REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Projet de Fin de Cycle

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

Chaine de Conversion photovoltaïque à base d'une Commande Intelligente avec Convertisseur Z-source

Présentés par :

KERBOUCI Zakaria

BELAISSA Raid

Proposés et Dirigés par :

Mr. KADDOUR Benyoucef

Promotion 2024/2025

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre gratitude envers Allah pour nous avoir accordé le courage, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien cette tâche. Nous sommes reconnaissants envers nos chers parents pour leur soutien, leur patience, leur sacrifice et leur amour. Vous méritez toutes les louanges, car c'est grâce à vous que nous sommes devenus ce que nous sommes aujourd'hui. Nous aspirons à être à la hauteur de vos attentes. Que Dieu vous protège et vous bénisse. Nous souhaitons également remercier notre encadreur, le Dr KADDOUR Benyoucef et tous les jurys. Nous dédions également ce travail à nos chers pères et mères, frères et sœurs, pour leur affection et leur encouragement, ainsi qu'à tous nos amis et à tous ceux qui nous ont apporté leur aide. Ce travail est dédié à tous ceux que nous aimons.

Dédicace

Avant de penser aux ‘’dédicaces’’, je veux Dédier ce simple travail à le

Person qui Était, et reste l’exemple qui m’inspire toujours : à mon père

M. BELAISSA Ahmed

A ma chère Mère

*A mes grands-pères **FERGANI Ahmed**, **BELAISSA Abdelkader***

*A mes frères **Ziad**, **Ibrahim***

A mes sœurs

A tous ma famille

A toute la promo du juin 2025 spécialement l’Automatique et systemes et à tous les gens que je connais.

*Je voudrais ainsi dédier tout mon parcours universitaire à un monsieur assez spéciale à **Mr.Annabi** Ahmed qui m’a tant appris et aidé..*

BELAISSA Raid

Dédicace

Avant de penser aux ‘’dédicaces’’, je veux Dédier ce simple travail à le Person qui Était, et reste l’exemple qui m’inspire toujours : à mon père

M. KERBOUCI Abdesselem

A ma chère mère

A mes grands-pères ***BOUKTAB Belkhir, KERBOUCI Tayeb***

A mes frères ***Yazid***, ***Abdelwadoud***

A mes sœurs

Pour leur amour et leur confiance, et pour tous les efforts, A toute la promo du juin 2025 spécialement l'Automatique et systèmes et à tous les gens que je connais et chaque personne nous aidé.

Je voudrais ainsi dédier tout mon parcours universitaire spécialement à ma famille qui m’a tant appris et pour leurs sacrifices.

KERBOUCI Zakaria

ملخص

في ظل الارتفاع المستمر لتكاليف الطاقة التقليدية وتناقص مواردها، تبرز الطاقة الكهروضوئية كحل واعد ومستدام، لما تتميز به من وفرة طبيعية ونظافة بيئية، مما يجعلها خيارًا استراتيجيًا لمواجهة التحديات الطاقوية الراهنة.

الهدف من هذا المشروع هو تصميم وتحسين سلسلة تحويل كهروضوئية تتضمن محول Z-Source، قادر على رفع وخفض الجهد في نفس الهيكل دون مكونات إضافية، وبالتالي تبسيط البنية وزيادة مرونة النظام. وبالاقتران مع عاكس متعدد المستويات، فإنه يحسن من جودة جهد الخرج ويقلل من خسائر التحويل. ويكمن الابتكار الرئيسي في استخدام التحكم الذكي القائم على الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA)، مما يتيح تتبعًا أكثر فعالية لنقطة الطاقة القصوى (MPP) واستقرارًا أكبر في مواجهة التغيرات في الإشعاع الشمسي. ويؤدي هذا المزيج إلى حل عالي الأداء وموثوق به ومناسب تمامًا للأنظمة الكهروضوئية المستقلة أو تلك التي تخضع لظروف بيئية متغيرة.

الكلمات المفتاحية: سلسة التحويل، محول الطاقة من نوعZ، محولات متعددة المستويات،PSPWM ،RNA .

Abstract

Due to the ever-increasing costs and diminishing resources of conventional energy, photovoltaic energy is emerging as a promising, sustainable solution. Its natural abundance and cleanliness make it a strategic choice for addressing current energy challenges.

This project aims to design and optimize a PV conversion chain that includes a Z-source converter. This converter can raise and lower voltage within the same structure, eliminating the need for additional components and simplifying the system's architecture while increasing its flexibility. Combined with a multilevel inverter, the converter improves the quality of the output voltage and minimizes switching losses. The project's key innovation is its use of intelligent control based on artificial neural networks (ANN), which enables more effective maximum power point tracking (MPPT) and greater stability in the face of changes in solar irradiance. This combination results in a high-performance, reliable solution well-suited for standalone PV systems or those subject to changing environmental conditions.

Keywords : conversion chain, Z-source converter, multilevel converters, PSPWM, RNA.

Résumé

Face à l'augmentation constante des coûts de l'énergie conventionnelle et à la diminution des ressources, l'énergie photovoltaïque apparaît comme une solution prometteuse et durable, en raison de son abondance naturelle et de sa propreté environnementale, ce qui en fait un choix stratégique pour relever les défis énergétiques actuels.

Ce projet a pour objectif de concevoir et d'optimiser une chaîne de conversion photovoltaïque intégrant un convertisseur Z-Source, capable d'élever et d'abaisser la tension dans une même structure sans composants supplémentaires, simplifiant ainsi l'architecture et renforçant la flexibilité du système. Couplé à un onduleur multiniveau, il permet d'améliorer la qualité de la tension de sortie et de réduire les pertes de commutation. L'innovation principale réside dans l'utilisation d'une commande intelligente basée sur les réseaux de neurones artificiels (RNA)**,** permettant un suivi plus efficace du point de puissance maximale (MPPT) et une meilleure stabilité face aux variations de l'ensoleillement. Cette combinaison aboutit à une solution performante, fiable et bien adaptée aux systèmes photovoltaïques autonomes ou soumis à des conditions environnementales variables.

Mots clés : chaine de conversion, convertisseur Z source, convertisseurs multiniveaux, PSPWM, RNA.

Table des matières

LISTE DES FIGURES **VIII**

LISTE DES TABLEAUX **XIII**

TABLEAU DES ABREVIATIONS ET DEFINITIONS **XIV**

INTRODUCTION GENERALE **1**

CHAPITRE I : LES CONVERTISSEURS DC-DC ET DC-AC

I.1. Introduction 3

I.2. Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs): 3

I.3. Onduleurs multiniveaux 4

I.3.1. Principe des convertisseurs multiniveaux 4

I.3.2. Topologies des Convertisseurs Multiniveaux à Pont H en Cascade : 6

I.4. Techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM) appliqué aux onduleurs H-Bridge 9

I.4.1. Modulation multi-porteuses à phases décalés (PSPWM) 10

I.4.1.1 Principe général 10

I.4.1.2 Application à un Onduleur CHB à 2 Cellules H-Bridge 11

I.4.1.3 Avantages de la PSPWM dans cette structure 13

I.5. Résultats de simulations: 13

I.5.1. Onduleur à 5 niveaux 14

I.5.2. Onduleur à 7 niveaux 16

I.5.3. Onduleur à 9 niveaux 19

I.6. Les convertisseur DC-DC (hacheurs) 22

I.6.1. Le Convertisseur à Z-Source (ZSC) 23

I.6.2. Principe de fonctionnement du Convertisseur Z-Source (ZSC) 24

I.6.3. Les modes de fonctionnement du Convertisseur à Z-Source 25

I.6.4. Facteur de survoltage B 27

I.6.5. Simulation d'un hacheur à Z-Source 29

I.7. Conclusion 33

CHAPITRE II : LES SYSTEMES D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE

II.1. Introduction 34

II.2. Les differentes sources des énergies renouvelables 34

II.2.1. Énergie hydraulique 34

II.2.2. Energie géothermique 35
II.2.3. Energie eolienne 36
II.2.4. Énergie solaire: 36
II.3. Le système photovoltaïque 37
II.3.1. Cellule photovoltaïque 37
II.3.2. Effet photovoltaïque 37
II.3.3. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque 37
II.3.4. Modèle mathématique de la cellule photovoltaïque : 38
II.3.5. Association des cellules photovoltaïques: 39
II.3.5.1 Association série (Figure II.7) 39
II.3.5.2 Association en parallèle (Figure II.8) 40
II.3.5.3 Association mixte (série- parallèle) 40
II.4. Comportment d'une cellule photovoltaïque 41
II.4.1. Influence de l'ensoleillement E (W/m2) 41
II.4.2. Influence de la temperature 41
II.5. Les systèmes energies photovoltaique 42
II.5.1. Les systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes avec stockage 42
II.5.2. Les systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes sans stockage 42
II.6. Les systèmes de stockage 42
II.6.1. Les batteries 43
II.6.1.1 Caractéristiques clés des Batteries 43
II.6.2. Les supercondensateurs 44
II.6.2.1 Structure et fonctionnement 45
II.6.3. Les piles à combustible: 45
II.6.3.1 Principe de fonctionnement: 45
II.7. Étage d'adaptation continu-continu à Z source 46
II.8. Les méthodes de poursuite de MPP 47
II.8.1. Technique de Perturbation et Observation (P&O) 47
II.8.2. La technique d'incrémental Conductance (INC) 48
II.8.3. Approche basée sur les réseaux de neurones 50
II.8.3.1 Les réseaux de neurones 50
II.8.3.2 Les fonctions d'activation: 51
II.8.3.3 Architectures des réseaux de neurones 51
II.8.3.4 Types d'apprentissages 52

II.8.3.5 Le Perceptron 53
II.9. Conclusion 54
CHAPITRE III : CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME
III.1. Introduction 55
III.2. Schéma synoptique de la chaine proposé 55
III.3. Système de commande 56
III.4. Apprentissage et configuration des réseaux de neurones 57
III.4.1. Structure du réseau de neurones 57
III.4.2. Génération de la base de données d'apprentissage 57
III.5. Les résultats de simulation pour la chaine de conversion proposé 58
III.5.1. Les résultats de simulations avec MPPT (*P&O*) et RNA 59
III.5.1.1 Chaine de conversion avec onduleur à 5 niveaux 60
III.5.1.2 Chaine de conversion avec onduleur à 7 niveaux 64
III.5.1.3 Chaine de conversion avec onduleur à 9 niveaux 68
III.6. Conclusion 73
CONCLUSION GENERALE 74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES 76

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1:Symbole des convertisseurs DC-AC. 3
Figure I.2:Schéma de principe des convertisseurs multiniveaux. 4
Figure I.3:Topologies de circuits d'onduleurs multiniveaux à diodes clampées : (a) à trois niveaux, (b) à cinq niveaux. 4
Figure I.4: Topologies de circuits d'onduleurs multiniveaux à condensateur : (a) trois niveaux, (b) cinq niveaux. 5
Figure I.5:Structure d'un onduleur multiniveaux H-bridges en cascade et ça forme d'onde de sortie. 5
Figure I.6:Configuration d'onduleur multiniveau avec 2 ponts H connectés en série. 6
Figure I.7:Forme d'onde de l'onduleur à 5 niveaux utilisant la modulation PSPWM. 11
Figure I.8:Forme d'onde de l'onduleur à 7 niveaux avec PSPWM – première cellule alimentée par Vdc et la seconde par 2Vdc. 12
Figure I.9:Forme d'onde de l'onduleur à 9 niveaux avec PSPWM – première cellule alimentée par Vdc et la seconde par 3Vdc. 12
Figure I.10:Onduleur multiniveaux avec deux cellules H-Bridge. 13
Figure I.11:Réponse de tension simple de l'onduleur a 5 niveaux. 14
Figure I.12:THD Tension simple. 14
Figure I.13:Réponse de tension composée de l'onduleur 5 niveaux. 14
Figure I.14:THD tension composée. 15
Figure I.15:Réponse de tension simple filtrée de l'onduleur 5 niveaux. 15
Figure I.16:THD tension simple filtrée. 15
Figure I.17:Réponse de courant de sortie de l'onduleur 5 niveaux. 16
Figure I.18:THD Courant de sortie. 16
Figure I.19:Réponse de tension simple de l'onduleur 7 niveaux. 17
Figure I.20:THD tension simple. 17
Figure I.21:Réponse de tension composée de l'onduleur 7 niveaux. 17
Figure I.22:THD tension composée. 18
Figure I.23:Réponse de tension simple filtrée de l'onduleur 7 niveaux. 18
Figure I.24:THD tension simple filtrée. 18
Figure I.25:Réponse de courant de l'onduleur 7 niveaux. 19

