

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N°d'enregistrement

Université de Ghardaïa



كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم آلية و كهرو ميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

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

**Master**

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Energies Renouvelables en Electrotechnique

**Thème**

**Etude et réalisation d'un convertisseur DC/AC  
commandé par MLI pour application photovoltaïque**

Présenté par :

**ABDENNOUR SEMAOUI**

**MOKHTAR BAHMANI**

Soutenue publiquement le 11/06/2022

Devant le jury composé de:

Ahmed BAHRI	Maitre-Assistant A	Université de Ghardaïa	Président
Karima BENAMRANE	Maitre de recherche B	URAER Ghardaïa	Encadrant
Thameur ABDELKRIM	Directeur de recherche	URAER Ghardaïa	Co-encadrant
Abdelhak BOUCHAKOUR	Maitre de recherche A	URAER Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2021/2022

# Remerciement

Nous remercions avant tous le Bon Dieu qu'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire d'électronique de puissance de l'URAER (Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable) DE Ghardaïa.

Nous sommes très reconnaissants à l'URAER pour le soutien matériel nécessaire à la réalisation de ce travail.

Pour avoir consenti à examiner ce travail, nous tenons à remercier très sincèrement:

Nos encadreurs et Co-encadreur Dr. BENAMRANE KARIMA, et Dr. ABDELKRIM THAMEUR. Pour les efforts et le temps qu'ils nous ont consacré, ils nous ont beaucoup aidés par leur conseils, leurs expériences et leurs encouragements, nous leur sommes très reconnaissants.

Notre reconnaissance va également à nos enseignants pour leurs honorables tâches durant notre période d'études.

Merci, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.

# Dédicace

**La mémoire de mes regrettés parents..., pour l'amour et l'affection qu'ils m'ont offert, pour les conseils fructueux qui m'ont été prodigués, grand merci. Que Dieu les accueille dans son vaste paradis.**

**A ma femme et mon fils**

**A toute la famille **Bahmani****

**A tous les amis ...**

**A tous ceux qu'on aime ...**

**Et à tous ceux qui me sont chers.**

*Bahmani mokhtar*

# Dédicace

**La mémoire de mes regrettés parents..., pour l'amour et l'affection qu'ils m'ont offert, pour les conseils fructueux qui m'ont été prodigués, grand merci. Que Dieu les accueille dans son vaste paradis.**

**A ma femme et mes enfants**

**A toute la famille **Semaoui****

**A tous les amis ...**

**A tous ceux qu'on aime ...**

**Et à tous ceux qui me sont chers.**

*Semaoui Abdennour*

## Résumé

L'objectif de ce mémoire est la réalisation et l'expérimentation d'un onduleur monophasé. Cet onduleur à deux bras est commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion MLI. L'implémentation de l'algorithme de commande est effectuée en utilisant le logiciel Matlab associé à la carte de commande PCIe6351. Cette carte nous délivre un seul signal, qui est par la suite transformé en quatre signaux grâce à la carte d'interface réalisée. Le convertisseur réalisé est utilisé comme un deuxième étage dans une chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages.

**Mots clés :** – Onduleur monophasé – Commande MLI – Energie photovoltaïque  
– Convertisseur DC/DC – Commande par MPPT – Panneaux solaire

## Abstract

The objective of this thesis is the realization and the experimentation of a single-phase inverter. This two-leg inverter is controlled by the PWM pulse-width modulation strategy. The implementation of the control algorithm is carried out using the Matlab software associated with the PCIe6351 control card. This card delivers a single signal, which is then transformed into four signals through the interface card realized. The converter realized is used as a second stage in a two-stage photovoltaic conversion chain.

**Keywords:** – Single-phase inverter – PWM control – Photovoltaic energy  
– DC/DC converter – MPPT control – Solar panels

## ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو إدراك وتجريب عاكس أحادي الطور. يتم التحكم في العاكس ثنائي الذراع بواسطة استراتيجية تعديل تقدم هذه **PCIe6351** المرتبط بلوحة التحكم **Matlab** يتم تنفيذ خوارزمية التحكم باستخدام برنامج **PWM** عرض النبضة البطاقة إشارة واحدة ، والتي يتم تحويلها بعد ذلك إلى أربع إشارات بفضل بطاقة الواجهة المنتجة. يتم استخدام المحول الناتج كمرحلة ثانية في سلسلة التحويل الكهروضوئية ذات المرحلتين.

**الكلمات المفتاحية:** - عاكس أحادي الطور - تحكم **MLI** - طاقة كهروضوئية

**محولات DC/DC** - التحكم عن طريق **MPPT** - الواح شمسية

## Sommaire

REMERCIEMENT.....	
DEDICACE BAHMANI .M.....	
DEDICACE SEMAOUI. A.....	
RESUME.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	01
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE</b>	
I.1 INTRODUCTION.....	04
I.2 L'ENERGIE SOLAIRE.....	04
I.2.1.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PV .....	04
I.2.2 POTENTIEL DANS L'ALGERIE .....	06
I.2.3. INSTRUMENTS DE MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	06
I.3.LES ONDULEURS CLASSIQUES.....	07
I.4 ONDULEURS SOLAIRE.....	09
I.4.1 TYYPES DES ONDULEURS SOLAIRES.....	09
I.4.1.1 ONDULEURS AUTONOME.....	10
I.4.1.2 ONDULEURS INTERCONNECTES.....	10
I.4.1.3 ONDULEURS DE POMPAGE.....	11
I.4.2 TOPOLOGIE DES ONDULEURS SOLAIRE:.....	11
I.4.2.1.MONTAGE A TYRISTOR.....	11
I.4.2.2.MONTAGE A PONT DE TRANSISTORS.....	12
I.4.2.3.MONTAGE A PONT DE TRANSISTORS AVEC CONVERTISSEURS ELEVATEUR.....	12
I.4.2.4.MONTAGE A 3 ETAGES AVEC TRANSFORMATEUR HAUT FREQUENCE.....	12
I.4.2.5.MONTAGE A 4 ETAGE AVEC MONTAGE PUSH PULL .....	13
I.4.2.6.MONTAGE D'ONDULEURS SANS TRANSFORMATEUR .....	13
I.4.2.7.ROLE DU CONDENSSEUR D'ENTREE.....	14
I.5 CONCLUSION.....	14

CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR MONOPHASE	
II.1 INTRODUCTION.....	16
II.2. MODELISATION.....	16
II.3. STRATEGIES DE COMMANDES.....	17
II.3.1 COMMANDE PLEIN ONDE.(180°-0°).....	17
II.3.2 COMMANDE DECALE (120°-60°).....	19
II.3.3 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION MLI.....	21
II.4. SIMULATION ET RESULTATS .....	22
II.5 CONCLUSION.....	25
CHAPITRE III : REALISATION ET EXPERIMENTATION	
III.1. INTRODUCTION.....	27
III.2. CARTE D'ACQUISITION PCI E 6351.....	27
III.3. REALISATION.....	28
III.3.1 PARTIE COMMANDE.....	28
III.3.1.1 ALIMENTATION STABILISEE.....	28
III.3.1.2 CIRCUIT D'ISOLATION OPTOCOUPLEUR A3120.....	29
III.3.1.3 DRIVER IR2111.....	30
III.3.1.4 CIRCUIT INVERSSEUR CD4069.....	31
III.3.1.5 CARTE DE COMMANDE.....	32
III.3.2 PARTIE PUISSANCE.....	33
III.3.3 STRUCTURE DE L'ONDULEUR .....	34
III.4 RESULTATS EXPREMENTAUX .....	35
III.4.1 TEST DE L'ONDULEUR.....	35
III.4.2 TEST DE L'ONDULEUR SOLAIRE .....	36
III.5 CONCLUSION.....	40
CONCLUSION GENERALE .....	41
REFERENCES.....	42

Liste des abréviations	
Abréviations	Nomination
<b>PCIe6351</b>	Carte de Commande
<b>AC</b>	Courant Continu
<b>AC/DC</b>	Convertisseur Continu/Alternatif
<b>AC/AC</b>	Convertisseur Continu/Continu
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>PPM</b>	Point de Puissance Maximale
<b>MPPT</b>	Maximum Puissance point tracking
<b>Gpv</b>	Générateur photovoltaïque
<b>IGBT</b>	Insulated-gatebipolar transistor
<b>MLI</b>	Modulation de la Largeur d'Impulsion
<b>CDER</b>	Centre Développement Energie Renouvelable
<b>Peak</b>	La pointe
<b>Datasheet</b>	Fiche de données
<b>Deadtime</b>	Temps mort

Liste des Symboles		
Symboles	Nomination	Unité
$T^{\circ}$	Température	(C°)
$S$	Rayonnement solaire	(W/m <sup>2</sup> )
$P_{PV}$	Puissance photovoltaïque	(W)
$V_{pv}$	Tension photovoltaïque	(V)
$V_0$	Tension de sortie	(V)
$V_{mpp}$	Tension de circuit ouvert	(V)
$V_b$	Tension de sortie convertisseur DC/DC (Boost)	(V)
$I_{pv}$	courant photovoltaïque	(A)
$I_m$	Courant minimum	(A)
$I_M$	Courant maximum	(A)
$I_b$	Courant sortie convertisseur DC/DC (Boost)	(A)
$I_{GPV}$	Courant de générateur photovoltaïque	(A)
$U_{GPV}$	Courant de générateur photovoltaïque	(W)
$P_{mpp}$	Puissance au point de puissance maximale	(W)
$f_p$	Fréquence de la porteuse	(Hz)
$f_{ref}$	Fréquence de la référence	(Hz)
$V_p$	Tension de la porteuse	(V)
$V_{ref}$	Tension de la référence	(V)
$T$	Période de temps	(S)
$V_s$	Tension de sortie Onduleur	(V)

<b>Liste des figures</b>		
<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE</b>		
<b>Figure.I.1</b>	I(V) avec variation de la $T^{\circ}$	<b>6</b>
<b>Figure.I.2</b>	I(V) avec variation de l'éclairement S	<b>6</b>
<b>Figure.I.3</b>	Irradiation solaire globale journalière KWh/m <sup>2</sup> /jour, période 1992-2002	<b>7</b>
<b>Figure.I.4</b>	Station de mesure de rayonnement solaire (a): Pyrhéliomètre (b) Pyranomètre	<b>8</b>
<b>Figure.I.5</b>	Système onduleurs autonome	<b>10</b>
<b>Figure.I.6</b>	Fonctionnement de l'onduleur interconnecté de réseau	<b>10</b>
<b>Figure.I.7</b>	Structure des onduleurs solaires de pompage	<b>11</b>
<b>Figure.I.8</b>	Circuit utilisant des thyristors	<b>11</b>
<b>Figure.I.9</b>	Circuit simple utilisant un pont de transistors	<b>12</b>
<b>Figure.I.10</b>	Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur	<b>12</b>
<b>Figure.I.11</b>	Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence	<b>13</b>
<b>Figure.I.12</b>	Circuit à 4 étages avec montage push pull	<b>13</b>
<b>Figure.I.13</b>	Onduleur sans transformateur dit « à Topologie de Karschny	<b>14</b>
<b>CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR MONOPHASE</b>		
<b>Figure.II.1</b>	Structure d'un onduleur monophasé à deux bras	<b>16</b>
<b>Figure.II.2</b>	Tension de sortie $V_o(V)$ , (b) Courant de sortie $I_o(A)$	<b>17</b>
<b>Figure.II.3</b>	Spectre harmonique	<b>18</b>
<b>Figure.II.4</b>	Courbe de courant de sortie	<b>19</b>
<b>Figure.II.5</b>	Spectre de courant	<b>19</b>
<b>Figure.II.6</b>	Tension de sortie $V_o(V)$	<b>19</b>
<b>Figure.II.7</b>	Intervalle de fonctionnement des commutateurs	<b>20</b>
<b>Figure.II.8</b>	Spectre harmonique de la tension de sortie $V_o(V)$	<b>20</b>
<b>Figure.II.9</b>	(a) Courant de charge, (b) spectre harmonique	<b>20</b>
<b>Figure.I.10</b>	Schéma synoptique de la MLI	<b>21</b>
<b>Figure.II.11</b>	Signal de commande Q1	<b>22</b>
<b>Figure.II.12</b>	L'ensemble des courbes : $V_p$ , $V_{ref}$ , B11, B10, B21, B20 et $V_o(V)$	<b>23</b>
<b>Figure.II.13</b>	(a)Tension de sortie, (b) spectre harmonique pour $r = 0.9, m = 20$	<b>24</b>

## Liste des Figure

<b>Figure.II.14</b>	(a) Tension de sortie, (b) spectre harmonique pour $r = 0.7$ , $m = 20$	<b>24</b>
<b>Figure.II.15</b>	(a) Tension de sortie, (b) spectre harmonique pour $r = 0.5$ , $m = 20$	<b>25</b>
<b>CHAPITRE III : REALISATION ET EXPERIMENTATION</b>		
<b>Figure.III.1</b>	Carte PCIe6351	<b>27</b>
<b>Figure.III.2</b>	Schémas globale de l'alimentation stabilisée	<b>28</b>
<b>Figure.III.3</b>	Transformateur abaisseur 230Vac/18Vac	<b>28</b>
<b>Figure.III.4</b>	Redresseur D25XB80	<b>29</b>
<b>Figure.III.5</b>	(a) regulateurs L7815CV et (b) regulateur L7812CV	<b>29</b>
<b>Figure.III.6</b>	Branchement utilisé de l'Optocoupleur A3120	<b>30</b>
<b>Figure.III.7</b>	Circuit IR2111	<b>30</b>
<b>Figure.III.8</b>	(a) le branchement, (b) diagramme de temps	<b>31</b>
<b>Figure.III.9</b>	Circuit CD4069	<b>31</b>
<b>Figure.III.10</b>	Carte d'adaptation de la commande	<b>32</b>
<b>Figure.III.11</b>	IGBT IRG4PH40UD2-E	<b>33</b>
<b>Figure.III.12</b>	Photo de la partie puissance réalisée	<b>34</b>
<b>Figure.III.13</b>	Structure de l'onduleur	<b>34</b>
<b>Figure.III.14</b>	Banc expérimental de teste de l'onduleur	<b>35</b>
<b>Figure.III.15</b>	Algorithme de commande	<b>36</b>
<b>Figure.III.16</b>	Tension de sortie de l'onduleur ( $V_s/10$ )	<b>36</b>
<b>Figure.III.17</b>	Banc expérimental de teste de l'onduleur solaire	<b>37</b>
<b>Figure.III.18</b>	Plaque signalétique du module photovoltaïque	<b>38</b>
<b>Figure.III.19</b>	Photo du module photovoltaïque	<b>38</b>
<b>Figure.III.20</b>	(a) Puissance du module PV $P_{PV}(W)$ , (b) Rapport cyclique $D$	<b>39</b>
<b>Figure.III.21</b>	(a) Tensions du module PV $V_{pv}(V)$ , (b) tension de sortie $V_b(V)$	<b>39</b>
<b>Figure.III.22</b>	(a) Courant du module PV $I_{pv}(A)$ , (b) Courant de sortie $I_b(A)$	<b>40</b>
<b>Figure.III.23</b>	Tension de sortie de l'onduleur ( $V_s/10$ )	<b>40</b>

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Les besoins énergétiques des humains ne cessent d'augmenter au fil du temps. La production d'énergie représente un défi de grande importance pour les années à venir. Les pays du monde auront besoin de plus en plus d'énergie pour leur développement. Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est originaire de sources fossiles. Mais l'utilisation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre ce qui engendre une augmentation de la pollution. Malheureusement ces ressources naturelles se réduisent chaque année ce qui représente un danger pour les générations à venir. [1,2].

Les énergies renouvelables sont les énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les ENR sont des énergies à ressource illimitée. Les ENR regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. [1,2].

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes. La conversion de l'énergie solaire en électricité adaptée à l'utilisation nécessite l'utilisation de convertisseurs d'électronique de puissance. Pour des charges à courants alternatifs, l'utilisation d'onduleurs est nécessaire. L'objectif de ce mémoire est la réalisation et l'expérimentation d'un onduleur monophasé, qui sera utilisé comme un deuxième étage dans une chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages. Pour réaliser ce travail, nous avons divisé notre mémoire en trois parties :

Dans la première partie, nous allons présenter en premier lieu des généralités sur les systèmes photovoltaïques. En deuxième lieu, nous présentons le potentiel solaire en Algérie. Les différents types d'onduleurs solaires feront l'objet d'un bref aperçu dans cette partie. Enfin, nous terminons par la présentation de quelques topologies d'onduleurs solaires fabriqués par différents constructeurs.

