



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

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

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

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : électrotechnique

Spécialité : énergie renouvelable en électrotechnique

Thème

Conception d'une chaîne de conversion photovoltaïque
monophasé à base de convertisseur multiniveaux

Présenté par :

KERCHA Djamila

LAHOUADJI Oum kalthoum

Soutenue publiquement le : 14/06/2023

Devant le jury composé de:

FERKOUS Khaled	Maitre de conférence B	Univ. Ghardaïa	Président
BAHRI Ahmed	Maitre de conférence B	Univ. Ghardaïa	Examineur
MESBAH Abdelkrim	Maitre de conférence B	Univ. Ghardaïa	Examineur
ABDELKRIM Thameur	Directeur de recherche	URAER Ghardaïa	Encadreur
BENAMRANE Karima	Maitre de recherche B	URAER Ghardaïa	Co- Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remercimment

Nous tenons au début de ce mémoire à remercier ALLAH de nous avoir donnée la force de réaliser ce modeste travail

Nos sincères remerciements à notre Encadreur et Co-encadreur : Dr. ABDELKRIM Thameur et Dr. BENAMRANE Karima de nous avoir guidé et encouragé durant ce travail, pour la confiance qu'ils nous ont témoignée et d'avoir mis à notre disposition tous ses savoir-faire et ses qualités intellectuelles, professionnelles et humaines.

Nous tenons à remercier également les enseignants de l' Université de Ghardaïa.

Nous n' oublions pas dans nos remerciements tous les membres des personelles de l' unité de recherche appliqué en énergie renouvelable (URAER) Ghardaïa.

Un grand merci à nos familles et à tous nos amis (es) qui nous a soutenues, aidé et encouragé tout le long de notre parcours. Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici nos sincères reconnaissances.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est la simulation et l'expérimentation d'une chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages composée par un convertisseur boost suivi d'un onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC. Le convertisseur DC/DC est commandé par l'algorithme MPPT P&O. Concernant l'onduleur multi-niveaux à deux bras, la stratégie de modulation de largeur d'impulsion MLI sinus triangle est appliquée. L'implémentation des deux algorithmes de commande est effectuée en utilisant le logiciel Matlab associé aux cartes de commande ArduinoMega et PCIE6351. Ces cartes nous délivrent les signaux de commande, qui sont par la suite amplifiés pour les adaptés aux gâchettes des transistors.

Mots clés : – Panneaux solaire - Onduleur monophasé à trois niveaux – Commande MLI – Convertisseur DC/DC – Commande MPPT

Abstract

The objective of this work is the simulation and experimentation of a two-stage photovoltaic conversion cascade composed of a boost converter followed by a single-phase NPC three-level inverter. The DC/DC converter is controlled by the MPPT P&O algorithm. About the two-leg of the multi-level inverter, the sine-triangle PWM pulse width modulation strategy is applied. The implementation of the two control algorithms is carried out using the Matlab software associated with the Arduino Mega and PCIE6351 control boards. These cards deliver the control signals, which are then amplified for the transistors gates.

Keywords: – Solar panel- Single-phase three levels inverter – PWM control – DC/DC converter- MPPT control

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو محاكاة وتجريب سلسلة تحويل كهروضوئية تتكون من محول boost متبوعاً بعاكس أحادي الطور ثلاثي المستويات بهيكل NPC. يتم التحكم في محول DC / DC بواسطة خوارزمية MPPT&O. فيما يتعلق بالعاكس متعدد المستويات بذراعين، يتم تطبيق إستراتيجية التحكم في عرض النبضة PWM و الجيب المثلي. يتم تنفيذ خوارزميات التحكم باستخدام برنامج Matlab المرتبط ببطاقات التحكم ArduinoMega و PCIE6351. تقوم هذه البطاقات بتوصيل إشارات التحكم، والتي يتم تضخيمها بعد للترانسستور.

الكلمات المفتاحية: - عاكس أحادي الطور – تحكم MLI - طاقة كهروضوئية- الواح شمسية- التحكم عن طريق

MPPT-محول DC/DC

Table des matières

Remercimment.....	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des symboles.....	x
Liste des abréviations	xii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les onduleurs multi-niveaux	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de l'onduleur.....	3
I.3 Classification d'un onduleur.....	4
I.3.1 Onduleur autonome	4
I.3.2 Onduleur non autonome	4
I.4 Les onduleurs multi-niveaux.....	5
I.4.1 Convertisseurs DC/AC structure de base	5
I.4.2 Topologies de base des onduleurs multi-niveaux.....	6
I.4.2.1 Les convertisseurs multi-niveaux NPC (Neutral Point Clamped).....	7
I.4.2.2 Onduleur multi niveau à pont en H en cascade	8
I.4.2.3 Onduleurs multi-niveaux à cellules imbriquées	9
I.4.3 Autreatopologiesadesaonduleursamultianiveaux	10
I.4.3.1 ActiveaNeutralapointaclamped (ANPC)	10
I.4.3.2 Onduleur multi-niveaux Modulaire.....	11
I.4.3.3 Nested Neutral Point Clamped (NNPC).....	12

I.4.3.4	T-type neutral point clamped.....	13
I.4.3.5	Onduleurs multi-niveaux hybrides :	14
I.5	Intérêts des onduleurs multi-niveaux	15
I.6	Domaine d'applications	15
I.7	Conclusion	16
Chapitre II	Etude et expérimentation de l'hacheur élévateur	17
II.1	Introduction	17
II.2	Générateur photovoltaïque	17
II.2.1	Modèle électrique	18
II.2.2	Caractéristique courant-tension d'une cellule PV	19
II.2.3	Groupement des cellules.....	20
II.2.4	Influence de l'éclairement sur le module PV	21
II.2.5	Influence de la Température	22
II.3	Le hacheur élévateur (boost) :.....	22
II.3.1	Principe de fonctionnement	23
II.3.2	Dimensionnement du hacheur élévateur.....	25
II.4	Commande MPPT Technique de Perturbe et observe (P&O)	26
II.5	Simulation de système	27
II.6	Banc expérimental.....	29
II.6.1	Description.....	29
II.6.2	Composants du système photovoltaïque utilisés	30
II.7	Résultats expérimentaux	36
II.8	Conclusion	37
Chapitre III	Onduleur monophasé à trois niveaux	38
III.1	Introduction.....	38
III.2	Modélisation de l'onduleur monophasé à trois niveaux de type NPC	38

III.2.1	Structure de l'onduleur à trois niveaux.....	38
III.2.2	Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur	39
III.2.3	Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur	39
III.2.4	Commande complémentaire	40
III.2.5	Fonction de connexion.....	40
III.2.6	Modélisation aux valeurs instantanées	41
III.3	Stratégie de commande	42
III.4	Simulation de l'onduleur avec la commande MLI.....	43
III.5	Etude comparatif entre onduleur deux niveaux et trois niveaux :.....	45
III.6	Banc expérimental.....	46
III.6.1	Description.....	46
III.6.2	Appareils utilisés dans le montage expérimental.....	47
III.7	Résultats expérimentaux	50
III.8	Conclusion	51
Chapitre IV :Simulation et expérimentation de la chaîne de conversion		52
IV.1	Introduction	52
IV.2	Description de la chaine de conversion.....	52
IV.3	Résultats de simulation	53
IV.4	Partie expérimentale.....	54
IV.5	Résultat expérimentaux.....	55
IV.6	Conclusion	58
Conclusion générale		59
Annexe.....		67

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I- 1: Schéma symbolique d'un onduleur.....	3
Figure I- 2: (a) bras d'un convertisseur (b) forme d'onde à la sortie du convertisseur.....	6
Figure I- 3: Les formes d'ondes des onduleurs multi-niveaux.....	6
Figure I- 4: Structure d'un onduleur NPC : (a) à trois niveaux (b) à cinq niveaux.....	8
Figure I- 5: structure d'un onduleur cascade (a)à trois niveaux (b) à cinq niveaux.....	9
Figure I- 6: Structure d'un onduleur cellule imbriquées (a) à trois niveaux(b) à cinq niveaux	10
Figure I- 7: Onduleur ANPC à trois niveaux.....	11
Figure I- 8: Onduleur multi-niveaux modulaire	12
Figure I- 9:Onduleur multi-niveauxNNPC	13
Figure I- 10: Onduleur multi-niveaux T-type.....	13
Figure I- 11: Mise en série de deux onduleurs (structure NPC avec un pont en H)	14

Chapitre II :

Figure II- 1:Schémagéquivalentvd'unencellulebphotovoltaïqueuxréelle	18
Figure II- 2: La caractéristique I-V&et P-V d'une cellule PV. Au point.de.puissance.maximale (PPM) la cellule délivre&la majorité&de&sa puissance&disponible sous.les.conditions d'ensoleillement&et&de.température pour&les quels la courbe&I-V a été tracée.....	19
Figure II- 3: Groupement en parallèle de cellule PV	20
Figure II- 4: Groupement en série de cellule PV.....	21
Figure II- 5 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques (a) I(V) et (b) P(V) d'un module solaire sous une température fixe	21
Figure II- 6: Variation des caractéristiques (a) I(V) et (b) P(V) en fonction de la température sous un éclairement fixe	22
Figure II- 7: Schéma équivalent d'un hacheur élévateur	22
Figure II- 8: Circuit équivalent d'un convertisseur BOOST en phase 1	23
Figure II- 9: Circuit équivalent d'un convertisseur BOOST en phase 2	24
Figure II- 10: Formes d'onde en mode de conduction continue du convertisseur Boost.....	25
Figure II- 11: Algorithme MPPT basé sur la commande P&O	27

<i>Figure II- 12: Schéma synoptique du système.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II- 13: Rayonnement (W/m2), Courant $I_{pv}(A)$, Tensions $V_{pv}(V)$ et $V_s(V)$, Puissance $P_{pv}(W)$.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II- 14: Banc expérimentale du système</i>	<i>29</i>
<i>Figure II- 15: panneau photovoltaïque utilisé</i>	<i>30</i>
<i>Figure II- 16 : carte capteur</i>	<i>31</i>
<i>Figure II- 17: capteur de courant LA 55 –P</i>	<i>31</i>
<i>Figure II- 18: capteur de tensionLV-25P.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II- 19: multimètre</i>	<i>33</i>
<i>Figure II- 20: Partie puissance de hacheur boost</i>	<i>34</i>
<i>Figure II- 21: Arduino MEGA2560.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure II- 22 : Carte d'interface</i>	<i>35</i>
<i>Figure II- 23 : Oscilloscope</i>	<i>35</i>
<i>Figure II- 24: Schéma de commande</i>	<i>36</i>
Chapitre III :	
<i>Figure III- 1: Onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III- 2:Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III- 3: Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III- 4: schéma de principe de la technique MLI.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III- 5 : Technique MLI.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III- 6 : signaux de commande des transistors du bras B.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III- 7 : tension du bras $V_{aM}(V)$, tension du bras $V_{bM}(V)$ et tension de sortie $V_{ab}(V)$.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III- 8 : Tension de sortie de l'onduleur deux niveaux avec analyse spectrale</i>	<i>46</i>
<i>Figure III- 9 Tension de sortie de l'onduleur trois niveaux avec analyse spectrale.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III- 10: Banc expérimental</i>	<i>47</i>
<i>Figure III- 11: Deux Alimentations stabilisées</i>	<i>47</i>
<i>Figure III- 12: Commande MLI sous Matlab/Simulink.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III- 13: Carte d'acquisition et de commande PCIe 6351</i>	<i>48</i>
<i>Figure III- 14: Partie de puissance d'un Onduleur monophasé trois niveaux structure NPC.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III- 15: Tension de sortie de l'onduleur $V_{ab}/10$.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III- 16: Signale de commande des interrupteurs à des instants différents</i>	<i>50</i>
Chapitre IV :	
<i>Figure IV- 1 : Schéma de cascade.....</i>	<i>52</i>

<i>Figure IV- 2: Rayonnement solaire (W/m^2), Courant $I_{pv}(A)$, Tensions $V_{pv}(V)$ et $V_s(V)$, Puissance $P_{pv}(W)$.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV- 3: tension de premier bras $V_{aM}(V)$, tension de deuxième bras $V_{bM}(V)$, tension de sortie de l'onduleur $V_{ab}(V)$.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV- 4: banc expérimental.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV- 5: Profile de rayonnement pour la journée de 07 Mars 2023.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV- 6: (a) tension de GPV(V), (b) courant de GPV(A), (c) puissance de GPV(W),</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV- 7: Tension de sortie de l'onduleur</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV- 8: Ordre de commande du transistor de boost.....</i>	<i>58</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I- 1: états des interrupteurs et de la tension coté AC.....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau II- 1: Caractéristique du panneau.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau III- 1: Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur</i>	<i>42</i>

Liste des symboles

Symboles	Nomination	Unité
T	Température	(°C)
V	Tension	(V)
V_{pv}	Tension de générateur photovoltaïque	(V)
V_s	Tension de sortie	(V)
V_{amp}	Tension au point de puissance maximale	(V)
I	Courant	(A)
I_{cc}	Courant de court-circuit	(A)
I_{mpp}	Courant au point de puissance maximale	(A)
I_d	Courant de diode	(A)
P_{pv}	Puissance de panneau photovoltaïque	(W)
P_{mpp}	Puissance au point de puissance maximale	(W)
F_s	Fréquence de commutation	(Hz)
L	Inductance	(H)
Ce	Condensateur d'entrée	(F)
Cs	Condensateur de sortie	(F)

V_{aM}	Tension du bras a d'onduleur	(V)
V_{bM}	Tension du bras b d'onduleur	(V)
V_{ab}	Tension de sortie d'onduleur	(V)

Liste des abréviations

Abréviations	Nomination
Gpv	Générateur Photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum Power point tracking
P&O	perturbation et observation
DC	Direct Current
DC/DC	Direct Current / Direct Current
AC	Alternative Current
DC/AC	Direct Current/AlternatifCurrent
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les énergies renouvelables occupent une place importante, vu la demande mondiale grandissante en énergie électrique. Cette forme d'énergie est de plus en plus utilisée vu sa disponibilité sous différentes formes presque partout dans la planète. L'énergie électrique produite sous forme continue, doit être ondulée pour pouvoir alimenter des charges à courant alternatif, ou l'injecter au réseau de distribution [1]. Dans le but d'atteindre cet objectif, on doit concevoir et développer une la chaîne photovoltaïque, c'est-à-dire le système de conversion.

Dans les chaînes de conversions photovoltaïques à deux étages composées d'hacheurs suivis d'onduleurs, le transfert d'énergie des systèmes photovoltaïques (PV) peut être amélioré par des solutions telles que l'utilisation des techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques MPPT). Après avoir élevé la tension de sortie du système PV, il faut la convertir en tension alternatif pour l'utilisation. Pour assurer cette conversion, nous utilisons un convertisseur (DC/AC) dit l'onduleur.

L'onduleur joue un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques en assurant la conversion du courant continu en courant alternatif (DC/AC). Au fil des années, les convertisseurs statiques ont gagné en popularité et sont désormais utilisés dans diverses applications. Certaines de ces applications nécessitent une alimentation électrique à haute tension. Pour répondre à ce besoin, de nouveaux convertisseurs appelés convertisseurs multi-niveaux, présentant différentes topologies, ont été développés. Ces convertisseurs offrent des avantages tels qu'une meilleure qualité de l'alimentation électrique, une efficacité accrue et la possibilité de gérer des tensions plus élevées, ce qui les rend adaptés aux exigences des systèmes photovoltaïques modernes. [2].

Dans ce mémoire, nous allons étudier une chaîne de conversion photovoltaïque composée d'un hacheur élévateur commandé en MPPT. Ce dernier est suivi d'un onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC qui alimente à son tour une charge résistive.

L'étude présentée dans ce mémoire est organisée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous effectuons une présentation des onduleurs et leurs classifications. Par la suite, les différentes topologies d'onduleurs multi-niveaux, leur

avantages ainsi que leur inconvénient seront présentés. Nous terminons par montrer quelque domaine d'application de ces nouvelles structures.

Dans le deuxième chapitre, on va étudier le système qui comporte un générateur PV connecté avec un hacheur élévateur de type classique commandé par un algorithme MPPT. Ce système alimente une charge résistive DC. Une simulation ainsi que des résultats pratiques seront présentés dans cette partie.

Dans le troisième chapitre, Nous allons étudier en détail l'onduleur de tension monophasé à trois niveaux de type NPC. Les résultats de simulation et de l'implémentation expérimentale d'une stratégie de commande seront présentés.

Dans le dernier chapitre, nous examinerons l'association d'une chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages, composée d'un convertisseur boost dans son premier étage et d'un onduleur monophasé à trois niveaux de structure NPC dans le second. Nous commencerons par décrire le système, puis nous présenterons les résultats de simulation obtenus. Ensuite, nous décrirons le banc d'essai nécessaire à la mise en œuvre des algorithmes de commande et à la collecte des résultats. Enfin, nous conclurons ce chapitre en présentant les résultats expérimentaux obtenus.

Chapitre I : Généralité sur les onduleurs multi-niveaux

I.1 Introduction

Un onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir l'énergie d'une source de tension continue en une tension alternative. Il existe plusieurs configurations d'onduleurs, chacune adaptée à des applications spécifiques ou offrant des performances particulières.

En électronique de puissance moderne, les onduleurs multi-niveaux représentent un domaine de recherche important. Si depuis les années 80 les onduleurs appelés «à trois niveaux» sont devenus des produits presque classiques, d'autres topologies sont apparues, aussi bien au niveau des laboratoires qu'au niveau industriel [3].

Dans ce chapitre, nous effectuons une présentation des onduleurs et leurs classifications. Par la suite, les différentes topologies d'onduleurs multi-niveaux, leur avantages ainsi que leur inconvénient seront présentés. Nous terminons par montrer quelque domaine d'application de ces nouvelles structures.

I.2 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique qui convertit l'énergie électrique de la forme continue (DC) en une forme alternative (AC). Cette conversion est réalisée en utilisant un dispositif de commande basé sur des semi-conducteurs. L'onduleur permet de générer une tension alternative ajustable en fréquence et en amplitude au niveau des bornes du récepteur, grâce à une séquence de commande appropriée [4].

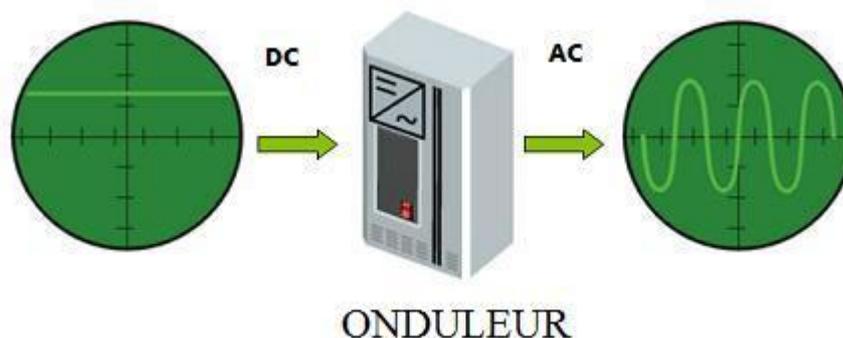


Figure I- 1: Schéma symbolique d'un onduleur

Il existe principalement deux types d'onduleurs selon le niveau de puissance à injecter l'onduleur monophasé et l'onduleur triphasé

- Onduleur monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée [5]. En général, la puissance des onduleurs photovoltaïques monophasés varie généralement entre 2,2 kW et 6 kW [6].

- Onduleur triphasé

Le pont onduleur triphasé est composé de trois cellules de commutation. L'onduleur doit fournir un système de tension dans lequel les composantes fondamentales sont équilibrées, ce qui signifie que les tensions de chaque phase sont égales en amplitude et déphasées de manière équilibrée. [7], Il est capable de générer une puissance supérieure par rapport au système monophasé [6].

I.3 Classification d'un onduleur

I.3.1 Onduleur autonome

Il existe deux principales catégories d'onduleurs autonomes qui peuvent fonctionner indépendamment du réseau électrique :

- Les onduleurs à fréquence fixe : Ils sont utilisés comme sources d'alimentation de secours dans des environnements tels que les hôpitaux, les centres téléphoniques, les systèmes informatiques, etc. Ces onduleurs sont alimentés par une batterie rechargeable et fournissent une alimentation de secours en cas de panne de courant.
- Les onduleurs à fréquence variable : Ils sont alimentés en courant continu à partir du réseau électrique alternatif via un redresseur. Ils génèrent des tensions à fréquence et amplitude variables qui sont utilisées pour contrôler la vitesse des moteurs à courant alternatif. Ces onduleurs sont utilisés pour réguler la vitesse des moteurs électriques dans diverses applications.

Les onduleurs autonomes sont utilisés dans une variété d'applications, allant de la fourniture de secours en cas de panne de courant à la régulation de la vitesse des moteurs électriques.

I.3.2 Onduleur non autonome

Un onduleur non autonome, également appelé onduleur assisté, est un type d'onduleur qui nécessite un signal d'entrée provenant d'un réseau électrique pour fonctionner. Il est composé

d'un redresseur commandé par des thyristors (pont de Graetz) qui opère en tant qu'onduleur par commutation naturelle en synchronisation avec le réseau auquel il est connecté, contrairement à un onduleur autonome.

Ce type d'onduleur est couramment employé dans les variateurs de moteurs synchrones de très grande puissance, où les thyristors sont généralement les seuls composants disponibles pour répondre à ces exigences spécifiques. [4].

