

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE JIJEL



*Faculté des Sciences et de la Technologie*

*Département d'électrotechnique*

*Mémoire*

*De Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme  
de Master en Electrotechnique  
Option : électromécanique*

*Thème*

***Réalisation pratique et implémentation des  
techniques de commandes à travers un  
onduleur triphasé***

**Réalisé par :**

*Mr. Bouchebtoul Youcef  
Mr. Lemtaiche Atmane*

**Encadré par :**

*Pr. Hicham Allag*

**Promotion: Juin 2018**

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The top and right sides feature a vertical line of pearls. The left side features a vertical line of roses, including a red rose bud and several white roses with green leaves. The bottom side features a horizontal line of pearls.

# Remerciement

*Nous remercions tout d'abord **ALLAH** le tout puissant pour nous avoir donnés la force et le courage pour faire aboutir ce travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Monsieur H.ALLAG pour avoir dirigé ce mémoire, pour son temps qu'il a accordé, ses conseils, ses encouragements et les précieuses orientations qui ont contribué à baliser le parcours de cette recherche.*

*Nous remercions les membres de jury qui ont accepté d'examiner notre modeste travail, pour leur disponibilité et leur confiance.*

*Nous remercions aussi nos enseignants de département d'électrotechnique de l'université de Jijel qui nous guident pendant les 5 années d'étude.*

*Un tel travail est également le résultat des efforts de beaucoup de personnes qui nous ont aidés énormément, à ceux qui nous ont facilités l'accès à l'information pour l'élaboration de ce mémoire.*

**LEM7A7CHE et BOUCHEBTOUL**



# *Dédicace*

*nous dédies ce travail*

*Aux deux chandelles, qui sont toujours en combustion pour que je Puisse  
être contente, cher père et chère mère, j'espère qu'ils trouvent à ce  
travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*



*A ceux qui occupent une place importante  
dans ma vie mes frères et mes sœurs.*

*A mes collègues et amies  
sans exception.*

*A tous ceux qui m'aiment et que  
j'aime.*



*ATMANE, YUCEF*



## *Liste des figures*

<b>Figure I.1</b> : Familles de convertisseurs statiques.....	5
<b>Figure I.2</b> : Les interrupteurs parfaits[a] (position ON : $u = 0$ ) [b] (position OFF : $i = 0$ ).....	6
<b>Figure I.3</b> : schéma symbolique du diode idéale.....	6
<b>Figure I.4</b> : schéma symbolique du transistor bipolaire.....	6
<b>Figure I.5</b> : schéma symbolique du transistor IGBT et MOSFET.....	7
<b>Figure I.6</b> : schéma symbolique du thyristor et thyristor GTO.....	8
<b>Figure I.7</b> : le schéma symbolique de l'onduleur.....	8
<b>Figure 1.8</b> : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux.....	10
<b>Figure 1.9</b> : Structures NPC à trois niveaux a) et à cinq niveaux b).....	10
<b>Figure 1.10</b> : Structures à condensateurs flottants à trois niveaux a) et à cinq niveaux b).....	11
<b>Figure 1.11</b> : Onduleur en cascade à cinq niveaux a) et à N niveaux b).....	13
<b>Figure I.12</b> : Alimentations sans interruption.....	14
<b>Figure I.13</b> : Variation de la vitesse des moteurs à courant alternatif.....	15
<b>Figure 1.14</b> : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	15
<b>Figure I.15</b> : Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé.....	18
<b>Figure I.16</b> : Conduction sur une demi-période.....	18
<b>Figure I.17</b> : Fonctionnement d'un onduleur sur une période.....	18
<b>Figure I.18</b> : Montage en demi-pont.....	19
<b>Figure I.19</b> : Montage en pont.....	20

<b>Figure I.20:</b> Schéma de principe de l'onduleur triphasé avec charge RLE.....	<b>20</b>
<b>Figure I.21 :</b> Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.....	<b>21</b>
<b>Figure I.22.</b> Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge <i>RL</i> montée en étoile (commande 180°).....	<b>25</b>
<b>Figure I.23:</b> Commande 180°.....	<b>26</b>
<b>Figure I.24 :</b> a) Les tensions simples $V_a$ $V_b$ , $V_c$ de l'onduleur b) La tension composée $V_{AB}$ de l'onduleur.....	<b>26</b>
<b>Figure I.25 :</b> Commande 120°.....	<b>27</b>
<b>Figure I.26 :</b> Commande des interrupteurs à $\frac{2\pi}{3}$ .....	<b>27</b>
<b>Figure I.27 :</b> Commande mli simple.....	<b>29</b>
<b>Figure I.28:</b> a) Représentation des vecteurs tensions réalisables par l'onduleur. b) Projection du vecteur à réaliser sur ses deux vecteurs adjacents.....	<b>29</b>
<b>Figure II.1:</b> Photo de la carte Arduino Uno.....	<b>34</b>
<b>Figure II.2:</b> Structure de la carte ARDUINO-UNO.....	<b>36</b>
<b>Figure II.3:</b> Connecteur pile 9V.....	<b>37</b>
<b>Figure II.4:</b> Support de piles.....	<b>37</b>
<b>Figure II.5:</b> fenêtré d'édition avec code ou programmation du module ARDUINO.....	<b>39</b>
<b>Figure II.6:</b> Structure d'un projet Arduino.....	<b>40</b>
<b>Figure III.1 :</b> étapes essentiels pour la réalisation de l'onduleur.....	<b>44</b>
<b>Figure III.2:</b> Le semi-conducteur IRF640 et leur architecture interne.....	<b>46</b>
<b>Figure III.3:</b> photo de driver (a) Synoptique simplifié de fonctionnement (b).....	<b>47</b>

<b>Figure III.4:</b> Schéma électrique de la partie puissance avec ISIS.....	<b>48</b>
<b>Figure III.5:</b> Schéma de circuit imprimé de la partie puissance avec sprint-layout.....	<b>48</b>
<b>Figure.III.6.</b> Radiateur.....	<b>49</b>
<b>Figure III.7:</b> onduleur triphasé.....	<b>51</b>
<b>Figure III.8 :</b> l'amplification par les drivers.....	<b>52</b>
<b>Figure III.9:</b> Photo de l'onduleur réalisé avec le banc d'essai.....	<b>52</b>
<b>Figure III.10</b> les signaux fournis par la carte Arduino (A), les signaux simulé (b) (plein-onde).....	<b>53</b>
<b>Figure III.11 :</b> amplification des signaux de commande.....	<b>54</b>
<b>Figure III.12</b> onduleur triphasé utilisé comme monophasé en pont.....	<b>55</b>
<b>Figure III.13</b> L'allure de tension (charge R).....	<b>55</b>
<b>Figure III.14:</b> L'allure de courant et de tension de sortie (charge R L).....	<b>56</b>
<b>Figure III.15:</b> L'allure de courant et de tension de sortie (charge R L).....	<b>57</b>
<b>Figure III.16 :</b> les signaux délivrer par la carte Arduino avec un déphasage de $\frac{2\pi}{3}$ pour chaque haut de bras(A),par simulation(B).....	<b>57</b>
<b>Figure III.17 :</b> L'allure de courant de sortie avec FFT (A) et le courant simulé(B).....	<b>58</b>
<b>Figure III.18 :</b> L'allure de tension simple (A) et la tension simple simulé(B).....	<b>58</b>
<b>Figure III.19 :</b> L'allure de tension composé avec FFT (A) et la tension composée simulé (B). .....	<b>58</b>
<b>Figure III.20 :</b> Les impulsions obtenues à la sortie de la carte Arduino pour deux phases complémentaires (A) ,et Les impulsions obtenues par la simulation(B) (MLI).....	<b>59</b>
<b>Figure III.21 :</b> L'allure de courant de sortie avec FFT (A) et le courant simulé(B).....	<b>59</b>
<b>Figure III.22 :</b> L'allure de tension simple (A) et la tension simple simulé(B).....	<b>60</b>
<b>Figure III.23 :</b> L'allure de tension composé (A) et la tension composé simulé (B).....	<b>60</b>



## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1.1 : Les tensions et les courants correspondants à chaque état de commutation de l'onduleur.....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau. II.1. Liste des fonctions usuelles en C pour les Arduino.....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau III.1: Résumé des caractéristiques et sélection .....</b>	<b>45</b>

## **NOMENCLATURES**

**CA** : Courant Alternatif

**DC** : Direct Current (courant continu)

**GTO** : Gate Turn-Off.

**MOS** ou **MOSFET**: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

**IGBT**: Insulated Gate Bipolar Transistor

**NPC** : Neutral Point Clamped

**ASI** : Alimentations Sans Interruption

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion

**MLIS** : Modulation de Largeur d'Impulsion Sinusoïdale

**SVM** : Space Vector Modulation

**PWM** : Pulse Width Modulated

**R** : Résistance

**L** : L' inductance

**C** : Capacité

**AVR** : Architecture Harvard 8 bits RISC

**PC** : Personal Computer

## SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Sommaire

Introduction Générale.....2

### CHAPITRE I : Généralité sur les Onduleurs

I.1- Introduction.....4

I.1.1 Réversibilité des convertisseurs.....4

I.1.2 familles des convertisseurs statiques .....4

I.1.3 Origine des convertisseurs de puissance électrique .....5

I.1.4 les interrupteurs de l'électronique de puissance .....5

I.1.4.1 Les interrupteurs parfaits .....5

I.1.4.2 Les interrupteurs à semi-conducteurs.....6

I.2 - généralité sur les onduleurs .....8

I.2.1 Définition de l'onduleur.....8

I.2.2 Classification des onduleurs.....8

I.2.2.1 Onduleur autonome.....9

I.2.2.2 Onduleur non autonome.....9

I.2.3 Onduleurs multi-niveaux .....9

I.2.3.1 Onduleur multi-niveaux à diode de bouclage .....10

I.2.3.2.Onduleur multi-niveaux à condensateurs flottants.....11

I.2.3.3 Onduleur multi-niveaux à alimentation séparée (en cascade).....12

I.3 Applications des onduleurs .....13

I.3.1 Les ASI.....13

I.3.2 Variation de la vitesse des moteurs à courant alternatif.....15

I.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes .....15

I.4 Différents types de commande des interrupteurs.....16

I.4.1Commande à onde rectangulaire.....16

I.4.2	Commande en créneaux de largeur variable.....	16
I.4.3	Commande à paliers.....	16
I.4.4	Commande à modulation de largeur d'impulsions.....	17
I.5	Le principe de fonctionnement .....	17
I.5.1	Onduleur monophasé.....	17
I.5.1.1	Montage en demi-pont.....	19
I.5.1.2	Montage en pont.....	19
I.5.2	Les onduleurs triphasés.....	20
I.5.2.1	Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	21
I.6.	Stratégies de commande.....	25
I.6.1	Commande en créneaux de largeur variable.....	25
I.6.1.1	Commande 180°.....	25
I.6.1.2	Commande 120°.....	26
I.6.2	Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	27
I.6.2.1	Modulation sinusoïdale (MLIS).....	28
I.6.2.2	Modulation vectorielle (SVM).....	29
I.7	Conclusion.....	30

## CHAPITRE II : Généralité sur l'Arduino

II.1	Introduction.....	32
II.2	La carte ARDUINO Uno.....	34
II.3	Caractéristiques de la carte Arduino Uno.....	35
II.4	Schéma de principe de la carte ARDUINO.....	35
II.5	Alimentation de la carte ARDUINO.....	36
II.5.1	Alimentation filaire .....	36
II.5.2	Alimentation autonome.....	37
II.6	Entée sortie de la carte ARDUINO.....	38
II.7	Envernement de l'ARDUINO C.....	38
II.7.1	Structure d'un projet ARDUINO C.....	40
II.7.2	Commandes de structure duprogramme.....	41
II.8	Conclusion.....	42

## **CHAPITRE III :Réalisation pratique et implémentation des Résultats expérimentaux**

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>44</b>
<b>III.2 choix de semi-conducteurs.....</b>	<b>44</b>
<b>III.3 Le semi-conducteur utilisé.....</b>	<b>45</b>
<b>III.4 Circuit de commande de l'onduleur triphasé.....</b>	<b>46</b>
<b>III.4.1 La carte ARDUINO UNO .....</b>	<b>46</b>
<b>III.4.2 DRIVER IR2113.....</b>	<b>46</b>
<b>III.5 réalisation de l'onduleur triphasé.....</b>	<b>47</b>
<b>III.6 Protection de l'onduleur.....</b>	<b>49</b>
<b>III.7 Implantation des techniques de commandes (plein-onde et MLI).....</b>	<b>53</b>
<b>III.8 Observation des signaux de commande pour la commande pleineonde .....</b>	<b>53</b>
<b>III.9 Observation des grandeur électriques pour l'onduleur monophasé en pont.....</b>	<b>54</b>
<b>III.9.1 Débit sur une charge résistive R.....</b>	<b>54</b>
<b>III.9.2 : Débit sur une Charge RL .....</b>	<b>56</b>
<b>III.10 Observation des signaux de commande pour la plein-onde en triphasé .....</b>	<b>57</b>
<b>III.11 Implémentation de la commande plein-onde pour l'onduleur triphasé.....</b>	<b>57</b>
<b>III .12 Signaux de commande MLI.....</b>	<b>59</b>
<b>III.13 Implémentation de la MLI pour l'onduleur triphasé.....</b>	<b>59</b>
<b>III .14 conclusion .....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliographie et webographie</b>	
<b>Annexe</b>	

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Introduction générale

---

### Introduction générale

Le besoin d'alimentation en puissance et en fréquence variable a rendu l'utilisation des onduleurs d'une dominance magistrale. Les performances et les dynamiques des onduleurs dépendent essentiellement de la robustesse et la rapidité de la commande et de semi-conducteurs de puissance. La commande a connu une énorme amélioration avec l'accroissement des composants électroniques et surtout les microcontrôleurs. D'une autre part les semi-conducteurs de puissance ont à leur tour connu une grande évolution notamment avec l'arrivée des IGBT et des MOSFET.

Dans le but de réaliser un onduleur triphasé qui sera bénéfique en pédagogie pour les étudiants de master du département de l'électrotechnique. Nous avons eu l'idée de le réaliser avec des MOSFETs et en utilisant une carte open source type Arduino pour le faire, ce mémoire est constitué en trois chapitres dont le premier présente un aperçu théorique sur les types des onduleurs existants, les techniques de commandes classiques et modernes et surtout les différents semi-conducteurs qui peuvent être employés.

Le chapitre deux, évoque les différents carte Arduino connues et existants dans le marché mondial et algérien savoir (Arduino Uno, Arduino Min, Arduino Nano,...etc.).

Le troisième chapitre, dont l'intérêt global est bien inclus. il s'agit des étapes de réalisation de l'onduleur triphasé, en hacheur, et en pont.

Enfin, on terminera le travail par une conclusion et des perspectives.

## I.1 Introduction

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie.

Exemples :

Une alimentation stabilisée transforme la tension alternative sinusoïdale du réseau en tension continue (famille des redresseurs).

Un onduleur de secours transforme la tension continue des batteries en tension alternative pour alimenter, par exemple, du matériel informatique (famille des onduleurs). [1]

### I.1.1 Réversibilité des convertisseurs

Une notion importante en électronique de puissance comme en électrotechnique est la notion de réversibilité.

**Définition** : Un convertisseur statique d'énergie est dit réversible lorsque l'énergie peut transiter dans les deux sens (source - récepteur ou récepteur - source) de manière naturelle ou commandée.

Exemple : Lors du freinage d'une voiture électrique, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (moteur - génératrice) qui sert à recharger les accumulateurs à travers le redresseur réversible (redresseur commandé) [1].

### I.1.2 familles des convertisseurs statiques

Suivant le type du récepteur à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques [1] :

- Hacheur : continu/ continu (rapport cyclique a réglable).
- Onduleur : continu / alternatif (valeur moyenne = 0).
- Redresseur : alternatif / continu (valeur moyenne éventuellement réglable).
- Gradateur : alternatif / alternatif (valeur efficace réglable).

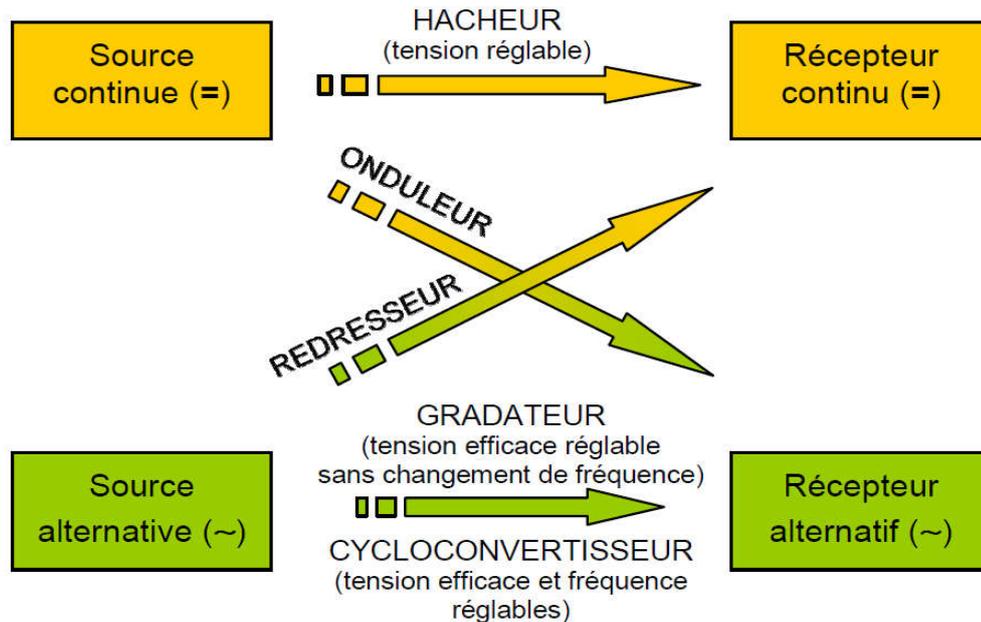


Figure I.1 : Familles de convertisseurs statiques.

### I.1.3 Origine des convertisseurs de puissance électrique

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement.

Une machine à courant alternatif d'une part (de type synchrone ou asynchrone) couplée au réseau permettait de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe. Une machine à courant continu d'autre part dont l'excitation commandée permettait de disposer d'une tension continue variable en sortie.

Le développement des composants de puissance au milieu du 20<sup>e</sup> siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournantes [1].

La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer :

- faible coût
- puissances commutées élevées
- facilité de contrôle

### I.1.4 les interrupteurs de l'électronique de puissance

#### I.1.4.1 Les interrupteurs parfaits

Un interrupteur parfait possède deux états : "Ouvert (OFF)" et "Fermé (ON)"

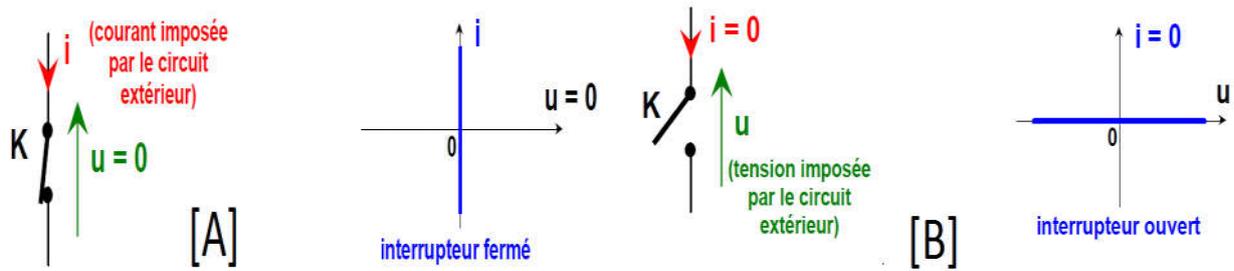


Figure I.2 : Les interrupteurs parfaits [a] (position ON :  $u = 0$ ) [b] (position OFF :  $i = 0$ ) [1].

### I.1.4.2 Les interrupteurs à semi-conducteurs

- La diode idéale (interrupteur non commandé)

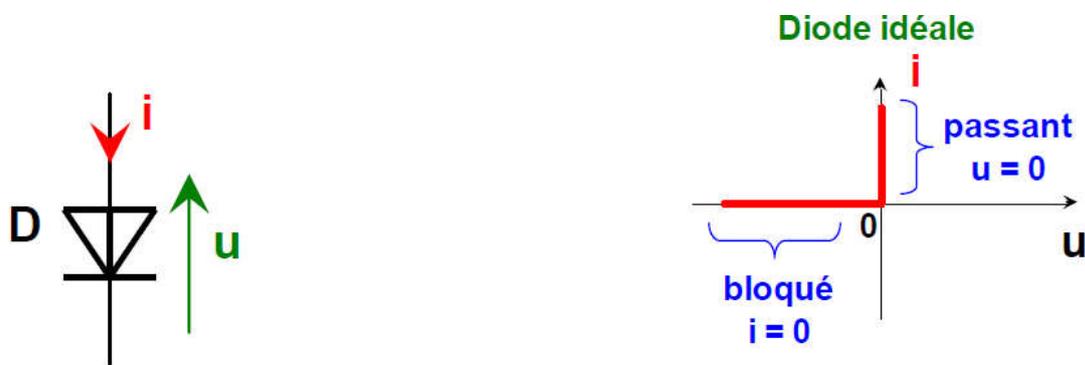


Figure I.3 : schéma symbolique du diode idéale [1].

