlab et Proteus est alors vérifiée.

#### 4. 4. 3 Visualisation des signaux de sortie

La première série de mesures concerne le mode de fonctionnement à 3 niveaux (voir [Figure. 4. 14](#)). Pour deux fréquences différentes (178Hz et 154Hz) et  $R = 75 \Omega$ , il est bien remarqué que le courant évolue d'une nature exponentiellement et la tension aux bornes de la charge est forcée par 3 niveaux distinctes, 0V, +15V et -15V. Les pics lors des instants de commutation sont observés à cause des régimes transitoires du convertisseur, nous avons un système physique qui n'est pas idéal.

La [Figure. 4. 15](#) délivre les formes d'ondes du mode d'onduleur à 5 niveaux avec des niveaux 0V, +15V, +30V, -15V et -30V. A partir de deux fréquence 178 Hz et 60.2 Hz, la conformité avec les signaux de simulation est bien remarquée. Les largeurs des instants de commutation sont contrôlées par la variation des combinaisons des angles de référence.

Prenant les mêmes valeurs des fréquences de commande que précédemment mais avec un taux de réglage différé, la [Figure. 4. 16](#) montre clairement la forme en 7 niveaux de la tension de sortie, 0V, +15V, +30V, +45V, -15V, -30V et -45V. Ce type de commande mène à obtenir une forme de courant presque sinusoïdal. L'amplitude de ce courant augmente par rapport aux cas des onduleurs à 3 et à 5 niveaux puisque, nous avons une tension maximale de 45V. Les pics au niveau des commutations restent encore qui représentent un bruit aditif Gaussien. Nous avons utilisé un condensateur céramique aux bornes de la charge pour filtrer

un petit peu ce genre de parasites. La présente expérience montre que les signaux expérimentaux ont des scènes analogues par rapport aux signaux de simulations.

Dans la deuxième série de mesures, nous avons repris les mêmes stratégies de commande mais avec une charge  $R = 52\Omega$  et  $L = 51\text{mH}$ . Les signaux de sortie sont illustrés dans les Figures. 4. 17-4. 19. Nous avons trouvé le même raisonnement sauf que le courant atteint aux valeurs supérieures par rapport aux cas des Figures. 4. 14-16.

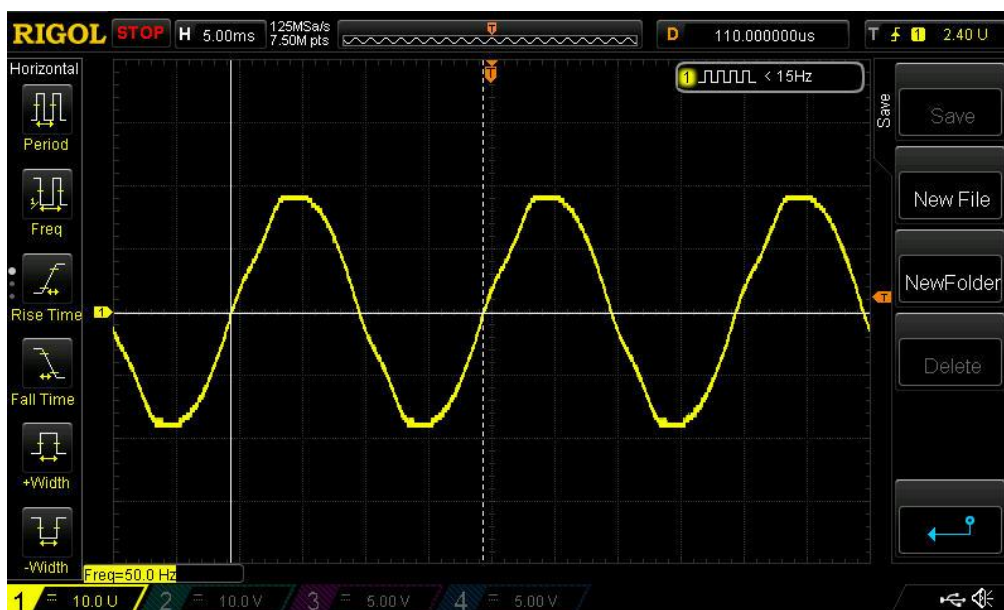


Figure. 4. 8 : L'une des trois tensions alternatives fournit par les transformateurs

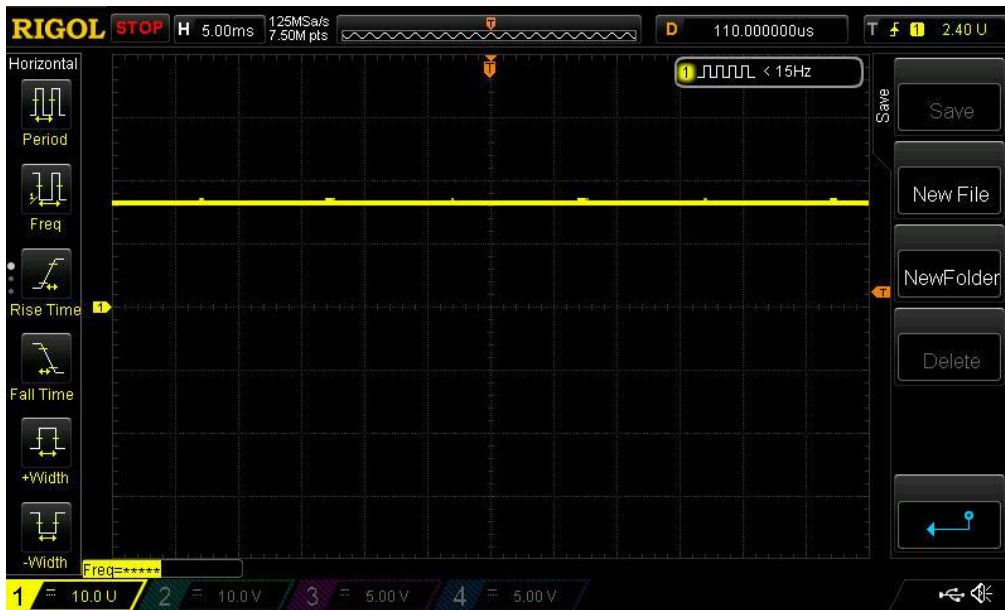


Figure. 4. 9 : Tension continue à la sortie du filtre.