Figure I.26:THD courant de sortie de l'onduleur. 19
Figure I.27:Réponse de tension simple de l'onduleur 9 niveaux. 20
Figure I.28:THD Tension simple 20
Figure I.29:Réponse de tension composée de l'onduleur 9 niveaux. 20
Figure I.30:THD tension composée 21
Figure I.31:Reponse de tension simple filtrée. 21
Figure I.32:THD tension simple filtrée. 21
Figure I.33:Réponse de courant de l'onduleur 9 niveaux. 22
Figure I.34:THD Courant de sortie de l'onduleur. 22
Figure I.35:Convertisseur Z source. 24
Figure I.36:Schéma équivalent du convertisseur Z-source en mode 1. 25
Figure I.37:Schéma équivalent du convertisseur Z-source en mode 2. 26
Figure I.38:Schéma équivalent du convertisseur Z-source en mode 3. 27
Figure I.39:le gain B en fonction du rapport cyclique D. 29
Figure I.40:Schéma fonctionnel Matlab Simulink de la topologie de conversion de la z-source en boucle ouverte. 29
Figure I.41:Réponse en tension de la z-source 1. 30
Figure I.42:Réponse en tension de la z-source 2. 30
Figure I.43:Schéma fonctionnel Matlab Simulink de la topologie de conversion de la source Z en boucle fermée (commande PI). 31
Figure I.44:Réponse en tension de la z-source 3. 31
Figure I.45:Réponse en tension de la z-source 4. 32
Figure I.46:Schéma fonctionnel Matlab Simulink de la topologie de conversion de la source Z en boucle fermée (commande intelligente). 32
Figure I.47:Réponse en tension de la z-source 5. 32
Figure I.48:Réponse en tension de la z-source 6. 33

Chapitre II

Figure II.1: le principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire pour la production de l'électricité [24]. 35
Figure II.2: Principaux composants de la centrale géothermique à vapeur sèche [25]. 35
Figure II.3: une eolienne. 36
Figure II.4: Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [29]. 37

Figure II.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.[31] 38
Figure II.6:Les composants photovoltaïques : cellule, panneau, module et champ. 39
Figure II.7: l'association des cellules en série et la caractéristique I(V) d'un module Photovoltaïque]. 39
Figure II.8:l'association des cellules en parallèle et la caractéristique I(V) d'un module Photovoltaïque . 40
Figure II.9: caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque a association mixte des cellules 40
Figure II.10:Influence de l'éclairement sur les caractéristiques d'une Cellule photovoltaïque I(A) et P(W) à T=25°C. [23] 41
Figure II.11: Influence de la température sur les caractéristique V(v) et P(w) d'une cellule Photovoltaïque à E=1000W/$\boldsymbol{m2}$. 41
Figure II.12: Systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes avec système de stockage [40]. 42
Figure II.13:Systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes sans système de stockage. 42
Figure II. 14:Principe de la batterie [41] 43
Figure II. 15:Principe de connexions des batteries.[41] 44
Figure II.16:Principe des supercondensateurs.[41] 45
Figure II.17: Principe de la pile à combustible [45] 46
Figure II.18:Chaîne de conversion photovoltaïque a impédance Z [23]. 46
Figure II.19:Schéma du principe de la méthode P&O. [48] 47
Figure II.20:Organigramme de la méthode P&O [49] 48
Figure II.21:Principe de la technique Incrémental conductance.[23] 49
Figure II.22:Algorithme de la technique de l'incrémental conductance INC. 50
Figure II.23: neurone formel. 50
Figure II.24:Exemples de fonctions d'activation. [52] 51
Figure II.25:Réseau non bouclé.[52] 51
Figure II.26:Réseau bouclé.[52] 51
Figure II.27:Schéma bloc de l'apprentissage supervisé d'un réseau de neurone.[54] 52
Figure II.28:Schéma bloc de l'apprentissage non supervisé d'un réseau de neurone.[54] 52
Figure II.29:Perceptron à une seule couche 53
Figure II.30:Perceptron Multicouche 53

Chapitre III

Figure III.1 : Synoptique du Système Non connecté PV-Batterie avec onduleur Multiniveaux à H-Bridge. 55
Figure III.2: Synoptique de la gestion de la tension Vbus et contrôle de la consommation du système. 56
Figure III.3:Configuration de réseau de neurones. 57
Figure III.4: résultat de l'entrainement obtenus 58
Figure III.5:Caractéristique des panneaux PV. 58
Figure III.6:Architecture de Simulation d'un Système autonome PV–Batterie avec Contrôle MPPT et Gestion de l'Énergie dans Simulink. 59
Figure III.7:Architecture de Simulation d'un Système autonome PV–Batterie avec Commande intelligente (RNA) et Gestion de l'Énergie dans Simulink. 59
Figure III.8: L'impact des variations d'irradiance sur Ppv et Vbus 60
Figure III.9:SOC et le courant de la batterie Ibat et tension Vbat 61
Figure III.10:Variation de la tension simple 62
Figure III.11:THD Tension simple 62
Figure III.12:Variation de la tension composée 63
Figure III.13:THD Tension composée 63
Figure III.14:Tension simple filtré 64
Figure III.15:THD Tension simple filtré 64
Figure III.16: L'impact des variations d'irradiance sur Ppv et Vbus 65
Figure III.17:SOC et le courant de la batterie Ibat et tension Vbat 65
Figure III.18:Variation de la tension simple 66
Figure III.19:THD Tension simple 66
Figure III.20:Variation de la tension composée 67
Figure III.21:THD Tension composée 67
Figure III.22:Tension simple filtré 68
Figure III.23:THD Tension simple filtré avec la technique P&O et la commande intelligente 68
Figure III.24: L'impact des variations d'irradiance sur Ppv et Vbus 69
Figure III.25: SOC et le courant de la batterie Ibat et tension Vbat 70
Figure III.26:Variation de la tension simple 70
Figure III.27:THD Tension simple 71

Figure III.28: Variation de la tension composée 71
Figure III.29:THD Tension composite avec la technique P&O et la commande intelligente. 71
Figure III.30:Tension simple filtré 72
Figure III.31:THD Tension simple filtré 72

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1:Configuration d'un onduleurs 5 niveaux avec 2 H-bridges (Vdc1=Vdc et Vdc2= Vdc). 7

Tableau I.2:Configuration d'un onduleurs 7 niveaux avec 2 H-bridges (Vdc1=Vdc et Vdc2= 2Vdc). 8

Tableau I.3:Configuration d'un onduleurs 9 niveaux avec 2 H-bridges (Vdc1=Vdc et Vdc2= 3Vdc). 9

Chapitre III

Tableau III.1 : Tableau recapulatif des performances de sortie de l'onduleur THD avec les deux techniques P&O et (RNA) 73

TABLEAU DES ABREVIATIONS ET DEFINITIONS

Abréviation	Définition
A	Ampère
AC	Alternative Current
CHB	Cascade H-Bridge
D	Rapport cyclique (Duty-cycle)
DC	DC Current
Ds	Diode
GP	Générateur Photovoltaïque
H-Bridge	Pont en H
Hz	Hertz
IBat	Courant de batterie
INC	Incremental Conductance
LSPWM	Level-Shifted Pulse Width Modulation
MLP	Multi-Layer Perceptron (Perceptron Multicouche)
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturb and Observe (Perturbation et Observation)
PID	Proportional-Integral-Derivative
Ppv	Puissance de PV
PSPWM	Phase-Shifted Pulse Width Modulation
PV	Photovoltaique
PWM	Pulse Width Modulation
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
SMPS	Switched-Mode Power Supply
SOC	State of Charge
THD	Total Harmonic Distortion
V	Volt
VAN	Tension de sortie de l'onduleur
Vbat	Tension de batterie
Vbus	Tension de bus continu
Vi	Tension d'entrée de l'onduleur
W/m²	Watt par mètre carré

Z	Impédance
ZSC	Z-Source Converter
$\hat{V}_i$	Valeur de crête de la tension d'entrée de l'onduleur
$\hat{V}_m$	Valeur de crête de l'onde fondamentale de la tension de sortie

Introduction Générale

Face à l'augmentation constante de la demande énergétique mondiale et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, les énergies renouvelables sont devenues une alternative incontournable. Parmi elles, l'énergie solaire se distingue par sa disponibilité, sa durabilité et sa faible empreinte environnementale. Le Soleil émet chaque année sur la surface terrestre un rayonnement équivalent à environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité, faisant de l'énergie solaire une ressource presque inépuisable. Toutefois, son exploitation reste confrontée à plusieurs défis, notamment la variabilité de la production en fonction des conditions climatiques. Cette instabilité nécessite la mise en place de chaînes de conversion intelligentes, capables d'optimiser, de stocker et de distribuer l'énergie de manière fiable.

Une chaîne de conversion photovoltaïque performante repose sur plusieurs composantes essentielles :

- Un générateur solaire convertissant le rayonnement en énergie électrique,
- Un convertisseur DC-DC pour l'adaptation de la tension,
- Un convertisseur DC-AC (onduleur) pour l'injection de l'énergie alternative dans la charge,
- Une technique pour maximiser la puissance extraite (MPPT).
- Un système de stockage d'énergie pour garantir l'autonomie et la continuité d'alimentation.

Dans ce cadre, le convertisseur à source Z (Z-Source Converter) est une alternative innovante aux structures classiques. Il permet à la fois l'élévation et l'abaissement de la tension, tout en offrant une robustesse accrue face aux perturbations du réseau ou aux courts-circuits internes. Combiné avec des onduleurs multiniveaux, il permet d'améliorer la qualité du signal alternatif, de réduire les pertes de commutation et de limiter les harmoniques.

Afin d'assurer un contrôle efficace de ces onduleurs, la technique de modulation de largeur d'impulsion à phases décalées (PSPWM) est utilisée. Cette méthode permet une meilleure distribution des pertes thermiques et une génération d'ondes de tension plus proches de la forme sinusoïdale, surtout dans les topologies à base de ponts en H.

Des techniques intelligentes permettant de contrôler les algorithmes MPPT, notamment les réseaux de neurones artificiels (RNA), ont été introduites. Elles se distinguent par leur

capacité d'adaptation dynamique, leur aptitude à l'apprentissage et leur robustesse face aux perturbations externes.

Enfin, pour faire face à l'intermittence inhérente à la production photovoltaïque, l'intégration d'un système de stockage devient indispensable. Ce dernier, qu'il soit basé sur des batteries, des supercondensateurs, ou des piles à combustible, joue un rôle fondamental dans :

- La régulation de l'énergie produite,
- La garantie d'un approvisionnement continu,
- L'amélioration de la stabilité globale du système, notamment dans les installations autonomes.

Ainsi, le présent mémoire vise à concevoir et simuler une chaîne de conversion photovoltaïque intelligente et autonome, intégrant :

- Un convertisseur à source Z.
- Un onduleur multiniveaux commandé par PSPWM,
- Une stratégie MPPT basée sur les réseaux de neurones.
- Un système de stockage assurant la continuité énergétique.

Pour atteindre ces objectifs, ce travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les structures de conversion DC-DC et DC-AC, les principes des onduleurs multiniveaux en cascade, et la technique de commande PSPWM.
- Le deuxième chapitre présente un aperçu des principales sources d'énergie renouvelables, en mettant l'accent sur les systèmes photovoltaïques. Il décrit en détail les dispositifs de stockage de l'énergie, ainsi que les différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), incluant l'approche classique et l'approche avancée basée sur les réseaux de neurones.
- Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et à la simulation complète de la chaîne de conversion photovoltaïque, en intégrant un système de stockage. Il analyse et compare les performances obtenues à l'aide de la technique MPPT classique (P&O) et de la commande intelligente par réseaux de neurones artificiels (RNA), tout en évaluant l'impact des différentes topologies d'onduleurs multiniveaux (5, 7 et 9 niveaux) sur la qualité et la stabilité de la conversion énergétique.

Ce travail est achevé par une conclusion générale.

Chapitre I

Les convertisseurs DC-DC et DC-AC

Chapitre I : Les convertisseurs DC-DC et DC-AC

I.1. Introduction

L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque nécessite des systèmes de conversion efficaces. La tension continue produite par les panneaux PV varie selon les conditions métrologiques, d'où l'importance des convertisseurs DC-DC. Le convertisseur Z-Source est particulièrement adapté grâce à sa capacité à élever ou abaisser la tension d'entrée. En sortie, les convertisseurs DC-AC transforment cette énergie en tension alternative. Les onduleurs multiniveaux, notamment en cascade (CHB), améliorent la qualité du signal. Une structure à deux H-Bridge permet de générer 5, 7 ou 9 niveaux à partir de sources DC multiples. Cette étude propose l'etude de convertisseur Z-Source et CHB 5,7et 9 niveaux avec la commande PSPWM.