- Le transistor bipolaire

Cet interrupteur est commandable à l'ouverture et à la fermeture, la commutation se fait par une action électrique (injection d'un courant de base  $i_B$ ).

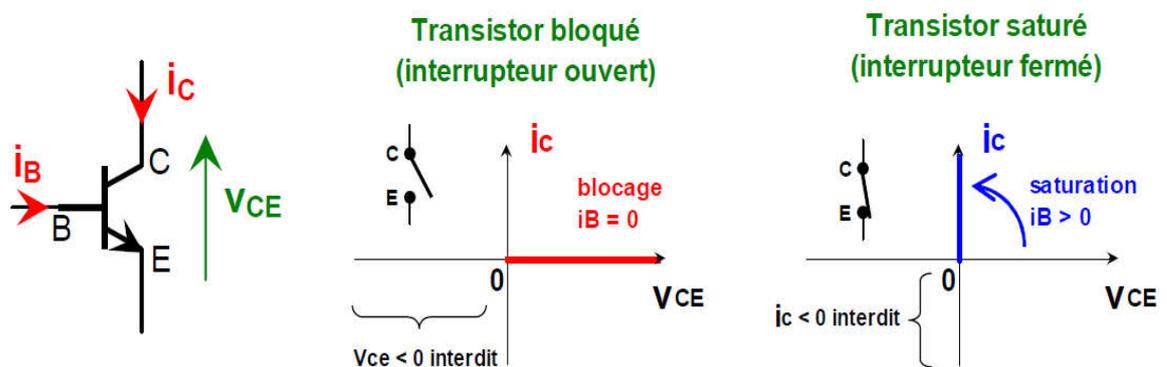


Figure I.4 : schéma symbolique du transistor bipolaire [1]

Lorsque le transistor est saturé (interrupteur fermé) le courant  $I_C$  et la tension  $V_{CE}$  ne doivent pas être négatif.

Le transistor est donc un interrupteur commandé unidirectionnel en tension et en courant.

- **Les transistors MOS et IGBT**

Ces transistors, plus performants, ont le même comportement que le bipolaire à la différence qu'ils se commandent avec une tension (le courant de commande est très faible).

☞ Dans cette mémoire on a utilisé ce type des transistors.

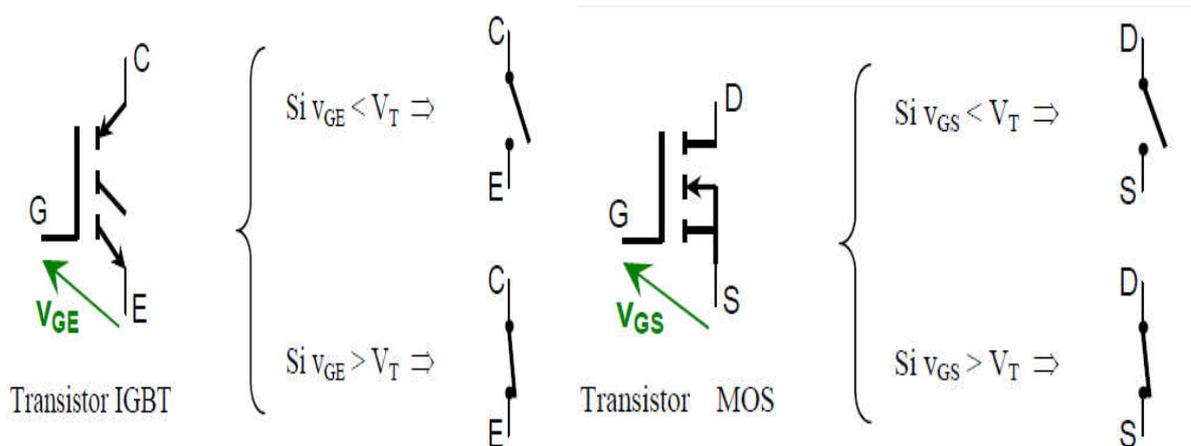


Figure I.5 : schéma symbolique du transistor IGBT et MOSFET [1]

- **Le thyristor**

Le thyristor est une diode commandée qui ne permet donc le passage du courant que dans un sens. De plus il n'est commandable qu'à la fermeture. L'ouverture s'effectue lors de la disparition du courant direct (voir diode).

Le thyristor se comporte donc comme une diode dont la mise en conduction dans le sens passant sera autorisée par une impulsion de courant sur la gâchette (retard à l'amorçage réglable) [1].

- **GTO**

Le thyristor GTO (*gate turn-off*), souvent appelé simplement GTO, est un semi-conducteur dont la *fermeture* et l'*ouverture* peuvent être commandées par la gâchette. Son symbole représentatif (figure I.6) est le même que celui du thyristor, si ce n'est qu'un tiret perpendiculaire à la connexion de gâchette signifie que le courant injecté dans le circuit gâchette-cathode peut être positif ou négatif.

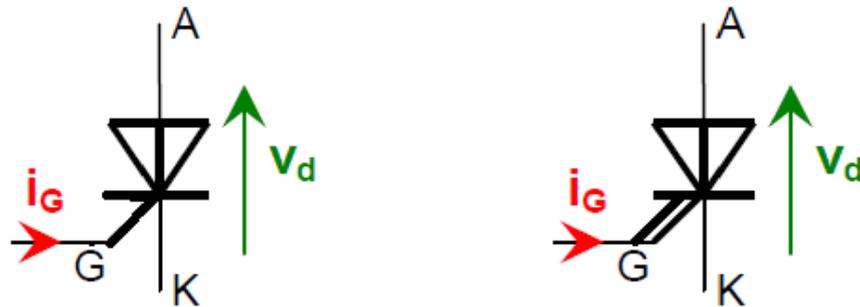


Figure I.6 : schéma symbolique du thyristor et thyristor GTO [1]

## I.2 généralité sur les onduleurs

### I.2.1 Définition de l'ondeleur

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

Il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif, c'est-à-dire de valeur moyenne nulle, ou un système polyphasé de telles grandeurs.[3]

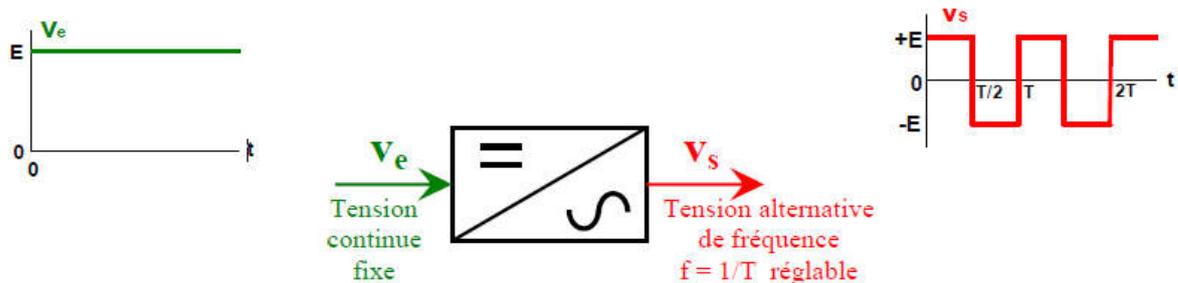


Figure I.7: le schéma symbolique de l'ondeleur .

### I.2.2 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines des schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs. [4]

### **I.2.2.1 Onduleur autonome**

Un onduleur "autonome" est un système de commutation à transistors ou à thyristors, de Fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La Charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

### **I.2.2.2 Onduleur non autonome**

Un onduleur "assisté" ou "non autonome" est un système de commutation à thyristors, à fréquence fixe, dont les instants de commutations sont imposés par la charge, inductive et active. Son fonctionnement est réversible (redresseur et onduleur).

### **1.2.3 Onduleurs multi-niveaux**

Un onduleur est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux[2]. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages : D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance (chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continu que le nombre de niveaux est élevé). D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales [5].

Les onduleurs de tension multi niveaux peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux.

Les principales topologies de la conversion multi-niveaux sont:

- La topologie à diode de bouclage (NPC) (Neutral Point Clamped) .
- La topologie au condensateur flotteur (à cellule imbriquées)
- La topologie en cascade.

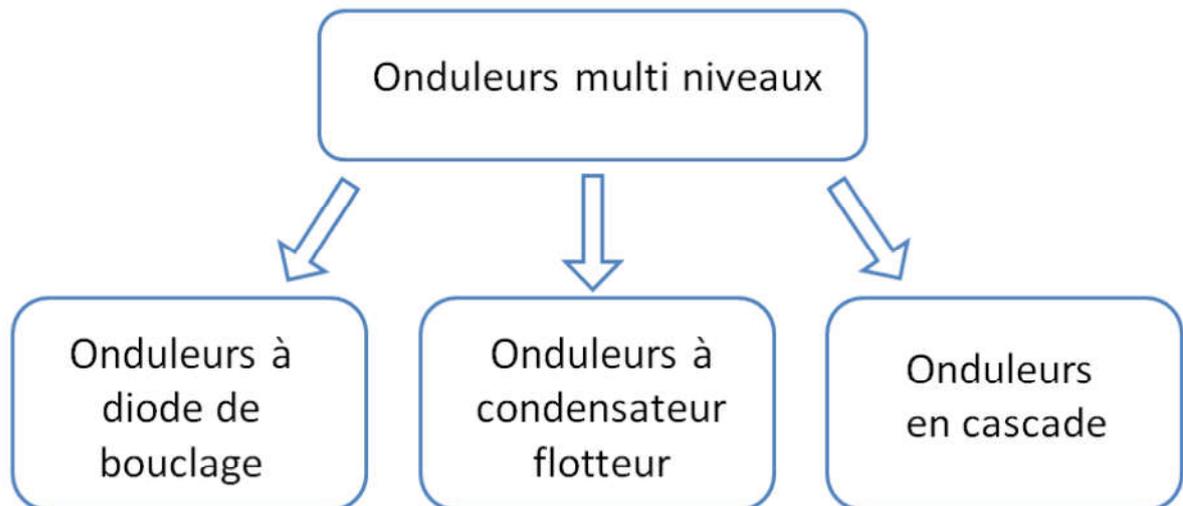


Figure I.8 : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux.

### I.2.3.1 Onduleur multi-niveaux à diode de bouclage

La première topologie d'onduleur de tension multi-niveaux est la structure NPC (Neutral Point Clamped) [6]. Les onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux sont donnés par la figure I.9. Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence  $o$ . Pour l'obtention d'une tension de  $N$  niveaux,  $N-1$  capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $V_{dc} / (N-1)$ ,  $V_{dc}$  étant la tension d'entrée totale appliquée. Les deux interrupteurs dans un même bras sont commandés de façon complémentaire.

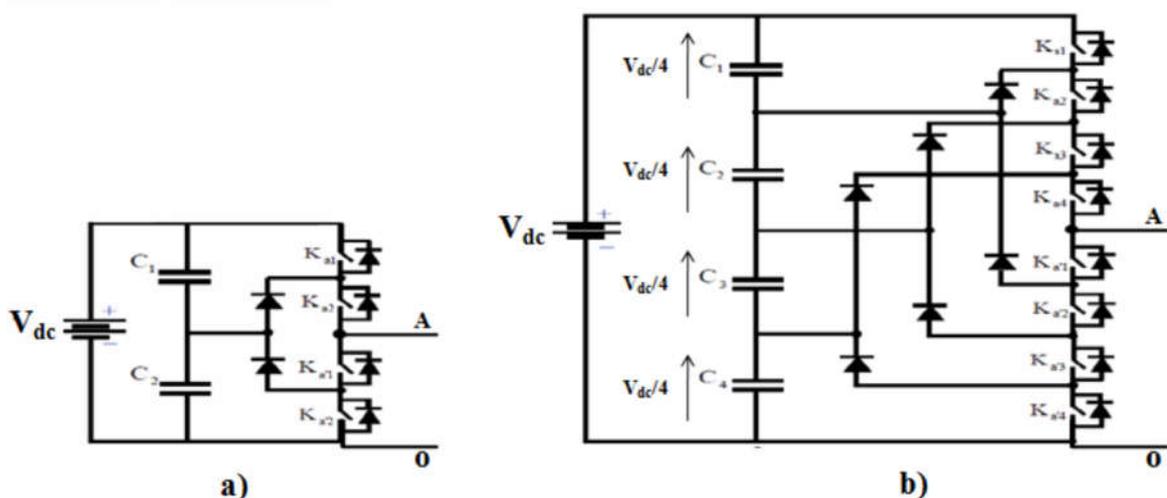


Figure I.9 : Structures NPC à trois niveaux a) et à cinq niveaux b).

- ☞ Parmi les avantages de ces structures, on a :
  - Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur, celle-ci est donnée par  $V_{dc} / (N-1)$ .
  - Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée capable de supporter le courant de la pleine charge [2].
- ☞ Ces structures présentent aussi un inconvénient, en effet les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $V_{dc} (N-1)/N$ . Donc les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception [2].

### I.2.3.2 Onduleur multi-niveaux à condensateurs flottants

La topologie de l'onduleur multi-niveaux à condensateur flotteur (Flying Capacitor Multilevel Inverter) est donnée par la figure I.10. Cette structure permet de résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes.

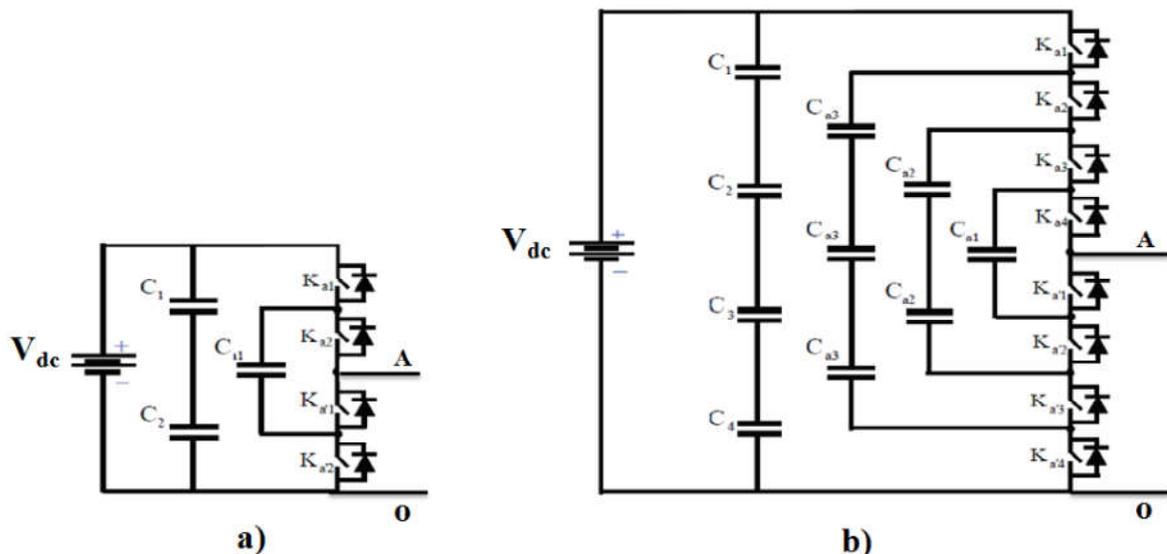


Figure I.10 : Structures à condensateurs flottants à trois niveaux a) et à cinq niveaux b).

- ☞ Parmi les avantages de ces structures, on a :
  - La modularité de ces structures permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux .

□ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

☞ Ces structures présentent aussi des inconvénients tels que:

□ Le nombre important requis de condensateurs, ce qui peut représenter un volume prohibitif.

□ La circulation de courants de grandes valeurs efficaces à travers ces condensateurs.

□ La présence d'un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés [2].

### I.2.3.3 Onduleur multi-niveaux à alimentation séparée (en cascade)

Les onduleurs multi-niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle. Un onduleur multi-niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés, ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure I.11 montre le schéma de base d'un convertisseur N niveaux en cascade formé par l'association en série de  $(N-1)/2$  ponts à deux niveaux. La tension de sortie  $V_s$  D'une telle structure est donnée par la somme des  $(N-1)/2$  tensions en sortie de ces ponts.

Chaque onduleur monophasé en pont est connecté à sa propre source en courant continue. Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :  $N = 2S + 1$ , Où S est le nombre des sources des tensions continues.

L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance, en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système. Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire. Mais il est nécessaire d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.

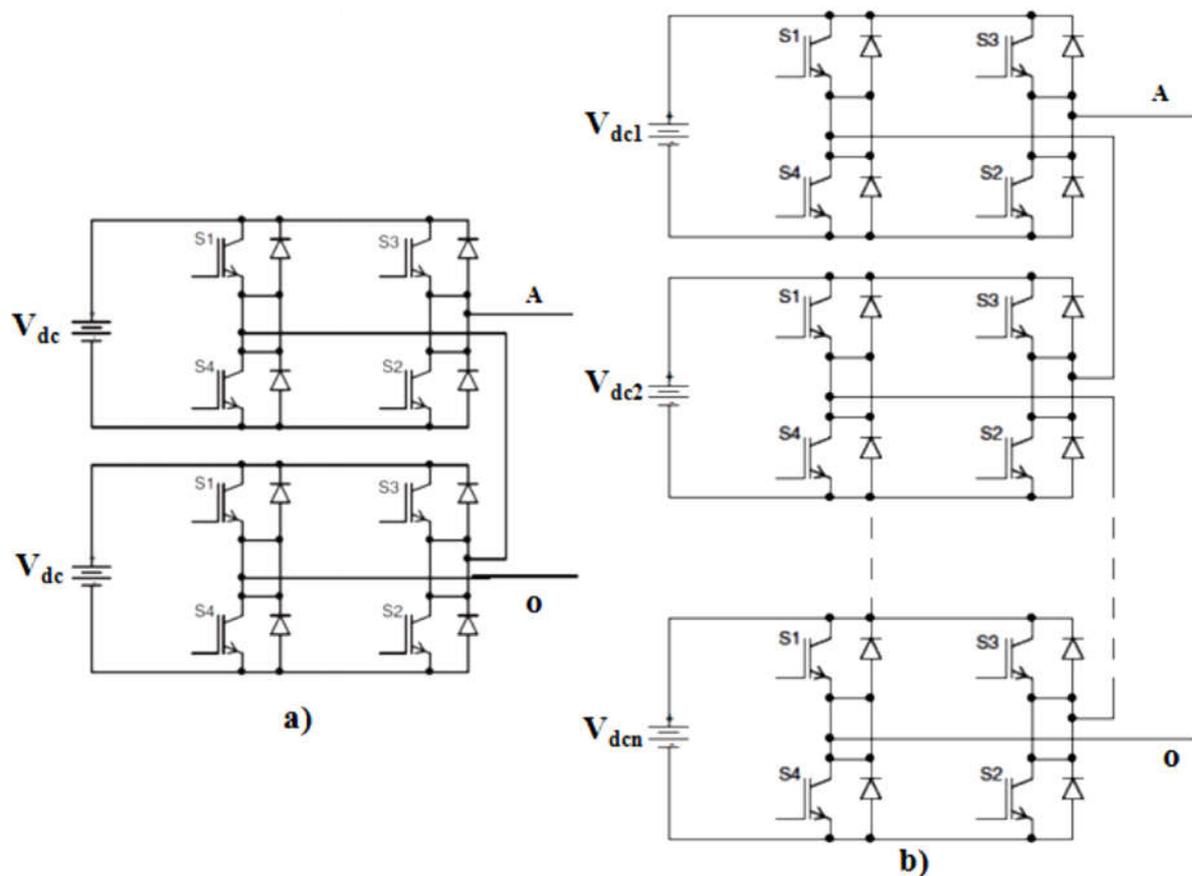


Figure I.11 : Onduleur en cascade à cinq niveaux a) et à N niveaux b).

Cette topologie est adaptée facilement à l'alimentation photovoltaïque [2]. En effet, les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique. Au contraire, les structures des onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation, elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

### I.3 Applications des onduleurs

Ils sont utilisés principalement dans deux types de systèmes :

#### I.3.1 Les ASI

Alimentations sans interruption, elles servent le plus souvent d'alimentation de secours pour des systèmes informatiques. La source de tension continue est

généralement constituée d'une batterie d'accumulateurs. La fréquence et l'amplitude de la tension de sortie sont fixes [5].