I.4 Les onduleurs multi-niveaux

Depuis 1975, l'introduction des convertisseurs multi-niveaux a révolutionné le domaine. Les techniques de conversion multi-niveaux permettent de contourner les limitations liées à la tension de blocage maximale des semi-conducteurs de puissance. En utilisant une combinaison en série de composants de puissance, ces convertisseurs fournissent une alimentation à haute tension pour les actionneurs électriques de moyenne et haute puissance. De plus, ces techniques offrent l'avantage d'obtenir un spectre de tension et de courant de meilleure qualité, se traduisant par de faibles ondulations de courant et de tension, ainsi que des pertes réduites causées par les harmoniques. [8].

I.4.1 Convertisseurs DC/AC - structure de base

Avant de citer les principales topologies des onduleurs multi-niveaux et avant d'en observer l'évolution de sa structure de base qui est un convertisseur " continu / alternatif ", il faut bien comprendre les séquences de fonctionnement du montage simple comme celui de la figure (I-2). Ce montage présente une phase du convertisseur à deux niveaux et il est constitué de deux cellules. Chaque cellule comprend un interrupteur à base de semi-conducteur, le côté DC une source de tension continue qui peut être réalisé à l'aide d'un ou plusieurs condensateurs ou source indépendante (batterie).

Les interrupteurs k1 et k2 comportent deux états stables : état ouvert et état fermé, le tableau suivant résume les quatre combinaisons possibles [9] :

Tableau I- 1: états des interrupteurs et de la tension coté AC

K1	1	1	0
K2	0	1	1

Tension de sortie(V_a)	$+V_{cc}/2$	Court-circuit ($V=0$)	$-V_{cc}/2$
--------------------------------------------	-------------	-------------------------	-------------

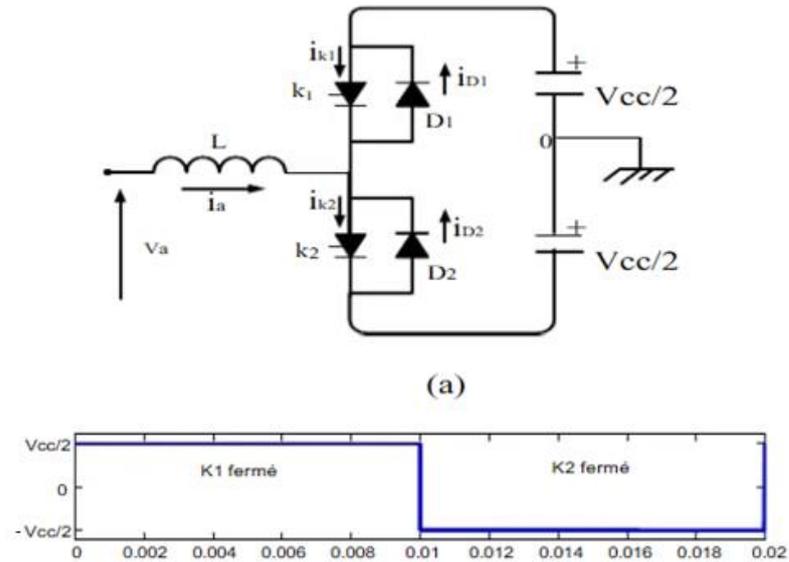


Figure I- 2: (a) bras d'un convertisseur (b) forme d'onde à la sortie du convertisseur

I.4.2 Topologies de base des onduleurs multi-niveaux

L'ondeur multi-niveaux par définition possède trois ou plusieurs niveaux comme montrée dans la figure I-3, plus le nombre de niveaux augmente, plus la forme d'onde s'approche d'une sinusoïde [6].

Les topologies de base des onduleurs multi-niveaux sont:

- la topologie à diode de bouclage NPC.
- la topologie en cascade.
- la topologie à cellules imbriquées (condensateur flottant).

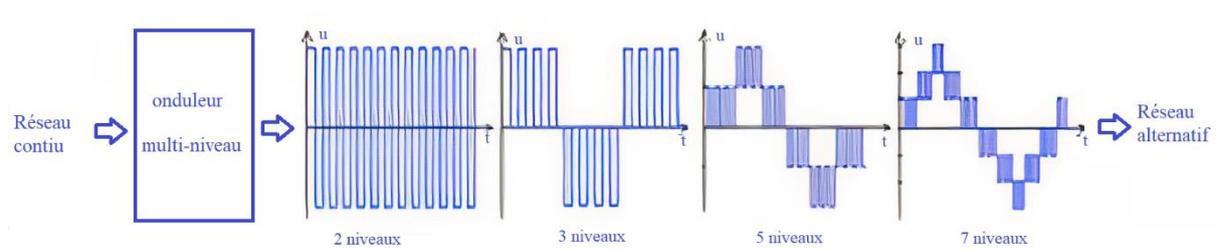


Figure I- 3: Les formes d'ondes des onduleurs multi niveaux

I.4.2.1 Les convertisseurs multi-niveaux NPC (Neutral Point Clamped)

Les onduleurs multi-niveaux NPC (Neural-Point-Clamped) ont été proposés en 1981 par A. Nabae et H. Akagi pour générer trois niveaux de tension à partir de deux interrupteurs élémentaires alimentés par des sources de tension continues distinctes. La figure I-4 (a) présente la structure d'un onduleur NPC à trois niveaux. Cette structure utilise des interrupteurs en série et deux diodes connectées au point milieu de la source de tension d'entrée formé par deux condensateurs. Son objectif est de générer un niveau de tension supplémentaire dans le bras de l'onduleur, avec un courant bidirectionnel. Il est important de noter que la tension de sortie d'un bras de ce convertisseur ne peut pas dépasser la moitié de la tension continue d'entrée.

A topologie de l'onduleur à trois niveaux de type NPC présente plusieurs avantages, notamment :

- Utilisation de composants de tension inférieure à l'amplitude des tensions d'entrée et de sortie.
- Pour les systèmes triphasés, les trois phases partagent le même bus continu, optimisant ainsi l'utilisation des condensateurs du bus continu.
- Fonctionnement à des fréquences de commutation élevées, garantissant un rendement élevé.
- Commande relativement simple.
- Faibles pertes de commutation et coût compétitif.
- Possibilité de contrôler l'énergie réactive.

Cependant, l'onduleur NPC rencontre des difficultés lorsqu'il s'agit de l'augmentation du nombre de niveaux au-delà de trois, ce qui limite ses applications dans les cas de puissances élevées. L'équilibrage des tensions d'entrée (notamment au niveau du point milieu) demeure le principal inconvénient des convertisseurs NPC :

- La présence de plusieurs composants de puissance en série conduit à une augmentation des pertes dans le système.
- Les pertes ne sont pas réparties de manière équitable entre les différents composants de puissance.
- À mesure que le niveau de tension augmente, la complexité de la commande et le nombre de composants semi-conducteurs nécessaires augmentent, ce qui rend le système plus coûteux et complexe.
- Absence de modularité [10].

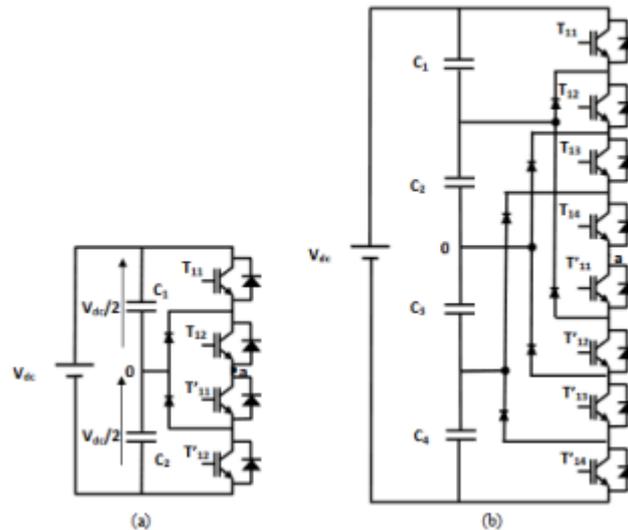


Figure I- 4: Structure d'un onduleur NPC : (a) à trois niveaux (b) à cinq niveaux

I.4.2.2 Onduleur multi niveau à pont en H en cascade

En 1975, Des chercheurs ont proposés un convertisseur multi niveaux en cascade. Il consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés, d'où leur nom. Un seul convertisseur à pont en H est capable de générer trois niveaux de tension différents. Chaque branche n'a que deux états de commutation possibles, afin d'éviter un court-circuit. Comme il y a deux branches, quatre états de commutation différents sont possibles. Lorsque deux ou plusieurs ponts en H sont connectés en série, leurs tensions de sortie peuvent être combinées pour former différents niveau de sortie, augmentant ainsi la tension de sortie totale de l'onduleur et également sa puissance nominale. La figure I-5 montre deux ponts en H à trois niveaux et à cinq niveaux [11].

Cette topologie présente plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Permet l'alimentation d'une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs sources de basse tension par exemple, dans le cas del'énergie photovoltaïque).
- Requier moins de composants pour atteindre le même nombre de niveaux de tension.
- Élimine le besoin de diodes supplémentaires, contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant.
- Offre une construction de commande simplifiée.

Mais comme les autres topologies, ce convertisseur possède certain inconvénients qui sont :

- Dans un système à trois phases, un nombre plus élevé de commutateurs est nécessaire par rapport à un onduleur traditionnel.
- Elle utilise des tensions d'alimentation indépendantes (chaque pont nécessite sa propre tension d'alimentation) [12].

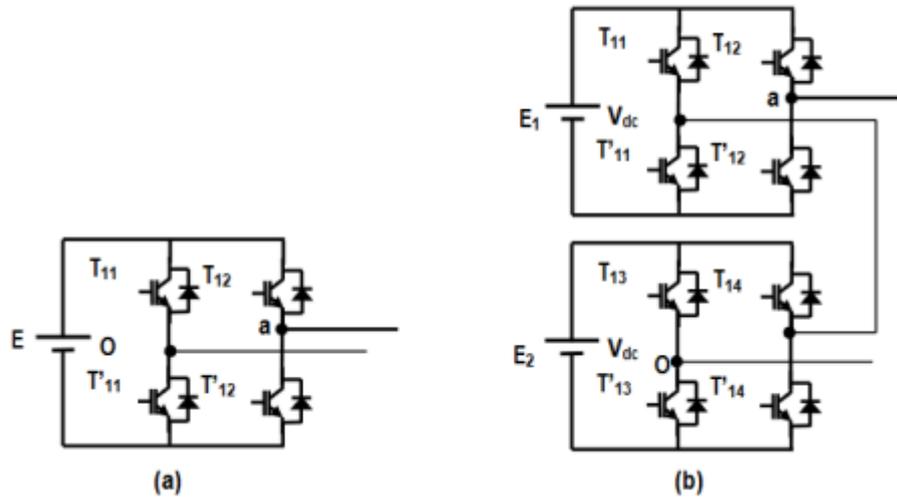


Figure I- 5: structure d'un onduleur cascade (a) à trois niveaux (b) à cinq niveaux

I.4.2.3 Onduleurs multi-niveaux à cellules imbriquées

Cette topologie a été proposée par T. Meynard et H. Fochan en 1992. Appelée aussi onduleurs à condensateurs flottants (Flying Capacitor) (Figure I-6). Elle implique la connexion en série de cellules de commutation à condensateur. Cette topologie ne contient pas des diodes de bouclage supplémentaires. De plus, l'onduleur à condensateur flottant a une redondance de commutation dans la phase qui peut être utilisée pour équilibrer les condensateurs volants de sorte qu'une seule source de courant continu soit nécessaire.

Avantages de l'onduleur multi-niveaux à cellules imbriquées :

- Partage des transports DC est terminé.
- Même niveau de tension avec moins de composants.

Cependant, la topologie FC présente également quelques désavantages, notamment :

- La topologie de l'onduleur FC nécessite plus de condensateurs que celle de l'onduleur NPC, ce qui entraîne une augmentation du volume de l'onduleur.
- Comme pour le NPC, plusieurs composants de puissance en série sont nécessaires pour conduire le courant de sortie, ce qui entraîne une augmentation des pertes.
- Les condensateurs sont soumis à des valeurs élevées de courant efficace.

- La gestion de la charge des condensateurs ajoute de la complexité à la stratégie de commande globale de l'onduleur.
- La commande du système devient plus difficile avec l'augmentation du nombre de niveaux [13].

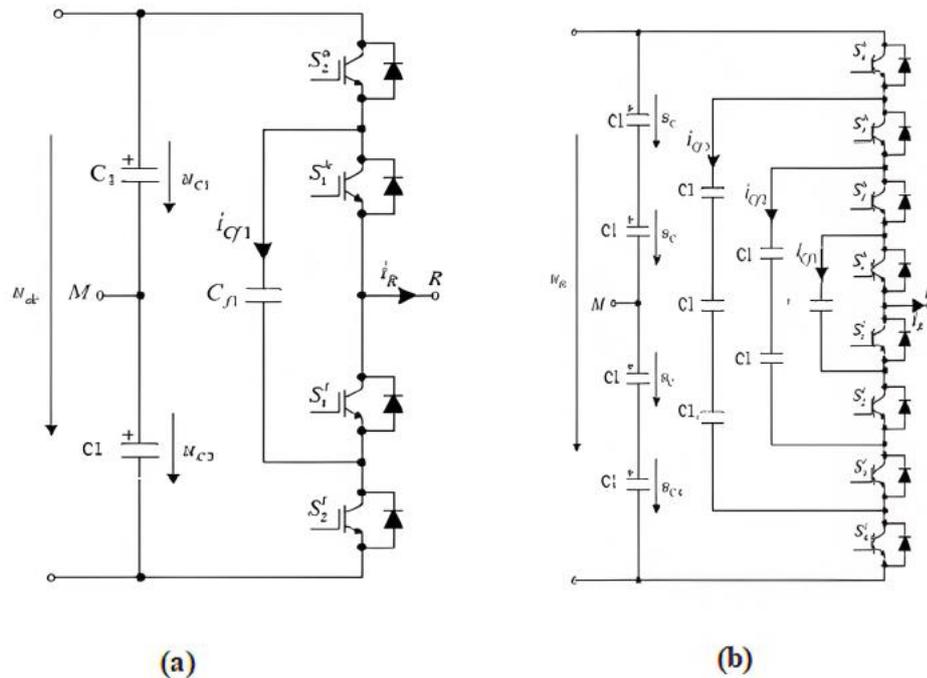


Figure I- 6: Structure d'un onduleur cellule imbriquées (a) à trois niveaux(b) à cinq niveaux

I.4.3 Autre topologies des onduleurs multi niveaux

I.4.3.1 Active Neutral point clamped (ANPC)

Différentes structures de convertisseurs à plusieurs niveaux sont utilisées comme base pour les configurations NPC [14]. L'onduleur multi-niveaux (ANPC) (Figure I-7) combine la flexibilité du convertisseur à condensateurs flottants avec la robustesse du convertisseur NPC pour générer des tensions multi-niveaux [15]. Dans cette topologie offre plus d'options pour répartir les pertes dans les différents composants.

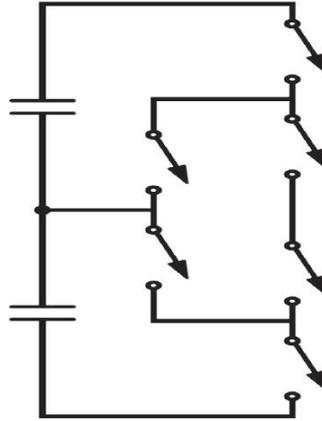


Figure I- 7: Onduleur ANPC à trois niveaux

Avantages

- pas de condensateurs flottant en structure à trois niveaux
- conception simple
- faible coût et structure compacte à trois niveaux
- bonne réponse dynamique

Inconvénients

- Contrôle plus complexe que NPC
- nombre accru des condensateurs flottants à mesure que le niveau augmente [16].

I.4.3.2 Onduleur multi-niveaux Modulaire

L'onduleur modulaire multi-niveaux (MMC), illustré dans la Figure I-8, est une structure d'électronique de puissance couramment utilisée dans le transport de l'électricité à très haute tension et dans la variation de vitesse des moteurs électriques de moyenne tension. Les modules individuels de l'onduleur MMC sont composés d'une cellule de commutation et d'un condensateur [17].

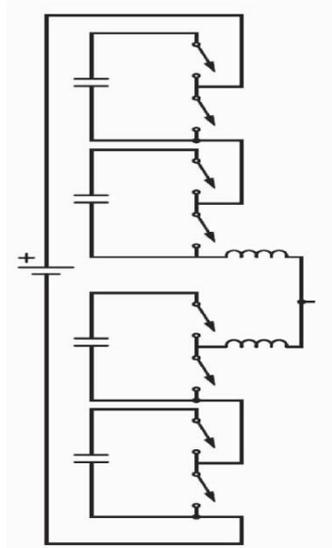


Figure I- 8: Onduleur multi-niveaux modulaire

Avantages

- modulaire
- haute fiabilité

Inconvénients

- grand nombre de condensateurs
- circuits de préchargement du condensateur
- commande complexe
- Ondulation en haute tension à basse fréquence
- volumineux et lourds
- nécessite beaucoup de capteur de tension [16].

I.4.3.3 Nested Neutral Point Clamped (NNPC)

La structure de l'onduleur NNPC est illustrée à la figure I-9. Cette topologie est une combinaison d'une topologie FC avec la topologie NPC [18].

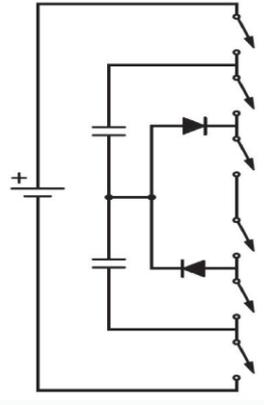


Figure I- 9: Onduleur multi-niveaux NNPC

Avantages

- moins des condensateurs par rapport à FC
- moins des diodes par rapport à NPC à mesure que le niveau augmente

Inconvénients

- tous les problèmes liés au condensateur flottant
- partage inégal de la tension sur les commutateurs à un niveau supérieur à 4 [16].

I.4.3.4 T-type neutral point clamped

La topologie de l'onduleur T-type (Figure I-10) a été proposée par "Schweize". Elle utilise des interrupteurs bidirectionnels actifs connectés au point milieu du bus continu. Cette topologie d'onduleur combine les avantages du convertisseur à deux niveaux, tels que les pertes de conduction réduites, le nombre limité d'interrupteurs et la simplicité de son fonctionnement, avec les avantages du convertisseur à trois niveaux, tels que les pertes de commutation réduites et une qualité de tension de sortie supérieure [19].

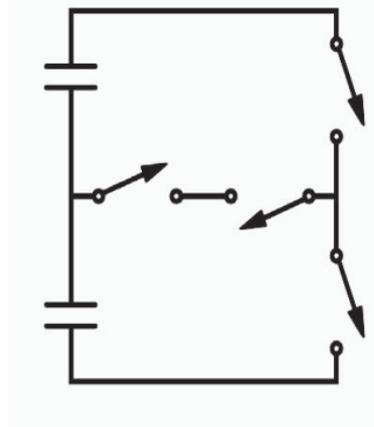


Figure I- 10: Onduleur multi-niveaux T-type

Avantages

- pas de condensateur flottant
- pas de diode
- commande simple

Inconvénients

- tension plus élevée sur les interrupteurs
- faible rendement lors d'un fonctionnement à haute fréquence
- not souhaitable pour les entraînements de haute tension et haute puissance [16].

I.4.3.5 Onduleurs multi-niveaux hybrides :

Les configurations mentionnées ci-dessous représentent les structures de base des convertisseurs multi-niveaux. En les combinant en série ou en parallèle, il est possible d'obtenir des topologies hybrides. Par exemple, une structure hybride peut être créée en mettant en série deux onduleurs monophasés sur la même phase : l'un est un onduleur monophasé de type NPC et l'autre est un onduleur monophasé en pont en H (Figure I-8). Il est également possible de connecter en série deux structures à cellules imbriquées.

Les topologies hybrides permettent de générer un nombre plus élevé de niveaux, ce qui se traduit par une tension de sortie présentant moins d'harmoniques, même avec le même nombre de semi-conducteurs [20].

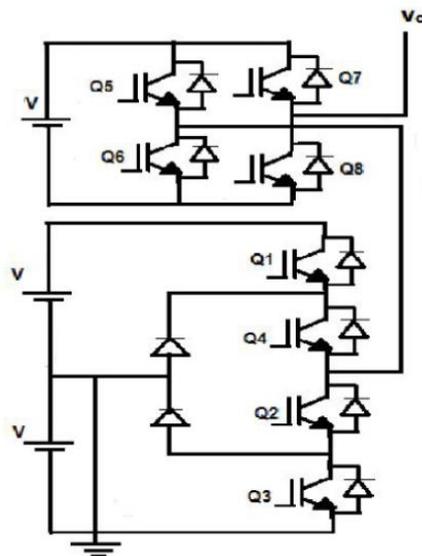


Figure I- 11: Mise en série de deux onduleurs (structure NPC avec un pont en H)

I.5 Intérêts des onduleurs multi-niveaux

Les convertisseurs multi-niveaux sont conçus pour résoudre les problèmes liés à la tension maximale des semi-conducteurs de puissance. Ils offrent une alimentation électrique de haute tension pour les charges électriques de moyenne et forte puissance. En combinant plusieurs composants de puissance, ces convertisseurs améliorent la qualité de l'énergie en réduisant les distorsions harmoniques (THD) et en minimisant la taille des filtres de sortie. En plus de ces avantages, ils présentent également d'autres avantages.

- Une réduction des contraintes imposées à la charge grâce au réglage plus fin de la tension de sortie,
- Une réduction de la contrainte de la tension bloquée par les composants de puissance, ce qui réduit d'autant les pertes par commutation.
- Une amélioration des performances dynamiques du convertisseur,
- Une meilleure compatibilité électromagnétique (CEM) [21].