I.2. Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs):

Les onduleurs, ou convertisseurs DC-AC, sont des dispositifs d'électroniques de puissance indispensables dans de nombreux systèmes, permettant de convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC). La figure I.1 illustre leur symbole.

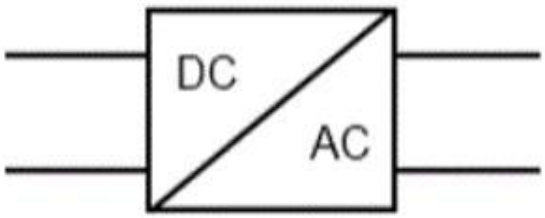


Figure I.1:Symbole des convertisseurs DC-AC.

La technologie des onduleurs a évolué pour répondre aux exigences croissantes en termes de qualité de l'onde de sortie et de gestion de charges complexes. Parmi les avancées majeures, on peut citer les onduleurs multiniveaux, qui utilisent plusieurs niveaux de tension pour générer une forme d'onde AC, Cela permet ainsi de réduire les distorsions harmoniques et les pertes de commutation, en éliminant les harmoniques de bas ordre dans la forme d'onde de sortie sans entraîner une augmentation des harmoniques de haut ordre [1][2]. Cette technologie est particulièrement avantageuse pour les applications à haute puissance. Il existe différents types d'onduleurs multiniveaux, tels que les onduleurs à diodes clampées (NPC), à condensateurs flottants (FC) et les onduleurs en cascade à H-bridge [3].

I.3. Onduleurs multiniveaux

I.3.1. Principe des convertisseurs multiniveaux

La Figure I.2 simplifie la compréhension des convertisseurs multiniveaux en montrant, de gauche à droite, un convertisseur à deux niveaux, un onduleur à trois niveaux, et un onduleur de N niveaux.

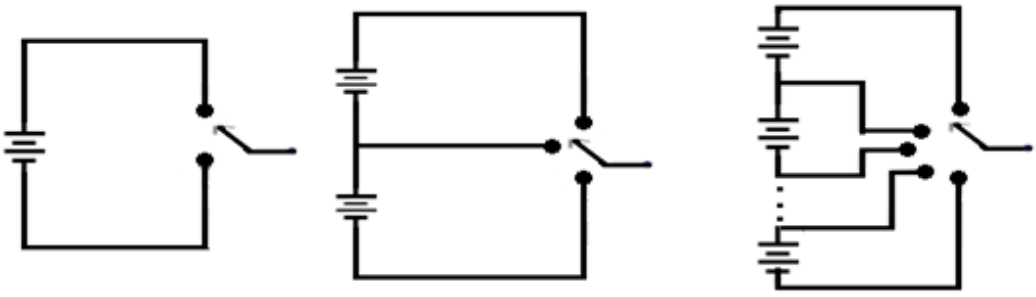


Figure I.2: Schéma de principe des convertisseurs multiniveaux.

Les onduleurs multiniveaux sont conçus pour produire des tensions de sortie plus proches d'une sinusoïde, avec des niveaux intermédiaires multiples. Ils permettent de réduire les pertes de commutation, les contraintes sur les composants, et les filtres nécessaires en sortie [4].

Les principales topologies multiniveaux sont :

a. **Onduleur à diodes clampées (Neutral Point Clamped - NPC)** : Utilise des diodes supplémentaires pour répartir la tension entre les étages. Couramment utilisé dans les applications industrielles [5].

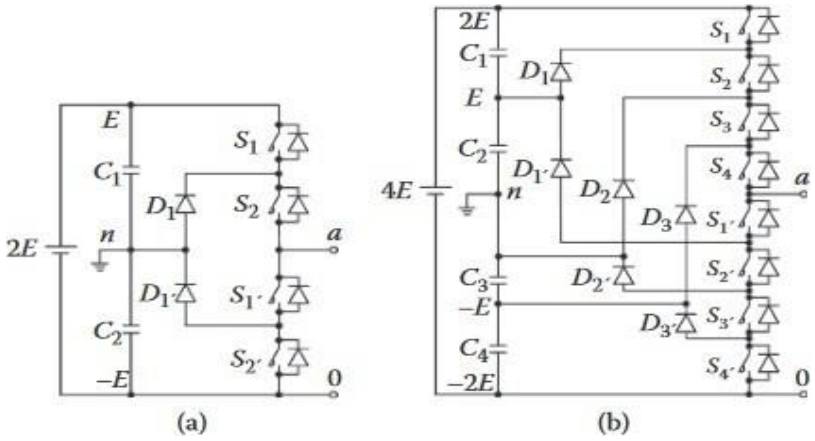


Figure I.3:Topologies de circuits d'onduleurs multiniveaux à diodes clampées : (a) à trois niveaux, (b) à cinq niveaux.

b. **Onduleur à condensateurs volants (Flying Capacitor)** : Repose sur des condensateurs flottants pour générer les niveaux intermédiaires. Cette topologie offre une bonne redondance mais nécessite une gestion complexe des tensions de condensateurs [6].

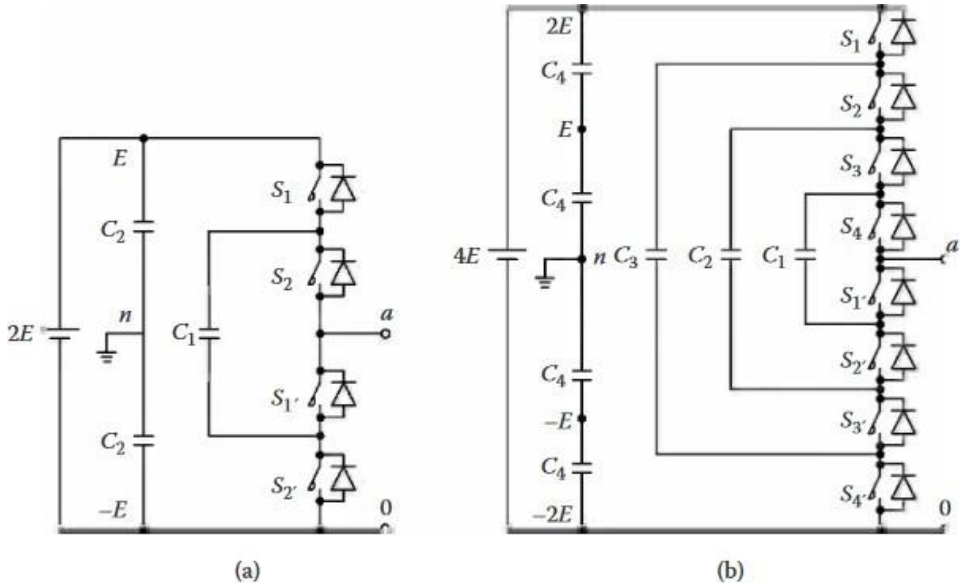


Figure I.4: Topologies de circuits d'onduleurs multiniveaux à condensateur : (a) trois niveaux, (b) cinq niveaux.

c. **Onduleur à H-bridges en cascade (Cascaded H-Bridge - CHB)** : Formé par la série de plusieurs cellules H-Bridge indépendantes**,** chacune alimentée par une source isolée. Très utilisé dans les systèmes PV ou éolien, cette structure est facilement extensible en nombre de niveaux [7]. la figure I.5 montre un onduleur multiniveaux avec 3 H-bridges en cascade ,ainsi la figure I.6 montre la forme d'onde de sortie.

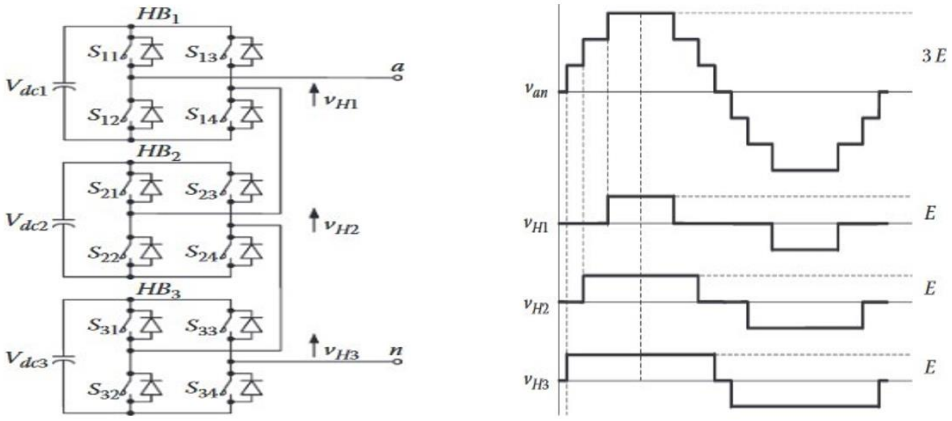


Figure I.5: Structure d'un onduleur multiniveaux H-bridges en cascade et ca forme d'onde de sortie.

I.3.2. Topologies des Convertisseurs Multiniveaux à Pont H en Cascade :

Les Onduleurs à H-Bridge : Le premier modèle d'onduleur, appelé onduleur en pont H (H-bridge en anglais), est apparu en 1975[2]. Au sein de la catégorie des onduleurs multiniveaux, les onduleurs en cascade H-bridge (CHB) occupent une place importante. Un onduleur H-bridge est une configuration qui utilise quatre interrupteurs disposés en forme de "H" pour inverser la polarité de la tension appliquée à une charge, générant ainsi une tension AC à partir d'une source DC.

Dans un onduleur multiniveau en cascade (Cascaded H-Bridge – CHB), plusieurs cellules H-bridge sont connectées en série, chacune contribuant à générer un niveau de tension supplémentaire [8]. Cela permet de synthétiser des formes d'onde AC avec un nombre accru de niveaux, ce qui réduit encore d'avantage la distorsion harmonique et améliore la qualité de la sortie.

La topologie en cascade des ponts H consiste à connecter plusieurs onduleurs(H-bridge) en série, comme illustré à la figure I.6.

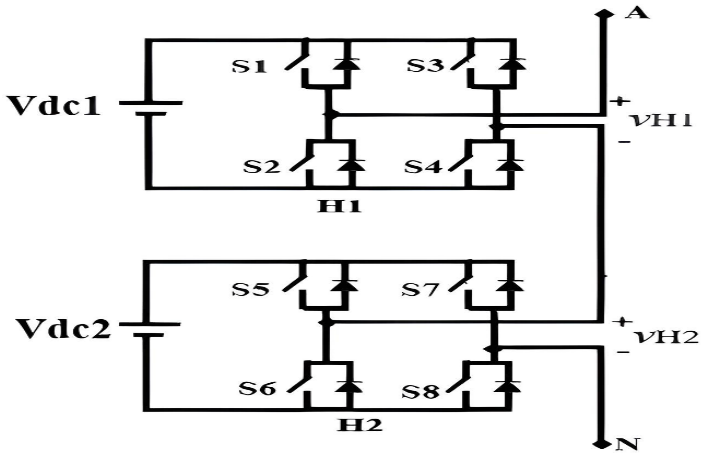


Figure I.6: Configuration d'onduleur multiniveau avec 2 ponts H connectés en série.

Cette configuration permet de générer des tensions de sortie avec un plus grand nombre de niveaux [9]. Chaque onduleur en pont H génère une tension de sortie, et ces tensions individuelles sont additionnées pour obtenir une tension de sortie composite. Mais l'inconvénient Majeur de cette topologie est le grand nombre de tensions continues isolées exigées pour chaque pont [10].

Pour un H-Bridge multiniveau avec N niveaux, le nombre total de sources de tension d'alimentation des H-Bridges K requises est donné par la formule (I.1).

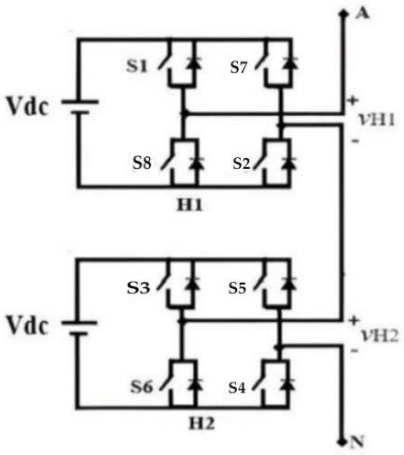
$$K = \frac{(N-1)}{2} \qquad (I.1)$$

Il est possible d'utiliser deux H-bridge pour obtenir des tensions de sortie VAN de 5,7 et 9 niveaux, en alimentant Vdc1 et Vdc2 de la figure I.6 de manière différente, selon les configurations définies dans les tableaux (I.1), (I.2) et (I.3) correspondants.