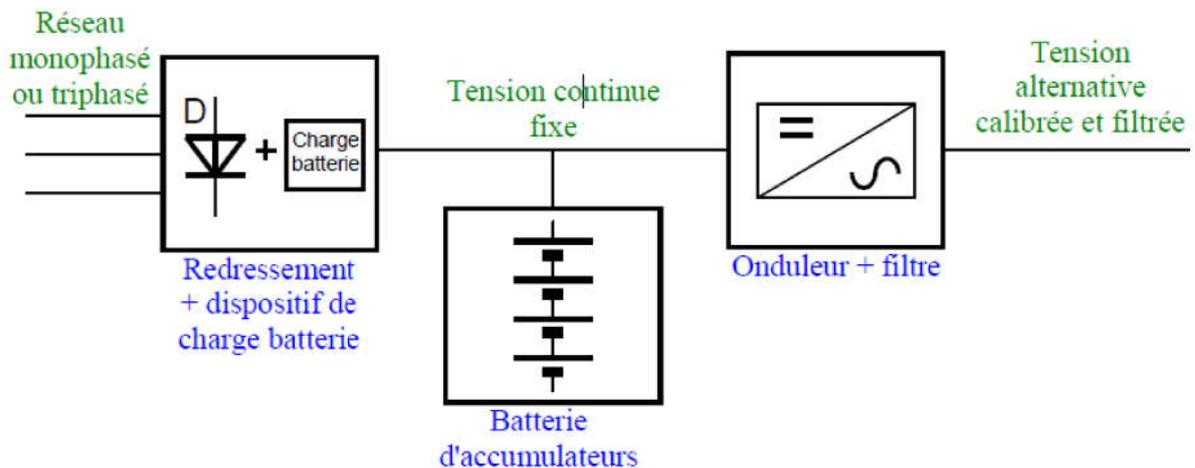


Figure I.12 : Alimentations sans interruption.

Les alimentations de secours sont destinées à remplacer le réseau de distribution (Monophasé ou triphasé)

En cas de défaillance du réseau. On les utilise dans les deux cas suivants :

- Pour les installations qui nécessitent la continuité de l'alimentation : hôpitaux, centraux téléphoniques, circuits de sécurité,...
- Pour les appareils (ordinateurs, ...) qui exigent non seulement la continuité de leur alimentation, mais encore la protection contre les perturbations du réseau de distribution (variations de tension, parasites, coupures, ...).

Les alimentations de secours comportent trois parties principales:

- Un redresseur-chargeur, alimenté par le réseau, constitué soit d'un pont à diodes suivi d'un hacheur, soit d'un pont commandé.
- Une batterie d'accumulateurs.
- Un onduleur de fréquence 50Hz délivrant une tension parfaitement sinusoïdale.

### I.3.2 Variation de la vitesse des moteurs à courant alternatif

La source continue est obtenue par redressement du réseau. La fréquence et l'amplitude de la tension sont variables, la vitesse des moteurs synchrones et asynchrones est directement liée à la fréquence d'alimentation; un onduleur réglable en fréquence permettra donc de faire varier la vitesse de ces moteurs [2].

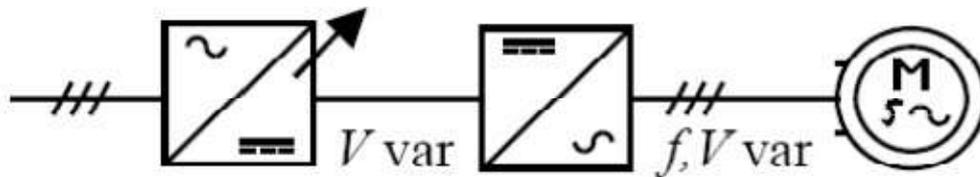


Figure I.13 : Variation de la vitesse des moteurs à courant alternatif.

Pour un bon fonctionnement des moteurs, il faut maintenir le rapport U/F constant

### 1.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du Réseau Anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

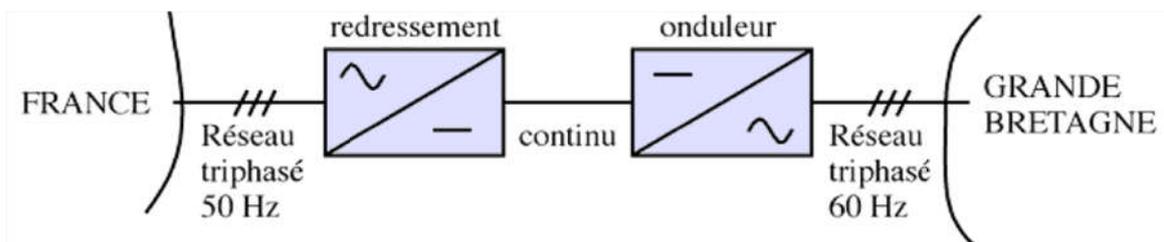


Figure I.14 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes [2].

### **I.4 Différents types de commande des interrupteurs**

Pour découper la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur, il faut intervenir sur la commande des interrupteurs qui constituent l'onduleur. Cette dernière a une très grande importance, car c'est elle qui détermine le type de la tension de sortie[4].

Parmi les différents types de commande, il existe :

1. commande à onde rectangulaire
2. commande en créneaux de largeur variable
3. commande à paliers
4. commande à MLI

#### **I.4.1 Commande à onde rectangulaire**

Pour la forme d'onde de cette commande, la valeur efficace de la tension n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée.

#### **I.4.2 Commande en créneaux de largeur variable**

Cette commande est obtenue par l'association des ondes rectangulaires déphasées l'une par rapport à l'autre avec une angle variable, d'où, une commande à trois états de sortie

La valeur efficace de la tension de sortie est variable en agissant seulement sur la durée du créneau.

#### **I.4.3 Commande à paliers**

Elle est constituée par la somme ou la différence de créneaux de largeur variable. La forme générale se rapproche au mieux de la sinusoïde. Elle est nommée, aussi, commande en marche d'escalier.

#### I.4.4 Commande à modulation de largeur d'impulsions

Elle est très utilisable pour la commande de la machine asynchrone, en se basant sur la comparaison entre deux signaux, le premier est triangulaire et le deuxième est sinusoïdal, on fait la génération des séquences des impulsions.

L'onde de sortie se compose d'un train d'impulsions de largeur et d'espacement variable. L'intérêt de ce type de commande est de réduire le taux d'harmonique afin d'approcher l'onde de sortie à la sinusoïde par conséquent devient facilement filtrable.

### I.5 Le principe de fonctionnement

Si l'on revient au concept d'une conversion continu-alternatif basée sur l'emploi d'une électronique de commutation, on peut considérer, beaucoup plus généralement qu'il s'agit de générer une onde de tension alternative en connectant cycliquement la sortie à un certain nombre de sources de tension continue par l'intermédiaire d'interrupteurs. D'une façon plus générale, on peut estimer qu'il existe deux moyens d'actions non exclusifs pour réaliser cette conversion.

- Le premier s'appuie sur l'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.
- Le second revient à contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

#### I.5.1 Onduleur monophasé

Pour réaliser un onduleur monophasé il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur  $k$  et d'une source de tension continue  $E$  comme le montre la figure (I.15).

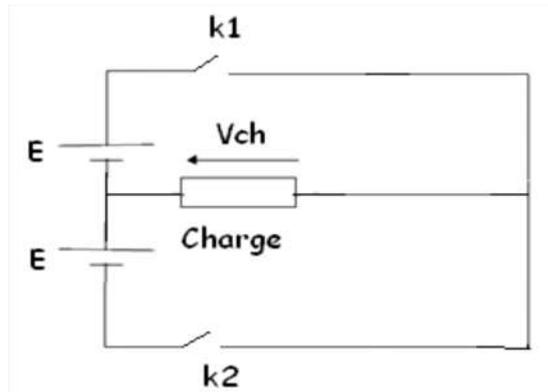


Figure I.15: Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé.

Lorsque  $k_1$  est fermé et  $k_2$  ouvert, on obtient  $V_{ch} = +E$

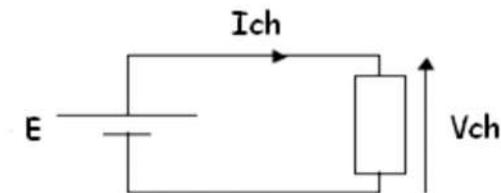


Figure I.16 : Conduction sur une demi-période.

Lorsque  $k_2$  est fermé et  $k_1$  ouvert, on obtient  $V_{ch} = -E$

La figure suivante donne la forme de  $V_{ch}(t)$  sur une période complète de fonctionnement.

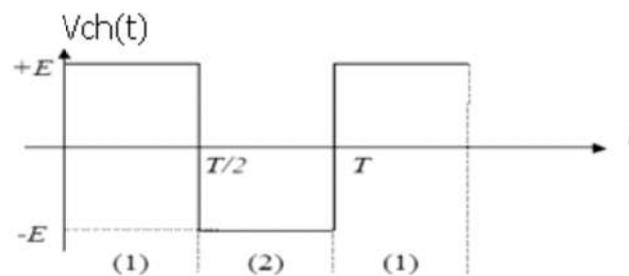


Figure I.17 : Fonctionnement d'un onduleur sur une période.

Dans la pratique, l'interrupteur  $k$  est remplacé par des interrupteurs électroniques, on les considère idéaux.

**Montages pratiques :** Deux types de montages sont utilisés :

### I.5.1.1 Montage en demi-pont

Dans ce type de montage (figure I.18), on fait l'hypothèse que la capacité  $C$  des deux condensateurs est suffisamment grande pour que l'on puisse considérer qu'en régime permanent la tension à leur borne reste toujours égale à  $E/2$ .

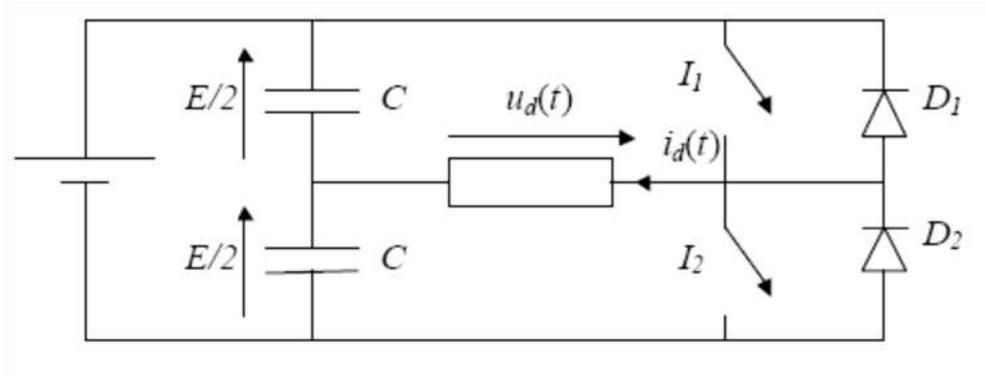


Figure I.18 : Montage en demi-pont.

### I.5.1.2 Montage en pont

Il est constitué de deux cellules de commutation, la charge est connectée entre les sorties S1 et S2 de chacune des deux cellules (figure I.19). La tension de sortie est donc la différence entre les tensions élémentaires  $v_{s1}$  et  $v_{s2}$  de chaque cellule.

Le nombre des possibilités d'utilisation est élevé puisque chaque cellule est indépendante de l'autre et peut, en particulier, recevoir des signaux de commande différents de ceux de la cellule voisine. Chaque cellule peut fonctionner en modulation ou sans modulation, en commande adjacente ou disjointe, avec des mécanismes de commutation différents dans la mesure où le déphasage relatif du courant commun par rapport aux tensions issues des deux cellules peut être différent dès lors que les commandes de ces deux cellules peuvent être déphasées entre elles. Éliminons, pour simplifier, le cas des commandes disjointes (excepté le temps mort nécessaire à la sécurité).

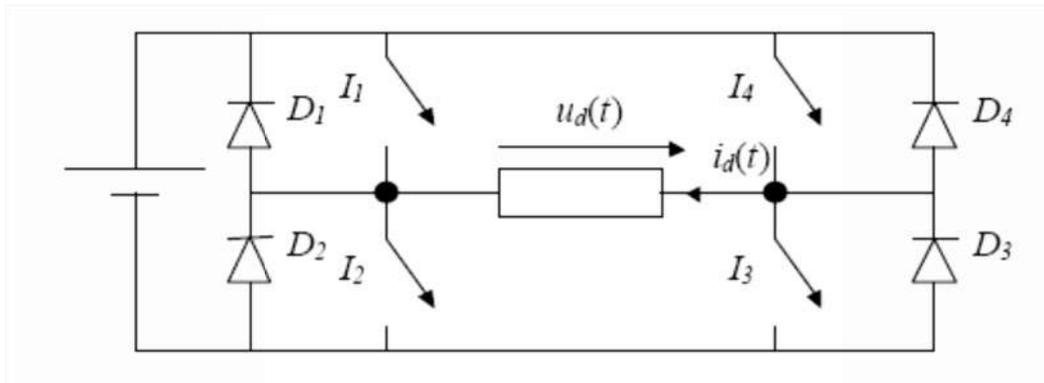


Figure I.19 : Montage en pont.

L'intérêt des montages en pont ou en demi-pont réside dans l'utilisation d'une seule source de tension  $E$ .

### I.5.2 Les onduleurs triphasés

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (figure I.20). Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$ , les interrupteurs  $K_1$ ,  $K'1$  et  $K_2$ ,  $K'2$ ,  $K_3$  et  $K'3$  doivent être complémentaires deux à deux [5] On définit  $K_i = (T_i, D_i)$ .

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime normal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré.

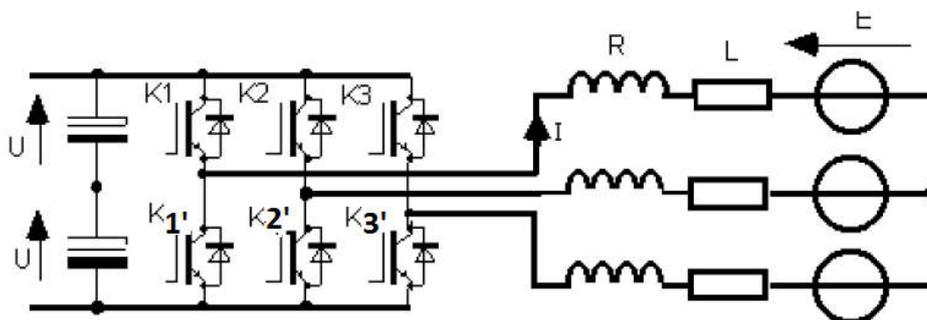


Figure I.20: Schéma de principe de l'onduleur triphasé avec charge RLE.

### I.5.2.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la figure (I.21). Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$ , les interrupteur  $k_1$  et  $k'1$ ,  $k_2$  et  $k'2$ ,  $k_3$  et  $k'3$  doivent être complémentaires deux à deux, et pour que les tensions de sortie  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  soient identiques à un tiers de la période  $T$  de leur fondamental près, il faut commander chaque demi pont avec un retard de  $T/3$  sur le précédent. [2]

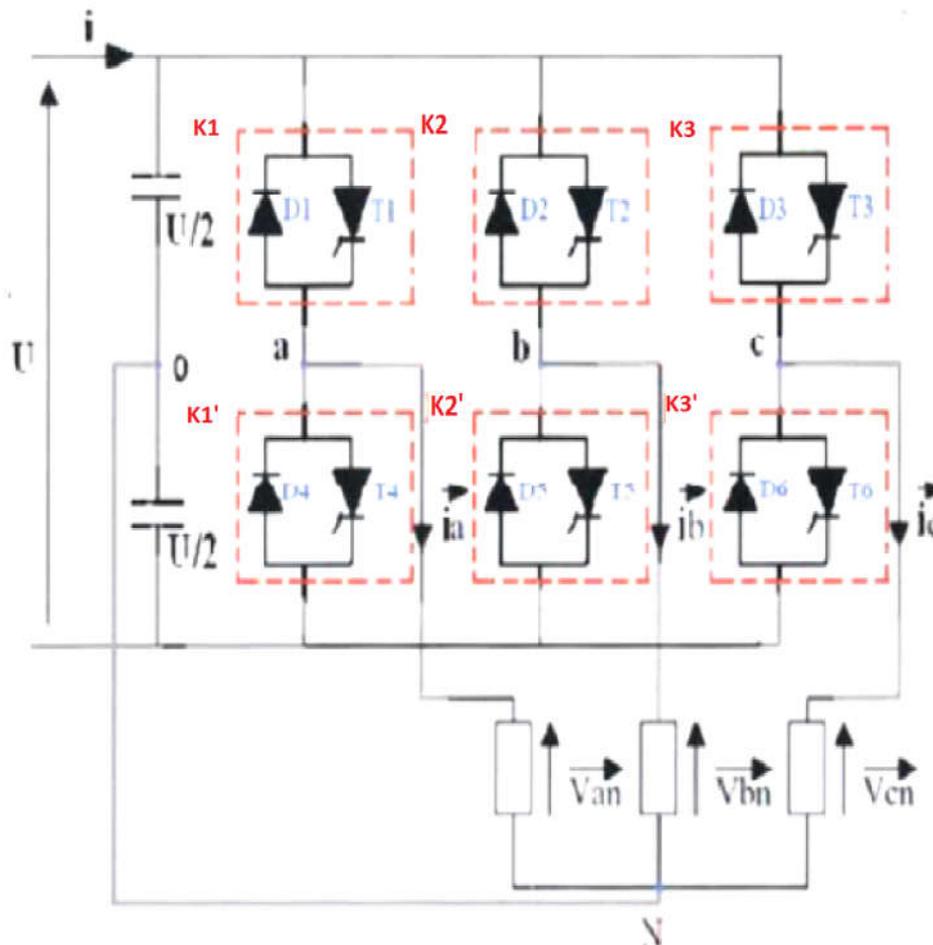


Figure I.21 : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » de la source. Donc supprimer celui-ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit (figure I.21). [ 6]

On peut commander l'onduleur de manière que :

- Chaque interrupteur conduit durant 120°.
- Chaque interrupteur conduit durant 180°.

On va se limiter à l'étude seulement de cette dernière, c'est-à-dire la commande en pleine onde (180°), dont, les intervalles de commande de fermeture de chaque interrupteur sont définis comme suit :

k1 pour $0 < \omega t < \pi$	k'1 pour $\pi < \omega t < 2\pi$
k2 pour $2\pi / 3 < \omega t < 2\pi / 3 + \pi$	k'2 pour $2\pi / 3 + \pi < \omega t < 2\pi / 3 + 2\pi$
k3 pour $4\pi / 3 < \omega t < \pi / 3 + \pi$	k'3 pour $4\pi / 3 + \pi < \omega t < \pi / 3 + 2\pi$

Si les courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  sont sinusoïdaux et forment un système triphasé équilibré, alors :

$$i_a = I \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi) \dots \dots \dots (I.1)$$

$$i_b = I \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi - 2\pi / 3) \dots \dots \dots (I.2)$$

$$i_c = I \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi + 2\pi / 3) \dots \dots \dots (I.3)$$

Avec I : la valeur efficace du courant de sortie de l'onduleur.