Dans la deuxième partie nous allons présenter la modélisation puis la simulation de l'onduleur monophasé. Nous commençons en premier lieu par présenter sa structure ainsi que son principe de fonctionnement. Par la suite, nous montrons les algorithmes des différentes stratégies de

commandes de ce convertisseur. Nous terminons cette partie par la présentation des résultats de simulation.

Dans la troisième partie, nous allons procéder à la réalisation de notre convertisseur DC/AC et effectué différents tests expérimentaux. Nous allons commencer par présenter la carte de commande PCIe6351 qui va nous servir d'interface entre le PC et la partie commande de l'onduleur. Le logiciel Matlab sera utiliser pour la programmation de notre algorithme de commande MLI. Par la suite, nous allons réaliser les parties commande et puissance de l'onduleur. Enfin nous terminons par présenter les résultats expérimentaux obtenus de l'onduleur alimenté par une source DC, puis de la chaine de conversion photovoltaïque à deux étages.

**Chapitre I**  
**Généralités sur les**  
**Onduleurs Solaires**

## I.1. Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes [2,5]. Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu des généralités sur les systèmes photovoltaïques. En deuxième lieu, nous présentons le potentiel solaire en Algérie.

La conversion de l'énergie solaire en électricité adaptée à l'utilisation nécessite l'utilisation de convertisseurs d'électronique de puissance. Pour des charges à courants alternatifs, l'utilisation d'onduleurs est nécessaire. Les différents types d'onduleurs solaires feront l'objet d'un bref aperçu dans ce chapitre. Nous terminons ce dernier par la présentation de quelques topologies d'onduleurs solaires fabriqués par différents constructeurs.

## I.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire figure parmi les énergies renouvelables les plus disponibles, on distingue 03 types :

- L'énergie solaire photovoltaïque qui est obtenue par l'énergie du rayonnement du soleil sur des panneaux solaires photovoltaïques [1,2].
- L'énergie solaire thermique issue à partir de panneaux solaires thermiques
- L'énergie solaire thermodynamique produite via des centrales solaires à concentration.

L'utilisation de l'énergie solaire ne pourra que s'étendre puisque le coût des installations photovoltaïques tend à baisser. Ainsi le coût de production de l'énergie solaire deviendra de plus en plus compétitif face à celui de l'électricité conventionnelle.

### I.2.1.Principe de fonctionnement de la cellule PV

Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant). Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus.

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente (Figure I.1).

Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement. Il augmente si l'éclairement augmente (Figure I.2).

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance (produit de la tension et du courant) est maximisée.

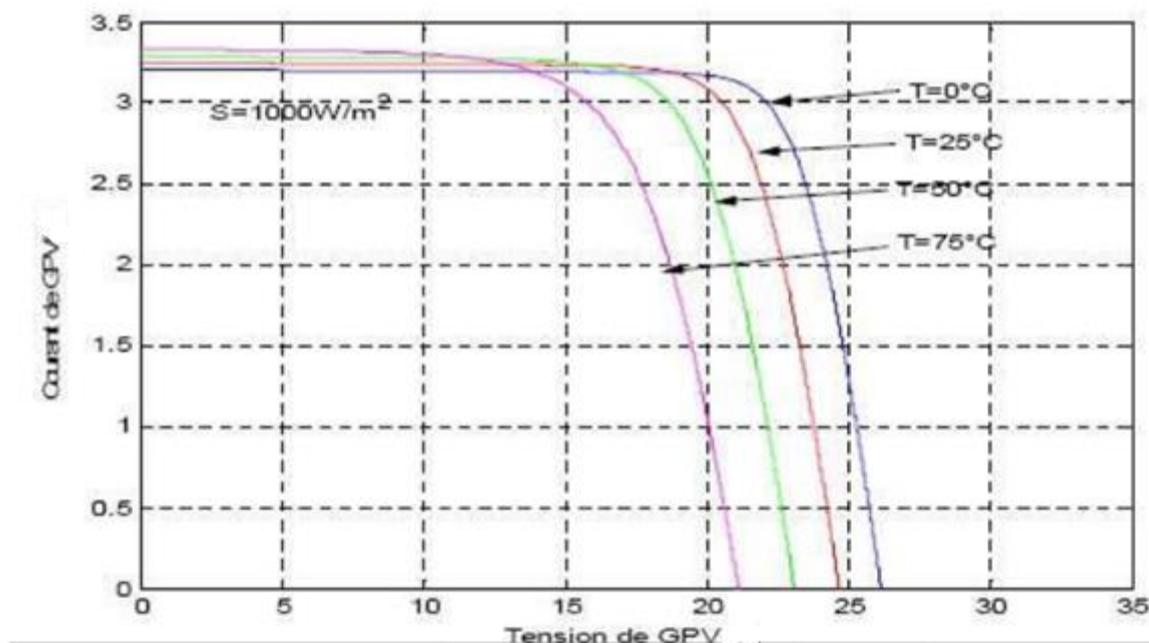


Figure I.1. Caractéristique I(V) avec variation de la  $T^\circ$

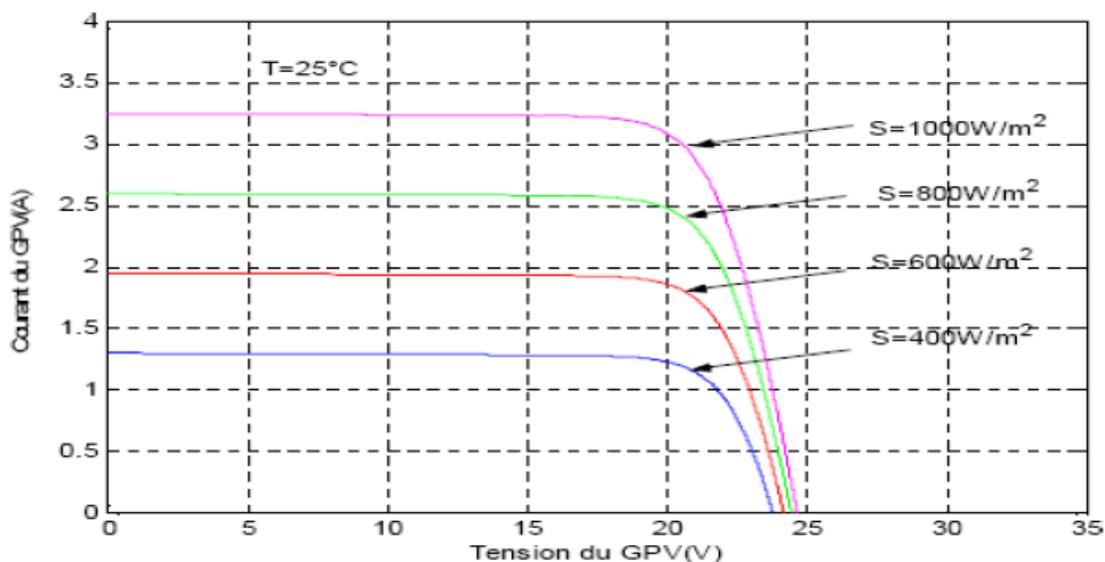


Figure I.2. Caractéristique I(V) avec variation de l'éclairement S

### I.2.2. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie est considérée comme l'un des plus grands gisements d'énergie solaire au monde, en raison de sa situation géographique importante et distinguée. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au Nord [3, 4, 5, 6, 7,8].

Le ministère algérien de l'énergie et des mines a publié en 2011 son programme sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique qui vise à porter la part des énergies renouvelables utilisées pour la production d'électricité à 40 % de la demande intérieure d'ici 2030. Le plan prévoit 800 MW d'installations jusqu'en 2020 et un total de 1,8 GW d'ici 2030 [9].

La figure I.3 présente l'irradiation solaire globale journalière  $\text{KWh/m}^2/\text{jour}$  selon CDER (Centre Développement d'Energies Renouvelables).

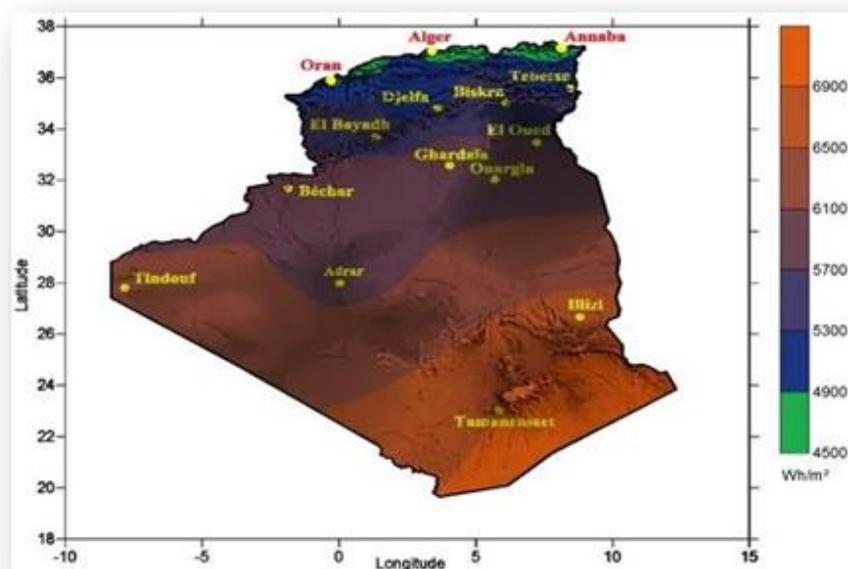


Figure I.3. Irradiation solaire globale journalière  $\text{KWh/m}^2/\text{jour}$

### I.2.3. Instruments de mesure du rayonnement solaire

La figure I.4 présente la station de mesure du rayonnement solaire reçu sur une surface terrestre, installée à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – URAER, Ghardaïa. Elle est composé de:

**A. Le pyranomètre:** est un instrument destiné à mesurer le flux lumineux solaire. Le montage de la sonde à thermopile permet de mesurer l'énergie solaire qui est reçue du spectre solaire total et de l'ensemble de l'hémisphère (champ visuel de 180 degrés).

**B. Le pyréliomètre :** mesure du rayonnement direct normal

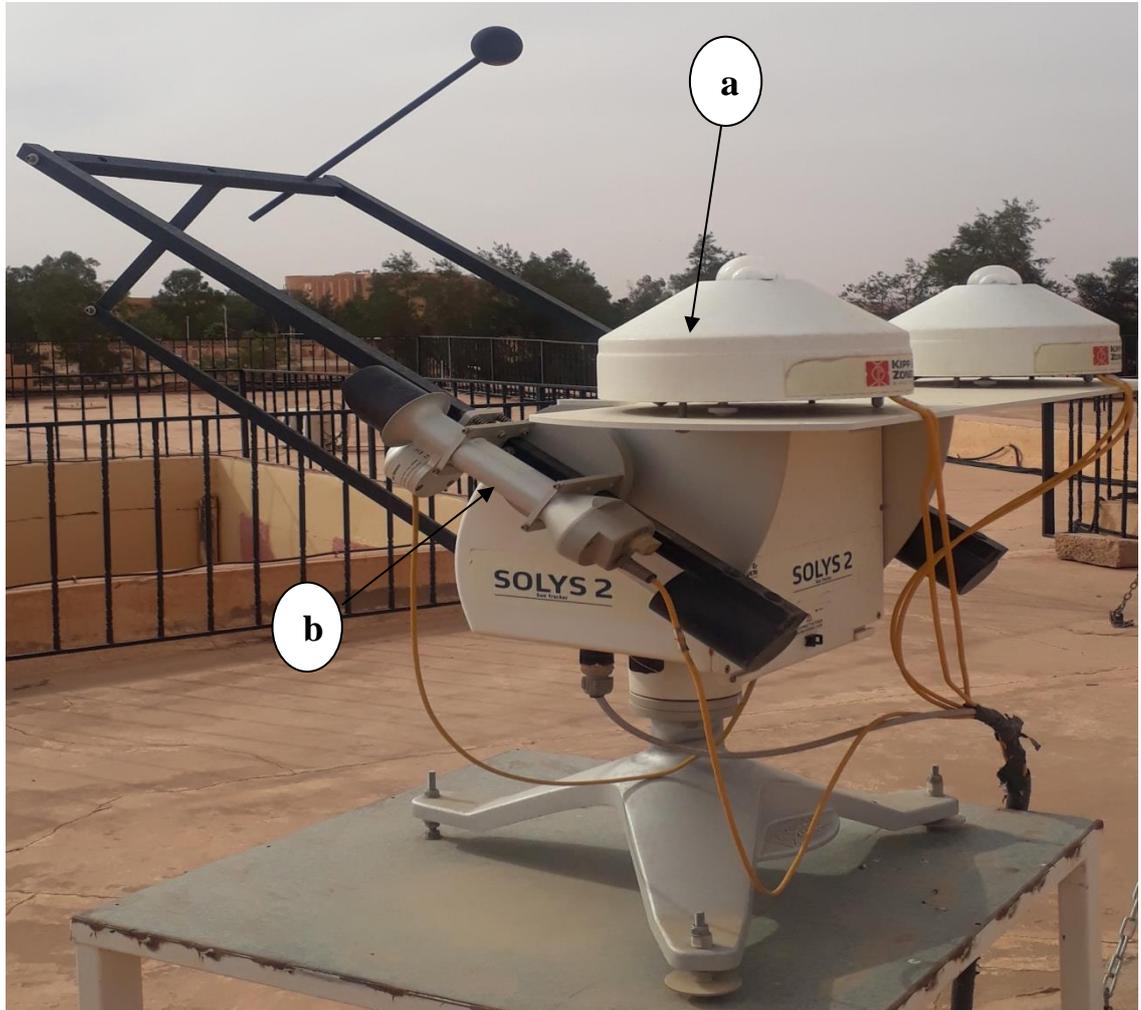


Figure I.4. Station de mesure de rayonnement solaire(a): Pyréliomètre (b) Pyranomètre

### I.3. Les onduleurs classiques

Un onduleur est un dispositif qui permet de transformer en alternatif une énergie électrique continue. Ils sont utilisés pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables comme l'alimentation des moteurs à courant alternatif à vitesse variable.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes

On peut distinguer les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de

tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

Les onduleurs sont appliqués dans plusieurs domaines tel que:

### A. Applications domestiques:

- Alimentation des appareils électroniques (TV, PC, magnétoscopes, ...) .
- Électroménager (aspirateur, réfrigérateur, lave-linge, lave-vaisselle, robots culinaires,...).
- Actionneurs domotiques (volets roulants, stores électriques,...), Éclairage et chauffage.

### B. Applications industrielles:

#### ➤ Commande de moteur :

- Compresseurs et pompes, grue, textile, Forage pétrolier.
- Machine-outil, variation de vitesse.

#### ➤ Alimentations :

- Accélérateurs de particules.
- Chargeur de batterie. - Soudage à l'arc.
- Onduleurs de secours.

### C. Transport:

- Réseaux de bord d'avion, commande électrique.
- Traction électrique (trains, métros, voitures électriques, ...).
- Propulsion électrique des navires, génération d'électricité à bord des navires.
- Génération de l'énergie électrique par des cellules photovoltaïques, les stations spatiales.

### D. Production et distribution de l'électricité:

- Compensateur de puissance réactive et filtrage actif (augmenter le facteur de puissance d'une installation et limiter les harmoniques de courant sur le réseau).

## I.4 Les onduleurs solaires

### I.4.1 Types d'onduleurs solaires

Les onduleurs destinés aux systèmes PV sont peu différents des onduleurs classiques, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même [10,11]. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système [12]. En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique  $I(V)$  non linéaire. On distingue différents types d'onduleur solaire, parmi lesquels:

## I.4.1.1 Les onduleurs Autonomes

L'onduleur autonome (Figure I.5) est un système de commutation à transistors ou à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes, il n'a pas besoin du réseau électrique pour fonctionner. Les onduleurs sont de différentes tailles de 100W pour alimenter un ordinateur portable à 10KW. Ils utilisent des batteries pour le stockage et des contrôleurs de charge pour assurer la durabilité de ces batteries, [13].