I.6 Domaine d'applications

En termes de puissance élevée, l'utilisation de convertisseurs multi - niveaux fonctionnant à moyenne tension (MT) est un sujet d'étude important pour la communauté scientifique et l'industrie. Ces convertisseurs sont utilisés dans divers domaines tels que :

- Traction et entraînement : ils sont utilisés dans les trains, les véhicules électriques et la propulsion marine.
- Démarrage et variation de vitesse à basse vitesse : ils sont utilisés dans les applications de pompage, de ventilation, de chauffage et de compression.
- Alimentation des machines électriques : dans les applications industrielles nécessitant une alimentation à moyenne tension pour les machines électriques de moyenne et forte puissance, l'utilisation de convertisseurs multi-niveaux est plus adaptée. Ces convertisseurs permettent de réduire la tension supportée par les semi-conducteurs par rapport à celle requise par la machine, améliorant ainsi la qualité de la tension en termes d'harmoniques et réduisant les effets néfastes sur la durée de vie de la machine et du réseau électrique. De plus, il devient possible d'alimenter une machine à moyenne tension à partir de sources de faible tension telles que des batteries, des piles à combustible ou des cellules photovoltaïques.
- Réseaux électriques : les convertisseurs multi-niveaux sont également adaptés pour améliorer la qualité de la tension dans les réseaux électriques. Ils sont particulièrement

utiles pour compenser la puissance réactive, notamment sur les lignes de transmission de longue distance. Lorsqu'ils sont contrôlés de manière appropriée, ces convertisseurs offrent la possibilité de régler l'amplitude de la tension, le déphasage et l'impédance de la ligne de transmission. Ainsi, ils peuvent agir en tant que compensateurs statiques pour améliorer la qualité de la tension sur le réseau [7].

I.7 Conclusion

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs multi-niveaux, dont chacune correspond à un type d'application bien déterminé permettant d'atteindre les performances recherchées. Dans ce chapitre nous avons présenté la définition des onduleurs ainsi que leurs classifications. Par la suite, nous avons présenté la description des quelques principales topologies des convertisseurs multi-niveaux ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons terminé ce chapitre par présenter les domaines d'applications de ces structures.

Chapitre II : Etude et expérimentation de l'hacheur élévateur

II.1 Introduction

Le secteur de l'énergie photovoltaïque est en pleine expansion à l'échelle mondiale en raison de son caractère renouvelable et de sa facilité d'installation. Toutefois, sa rentabilité reste inférieure à celle d'autres sources d'énergie en raison des variations de production dues à la non-linéarité de l'intensité lumineuse et de la température. Ainsi, la puissance maximale qu'un panneau photovoltaïque peut fournir ne coïncide pas toujours avec son point de fonctionnement optimal. Pour résoudre ce problème, des chercheurs ont proposé des mécanismes tels que des algorithmes de contrôle et des traqueurs de point de puissance maximale (MPPT) afin d'extraire la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque dans des conditions météorologiques variables. Ces dispositifs de contrôle nécessitent l'utilisation d'un convertisseur DC-DC entre le générateur PV et la charge, qui permet d'adapter et de réguler la puissance délivrée par le panneau PV en fonction des besoins de la charge. Ainsi, le point de puissance maximale est atteint en contrôlant la durée des impulsions du convertisseur DC-DC (rapport cyclique) à l'aide de l'algorithme MPPT [22].

Dans ce chapitre, on va étudier un système qui comporte un générateur PV connecté avec un hacheur élévateur de type classique commandé par un algorithme MPPT. Ce système alimente une charge résistive.

II.2 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie des rayons solaires en énergie électrique. La cellule solaire photovoltaïque (PV) est l'élément essentiel de conversion dans un système photovoltaïque. Elle est composée d'une jonction PN réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Pour obtenir la tension et le courant souhaités, plusieurs cellules PV sont assemblées en série ou en parallèle pour former un panneau photovoltaïque. L'ensemble des modules, connectés de cette manière, constitue un générateur photovoltaïque (GPV) [23].

II.2.1 Modèle électrique

Le schéma équivalent présenté dans la figure II-1 prend en compte les effets résistifs parasites liés à la fabrication de la cellule photovoltaïque réelle.

Ce schéma comprend plusieurs composants essentiels. Parmi eux, on trouve une diode (d) qui représente la jonction, une source de courant (I_{ph}) qui représente le courant photovoltaïque, une résistance série (R_s) qui prend en compte les pertes dues à l'effet Joule, et une résistance de dérivation (R_{sh}) qui caractérise le courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière. Il est important de noter que la résistance de dérivation est généralement beaucoup plus élevée que la résistance série [24].

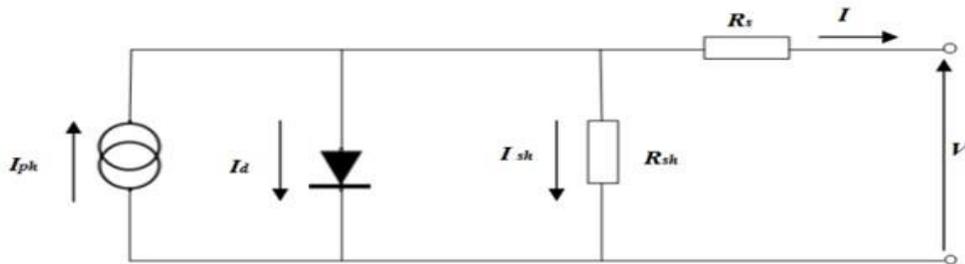


Figure II- 1:Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

I : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule.

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q(V + R_s I)}{nKT} - 1 \right] + \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

I_s : Courant de saturation (A)

K : Constante de Boltzmann (J/K)

q : Charge élémentaire (C)

R_s : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistance shunt (Ω)

T : Température (K)

n : facteur d'idéalité de la diode

II.2.2 Caractéristique courant-tension d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque se caractérise par :

- **La puissance crête (P_c)** : représente la puissance électrique maximale que peut générer une cellule photovoltaïque dans des conditions standardisées, c'est-à-dire à une température de 25°C et avec un éclairement solaire de 1000 W/m^2 .
- **La caractéristique I (V)** : Courbe représentant le courant I débité par la cellule en fonction de la tension aux bornes de celle-ci, comme présenté dans la figure suivante.

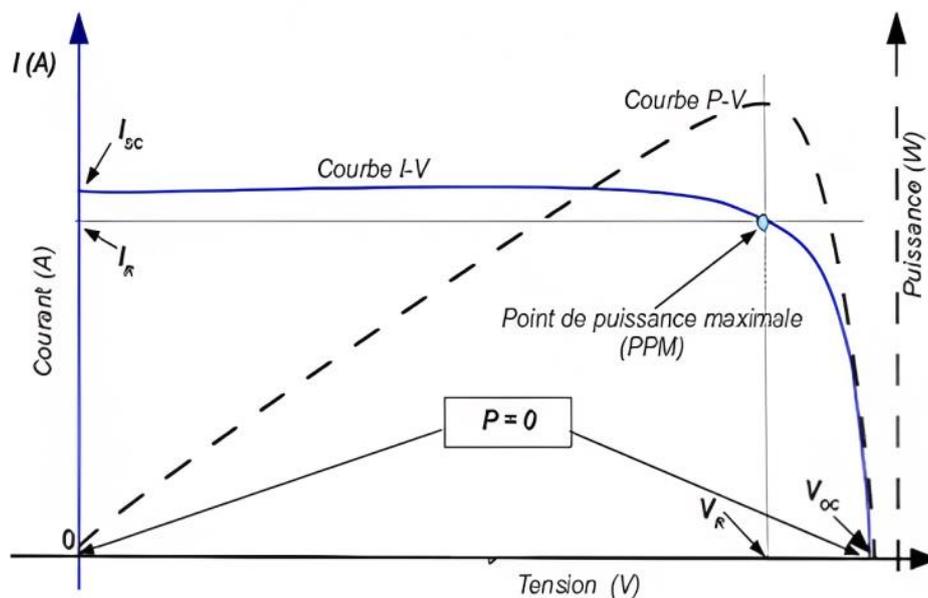


Figure II- 2: La caractéristique I-V et P-V d'une cellule PV. Au point de puissance maximale (PPM) la cellule délivre la majorité de sa puissance disponible sous les conditions d'ensoleillement et de température pour les quels la courbe I-V a été tracée

- **Tension à vide V_{oc}** : Tension aux bornes de la cellule en l'absence de tout courant de charge.
- **Courant de court-circuit I_{sc}** : Courant débité par la cellule en court-circuit.

- **Point de Puissance Maximale (PPM), (V_R, I_R)** : C'est le point sur la caractéristique P-V (ou I-V) où la puissance est maximale : $P = V_R \times I_R$.

Pour les conditions standards, on parle de la puissance crête.

- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente : $\tau = \frac{P_m}{E_c \times S_{ef}}$ Avec E_c est l'irradiation incident en (W/m^2) et S_{ef} est la surface effective du module PV.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et le produit de la tension de circuit ouvert par le courant de court-circuit : $FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{sc}}$ [25].

II.2.3 Groupement des cellules

a) Groupement en parallèle

La figure II-3 montre qu'avec ce groupement, la tension reste à la même valeur, et la totalité de courant devient N_p (nombre des cellules parallèle) fois que celui fournit par une seule cellule [26,27].

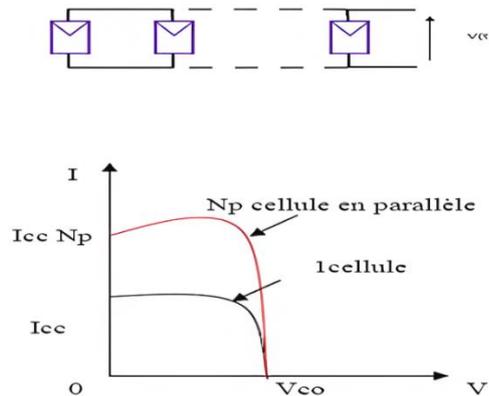


Figure II- 3: Groupement en parallèle de cellule PV

b) Groupement en série

Dans le but d'augmenté la tension, on doit assembler des cellules en série. Donc la totalité de la tension devient N_s fois la tension d'une seule cellule, comme montré dans la figure II-4, Avec (N_s : nombre des cellules série) [26,27].

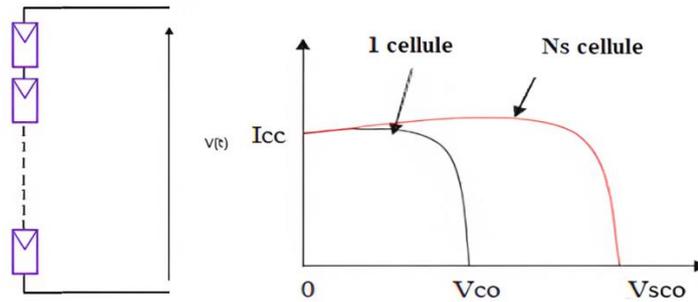


Figure II- 4: Groupement en série de cellule PV

c) Groupement mixtes (série et parallèle)

Afin d'obtenir des tensions et des courants significatifs, il est nécessaire de combiner plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette configuration interconnectée des cellules forme ce qu'on appelle un module photovoltaïque [28].

II.2.4 Influence de l'éclairement sur le module PV

L'éclairement a un impact significatif sur le rendement électrique du module. Selon la figure (II-5), la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque évolue en fonction de l'éclairement pour une température donnée. Lorsque l'éclairement augmente, la courbe se déplace vers le haut et vers la droite. Le courant de court-circuit varie de manière proportionnelle à l'éclairement, tandis que la tension de circuit ouvert reste relativement stable. De plus, la puissance générée augmente également avec l'augmentation de l'éclairement, comme le montrent les figures ci-dessous [29,30].

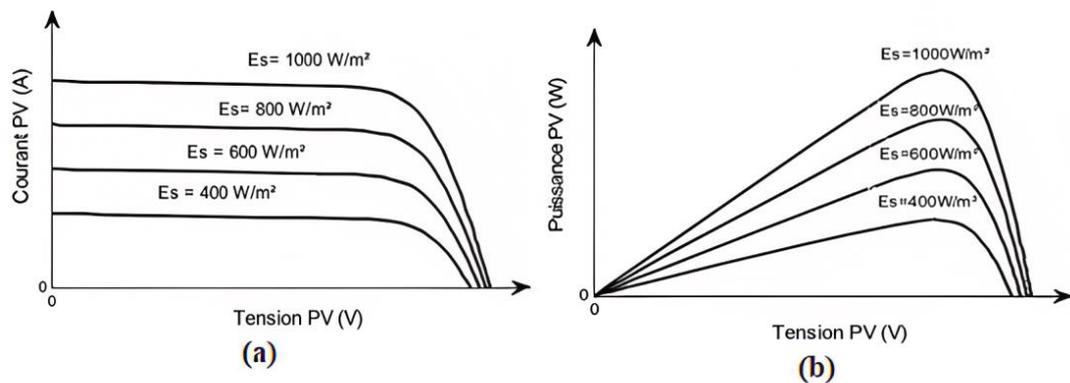


Figure II- 5 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques (a) I(V) et (b) P(V) d'un module solaire sous une température fixe

II.2.5 Influence de la Température

La figure II-6 met en évidence l'influence de la température. On peut observer qu'une augmentation de la température entraîne une augmentation significative du courant de court-circuit (I_{cc}). De plus, la température a un effet négatif sur la tension de circuit ouvert. En augmentant la température, la tension de circuit ouvert diminue, ce qui entraîne une diminution de la puissance maximale du générateur [29,30].

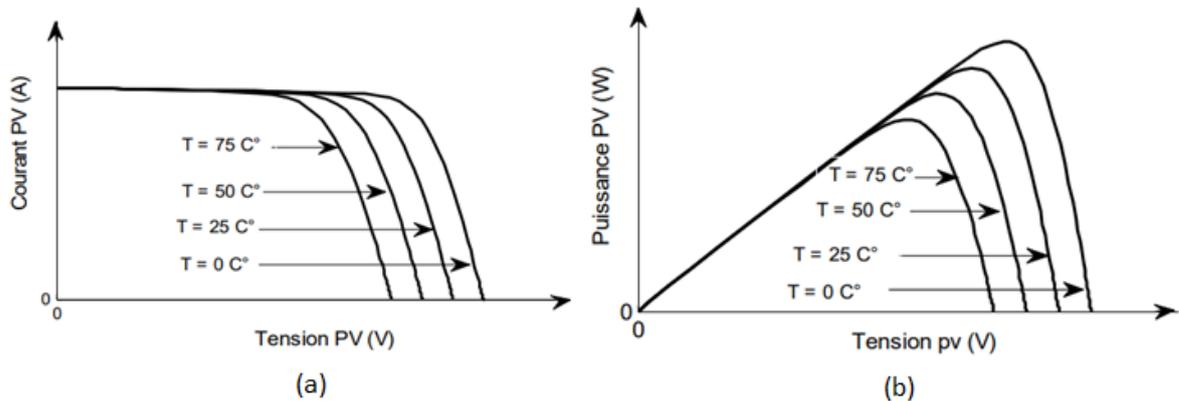


Figure II- 6: Variation des caractéristiques (a) I(V) et (b) P(V) en fonction de la température sous un éclairage fixe

II.3 Le hacheur élévateur (boost) :

Un hacheur élévateur, également connu sous le nom de hacheur parallèle, est un convertisseur DC-DC qui transforme une tension continue en une autre tension continue de valeur plus élevée. Le schéma électrique équivalent du hacheur est présenté dans la figure suivante. Il est composé d'une inductance (L), d'une diode (D) et d'un interrupteur (k), représenté ici par un MOSFET de puissance, qui est périodiquement activé avec un rapport cyclique α à une fréquence $F = 1/T$ [31,32].

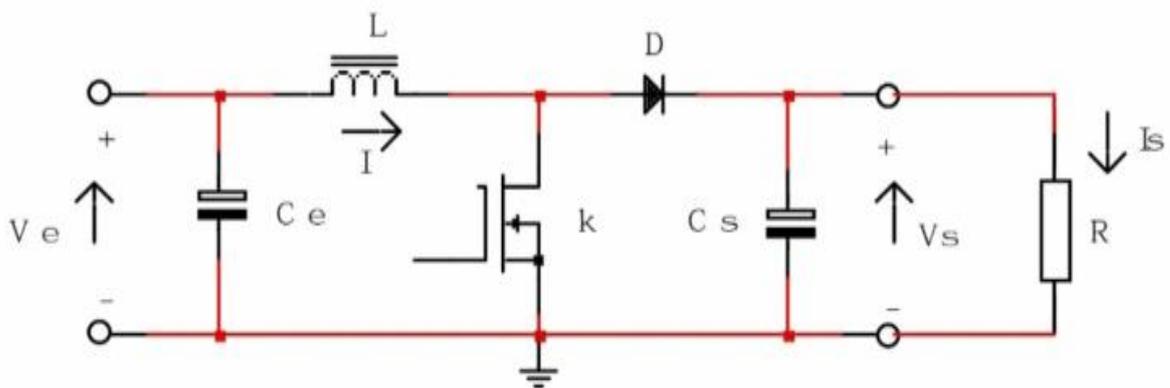


Figure II- 7: Schéma équivalent d'un hacheur élévateur

II.3.1 Principe de fonctionnement

Selon le principe de commutation à haute fréquence, le hacheur permet de transférer de l'énergie d'une source vers une charge en alternant la recharge et la décharge des éléments accumulateurs L et C en synchronisation avec l'interrupteur ON et OFF. Lorsque l'interrupteur est fermé, la diode est polarisée en inverse et se bloque automatiquement. Pendant cette phase de fermeture, la bobine se recharge avec un courant qui augmente progressivement. Une fois la durée de fermeture (t_{on}) écoulée, l'interrupteur s'ouvre en réponse à une commande externe qui définit le rapport cyclique entre la durée ton et la période de commutation T. Lors de cette phase d'ouverture (OFF), l'énergie inductive accumulée est transférée vers le condensateur de sortie C et la charge (résistance R) via une boucle de roue libre, avec la diode polarisée en direct et devenue passante [33].

On distingue deux modes de fonctionnement :

- **Phase 1 : ($0 < t < \alpha T$) :**

L'interrupteur K est fermé, la diode D est bloquée. Le schéma équivalent du circuit est montré par la figure II-8:

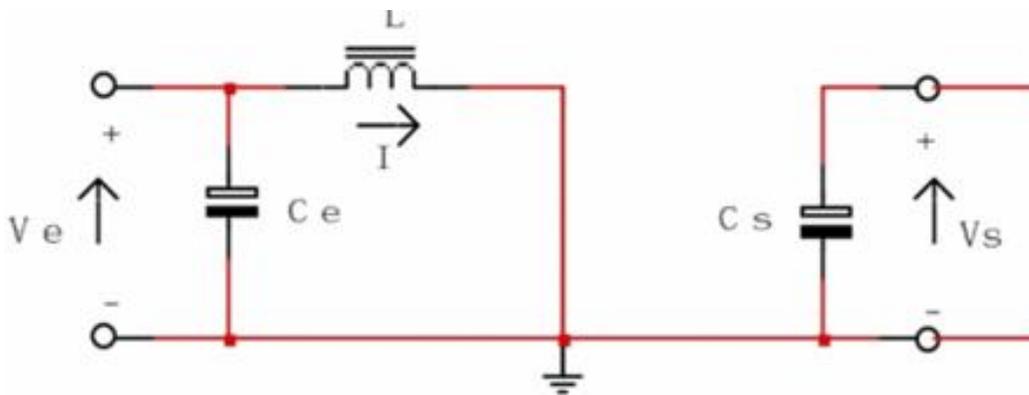


Figure II- 8: Circuit équivalent d'un convertisseur BOOST en phase 1

On a :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad \text{D'où} \quad i(t) = I_{min} + \frac{V_e}{L} t$$

A l'instant $t = \alpha T$ le courant dans l'inductance atteint la valeur crête :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.1})$$

• Phase 2 : ($\alpha T < t < T$) :

Lorsque $t = \alpha T$, l'interrupteur K est ouvert, ce qui permet à la diode D de devenir conductrice. Le schéma équivalent du circuit est alors représenté par la figure II-9 :

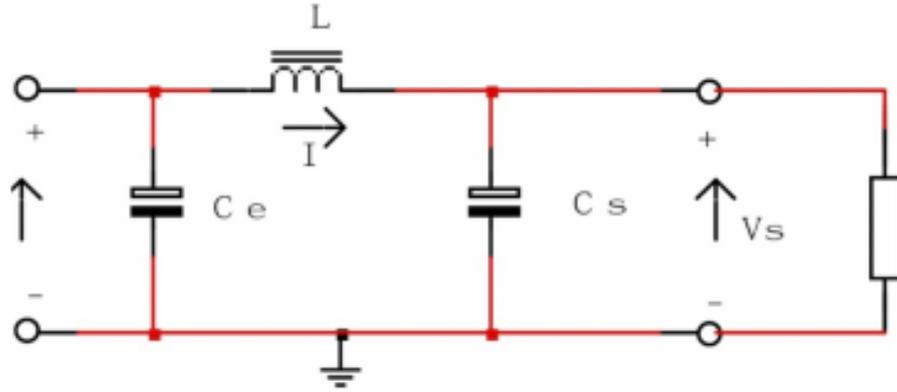


Figure II- 9: Circuit équivalent d'un convertisseur BOOST en phase 2

On a :

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad \text{Ou} \quad V_s - V_e = -L \frac{di}{dt}$$

$$i(t) = I_{\max} - \frac{V_s - V_e}{L} (t - \alpha)T \quad (\text{II.2})$$

A l'instant ($t = T$) le courant dans l'inductance atteint sa valeur minimale :

$$i_{\min} = I_{\max} - \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha)T \quad (\text{II.3})$$

Soit ΔI l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} \quad (\text{II.4})$$

De l'équation (II.1) on tire :

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.5})$$

Et de l'équation (II-3) :

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha)T \quad (\text{II.6})$$

En combinant ces deux relations, on peut établir l'expression de la tension de sortie :

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.7})$$

Il est remarqué que la tension de sortie d'un convertisseur est entièrement déterminée par la tension d'entrée et le rapport cyclique α . Étant donné que ce rapport cyclique est toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur assure systématiquement une élévation de la tension [34].