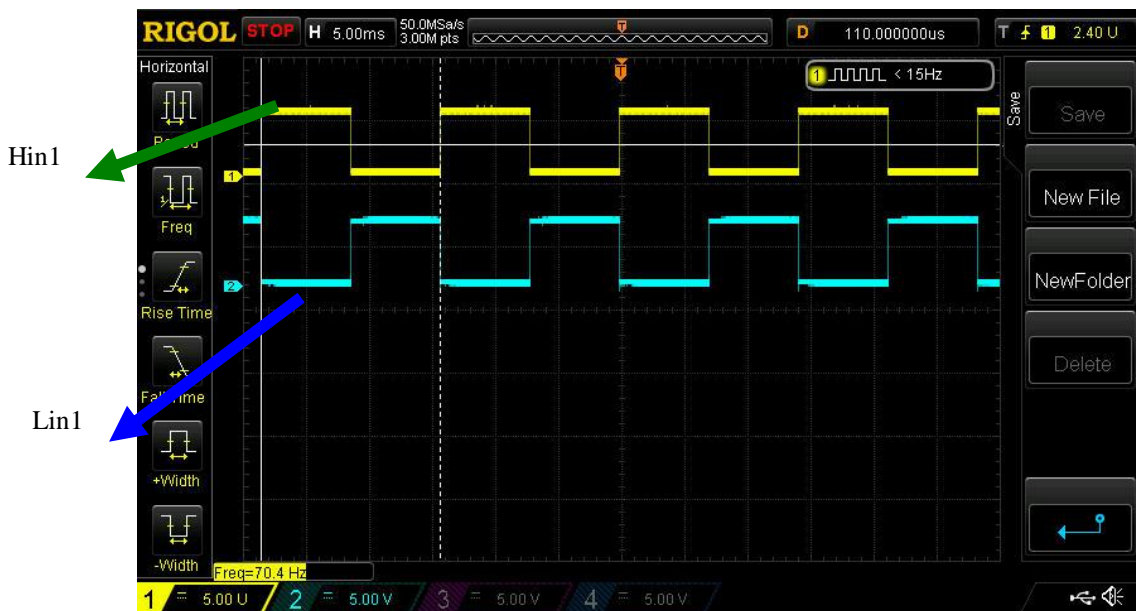
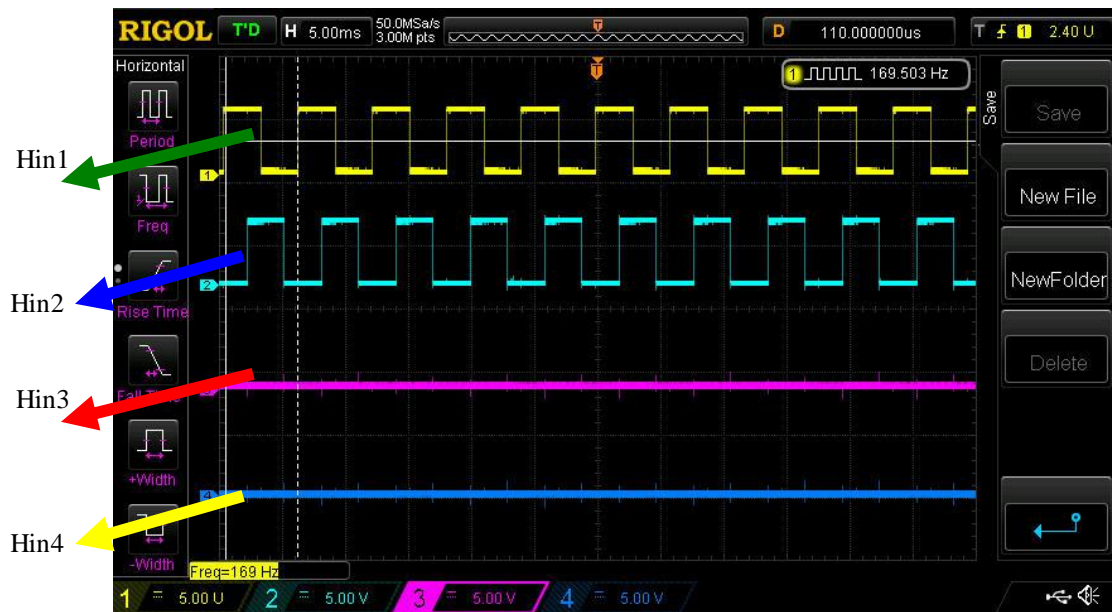
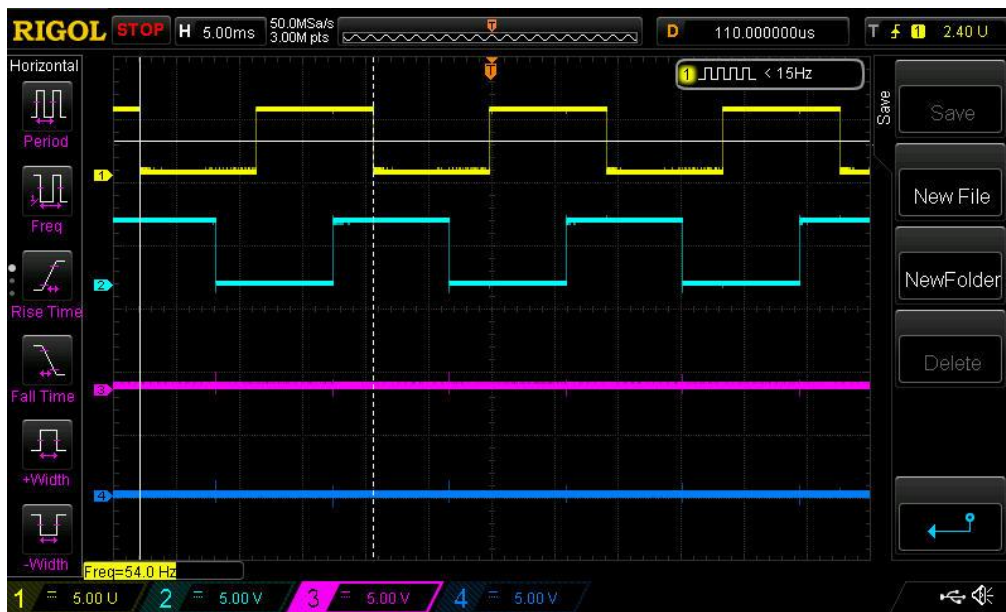


Figure. 4. 10 : Signaux de commande complémentaires du premier bras du pont en H (Hin1 & Lin1)



(a)

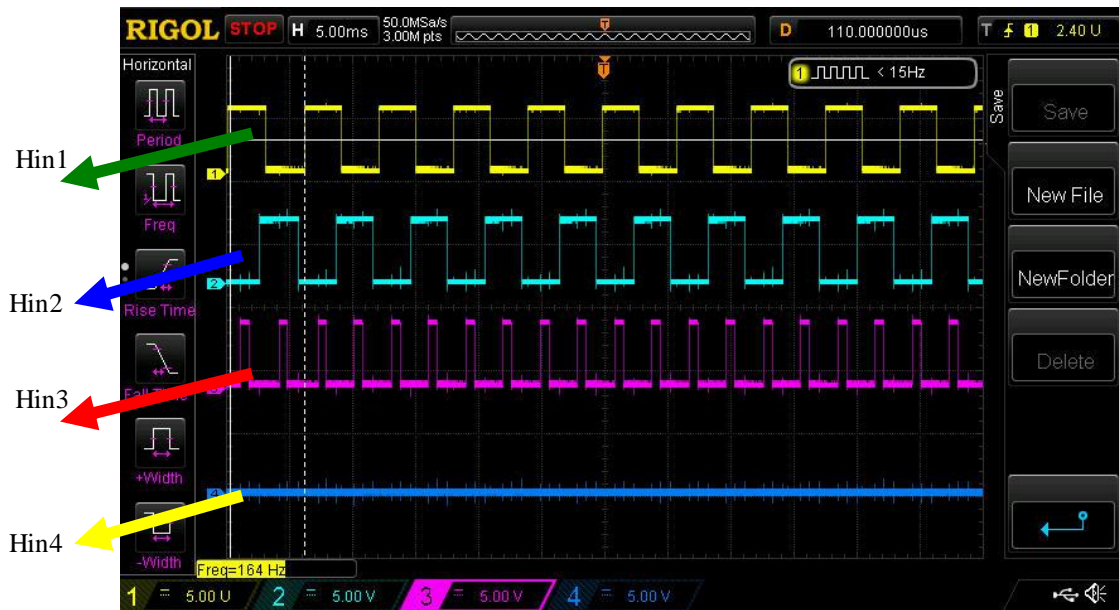


(b)