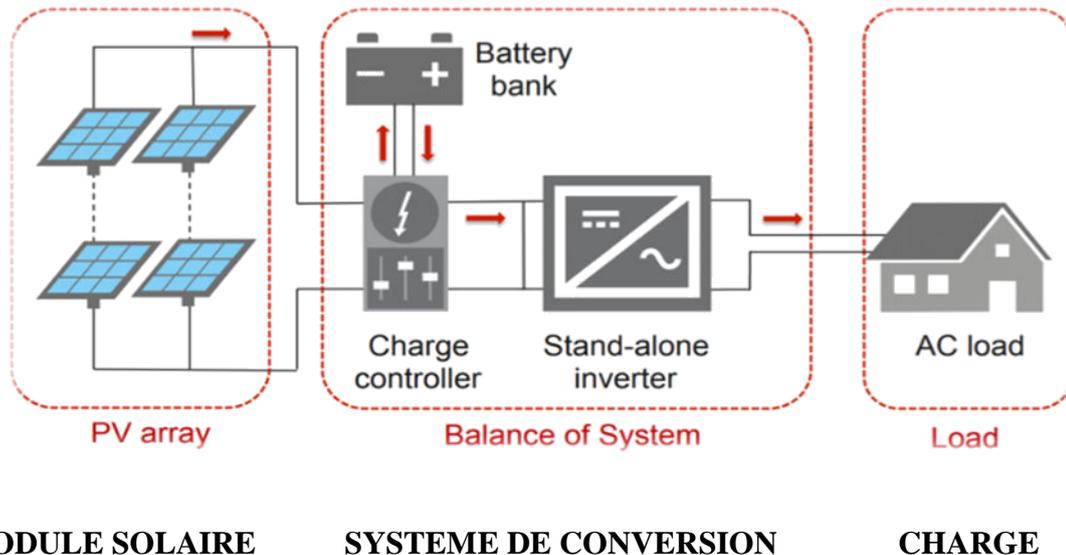


Figure I.5. Onduleurs autonome

## I.4.1.2 Les onduleurs interconnectés

Les onduleurs interconnectés au réseau, sont utilisés dans la plupart des installations solaires de base. Ils sont des appareils faciles à installer et ne doivent être connectés qu'à des panneaux solaires et au réseau local. Étant donné que le système n'est pas compliqué et assez simple, l'installation du système de raccordement au réseau est un processus relativement rapide et facile. Tout comme son fonctionnement: dès que les panneaux solaires commencent à générer du courant continu, l'onduleur connecté au réseau le détecte, passe du mode veille au mode de fonctionnement et convertit la production d'énergie photovoltaïque en courant alternatif [14]. Le principe de fonctionnement est présenté par la figure I.6.

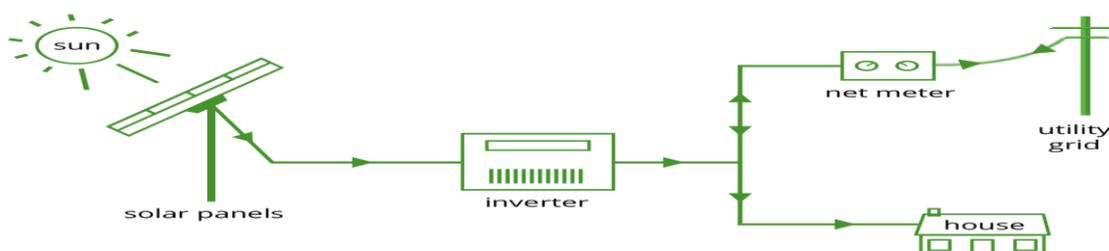


Figure I.6. Onduleur interconnecté de réseau

## I.4.1.3 Les onduleurs de pompage

L'onduleur de pompage (Figure I.7) est facile à installer. Il est respectueux de l'environnement avec une longue durée de vie et des coûts de maintenance réduits. Le MPPT intégré assure d'obtenir la meilleure puissance de sortie et optimise les performances de l'onduleur solaire de la pompe à eau tout au long de la journée car il démarre et s'arrête automatiquement en fonction de l'intensité du rayonnement solaire [15].

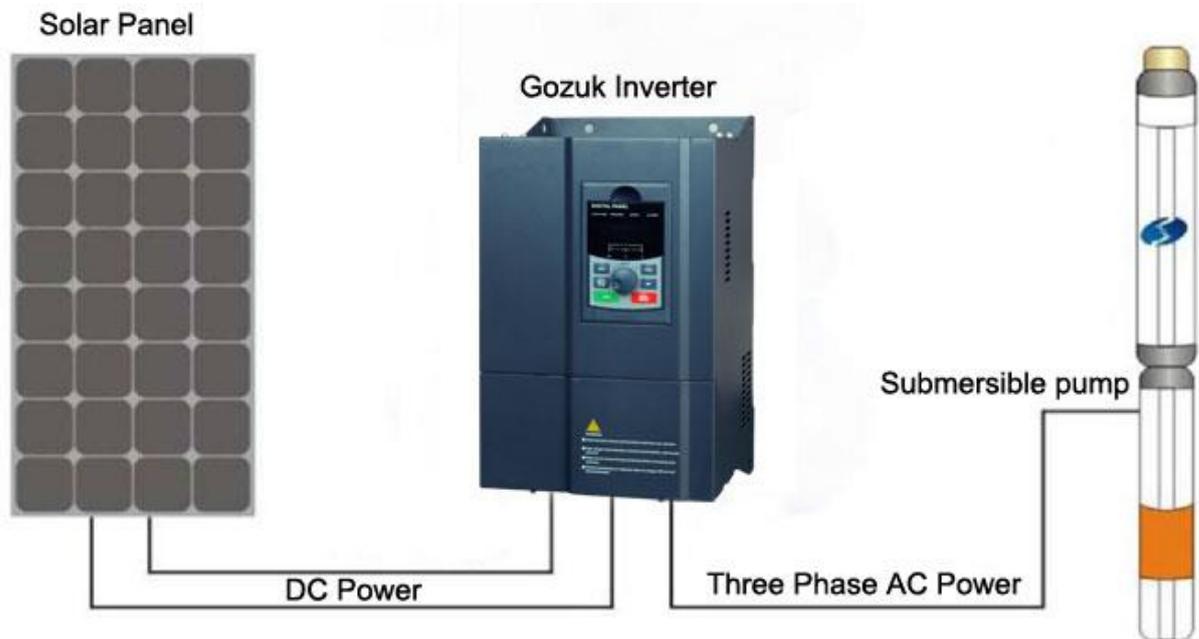


Figure I.7. Onduleurs solaires de pompage

## I.4.2 Topologies d'onduleurs solaires

### I.4.2.1 Montage à thyristors

Le montage le plus simple est composé de thyristors. Cette technologie était utilisée dans les premiers onduleurs PV (et est encore disponible en monophasé et triphasé). Peu cher, il présente cependant un courant de sortie plus ou moins rectangulaire induisant de la puissance réactive et des harmoniques qui affectent le rendement de l'onduleur et peuvent perturber le réseau.

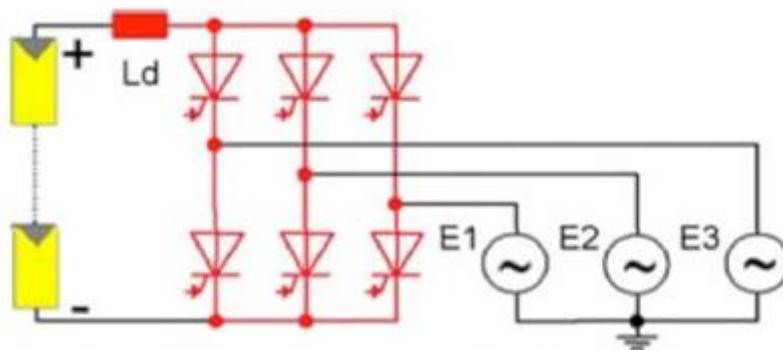


Figure I.8. Circuit utilisant des thyristors

### I.4.2.2 Montage a pont de transistors

Le montage de la (figure I.9) présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance  $L_d$  située avant le transformateur afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau. Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

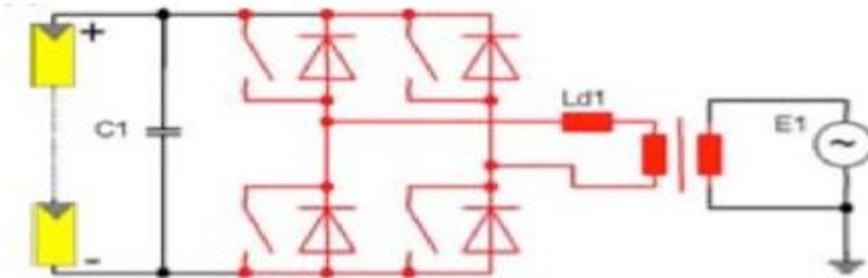


Figure I.9 : Circuit simple utilisant un pont de transistors

### I.4.2.3 Montage à pont de transistors avec convertisseur élévateur

Pour travailler sur une gamme de tensions d'entrée plus large, un convertisseur élévateur («boost») peut être rajouté (en vert) en entrée du pont (figure I.10).

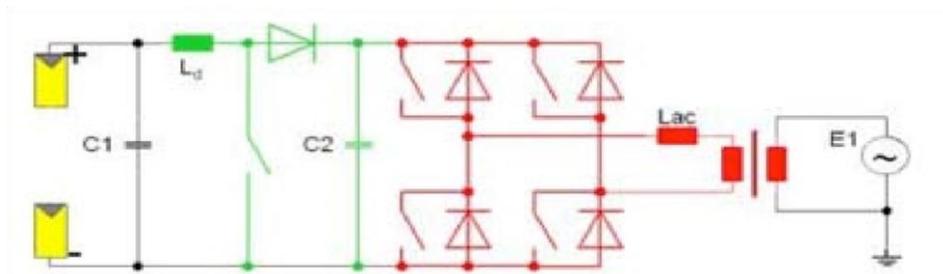


Figure I.10. Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur

### I.4.2.4 Montage à 3 étages avec transformateur haute fréquence

Le montage de la (figure I.11) comprend 3 étages différents. Il est composé d'un transformateur haute fréquence (en bleu) qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur. À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur (en vert) permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

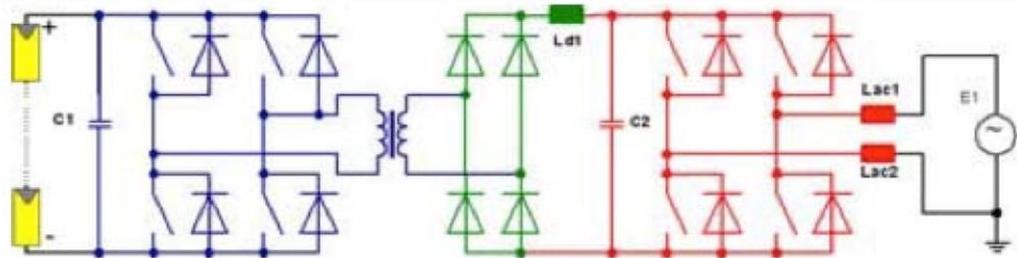


Figure I.11. Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence

### I.4.2.5 Montage à 4 étages avec montage push pull

Le montage de la figure I.12 est constitué de 4 étages. Ce circuit nécessite le contrôle de 7 interrupteurs contre 8 pour celui de la (figure I.11). Il est composé d'un convertisseur abaisseur de tension, d'un montage dit « pushpull » suivi d'un redresseur, et d'un pont de sortie. La partie « convertisseur abaisseur + transformateur push pull » permet d'adapter la tension d'entrée, et permet aussi à l'onduleur d'avoir une plus large gamme de tensions d'entrée possible donc une plus grande flexibilité d'association avec les modules PV. Le redresseur « redresse » la tension en sortie du push pull, et le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

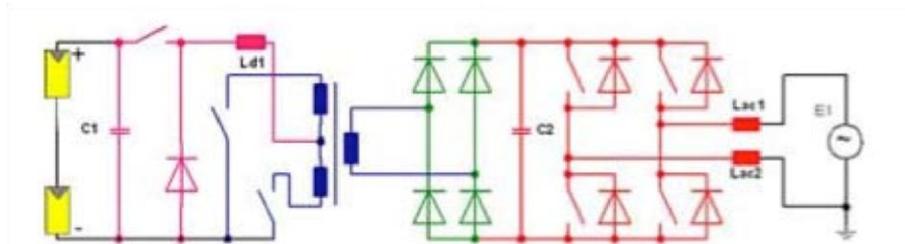


Figure I.12. Circuit à 4 étages avec montage push pull

### I.4.2.6 Montage d'onduleur sans transformateur

Le montage de la (figure I.13) présente un exemple simple de la technologie des onduleurs sans transformateur. En éliminant le transformateur (générateur de pertes importantes dans le circuit lors de la conversion de puissance) on peut augmenter le rendement. Dans ce circuit, les interrupteurs S1 (pour les courants positifs et négatifs) et S2 (pour les courants positifs) sont commandés en haute fréquence et les autres interrupteurs en 50Hz (fréquence du réseau). Pour des tensions d'entrée plus grandes, S1 peut être contrôlé seul en haute fréquence et les 4 autres en 50Hz pour former un convertisseur abaisseur et un convertisseur push pull. Dans les 2 cas, le désavantage de ce montage est la très forte tension appliquée aux bornes des interrupteurs.

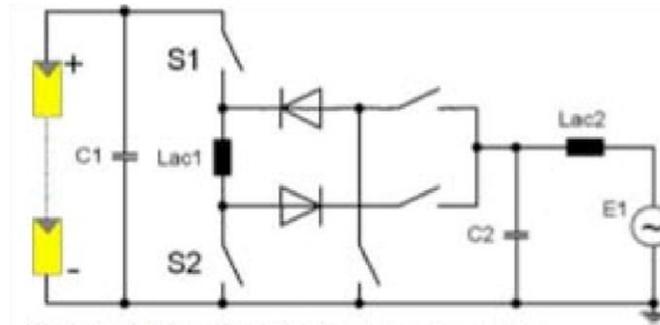


Figure I.13. Onduleur sans transformateur dit « à Topologie de Karschny »

### I.4.2.7 Rôle du condensateur d'entrée

Tous les circuits présentés disposent en entrée d'un condensateur référencé C1 de forte capacité, qui a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable.

Il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension dues aux commutations. Il assure ainsi un écoulement homogène du courant du générateur PV vers le réseau en maintenant la tension constante.

### I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu des généralités sur les systèmes photovoltaïques ainsi la carte qui montre le potentiel solaire en Algérie. Par la suite, nous avons présenté les différents types d'onduleurs solaires. Ces derniers sont utilisés dans les applications autonomes, interconnecté au réseau de distribution ainsi que pour le pompage solaire. Ce chapitre est terminé par la présentation de quelques topologies d'onduleurs solaires, à un ou à plusieurs étages de conversion, fabriqués par différents constructeurs.

Le prochain chapitre sera consacré à la Modélisation, simulation de l'onduleur Monophasé.

## **Chapitre II**

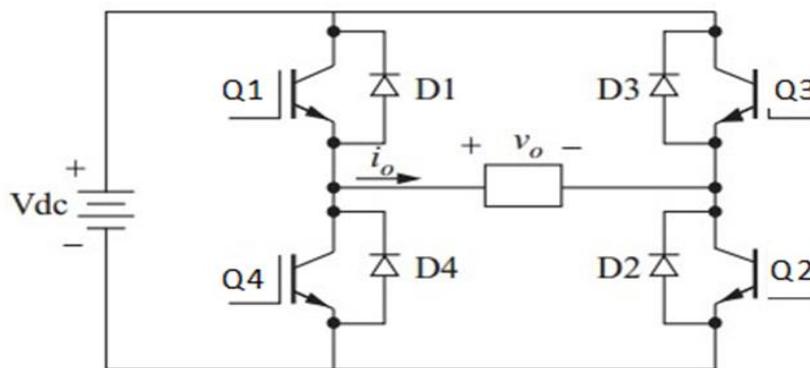
# **Modélisation, simulation de l'onduleur monophasé**

## II.1. Introduction

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Il existe plusieurs structures d'onduleurs ; dont chacun correspond à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées [16]. Dans ce chapitre, nous allons présenter un onduleur monophasé à deux bras. Nous commençons en premier lieu par présenter sa structure ainsi que son principe de fonctionnement. Par la suite, nous montrons les algorithmes des différentes stratégies de commandes de ce convertisseur. Nous terminons ce chapitre par les résultats de simulation.