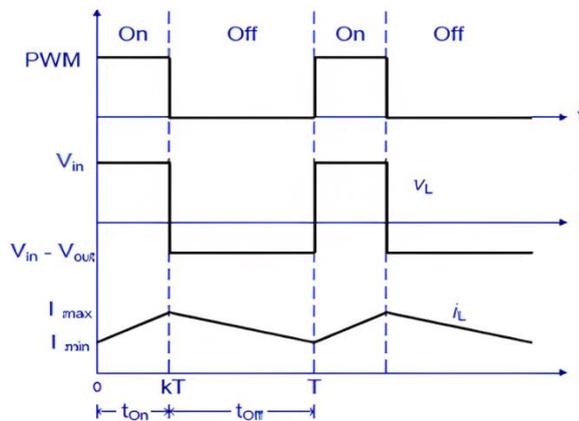


Figure II- 10: Formes d'onde en mode de conduction continue du convertisseur Boost

II.3.2 Dimensionnement du hacheur élévateur

a) Sélection de l'interrupteur

L'interrupteur d'alimentation considéré doit supporter une tension et un courant nominaux selon la charge. Par conséquent, dans ce système, le MOSFET est utilisé. Ce dernier permet une meilleure efficacité énergétique et une plus grande densité de puissance. En effet, le MOSFET a une résistance interne très faible et peut être utilisé pour des tensions élevées. De plus, il peut être utilisé pour des fréquences de commutation élevées.

b) Sélection de la diode

Les caractéristiques de sélection de la diode sont la commutation rapide, le courant moyen, la chute de tension directe [35].

c) Sélection de l'inductance et du condensateur

Les paramètres nécessaires pour la détermination des valeurs de l'inductance et du condensateur sont : Tension de sortie V_o , Tension d'entrée V_{in} , Courant de sortie I_o , fréquence de commutation (F_s), facteur d'ondulation.

Le rapport cyclique :

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad (\text{II.8})$$

Valeur d'inductance :

$$L = \frac{V_{in} \times D}{F_s \times \Delta I_o} \quad (\text{II.9})$$

Valeurs des capacités C_s :

$$C = \frac{I_o \times D}{F_s \times \Delta V_o} \quad (\text{II.10})$$

Ou ΔV_o : est l'ondulation de tension de sortie

II.4 Commande MPPT Technique de Perturbe et observe (P&O)

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) joue un rôle crucial dans l'optimisation du fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Son principe repose sur une variation automatique du rapport cyclique D , visant à atteindre la valeur optimale pour maximiser la puissance délivrée par le panneau solaire [35].

Dans notre étude, nous avons adopté la technique de commande perturbe et observe, illustrée dans la Figure II.11. Ce principe est simple : il consiste à générer des perturbations au niveau de la tension du panneau solaire en augmentant et en diminuant le rapport cyclique D du convertisseur DC-DC, puis à observer l'effet de ces perturbations sur la puissance produite par le générateur solaire [36].

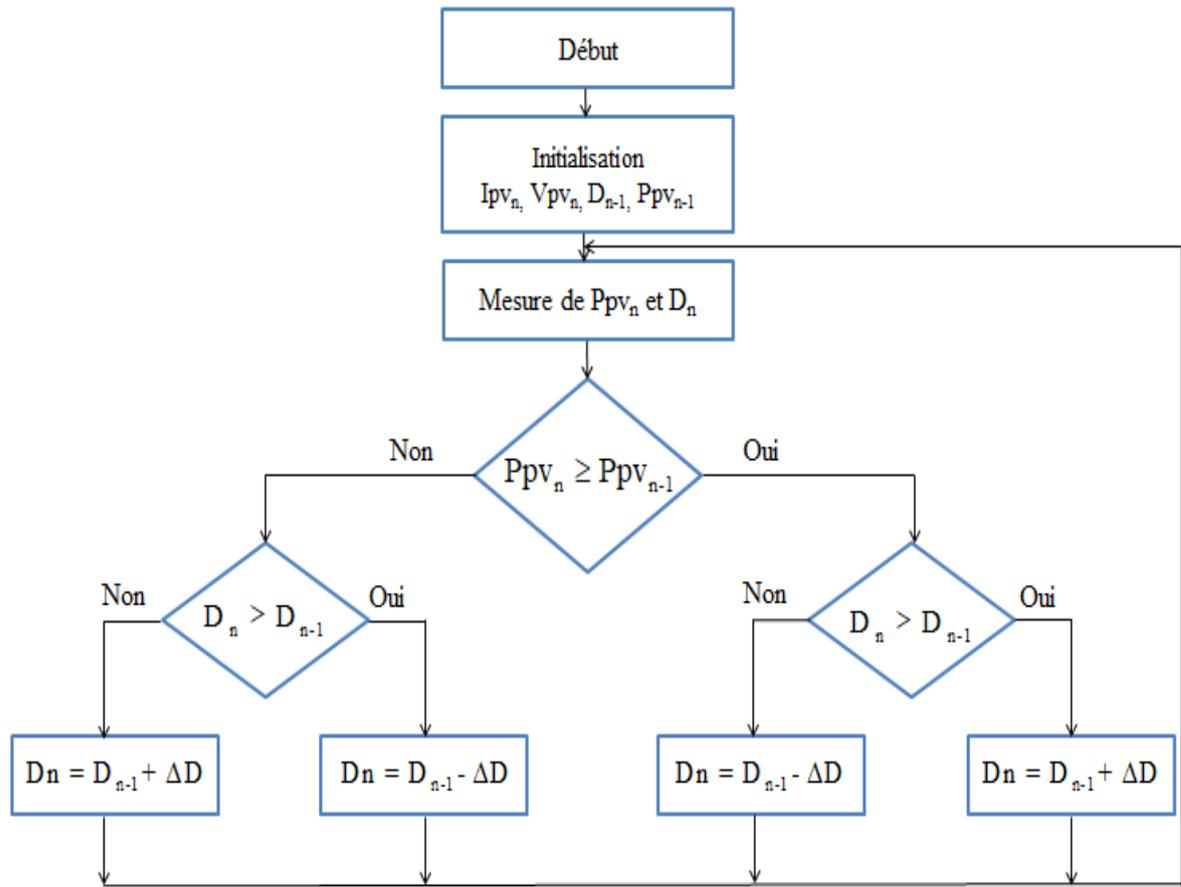


Figure II- 11: Algorithme MPPT basé sur la commande P&O

II.5 Simulation de système

Pour la simulation du système illustré dans la figure ci-dessous, nous avons opté pour l'utilisation de logiciel Matlab/Simulink.

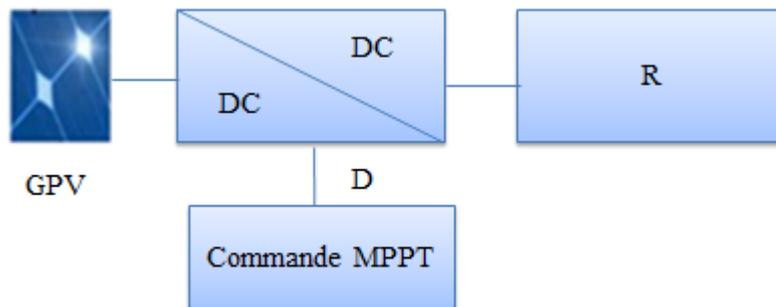


Figure II- 12: Schéma synoptique du système

Après avoir simulé le système dans logiciel Matlab, on peut distinguer selon les résultats de simulation montrée par la figure II-13 que :

- ✓ Quand $0 < t < 1$ & $2.3 < t < 3$ s : La valeur de rayonnement est fixé à 1000 W/m^2 et la tension délivré par le GPV est de 150 V avec un courant de 8 A et une puissance de 1200 W . Comme on peut voir que la tension de sortie est plus grande que celle de l'entrée avec une valeur de 250 V .
- ✓ Quand $1 < t < 2.3$ s : La valeur de rayonnement descend de 1000 W/m^2 vers 600 W/m^2 . On peut voir que le courant du GPV prend une valeur de 4.5 A après qu'il était 8 A , donc la puissance s'affect aussi avec une valeur de 650 W après qu'elle était 1200 W . La tension de sortie est toujours grand que la tension d'entrée, donc le boost accompli sa fonction.

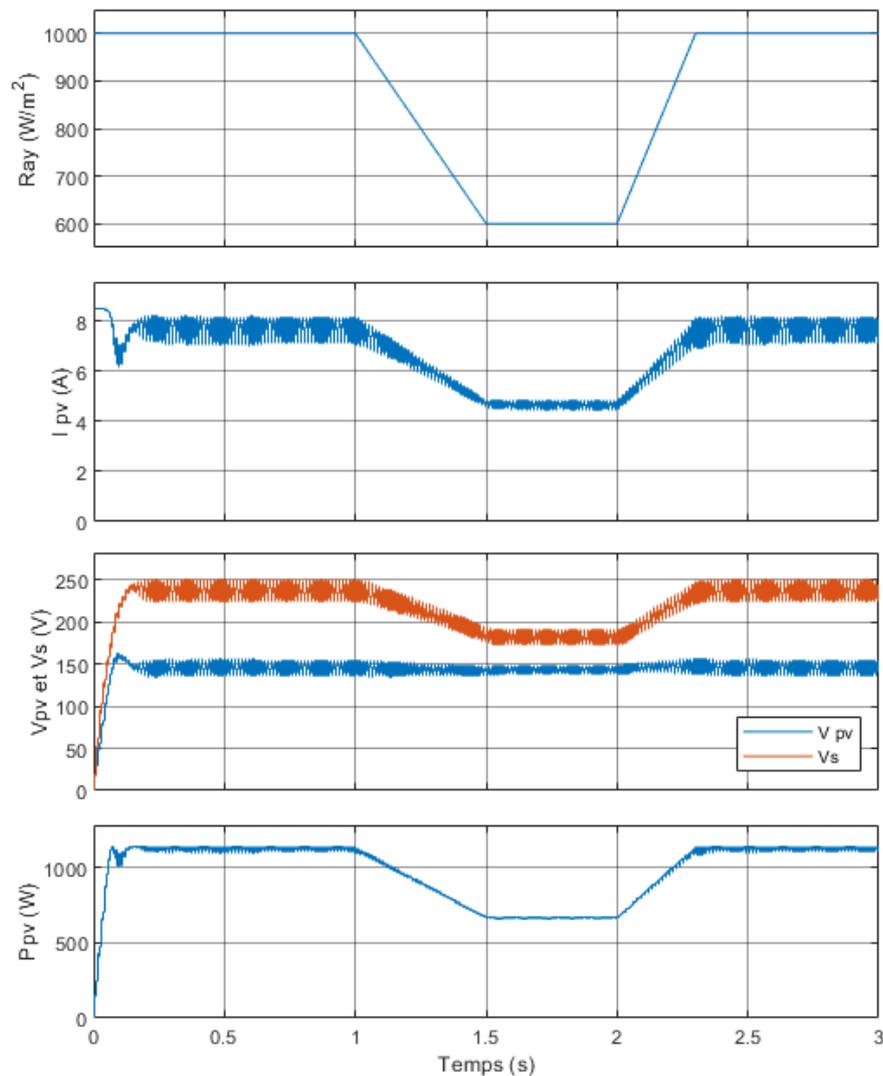


Figure II- 13: Rayonnement (W/m^2), Courant $I_{pv}(\text{A})$, Tensions $V_{pv}(\text{V})$ et $V_s(\text{V})$, Puissance

$$P_{pv}(\text{W})$$

II.6 Banc expérimental

II.6.1 Description

Dans cette partie, nous allons tester en temps réelle le système photovoltaïque composé d'un panneau solaire, d'un hacheur boost et une charge résistive (figure II-14).

La tension et le courant générés par le module PV subissent une réduction de leurs amplitudes via la carte capteur. Ensuite, ces signaux sont transmis à la carte Arduino où ils sont traités par l'algorithme MPPT. Ce dernier est réalisé sous Matlab puis transmet à la carte Arduino. Le résultat de ce traitement se traduit par le calcul du rapport cyclique appliqué pour commander le transistor de l'hacheur.

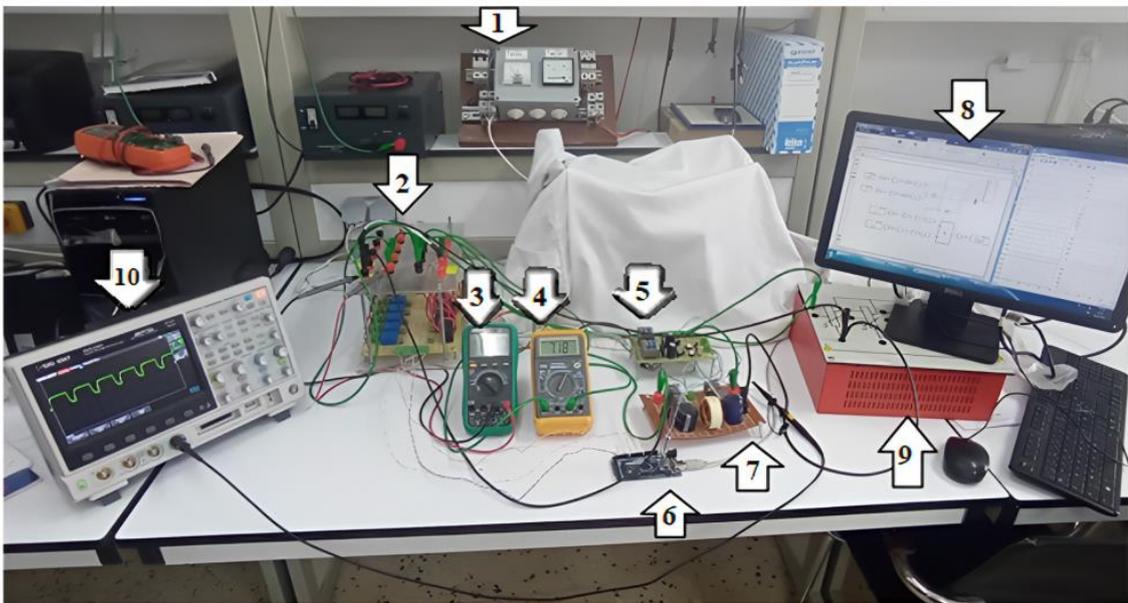


Figure II- 14: Banc expérimentale du système

Composants utilisé dans l'ordre :

- | | |
|----------------------------|-----------------------------------------|
| (1) : Arrivée de module PV | (6) : Arduino Mega |
| (2) : Carte Capteur | (7) : Partie puissance du hacheur boost |
| (3) : Ampèremètre | (8) : Ordinateur |
| (4) : Voltmètre | (9) : Charge Résistive |
| (5) : Carte d'interface | (10) : Oscilloscope |

II.6.2 Composants du système photovoltaïque utilisés

a) Module PV

Dans notre essai, nous avons utilisé un panneau de technologie monocristallin (Figure II.15), fabriqué par la société ISOFOTON. Les caractéristiques de ce panneau sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II- 1: Caractéristique du panneau

I_{sc}	V_{oc}	I_{mpp}	V_{mpp}	P_{mpp}
9,3 A	21,6 V	8,7 A	17,3	150 W



Figure II- 15: panneau photovoltaïque utilisé

b) Carte Capteurs

La carte illustrée par l'image ci-dessous permet de réduire les grandeurs physiques des courants et tensions et de les adapter à la carte de commande [37].

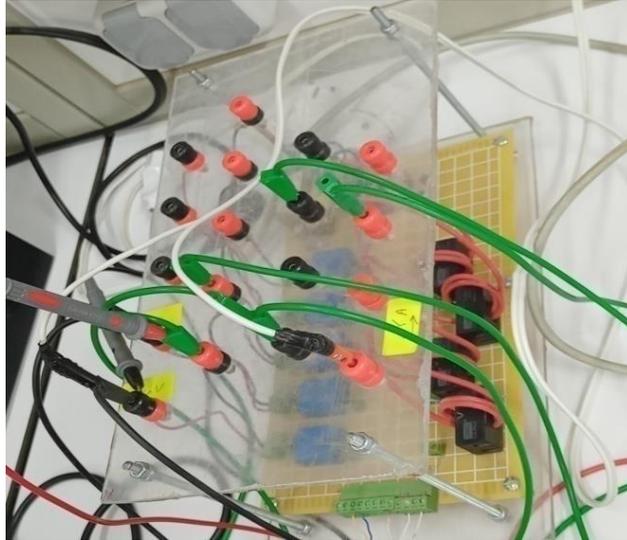


Figure II- 16 : carte capteur

Cette carte est constituée par deux types des capteurs : capteurs de courant (LA 55-P) et des capteurs de tension (LV 25-P).

➤ **Capteur de courant:**

Le LA55-P est un capteur de courant à effet Hall à boucle fermée conçu pour mesurer des courants avec une tension d'alimentation de $\pm 12V$ [38].

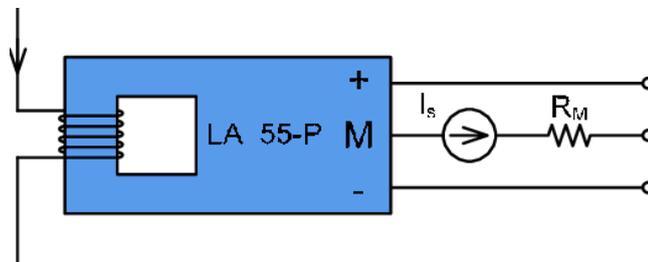


Figure II- 17: capteur de courant LA 55 –P

Le courant secondaire I_s donné par :

$$I_s = I_{max} / 1000 \quad (\text{II.11})$$

$$I_{max} = I_{pv} \times n \quad (\text{II.12})$$

n : nombre de tours du primaire du capteur.

1000 : rapport de transformation

Dans notre cas $n = 3$;

Donc :

$$I_{max} = I_{pv} * 3 = 10 * 3 = 30A \quad (\text{II.13})$$

Donc:

$$I_s = I_{max}/1000 \quad (\text{II.14})$$

Nous choisissons la valeur de tension de sortie $V_s = 5 \text{ V}$.

D'après la loi d'ohm en tire la valeur de la résistance :

$$V_s = R_s * I_s \quad (\text{II.15})$$

$$R_s = V_s/I_s = 5/0.03 = 166.66\Omega \quad (\text{II.16})$$

➤ Capteur de tension :

Le LV-25P est un capteur de tension à effet Hall, tel qu'illustré dans la Figure II.18. Le dimensionnement des composants du capteur de tension implique le calcul de la résistance R_1 située à l'entrée du primaire, ainsi que de la résistance R_s située à la sortie du secondaire [39].

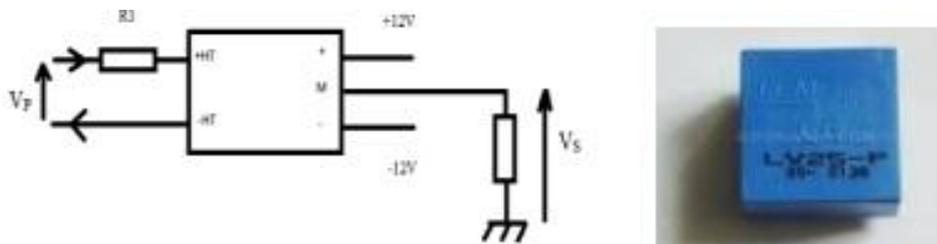


Figure II- 18: capteur de tensionLV-25P

On a choisissiez les valeurs de tension et de résistance d'entré :

$$V_e = 20 \text{ V et } R_e = 33 \text{ k}\Omega$$

D'après la loi d'ohm :

$$V_e = R_e \times I_e \quad (\text{II.17})$$

$$I_e = \frac{V_e}{R_e} = \frac{20}{33000} = 0.0006 \text{ A} \quad (\text{II.18})$$

$$I_s = m \times I_e \quad (\text{II.19})$$

$m=2.5$: le rapport de transformation de capteur.

Donc :

$$I_s = 2.5 \times 0.0006 = 0.0015 \text{ A} \quad (\text{II.20})$$

Nous choisirons la valeur de tension de sortie $V_s = 5 \text{ V}$

En déduire la valeur de la résistance de sortie :

$$V_s = R_s \times I_s \quad (\text{II.21})$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{5}{0.0015} = 3.33 \text{ k}\Omega \quad (\text{II.22})$$

c) Ampèremètre et voltmètre

Nous avons utilisé deux multimètres digitaux pour voir les valeurs du courant et de la tension [40].



Figure II- 19: multimètre

d) Partie puissance du hacheur Boost

Le convertisseur boost est montré par a figure II.20. Il est constitué d'une inductance de valeur $L= 0.25 \text{ mH}$, d'un transistor de puissance (IRF), d'une diode (BYT30P-1000) et des deux condensateurs ($C_e=2200 \mu\text{F}$, $V_{C_e}=160\text{V}$)et ($C_s= 330 \mu\text{F}$, $V_{C_s}= 400 \text{ V}$).