Avec cette commande, quel que soit les courants circulants, les interrupteurs imposent les tensions suivantes :

- Tension entre  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $\theta$  (neutre) :

$$v_{ao} = v_a - v_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} \text{ si K1 est fermé.} \\ \dots \dots \dots (I.4) \\ \frac{-U}{2} \text{ si K'1 est fermé.} \end{cases}$$

$$v_{bo} = v_b - v_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} \text{ si K2 est fermé.} \\ \dots \dots \dots (I.5) \\ \frac{-U}{2} \text{ si K'2 est fermé.} \end{cases}$$

$$v_{co} = v_c - v_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} \text{ si K3 est fermé.} \\ \dots \dots \dots (I.6) \\ \frac{-U}{2} \text{ si K'3 est fermé.} \end{cases}$$

- Les tensions simples  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  :

Si la charge est équilibrée et couplée en étoile: la somme des courants de ligne est nulle, ce qui implique que la somme des tensions simples est égale a zéro, donc:

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \dots\dots\dots(I.7)$$

A partir des relations précédentes, on tire:

$$\begin{aligned} v_{an} &= \frac{1}{3} [2 (v_a - v_o) - (v_b - v_o) - (v_c - v_o)] \\ v_{bn} &= \frac{1}{3} [2 (v_b - v_o) - (v_a - v_o) - (v_c - v_o)] \\ v_{cn} &= \frac{1}{3} [2 (v_c - v_o) - (v_a - v_o) - (v_b - v_o)] \\ v_n - v_o &= \frac{1}{3} [2 (v_a - v_o) (v_b - v_o) (v_c - v_o)] \end{aligned} \dots\dots\dots(I.8)$$

- Tension composée  $v_{ab}$  ,  $v_{bc}$  et  $v_{ca}$  :

De ces tensions simples, on déduit les tensions composées entre les bornes de sortie de l'onduleur, tel que :

$$\begin{aligned} v_{ab} &= v_{an} - v_{bn} \\ v_{bc} &= v_{bn} - v_{cn} \dots\dots\dots(I.9) \\ v_{ca} &= v_{cn} - v_{an} \end{aligned}$$

De ces équations on tire :

$$\begin{aligned} v_{an} &= \frac{1}{3} (v_{ab} - v_{ca}) = \frac{1}{3} (2v_{ao} - v_{bo} - v_{co}) \\ v_{bn} &= \frac{1}{3} (v_{bc} - v_{ab}) = \frac{1}{3} (2v_{bo} - v_{ao} - v_{co}) \dots\dots\dots(I.10) \\ v_{cn} &= \frac{1}{3} (v_{ca} - v_{bc}) = \frac{1}{3} (2v_{co} - v_{ao} - v_{bo}) \end{aligned}$$

Les courants dans les interrupteurs se déduisent des courants de sortie  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  tel que :

$i_{k1} = i_a$	$i_{k1}' = 0$	Quand $K_1$ est fermé
$i_{k1} = 0$	$i_{k1}' = -i_a$	Quand $K_1$ est fermé
$i_{k2} = i_b$	$i_{k2}' = 0$	Quand $K_2$ est fermé.....(I.11)
$i_{k2} = 0$	$i_{k2}' = -i_b$	Quand $K_2$ est fermé

$$i_{k3}=i_c \quad i_{k3}'=0$$

Quand **K3** est fermé

$$i_{k3}=0 \quad i_{k3}'=-i_c$$

Quand **K** est fermé

Et le courant fourni par la source  $i$  est donnée par :

$$I=i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} \dots \dots \dots (I.12)$$

En considérant alors, les états possibles des interrupteurs, on peut établir le tableau suivant décrivant ainsi; les tensions simples et composés, les courants dans les interrupteurs et le courant d'entrée  $i$  correspondant à chaque état de commutation [2]

K1	K2	K3	$v_{an}$	$v_{bn}$	$v_{cn}$	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$	$i_{k1}$	$i_{k2}$	$i_{k3}$	I
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	F	$\frac{-U}{3}$	$\frac{-U}{3}$	$\frac{-U}{3}$	0	-U	U	0	0	$i_c$	$i_c$
0	F	0	$\frac{-U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$\frac{-U}{3}$	-U	U	0	0	$i_b$	0	$i_b$
0	F	F	$\frac{-2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	-U	0	U	0	$i_b$	$i_c$	$i_a$
F	0	0	$\frac{2U}{3}$	$\frac{-U}{3}$	$\frac{-U}{3}$	U	0	-U	$i_a$	0	0	$-i_a$
F	0	F	$\frac{U}{3}$	$\frac{-2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	U	-U	0	$i_a$	0	$i_c$	$-i_b$
F	F	0	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{-2U}{3}$	0	U	-U	$i_a$	$i_b$	0	$-i_c$
F	F	F	0	0	0	0	0	0	$i_a$	$i_b$	$i_c$	0

**Tableau I.1** : Les tensions et les courants correspondants à chaque état de commutation de l'onduleur

En tenant compte du Tableau I.1, La Figure I.22 donne un exemple du tracé des formes d'ondes des tensions et des courants obtenus pour une charge  $RL$  :

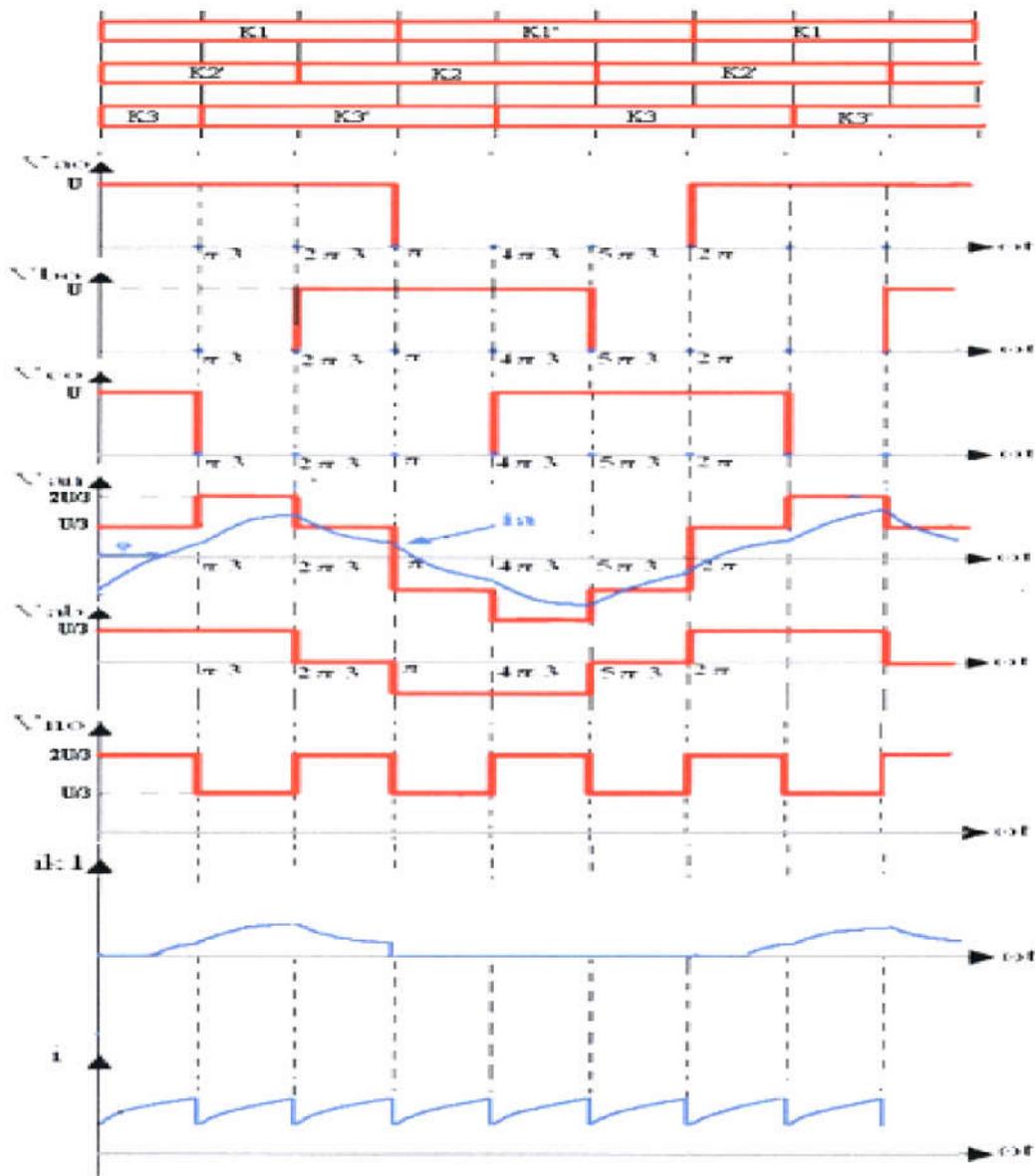


Figure I.22. Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge  $RL$  montée en étoile (commande  $180^\circ$ )

## I.6 Stratégies de commande

### I.6.1 Commande en créneaux de largeur variable

#### I.6.1.1 Commande $180^\circ$

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type  $180^\circ$ , Figure I.23.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi-période ( $180^\circ$ ), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$  par rapport au premier bras.[4]

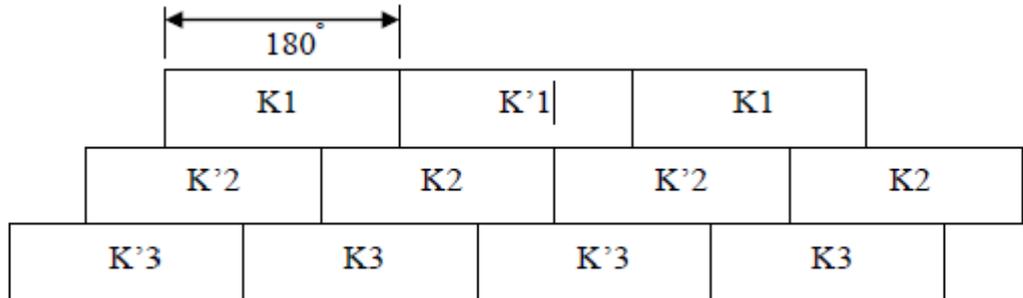


Figure I.23: Commande  $180^\circ$ .

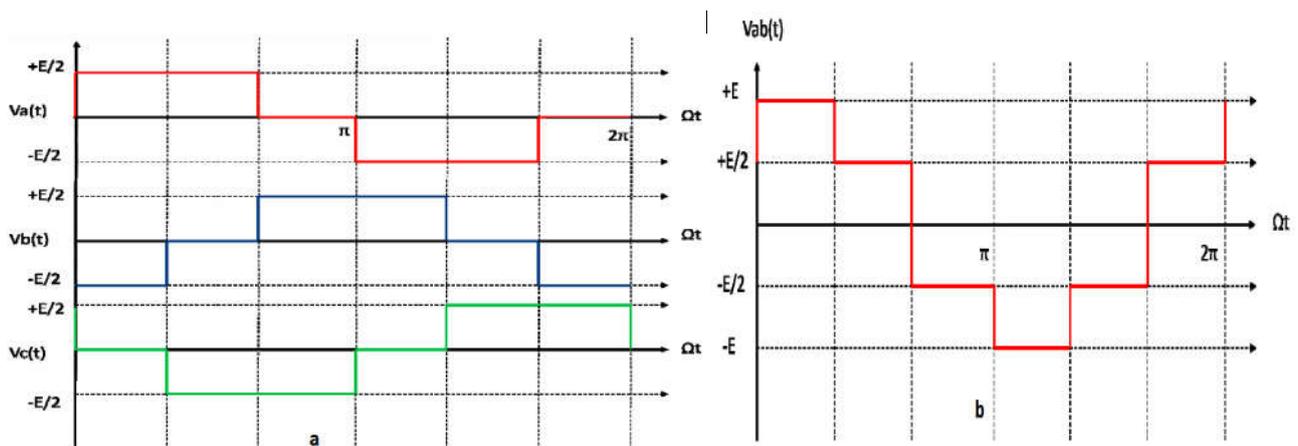


Figure I.24 a) Les tensions composées  $v_a, v_b, v_c$  de l'onduleur b) La tension simple  $v_{ab}$  de l'onduleur

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

### I.6.1.2 Commande $120^\circ$

Dans ce cas la Figure I.25, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type  $120^\circ$ . [4]

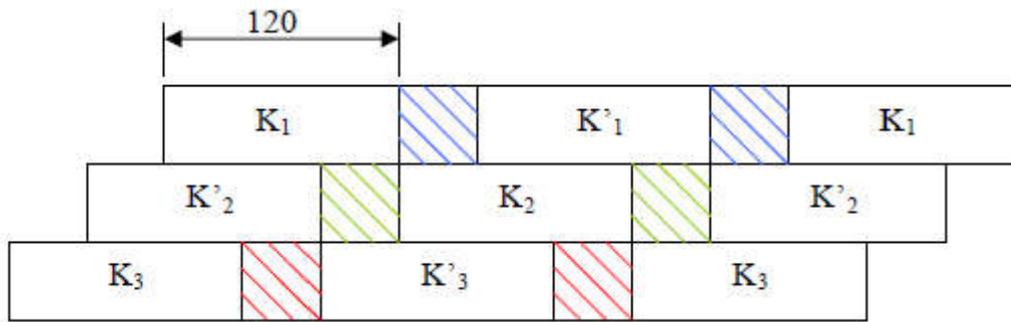
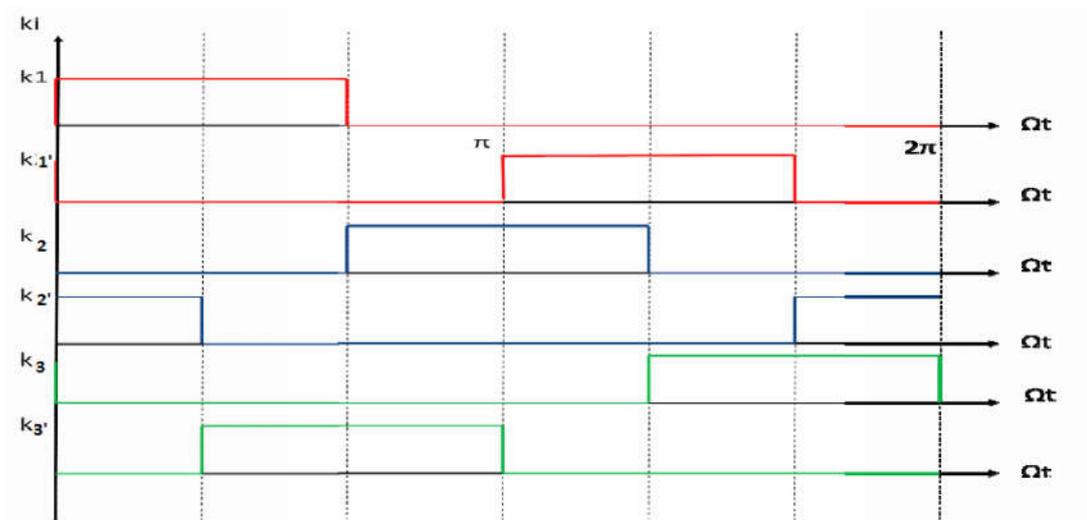


Figure I.25 : Commande 120°.

Figure I.26 : Commande des interrupteurs à  $\frac{2\pi}{3}$ .

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant  $120^\circ$ , telle que la séquence est  $K1$ ,  $K2$  puis  $K3$  successivement. De même pour les interrupteurs  $K'1$ ,  $K'2$  et  $K'3$  avec un décalage de  $60^\circ$  par rapport à  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ .

### I.6.2 Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple [2], [3].

En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle :

### **I.6.2.1 Modulation sinusoïdale (MLIS)**

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes, la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée, appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence  $f$  qui détermine la fréquence de la tension de sortie, appelée référence. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [3], [5].

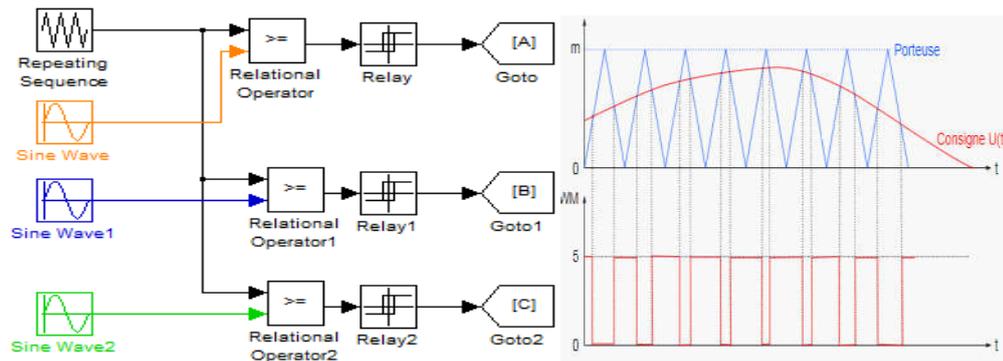


Figure I.27 : Commande mli simple.

### I.6.2.2. Modulation vectorielle (SVM)

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones.

En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension[7].

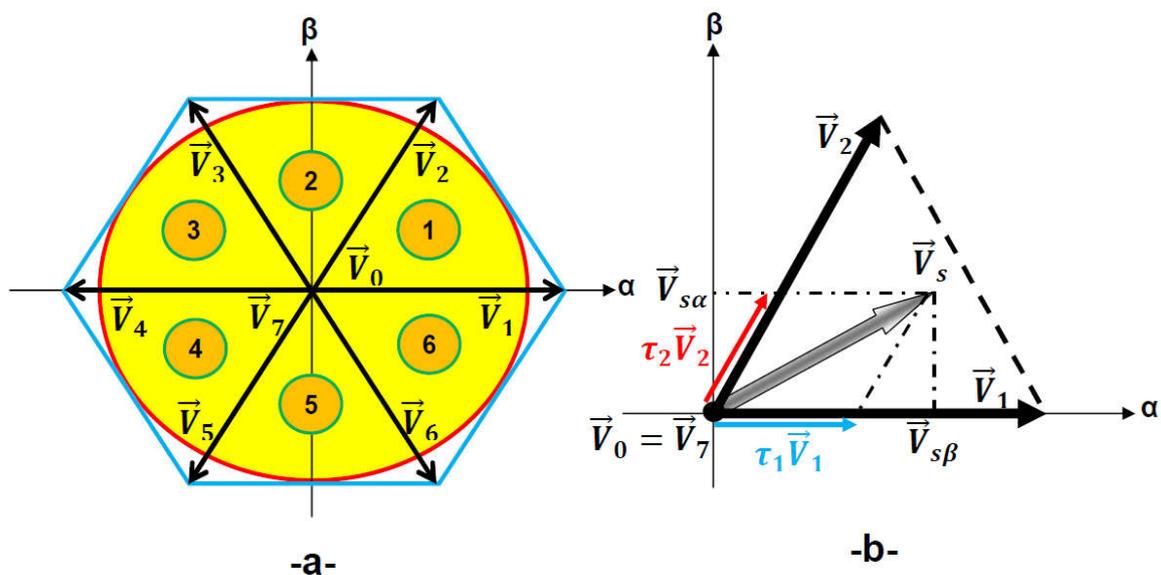


Figure I.28: a) Représentation des vecteurs tensions réalisables par l'onduleur.

b) Projection du vecteur à réaliser sur ses deux vecteurs adjacents

La somme des deux vecteurs  $\vec{V1}$  et  $\vec{V2}$  et respectivement appliqués pendant les durées  $\tau1$  et  $\tau2$  donne donc le vecteur  $\vec{Vs}$  initial. En combinant ces deux vecteurs avec les vecteurs nuls ( $\vec{V0}$  et  $\vec{V7}$ ) et en codant par un 1 un interrupteur fermé et un zéro 0 un interrupteur ouvert, nous pouvons reconstituer les signaux de commande à appliquer pour obtenir le vecteur  $\vec{Vs}$  souhaité[9].

### **I.7Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les types des onduleurs, leurs constitutions élémentaires, leurs fonctionnements, leurs principales applications et les différentes structures réelles existantes. a travers cette partie, il était décrit en détail, les onduleurs simples et multi niveaux, les différents composants de puissance utilisés (MOSFET, IGBT, GTO...). Plus principalement, les techniques de commandes qui sont généralement issues des parties électroniques à savoir, la commande plein onde, décalée et la modulation de largeur de l'impulsion.

Le prochain chapitre, on va le consacrer à la partie faible puissance (commande par la carte Arduino).

## II.1 Introduction

L'ARDUINO est un circuit imprimé en matériel libre (les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre) sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot ...etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple [10].

L'origine, arduino avait été conçu pour aider les étudiants dans leurs expérimentations. En 2005, il a été proposé à la vente par Massimo Banzi et David Cuartielles. En quelques années, il est devenu très populaire auprès des concepteurs, des étudiants et des artistes, par sa facilité d'emploi et sa robustesse.

Les modules d'origine des différentes versions de l'Arduino sont fabriqués par la société italienne Smart Project. Quelques-unes des cartes de marque Arduino ont été conçues par la société américaine SparkFun Electronics [11].

Dix-sept versions des cartes de type Arduino ont été produites et vendues dans le commerce à ce jour dans l'ordre chronologique ci-dessous :

1. Serial Arduino : programmé avec une connexion série par connecteur DB9 et utilisant un ATmega8.
2. Arduino Extrême : programmable via une connexion USB et utilisant un ATmega8.
3. Arduino Min : une version miniature de l'Arduino utilisant un ATmega168 de type CMS.
4. Arduino Nano : une version encore plus petite de l'Arduino alimenté par USB et utilisant un ATmega168 (avant la version 3) ou ATmega328 (à partir de la version 3.0) de type CMS.
5. LilyPad Arduino : une conception de type minimaliste pour permettre une application portable utilisant un ATmega168 de type CMS, cette carte se remarque par son vernis violet.
6. Arduino NG : programmable via une connexion USB et utilisant un ATmega8.
7. Arduino NG plus : programmable via une connexion USB et utilisant un ATmega168.