## II.2. Modélisation

La structure d'un onduleur monophasé à deux bras est représentée par la figure II.1 [16].



**Figure .II.1 Structure d'un onduleur monophasé à deux bras**

L'onduleur est constitué par quatre IGBT, chaque deux IGBT en série forment un bras. Les transistors d'un seul bras sont complémentaires, c'est-à-dire :

Si Q1 est fermé, Q4 ouvert ( $Q1 = \overline{Q4}$ )

Et Si Q3 est fermé, le Q2 est ouvert ( $Q3 = \overline{Q2}$ )

Si nous considérons Q1, Q2, Q3 et Q4 comme des variables logiques, nous obtenons les résultats indiqués dans le tableau (II -1) suivant:

Tableau II.1. Configurations possibles

Séquences	Q1	Q4	Q3	Q2	Tension Vo
Séquence 1	Passant	Bloqué	Bloqué	Passant	$V_o = +V_{dc}$
Séquence 2	Passant	Passant	Bloqué	Bloqué	$V_o = 0$
Séquence 3	Bloqué	Passant	Passant	Bloqué	$V_o = -V_{dc}$
Séquence 4	Bloqué	Bloqué	Passant	Passant	$V_o = 0$

L'objectif de la commande est de générer les ordres de l'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

### II.3. Stratégies de commandes

Il existe plusieurs stratégies de commande des onduleurs. Ces stratégies dépendent des structures et technologies des convertisseurs utilisés.

On présente dans ce qui suit trois stratégies de l'onduleur monophasé à deux bras :

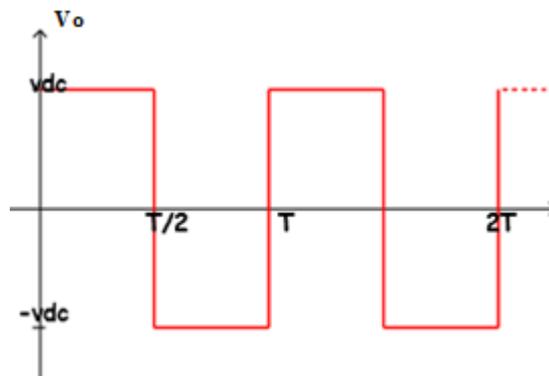
- La commande  $180^\circ-0^\circ$
- La commande  $120^\circ-60^\circ$
- La commande par modulation de largeurs d'impulsions MLI

#### II.3.1 Commande plein onde ( $180^\circ-0^\circ$ ) :

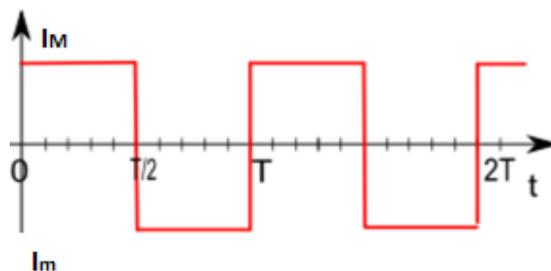
Dans la commande pleine onde, on génère la tension de sortie en faisant commuter les interrupteurs des bras à la fréquence souhaitée.

Dans cette technique, on commande simultanément les interrupteurs (Q1, Q2) et (Q3, Q4) pour obtenir une séquence 1 et 3. La durée de chacune des séquences est  $T/2$ .

La tension de sortie  $V_o$  est une onde d'un seul créneau par alternance. Le courant  $I_o$  pour une charge résistive varie entre  $I_m$  et  $I_M$  comme. Ils sont représentés par les Figures II.2.a et II.2.b.



(a)



(b)

Figure.II.2. (a) Tension de sortie  $V_o(V)$ , (b) Courant de sortie  $I_o(A)$

La valeur efficace de la tension est donnée par :

$$V_{eff} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_0^2(t) dt} \quad (II.1)$$

Un facteur important d'évaluation des performances de l'algorithme de commande est le facteur de distorsion totale des harmoniques (THD), défini par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur du fondamental de la tension [17]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} \quad (II.2)$$

L'analyse des harmoniques de la tension de sortie et du courant de charge est très utile (Fig. II.3). Dans ce cas les spectres harmoniques de la tension et du courant sont analogue. Nous remarquons que la pollution du signal est très forte, cela ne convient que pour des charges peu exigeantes vis à vis de la qualité du courant.

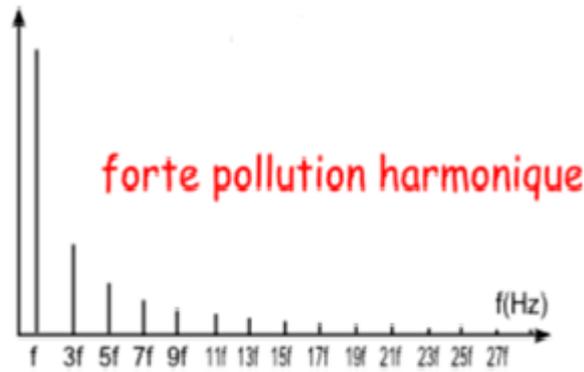


Figure.II.3. Spectre harmonique

Pour un signal carré tel que  $V_0$ , la série de Fourier ne contient que les harmoniques impaires et peut être représenté par :  $V_n$

$$V_0(t) = \sum_n \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin n\omega_0 t \quad (II.3)$$

Avec  $n=1, 3, 5, 7, \dots$

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \quad (II.4)$$

$V_n$ : Amplitude d'harmonique d'ordre  $n$

Le tableau II.2 suivant représente les valeurs de la tension  $V_n$  selon l'ordre d'harmonique  $n$

Tableau II.2. Valeurs de la tension  $V_n$  selon l'ordre d'harmonique  $n$

$n$	$V_n$
1	$4V_{dc}/\pi$
2	0
3	$4V_{dc}/3\pi$
4	0
5	$4V_{dc}/5\pi$
6	0
7	$4V_{dc}/7\pi$

Si la charge est inductive, on observe des charges et des décharges de la bobine (comme pour le hacheur). Les figures suivantes représentent la courbe de courant de sortie avec son spectre.

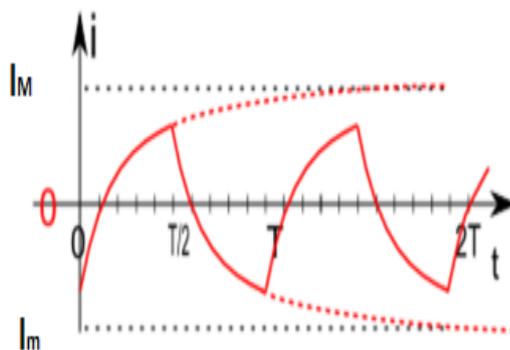


Figure II.4 Courbe de courant de sortie



Figure II.5 Spectre de courant

L'allure de courant  $i$  se rapproche plus d'une sinusoïde qu'avec la charge résistive. La charge RL filtre les harmoniques de hautes fréquences, elle améliore naturellement la qualité du courant.

### II.3.2. Commande décalé ( $120^\circ$ - $60^\circ$ ):

Dans cette commande, la tension de sortie prend en plus des valeurs  $V_{dc}$  et  $-V_{dc}$ , une troisième valeur qui est  $V_o = 0$  (Fig. II.6). La Fig. II.7 illustre le principe de fonctionnement de la commande décalé avec une répartition temporaire sur une période de temps  $T$ .

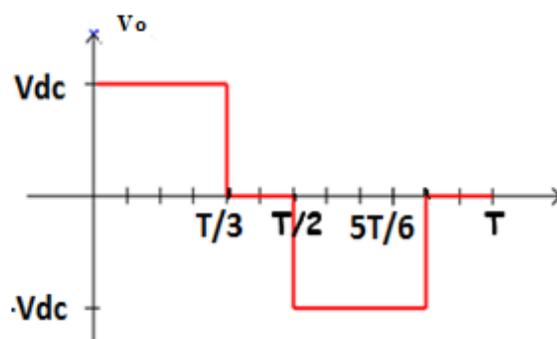


Figure II.6. Tension de sortie  $V_o(V)$

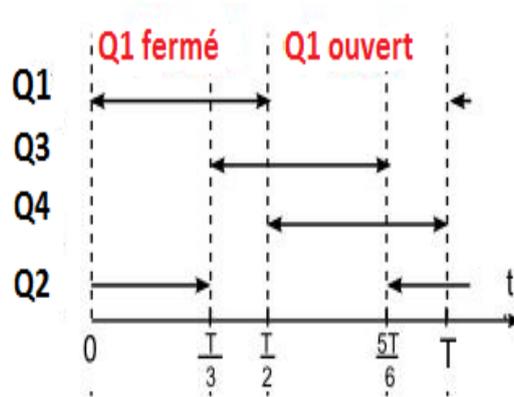


Figure. II.7. Intervalle de fonctionnement des commutateurs

- De 0 à  $T/3$  : Q1 et Q2 sont fermés : Loi des mailles :  $V_o - V_{dc} = 0 \rightarrow V_o = V_{dc}$  .
- De  $T/3$  à  $T/2$  : Q1 et Q3 sont fermés : Loi des mailles :  $V_o = 0$  .
- De  $T/2$  à  $5T/6$  : Q3 et Q4 sont fermés : Loi des mailles :  $V_o + V_{dc} = 0 \rightarrow V_o = -V_{dc}$  .
- De  $5T/6$  à  $T$  : Q2 et Q4 sont fermés : Loi des mailles :  $V_o = 0$  .

La figure II.8 représente un spectre d'harmonique de la tension de charge qui est moins pollué que celui de la tension de sortie dans la stratégie plein onde 180.

Les figures II.9. (a) et (b) représentent le courant de sortie ainsi que son spectre harmonique. Nous remarquons que le spectre harmonique obtenu est meilleur que celui obtenu par la stratégie 180.

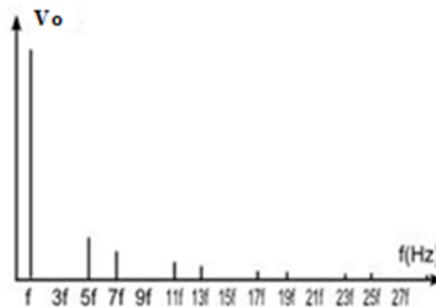


Figure II.8. Spectre harmonique de la tension de sortie  $V_o(V)$

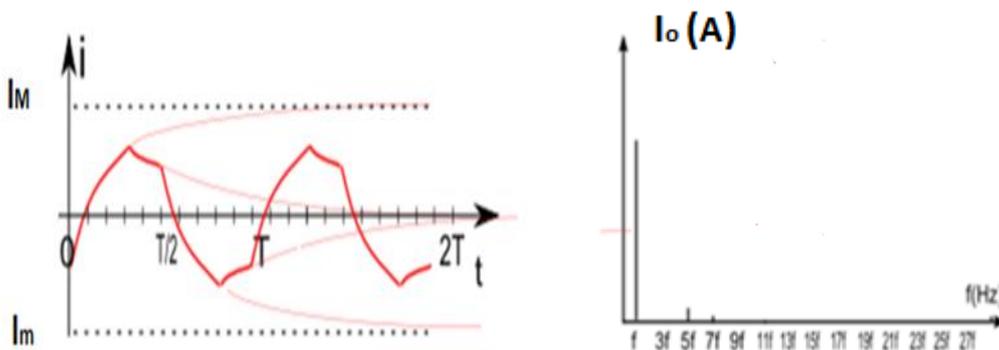


Figure II.9. (a) Courant de charge, (b) spectre harmonique

### II.3.3 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de modulation de largeurs d'impulsions MLI ou Pulse Width Modulation P.W.M (en Anglais) est l'une des techniques utilisées pour obtenir à partir d'une source continue une alimentation variable en tension et en fréquence. Cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé modulatrice d'amplitude  $V_{ref}$  et de fréquence  $f_{ref}$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $V_p$  et de fréquence  $f_p$  très élevée comme montrer par la figure II.10. [17]

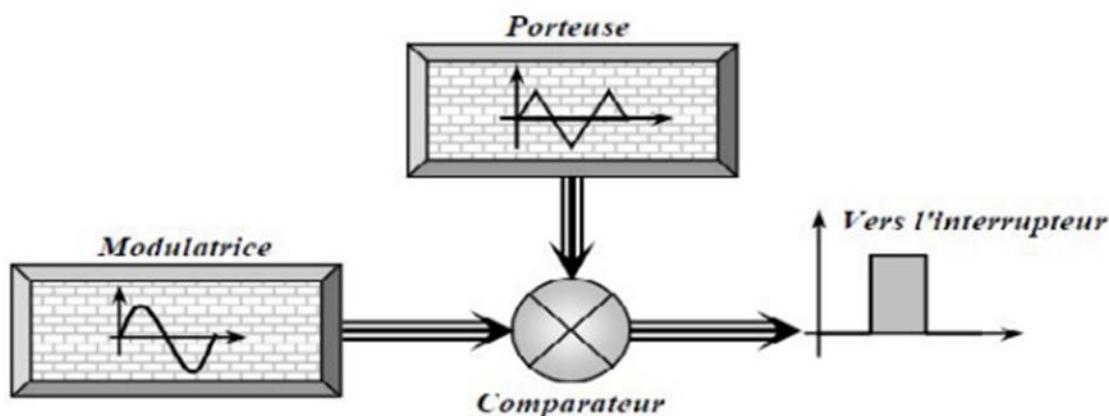


Figure. II.10. Schéma synoptique de la Commande MLI

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_p$  de la porteuse à la fréquence  $f_{ref}$  de la tension de référence

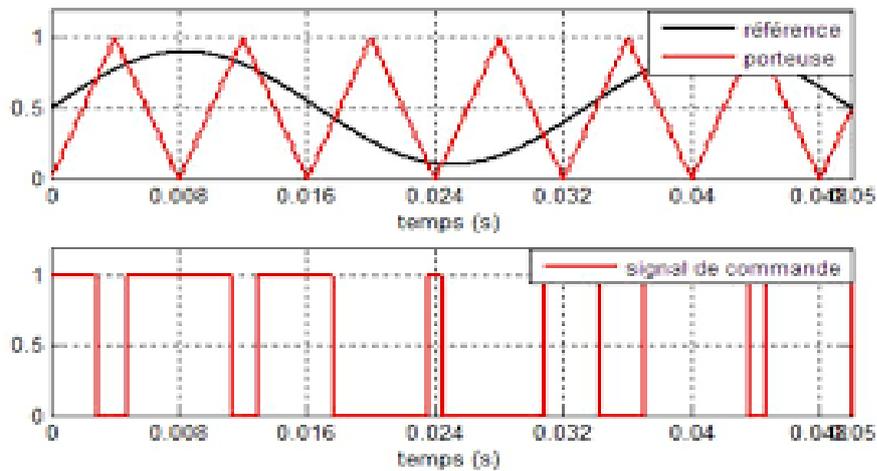
$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (II.5)$$

- Le coefficient de réglage en tension  $r$  est le rapport de l'amplitude  $V_{ref}$  de la tension de référence à l'amplitude  $V_p$  de la porteuse.

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (II.6)$$

Nous obtenons l'ordre de commande de l'interrupteur Q1 par l'application de l'algorithme suivant :

- Si  $V_{ref} > V_p \rightarrow Q1 = 1$ .
- Si  $V_{ref} < V_p \rightarrow Q1 = 0$ .