Figure. 4. 11 : Signaux de commande Hin1, Hin2, Hin3 & Hin4 pour le mode de la commande à 3 niveaux

a) Fréquence élevée

b) Fréquence basse



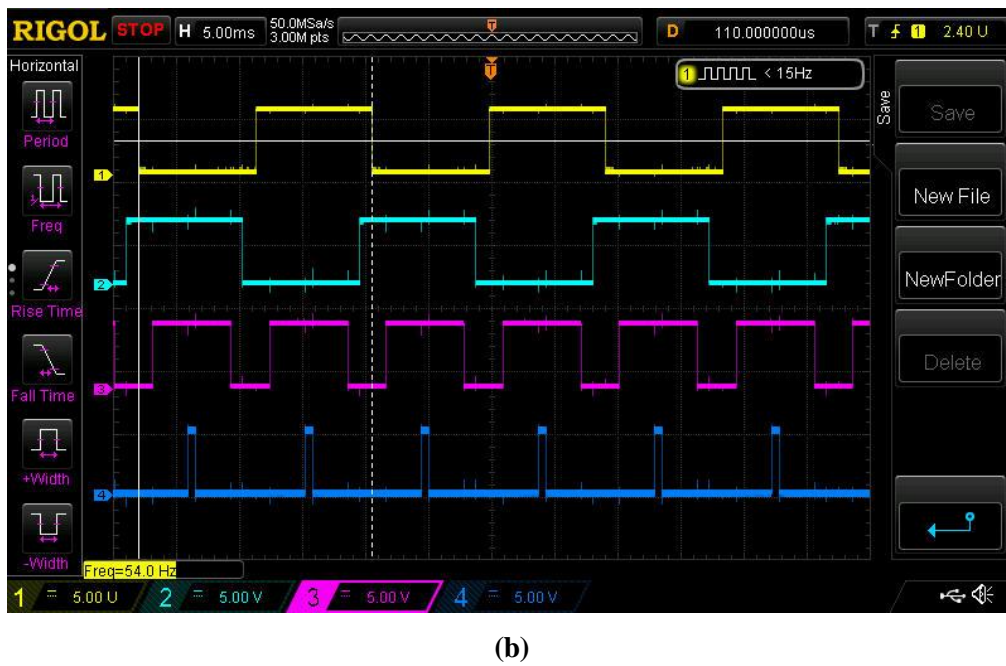
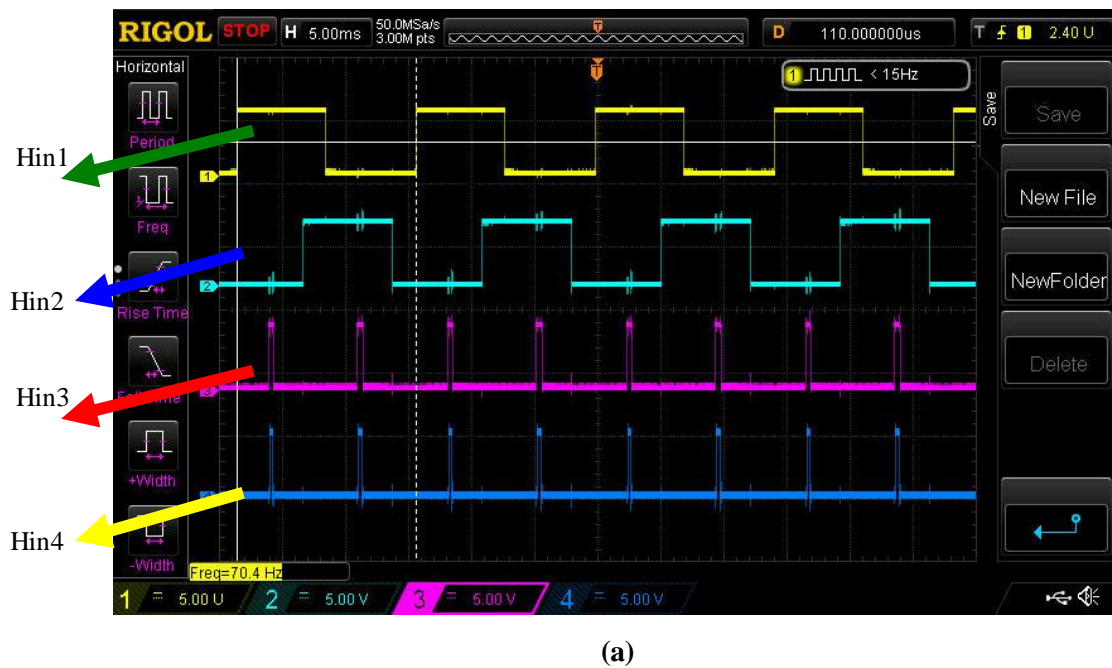
(a)



(b)

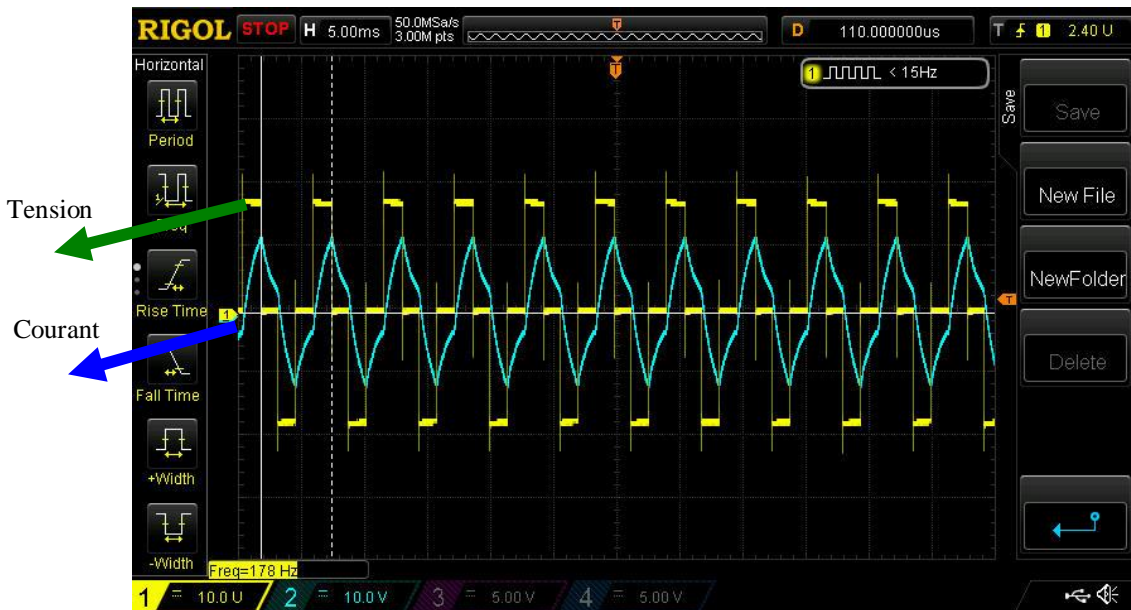
**Figure. 4. 12** : Signaux de commande Hin1, Hin2, Hin3 & Hin4 pour le mode de la commande à 5 niveaux

- a) Exemple d'une fréquence élevée
- b) Exemple d'une fréquence basse

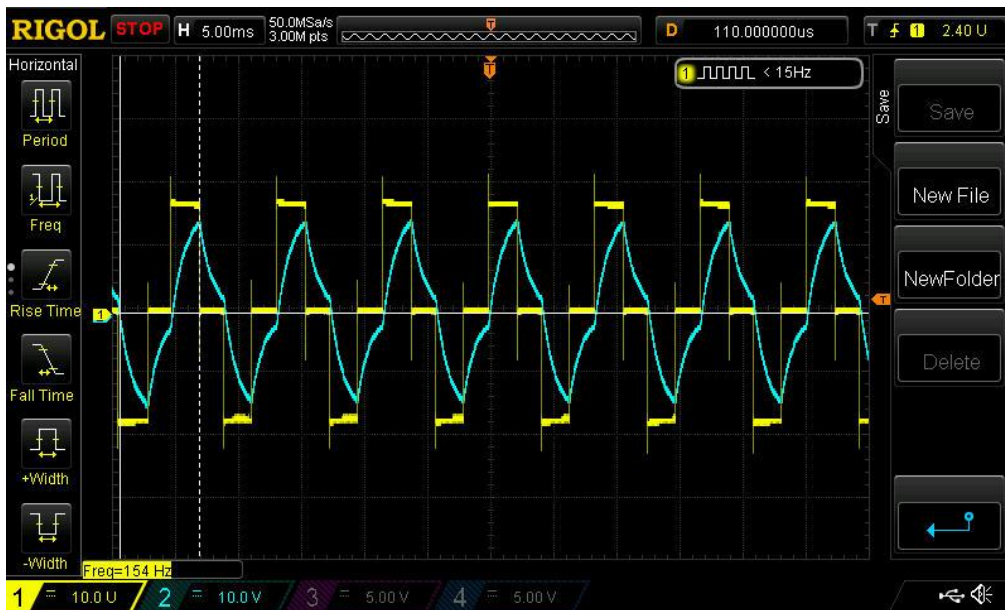


**Figure. 4. 13 :** Signaux de commande Hin1, Hin2, Hin3 & Hin4 pour le mode de la commande à 7 niveaux

- a) Exemple d'une tension efficace faible
- b) Exemple d'une tension efficace modérée