8. Arduino Bluetooth(BT) : programmable via une connexion Bluetooth et utilisant un ATmega 328.
9. Arduino Diecimila : possède une interface USB et utilise un ATmega168 dans un boîtier format DIL28. (16 ko flash, 1 ko SRAM, 0,5 ko EEPROM)
10. Arduino Duemilanove (2009) : utilise un Atmega168 et est alimenté en électricité par le connecteur USB ou une alimentation externe avec commutation automatique. La nouvelle version est équipée d'un ATmega328 (32 ko de flash, 2 ko de SRAM, et 1 ko d'EEPROM).
11. Arduino Mega : est équipé d'un ATmega1280 de type CMS pour avoir des Entrées/Sorties supplémentaires et de la mémoire (128 ko flash, 8 ko SRAM, 4 ko EEPROM).
12. Arduino Uno : utilise un ATmega328 comme les derniers modèles de Duemilanove, mais alors que le Duemilanove utilisait une puce FTDI pour la programmation via un connecteur USB, l'Uno utilise une puce ATmega8U2 programmée comme un convertisseur série.
13. Arduino Mega2560 : est équipé d'un ATmega2560 de type CMS, augmentant la mémoire totale disponible à 256 ko. Il est équipé aussi de la nouvelle puce USB ATmega8U2.
14. Arduino Ethernet : est une carte Arduino UNO intégrant un chip Wiznet W5100 pour rajouter la connectivité Ethernet intégré.
15. Arduino Leonardo : est une version bas coût de l'Arduino UNO à base d'un ATmega32U4.
16. Arduino DUE : est une évolution de l'Arduino Mega2560 avec un micro-contrôleur 32 bits Atmel SAM3X (ARM 32 bits Cortex-M3).
17. Arduino Esplora : est une carte dérivée de l'Arduino Leonardo. Elle a la forme d'une manette de jeu. Contrairement aux autres Arduino, c'est une carte « tout-en-un » qui comporte de nombreux capteurs (température accélération, lumière, microphone, potentiomètre...) ainsi que quatre, boutons poussoirs, un potentiomètre et un joystick analogique [11].

Dans ce chapitre, nous allons parler spécialement à la carte Arduino-Uno mentionnant les Caractéristiques et le principe de fonctionnement et nous donnons le schéma de principe de cette carte.

## II.2 La carte ARDUINO Uno

La carte Arduino Uno est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. C'est la plus récente et la plus économique carte à microcontrôleur d'Arduino. Des connecteurs situés sur les bords extérieurs du circuit imprimé permettent d'enfiler une série de modules complémentaires.

Elle peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un boot loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur. Le logiciel est téléchargeable gratuitement. Cette carte est livrée sans cordon USB (voir articles conseillés) [12].

Nous donnons la photo de la carte Arduino Uno Figure II.1

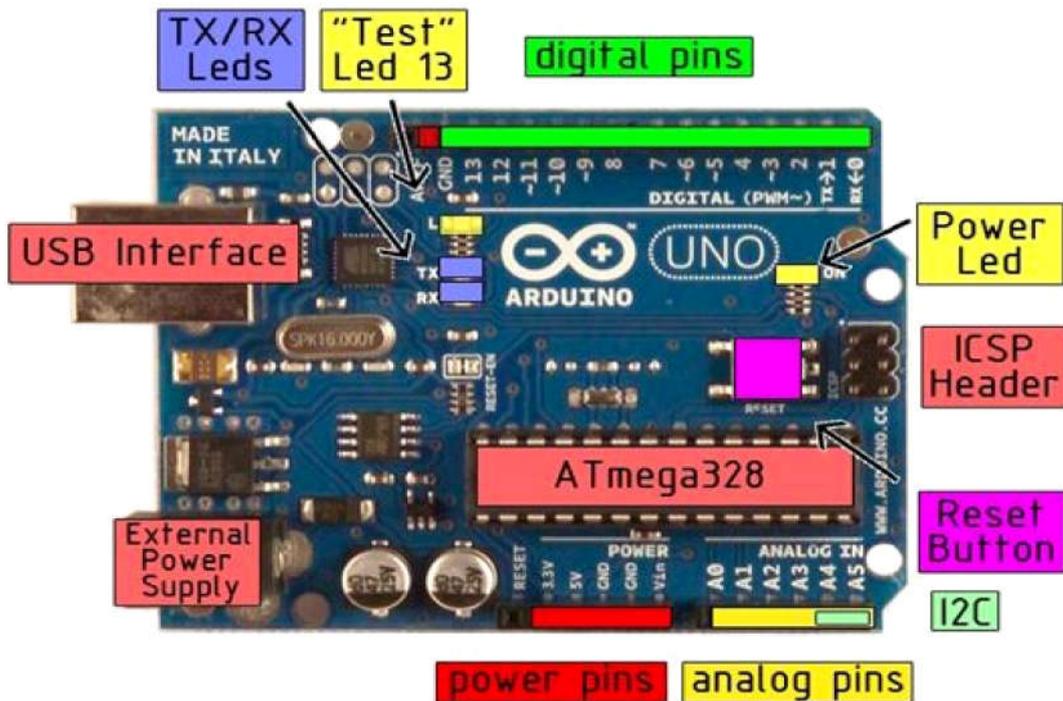


Figure II.1: Photo de la carte Arduino Uno [13].

Elle dispose :

- de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)).

- de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques).
- d'un quartz 16Mhz.
- d'une connexion USB.
- d'un connecteur d'alimentation jack.
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit").
- et d'un bouton de réinitialisation (reset) .

### II.3 Caractéristiques de la carte Arduino Uno [14]

- Microcontrôleur: ATmega328.
- Tension d'alimentation interne = 5V.
- 13 entrées /sorties numériques numérotées de 0 à 13 (digital pins).
- Tension d'alimentation (recommandée) = 7 à 12V, limites = 6 à 20 V.
- Entrées/sorties numériques : 14 dont 6 sorties PWM.
- Entrées analogiques = 6.
- Courant max par broches E/S = 40 mA.
- Courant max sur sortie 3,3V = 50mA.
- Mémoire Flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le boot loader.
- Mémoire SRAM 2 KB.
- Mémoire EEPROM 1 KB.
- Fréquence horloge = 16 MHz.
- Dimensions = 68.6mm x 53.3mm.

### II.4 Schéma de principe de la carte ARDUINO

La Figure II.2 suivant représenté le schéma de principe de la carte Arduino-Uno et les signaux d'entrée-sortie du microcontrôleur sont reliés à des connecteurs selon le schéma ci-dessous:

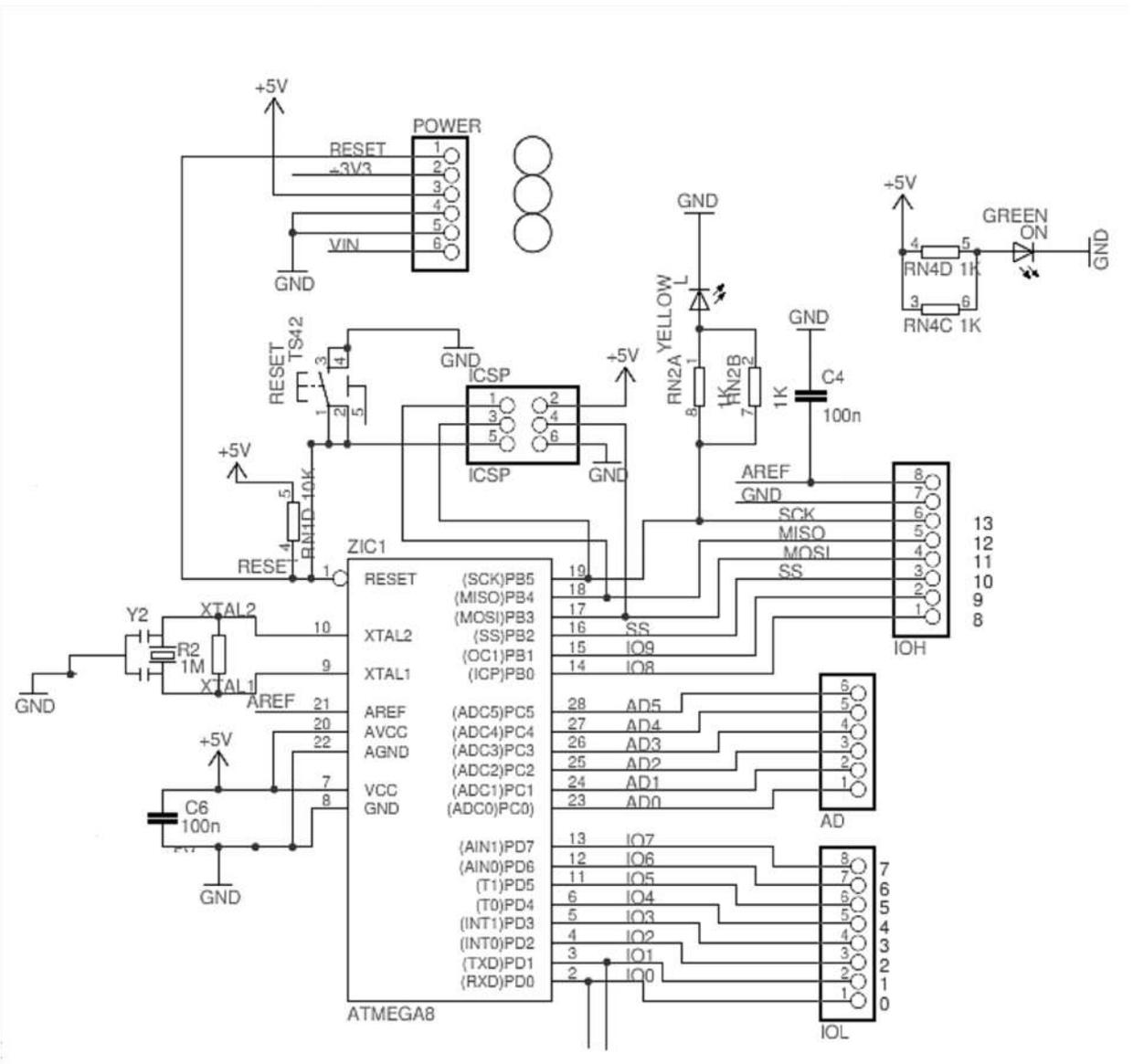


Figure II.2: Structure de la carte ARDUINO-UNO [15]

## II.5 : Alimentation de la carte ARDUINO

L'Arduino peut fonctionner avec une source de tension continue allant de 6 à 20 Volt (entre 7 et 12 recommandé) ou en USB, que l'on peut classer en deux catégories, les filaires et les autonomes [16].

### II.5.1 : Alimentation filaire

- Câble USB: lorsque vous reliez la carte à votre PC (ou n'importe quel port USB), votre arduino s'allume. La plupart des modèles requiert un câble USB

standard A-B, mais quelque uns (comme le nano) nécessite un câble USB A – mini B.

- Adaptateur: la plupart des adaptateurs type téléphone ou autre, sortant avec une tension continue comprise entre 7 et 12V et ayant un connecteur Jack 2.1mm convient à l'arduino.

### II.5 .2 : Alimentation autonome.

- Pile 9V: Cette pile est idéale car commune, avec un faible encombrement et se trouvant dans la plage de tension recommandée (entre 7 et 12V). De plus il est facile de récupérer son connecteur sur de vieux appareils électroniques (ex radioréveil...), il ne vous restera qu'à souder à l'autre extrémité la prise jack mâle de 2.1mm et le tour est joué.



Figure II.3: Connecteur pile 9V [17].

- Autres piles: Une solution moins pratique car plus encombrante est de mettre en série des piles de type AA (ou AAA). Les AA faisant 1.5V, en mettre 4 en série vous fournira du 6V, 5 piles du 7.5V... mais pour cela il vous faudra un support assez encombrant.



Figure II.4: Support de piles [16].

- Puis TOUT ce qui fournit une tension continue entre 7 et 12V, comme par exemple des batteries, des panneaux solaires...

## II.6 Entrée sortie de la carte ARDUINO

La carte Arduino Uno est dotée de : 6 entrées analogiques, 14 entrées/sorties numériques dont 6 peuvent assurer une sortie PWM, chacune des entrées/sorties de la carte ne peut pas délivrer Plus de 20 mA.

- ✓ Entrées analogiques: Référence de tension comprise entre 0 et 5V (ne pas dépasser 5V ).
- ✓ Sorties analogiques: Elle sera sous la forme d'un signal PWM (ou Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une tension maximale de 5V et une fréquence d'environ 490Hz.
- ✓ Entrées / Sorties Tout Ou Rien: Tensions de 0V pour le niveau bas et 5V pour le niveau haut. [16]

## II.7 Environnement de l'ARDUINO C

Le langage ARDUINO est basé sur les langages C ou C++, avec des fonctions et des bibliothèques spécifiques à ARDUINO (gestions des entrées /sorties). On relie la carte ARDUINO au PC, on édite un programme (on dit sketch) concernant l'application demandée, on contrôle s'il n y a pas d'erreurs de syntaxe ou autre puis on transfère le programme sur la carte. La fenêtre d'édition est visualisée sur le PC dès que l'on clique sur l'icône ARDUINO, il suffit alors d'éditer le programme, Cette fenêtre d'édition se présente de la façon ci-dessous:

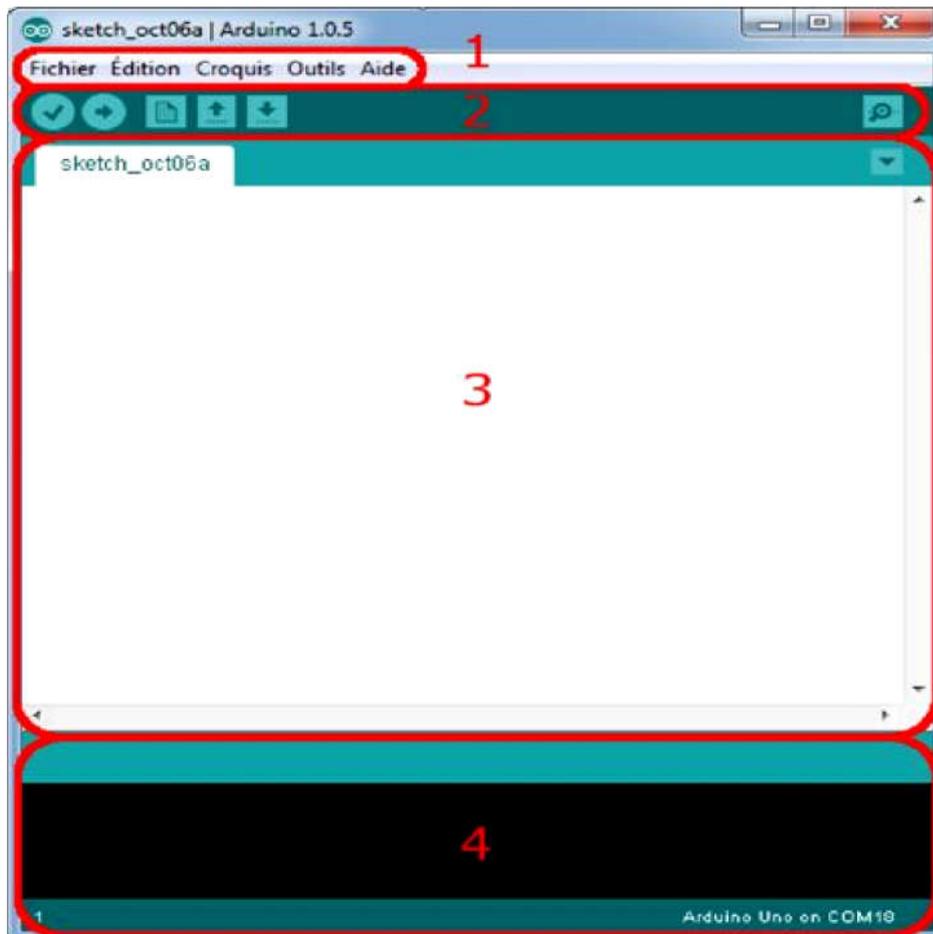


Figure II.5:fenêtre d'édition avec code ou programmation du module ARDUINO [14].

- **La zone 1:** ce sont les options de configuration du logiciel.
- **La zone 2:** elle contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.



Ces cinq boutons sont quasiment les seuls que nous aurons à utiliser pour lancer le programme (nous verrons d'autres fonctionnalités par la suite).

- ✓  Il permet de compiler le programme et de vérifier si des erreurs s'y trouvent.
- ✓  Compiler et télécharger v1e sketch sur la carte Arduino.
- ✓  Créer un nouveau sketch.

- ✓  D'ouvrir un sketch qui figure dans un dossier de travail spécifié.
  - ✓  Il permet de sauvegarder le sketch.
- **La zone 3:** ce bloc va contenir le programme que nous allons créer.
  - **La zone 4:** celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les erreurs dans notre programme : C'est le débogueur.

### II.7.1 Structure d'un projet ARDUINO C

Un programme Arduino comporte trois parties principales:

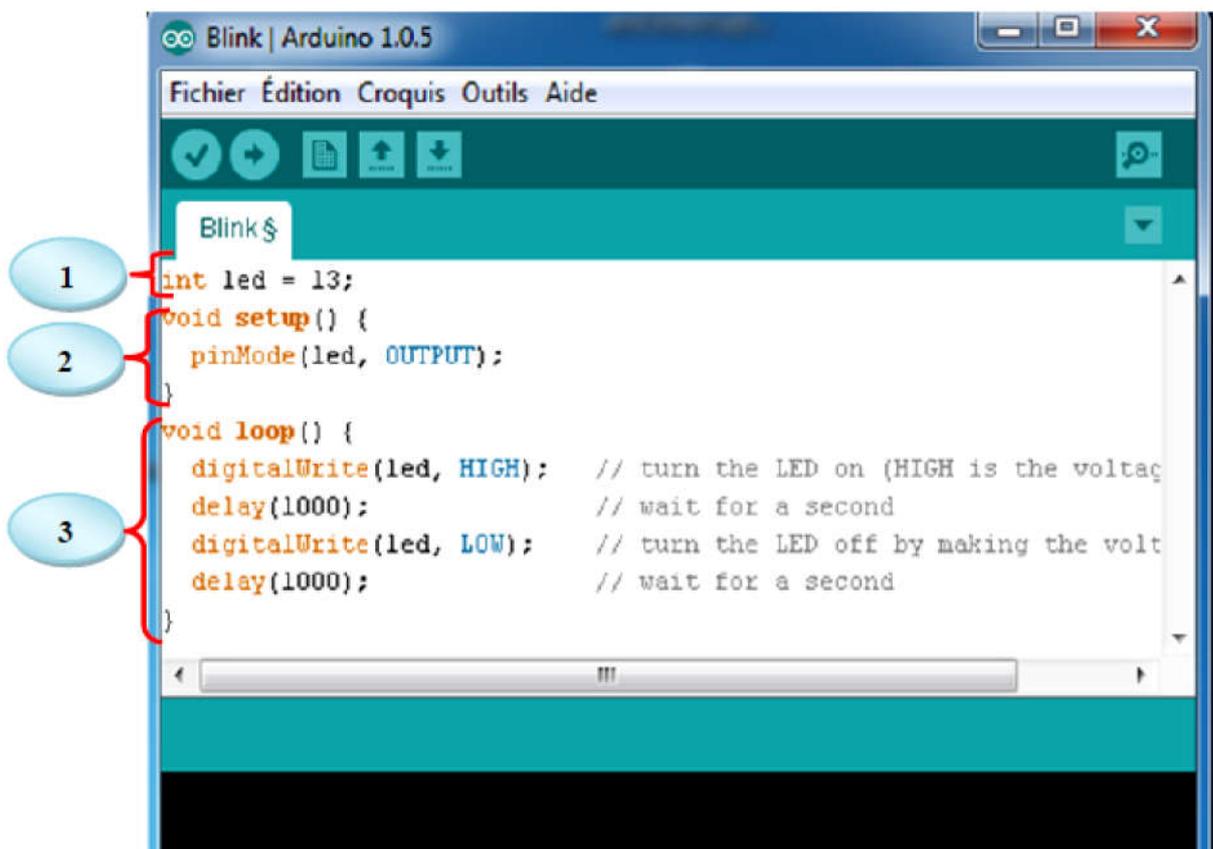


Figure II.6: Structure d'un projet Arduino C [15]

1. la partie Définition des variables (optionnelle)
2. la partie initialisation et configuration des entrées/sorties : la fonction setup ()
3. la partie principale qui s'exécute en boucle : la fonction loop ()

II.7.2 Commandes de structure du programme

Des programmes d'Arduino peuvent être divisés dans trois parts principales : structure, valeurs (variables et constantes), et fonctions.