Le tableau (I.1) montre qu'à l'aide de deux H-Bridge, tous deux alimentés par la même tension Vdc, on obtient une tension de sortie VAN à cinq niveaux.

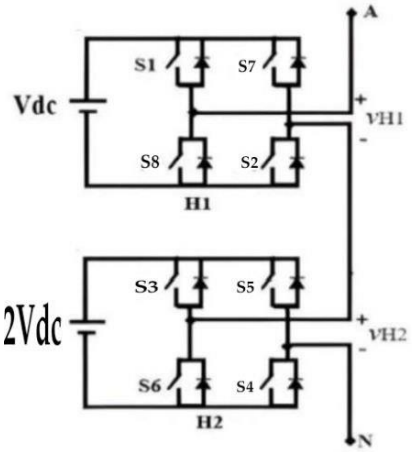
De même, sur le tableau (I.2) montre la configuration d'un onduleur à 7 niveaux conçu à l'aide de deux H-Bridge, le premier HB1 alimenté par une tension Vdc et le second HB2 par une tension 2Vdc.

Tableau I.1: Configuration d'un onduleurs 5 niveaux avec 2 H-bridges (Vdc1=Vdc et Vdc2= Vdc).



VAN	Etat des switches								VH1	VH2
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	+Vdc	+Vdc
+2Vdc	1	1	1	1	0	0	0	0	+Vdc	+Vdc
+Vdc	1	1	0	1	0	1	0	0	+Vdc	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-Vdc	0	0	0	1	0	1	1	1	-Vdc	0
-2Vdc	0	0	0	0	1	1	1	1	-Vdc	-Vdc

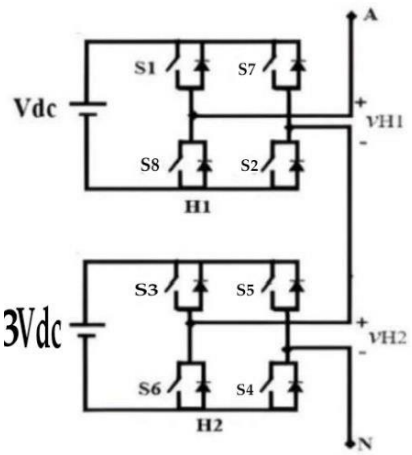
Tableau I.2: Configuration d'un onduleurs 7 niveaux avec 2 H-bridges (Vdc1=Vdc et Vdc2= 2Vdc).



VAN	Etat des switches								VH1	VH2
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	+Vdc	+2Vdc
+3Vdc	1	1	1	1	0	0	0	0	+Vdc	+2Vdc
+2Vdc	0	1	1	1	0	0	0	1	0	+2Vdc
+Vdc	1	1	0	1	0	1	0	0	+Vdc	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-Vdc	0	0	0	1	0	1	1	1	-Vdc	0
-2Vdc	0	1	0	0	1	1	0	1	0	-2Vdc
-3Vdc	0	0	0	0	1	1	1	1	-Vdc	-2Vdc

De même, sur le tableau (I.3) montre la configuration d'un onduleur à 9 niveaux conçu à l'aide de deux H-Bridge, le premier HB1 alimenté par une tension Vdc et le second HB2 par une tension 3Vdc.

Tableau I.3: Configuration d'un onduleurs 9 niveaux avec 2 H-bridges (Vdc1=Vdc et Vdc2= 3Vdc).



VAN	Etat des switches								VH1	VH2
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	+Vdc	+3Vdc
+4Vdc	1	1	1	1	0	0	0	0	+Vdc	+3Vdc
+3Vdc	0	1	1	1	0	0	0	1	0	+3Vdc
+2Vdc	0	0	1	1	0	0	1	1	-Vdc	+3Vdc
+Vdc	1	1	0	1	0	1	0	0	+Vdc	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-Vdc	0	0	0	1	0	1	1	1	-Vdc	0
-2Vdc	0	0	0	0	1	1	0	0	+Vdc	-3Vdc
-3Vdc	0	1	0	0	1	1	0	1	0	-3Vdc
-4Vdc	0	0	0	0	1	1	1	1	-Vdc	-3Vdc

NB : D'autres configurations existent avec un total de 10 interrupteurs, permettant d'obtenir des onduleurs à 17 et 25 niveaux [11][12].

I.4.Techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM) appliqué aux onduleurs H- Bridge

La modulation de largeur d'impulsion (PWM) permet un contrôle précis de la tension de sortie et améliore sa qualité [13] ; pour commuter les cellules dans un convertisseur H-Bridge, plusieurs variantes de PWM sont couramment utilisées, telles que la (Level Shifted PWM), qui ajuste la modulation en fonction de la variation verticale des niveaux de tension, et la PSPWM (Phase Shifted PWM), qui déphase les signaux

PWM pour réduire les harmoniques. Cette dernière sera utilisée dans le reste de cette étude.

I.4.1. Modulation multi-porteuses à phases décalés (PSPWM)

La modulation à largeur d'impulsion à phases décalées (Phase-Shifted Pulse Width Modulation - PSPWM) est une technique de modulation particulièrement adaptée aux onduleurs multiniveaux de type Cascaded H-Bridge (CHB) [7]. Elle consiste à comparer une onde sinusoïdale de référence avec plusieurs ondes porteuses triangulaires, chacune étant décalée en phase par rapport aux autres. Cette méthode permet de générer des signaux de commande (PWM) pour les interrupteurs de chaque cellule H-Bridge de manière décalée, ce qui améliore la répartition des commutations [14].

I.4.1.1 Principe général

Le principe de la PSPWM consiste à comparer une onde sinusoïdale de référence $V_{ref}(t)$ avec plusieurs ondes porteuses triangulaires C_i(t), de même fréquence f_c, amplitude et forme, mais décalées entre elles en phase.

Le nombre de porteuses nécessaires pour un onduleur multiniveau à N niveaux est : [15]

$$N_{\text{porteuses}} = \text{N}-1 \qquad \text{(I.2)}$$

Chaque onde porteuse est décalée en phase selon la relation : [15]

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{N-1} \qquad \text{(I.2)}$$

Le signal de modulation PWM est obtenu par : [16]

$$PWM_{\text{i}}(t) = \begin{cases} 1 & si \;\; V_{ref}(t) > C_i(\text{t}) \\ 0 & si \; non \end{cases} \text{ Avec i=1,2,...,N}-1 \qquad \text{(I.4)}$$

Avec :

$$V_{ref}(t) = M \cdot \sin(2\pi f_s t) \qquad \text{(I.5)}$$

Où :

- M est l'indice de modulation ($0 < M \leq 1$),
- f_s Est la fréquence fondamentale de sortie.

Chaque comparateur génère un signal PWM associé à une transition de tension d'une des cellules de l'onduleur.

I.4.1.2 Application à un Onduleur CHB à 2 Cellules H-Bridge

Dans cette topologie, l'onduleur par phase est constitué de 2 cellules H-Bridge en série, mais avec des alimentations différentes selon le nombre de niveaux souhaités :

Nombre de niveaux	Alimentation cellule 1	Alimentation cellule 2
5 niveaux	V_{dc}	V_{dc}
7 niveaux	V_{dc}	$2\,V_{dc}$
9 niveaux	V_{dc}	$3\,V_{dc}$

Chaque cellule peut générer 3 niveaux : $\{-V_i,\ 0,\ +V_i\}$. La superposition des tensions produites par les deux cellules permet d'obtenir les niveaux de sortie souhaités :

a. Pour 5 niveaux :

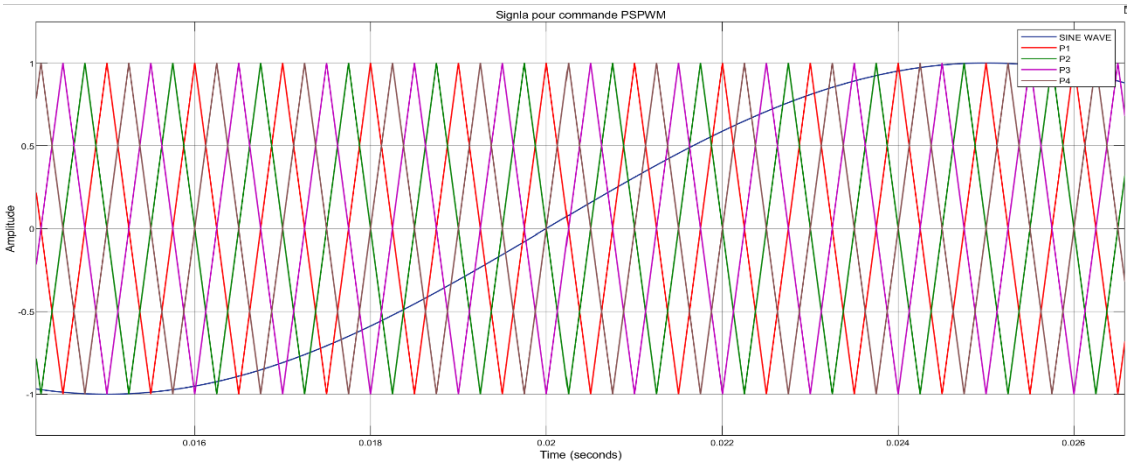


Figure I.7: Forme d'onde de l'onduleur à 5 niveaux utilisant la modulation PSPWM.

$V_{Sortie} \in \{-2V_{dc}, -V_{dc}, 0, +V_{dc}, +2V_{dc}\}$

- $N_{\text{porteuses}} = N - 1 = 4$
- $\Delta\varphi = \frac{360°}{4} = 90°$

b. Pour 7 niveaux :

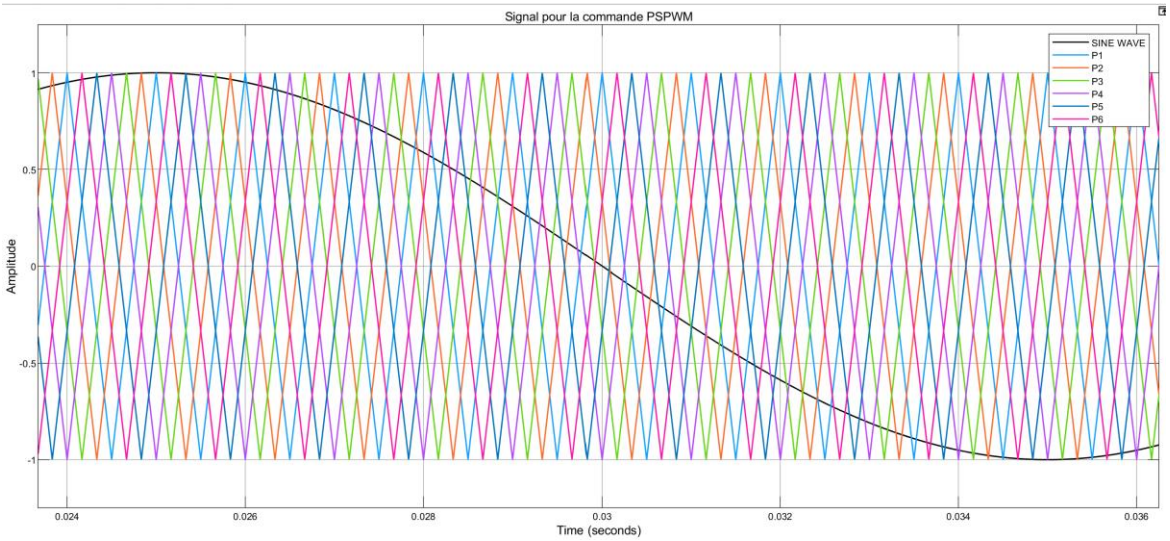


Figure I.8: Forme d'onde de l'onduleur à 7 niveaux avec PSPWM – première cellule alimentée par Vdc et la seconde par 2Vdc.