**Figure .II.11. Signal de commande Q1**

### II.4. Simulation et résultats :

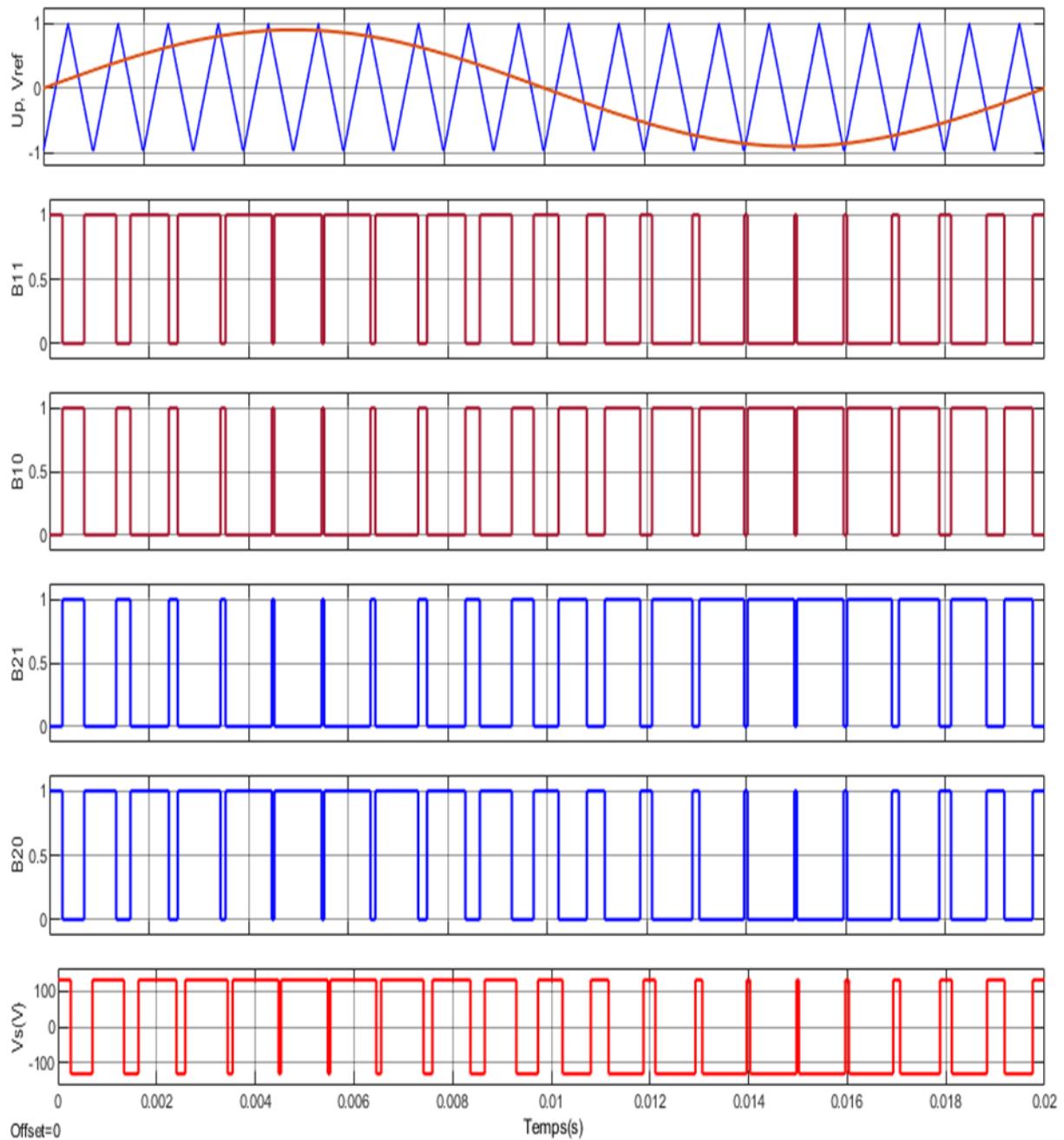
Nous appliquons la commande par modulation de largeurs d'impulsions à notre onduleur monophasé. La simulation est effectuée en utilisant le logiciel Matlab simulink. Les paramètres de la simulation sont :

- $V_p = 1$  et  $f_p = 1000$  Hz
- $V_{ref} = 0.9$  et,  $f_{ref} = 50$  Hz

Donc :

- L'indice de modulation  **$m = 20$**
- Le coefficient de réglage en tension  **$r = 0.9$**

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de la commande de l'onduleur avec les paramètres présentés précédemment. L'ordre de commande B11 de l'interrupteur Q1 est présenté par la figure II.12.b. Le transistor Q2 reçoit le même ordre de commande B20 (Fig.II.12.e). Par contre les interrupteurs Q3 et Q4 reçoivent des ordres de commande inverse que Q1 (Fig. II.12.c et d). La tension de sortie  $V_o$  obtenue est présentée par la figure II.12.f.



**Figure .II.12 L'ensemble des courbes :  $V_p$ ,  $V_{réf}$ , B11, B10, B21, B20 et  $V_o(V)$**

Les figures II.12, II.13, II.14 représentent la tension de sortie de l'onduleur monophasé pour un indice de modulation  $m=20$  pour différentes valeurs du taux de réglage  $r$ . Nous remarquons que le taux de distorsion des harmoniques augmente avec la diminution du taux de réglage  $r$ . Donc dans le but d'avoir une meilleure forme d'onde de la tension de sortie, il est important de travailler avec un taux de réglage qui s'approche de l'amplitude de la porteuse.

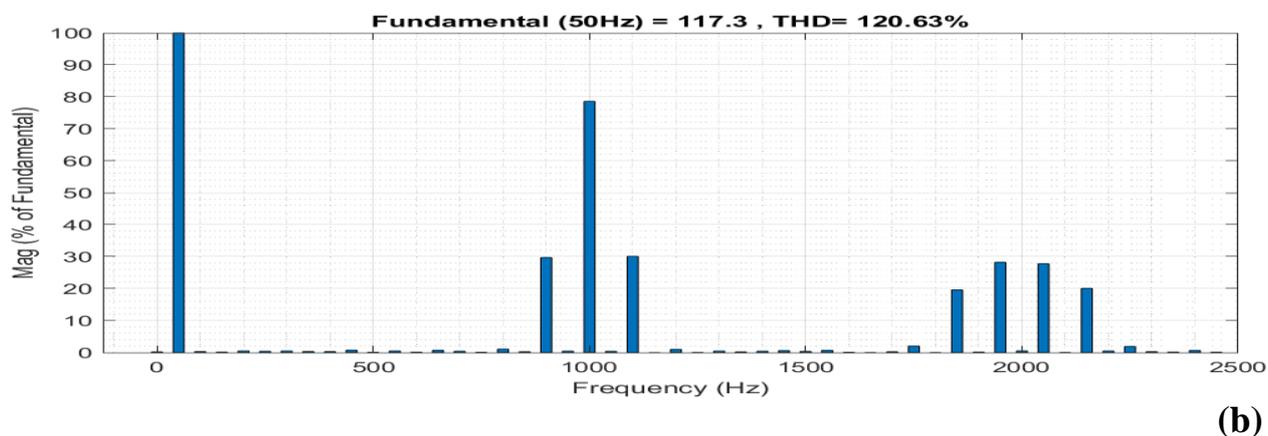
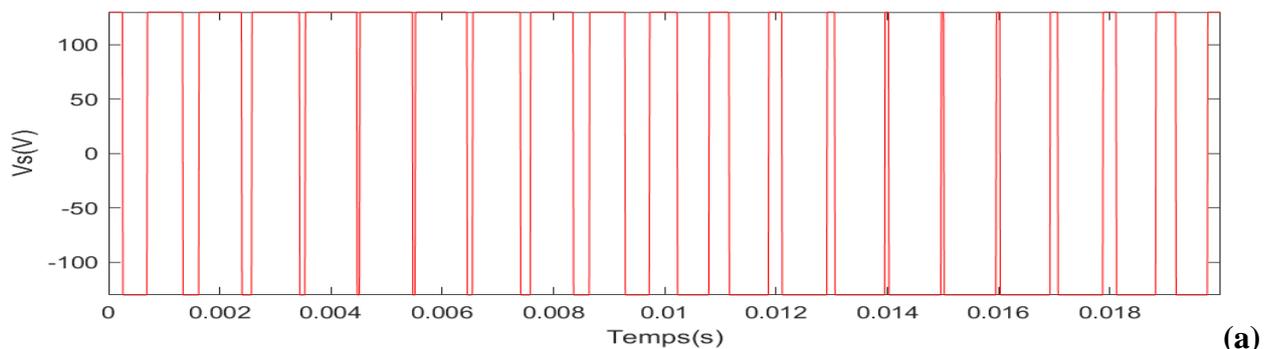


Figure .II.13. (a) Tension de sortie, (b) spectre harmonique pour  $r = 0.9$ ,  $m = 20$

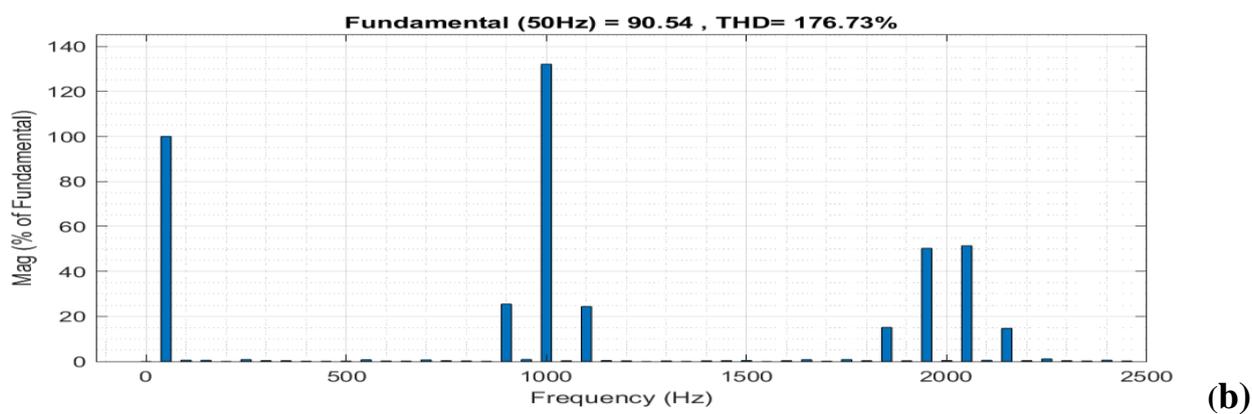
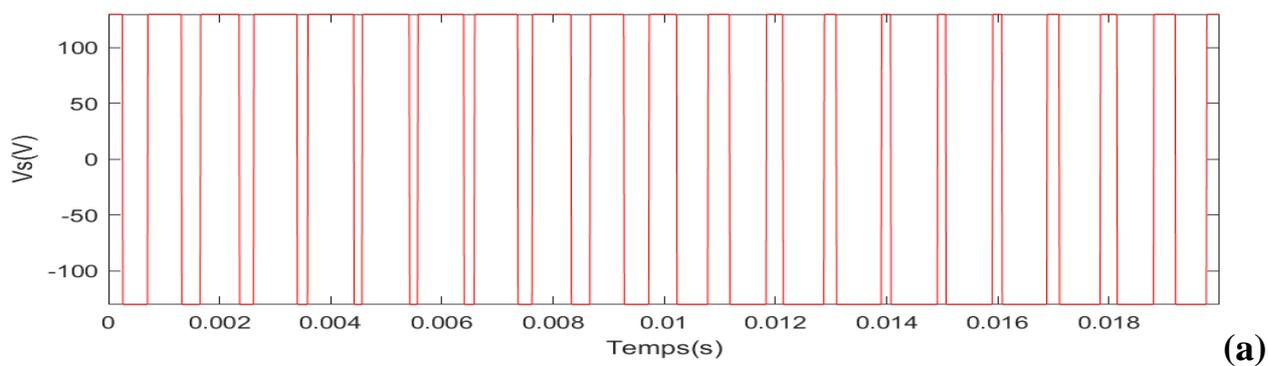
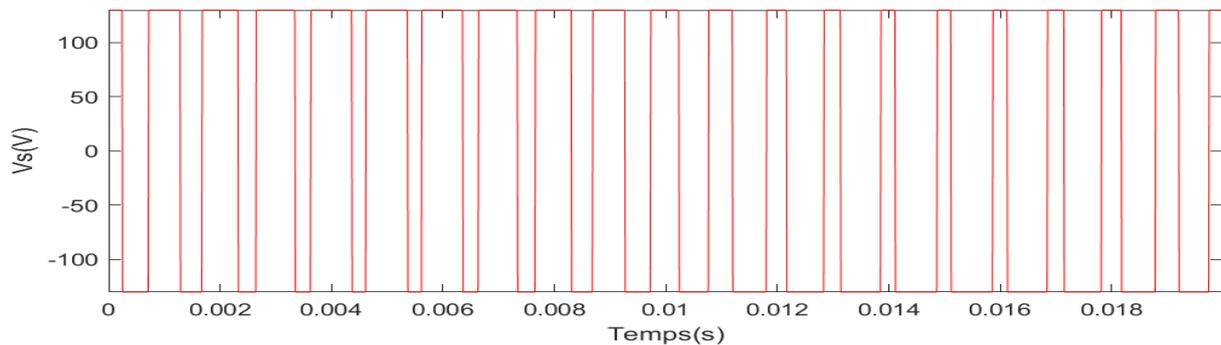
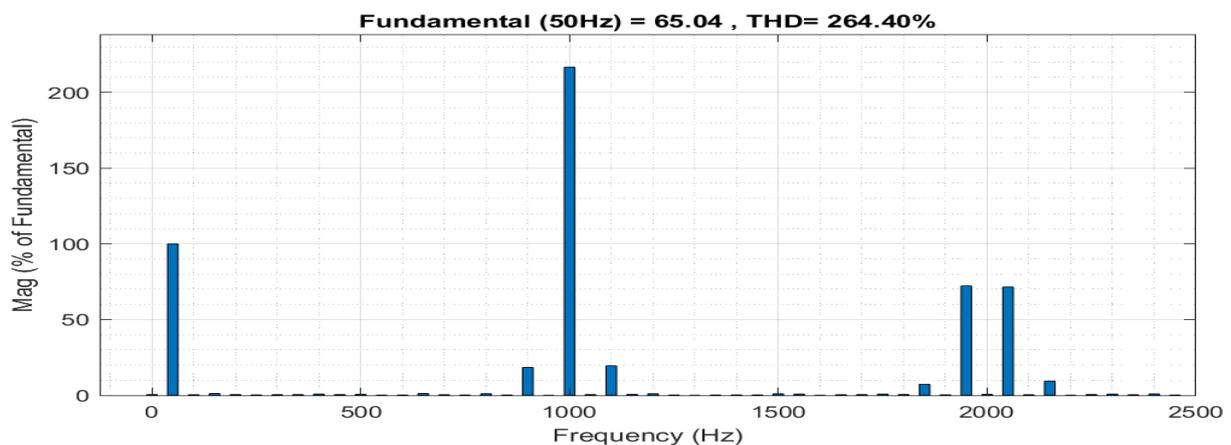


Figure .II.14. (a) Tension de sortie, (b) spectre harmonique pour  $r = 0.7$ ,  $m = 20$



(a)



(b)

**Figure .II.15. (a) Tension de sortie, (b) spectre harmonique pour  $r = 0.5$ ,  $m = 20$**

### II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation puis la simulation de l'onduleur monophasé à deux bras. Nous avons commencé en premier lieu par présenter la structure ainsi que le principe de fonctionnement de notre convertisseur. Par la suite, nous avons montré trois algorithmes de commandes de notre convertisseur. La commande 180, par la suite, la commande 120-60, et enfin la commande MLI. Les résultats de simulation et leurs interprétations ont été présentés à la fin de ce chapitre. La stratégie de MLI a présentée de meilleures performances que les deux autres algorithmes présentés. En plus l'application d'un taux de réglage qui s'approche de l'amplitude de la porteuse permet d'avoir une meilleure forme d'onde de la tension de sortie.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter la réalisation notre convertisseur dans la but de valider nos résultats de simulation.

## **Chapitre III**

### **Réalisation et expérimentation**

### III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la modélisation et les différentes stratégies de commande d'un onduleur monophasé [18,19]. Dans ce chapitre, nous allons procéder à la réalisation de notre convertisseur DC/AC (onduleur) et effectués différents tests.

Nous allons commencer par présenter la carte de commande PCIe6351 qui va nous servir d'interface entre le PC et la partie commande de l'onduleur. Le logiciel Matlab sera utilisé pour la programmation de notre algorithme de commande MLI. Par la suite, nous allons réaliser les parties commande et puissance de l'onduleur. Enfin nous terminons notre chapitre par présenter les résultats expérimentaux de l'onduleur alimenté par une source DC, puis de la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages.

### III.2. Carte d'acquisition PCIe6351

La carte d'acquisition et de commande PCIe6351 (Fig.III.1), est la carte utilisée pour générer le signal de sortie de notre onduleur. Elle est compatible avec le logiciel Matlab. Elle contient 16 entrées analogiques, deux sorties analogiques, 24 entrées/sorties numériques ainsi qu'une sortie MLI.