Structure générale	Variables Constants	Fonctionne
setup () loop () <b>Contrôle et conditions</b> if if...else for switch case while do... while break continue return goto <b>Autres commandes</b> (semi colon) {} (curly braces) // (single line comment) /* */ (multi-line comment) #define #include <b>Arithmetic Operators</b> = (assignment operator) + (addition) - (subtraction) * (multiplication) / (division) % (modulo) <b>Opérations de comparaison</b> == (equal to) != (not equal to) < (less than) > (greater than) <= (less than or equal to) >= (greater than or equal to) to) <b>Operations booléennes</b> && (and)    (or) ! (not) <b>Pointer Access Operators</b> * dereference operator & reference operator <b>Bitwise Operators</b> & (bitwise and)  (bitwise or)	HIGH   LOW INPUT OUTPUT INPUT_PULLUP true   false integer constants floating point constants <b>Data Types</b> void Boolean char unsigned char byte int unsigned int word long unsigned long short float double string - char array String - object array <b>Conversion</b> char () byte () int () word () long () float () <b>Variable Scope &amp; Qualifiers</b> variable scope static volatile const <b>Random Numbers</b> random Seed () random () <b>Bits and Bytes</b> low Byte () high Byte () bit Read () bit Write () bit Set ()	<b>E/S numérique</b> pin Mode () digital Write () digital Read () <b>E/S analogique</b> analog Reference () analog Read () analog Write () - PWM <b>Due only</b> analog Read Resolution () analog Write Resolution() <b>E/S Avancé</b> tone () no Tone () shift Out () shift In () pulse In () <b>Gestion du temps</b> Millis () micros () delay () delay Microseconds () <b>Math</b> min () max () abs () constrain () map () pow () sqrt () <b>Trigonometry</b> sin () cos () tan () bit Clear () bit () <b>Interruptions Externes</b> Attach Interrupt () detach Interrupt () no Interrupts ()

Tableau II.1. Liste des fonctions usuelles en C pour les Arduino [15].

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les différentes cartes Arduino, capable d'être utilisé pour le control et la commande des circuits numériques et analogiques. Parmi les Arduino cites dans ce chapitre, notre choix est porter sur l'Arduino UNO. Ce choix est justifié par l'existence de ce type de cartes dans les locaux des laboratoires pédagogiques de notre université et aussi les performances de la carte en question. Dans la suite, on va visualiser les signaux de commande issu de l Arduino Uno et qui sont adaptés aux onduleurs de tension.

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre dédié à la réalisation de l'onduleur triphasé à trois bras et six semi-conducteurs de puissance. Cet onduleur doit avoir une partie commande qui pilote les semi-conducteur. Le cerveau de commande est la carte Arduino doté d'un microcontrôleur programmable à l'aide du langage C. une partie intermédiaire, capable d'amplifier les signaux est réaliser a pour but d'amorcer les semi-conducteur de puissance (MOS ou IGBT).

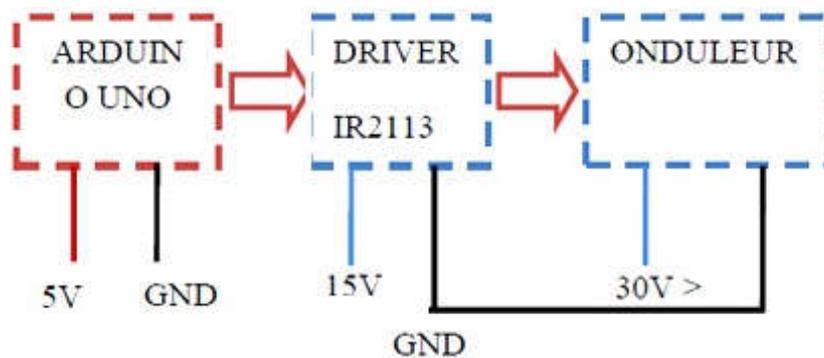


Figure III.1 étapes essentiels pour la réalisation de l'onduleur.

### III.2 choix de semi-conducteurs

La sélection entre MOSFET et IGBT dépend de l'application. Les solutions ne sont pas uniques et les caractéristiques et les exigences données dans chaque application déterminent le choix. Cependant, à première vue, dans le tableau III.1, on peut voir un résumé de certaines caractéristiques et valeurs remarquables.

Fonctionnalité	MOSFET	IGBT
Les pertes de commutation	faibles	moyennes
Conductivité courant	faible	Elevée
Les pertes de conduction	Elevée	faible
Commande	Tension	Tension
Coût	moine cher	cher
Tension	<250 V	> 1000V
La fréquence	> 100 kHz	<20 kHz
Puissance	<3 kW	> 3 kW
Efficacité	Charge légère	Pleine charge
dV / dt	Limité	Haute
Commutation	la vitesse de fermeture et d'ouverture très rapide	la vitesse de fermeture et d'ouverture rapide

Tableau III.1: Résumé des caractéristiques et sélection [17]

Notre choix porte sur les MOS qui sont les plus rapides car on ne va pas monter en puissance on va tout simplement tester la dynamique de l'onduleur.

### III.3 Le semi-conducteur utilisé

Dans ce travail nous allons utiliser le composant MOSFET IRFP640, qui est réputé par la commutation rapide, facilité de la mise en parallèle, conditions simples d'entraînement.



**Figure III.2:** Le semi-conducteur IRF640 et leur architecture interne

### III.4 Circuit de commande de l'onduleur triphasé

Dans cette partie on va réaliser un montage qui a pour rôle la conversion numérique analogique des impulsions générées par la carte Arduino et assurer une tension suffisante pour attaquer la grille des MOSFETs de notre carte.

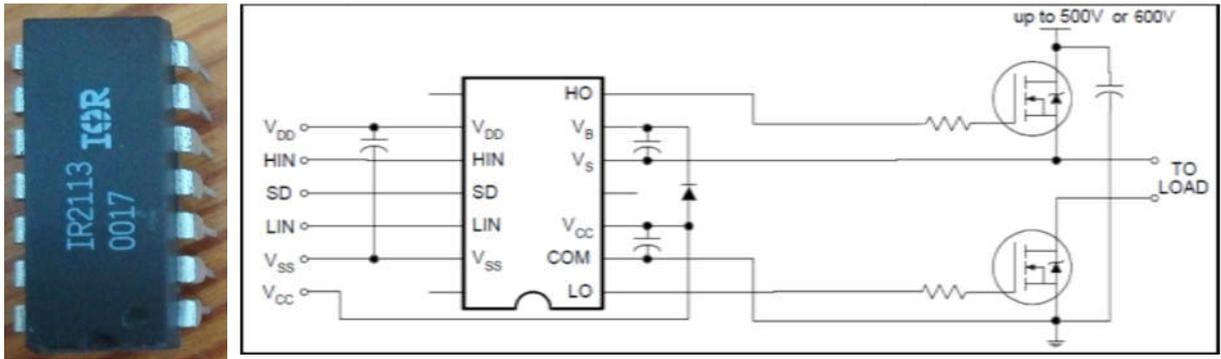
Les composants utilisés pour la réalisation de la carte de commande, nous allons parler ci dessous :

#### III.4.1 La carte ARDUINO UNO (voir chapitre II)

#### III.4.2 DRIVER IR2113:

Un pilote (DRIVER) : est un appareil qui adapte la fonction de connexion aux exigences des semi-conducteurs. Comme la fonction de connexion oscille uniquement entre deux valeurs, il est parfois nécessaire de modifier le signal pour ne pas endommager les semi-conducteurs. [17]

L'IR2113 (IRF2113 de International Rectifier) c'est un circuit intégré voir la Figure III.3(a) à grande vitesse, constitué 14 pins, il y a de pin utilisé pour garantir une impulsion suffisante pour commander un transistor MOSFET ou un IGBT de la partie puissance, la Figure III.3(b) présente un synoptique simplifié de fonctionnement du circuit IR2113 dans sa mise en œuvre.



(a)

(b)

Figure III.3: photo de driver (a) Synoptique simplifié de fonctionnement (b)[19].

Les fonctions principales de ce driver sont :

- ✓ Amplification du signal de commande afin de l'adapter aux niveaux de tension et de courant désirés.
- ✓ Isolation galvanique: pour éviter le contact électrique entre deux parties du circuit.
- ✓ Protection contre les basses tensions d'alimentation ou le courant qui pourraient endommager les semi-conducteurs.

### III.5 réalisation de l'onduleur triphasé

Parmi les logiciels de simulation dont la carte Arduino est déjà intégrée. On choisit le logiciel proteus (partie ISIS) qui à la fois tient compte de la vitesse réelle de l'Arduino (vitesse de 16MHZ) et permet aussi de nous offrir les différentes MOS et IGBT de puissance grâce à sa riche bibliothèque.

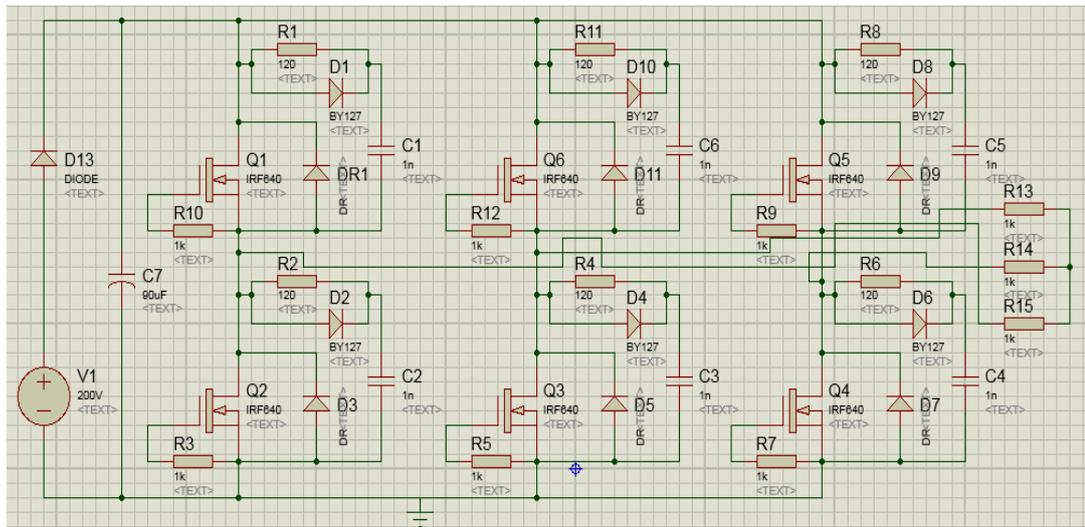


Figure III.4: Schéma électrique de la partie puissance avec ISIS

Après nous avons préparé le logiciel sprint-layout pour dessiné le schéma de circuit imprimé. Figure III.5.

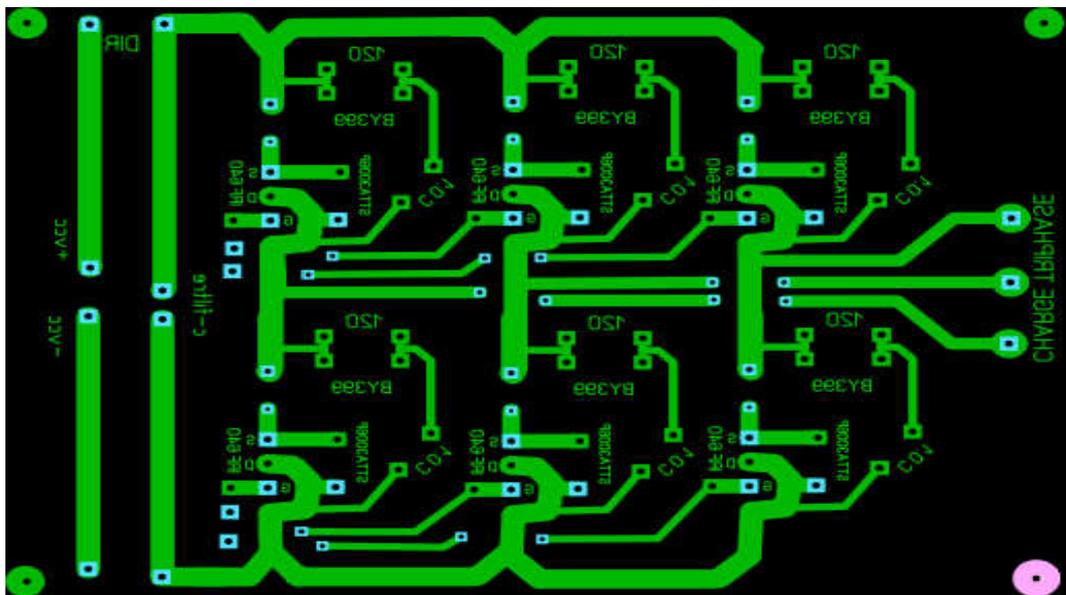


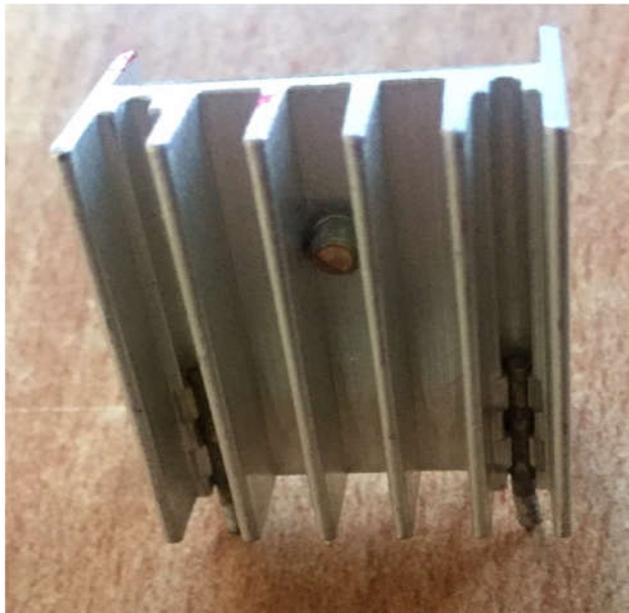
Figure III.5: Schéma de circuit imprimé de la partie puissance avec sprint-layout

### III.6 Protection de l'onduleur

Pour la protection de l'onduleur et ses composants, on doit utiliser :

➤ **Radiateur:**

La cause principale de l'endommagement des composants dans la majorité des cas, c'est l'augmentation de température pour cela on va monter au dos de chaque IRFP640 un radiateur dissipateur en aluminium représenté sur la Figure III.6 l'utilisation de ce métal parce que l'aluminium est un bon conducteur de chaleur.



**Figure.III.6.** Radiateur

➤ **Condensateurs de filtrage**

Nous avons placé un condensateur électrochimique de filtrage en parallèle avec la source afin d'assurer l'équilibrage des tensions. La valeur de ce condensateur  $4700\mu\text{F}/200\text{V}$ , le modèle du condensateur, représenté sur la figure III.7.

➤ **La diode rapide**

Nous avons placé les diodes rapides pour assurer la circulation de courant ou pour éviter le court-circuit avec la charge (et le condensateur de filtrage) en cas où l'interrupteur principal est fermé. Dans ce travail, nous avons choisi le modèle STTA3006P.(voir figure III. 7)

➤ **Circuit RCD**

L'utilisation d'un composant rapide dans les convertisseurs de forte et moyenne puissance cause des surtensions par la présence inévitable d'inductance parasites, alors pour protéger le circuit de puissance contre les surtensions il faut placer un circuit constitué d'une résistance de 120  $\Omega$ , capacité de 0.1 nF, diode BY399.(voir figure III.7).

➤ **Résistance de 1 k ohm**

La plus part des onduleurs ont des résistances placées entre les grilles et les sources. Ces résistances empêchent l'allumage accidentel des transistors MOS. (voir figure III.7).