$V_{Sortie} \in \{-3V_{dc}, -2V_{dc}, -V_{dc}, 0, +V_{dc}, +2V_{dc}, +3V_{dc}\}$

- $N_{\text{porteuses}} = N - 1 = 6$
- $\Delta\varphi = \frac{360°}{6} = 60°$

c. Pour 9 niveaux

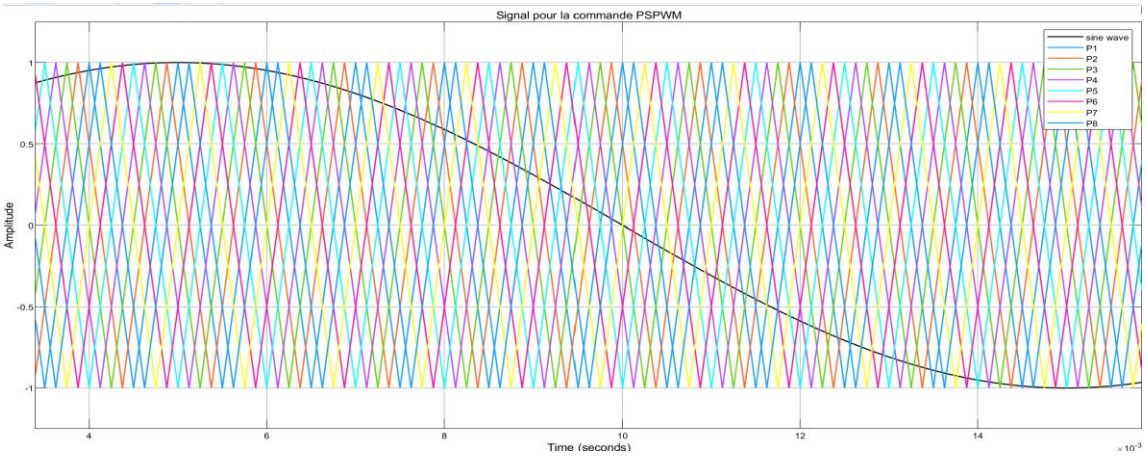


Figure I.9: Forme d'onde de l'onduleur à 9 niveaux avec PSPWM – première cellule alimentée par Vdc et la seconde par 3Vdc.

$V_{Sortie} \in \{-4V_{dc}, -3V_{dc}, \ldots, +3V_{dc}, +4V_{dc}\}$

- $N_{\text{porteuses}} = N - 1 = 8$

- $\Delta\varphi = \frac{360°}{8} = 45°$

I.4.1.3 Avantages de la PSPWM dans cette structure

- **Distribution homogène des commutations** grâce au décalage des porteuses.
- **Réduction des pertes de commutation** et amélioration du rendement global.
- **Diminution des harmoniques** par une répartition temporelle des changements de niveau.
- **Facilité de mise en œuvre** numérique.

I.5. Résultats de simulations :

La figure I.10 montre un onduleur multiniveau à ponts en H en cascade, pouvant générer 5, 7 ou 9 niveaux, alimenté par trois sources identiques (Vdc2 = Vdc4 = Vdc6), ayant chacune une tension égale à Vdc, 2Vdc ou 3Vdc selon le niveau souhaité, respectivement.

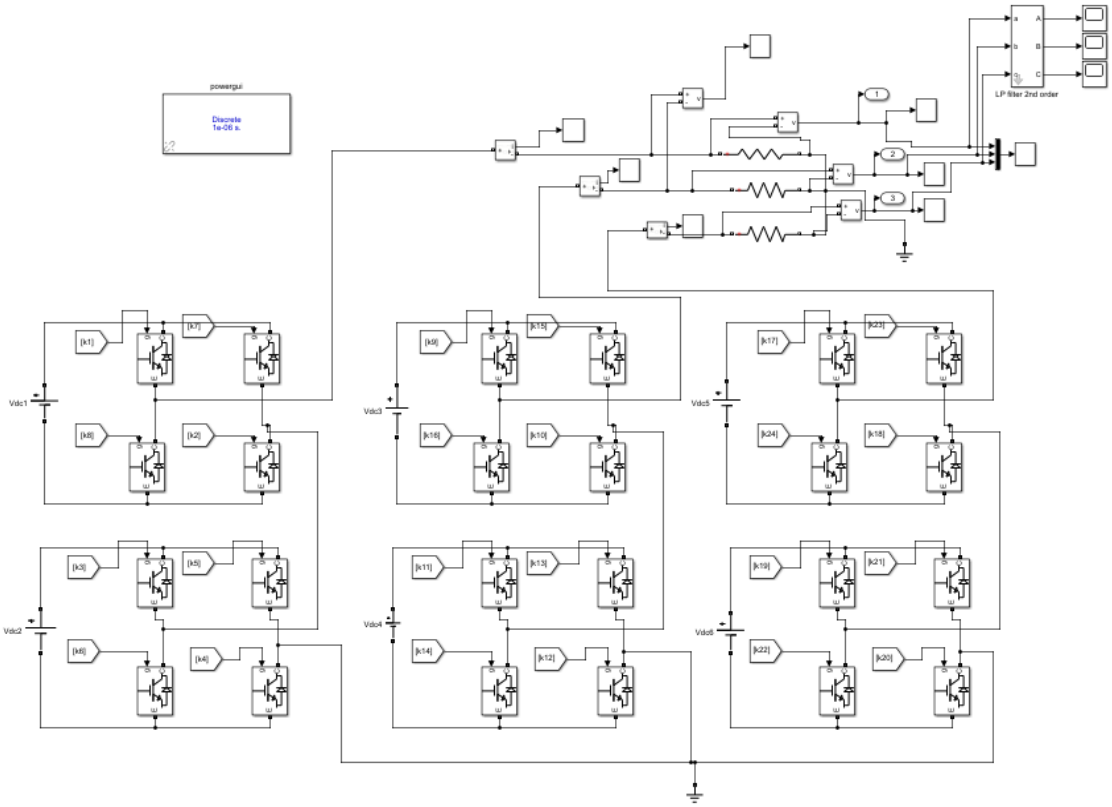


Figure I.10: Onduleur multiniveaux avec deux cellules H-Bridge.

I.5.1. Onduleur à 5 niveaux

R=200Ω ; Vdc1=Vdc3=Vdc5=100V ;Vdc2=Vdc4=Vdc6=100V.

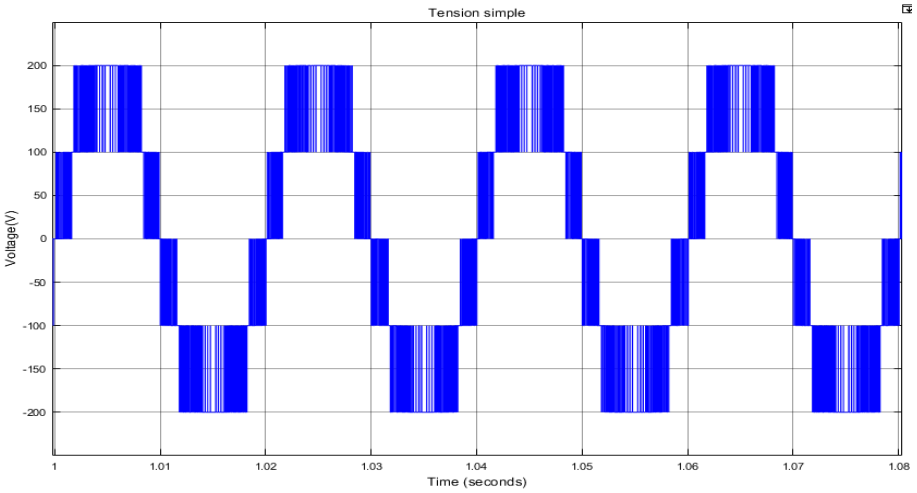


Figure I.11:Réponse de tension simple de l'onduleur a 5 niveaux.

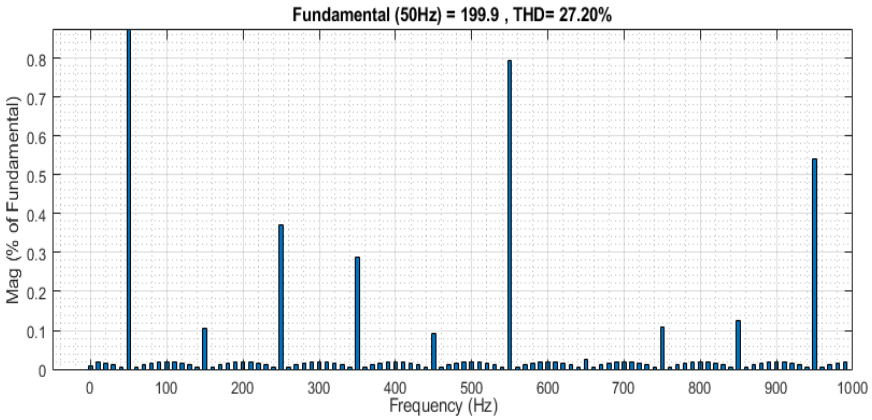


Figure I.12:THD Tension simple.

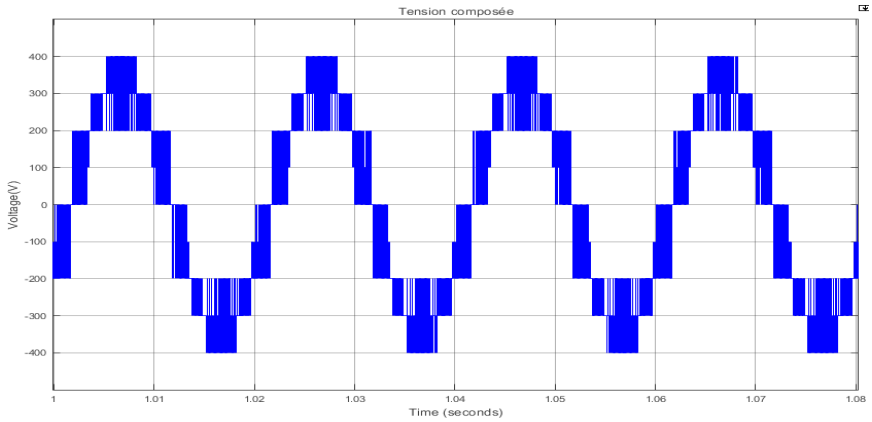


Figure I.13:Réponse de tension composée de l'onduleur 5 niveaux.

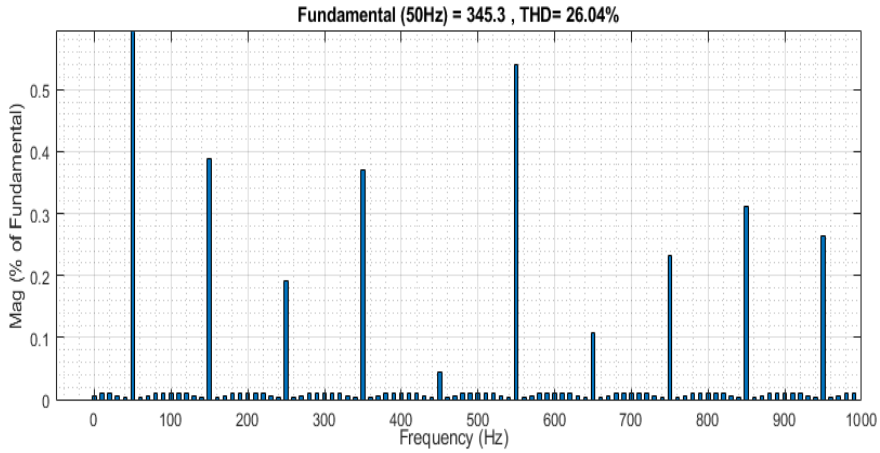


Figure I.14:THD tension composée.

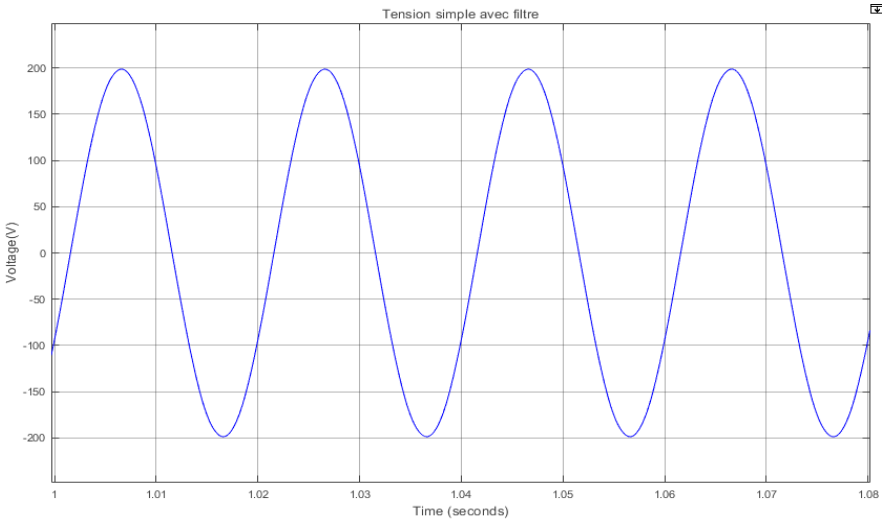


Figure I.15:Réponse de tension simple filtrée de l'onduleur 5 niveaux.