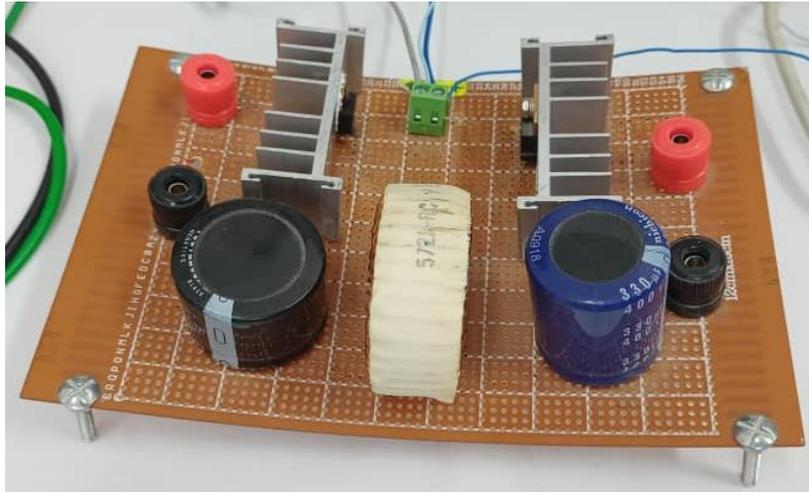


Figure II- 20: Partie puissance de hacheur boost

e) Arduino MEGA

La carte Arduino Méga 2560 (figure II-21) est basée sur Le microcontrôleur ATmega2560, disposant de 54 entrée/sortie dont 14 PWM, 16 analogiques et 4 ports série hardware. Cette carte peut être programmée en USB avec le logiciel Matlab [41].



Figure II- 21: Arduino MEGA2560

f) Carte d'interface

Cette carte permet d'amplifier la tension de sortie de la carte de commande Arduino de la tension de 5V à 15V pour l'adapter à la gâchette du transistor MOSFET [37].

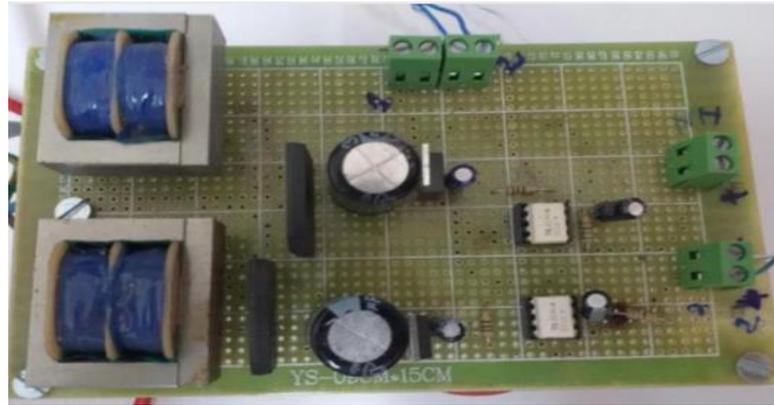


Figure II- 22 : Carte d'interface

g) Oscilloscope

L'oscilloscope est un dispositif de mesure destiné à visualiser les signale électrique souvent en fonction de temps, permet d'observer les grandeurs physique, la figure suivante présent l'oscilloscope que nous avons utilisé dans notre essai [42].



Figure II- 23 : Oscilloscope

h) Schéma de commande utilisée sur Matlab

La communication entre le PC (Matlab/Simulink) et la carte Arduino s'effectue via le câble du port USB. Les données peuvent être facilement envoyées de la carte de contrôle et Matlab et vice versa. La figure (II-24) montre le schéma de commande que nous utilisé.

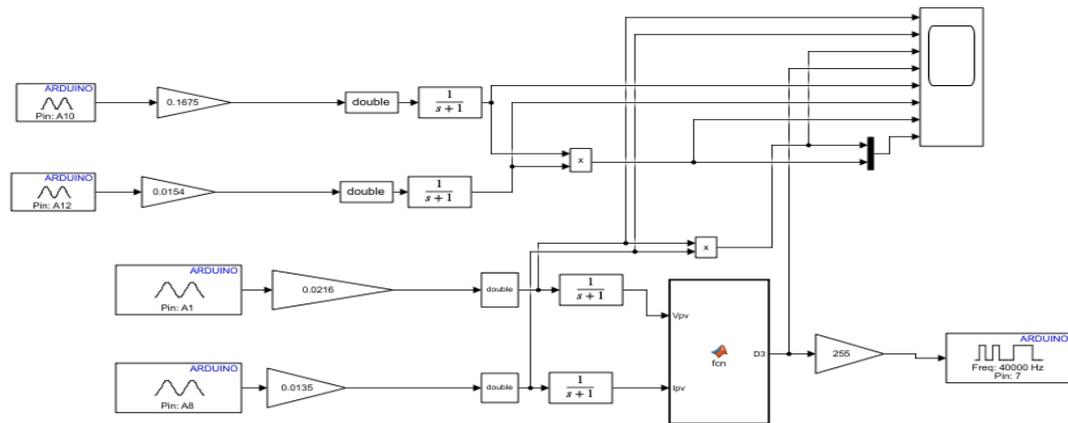


Figure II- 24: Schéma de commande

II.7 Résultats expérimentaux

Dans ce test, la tension et le courant du module PV passent premièrement par la carte capteur pour réduire leurs amplitudes, après ils sont transmis vers la carte Arduino pour les traiter par l'algorithme MPPT. A la sortie, nous obtenons le rapport cyclique à appliquer.

Tout d'abord, nous tenons à préciser que le test a été réalisé le 26/03/2023 à 09h05. La figure II-25 présente les résultats expérimentaux : (a) la tension de GPV, (b) courant de GPV, (c) la tension de sortie de boost, (d) puissance P_{pv} .

Des figures, nous remarquons :

Quand $0 < t < 14$ s : on remarque que la puissance augmente jusqu'à son maximum.

Quand $14 < t < 35$ s : la courbe de puissance se fixe dans la valeur de 50 W, la tension de sortie de boost (60V) et supérieure que celle du GPV (15 V).

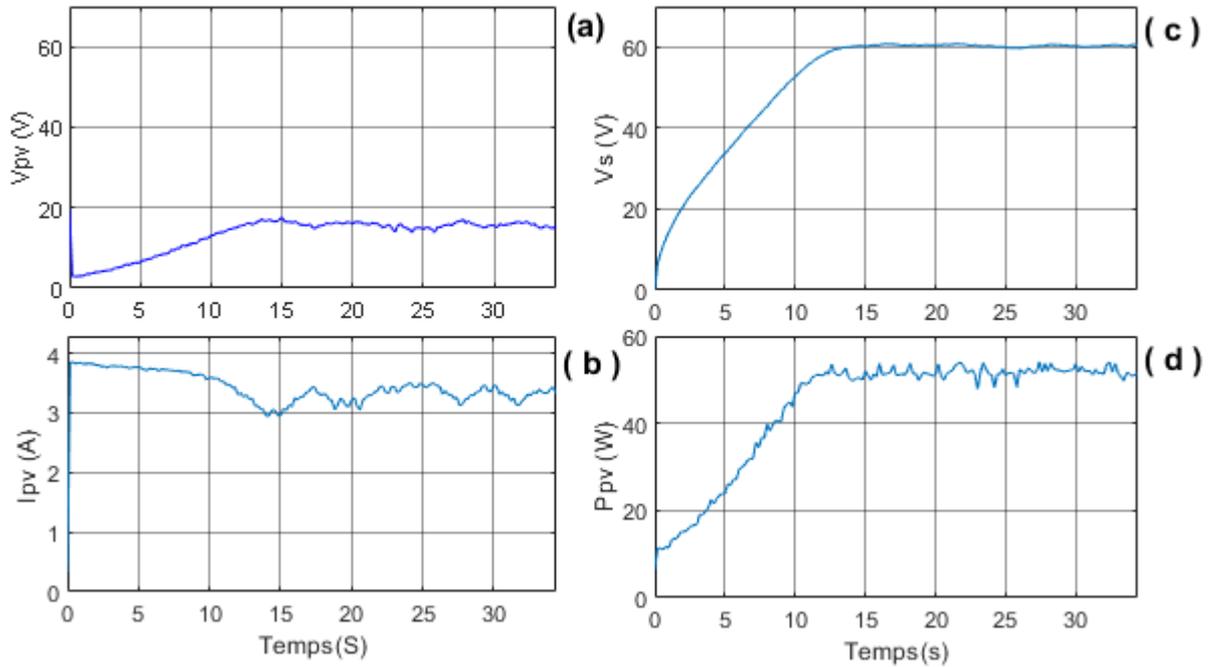


Figure II- 25: (a) Tension du module $V_{pv}(V)$, (b) Courant du module $I_{pv}(A)$,
 (c) Tension de sortie du boost $V_s(V)$, (d) Puissance du module $P(W)$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation d'un système PV en utilisant un boost avec une commande MPPT. Ensuite nous avons implémenté l'algorithme MPPT au banc expérimental. Les résultats de simulation et ceux de la partie pratique ont montrés de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Chapitre III : Onduleur monophasé à trois niveaux

III.1 Introduction

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Différentes structures d'onduleurs existent, chacune adaptée à des applications spécifiques ou offrant des performances recherchées. Grâce aux avancées des composants d'électronique de puissance, de nouvelles structures plus performantes ont été développées, surpassant les structures classiques [43].

Dans ce chapitre, nous examinerons de manière approfondie la topologie d'un onduleur monophasé à trois niveaux de type NPC.

III.2 Modélisation de l'onduleur monophasé à trois niveaux de type NPC

III.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux

L'onduleur monophasé à trois niveaux de structure NPC (Figure III-1) se compose de deux bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras est composé de quatre interrupteurs en série et de deux diodes médianes. Chaque interrupteur comprend un transistor et une diode montée en inverse. Le point médian de chaque bras est connecté à une alimentation continue. Grâce à un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de capacité égale, on obtient deux sources secondaires de tension continue, chacune délivrant une demi-tension. Ces sources sont connectées entre elles en un point neutre noté M , et elles sont identiques pour éviter tout déséquilibre de charge ($C_1 = C_2$) [44].

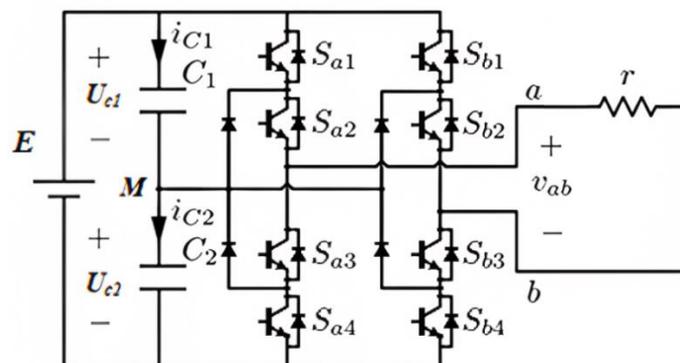


Figure III- 1: Onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux, nous présenterons la configuration d'un seul bras (Figure III-2).

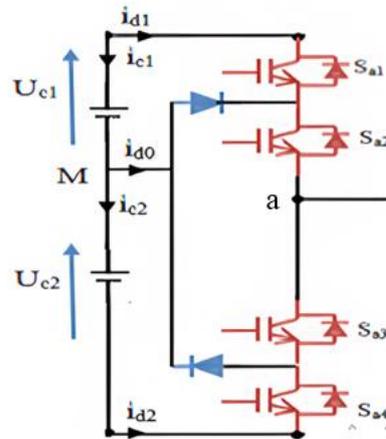


Figure III- 2:Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

III.2.2 Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur

La tension V_{aM} entre la borne a de la charge et le point milieu M est entièrement déterminée par l'état des quatre interrupteurs bidirectionnels (S_{kn}) du bras de l'onduleur. Cette tension doit prendre l'une des trois valeurs de potentiel (U_{c1} , $-U_{c2}$, 0), d'où le nom d'onduleur monophasé à trois niveaux.

III.2.3 Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur

En fonction de la configuration des interrupteurs commandés, chaque tension simple V_{aM} et V_{bM} entre les points (a, b) et le point milieu M du bus continu peut prendre les valeurs U_c , 0 ou $-U_c$. Une analyse topologique d'un bras d'onduleur montre cinq configurations électriques possibles (Figure III-3) [45]:

- Configuration C0: (0 0 0 0) Les interrupteurs (S_{a1} , S_{a2}) et (S_{a3} , S_{a4}) sont bloqués et la tension de sortie V_{aM} est imposée par la charge; cette configuration est indésirable pour la commande de l'onduleur.
- Configuration C1: (1 1 0 0) Les interrupteurs (S_{a1} , S_{a2}) sont passants et (S_{a3} , S_{a4}) sont bloqués et la tension de sortie: $V_{aM}=U_{c1}= U_c$
- Configuration C2:(01 0 0) L'interrupteur S_{a2} est passant et (S_{a1} , S_{a3} , S_{a4}) sont bloqués et la tension de sortie : $V_{aM}=0$
- Configuration C3:(0 0 1 1) Les interrupteurs (S_{a1} , S_{a2}) sont bloqués et (S_{a3} , S_{a4}) sont passants et la tension de sortie: $V_{aM}=-U_{c2}=- U_c$

- Configuration C4: (0 0 1 0) L'interrupteur S_{a3} est passant et (S_{a2}, S_{a1}, S_{a4}) sont bloqués et la tension de sortie : $V_{aM}=0$

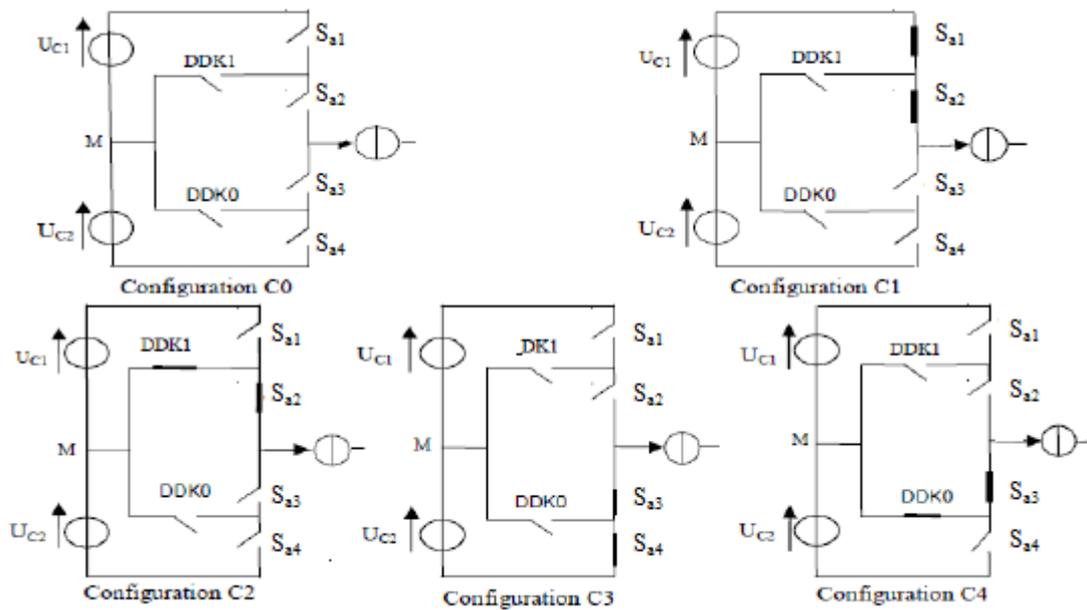


Figure III- 3: Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur

III.2.4 Commande complémentaire

Pour éviter les courts-circuits entre les sources de tension causés par la conduction simultanée de plusieurs interrupteurs et de garantir une commande complète du convertisseur, une stratégie de commande complémentaire est adoptée.

$$\begin{cases} Bk1 = \overline{Bk3} \\ Bk2 = \overline{Bk4} \end{cases} \quad (III.1)$$

Avec B_{kn} , commande de base du transistor S_{kn} d'un bras k [46].

III.2.5 Fonction de connexion

Les fonctions de connexion F_{kn} sont utilisées pour représenter l'état ouvert ou fermé de chaque interrupteur S_{kn} . Chaque interrupteur S_{Kn} (avec K appartenant à l'ensemble (a, b) et n appartenant à l'ensemble (1, 2, 3, 4)) est considéré comme idéal et introduit une fonction de connexion F_{kn} correspondante.

a) Relation entre les fonctions de connexion

Ainsi les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K3} \\ F_{K2} = 1 - F_{K4} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

b) Relation entre les fonctions des demi-bras

: La fonction de connexion du demi-bras est définie par F_{Km}^b , où K est le chiffre associé au bras. On utilise la variable m, qui est égale à 1 pour le demi-bras du haut et 0 pour le demi-bras du bas. Les fonctions de connexion des demi-bras pour un bras K sont exprimées en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs de la manière suivante :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

F_{k1}^b est associé au demi-bras du haut (la paire (S_{a1}, S_{a2})).

F_{K0}^b est associé au demi-bras du bas (la paire (S_{a3}, S_{a4})) [47].

III.2.6 Modélisation aux valeurs instantanées

Le système suivant donne les potentiels des nœuds a et b de l'onduleur monophasé à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée :

$$V_{aM} = F_{a1}F_{a2}U_{C1} - F_{a3}F_{a4}U_{C2} = (F_{a1}F_{a2} - F_{a3}F_{a4})U_C \quad (\text{III.4})$$

$$V_{bM} = F_{b1}F_{b2}U_{C1} - F_{b3}F_{b4}U_{C2} = (F_{b1}F_{b2} - F_{b3}F_{b4})U_C$$

D'après le système (III.4), il est évident que l'onduleur de tension à trois niveaux peut être représenté comme l'équivalent de deux onduleurs à deux niveaux connectés en série.

$$\begin{cases} F_{a1}^b = F_{a1}F_{a2} \\ F_{a0}^b = F_{a3}F_{a4} \end{cases}, \quad \begin{cases} F_{b1}^b = F_{b1}F_{b2} \\ F_{b0}^b = F_{b3}F_{b4} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

En introduisant l'expression de cette dernière dans les tensions d'entrée on aboutit à [4] :

$$V_{aM} = F_{a1}^b U_{C1} - F_{a0}^b U_{C2} = (F_{a1}^b - F_{a0}^b) U_C$$

$$V_{bM} = F_{b1}^b U_{c1} - F_{b0}^b U_{c2} = (F_{b1}^b - F_{b0}^b) U_c$$

(III.6)

Les tensions de sortie est donnée par :

$$V_{ab} = V_{aM} - V_{bM} = (F_{a1}F_{a2} - F_{b1}F_{b2})U_{C1} - (F_{a3}F_{a4} - F_{b3}F_{b4})U_{C2} \quad (\text{III.7})$$

La tension de sortie de l'onduleur monophasé à trois niveaux présent cinq niveaux de tension et neuf états de commutations comme présenté dans le tableau suivants :

Tableau III- 1: Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur

Etat	Sa ₁	Sa ₂	Sb ₁	Sb ₂	V _{aM}	V _{bM}	V _{ab}
1	1	1	1	1	U _{c1}	U _{c1}	0
2	1	1	0	1	U _{c1}	0	U _{c1}
3	1	1	0	0	U _{c1}	-U _{c2}	U _{c1} +U _{c2}
4	0	1	1	1	0	U _{c1}	-U _{c1}
5	0	1	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	-U _{c2}	U _{c2}
7	0	0	1	1	-U _{c2}	U _{c1}	-U _{c1} -U _{c2}
8	0	0	0	1	-U _{c2}	0	-U _{c2}
9	0	0	0	0	-U _{c2}	-U _{c2}	0

III.3 Stratégie de commande

Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux peuvent être classées de la manière suivante :

- Commande à pleine onde
- Commande à modulation de largeurs d'impulsions (MLI)

Dans notre cas, nous avons choisi la commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI) triangulo-sinusoidale. Cette méthode consiste à comparer une onde modulante basse

fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les moments de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [48].

Pour générer les impulsions de commande MLI de ce convertisseur, deux porteuses triangulaires sont nécessaires (Fig. III-4). Ces porteuses ont la même fréquence F_s et la même amplitude A_p . Ensuite, elles sont comparées aux deux signaux (sinusoïdaux) d'amplitude A_m et de fréquence F_m . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire [49].

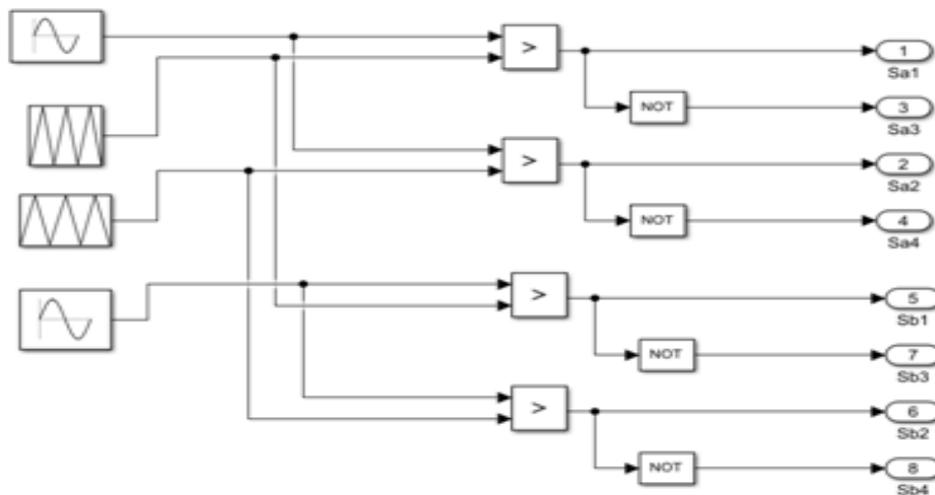


Figure III- 4: schéma de principe de la technique MLI

III.4 Simulation de l'onduleur avec la commande MLI

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel «MATLAB Simulink». L'onduleur monophasé de trois niveaux est commandé selon le principe de la MLI, avec une valeur de tension continue $E=100V$ générée par une batterie, la fréquence de la porteuse $F_s=1KHz$. L'onduleur alimente une charge $R=100\Omega$).