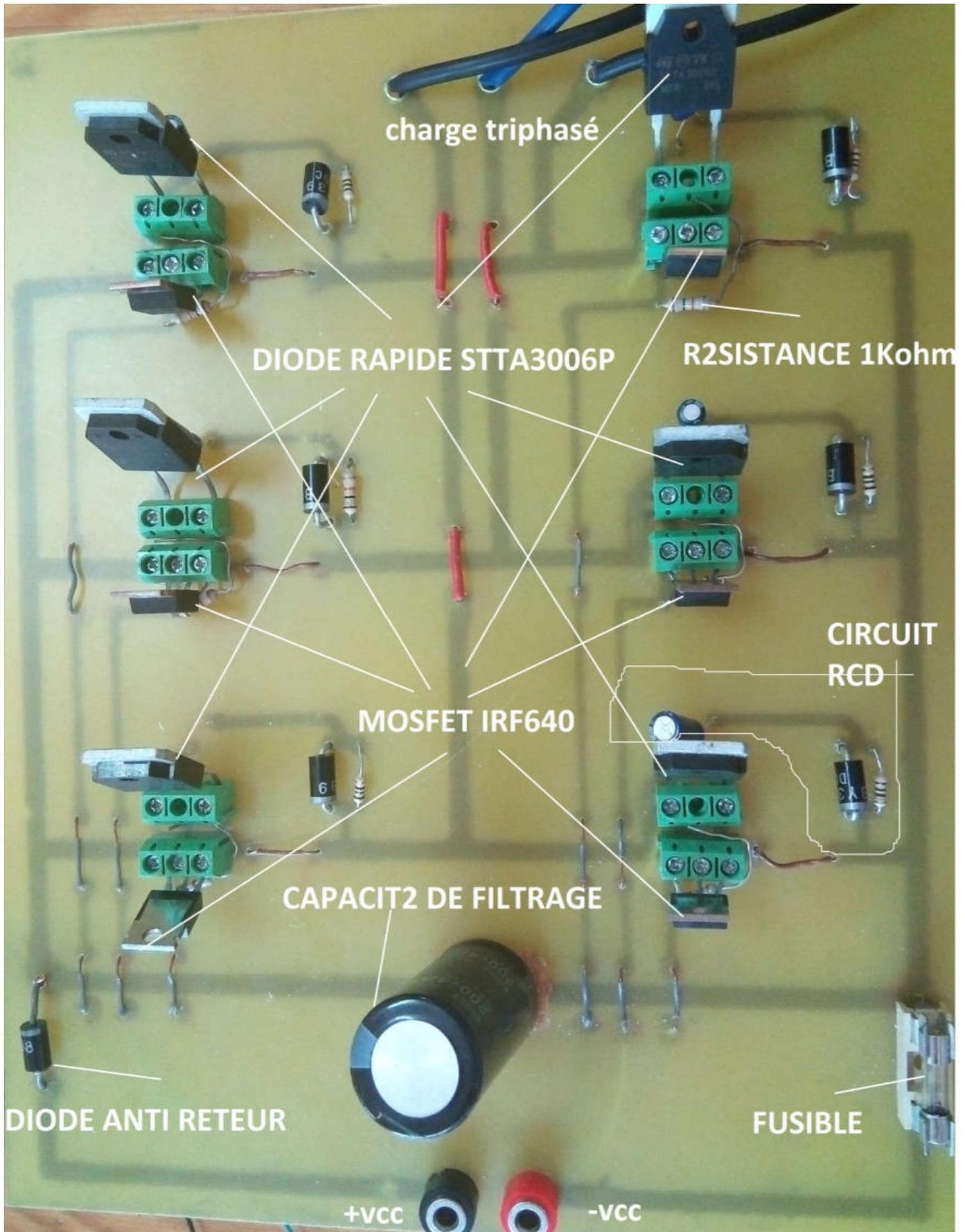


Figure III.7: onduleur triphasé

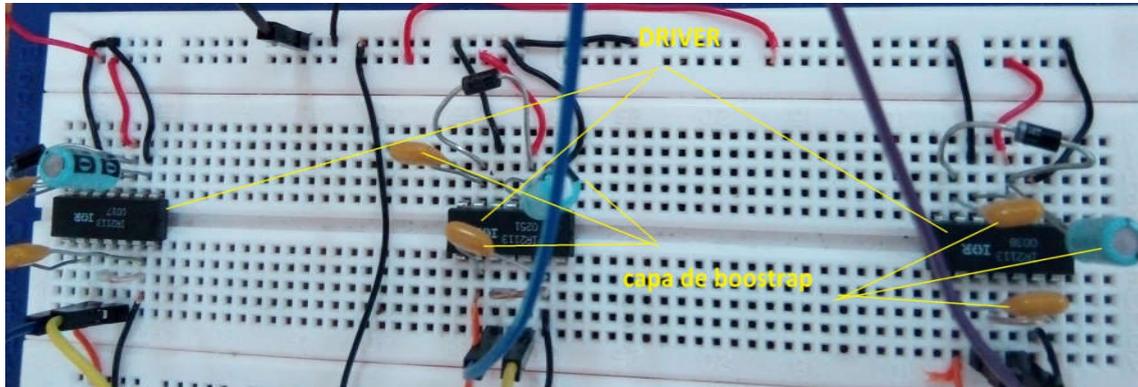


Figure III.8 : l'amplification par les drivers

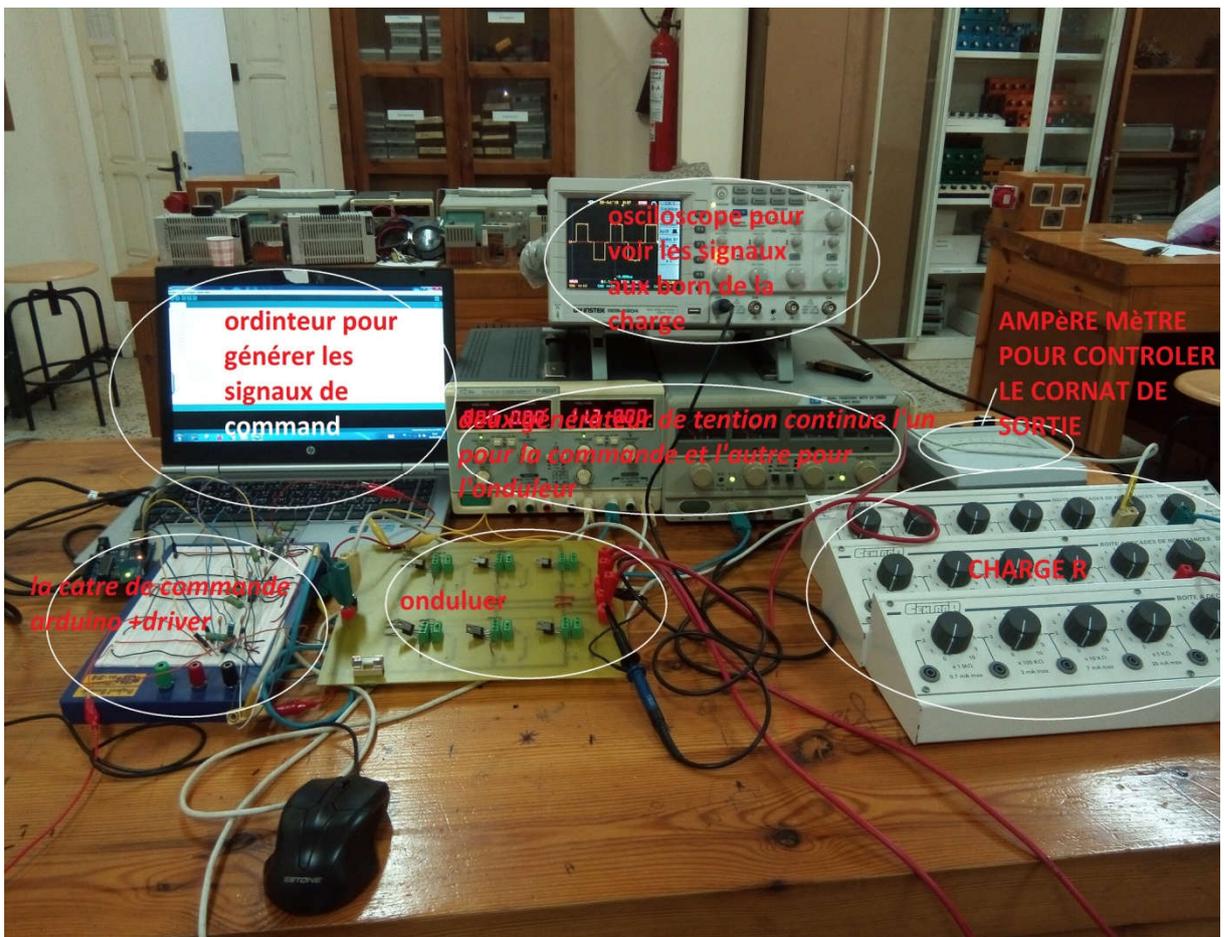


Figure III.9: Photo de l'onduleur réalisé avec le banc d'essai

### III.7 Implantation des techniques de commandes (plein-onde et MLI)

Maintenant on va appliquer les deux techniques de commandes (plein-onde et MLI) citées dans les chapitres précédents. L'implémentation sera réalisée après compilation des programme adéquats et le téléversé après compilation vers la Carte Arduino.

L'acquisition des résultats sera faite à l'aide d'oscilloscope numérique capable de travailler à des fréquences de GHz. chaque résultat pratique est consolidé par un autre de simulation utilisant Matlab.

### III.8 Observation des signaux de commande pour la commande pleine onde

Le programme crée en langage C (pour Arduino) est en premier lieu adapté pour la plein-onde en l'appliquant à l'onduleur monophasé en pont.

Dans cette application précise, on a besoin de quatre sorties complémentaire deux à deux. Une fois le programme (voire annexe A) est compilé on le téléverse à travers le pont à la carte Arduino qui répond à sont tours par une lumière clignotant. Après ce bref instant, la carte devient autonome et génère les signaux, par la suite les signaux de sortie de la carte sensés envoyer aux bras de l'onduleur, sont représentés en figure III.10. Ces signaux de faible puissance, on a besoin de les amplifier afin de pouvoir amorcer, les semi conducteur de puissance (MOS et IGBT) la solution trouvée est d'utiliser le Driver IR2113. Après amplification nous retrouvons les signaux de la figure III.11.

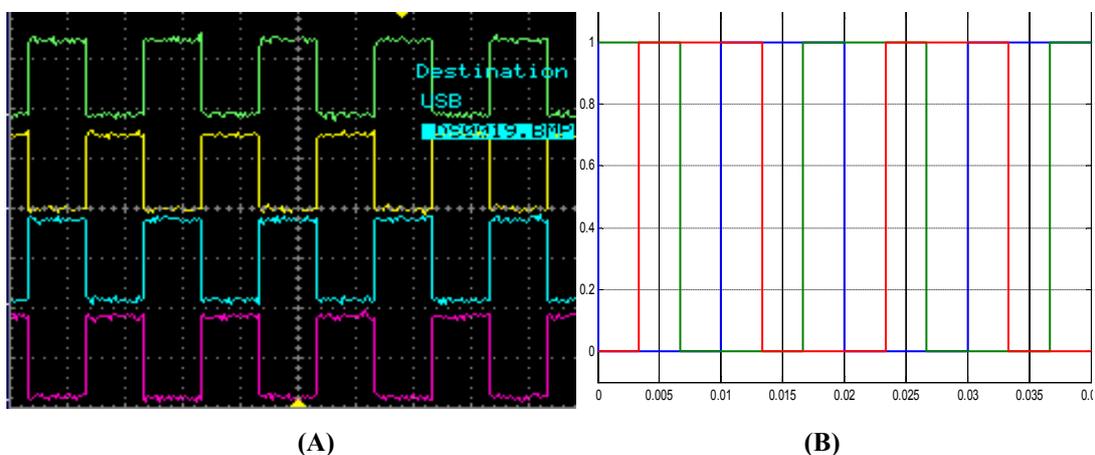


Figure III.10 les signaux fournis par la carte Arduino (A), les signaux simulé (b) (plein-onde).

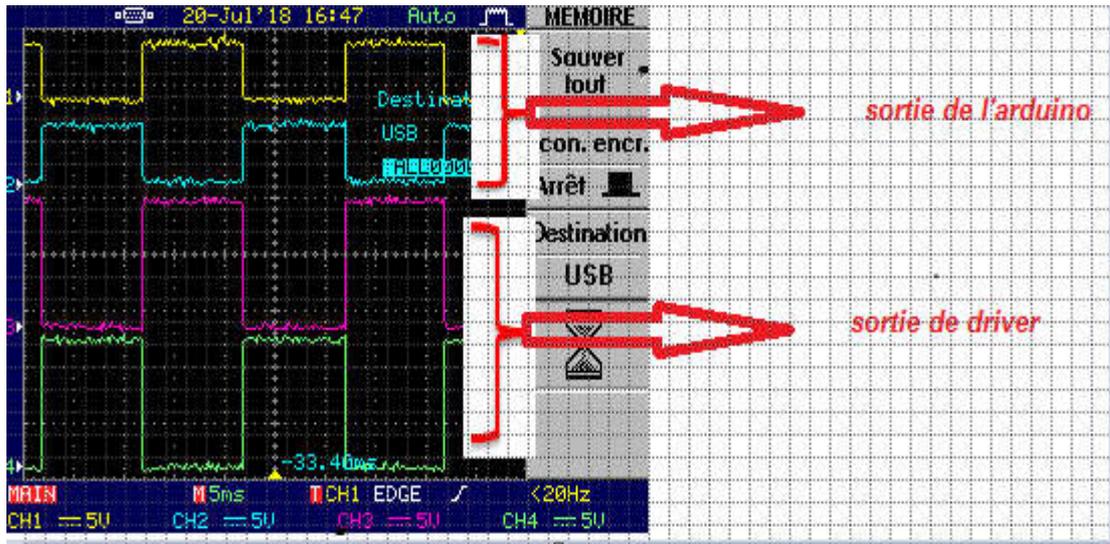


Figure III.11 : amplification des signaux de commande.

### III.9 Observation des grandeurs électriques pour l'onduleur monophasé en pont

Habituellement, en électronique de puissance les charges étudiées sont de nature inductive (moteur, actionneur ...etc)

Dans la plus part des ouvrages, on aborde les charges résistive pour faire comprendre aux lecteurs le principe de fonctionnement, puis on retourne vers les charges qui représente un effet inductif considérable.

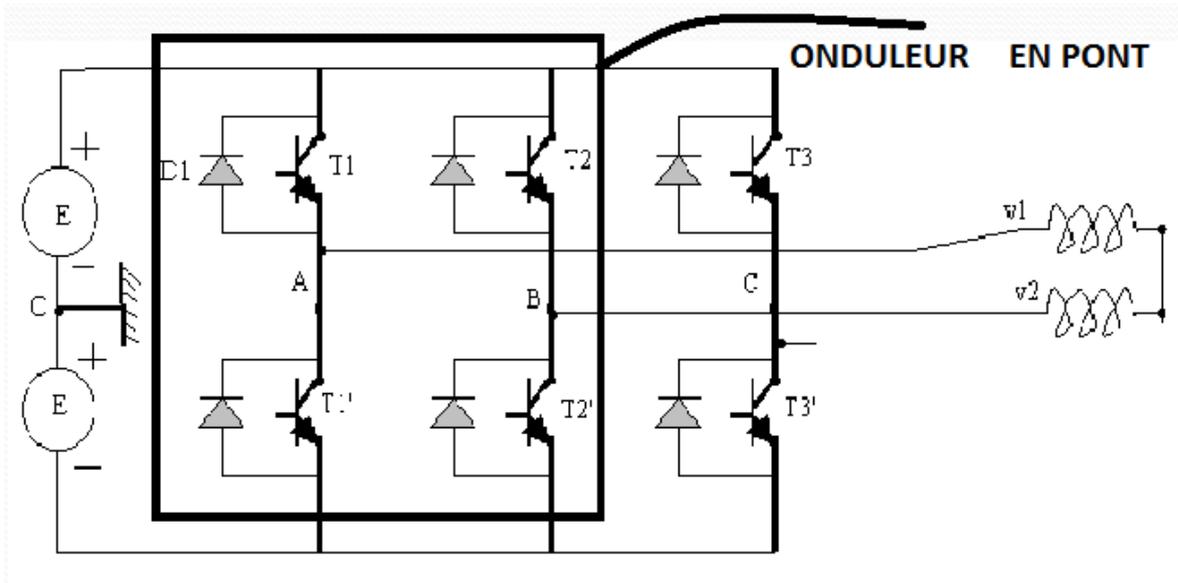
En suivant les mêmes manières, nous commençons par la charge résistive puis en représente les résultats pour des récepteurs inductifs.

#### III.9.1 Débit sur une charge résistive R

L'avantage de réaliser un onduleur triphasé est d'aussai l'utiliser pour réussir plusieurs convertisseurs monophasés, à savoir :

- Le hacheur série ou parallèle en utilisant un demi bras.
- Le hacheur en demi-pont en utilisant un bras complet.
- Le hacheur à quatre quadrants en utilisant deux bras.
- L'onduleur en pont avec deux bras.

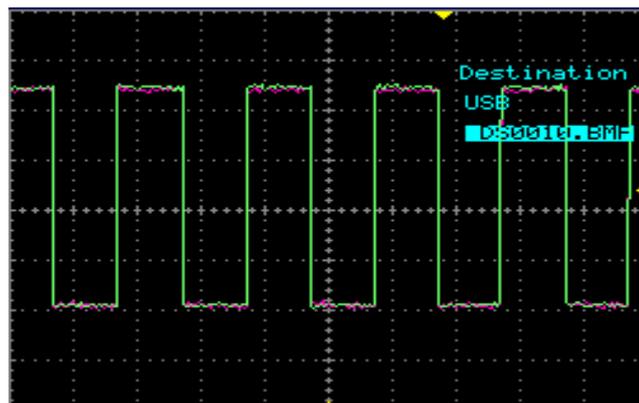
La figure suivant (figure III.12) montre l'onduleur monophasé en pont avec une charge résistive



**Figure III.12** onduleur triphasé utilisé comme monophasé en pont

L'oscilloscope, ne peut visualiser que des tensions. Dans toute l'application et afin de voir l'allure de courant, on mesure la tension aux borns des résistances. Pour la valeur exacte, on la calcule à partir d'un ampèremètre.

De la figure III.13 on observe que la tension est l'image du courant avec un rapport qui obéit à la loi d'ohm.



**Figure III.13** L'allure de tension (charge R)

### III.9.2 : Débit sur une Charge RL

Lors de l'application des tensions en créneaux (tension issue de l'onduleur plein-onde), la charge réagit selon un comportement d'une équation différentielle à second membre des fois positif et d'autre fois négatif. La solution de cette équation différentielle, dont sa variable essentielle est le courant et tantôt ascendant et tantôt descendant avec la même périodicité menée par la tension appliquée.

Cette variation est très sensible au rapport  $RL$ . Dans les résultats de la figure III.14 et en variant la résistance  $R$  nous confirmons l'allure exponentielle en plus pour des grandes valeurs de la résistance, la forme du courant tend à rejoindre celle de la tension appliquée.

Par contre en abaissant la résistance, le comportement sera comme étant linéaire et la forme se rapproche à un signal triangulaire figure III.5

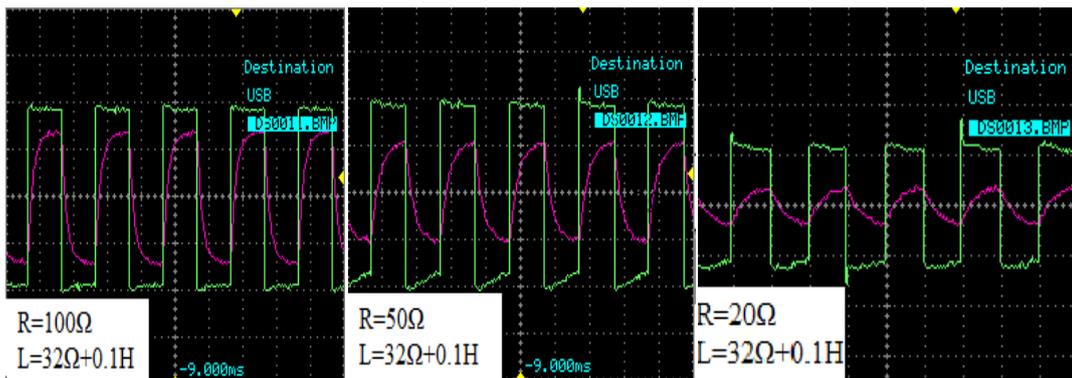


FIGURE III.14: L'allure de courant et de tension de sortie (charge R L)

- ☞ Juste un essai pour le hacheur ou on utilise un seule bras, les conditions de charge RL sont les mêmes. La seule différence est que la partie négative est complètement annulée pour la tension et le courant figure( III.15)

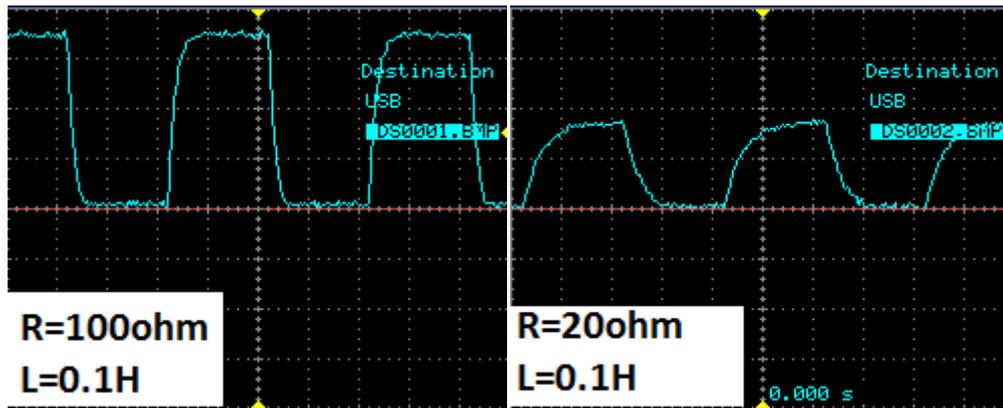


Figure III.15: L'allure de courant et de tension de sortie (charge R L)

### III.10 Observation des signaux de commande pour la plein-onde en triphasé

Maintenant on adapte le programme de l'Arduino afin de nous délivrer les signaux avec un déphasage de  $\frac{2\pi}{3}$  pour chaque haut de bras, pour les parties inférieures les signaux sont générés en complémentaire figure( III.7 )

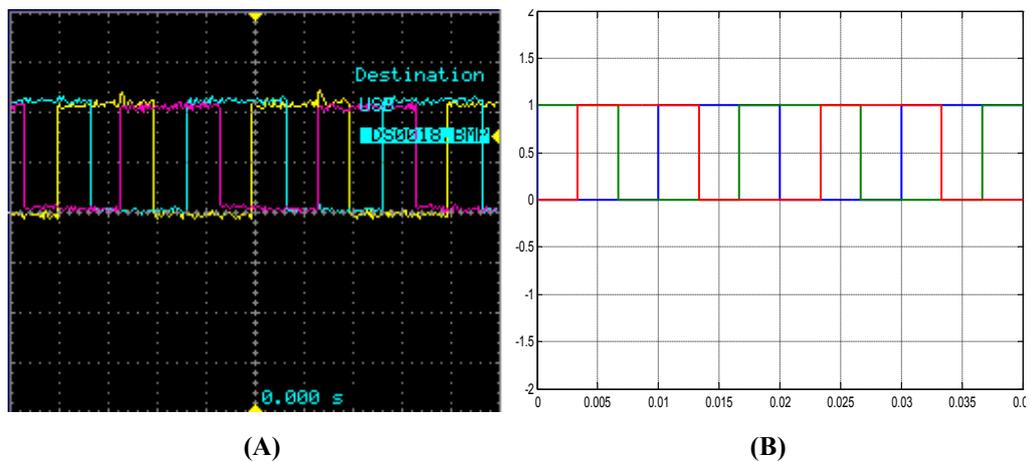


Figure III.16 les signaux délivrer par la carte Arduino avec un déphasage de  $\frac{2\pi}{3}$  pour chaque haut de bras(A),par simulation(B)

### III.11 Implémentation de la commande plein-onde pour l'onduleur triphasé

Le premier essai de l'onduleur triphasé sera réalisé avec la commande plein-onde. La charge RL étant branché en étoile, les mêmes observations concernant la forme exponentielle du courant sont obtenues en figure(III.17).

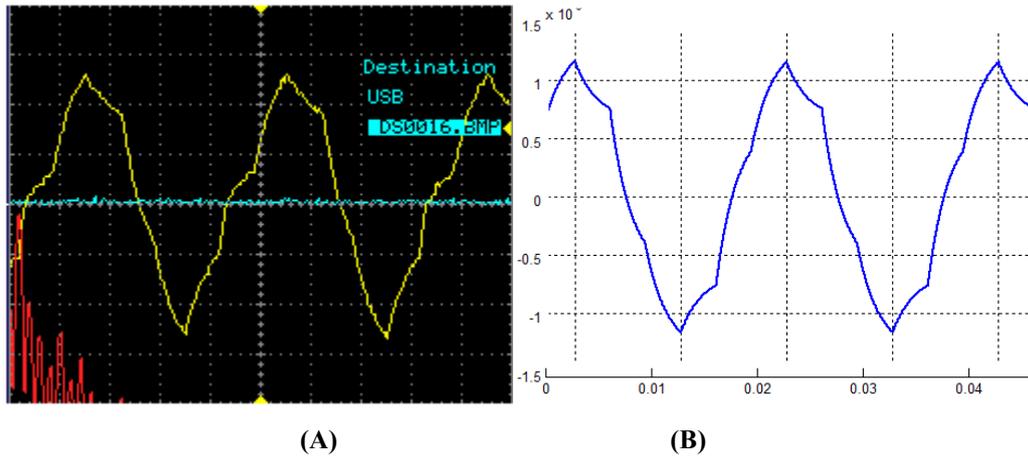


Figure III.17 L'allure de courant de sortie avec FFT (A) et le courant simulé(B)

ce courant tente de suivre la forme de tension simple appliquée au borne de la charge par l'onduleur figure ( III.18).