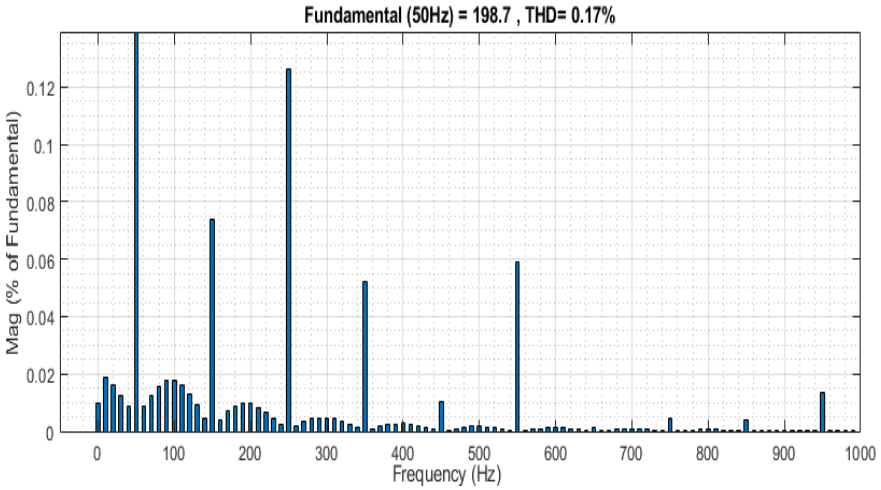


Figure I.16:THD tension simple filtrée.

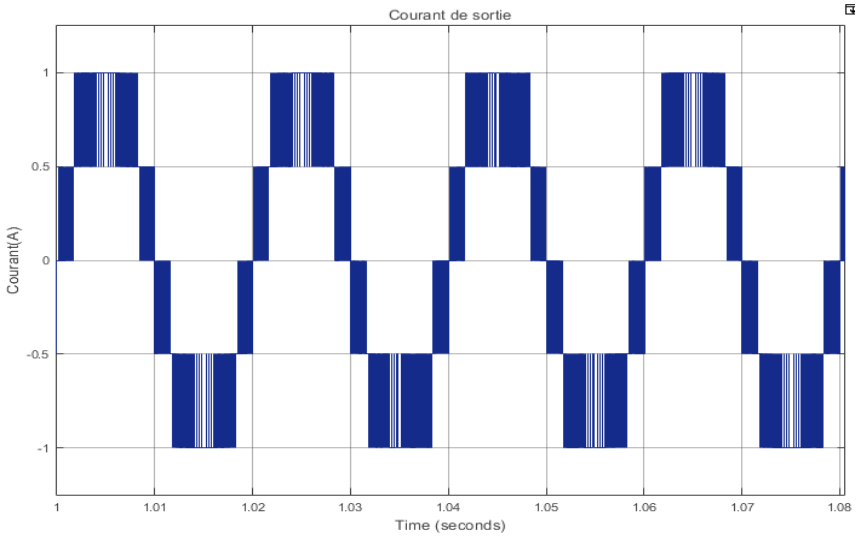


Figure I.17:Réponse de courant de sortie de l'onduleur 5 niveaux.

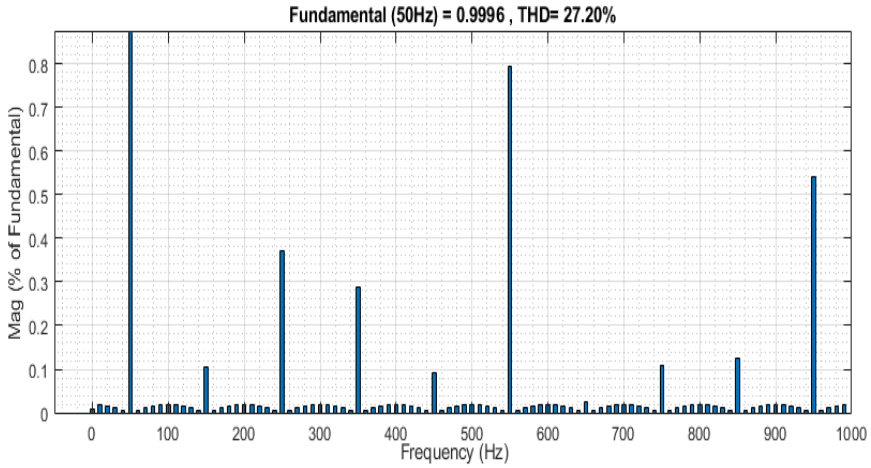


Figure I.18:THD Courant de sortie.

I.5.2. Onduleur à 7 niveaux

R=200Ω ;

Vdc1=Vdc3=Vdc5=100v ;

Vdc2=Vdc4=Vdc6=200.

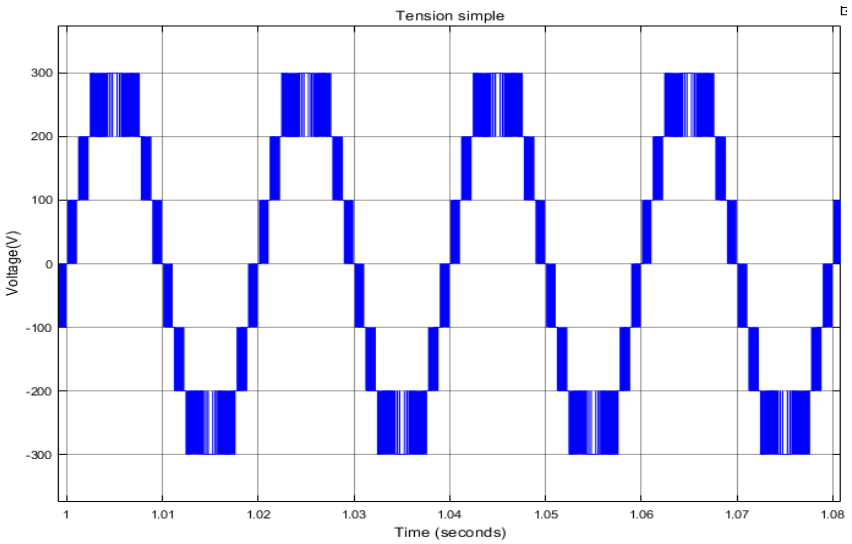


Figure I.19:Réponse de tension simple de l'onduleur 7 niveaux.

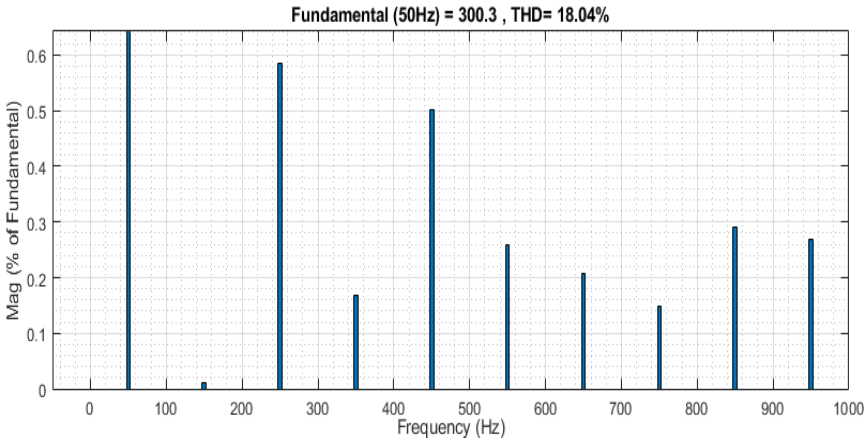


Figure I.20:THD tension simple.

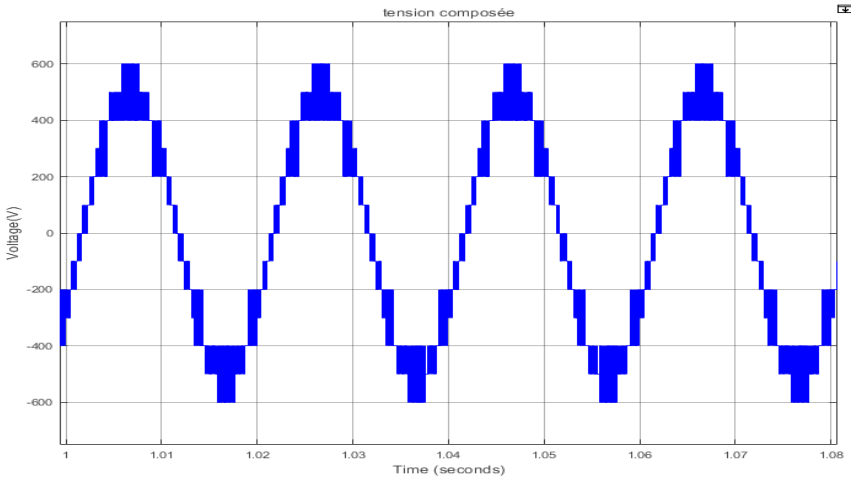


Figure I.21:Réponse de tension composée de l'onduleur 7 niveaux.

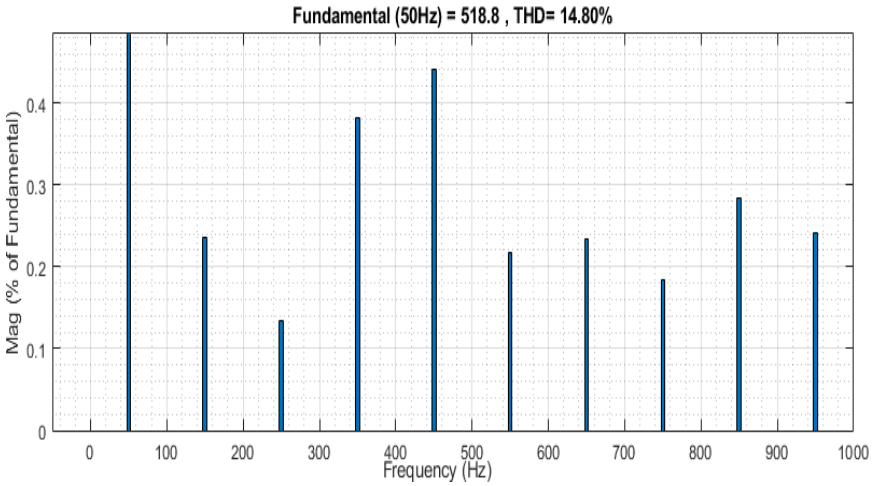


Figure I.22:THD tension composée.

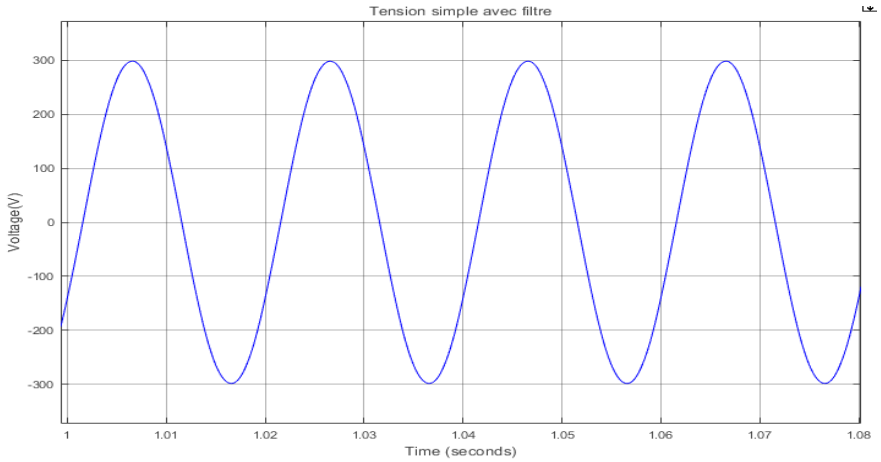


Figure I.23:Réponse de tension simple filtrée de l'onduleur 7 niveaux.