(a)

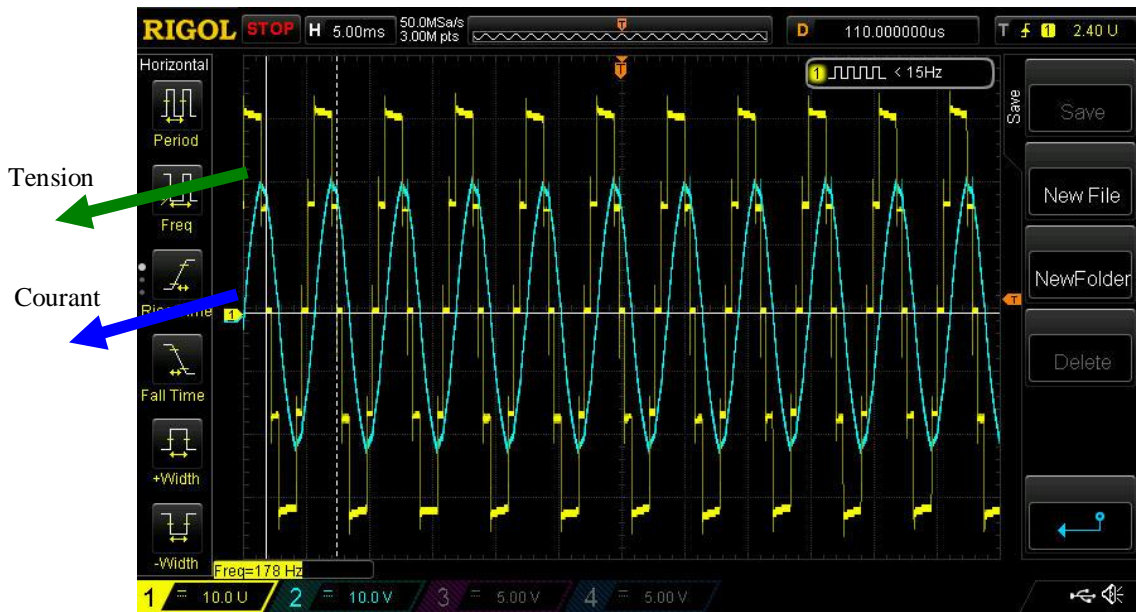


(b)

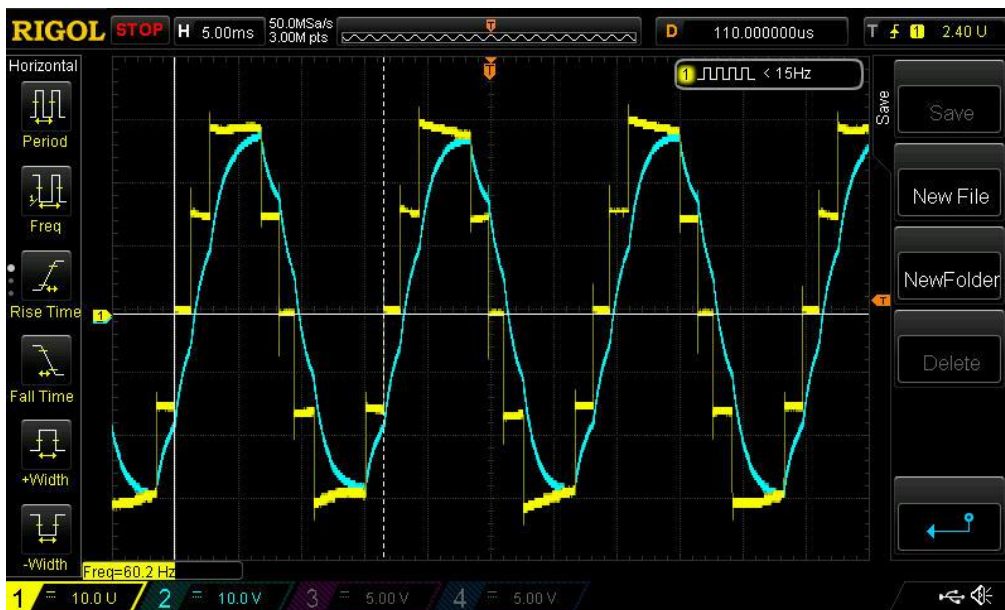
**Figure 4. 14 :** Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 3 niveaux

( $R = 75 \Omega$  et  $L = 51 \text{ mH}$ )

- a) Exemple d'une fréquence modérée
- b) Exemple d'une fréquence faible



(a)



(b)

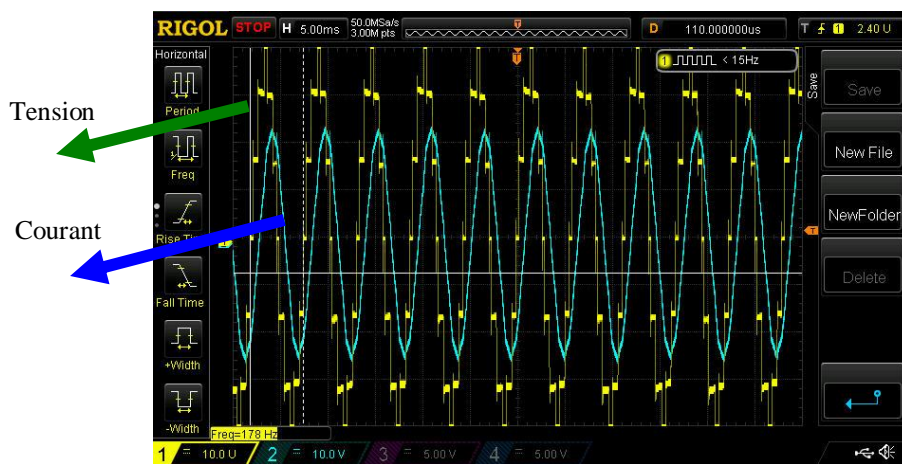
**Figure 4. 15 :** Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 5 niveaux  
( $R = 75 \Omega$  et  $L = 51 \text{ mH}$ )

a) Exemple d'une fréquence modérée

b) Exemple d'une fréquence faible



(a)



(b)