La Figure III.5 présente les résultats de simulation :

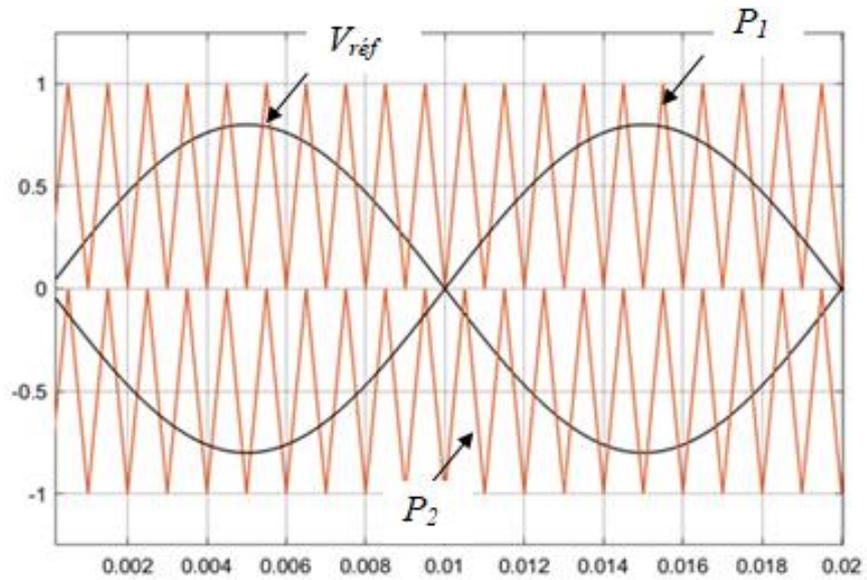


Figure III- 5 : Technique MLI

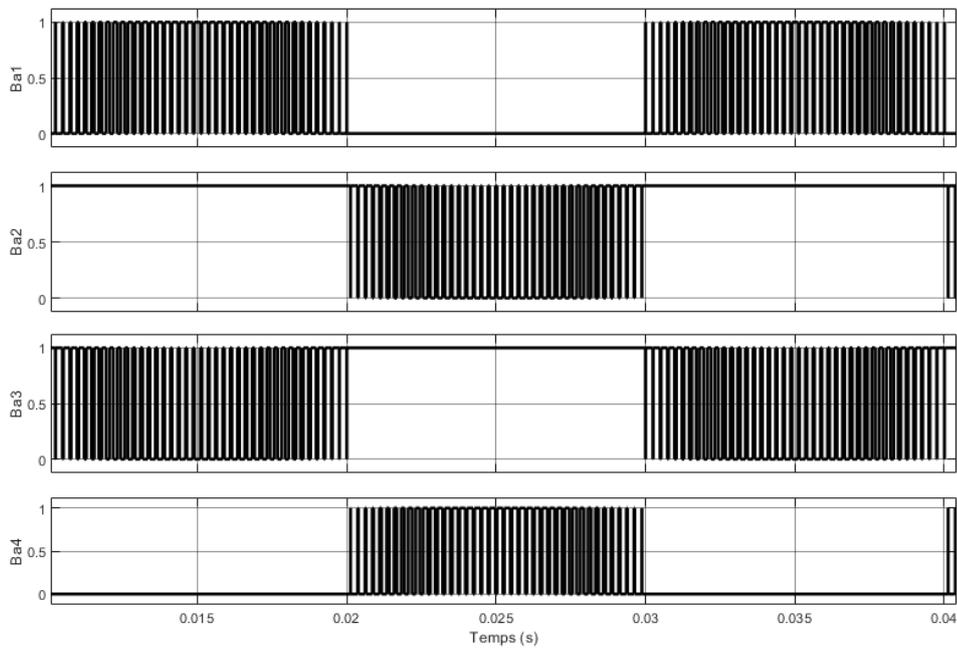


Figure III- 6 : signaux de commande des transistors du bras B

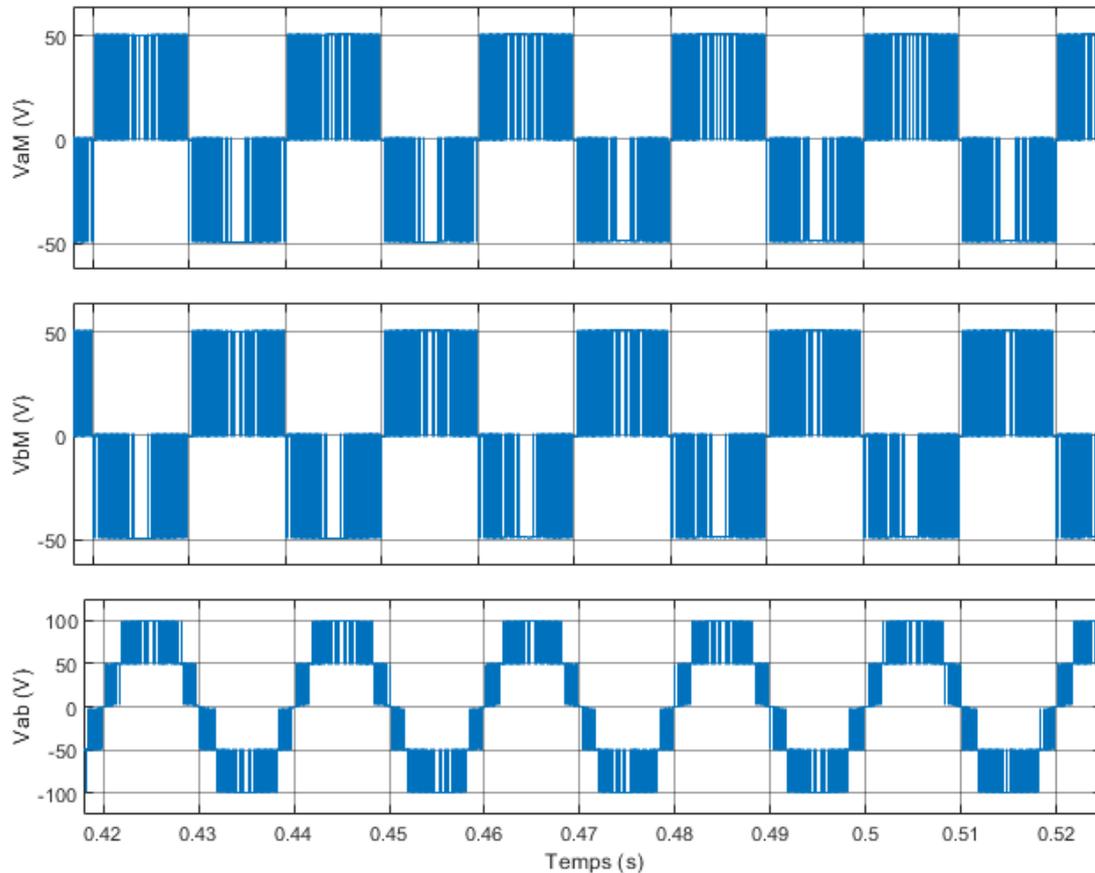


Figure III- 7 : tension du bras $V_{aM}(V)$, tension du bras $V_{bM}(V)$ et tension de sortie $V_{ab}(V)$

La figure III-5 (a) montre le principe de fonctionnement de la stratégie MLI qui est appliquée à notre l'onduleur. Les deux signaux (sinus) est comparé à deux porteuses triangulaires, ainsi la commande des interrupteurs S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} et S_{a4} est déterminée dans la figure III-6. Quand la valeur instantanée du signal triangulaire est inférieure à celui du signal sinusoïdal, la valeur du signal de sortie est "1", sinon elle prend la valeur "0". Cette algorithmne nous permet d'obtenir les tensions alternatives V_{aM} et V_{bM} des bras a et b montré respectivement dans la figure III-7 aussi La tension de sortie à cinq niveaux V_{ab} de l'onduleur.

III.5 Etude comparatif entre les onduleurs à deux et à trois niveaux :

Le taux de distorsion harmonique (THD) est un paramètre essentiel indiquant la qualité de l'onde de sortie d'un onduleur. Les figures suivantes montrent les tensions de sorties des onduleurs à deux et à trois niveaux avec leur analyse spectrales.

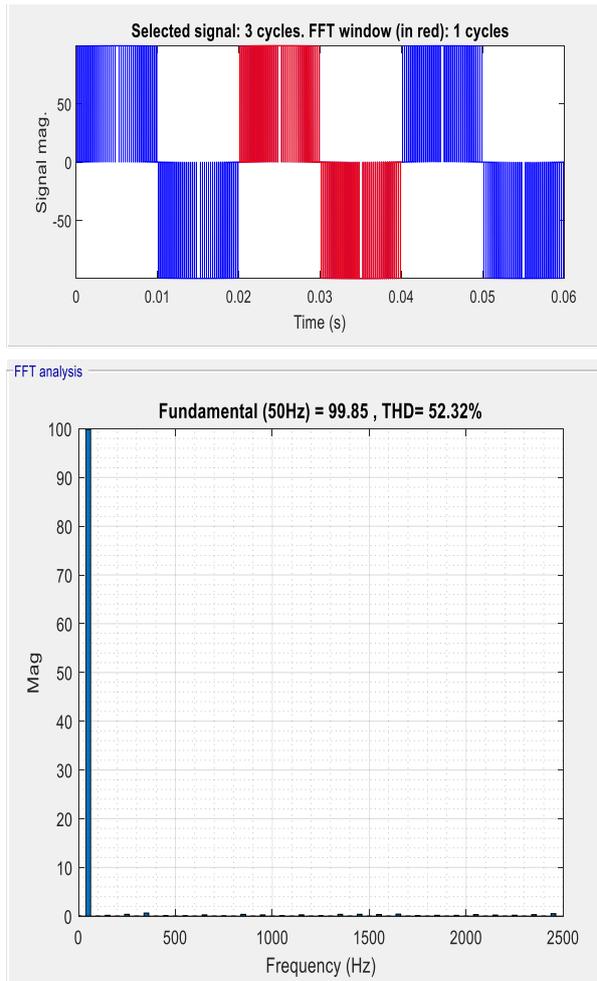


Figure III- 8 : Tension de sortie de l'onduleur deux niveaux avec analyse spectrale

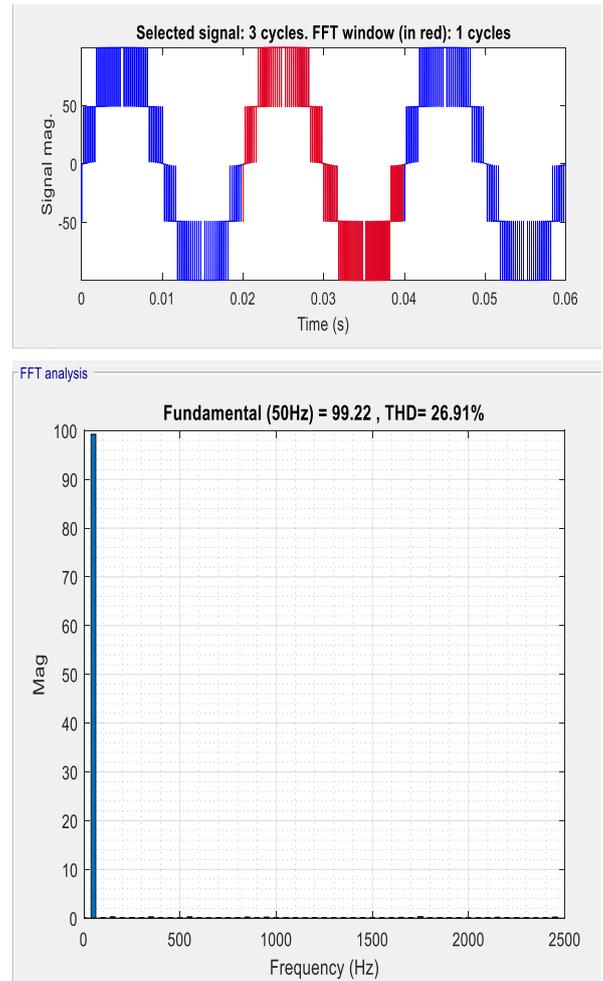


Figure III- 9 Tension de sortie de l'onduleur trois niveaux avec analyse spectrale

On peut observer que le THD de la tension de l'onduleur à trois niveaux est inférieur à celui de l'onduleur à deux niveaux, ce qui indique une meilleure qualité de l'onde de sortie et une réduction des distorsions harmoniques. Cela rend l'onduleur à trois niveaux plus adapté aux applications nécessitant une tension de sortie plus propre et une performance améliorée en termes de qualité de l'énergie électrique.

III.6 Banc expérimental

III.6.1 Description

Une fois, l'étude théorique terminée et les simulations effectuées, nous avons procédé à la l'expérimentation pour valider les résultats de simulation. Le banc d'essai expérimental (figure III-10) se compose des éléments suivants :

1. Ordinateur
2. Carte PCIe6351
3. Onduleur monophasé à trois niveaux
4. Deux alimentations stabilisées (30V ,30V)
5. Oscilloscope

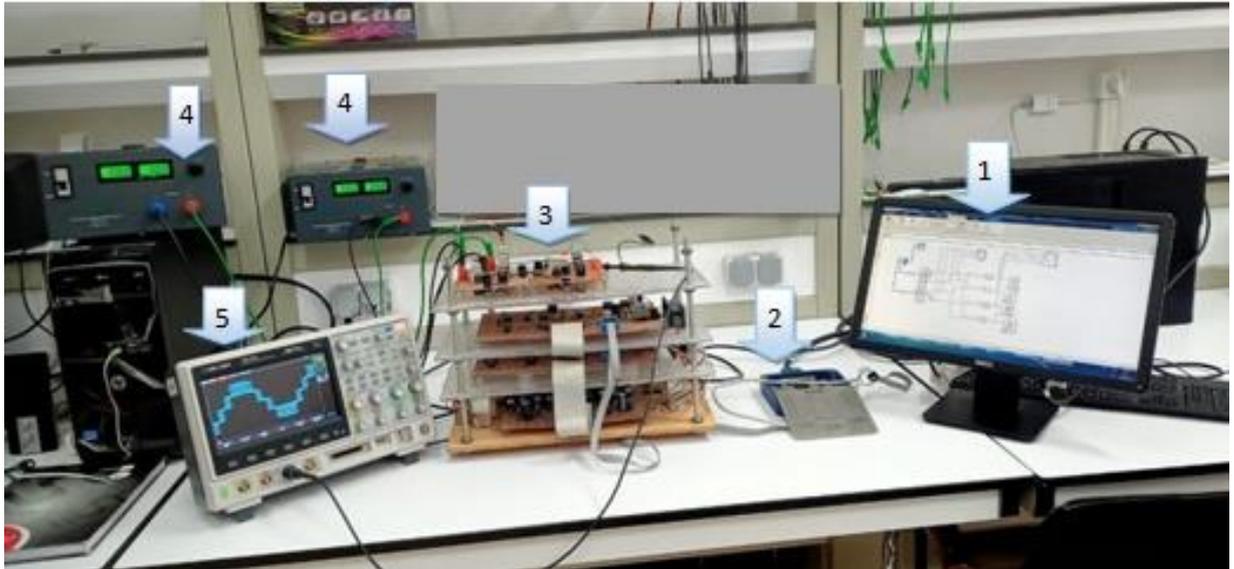


Figure III- 10: Banc expérimental

III.6.2 Appareils utilisés dans le montage expérimental

1) Alimentation stabilisée

Une Alimentation stabilisée est un dispositif électronique, utilisant un éventuel redressement à l'aide de diodes suivi d'un filtrage capacitif, permettant le réglage de la tension de sortie désirée. Comme montre la figure suivant :

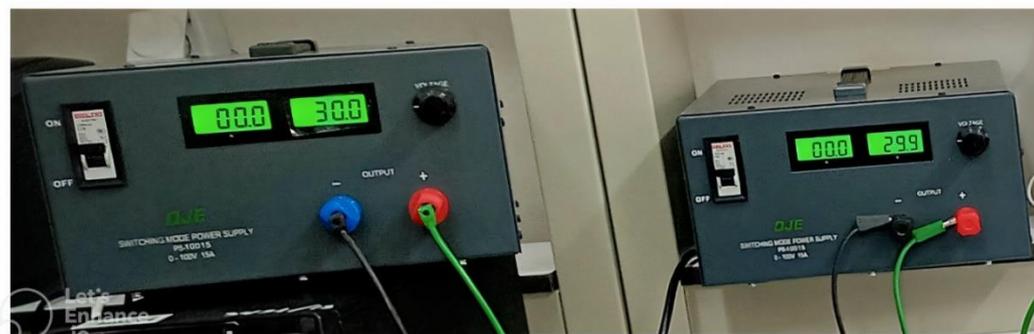


Figure III- 11: Deux Alimentations stabilisées

2) Carte PCIe 6351

Dans le but de généré les signaux de commande de l’algorithme réalisé sous Matlab/Simulink, nous avons utilisé la carte de commande PCIe-6351 (figure III-13) fabriquée par National Instruments. Les figures ci-après présentent l’algorithme de commande ainsi que la carte utilisée.

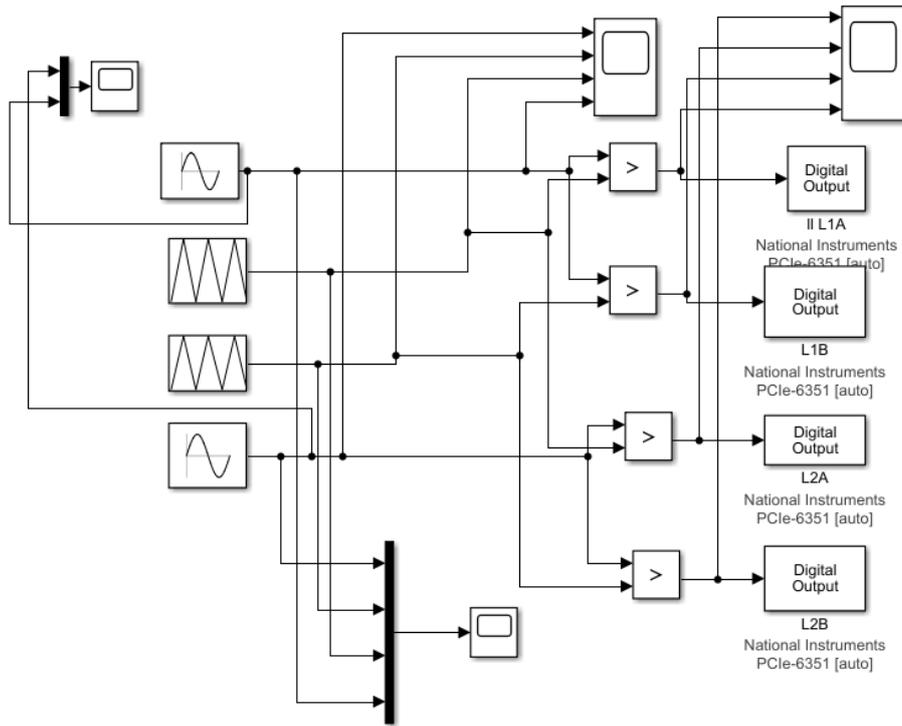


Figure III- 12: Commande MLI sous Matlab/Simulink



Figure III- 13: Carte d'acquisition et de commande PCIe 6351

3) Onduleur monophasé

La Figure III-14 montre l'onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC utilisé.

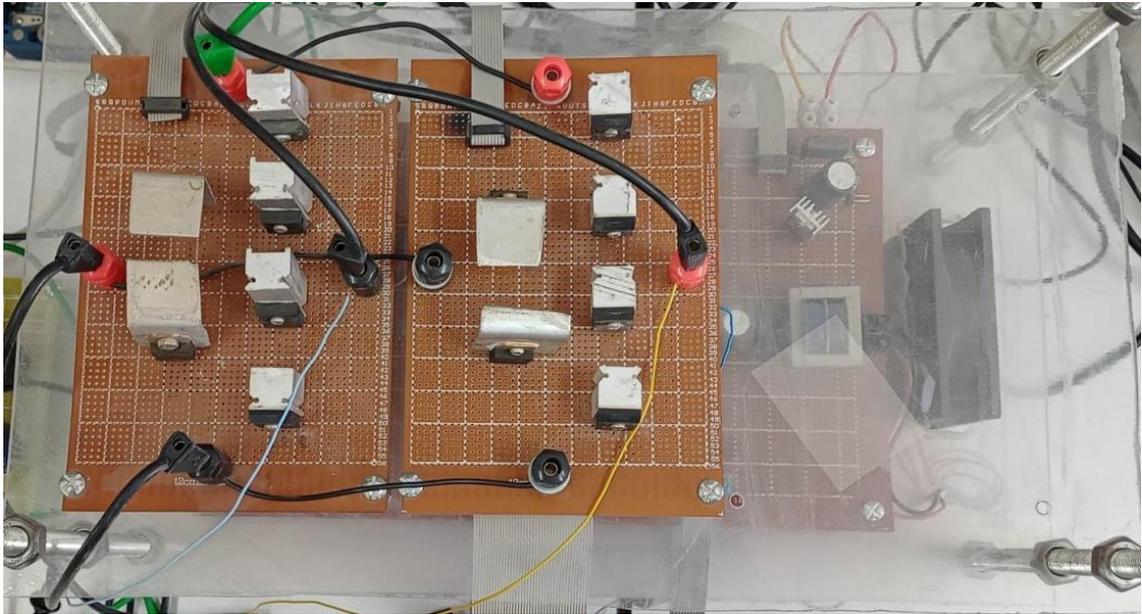


Figure III- 14: Partie de puissance d'un Onduleur monophasé trois niveaux structure NPC

III.7 Résultats expérimentaux

D'après le résultat montré dans la figure III-15, on peut distinguer que les tensions d'entrée 30V (DC) sont transformées en une tension sinusoïdale de 5 paliers de : 60, 30, 0, -30, -60. Pour visualiser cette tension, on a utilisé une sonde qui divise la tension par dix. Cette dernière a la même fréquence que la tension de référence, c'est-à-dire 50 Hz.