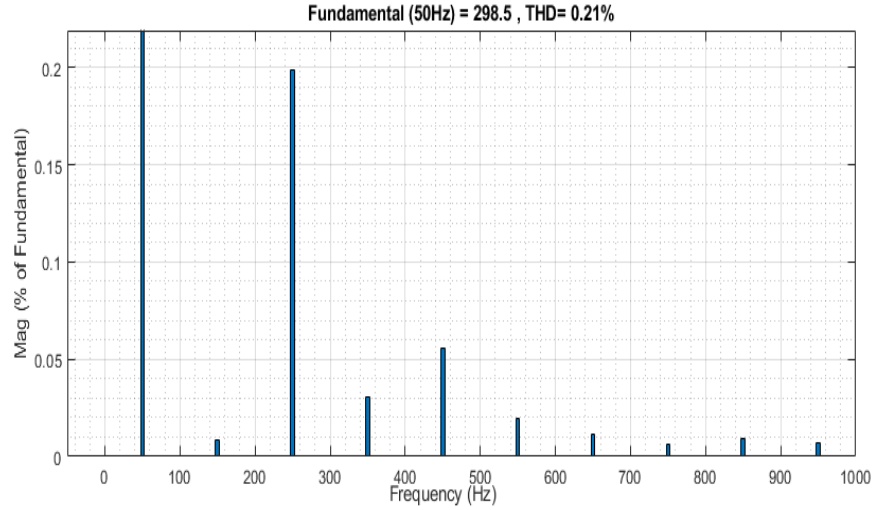


Figure I.24:THD tension simple filtrée.

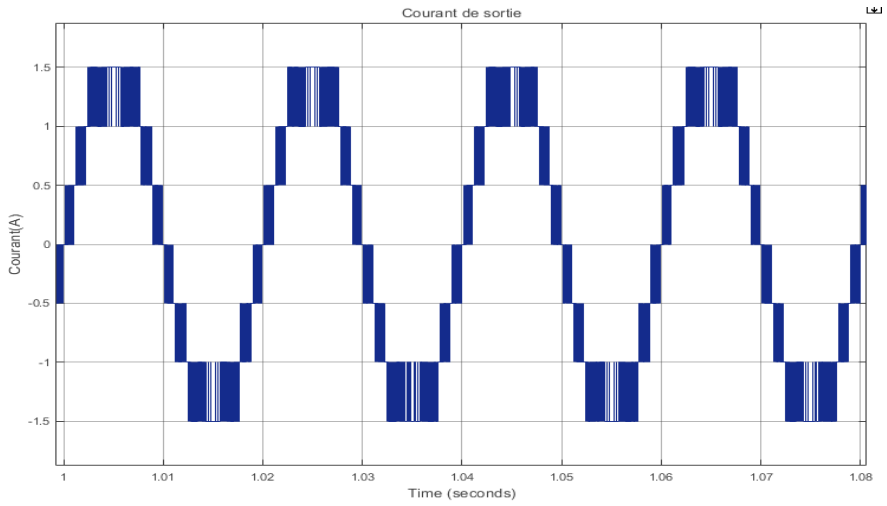


Figure I.25:Réponse de courant de l'onduleur 7 niveaux.

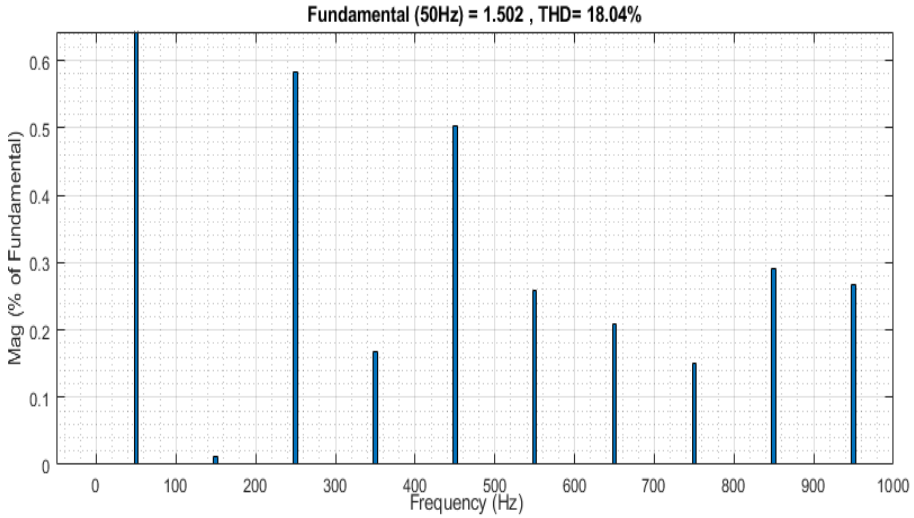


Figure I.26:THD courant de sortie de l'onduleur.

I.5.3. Onduleur à 9 niveaux

R=200Ω ;

Vdc1=Vdc3=Vdc5=100v ;

Vdc2=Vdc4=Vdc6=300V.

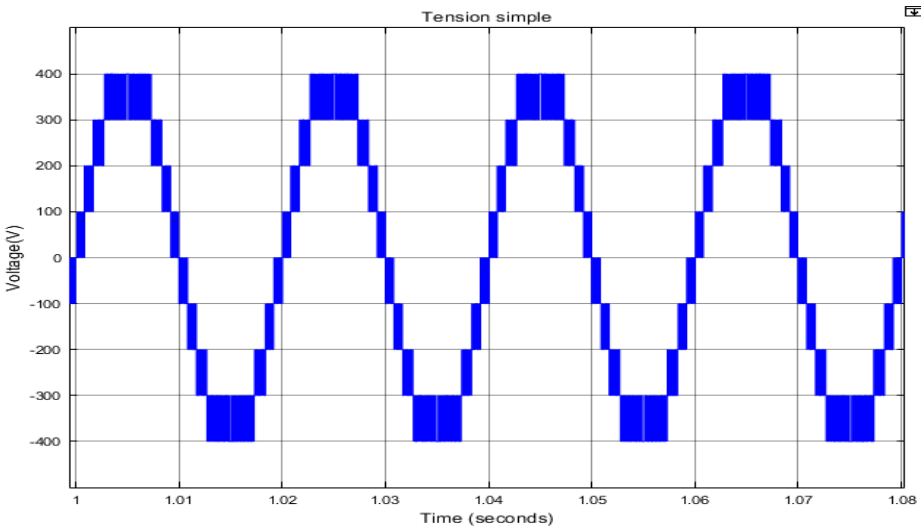


Figure I.27:Réponse de tension simple de l'onduleur 9 niveaux.

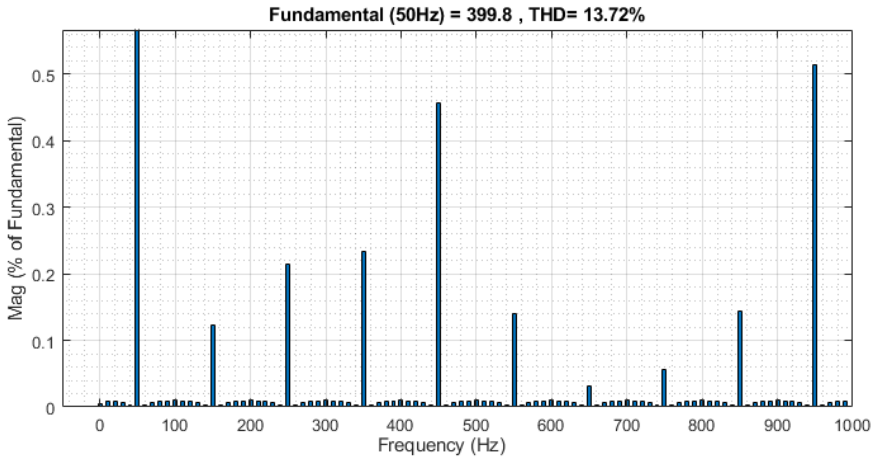


Figure I.28:THD Tension simple

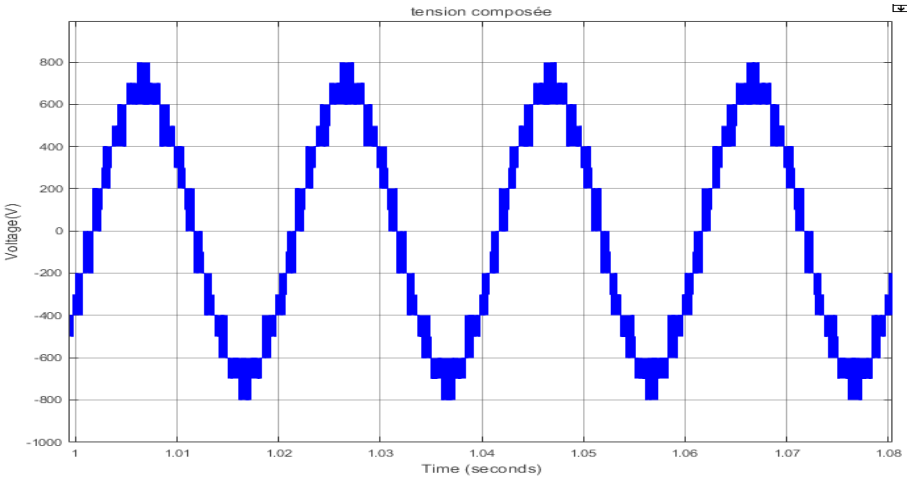


Figure I.29:Réponse de tension composée de l'onduleur 9 niveaux.

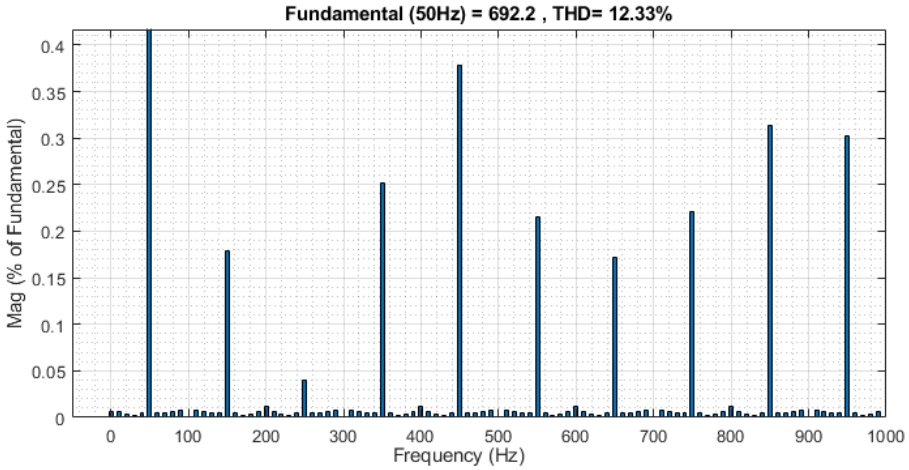


Figure I.30:THD tension composée

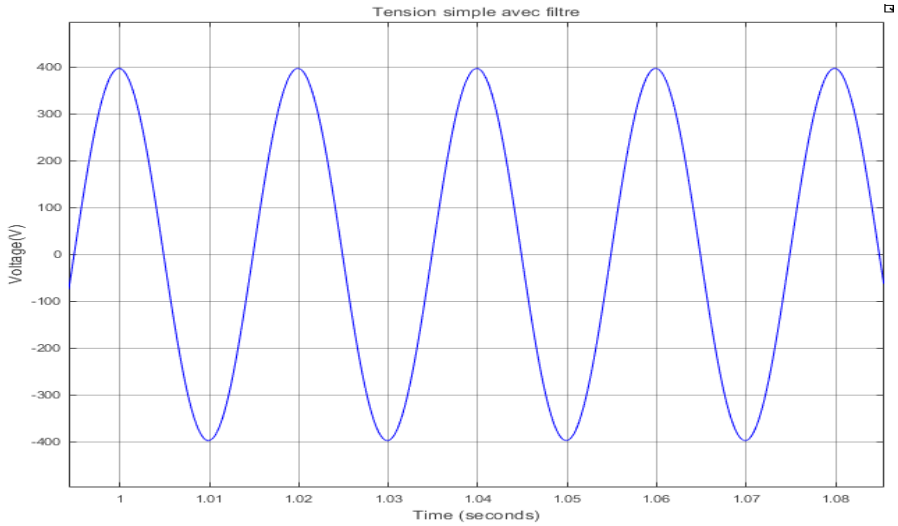


Figure I.31: Reponse de tension simple filtrée.