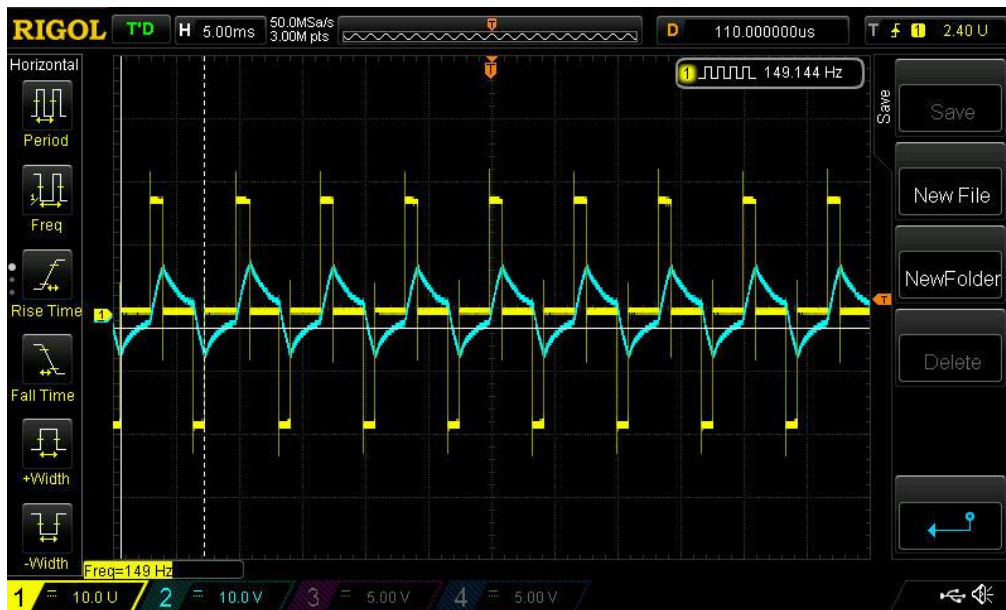


(c)

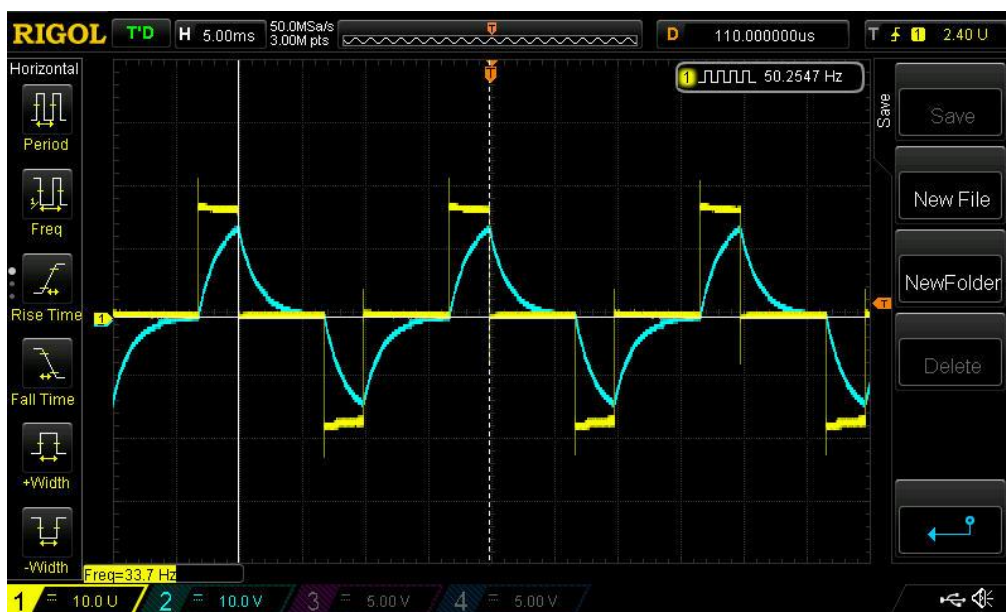
Figure 4. 16 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 7 niveaux

( $R = 75 \Omega$  et  $L = 51 \text{ mH}$ )

- a) Exemple d'une tension efficace modérée
- b) Exemple d'une fréquence modérée
- c) Exemple d'une fréquence faible



(a)



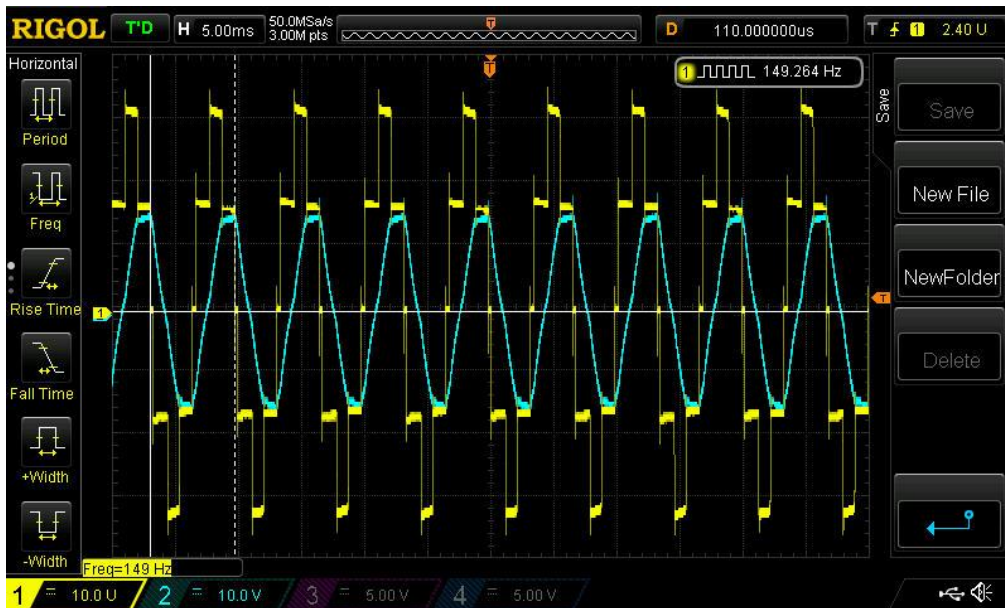
(b)

Figure 4. 17 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 3 niveaux

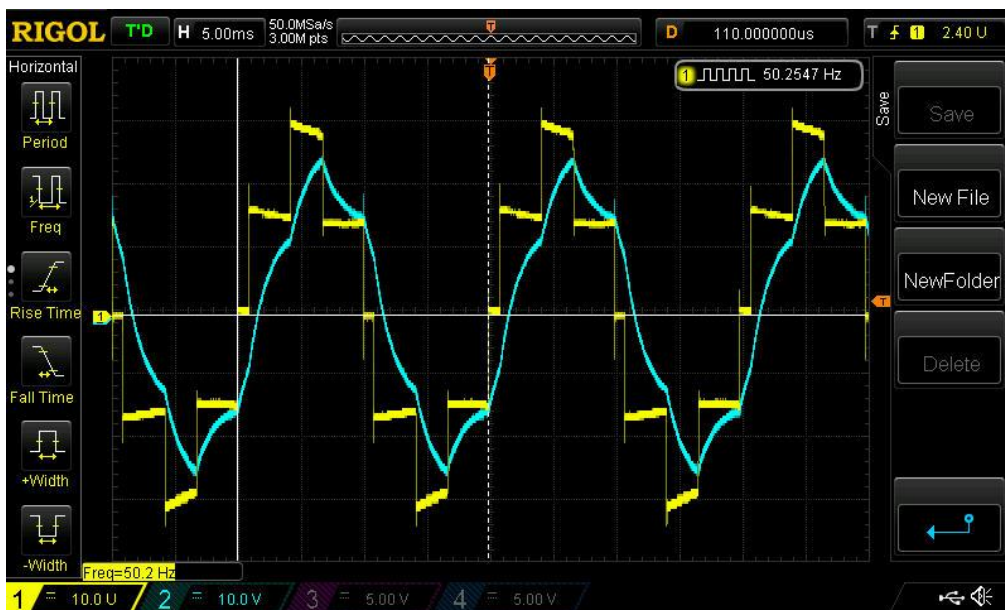
( $R = 52\Omega$  et  $L = 51\text{ mH}$ )

a) Exemple d'une tension efficace faible et fréquence élevée

b) Exemple d'une fréquence fiable



(a)