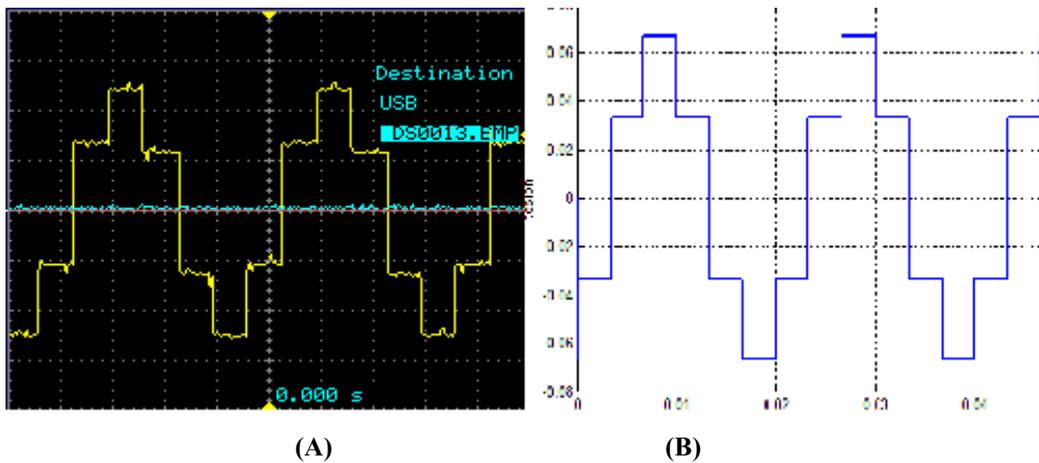


Figure III.18 L'allure de tension simple (A) et la tension simple simulé(B)

Quand à la tension composée elle est juste et conforme à celle obtenue par la simulation.

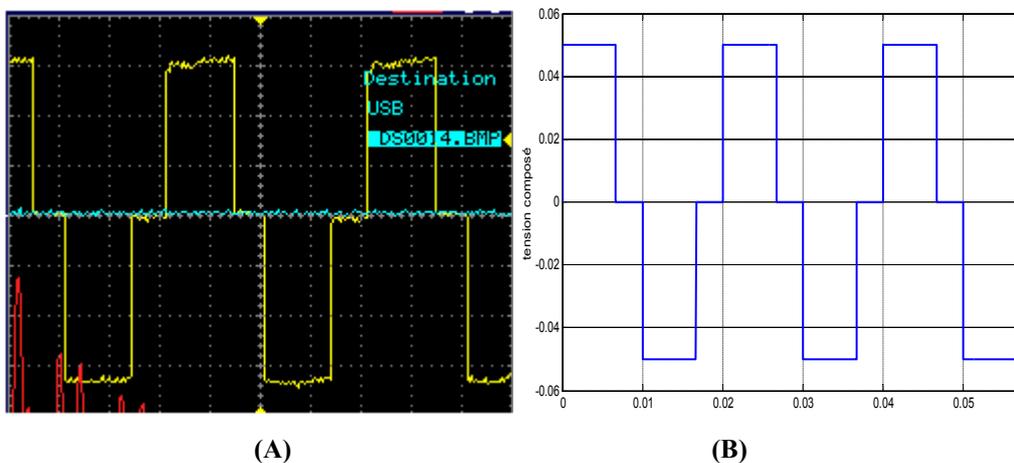


Figure III.19 L'allure de tension composé avec FFT (A) et la tension composé simulé(B)

### III.12 Signaux de commande MLI

les signaux générés par la MLI après comparaison de la porteuse et les trois modulantes sinusoïdale déphasés de  $\frac{2\pi}{3}$  chacun. Tous cela est fait par un programme interne téléversé toujours à la carte Arduino.

Les signaux d'un seul bras sont comparés avec ceux obtenus par la simulation pour un indice de modulation  $M=9$  figure( III.20)

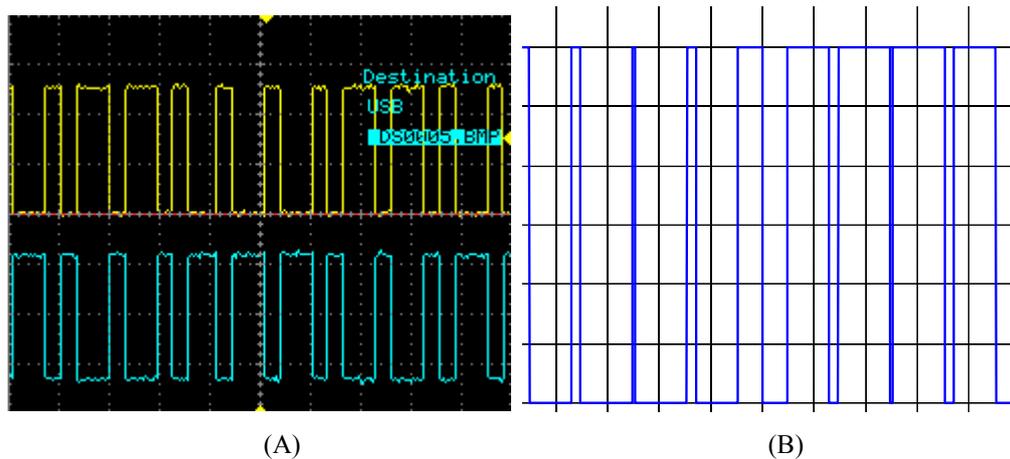


Figure III.20 : Les impulsions obtenues à la sortie de la carte Arduino pour deux phases complémentaires (A) ,et Les impulsions obtenues par la simulation(B) (MLI).

### III.13 Implémentation de la MLI pour l'onduleur triphasé

Maintenant en appliquant la MLI à l'onduleur triphasé et en gardant tous les considérations de charges et tension appliqués ( $R= 50 \Omega$ ,  $L=0.1H$ ).

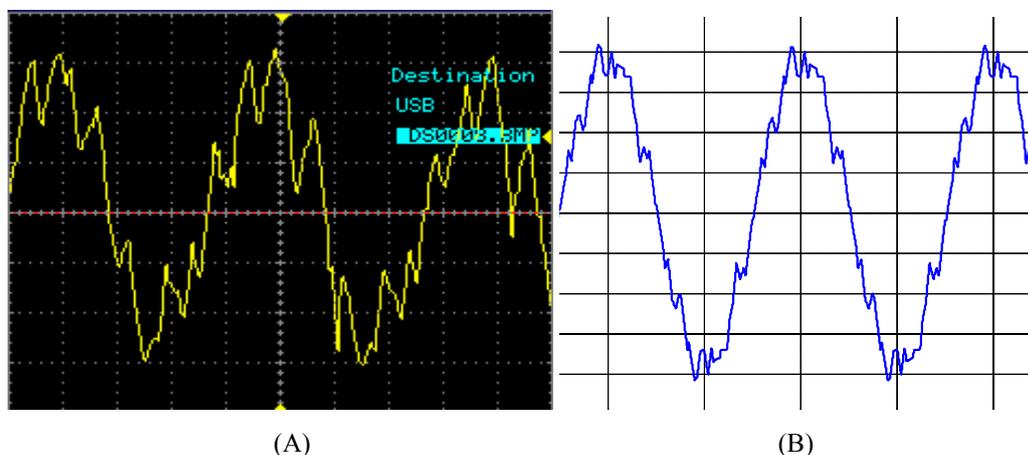


Figure III.21 L'allure de courant de sortie avec FFT (A) et le courant simulé(B)

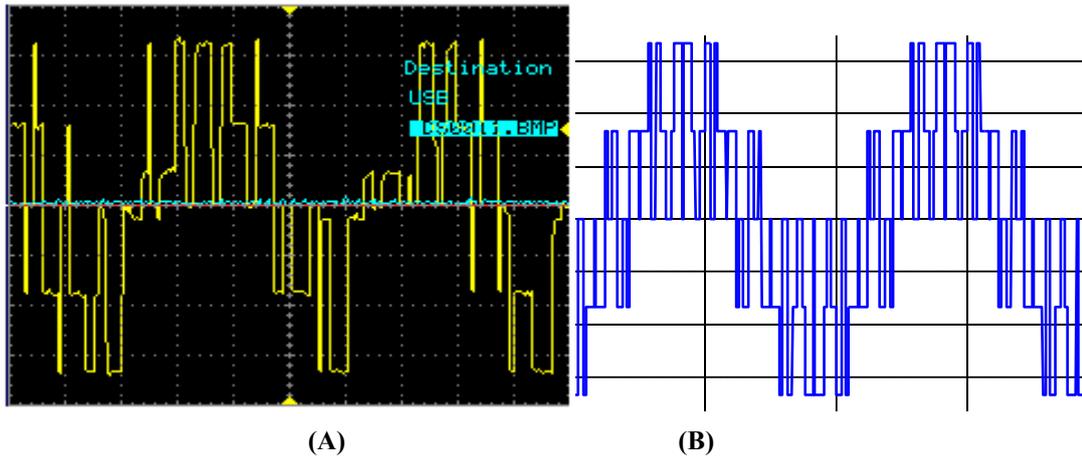


Figure III.22 L'allure de tension simple (A) et la tension simple simulé(B)

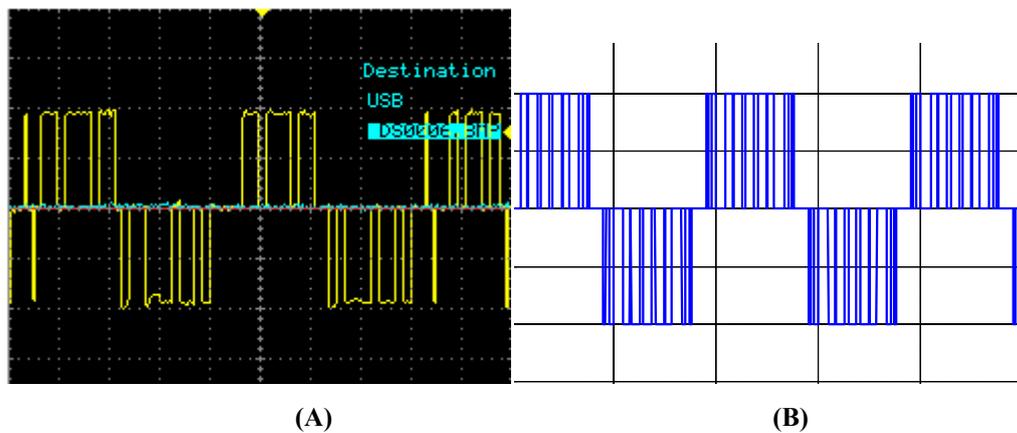


Figure III.23 L'allure de tension composé (A) et la tension composé simulé (B)

nous constatons que les tensions composées et simples sont comparable à la simulation et les courants engendrés sont nettement améliorés par rapport à la commande plein-onde

### III .14 conclusion

Ce chapitre présente le fruit de notre travail dont nous avons fait beaucoup d'efforts et de temps avant de réussir. On a eu pas mal de moment d'échec lors des réalisations malgré le choix de la carte Arduino qui a une fréquence d'horloge de 16MHz, on aura préféré d'avoir des microcontrôleurs plus puissants afin minimiser les ratés pour les commutations. On soulève actuellement le problème de protection des parties commande et puissance. Beaucoup d'idées sont venues en retard et qui ont pu donner plus de valeur à ce travail.

Mais malgré ces contraintes, concevoir un onduleur triphasé qui pourra être utilisé en pédagogie est une très bonne chose

### Conclusion général

Dans le cadre de la préparation du diplôme de master en électromécanique, Ce travail vise à présenter une étude théorique, simulation et réalisation pratique de l'onduleur triphasée (mise en place d'un banc d'essais expérimental) au niveau du laboratoire de mesure du département d'électrotechnique à l'université de Jijel.

Le mémoire est organisé en trois chapitres, en plus d'une introduction. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les onduleurs leurs stratégies de commande et les applications courantes.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'explication du fonctionnement de la carte Arduino à base de microcontrôleur (de la famille AVR), avec la manière de la mise en œuvre et la programmation de cette carte sous l'environnement de programmation Arduino C.

Le troisième chapitre est le fruit de cette étude qui traite le procédé de réalisation d'un onduleur triphasé.

Les résultats de validation expérimentale de l'onduleur réalisé à travers des tests avec les différentes charges, ainsi que l'application de deux commandes (plein onde et MLI).

Ce travail a mis en évidence l'importance de la réalisation pratique, il est vrai que les systèmes de simulation nous ont aidé pour savoir ou en va dans l'expérience, mais la réalisation nous a appris beaucoup de choses et de techniques qu'on auraient jamais eu avec la simulation.

## Référence bibliographique

---

- [1] <http://cbissprof.free.fr> « Conversion statique d'énergie ».
- [2] boukaroura abdelkader « modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bondgraph » mémoire de magistère ,option : réseaux électriques, université de sétif .2009.
- [3] Guy Segulier, Francis Labrique, Philippe Delarue - Electronique de puissance. Structures, commandes, applications (0, Dunod) .
- [4] hamane bekhada «la commande pleine onde des onduleurs association avec une machine asynchrone» mémoire de magistère département du génie électrique, ecole normale supérieure d'enseignement technique oran .2009.
- [5] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [6] T. Wildi : *Electrotechnique*, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [7] Philipe MISSIRLIU «Stratégie de commande des onduleurs ».
- [8] francis ladrique, guy segir, robert bausiere« Les convertisseurs statiques de l'électroniques de puissance »VOL .4. Edition technique et documentation –Lavoisier 1995.
- [9] « cours techniques de commande de l'onduleur » université de batna 2008 /2009.
- [10] <https://www.tunisia-sat.com>
- [11] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [12] <https://www.gotronic.fr/art-carte-arduino-uno>

## Référence bibliographique

---

[13] NOUAR Hadjer , TIRSATINE Fella, «Etude et programmation d'une carte ARDUINO UNO pour le comptage d'entrées/sorties d'un parking», Mémoire de mastère , département électrotechnique,2016

[14] : Etude et programmation d'une carte ARDUINO UNO pour le comptage d'entrées/sorties d'un parking

[15] mecheri salah-eddine « realisation d'un onduleur de tension monophasé contrôlé par une carte arduino », université constantine , mémoire de mastère, département électrotechnique, promotion 2013/2014.

[16] <http://automacile.fr/definition-arduino-quest-ce-quun-arduino>

[17] elisa braco sola « design and simulation of a single-phase inverter with digital pwm » thèse de fin d'études ingénierie des technologies industrielles, Germany. July 2016.

## 1. PROGRAMME MATLAB DE LA COMMANDE PLIEN OND

```

F=4000;T=1/F;
dt=0.0001;Tf=10*T;
for t=0:dt:Tf;
    kt=rem(t,T);
    if kt<=T/6
        A=1;
        B=-1;
        C=1;
    elseif kt>T/6 && kt<=2*T/6
        A=1;
        B=-1;
        C=-1;
        figure(3)
        plot(t,A)
    elseif kt>2*T/6 && kt<=3*T/6
        A=1;
        B=1;
        C=-1;
    elseif kt>3*T/6 && kt<=4*T/6
        A=-1;
        B=1;
        C=-1;
        elseif kt>4*T/6 && kt<=5*T/6
            A=-1;
            B=1;
            C=1;
    elseif kt>5*T/6 && kt<=6*T/6
        A=-1;
        B=-1;
        C=1;
    End

```

## 2. PROGRAMME matlab POUR MLI

```

figure(1)
plot(t,A,t,B,t,C), hold on
end
clear all
close all
f=200
T=1000000/f;
mod=15;dt=T/1000;i=1;A=1
for t=0+dt:dt:1*T
    rt=rem(t,T);
    k=round(2*mod*rt/T);k
    % for k=1:2*mod
        eq=(-1)^k*(4*A*mod*rt/T-(2*k-1)*A);
        %if (abs(eq)<=A)
            if ((0.9*A*sin(2*pi*rt/T))>(eq))
                sig(i)=1;
            else
                sig(i)=0;
            end
        %end
    %end
    tt(i)=i;

```

```
i=i+1;  
end  
plot(tt,sig),axis([0 1*T/dt -2 2]);
```

## 1. PROGRAMME ARDUINO DE LA COMMANDE PLIEN OND

```
unsigned long time;
```

```
//int time;
```

```
int Ft=100;
```

```
int T=1000000/Ft;
```

```
int det=0*0.01*T;
```

```
int rtime;
```

```
int phaseA = 13;
```

```
int phaseA1 = 12;
```

```
int phaseB = 11;
```

```
int phaseB1 = 10;
```

```
int phaseC = 9;
```

```
int phaseC1 = 8;
```

```
void setup(){
```

```
  //Serial.begin(9600);
```

```
  pinMode(phaseA, OUTPUT);
```

```
  pinMode(phaseA1, OUTPUT);
```

```
  pinMode(phaseB, OUTPUT);
```

```
pinMode(phaseB1, OUTPUT);

pinMode(phaseC, OUTPUT);

pinMode(phaseC1, OUTPUT);}

void loop(){

//Serial.print("Time: ");

time = micros();

rtime = time % T;

if ( (rtime < (0.166)*T) ) {           // timer / wait fou a full second

digitalWrite(phaseA1, LOW);delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseA, HIGH);

digitalWrite(phaseB, LOW);delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseB1, HIGH);

digitalWrite(phaseC1, LOW); delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseC, HIGH);

} else if (rtime >= (0.166)*T && rtime < (0.33)*T) {           // timer / wait fou a full second

//digitalWrite(phaseA, HIGH);digitalWrite(phaseA1, LOW);

// digitalWrite(phaseB, LOW);; delayMicroseconds(50);digitalWrite(phaseB1, HIGH);

digitalWrite(phaseC, LOW);delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseC1, HIGH);

} else if ((rtime >= (0.33)*T ) && (rtime < (0.5)*T)) {

// digitalWrite(phaseA, HIGH);digitalWrite(phaseA1, LOW);

digitalWrite(phaseB1, LOW); delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseB, HIGH);

//digitalWrite(phaseC, LOW);digitalWrite(phaseC1, HIGH);

} else if ((rtime >= (0.5)*T) && (rtime < (0.66)*T)) {
```

```
digitalWrite(phaseA, LOW); delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseA1, HIGH);

// digitalWrite(phaseB, HIGH);digitalWrite(phaseB1, LOW);

// digitalWrite(phaseC, LOW);digitalWrite(phaseC1, HIGH);

    }else if((rtime >= (0.66)*T) && (rtime < (0.83)*T))    {

// digitalWrite(phaseA, LOW);digitalWrite(phaseA1, HIGH);

// digitalWrite(phaseB, HIGH);digitalWrite(phaseB1, LOW);

digitalWrite(phaseC1, LOW); delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseC, HIGH);

    }else if((rtime >= (0.83)*T) && (rtime < (1)*T))    {

// digitalWrite(phaseA, LOW);digitalWrite(phaseA1, HIGH);

digitalWrite(phaseB, LOW); delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseB1, HIGH);

// digitalWrite(phaseC, HIGH);digitalWrite(phaseC1, LOW);

    }// Serial.println(time); //prints time since program started

//          // wait a second so as not to send massive amounts of data}
```

## 2. PROGRAMME POUR MLI

```
#include "math.h"
```

```
unsigned long time;
```

```
float Ft=100;
```

```
float T=1000000/Ft;
```

```
float rtime;
```

```
float rtimef;
```

```
float TT;
```

```
int phaseA = 13;
```

```
int phaseA1 = 12;
```

```
int phaseB = 11;
```

```
int phaseB1 = 10;
```

```
int phaseC = 9;
```

```
int phaseC1 = 8;
```

```
// modulation
```

```
float mod=9;
```

```
float A=1;
```

```
int k;
```

```
float Eq;
```

```
float k1;
```

```
int kk;

void setup(){

  //Serial.begin(9600);

  pinMode(phaseA, OUTPUT);

  pinMode(phaseA1, OUTPUT);

  pinMode(phaseB, OUTPUT);

  pinMode(phaseB1, OUTPUT);

  pinMode(phaseC, OUTPUT);

  pinMode(phaseC1, OUTPUT);

}

void loop(){

  //Serial.print("Time: ");

  time = micros();

  rtime = fmod(time,T);

  k=(int)(2*mod*rtime/T)+1;

  Eq=(pow(-1,k))*A*(4.0*mod*rtime/T-(2*k-1));

  Eq=double(Eq);

  //if (abs(Eq)<=A){

    if ((0.9*A*sin(2*3.14*rtime/T))>(Eq)){

      digitalWrite(phaseA1, LOW); digitalWrite(phaseA, HIGH);
```

```
    }else{

    digitalWrite(phaseA, LOW);digitalWrite(phaseA1, HIGH);

    }

if ((1.5*A*sin(2*3.14*time/T-2*3.14/3.))>(Eq)){

    digitalWrite(phaseB1, LOW);digitalWrite(phaseB, HIGH);

    }else{

    digitalWrite(phaseB, LOW);digitalWrite(phaseB1, HIGH);

    }

if ((1.5*A*sin(2*3.14*time/T-4*3.14/3.))>(Eq)){

    digitalWrite(phaseC1, LOW);digitalWrite(phaseC, HIGH);

    }else{

    digitalWrite(phaseC, LOW);digitalWrite(phaseC1, HIGH);

    }

}
```