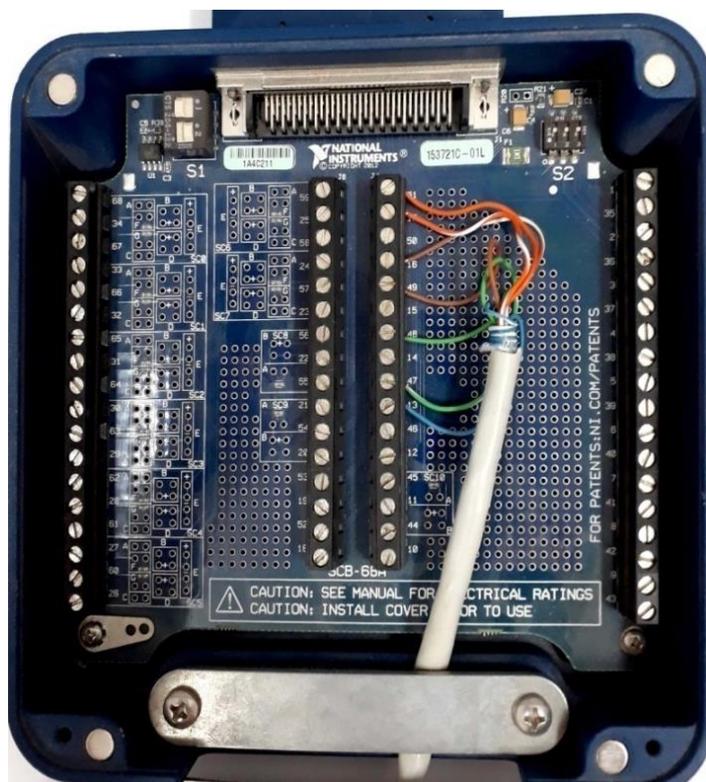


Figure. III.1 Carte PCIe6351

### III.3. Réalisation

#### III.3.1 Partie commande

L'alimentation des différents composants électroniques qui constitue le circuit de commande en tension de +15Vdc, il est nécessaire de réaliser une alimentation stabilisée.

##### III.3.1.1 Alimentation stabilisée

L'alimentation stabilisée est composée d'un transformateur abaisseur, redresseur D25XB80-BHC68, filtrage (condensateurs) et d'un régulateur de tension L7815CV pour alimenter les différents composants électroniques et un autre régulateur L7812CV pour alimenter un ventilateur qui sert à refroidir le circuit de puissance. Le schéma globale de l'alimentation stabilisée est présenté par la figure III.2

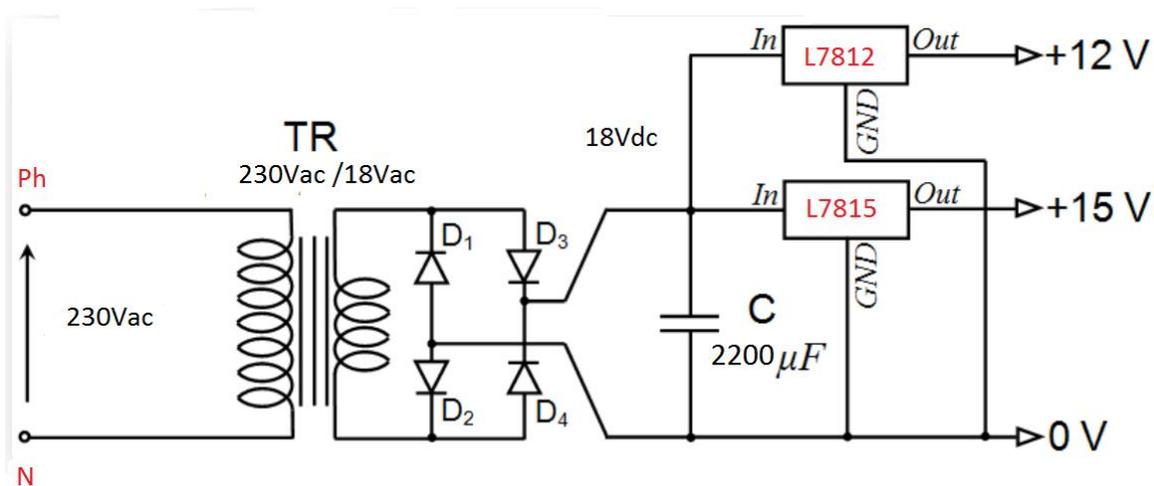


Figure. III.2 Schémas globale de l'alimentation stabilisée.

Cette carte est constitué de:

- Un transformateur abaisseur 230Vac/18Vac, pour le rôle d'abaisser la tension de secteur (230V-50Hz) a une tension désirée (18Vac)

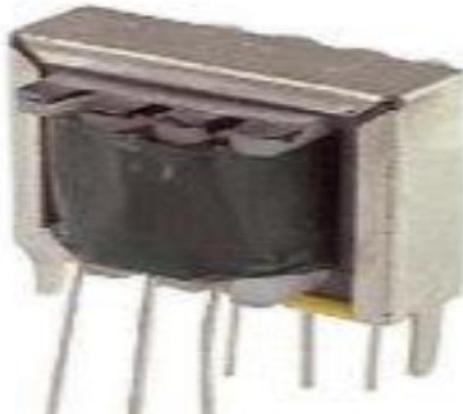
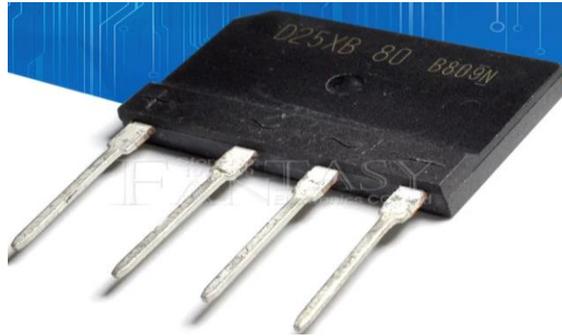


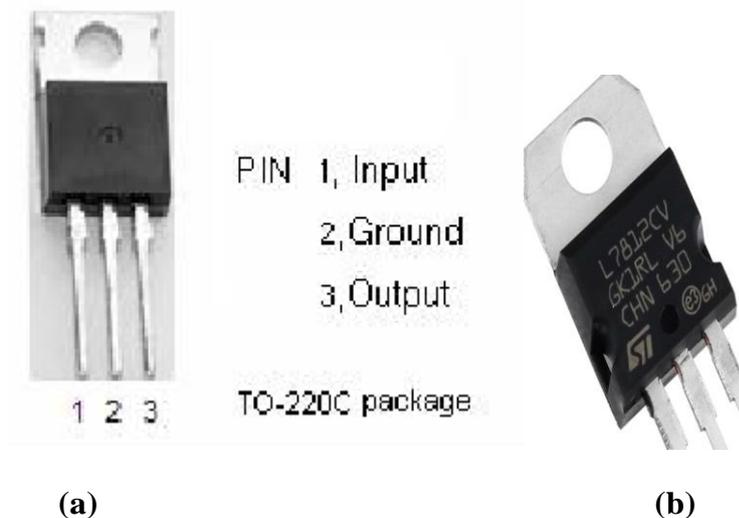
Figure. III.3. Transformateur abaisseur 230Vac/18Vac

- Un redresseur D25XB80 : Convertir la tension sortie transformateur alternatif à une tension redressée. Cette tension passe par un condensateur de 2200  $\mu\text{F}$  monté en parallèle pour assurer le filtrage de la tension et avoir une tension continue stable. Le pont des diodes est intégrée dans un seul circuit dite circuit intégré D25XB80, la figure III.4 présente une photo d'un redresseur



**Figure.III.4. Redresseur D25XB80**

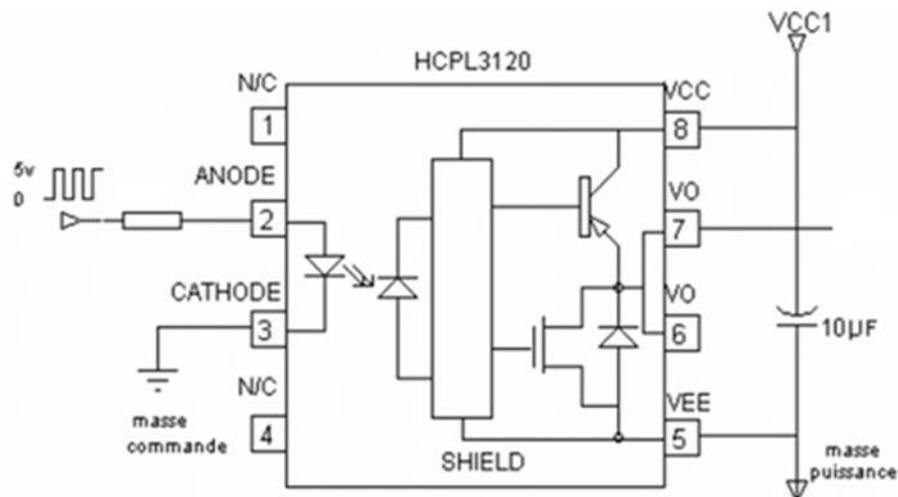
- Un régulateur de tension circuit L7815CVet circuit L7812CV: Un régulateur de tension est un élément qui permet de régler une tension à une valeur fixe désirée (+15V), qui ne fluctue pas. Les figures III.5.a et III.5.b représente les deux régulateurs.



**Figure.III.5 (a) regulateurs L7815CV et (b) regulateur L7812CV.**

### III.3.1.2 Circuit d'isolation (Optocoupleur A3120)

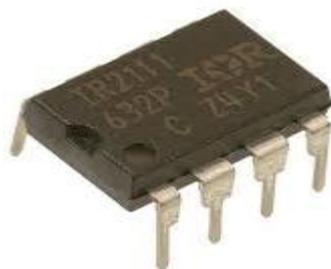
Les impulsions envoyées par la carte d'acquisition traversent la carte d'isolation galvanique à base d'optocoupleur, dont le but de protéger le PC ainsi que la carte PCIe6351. Dans notre cas, on a utilisé l'Optocoupleur Driver A3120 qui a comme tension d'isolation 1500V, sous une tension d'alimentation 15 à 30V et un courant de sortie (peak output courant) qui peut atteindre 2A.



**Figure.III.6** Branchement utilisé de l'Optocoupleur A3120.

### III.3.1.3 Driver IR2111

C'est un circuit intégré qui permet le pilotage en haute fréquence de 2 MOSFET ou de 2 IGBT, sous des tensions pouvant atteindre 600v en garantissant l'isolation électrique de chaque étage. La figure III.7 présente un circuit IR2111.



**Figure.III.7** Circuit IR2111

Suite à la fiche de données (datasheet) de ce circuit, on présente ces caractéristiques, son branchement ainsi que son fonctionnement (fig.III.8. (a), (b)).

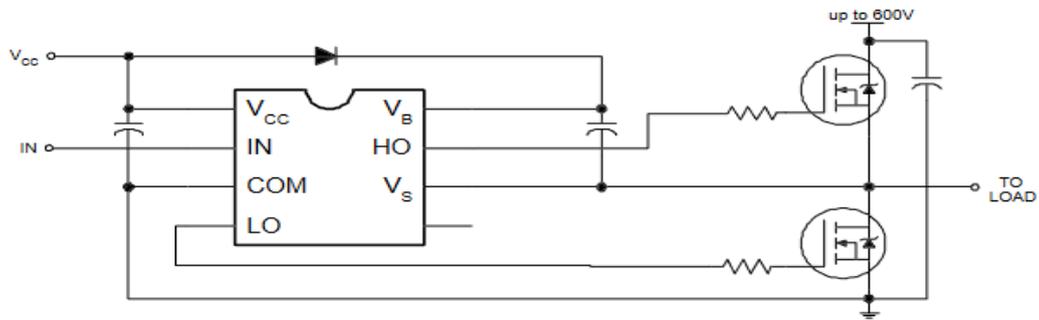
**$V_{\text{OFFSET}} = 600\text{V max}$**

**$I_{\text{O}} = 200 \text{ mA} / 420 \text{ mA}$**

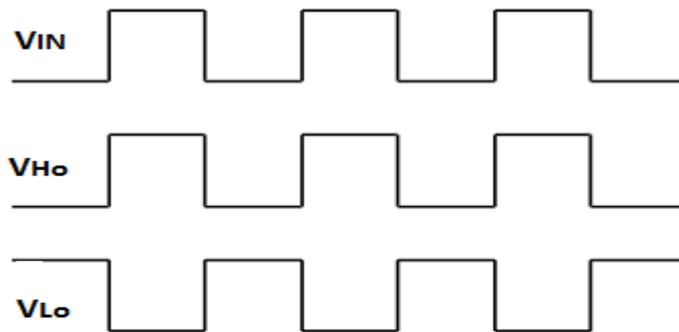
**$V_{\text{OUT}} = 10 - 20\text{V}$**

**$t_{\text{on/off}} = 750 \text{ \& } 150 \text{ ns}$**

**Deadtime= 650 ns**



(a)



(b)

Figure.III.8. (a) le branchement, (b) diagramme de temps.

### III.3.1.4. Circuit inverseur CD4069 :

Le CD4069 se compose de six circuits inverseurs. La figure III.9 présente le brochage interne de ces pins.

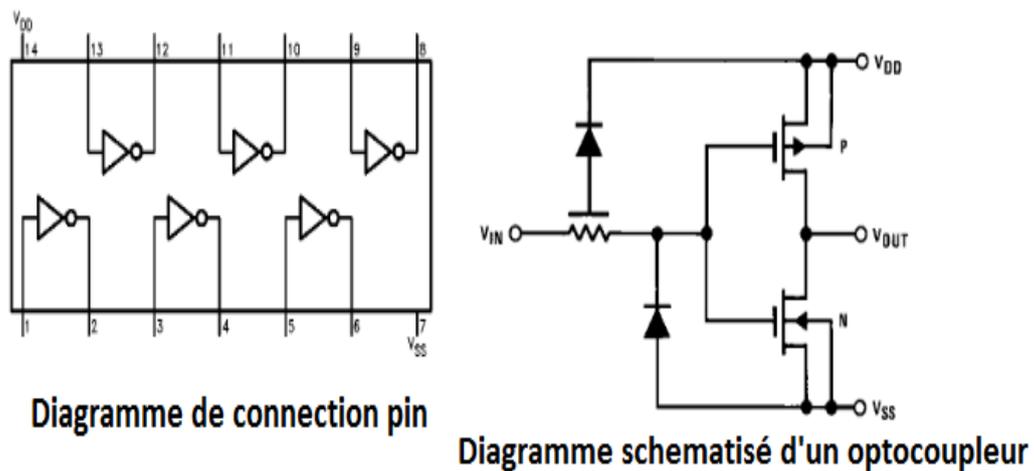


Figure.III.9. CD4069

### III.3.1.5 Carte de commande

La figure III.10 ci-dessous présente la carte d'adaptation de la commande réalisée. Elle est composé de:

- 1 Transformateur
- 2 Ventilateur.
- 3 Redresseur D25XB80
- 4 Condensateur :2200 $\mu$ F
- 5 Régulateur L7815CV
- 6 Condensateur 10 $\mu$ F
- 7 RegulateurL7812CV
- 8 Optocoupleur HCPL3120
- 9 Inverseur CD4069
- 10 Drivers : IR2111
- 11 Condensateurs 100 $\mu$ F
- 12 Diodes
- 13 Résistance 150  $\Omega$
- 14 Résistance 100 $\Omega$ .
- 15 Resistance 82 $\Omega$
- 16 Resistance 47 $\Omega$
- 17 Nappe de connexion
- 18 Entres commande MLI.
- 19 Sortie +12Vdc