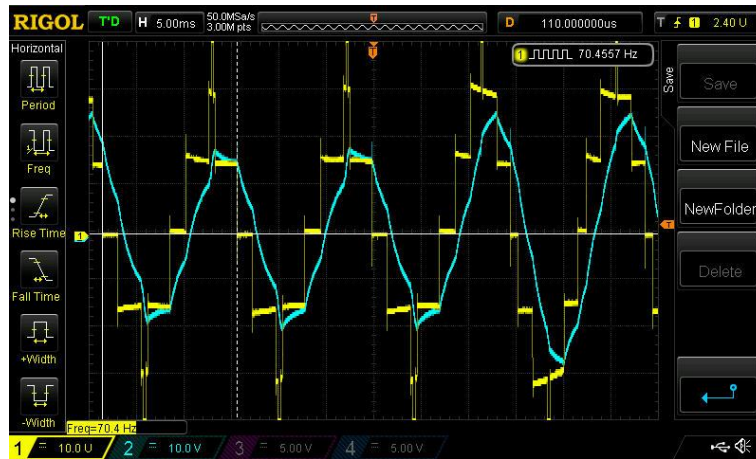


(b)

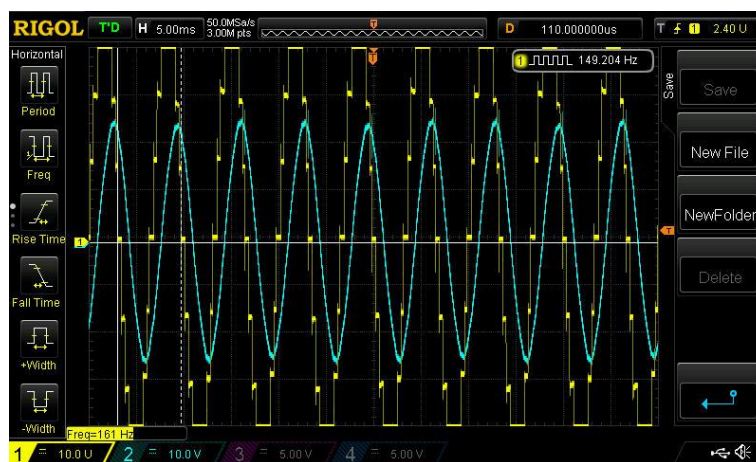
**Figure 4. 18 :** Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 5 niveaux  
( $R = 52 \Omega$  et  $L = 51 \text{ mH}$ )

a) Exemple d'une tension efficace faible et fréquence élevée

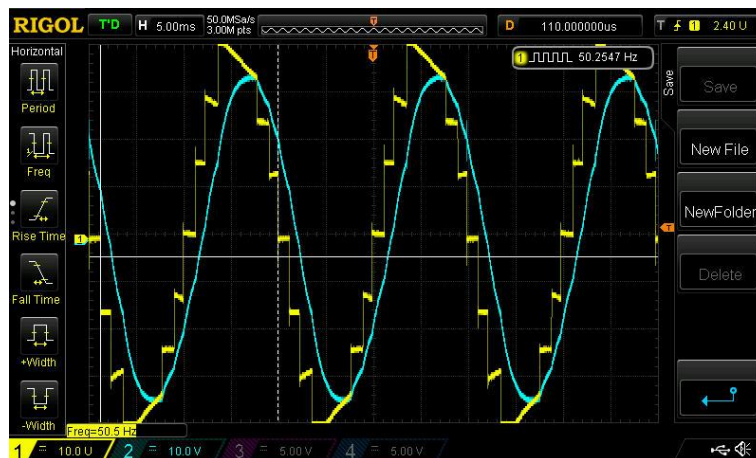
b) Exemple d'une fréquence fiable



(a)



(b)



(c)

Figure 4. 19 : Tension et courant de charge pour le mode de la commande à 7 niveaux

( $R = 52\Omega$  et  $L = 51\text{ mH}$ )

- a) Exemple d'une tension efficace faible et fréquence faible
- b) Exemple d'une fréquence élevée
- c) Exemple d'une fréquence faible et tension élevée

#### **4. 5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté expérimentalement notre projet qui assure en particulier la commande en pleine onde de l'onduleur monophasé à 7 niveaux. Les listes des composants, les circuits électriques et les circuits imprimés des étages ont été illustrés. Les mesures des signaux de commande, de la tension et du courant de charge ont montrées une grande concordance devant les signaux de simulations Matlab et Preteus. Nous avons parlé que les pics ou les parasites dans les signaux réels sont dus aux phénomènes des régimes transitoires lors de commutation des transistors de puissance. Dans le cas de la structure à 7 niveaux, les signaux de courant ont des formes d'ondes quasiment sinusoïdales qui signifient un taux de distorsion harmonique faible.

# Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons achevé aux nos objectifs de réalisation de onduleur monophasé à 7 niveaux tracés dans l'introduction générale. Nous avons confirmé la concordance entre les formes de la tension et du courant réelles et simulées. La plateforme matérielle est constituée principalement par le microcontrôleur pic16F877A. Nous avons également développé un contrôle souple de la fréquence et des instants de réglage de la tension de sortie. Par rapport aux commandes classiques (3 et 5 niveaux), nous avons également diminué le taux de distorsion harmonique du courant. Notre projet a été réalisé après l'effectuation des différentes parties dans les chapitres du mémoire :

- ✚ Dans le **Chapitre 1**, nous avons présenté les différentes topologies des onduleurs multi niveaux, nous avons étudié l'onduleur à sept niveaux de la nouvelle structure avec sa commande à pleine onde. Ensuite, le système d'équations à optimiser est donné et l'expression explicite du calcul de THD à partir des mesures des signaux de sortie est aussi présentée. Enfin, nous avons présenté l'algorithme génétique à codage réel pour trouver les angles optimaux de commutation. Dans le Chapitre 2 on va présenter le microcontrôleur PIC16F877A qui représente l'organe principal de notre plate forme matérielle.
- ✚ Dans le **Chapitre 2**, nous avons exposé en premier lieu les définitions, les familles et la classification des microcontrôleurs. En particulier, nous avons opté le microcontrôleur pic16F877A comme un outil de commande de l'onduleur multi-niveaux, car les caractéristiques et les modules internes que dispose ce dernier s'adaptent mieux au notre projet. Cette cible qu'elle offre de modules dédiés pour la commande en boucle ouverte des moteurs électriques, mais elle reste insuffisante pour cadencer des stratégies de commande en boucle fermée des machines électriques.
- ✚ Dans le **Chapitre 3**, nous avons présenté deux sortes de simulations de l'onduleur monophasé à commande pleine onde possédant 3, 5 et 7 niveaux. Pour améliorer la qualité des signaux de sortie, nous avons utilisé des angles de conduction optimisés en fonction du taux de réglage. La simulation Matlab et la simulation Proteus offrent des

résultats quasiment similaires, ce qui nous confirme la justesse de notre code CCS développé. Le fichier hexadécimal de ce dernier sera chargé dans le pic16F877A (objectif du Chapitre 4) pour la création en temps réel les 8 chronogrammes des signaux de commande, Hin1, Lin1, Hin2, Lin2, Hin3, Lin3, Hin4 et Lin4.

- ✚ Dans le **Chapitre 4**, nous avons présenté expérimentalement notre projet qui assure en particulier la commande en pleine onde de l'onduleur monophasé à 7 niveaux. Les listes des composants, les circuits électriques et imprimés des étages ont été illustrés. Les mesures des signaux de commande, de la tension et du courant de charge ont montrées une grande concordance devant les signaux de simulations Matlab et Preteus. Nous avons parlé que les pics ou les parasites dans les signaux réels sont dus aux phénomènes des régimes transitoires lors de commutation des transistors de puissance. Dans le cas de la structure à 7 niveaux, les signaux de courant ont des formes d'ondes quasiment sinusoïdales (taux de distorsion harmonique faible).