Figure III- 15: Tension de sortie de l'onduleur $V_{ab}/10$

La Figure III-16 montre l'état de commutation des interrupteurs (S_{a1} , S_{a2}).

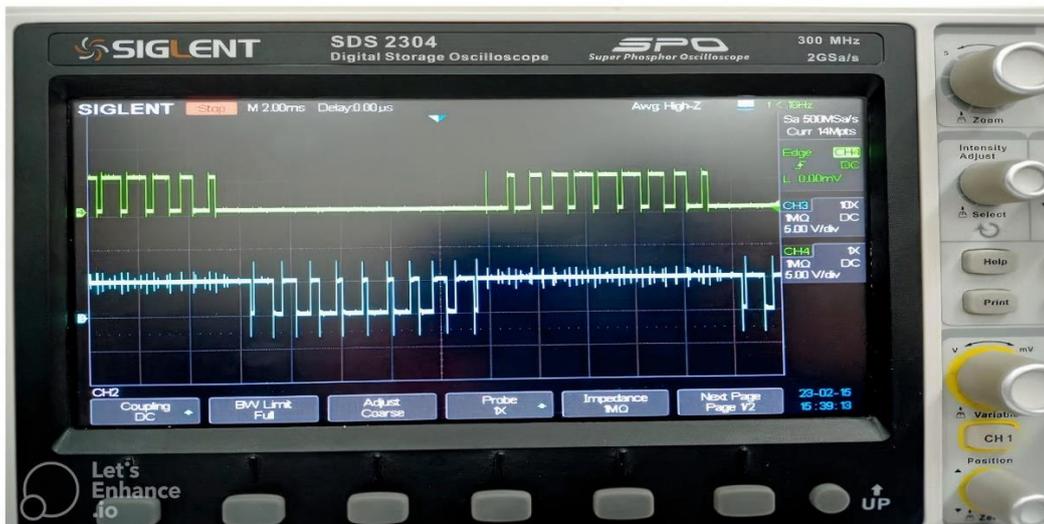


Figure III- 16: Signale de commande des interrupteurs à des instants différents

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la commande de l'onduleur monophasé à trois niveaux avec une structure NPC.

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur à trois niveaux a révélé que chaque interrupteur supporte une tension maximale équivalente à la moitié de celle supportée par l'onduleur à deux niveaux. Cette caractéristique permet d'augmenter la tension et la puissance dans le cas du nouveau convertisseur. Nous avons procédé à la simulation de notre onduleur et réalisé un test expérimental. La forme d'onde de la tension de sortie obtenue lors de l'expérimentation présente cinq niveaux de tension, ce qui est également identique à celle obtenue lors de la simulation.

Chapitre IV : Simulation et expérimentation de la chaîne de conversion

IV.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'élaboration d'une chaîne de conversion complète d'un système photovoltaïque. L'objectif de l'utilisation du hacheur est de produire une tension élevée au niveau du bus continu, ce qui permettra à l'onduleur de maintenir une tension appropriée du côté de la charge. Donc, nous allons simuler et implémenter la chaîne de conversion photovoltaïque monophasée en utilisant les deux convertisseurs que nous avons précédemment présentés pour alimenter une charge purement résistive.

IV.2 Description de la chaîne de conversion

Notre chaîne est constituée d'un panneau PV, d'un hacheur élévateur, d'un onduleur monophasé à trois niveaux de structure NPC et une charge résistive R comme présenté par la figure ci-dessous. Le convertisseur boost est commandé par l'algorithme MPPT présenté par la chapitre II. L'onduleur qui adapte la tension à la charge est contrôlé par la stratégie sinus tringle présentée dans le chapitre III.

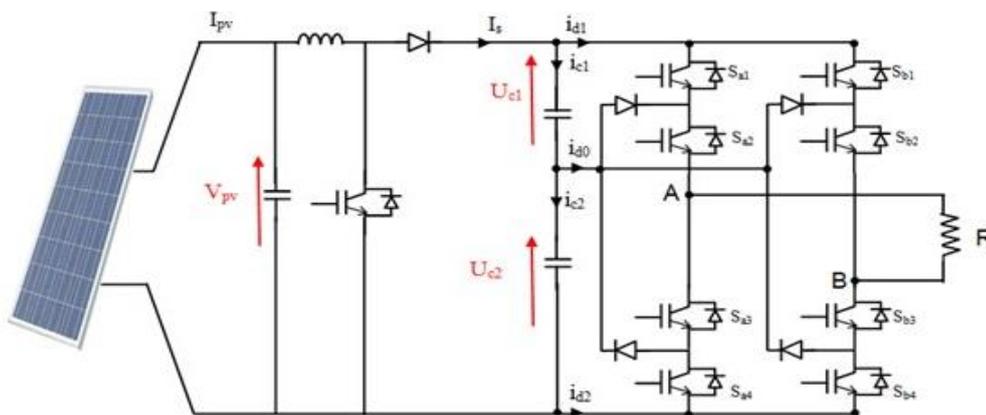


Figure IV- 1 : Schéma de cascade.

IV.3 Résultats de simulation

Les résultats de simulation sous le logiciel Matlab sont illustrés sur la figure IV-2.

- ✓ De $0 < t < 1$ & $2.3 < t < 3$ s : La valeur de rayonnement est fixé à 1000 W/m^2 et la tension générée par le GPV est 150V avec un courant de 8 A et une puissance de 1000 W . On peut voir que la tension de sortie est supérieure à celle de l'entrée avec une valeur de 380 V .
- ✓ De $1 < t < 2.3$ s : La valeur de rayonnement diminue de 1000 W/m^2 vers 900 W/m^2 , reste fixe pour une seconde après augmente à 1000 W/m^2 . Dans ce cas le courant I_{pv} diminue légèrement de 8A à 7.5A . La tension de sortie du GPV est toujours supérieure à celle d'entrée, ce qui indique que l'hacheur fonctionne correctement.

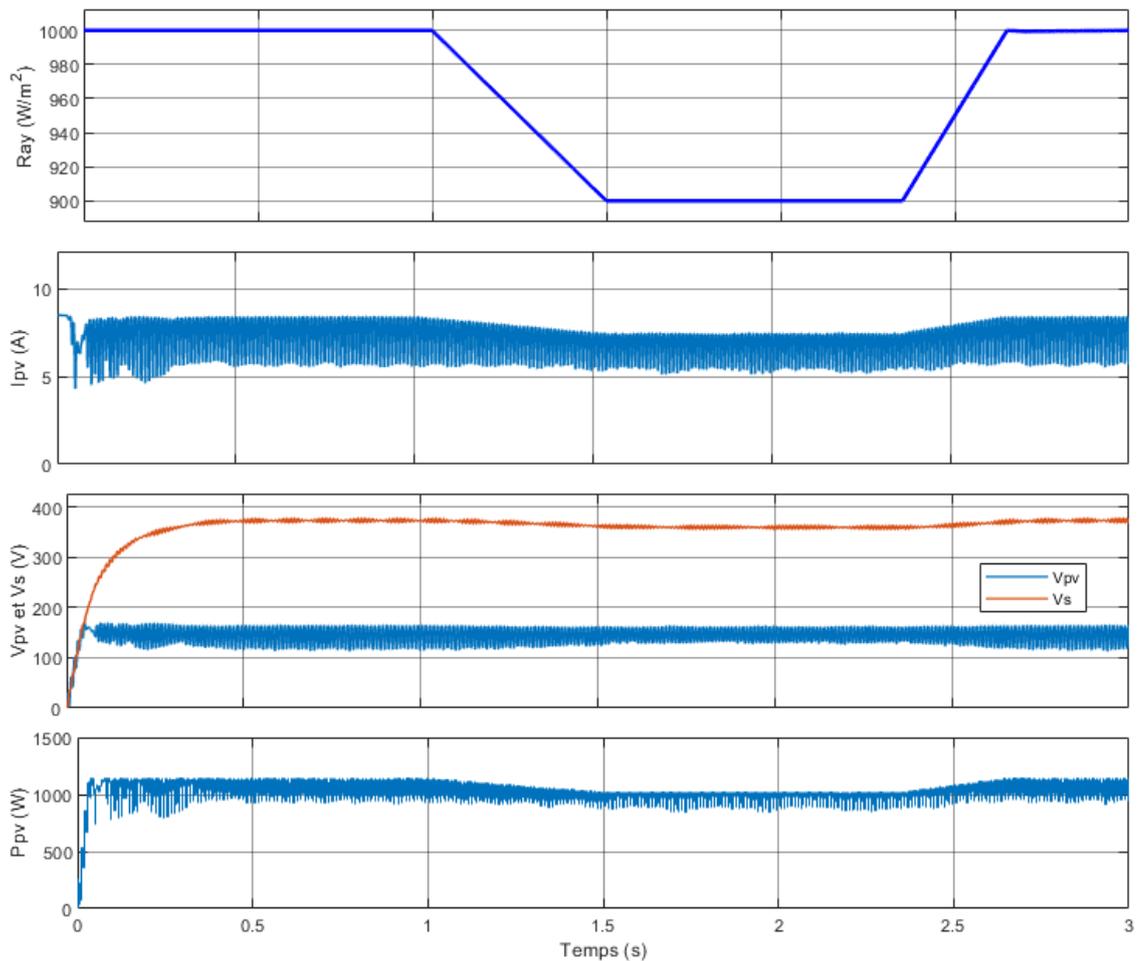


Figure IV- 2: Rayonnement solaire (W/m^2), Courant $I_{pv}(\text{A})$, Tensions $V_{pv}(\text{V})$ et $V_s(\text{V})$,
Puissance $P_{pv}(\text{W})$

La figure IV.3 illustre les tensions des bras ainsi que la tension de sortie de l'onduleur.

- ✓ La courbe (a) montre les trois paliers de tension de sortie V_{aM} au niveau du premier bras d'onduleur qui sont U_{c1} , 0 , $-U_{c2}$
- ✓ La courbe (b) montre les trois paliers de tension de sortie V_{bM} au niveau du deuxième bras d'onduleur qui sont U_{c1} , 0 , $-U_{c2}$.
- ✓ La courbe (c) montre les cinq paliers ($2U_{c1}$, U_{c1} , 0 , $-U_{c2}$, $-2U_{c2}$) de tension de sortie d'onduleur V_{ab} qui est le résultat de soustraction des tensions des deux bras $V_{ab} = V_{aM} - V_{bM}$.

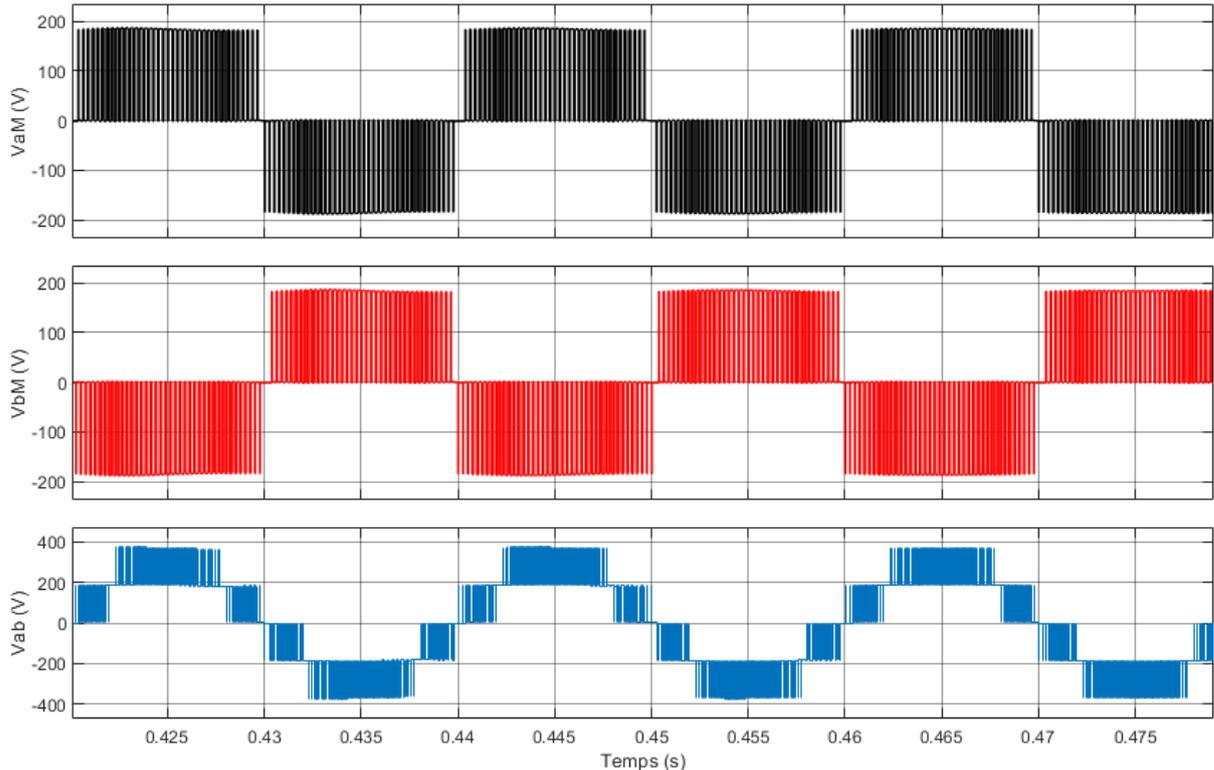


Figure IV- 3: tension de premier bras V_{aM} (V), tension de deuxième bras V_{bM} (V), tension de sortie de l'onduleur V_{ab} (V).

IV.4 Partie expérimentale

Dans cette partie, et pour réaliser cette chaîne de conversion photovoltaïque, nous avons utilisé les éléments des chaînes que nous avons vues dans les chapitres II et III (Figure IV.4).

La tension et le courant du module PV passent premièrement par la carte capteur dans le but de réduire leurs amplitudes. Après ils sont transmis vers la carte Arduino pour être traités par l'algorithme MPPT. Par la suite, l'ordre de commande est transmis au MOSFET après avoir été amplifié par la carte d'interface. Le convertisseur DC/DC qui a à sa sortie deux

condensateurs de filtrage qui ont les mêmes valeurs, va alimenter l'onduleur commandé par l'MLI S-T et qui alimente à son tour une charge résistive.

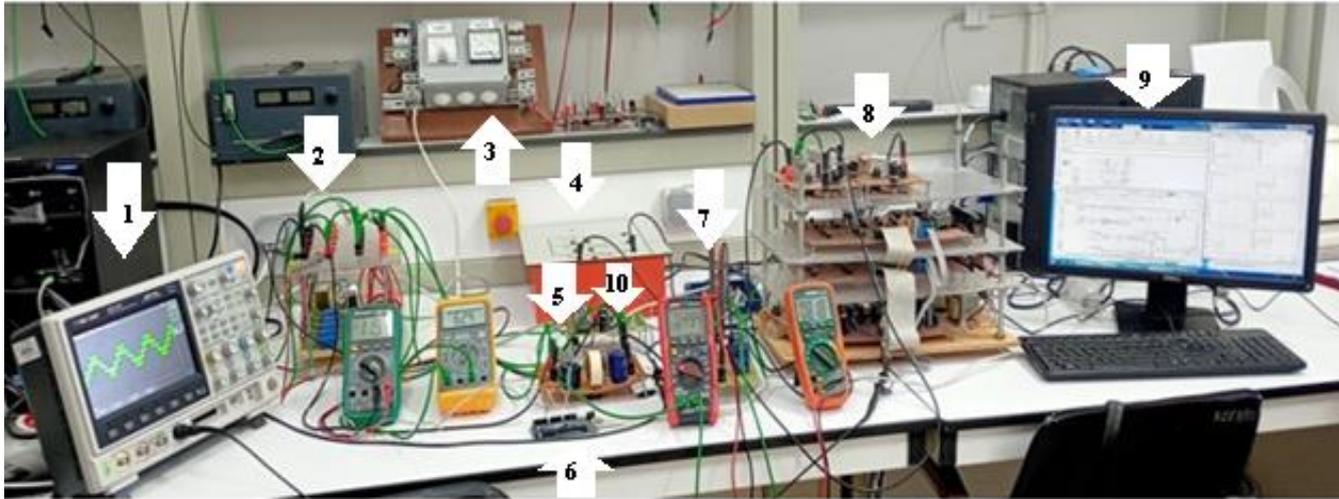


Figure IV- 4: banc expérimental

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 : oscilloscope | 6 : carte Arduino |
| 2 : carte capteur | 7 : Carte PCIe 6351 |
| 3 : Arrivée de module PV | 8 : Onduleur monophasé à trois niveaux |
| 4 : Charge Résistive | 9 : Ordinateur |
| 5 : Partie puissance du hacheur boost | 10 : Carte d'interface |

IV.5 Résultat expérimentaux

Premièrement, nous tenons à préciser que le test a été réalisé le 07/03/2023 à 09h52. La figure IV-5 montre le profil de rayonnement solaire réel pour cette journée mesurée par le pyranomètre installé à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (Annexe). Nous observons que le test a été réalisé avec une valeur de rayonnement équivalente à $600.489\text{W}/\text{m}^2$.

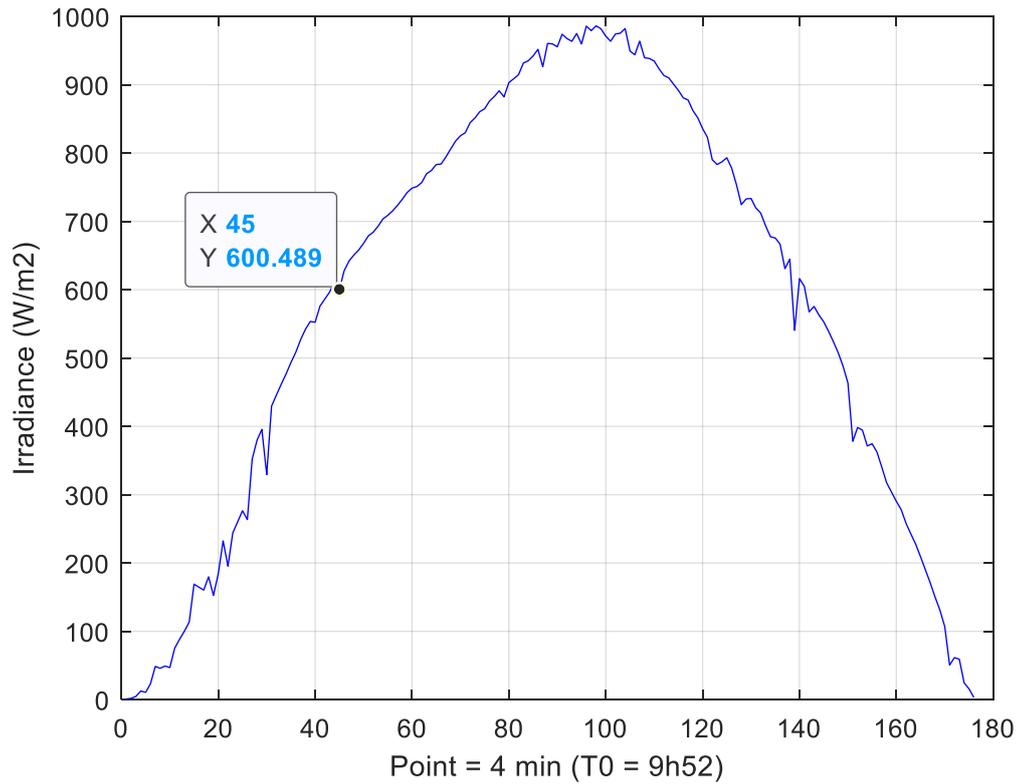


Figure IV- 5: Profil de rayonnement pour la journée de 07 Mars 2023

La figure IV-6 montre que la tension d'entrée était d'environ 10V et que la tension de sortie a atteint la valeur de 80V. Donc notre hacheur a réussi à élever la tension de sortie de panneau. D'une autre part la tension de sortie de l'onduleur est présentée dans la figure IV-6. Les cinq paliers de tension sont divisée par dix car nous avons utilisé une sonde /10. De plus, la fréquence de cette forme d'onde est identique au signal de référence (50Hz). La figure IV-7 montre l'ordre de commande d'un transistor de l'onduleur.