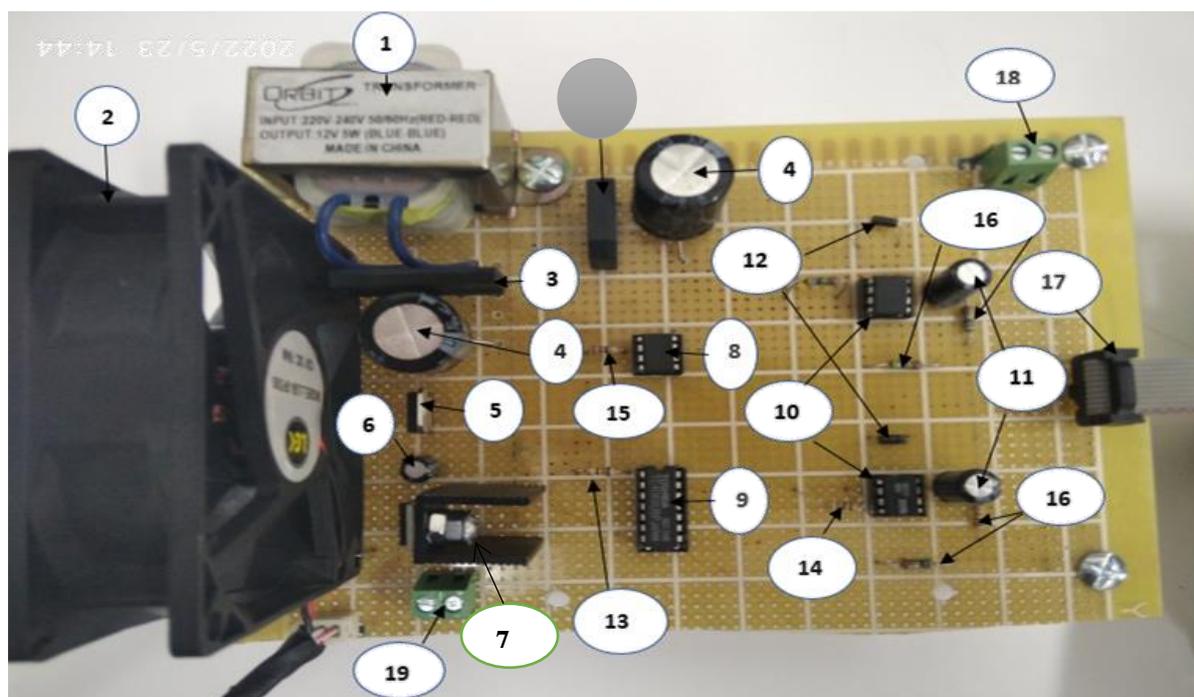


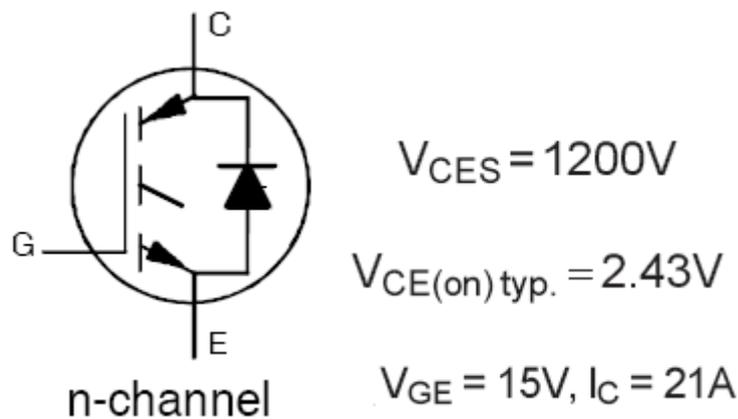
Figure.III.10. Carte d'adaptation de la commande

### III.3.2 Partie puissance

La partie puissance est constituée de quatre transistors IGBT. Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT, de l'anglais Insulated Gate Bipolar Transistor) est un dispositif semi-conducteur de la famille des transistors qui est utilisé comme interrupteur électronique, principalement dans les montages de l'électronique de puissance.

Ce composant, qui combine les avantages des technologies précédentes, c'est-à-dire la grande simplicité de commande du transistor à effet de champ par rapport au transistor bipolaire, tout en conservant les faibles pertes par conduction de ce dernier, a permis de nombreux progrès dans les applications de l'électronique de puissance, aussi bien en ce qui concerne la fiabilité que sur l'aspect économique.

Dans notre réalisation de cette partie de puissance, nous utilisons un IGBT de référence IRG4PH40UD2-E (Fig.III.11).



**Figure.III.11. IGBT IRG4PH40UD2-E**

La figure III.12 présente la photo de la partie puissance réalisée.

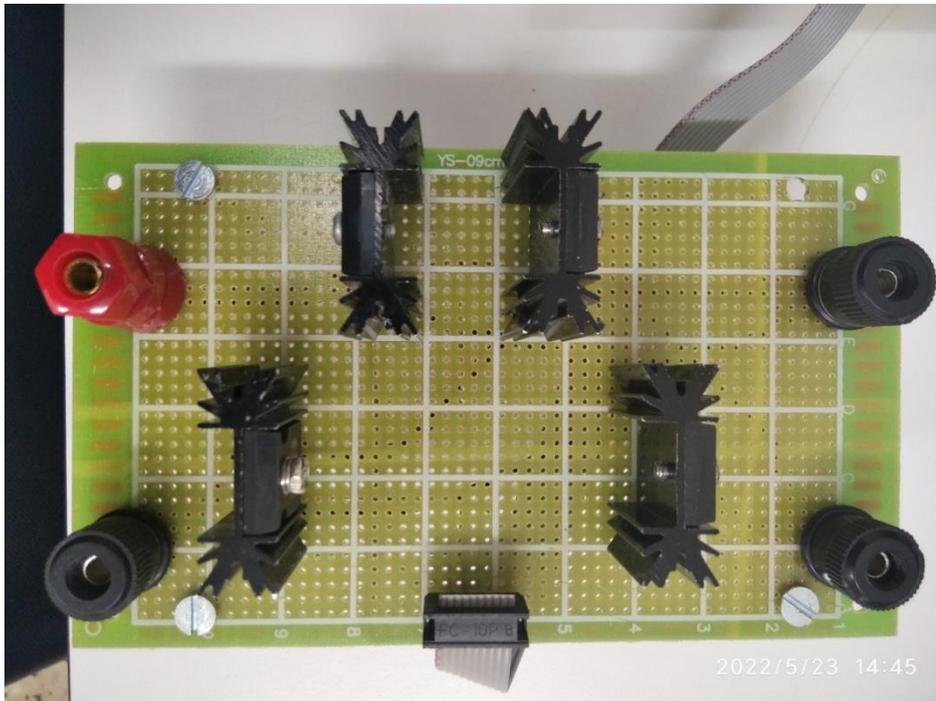


Figure III.12. Photo de la partie puissance réalisée

### III.3.3. Structure de l'onduleur

La figure III.13 présente la photo du l'onduleur réalisé.

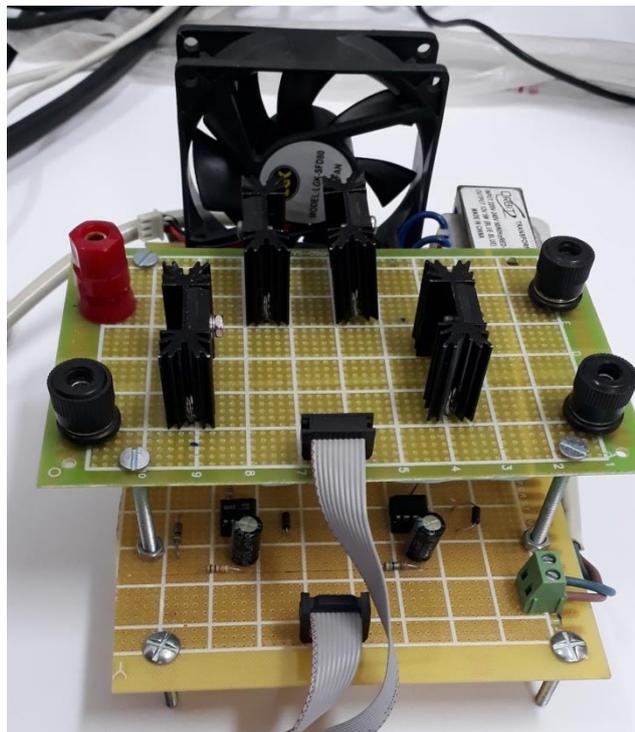


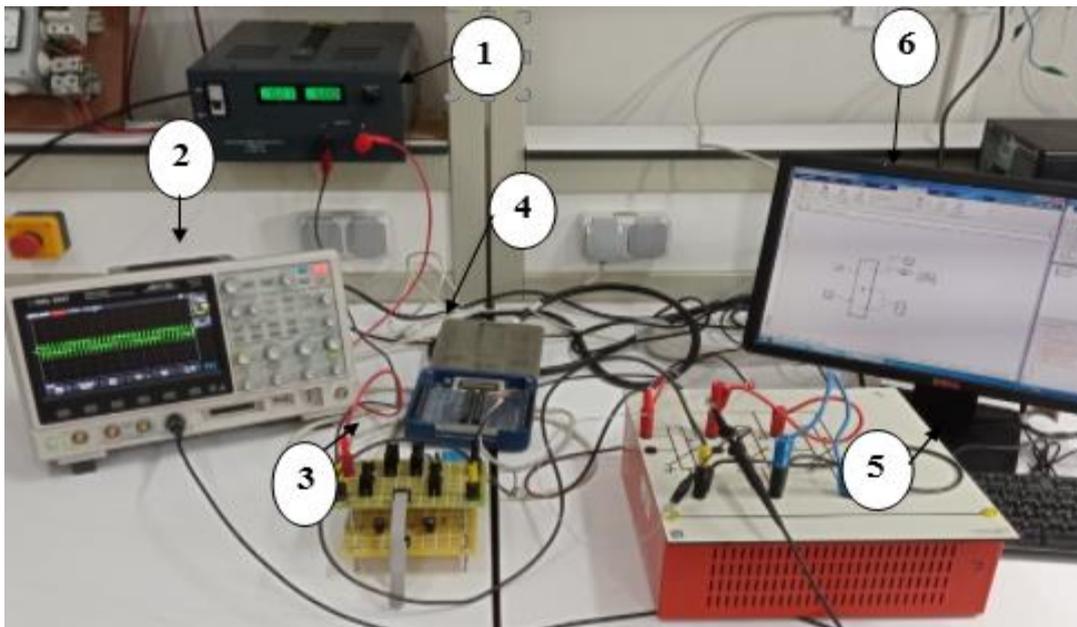
Figure III.13. Structure de l'onduleur

### III.4. Résultats expérimentaux

#### III.4.1. Test 1: Test de l'onduleur

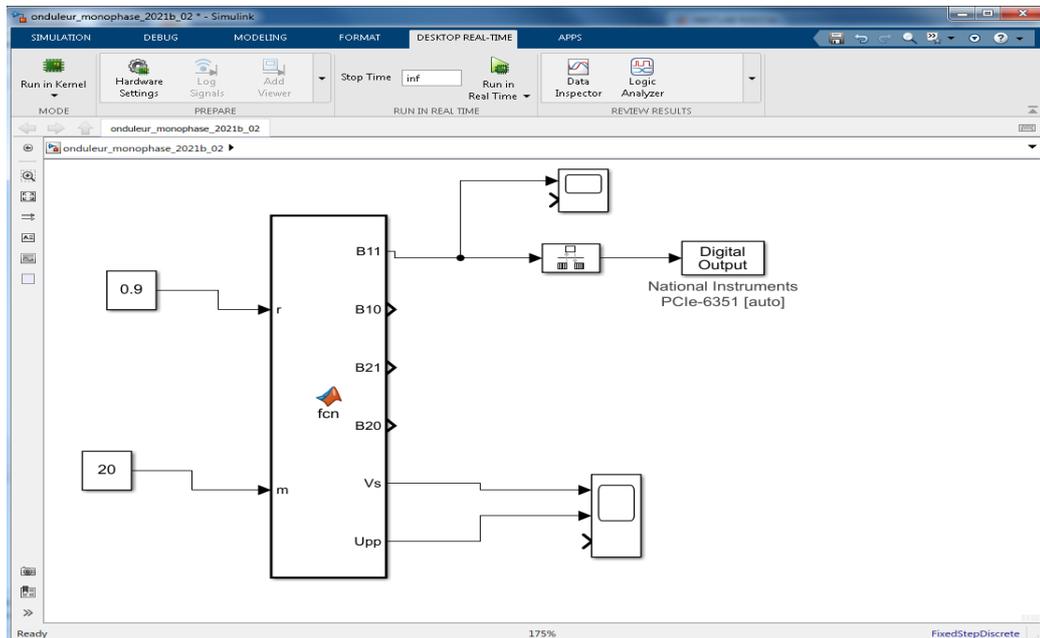
Le premier essai expérimental concerne le test de bon fonctionnement de l'onduleur. Il est présenté par la figure III.14. Ce test est composé de:

N	Désignation
1	Source d'une tension continue.
2	Oscilloscope
3	Onduleur monophasé
4	Carte d'acquisition et de commande PCIe6351
5	Charge résistive
6	PC



**Figure III.14. Banc expérimental de teste de l'onduleur**

L'algorithme de commande programmé sous Matlab simulink (Figure III.15) transmet le signal de commande par l'intermédiaire de la carte PCIe6351. La carte de commande réalisée qui reçoit un seul signal MLI, transmet à la partie puissance quatre signaux aux gâchettes des transistors IGBT.



**Figure III.15. Algorithme de commande**

La figure III.16 présente la tension de sortie de l'onduleur commandé par MLI. Il est à signaler que la sonde de l'oscilloscope divise par dix la valeur réel de la tension.



**Figure III.16. Tension de sortie de l'onduleur ( $V_s/10$ )**

### III.4.2. Test 2: Test de l'onduleur solaire

Ce deuxième test concerne l'expérimentation de l'onduleur solaire. Dans ce cas notre onduleur monophasé réalisé est alimenté par un module photovoltaïque associé à un convertisseur boost. Ce banc expérimental de teste de l'onduleur solaire est présenté par la figure III.17. Il est composé de :

- 1 Tension d'arrivée panneaux solaire
- 2 Capteur tension et courant
- 3 Convertisseur Boost DC/DC
- 4 Carte commande convertisseur
- 5 Carte arduino
- 6 Voltmètre (tension de PV)
- 7 Ampèremètre (courant de PV)
- 8 Ampèremètre (courant de sortie convertisseur DC/DC PV)
- 9 Voltmètre (tension de sortie convertisseur DC/DC)
- 10 Onduleur monophasé
- 11 Carte PCIe6351
- 12 Charge résistive
- 13 PC
- 14 Oscilloscope

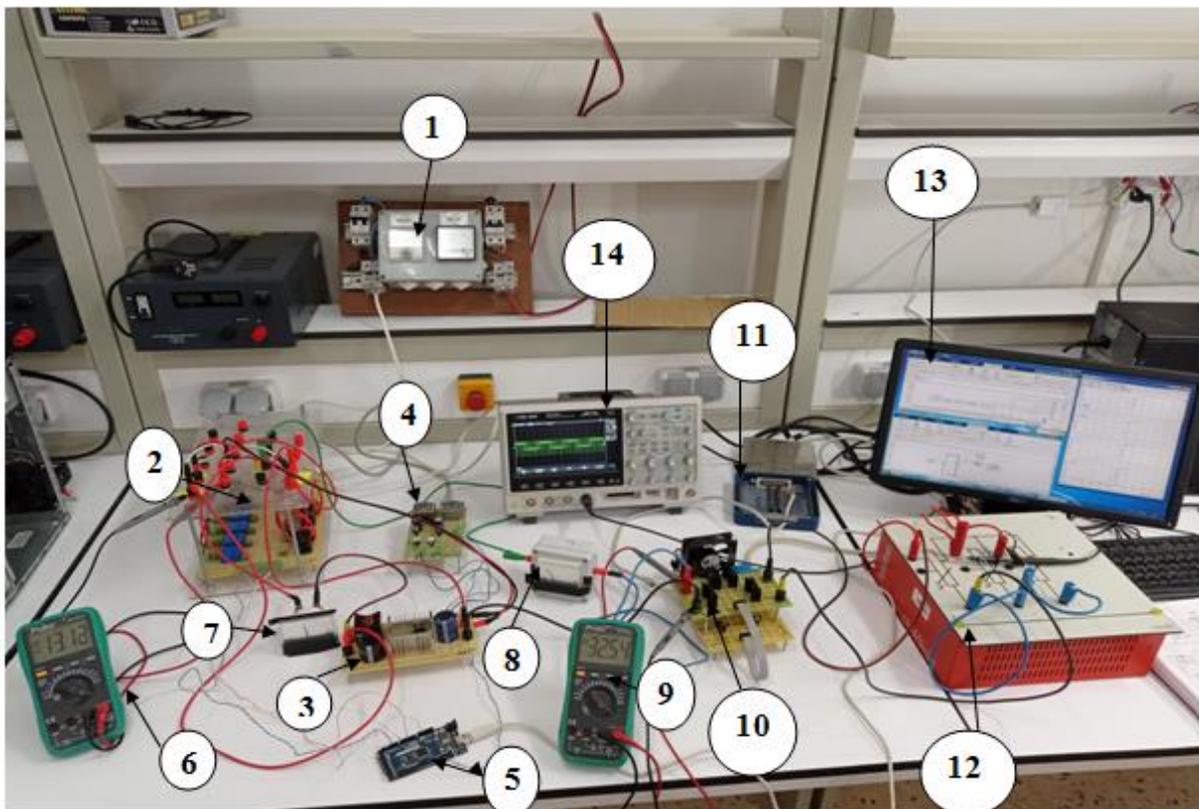
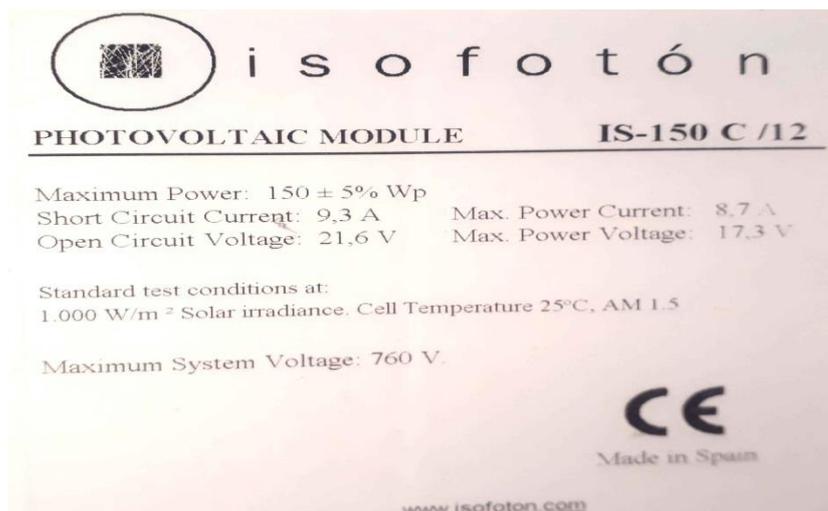


Figure III.17. Banc expérimental de teste de l'onduleur solaire

Les caractéristiques ainsi que la photo du module photovoltaïque utilise sont présentés par les figures ci-dessous.