Comme perspectives, on peut citer quelques travaux qui peuvent être effectués dans le futur :

- Commande en boucle fermée du variateur de vitesse du moteur AC à base de l'onduleur monophasé à 7 niveaux.
- Utilisation du microcontrôleur Dspic30F3010 pour la commande d'autres structures d'onduleurs monophasés.
- Commande en boucle fermée du hacheur parallèle (Boost).

# Références

- [1] La qualité de l'énergie électrique :  
<https://www.amelioronslaville.com/electricite/instruments-de-mesure/2017/01/la-qualite-de-lenergie-definition-et-principes/>
- [2] Kambiz ARAB TEHRANI "Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux ", Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [3] Gi. Seguier, "Electronique de puissance", Francis Labrique, Philippe Delarue - Collection Sciences sup - Sciences de l'ingénieur, 415 pages, parution le 19/08/2015 (10<sup>ème</sup> édition).
- [4] Muhammad Harunur Rashid, "Power electronics, Circuits, Devices and applications", Prentice-Hall. Inc, New Jersey 07632, 1988
- [5] K. El-Naggar and T. H. Abdelhamid, "Selective harmonic elimination of new family of multilevel inverters using genetic algorithms", Energy Conversion and Management, Vol. 49, 2008, pp. 89–95.
- [6] S. Dechoucha et O. Bourezg, "Conception des techniques MLI dédiées à la commande des convertisseurs DC/DC et DC/AC à base du microcontrôleur PIC18F4431 " Mémoire de Master en Electronique Option Contrôle Industriel, Département d'Electromécanique, Université de Msila, Algérie, 2017.
- [7] Microship fiche technique, PIC16F877A Datasheet :  
[https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Pic16f877a%20datasheet&gclid=EA1aIQobChMI68Lnw6Hx8AIVB7DtCh0gtQ-rEAAYASAAEgI9M\\_D\\_BwE](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Pic16f877a%20datasheet&gclid=EA1aIQobChMI68Lnw6Hx8AIVB7DtCh0gtQ-rEAAYASAAEgI9M_D_BwE).
- [8] Violaine Didier, "Les Onduleurs des Systèmes Photovoltaïques, Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances", Rapport rédigé par Violaine Didier, [www.hespul.org](http://www.hespul.org), 2007.
- [9] B. M. Wilamowski and J. David Irwin, "The Industrial Electronics Handbook", Power Electronics and Motor Drives, 2nd ed. CRC Press, 2017.
- [10] Maker Hattab, "Réalisation d'un Onduleur Monophasé Commandé par pic16F877", Rapport de Projet de fin d'étude, Ecole supérieur de technologie–Berrechid, Université Hassan1–Settat, Maroc, 2014.
- [11] Cours électronique de puissance, "Conversion Continu Alternative", Université Joseph Fourier, France
- [12] A. Benhadjer, "Etude, Simulation et Réalisation d'un Onduleur Triphasé pour les Trains Electro-diesel", Ecole Supérieure en Sciences Appliquées, Tlemcen, 2019.

- [13] A. Ahmane, “Etude et Réalisation d’une Carte de Commande d’un Onduleur Monophasé PWM“, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M’Hidi - Oum El Bouaghi, 2016.
- [14] S. Hantaz et D. Berbit, “Application des Réseaux de Neurones A la Commande Par Elimination d’harmonique des Onduleurs Monophasés à Sept Niveaux“, Mémoire d’Ingénieur, Université Mohamed Boudiaf- M’Sila, Algérie, 2011.
- [15] A. Chaki, A. Ghouzroum, “Conception et Réalisation des Convertisseurs AC/DC à Base du Microcontrôleur PIC16F877A“, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- M’Sila, Algérie, 2018.
- [16] H. Laterch et S. Abd Elaziz, “Réalisation d’un Onduleur Monophasé et l’Optimisation de sa Commande MLI“, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- M’Sila, Algérie, 2009.
- [17] C. Ghoubache et T. E. Chakir, “Etude et Réalisation d’un Télémètre à Ultrason à base d’un microcontrôleur PIC16F877A“, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M’Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, 2014.
- [18] S. Meftah et I. Belhadj, “Commande d’un Onduleur Monophasé avec Elimination d’Harmonique à base du Microcontrôleur PIC 18F4431, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- M’Sila, Algérie, 2020.
- [19] Langage CCSPICC :  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Proteus\\_\(%C3%A9lectronique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Proteus_(%C3%A9lectronique))
- [20] Driver IR2112 :  
[https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ir2112&gclid=EAIaIQobChMIjtj7wqXx8AIViLrtCh1rggt\\_EAAYASAAEgJeR\\_D\\_BwE](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ir2112&gclid=EAIaIQobChMIjtj7wqXx8AIViLrtCh1rggt_EAAYASAAEgJeR_D_BwE)

# Annexe A

Le code suivant représente la fonction ‘S-function’ pour la génération des chronogrammes des signaux de commande de l’onduleur à 7 niveaux:

```
function [sys,x0,str,ts]=Commande7niv(t,x,u,flag)
Fs=100e3;
Ts=1/Fs;
T=0.02;
w=314.16;

alpha1=9;
alpha2=29;
alpha3=54;

if flag==0
    sys=[0;0;4;0;0;0;1];
    str=[];
    x0=[];
    ts=[Ts 0];
elseif flag==3
    t1=alpha1*pi/(180*w);
    t2=alpha2*pi/(180*w);
    t3=alpha3*pi/(180*w);
    tt=mod(t,T);
    if (tt > t1 && tt <= T/2+t1)
        S1=1;
    else
        S1=0;
    end
    if (tt > T/2-t1 && tt <= T-t1)
        S2=1;
    else
        S2=0;
    end
    if (tt > t2 && tt <= T/2-t2) || (tt > T/2+t2 && tt <= T-t2)
        S5=1;
    else
        S5=0;
    end
    if (tt > t3 && tt <= T/2-t3) || (tt > T/2+t3 && tt <= T-t3)
        S7=1;
    else
        S7=0;
    end
    sys=[S1;S2;S5;S7];
else
    sys=[];
end
```