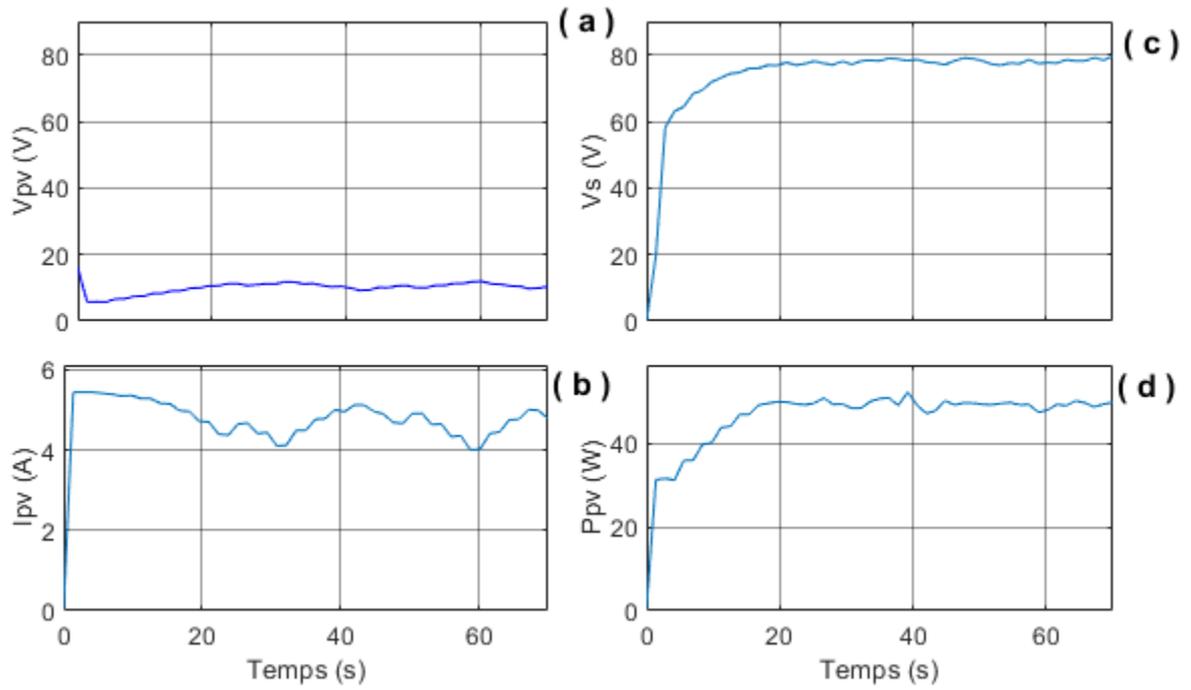


Figure IV- 6: (a) tension de GPV(V), (b) courant de GPV(A), (c) tension de sortie du hacheur(V), (d) puissance de GPV(W)



Figure IV- 7: Tension de sortie de l'onduleur

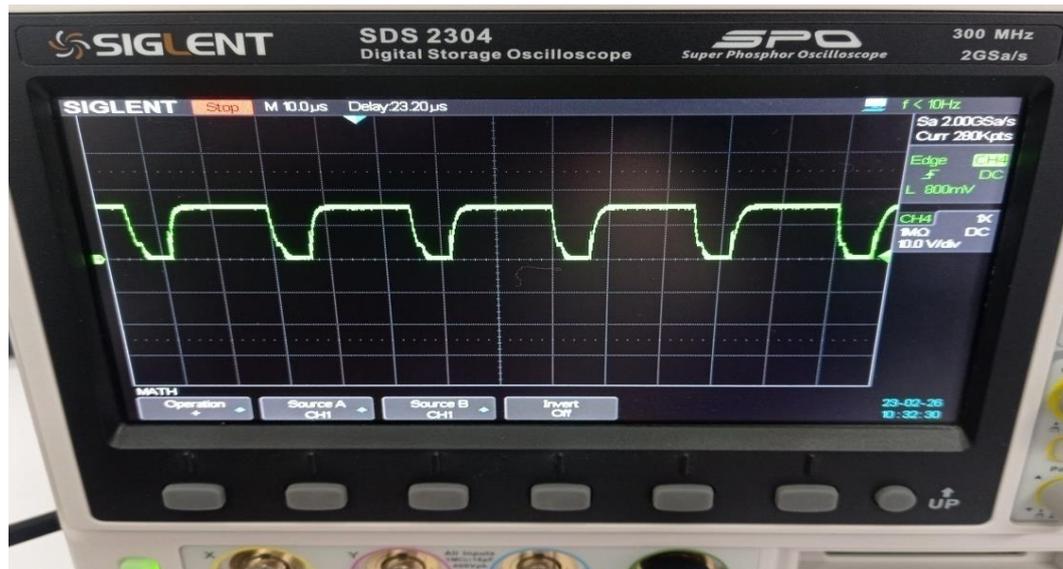


Figure IV- 8: Ordre de commande du transistor de boost

IV.6 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré la simulation ainsi qu'à l'expérimentation de notre chaîne de conversion photovoltaïque. Les résultats de simulation ont montrés un bon fonctionnement de l'algorithme MPPT appliqué au boost ainsi que la stratégie sinus triangle appliqué à l'onduleur. Dans le test expérimental, le contrôle 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 trois niveaux. La tension de sortie de l'onduleur est semblable à celle obtenue par simulation.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à la conversion de l'énergie solaire en une énergie électrique utilisable afin de répondre aux besoins d'une charge fonctionnant en courant alternatif. Pour atteindre cet objectif, nous avons développé une configuration à deux étages de conversion comprenant un hacheur élévateur et un onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC. Pour réaliser cet objectif, nous avons structuré notre travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la définition des onduleurs ainsi que leurs classifications. Par la suite, nous avons présenté la description des principales topologies des convertisseurs multi-niveaux ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons terminé par présenter les domaines d'applications de ces structures.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la simulation d'un système PV en utilisant un boost avec une commande MPPT. Ensuite nous avons implémenté l'algorithme MPPT au banc expérimental. Les résultats de simulation et ceux de la partie pratique ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la modélisation et la commande de l'onduleur monophasé à trois niveaux à structure NPC. L'analyse topologique d'un bras d'onduleur à trois niveaux a montré que chaque interrupteur supporte une tension maximale égale à la moitié par rapport à celle supportée par l'onduleur à deux niveaux. C'est cette caractéristique qui permet de monter en tension et en puissance dans le cas du nouveau convertisseur. Nous avons simulé notre onduleur et effectué un test expérimental. La forme d'onde de la tension de sortie obtenue dans la partie pratique présente cinq paliers de tensions et aussi identique à celle obtenue dans la simulation.

Le dernier chapitre a été consacré à la simulation ainsi qu'à l'expérimentation de notre chaîne de conversion photovoltaïque. Les résultats de simulation ont montré un bon fonctionnement de l'algorithme MPPT appliqué au boost ainsi que la stratégie sinus triangle appliqué à l'onduleur. Dans le test expérimental, le contrôle 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 trois niveaux. La tension de sortie de l'onduleur est semblable à celle obtenue par simulation.

Comme perspective, nous proposons d'améliorer les performances de chaîne de conversion photovoltaïque proposée par l'application de stratégies de commande intelligentes dans le but d'améliorer son rendement, ainsi que l'introduction de filtre passif à la sortie de l'onduleur pour améliorer la forme d'onde de la tension de sortie.

Références

- [1] M. Adouane, M. Haddadi , A. Malek et al, Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC 16F876A, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 ,543 – 550,2009.
- [2] Frank Vignola, Fotis Mavromatakis, performance of PV inverters, Conference Paper ,2008
- [3] Rachid Taleb, M'hamed Helaimi, Djilali Benyousef ,Zinelaabidine reOudjema ,Commande par MLI pré-calculée d'un onduleur asymétrique. Application à la commande vectorielle d'une MAS de forte puissance, International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET).Vol.4 pp.57-61.2015.
- [4] Khaled Saidoun, Mourad Si Moussi, Commande MLI d'un onduleur multi-niveaux, thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [5] Mohamed Merah, Mohamed Zakaria Kari, Conception, simulation et réalisation d'un onduleur assisté (Grid-Tie Inverter), mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2015.
- [6] Mahamat Chabakata, Analyse et commandes des convertisseurs multi-niveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique, thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay, 2018.
- [7] Mohammed Souleymene, Guerbouz, Ismail Salahi, Etude, Modélisation et commande d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC, mémoire de master, Université Ahmed Draya d'ADRAR, 2021.
- [8] Kevin Guepratte. Onduleur triphasé à structure innovante pour application aéronautique, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [9] Zeroual Yamina, Techniques de commande des convertisseurs appliquées aux onduleurs multi-niveaux, mémoire de master, Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2016.
- [10] Rami Troudi, Étude, conception et structure de commande temps réel d'un onduleur multiniveau à partir d'une seule source DC ; applications énergies renouvelables et véhicules électriques, thèse de doctorat, l'université de Poitier, France, 2021.

- [11] Jhalak Gubta, Elimination des harmoniques dans un onduleur à pont en H cascade à 11 niveaux, Editions Notre Savoir, 2019
- [12] Hanane Benattar, Nadja Abdellaoui, Etude et simulation d'un onduleur multi-niveaux pour système photovoltaïque, mémoire de master, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2020.
- [13] Deffaf Badreddine, Sekhri Mohammed Elhadj, Commande du system d'entrainement électrique en présence des défauts d'onduleur multi-niveaux, mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [14] Becker Florent, Contribution à la continuité de service des convertisseurs statiques multi-niveaux. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 2017.
- [15] Barbosa Peter, Steimer Peter, Steinke Jürgen, et al, Active-neutral-point-clamped (ANPC) multi level converter technology. In 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005.
- [16] Poorfakhraei Amirreza, Narimani Mehdi, Emadi Ali. A review of multilevel inverter topologies in electric vehicles: Current status and future trends. IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 2, p. 155-170, 2021.
- [17] Samimi Shabab, GRUSON François, DELARUE Philippe, et al, Représentation énergétique macroscopique et diagramme PQ des convertisseurs modulaires multi-niveaux. In Symposium de Génie Électrique 2014, 2014.
- [18] Tian, Kai, Wu, Bin, Narimani, Mehdi, et al, A capacitor voltage-balancing method for nested neutral point clamped (NNPC) inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no 3, p. 2575-2583, 2015.
- [19] Bouhadba Amine Abdelali, Boukertas Seddik, Étude et commande d'un système PV connecté au réseau utilisant un onduleur T-type à trois niveaux. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique, 2020.
- [20] Kahhoul Aymen, Louaifi Abdennour. Simulation et Implémentation en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Multi-niveaux par la Carte DSpace 1104. Université Mohamed Khider de Biskra mémoire de master. 2022.
- [21] Zouhaira Ben Mahmoud, Adelhedher, Onduleurs multi-niveaux de type NPC dédiés aux convertisseurs PV, Éditions universitaires européennes, 2022.

- [22] Mambrini Thomas, Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies, Thèse de doctorat. Université Paris-Sud,2014.
- [23] Benhadjer Abdeslam, Etude, Simulation et réalisation du redresseur aiguilleur et hacheur pour les trains électro-diesel, Mémoire de Magister, Ecole supérieure en sciences appliquées, Tlemcen, 2019.
- [24] Slama Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif,2018
- [25] Lakhdari Abd Elkader, Développement et implémentation d'une commande MPPT avancée pour systèmes photovoltaïques. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas - Sètif.2012
- [26] Bourezg Soheyb,Boubaya Djoudi, Etude de la dégradation d'un panneau photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université M'sila,2020.
- [27] Hacini Med Seif ,Naili Iyad,Etude et commande d'un système solaire photovoltaïque. Thèse de doctorat. Universitéde Ouargla,2022.
- [28] Degla Mohammed, Larbi Ben Ahmed Bachir, Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque, mémoire de Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla,2017
- [29] Djedid Meriem, Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV,mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidioum El Bouaghi ,2019.
- [30] Salim Arab, Dalila Toudert, Etude d'un système photovoltaïque, Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [31] Sarri Sofiane, Boutefaha Hocine, Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multi-niveaux, thèse de doctorat, Université de Jijel,2020.
- [32] Ahmed Mohamed Bella, Étude et modélisation d'un convertisseur BOOST pour une application Photovoltaïque en utilisant Matlab/Simulink, mémoire de licence professionnel, Université de Nouakchott Al-Asriya,2020.
- [33] Hanoun, Brahim. Etude et réalisation d'un hacheur Boost destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP, mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidioum El-Bouaghi ,2016.

- [34] Pradhan Arjyadhara, Panda Bhagabat, A simplified design and modeling of boost converter for photovoltaic sytem. International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 8, no 1, p. 141, 2018.
- [35] Kharef Fatima Zohra, Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage, Thèse de doctorat, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2021.
- [36] Abdelkhalek Chellakhi, ElbeidSaid, Abouelmahjoub Younes, Simulation et implémentation d'un système PV sous l'environnement Proteus avec nouvelle commande MPPT, littérature, vol. 3, p. 5-7,2019
- [37] Khelaif Atallah, Laiourat Kamel, Etude et réalisation d'un convertisseur DC/DC commandé en MPPT pour application photovoltaïque, mémoire de master, Universitéde Ghardaia, 2022.
- [38] Belhout Khaled, Sediki Mehdi, Conception, realisation et commande d'un convertisseur DC-DC multi-entrees multi sortiesb, mémoire de mastetr, Universite Dr. Yahia Fares De Medea, 2019.
- [39] Boucherit, H., Sahnine, S., Boukhelifa, A., et al. Realization of a photovoltaic chain with a chopper controlled by a microcontroller PIC 18F4550.In, 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). IEEE, p. 1-5, 2014.
- [40] <https://somonelec.ma/produit/metrix-digital-dt9205a/>
- [41] <https://www.gotronic.fr/art-arduino-mega-2560-12421.htm>
- [42] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Oscilloscope>
- [43] Mohammed Souleymene, Guerbouz Ismail Salahi, Etude Modélisation et commande d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC, mémoire de master, Université Ahmed Draya d'Adrar,2021.
- [44] Houria Ben Zemammouch, Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi-niveaux à base de GTO et d'IGBT, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba,2010
- [45] Guerfi Youcef, Régulation des onduleurs multi-niveaux par un régulateur à logique floue, Mémoire de magister, Université Badji Mokhtare- Annaba, 2009.

- [46] Badache Zohir, Saci Abdeslam, Etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur a trois niveaux à structure NPC pour la compensation des courants harmoniques, mémoire de master, Université de M'sila, 2006.
- [47] Dellalou Kheireddine, Stratégies de Commande Des Onduleurs Multi-niveaux (MLI ST et MLI Vectorielle, mémoire de master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019
- [48] Deffaf Badreddine, Sekhri Mohammed Elhadj, Commande du system d'entraînement électrique en présence des défauts d'onduleur multi-niveaux, mémoire de master. Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [49] Elferd Hamza, Zegaar Mourad, Fonctionnement en mode dégrade d'un onduleur multi-niveaux application au filtre actif parallèle, mémoire de master, Université de M'sila , 2017

Annexe

Date et heure	Ray (Wh/m ³)	Date et heure	Ray (Wh/m ³)	Date et heure	Ray (Wh/m ³)
07/03/2023 06:56	0,93582	07/03/2023 10:04	650,74099	07/03/2023 13:12	959,63627
07/03/2023 07:00	1,894752	07/03/2023 10:08	658,11787	07/03/2023 13:16	985,83404
07/03/2023 07:04	4,817826	07/03/2023 10:12	667,83442	07/03/2023 13:20	979,14458
07/03/2023 07:08	12,628008	07/03/2023 10:16	678,83335	07/03/2023 13:24	986,16911
07/03/2023 07:12	10,66392	07/03/2023 10:20	684,12497	07/03/2023 13:28	981,94626
07/03/2023 07:16	23,095476	07/03/2023 10:24	692,98076	07/03/2023 13:32	971,21884
07/03/2023 07:20	48,60567	07/03/2023 10:28	703,52334	07/03/2023 13:36	963,5531
07/03/2023 07:24	45,930996	07/03/2023 10:32	708,8668	07/03/2023 13:40	974,20541
07/03/2023 07:28	49,14864	07/03/2023 10:36	715,40609	07/03/2023 13:44	975,40119
07/03/2023 07:32	46,936152	07/03/2023 10:40	723,41845	07/03/2023 13:48	982,1831
07/03/2023 07:36	75,236526	07/03/2023 10:44	732,36668	07/03/2023 13:52	949,43453
07/03/2023 07:40	88,22844	07/03/2023 10:48	742,32596	07/03/2023 13:56	943,7675
07/03/2023 07:44	100,12852	07/03/2023 10:52	748,63996	07/03/2023 14:00	963,81884
07/03/2023 07:48	113,55384	07/03/2023 10:56	751,02001	07/03/2023 14:04	939,4292
07/03/2023 07:52	169,06271	07/03/2023 11:00	756,69277	07/03/2023 14:08	938,41826
07/03/2023 07:56	164,64352	07/03/2023 11:04	769,70779	07/03/2023 14:12	934,7211
07/03/2023 08:00	160,36294	07/03/2023 11:08	774,44473	07/03/2023 14:16	923,28314
07/03/2023 08:04	179,86525	07/03/2023 11:12	783,20228	07/03/2023 14:20	913,5551
07/03/2023 08:08	152,59898	07/03/2023 11:16	783,93598	07/03/2023 14:24	910,04861
07/03/2023 08:12	184,30756	07/03/2023 11:20	794,3515	07/03/2023 14:28	900,83459
07/03/2023 08:16	232,38187	07/03/2023 11:24	806,15342	07/03/2023 14:32	891,72463
07/03/2023 08:20	195,43361	07/03/2023 11:28	817,52209	07/03/2023 14:36	880,84125
07/03/2023 08:24	244,21268	07/03/2023 11:32	825,23405	07/03/2023 14:40	877,60627
07/03/2023 08:28	260,26051	07/03/2023 11:36	829,78036	07/03/2023 14:44	862,07258
07/03/2023 08:32	276,52784	07/03/2023 11:40	844,5053	07/03/2023 14:48	851,63972
07/03/2023 08:36	263,49548	07/03/2023 11:44	851,41444	07/03/2023 14:52	835,79974
07/03/2023 08:40	352,1111	07/03/2023 11:48	860,60524	07/03/2023 14:56	822,86561
07/03/2023 08:44	379,59116	07/03/2023 11:52	864,83965	07/03/2023 15:00	790,16332
07/03/2023 08:48	395,60432	07/03/2023 11:56	876,12165	07/03/2023 15:04	783,185
07/03/2023 08:52	329,24659	07/03/2023 12:00	882,82845	07/03/2023 15:08	787,20563
07/03/2023 08:56	429,54856	07/03/2023 12:04	891,12965	07/03/2023 15:12	793,12106
07/03/2023 09:00	445,90257	07/03/2023 12:08	882,22187	07/03/2023 15:16	777,89927
07/03/2023 09:04	461,67899	07/03/2023 12:12	903,1453	07/03/2023 15:20	753,43468
07/03/2023 09:08	476,62349	07/03/2023 12:16	908,74305	07/03/2023 15:24	724,49294
07/03/2023 09:12	493,35874	07/03/2023 12:20	914,66998	07/03/2023 15:28	732,92704
07/03/2023 09:16	508,30902	07/03/2023 12:24	931,73452	07/03/2023 15:32	733,5509
07/03/2023 09:20	526,88713	07/03/2023 12:28	935,06195	07/03/2023 15:36	719,54228
07/03/2023 09:24	542,1782	07/03/2023 12:32	942,11537	07/03/2023 15:40	712,17689
07/03/2023 09:28	553,46598	07/03/2023 12:36	951,80875	07/03/2023 15:44	693,72018
07/03/2023 09:32	552,37415	07/03/2023 12:40	926,36217	07/03/2023 15:48	677,53935
07/03/2023 09:36	575,89726	07/03/2023 12:44	960,49125	07/03/2023 15:52	675,68499
07/03/2023 09:40	586,28383	07/03/2023 12:48	959,68827	07/03/2023 15:56	666,58664
07/03/2023 09:44	596,57801	07/03/2023 12:52	955,50592	07/03/2023 16:00	630,79382
07/03/2023 09:48	612,33705	07/03/2023 12:56	973,9339	07/03/2023 16:04	644,73316
07/03/2023 09:52	600,48891	07/03/2023 13:00	967,5275	07/03/2023 16:08	540,45673
07/03/2023 09:56	627,80146	07/03/2023 13:04	963,54155	07/03/2023 16:12	616,33456
07/03/2023 10:00	641,98921	07/03/2023 13:08	974,97373	07/03/2023 16:16	604,84455

Date et heure	Ray (Wh/m²)
07/03/2023 16:20	567,52672
07/03/2023 16:24	575,57374
07/03/2023 16:28	563,16514
07/03/2023 16:32	552,99229
07/03/2023 16:36	539,10495
07/03/2023 16:40	524,0045
07/03/2023 16:44	507,55804
07/03/2023 16:48	487,94017
07/03/2023 16:52	463,51024
07/03/2023 16:56	378,04876
07/03/2023 17:00	398,33672
07/03/2023 17:04	394,44899
07/03/2023 17:08	371,23218
07/03/2023 17:12	374,60005
07/03/2023 17:16	362,20889
07/03/2023 17:20	340,10123
07/03/2023 17:24	317,25405
07/03/2023 17:28	303,78267
07/03/2023 17:32	290,27662
07/03/2023 17:36	278,19158
07/03/2023 17:40	258,14041
07/03/2023 17:44	242,45654
07/03/2023 17:48	227,51782
07/03/2023 17:52	209,06678
07/03/2023 17:56	190,09588
07/03/2023 18:00	170,93441
07/03/2023 18:04	150,13226
07/03/2023 18:08	130,96501
07/03/2023 18:12	106,80649
07/03/2023 18:16	50,63904
07/03/2023 18:20	61,510914
07/03/2023 18:24	59,159808
07/03/2023 18:28	24,551208
07/03/2023 18:32	15,862986
07/03/2023 18:36	3,25809