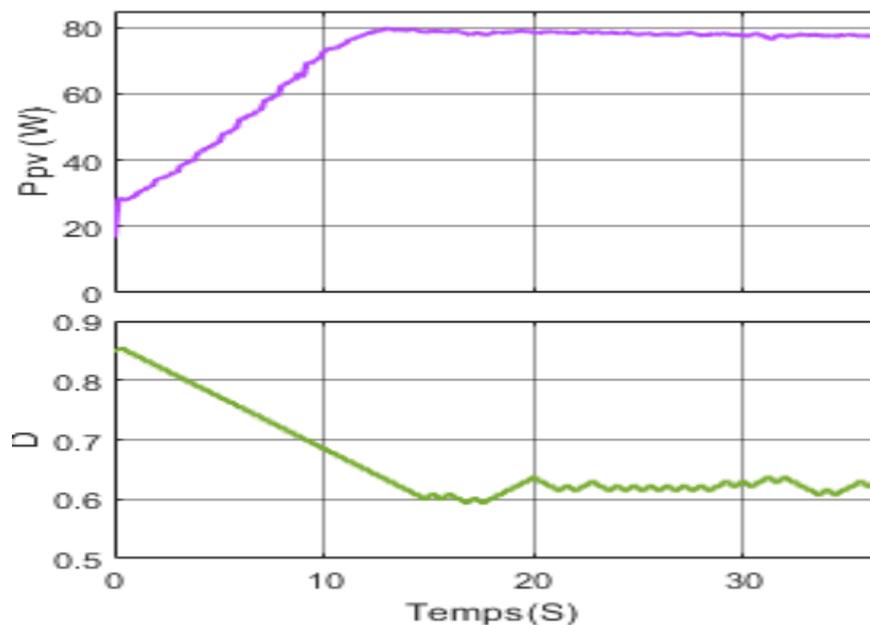
**Figure III.18. Plaque signalétique du module photovoltaïque Iso foton**



**Figure III.19 : Photo du module photovoltaïque Iso foton**

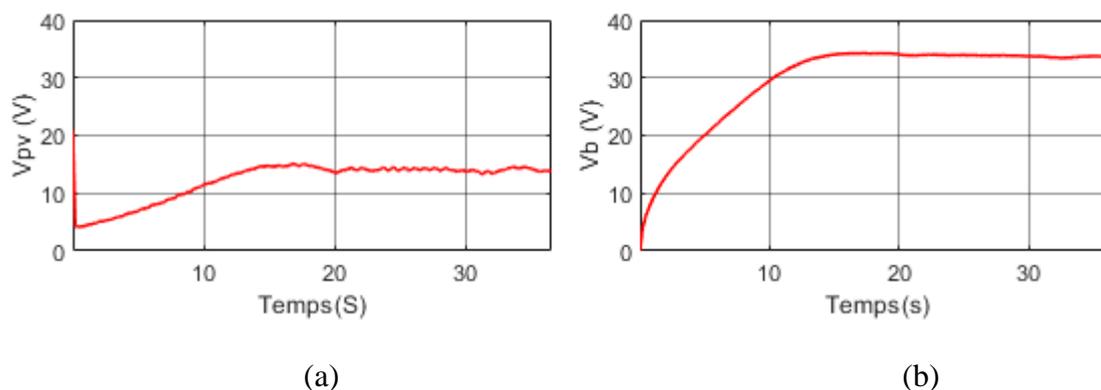
La figure III.20 présente la puissance du module photovoltaïque  $P_{PV}$  ainsi que le rapport cyclique  $D$ . Au début de l'essai expérimental, le rapport cyclique est initialisé à une valeur  $\alpha_0=0.85$ . Cette valeur permet d'obtenir une puissance du module PV autour de 30W. La valeur de cette dernière n'est pas la puissance maximale que peut générer le module PV, par conséquent

l'algorithme MPPT [20], vari le rapport cyclique de telle manière à augmenter la puissance de sortie du module jusqu'à son maximum. La puissance maximale a été atteinte (environ 80W) est atteinte après 13 secondes. Après cet instant, la commande du convertisseur boost maintien la puissance maximale obtenue jusqu'à la fin du test expérimental.

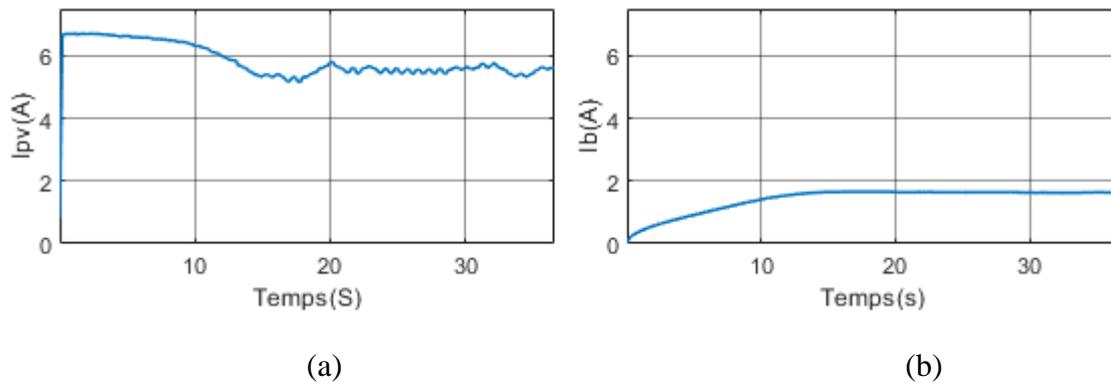


**Figure III.20. (a) Puissance du module PV  $P_{pv}$ (W), (b) Rapport cyclique  $D$ .**

Les tensions et courants du module photovoltaïque ( $V_{pv}$ ,  $I_{pv}$ ) et de sortie ( $V_b$ ,  $I_b$ ) sont représentées par les figures III.21 et III.22. La tension de sortie obtenue est supérieur à celle d'entrée, donc un bon fonctionnement du convertisseur boost.

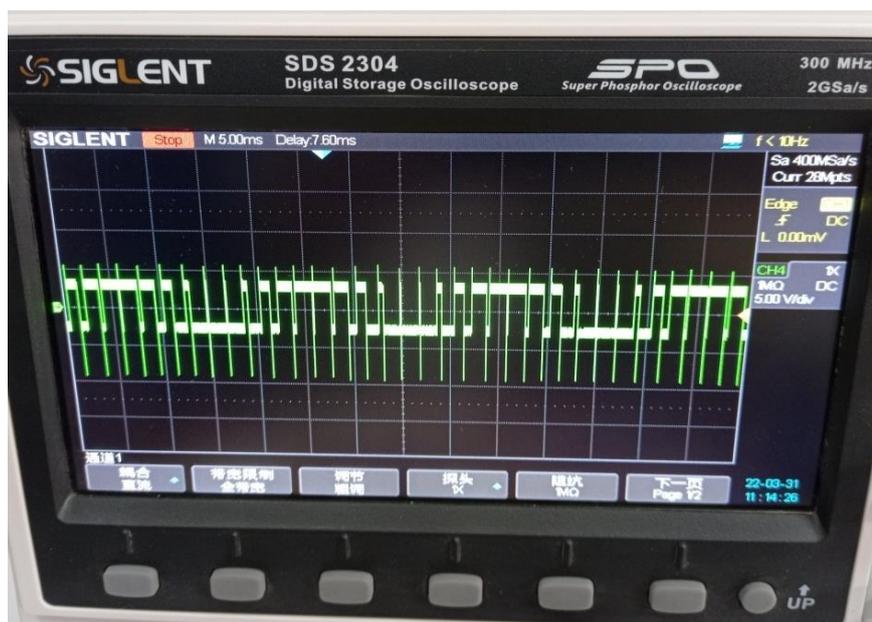


**Figure III.21. (a) Tensions du module PV  $V_{pv}$ (V), (b) tension de sortie  $V_b$ (V).**



**Figure III.22. (a) Courant du module PV  $I_{pv}$ (A), (b) Courant de sortie  $I_b$ (A).**

La figure III.23 présente la tension de sortie de l'onduleur commandé par MLI. Il est à signaler que la sonde de l'oscilloscope divise par dix la valeur réel de la tension.



**Figure III.23. Tension de sortie de l'onduleur (Vs/10)**

### III.5. Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à la réalisation pratique et les tests expérimentaux. Dans cette partie, la carte de commande; qui associé à la carte PCIE6351; constitue la partie commande ainsi que la partie puissance de l'onduleur monophasé ont été réalisés. L'algorithme MLI présenté dans le chapitre précédent a été implémenté sur le premier banc expérimental réalisé. Par la suite, le test de la chaîne de conversion photovoltaïque (onduleur solaire) a été effectué. Les résultats obtenus montrent un bon fonctionnement de l'onduleur monophasé dans le premier test. Dans le second test, l'algorithme MPPT a permis l'extraction de la puissance maximale du module photovoltaïque. Cette puissance est transmise à la charge par l'intermédiaire de l'onduleur commandé par MLI. La tension de sortie de l'onduleur est semblable à celle obtenue par simulation.

### III.6 Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque par l'utilisation d'une chaîne de conversion solaire à deux étages. L'objectif de ce mémoire a été de réaliser le deuxième étage de cette cascade de conversion qui est l'onduleur monophasé. Pour réaliser ce travail, nous avons divisé notre mémoire en trois parties.

Dans la première partie, nous avons présenté en premier lieu des généralités sur les systèmes photovoltaïques ainsi la carte qui montre le potentiel solaire en Algérie. Par la suite, nous avons présenté les différents types d'onduleurs solaires. Ces derniers sont utilisés dans les applications autonomes, interconnectés au réseau de distribution ainsi que pour le pompage solaire. Cette partie est terminée par la présentation de quelques topologies d'onduleurs solaires, à un ou à plusieurs étages de conversion, fabriqués par différents constructeurs.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté la modélisation puis la simulation de l'onduleur monophasé à deux bras. Nous avons commencé en premier lieu par présenter la structure ainsi que le principe de fonctionnement de notre convertisseur. Par la suite, nous avons montré trois algorithmes de commandes de notre convertisseur. La commande 180°, par la suite, la commande 120-60°, et enfin la commande par MLI. Les résultats de simulation et leurs interprétations ont été présentés à la fin de cette partie.

La stratégie de MLI a présenté de meilleures performances que les deux autres algorithmes présentés. En plus l'application d'un taux de réglage qui s'approche de l'amplitude de la porteuse permet d'avoir une meilleure forme d'onde de la tension de sortie.

La dernière partie a été consacrée à la réalisation pratique et les tests expérimentaux. Dans cette partie, la carte de commande, qui est associée à la carte PCIe6351, constitue la partie commande ainsi que la partie puissance de l'onduleur monophasé ont été réalisés. L'algorithme MLI présenté dans le deuxième chapitre a été implémenté sur le premier banc expérimental réalisé. Par la suite, le test de la chaîne de conversion photovoltaïque (onduleur solaire) a été effectué. Les résultats obtenus montrent un bon fonctionnement de l'onduleur monophasé dans le premier test. Dans le second test, l'algorithme MPPT a permis l'extraction de la puissance maximale du module photovoltaïque. Cette puissance est transmise à la charge par l'intermédiaire de l'onduleur commandé par MLI. La tension de sortie de l'onduleur est semblable à celle obtenue par simulation.

Comme perspective, nous proposons d'améliorer la forme d'onde de la tension de sortie par l'introduction de filtre à la sortie de l'onduleur.

## **Références**

- [1] A. Lobouret, M. Viloz, «Energie solaire photovoltaïque», Edition Dunod, 2006.
- [2] B. Flèche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [3] Khadraoui Fahima, "La place de l'Algérie sur le marché euro-méditerranéen de l'électricité: Bilan et perspectives", mémoire de magistère en économie de l'énergie, Université de Boumerdes, 2014
- [4] Patricia Jezequel, Alain de Pommereau, Energies renouvelables en méditerranée, IPEMED, Mars 2010
- [5] Mohamed Rédha Yaiche, Abdellah Bouhanik, "Atlas Solaire Algérien", Centre de Développement des Energies Renouvelables, EISSN/ISSN 1112-3850, 2002.
- [6] BAHAZ Safa, AL SID CHIKHK Zoubir , " Détermination du trouble atmosphérique de Linke à partir des mesures expérimentales d'éclairement solaire", Mémoire de master en Energies Renouvelables, Université de Ghardaïa,2020
- [7] F. Yettou et al, 'Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie', Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346
- [8] M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [9] Chabanizeyeb, "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030", Mémoire de magister; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2014.
- [10] Bouchrit W," Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV connectés au réseau", mémoire de magistère, Universte de Biskra, 2013.
- [11] Violaine Didier «Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » rapport de HESPUL,2007.
- [12] MECHOUMA RABIAA. Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques : Application pour les charges commerciales. Thèse de doctorat d'université hadj Lakhdar –Batna. Mars 2015.
- [13] MECHALIKH M.Nadjib,HAMADACHaraf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » mémoire de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.
- [14] Sofiane fellouah, sihammesbahi, " Etude d'un système photovoltaïque connecté auréseau", Mémoire de master en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de

- Tizi-ouzou, 2015.
- [15] M. Messoude, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergiephotovoltaïque application au pompage », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.
- [16] Saou Souhila," Etude et réalisation d'un onduleur solaire sinusoïdal", mémoire de Master Génie Électrique , Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi , 2016.
- [17] Abdelkrim Thameur," Etude et Implémentation de Différents Algorithmes Numériques de Modulation de Largeur d'Impulsions d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux", mémoire magister, systèmes électrotechnique, Université de Boumerdes, 2004.
- [18] MOUSSOUNI Nasser Eddine, OUADFEL Sofiane, "Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé", Mémoire de master en électrotechnique, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA,2017.
- [19] M. Adouane, M. Haddadi, A. Malek et M. Hadjiat, « Etude et Conception d'un Onduleur Monophasé Autonome géré par Microcontrôleur PIC 16F876A, Revue des Energies Renouvelable, Vol 12 no 4, 543 – 550, 2009.
- [20] M. BOUKLI-HACENE Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique. Mémoire de magister. Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, 2011.