# Annexe B

Le code suivant représente le programme CCSPICC pour la génération en temps réel les chronogrammes des signaux de commande de l'onduleur à 3, 5 et 7 niveaux:

```
#include <16F877A.h>
#device ADC=8

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O

#use delay(crystal=20000000)

//LCD 16/2 configuration
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_B4
#define LCD_RS_PIN PIN_B6
#define LCD_RW_PIN PIN_B5

#define LCD_DATA4 PIN_B3
#define LCD_DATA5 PIN_B2
#define LCD_DATA6 PIN_B1
#define LCD_DATA7 PIN_B0
#include <lcd.c>

#include <math.h>
#define PIN_MODE PIN_A2

#bit CM1 = 0x08.2      // PIN D2
#bit CM2 = 0x08.3      // PIN D3
```

```
#bit CM3 = 0x07.4 // PIN C4
```

```
#bit CM4 = 0x07.5 // PIN C5
```

```
int i,mode=0,k=0,v1,v2,t1,t2,t3,u1=0,u2=0,u3=0,a,
```

```
theta1[15]={25,24,24,24,21,22,11,11,10,18,16,19,11,5,9}, // 7 niveaux
```

```
theta2[15]={85,85,85,84,81,83,49,41,42,31,24,22,27,30,29},
```

```
theta3[15]={88,89,87,89,88,89,88,85,85,80,58,60,54,53,54},
```

```
alpha1[24]={85,80,22,21,19,18,16,15,13,12,10,9,7,5,3,2,1,3,5,8,11,14,18,26}, // 5
```

```
niveaux
```

```
alpha2[24]={88,85,82,81,79,78,76,75,73,72,70,69,67,65,63,62,59,57,55,52,49,46,42,34},
```

```
alpha[19]={175,170,160,150,140,130,120,110,100,90,80,70,60,50,40,30,20,10,5}; // 3
```

```
niveaux
```

```
float T,f;
```

```
#int_TIMER2
```

```
void TIMER(void)
```

```
{
```

```
  k++;
```

```
  switch(mode)
```

```
  {
```

```
    case 0: //Onduleur à 7 niveaux
```

```
      if (u1>v2) u1=0;
```

```
      if (u1>=t1 & u1<v2/2+t1)
```

```
        output_high(pin_d2);//CM1 = 1;
```

```
      else
```

```
        output_low(pin_d2);//CM1 = 0;
```

```
      if (u1>=v2/2-t1 & u1<v2-t1)
```

```
        output_high(pin_d3);//CM2 = 1;
```

```
      else
```

```
    output_low(pin_d3);//CM2 = 0;
if ((u1>=t2 & u1<v2/2-t2) || (u1>=v2/2+t2 & u1<v2-t2))
    output_high(pin_c4);//CM3 = 1;
else
    output_low(pin_c4);//CM3 = 0;
if ((u1>=t3 & u1<v2/2-t3) || (u1>=v2/2+t3 & u1<v2-t3))
    output_high(pin_c5);//CM4 = 1;
else
    output_low(pin_c5);//CM4 = 0;
    u1++;
break;
//-----
case 1: //Onduleur à 5 niveaux
    if (u2>v2) u2=0;

    if (u2>=t1 & u2<v2/2+t1)
        output_high(pin_d2);//CM1 = 1;
    else
        output_low(pin_d2);//CM1 = 0;
if (u2>=v2/2-t1 & u2<v2-t1)
    output_high(pin_d3);//CM2 = 1;
else
    output_low(pin_d3);//CM2 = 0;
if ((u2>=t2 & u2<v2/2-t2) || (u2>=v2/2+t2 & u2<v2-t2))
    output_high(pin_c4);//CM3 = 1;
else
    output_low(pin_c4);//CM3 = 0;
    output_low(pin_c5);//CM4 = 0;
    u2++;
break;
//-----
case 2: //Onduleur à 3 niveaux
    if (u3>v2) u3=0;
    if (u3<=v2/2)
```

```
        output_high(pin_d2);//CM1 = 1;
    else
        output_low(pin_d2);//CM1 = 0;
    if (u3>=a && u3<(a+v2/2))
        output_high(pin_d3);//CM2 = 1;
    else
        output_low(pin_d3);//CM2 = 0;
    output_low(pin_c4);//CM3 = 1;
    output_low(pin_c5);//CM4 = 0;
    u3++;
    break;
}
}

void main()
{
//ADC configuration:
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_4);
    setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);

//Timer2 configuration:T=(4*4*(24+1)*5)/(20*1000)=0.1 ms
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,24,5);
    enable_interrupts(INT_TIMER2);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    set_tris_d(0x0c);        //output
    set_tris_c(0x30);        //output

    output_float(PIN_MODE);
    lcd_init();
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ondul_elim_harmo");
    lcd_gotoxy(1,2);lcd_putc("39Hz<freq<200Hz");
    delay_ms(100);
```

```
while(TRUE)
{
  if(!input(PIN_MODE))
  {
    mode++;
    if(mode==3) mode=0;
    delay_us(10);
    while(!input(PIN_MODE));
  }

  switch(mode)
  {

  case 0: //Onduleur à 7 niveaux
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    v1=read_adc(); // voltage
    i=ceil(v1/17);
    if(i>15) i=15;
    set_adc_channel(1);
    delay_us(10);
    v2=51+0.8*read_adc(); // frequency

    t1=0.002777*theta1[i]*v2;
    t2=0.002777*theta2[i]*v2;
    t3=0.002777*theta3[i]*v2;
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond 7 niveaux: ");
    //lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc,"T=%2.1fms F=%3.0fHz",T,f);
    break;

  case 1: //Onduleur à 5 niveaux
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    v1=read_adc(); // voltage
```

```
i=ceil(v1/11);
if(i>23) i=23;
set_adc_channel(1);
delay_us(10);
v2=51+0.8*read_adc(); // frequency
//T=0.1*v2;f=10000/v2;
t1=0.002777*alpha1[i]*v2;
t2=0.002777*alpha2[i]*v2;
lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond 5 niveaux: ");
//lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc,"T=%2.1fms F=%3.0f Hz",T,f);
break;

case 2: //Onduleur à 3 niveaux
set_adc_channel(0);
delay_us(10);
v1=read_adc();
i=ceil(v1/14);
if(i>18) i=18;
set_adc_channel(1);
delay_us(10);
v2=51+0.8*read_adc(); // frequency
//T=0.1*v2;f=10000/v2;
a=0.002777*alpha[i]*v2; //x=alpha1*v2/360
lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond 3 niveaux: ");
//lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc,"T=%2.1fms F=%3.0f Hz",T,f);
break;
}
T=0.1*v2;
f=1000/T;
if (k>200) {lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc,"T=%2.1fms F=%3.0f Hz",T,f);k=0;}
}
}
```

## **Résumé**

Les transformateurs sont des convertisseurs CC | AC pour assurer la régulation de la fréquence et la valeur efficace de la tension de sortie. Dans ce travail, l'étude et la réalisation d'un type de transformateur d'élimination d'harmoniques qui est un onduleur pleine onde à 7 niveaux à travers un microcontrôleur PIC16F877A est présentée. La partie théorique de ce travail porte sur l'optimisation des angles de départ par la méthode de l'algorithme génétique. Ensuite, la partie pratique consiste à réaliser trois cartes distinctes, la carte de puissance, la carte de puissance et la carte de contrôle. De plus, des mesures de signaux en temps réel ont été effectuées via un oscilloscope numérique. Nous avons également utilisé des angles de conduction optimisés en fonction du taux de concordance. La simulation Matlab et la simulation Proteus donnent des résultats presque similaires, ce qui confirme la précision du code CCS développé.

## **Mots clés :**

Onduleur de tension , Microcontrôleur PIC16F877A

## **Abstract :**

Transformers are DC converters | AC to ensure frequency regulation and rms value of the output voltage. In this work, the study and realization of a type of harmonic removal transformer which is a full wave inverter with 7 levels through a PIC16F877A microcontroller is presented. The theoretical part of this work is concerned with optimizing the starting angles by the genetic algorithm method. Then, the practical part is to make three separate cards, the power card, the power card and the control card. In addition, real-time signal measurements were performed via a digital oscilloscope. We also used optimized conduction angles according to the rate of agreement. Matlab simulation and Proteus simulation give almost similar results, which confirms the accuracy of the developed CCS code.

## **Keywords :**

Inverter , PIC16F877A Microcontroller

## الملخص :

المحولات هي محولات AC | DC لضمان تنظيم التردد وقيمة جذر متوسط التربيع لجهد الخرج. في هذا العمل ، يتم تقديم دراسة وتحقيق نوع من محولات الإزالة التوافقية وهي عاكس الموجة الكاملة مع 7 مستويات من خلال متحكم PIC16F877A. يتعلق الجزء النظري من هذا العمل بتحسين زوايا البدء بطريقة الخوارزمية الجينية. بعد ذلك ، يتمثل الجزء العملي في عمل ثلاث بطاقات منفصلة ، وهي بطاقة الطاقة وبطاقة الطاقة وبطاقة التحكم. بالإضافة إلى ذلك ، تم إجراء قياسات للإشارة في الوقت الفعلي عبر مرسمة الذبذبات الرقمية. كما استخدمنا زوايا التوصيل المحسنة وفقاً لمعدل الاتفاق. تعطي محاكاة Matlab ومحاكاة Proteus نتائج متشابهة تقريباً ، مما يؤكد دقة كود CCS الذي تم تطويره.

## الكلمات المفتاحية :

المحول، متحكم PIC16F877A