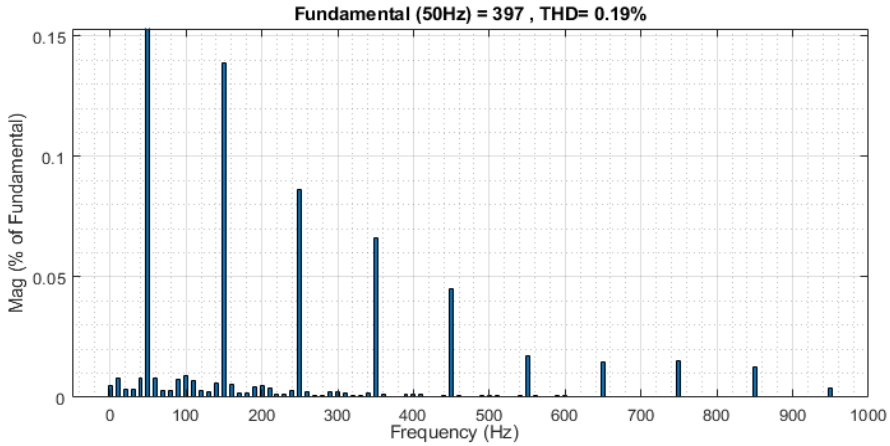


Figure I.32:THD tension simple filtrée.

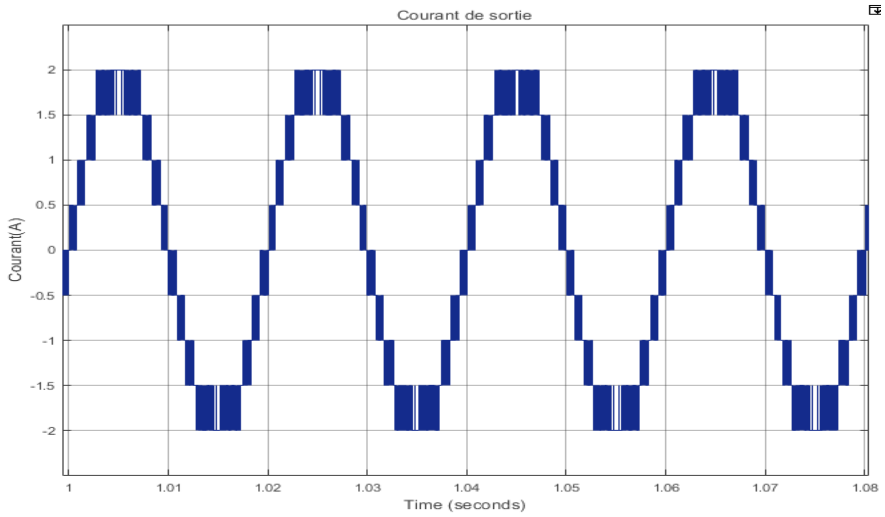


Figure I.33:Réponse de courant de l'onduleur 9 niveaux.

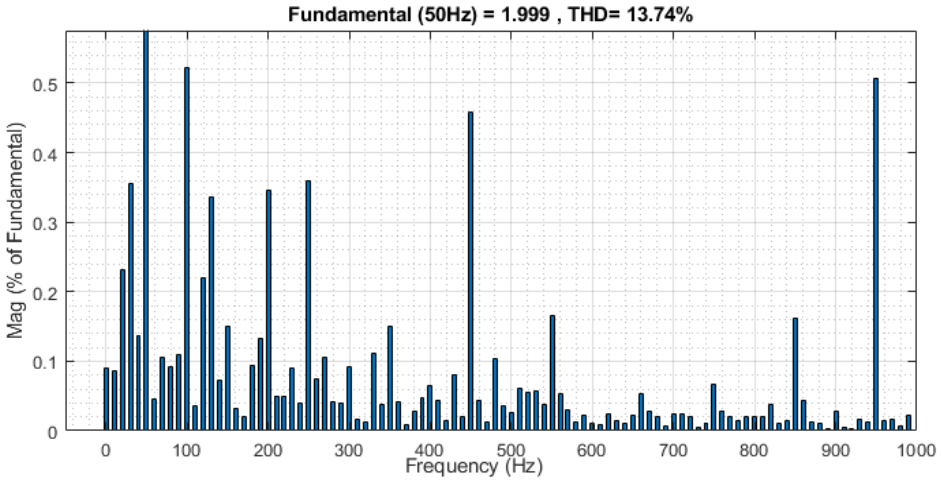


Figure I.34:THD Courant de sortie de l'onduleur.

I.6. Les convertisseur DC-DC (hacheurs)

Les convertisseurs statiques DC-DC constituent un maillon essentiel dans de nombreuses architectures d'alimentation modernes, notamment dans les systèmes à découpage et les chaînes de conversion pour entraînement de machines électriques. Ces dispositifs assurent la conversion d'une tension continue non régulée – généralement issue d'un redressement de la tension secteur – en une tension continue régulée, adaptée aux besoins spécifiques de la charge ou du sous-système alimenté [17].

Dans les alimentations à découpage (SMPS), les convertisseurs DC-DC sont souvent associés à des transformateurs d'isolement fonctionnant à haute fréquence, afin d'assurer la séparation galvanique entre les circuits d'entrée et de sortie. Toutefois, dans les systèmes de commande de moteurs électriques ou de conversion embarquée, les configurations non isolées sont privilégiées en raison de leur simplicité, compacité et rendement élevé [18].

Afin de limiter la complexité d'analyse, cette section se concentre exclusivement sur les topologies non isolées, pour lesquelles la modélisation est plus directe et l'implémentation mieux maîtrisée dans les applications embarquées et industrielles. Ces topologies assurent des fonctions élémentaires de réduction, d'élévation ou de conversion mixte de la tension d'entrée continue. Il existe plusieurs convertisseurs comme :

- **Le convertisseur abaisseur (Buck) :** Assure la réduction de la tension d'entrée selon un rapport de conversion inférieur à l'unité, tout en conservant la polarité d'origine. Il est souvent utilisé dans les alimentations de basse tension [19].
- **Le convertisseur élévateur (Boost) :** Permet d'élever la tension d'entrée à une valeur supérieure, sans inversion de polarité. Il est largement utilisé dans les systèmes de conversion d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque [19].
- **Le convertisseur Buck-Boost :** Peut délivrer une tension supérieure ou inférieure à celle de l'entrée, avec inversion de polarité. Cette topologie est utile dans les applications où la tension d'entrée est variable et ne permet pas un fonctionnement stable [19].

I.6.1. Le Convertisseur à Z-Source (ZSC)

C'est une topologie innovante de conversion d'énergie électrique introduite par *Fang Zheng Peng* en 2003 [20]. Contrairement aux convertisseurs traditionnels de type Buck (abaisseur) ou boost (élévateur), le ZSC permet à la fois l'élévation et l'abaissement de la tension dans une architecture unique, en intégrant un réseau d'impédance entre la source continue (DC) et l'onduleur.

La topologie ZSC est largement utilisée dans les applications de production d'énergie renouvelable (notamment photovoltaïque et éolien), les véhicules électriques, et les convertisseurs multiniveaux**.**

I.6.2. Principe de fonctionnement du Convertisseur Z-Source (ZSC)

Les convertisseurs à Z-source offrant la capacité d'augmenter, de réduire ou de stabiliser la tension selon les besoins spécifiques des applications, combine les fonctionnalités d'un hacheur survolteur avec celles d'un onduleur classique en utilisant un réseau d'impédance pour relier l'onduleur à une source de tension continue [21]. Ce réseau d'impédance est constitué d'une structure hybride croisée *L-C*.

Une caractéristique distinctive des convertisseurs à Z-source est l'état "Shoot-Through", qui permet l'activation simultanée des interrupteurs à semi-conducteurs au sein de la même branche de phase. Cette fonctionnalité modifie légèrement la commande de l'onduleur, permettant ainsi d'obtenir une tension alternative plus élevée par rapport à un onduleur classique.

La figure I.35 montre le schéma de base d'un convertisseur à Z source constitué par une source d'énergie Vdc et le circuit en Z ($L1$, $L2$; $C1$,$C2$), et un convertisseur DC-AC.

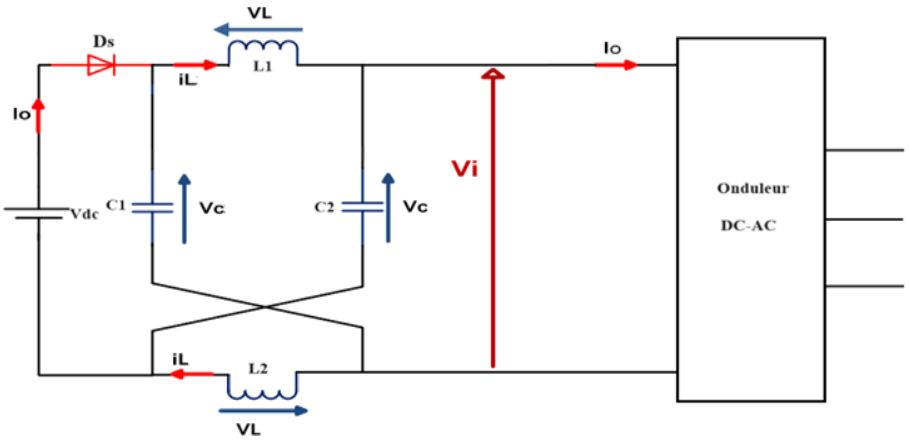


Figure I.35: Convertisseur Z source.

Le fonctionnement général d'un convertisseur Z Source peut être illustré en considérant la partie *AC* du circuit comme une charge *DC* équivalente (ou source).

<u>Nous définissons :</u>

$\hat{V}_m$: Valeur de crête de l'onde fondamentale de la tension de sortie de l'onduleur par rapport au point neutre.

$\hat{V}_i$: Valeur de crête de la tension d'entrée de l'onduleur.

$\hat{V}_{dc}$: Tension continue d'entrée

r : Profondeur de modulation de l'onduleur.

I0 : courant de bus continu.

V_i *:* tension de bus continu.

$$r = \frac{2\hat{V}_m}{\hat{V}_i} \qquad \text{(I.6)}$$

On note que : $L_1 = L_2 = L$; $C_1 = C_2 = C$, Ceci implique que $V_{C1} = V_{C2} = V_C$; $V_{L1} = V_{L1} = V_L$.

I.6.3. Les modes de fonctionnement du Convertisseur à Z-Source

Le fonctionnement du convertisseur Z-source peut être analysé en fonction de deux états principaux : l'état de conduction de la diode Ds et l'état de court-circuit d'un ou plusieurs bras de l'onduleur. Ces états permettent de définir trois modes de fonctionnement, qui se présentent comme suit [22]:

- **Mode 1 : *Ds* passante et onduleur Actif**

Dans ce mode la diode *Ds* est en conduction, elle permet le passage du courant, assurant ainsi le transfert d'énergie du réseau Z-source vers l'onduleur.

L'onduleur est en mode actif, ce qui signifie que les interrupteurs de l'onduleur sont commutés selon une séquence normale comme une commande *PWM*, pour convertir la tension continue fournie par le réseau Z-source en tension alternative (*AC*).

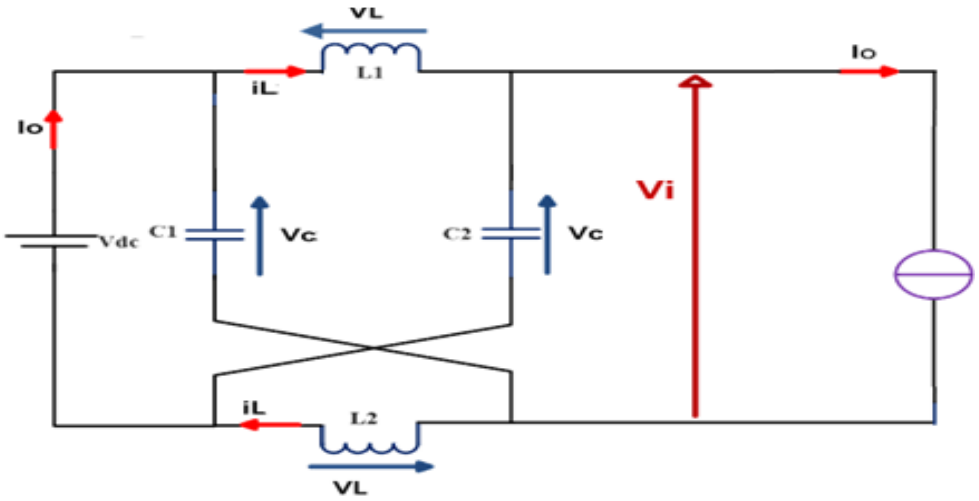


Figure I.36: Schéma équivalent du convertisseur Z-source en mode 1.

Durant cet état, l'onduleur peut être représenté comme une source de courant (voir Figure I.36) du point de vue de l'étage continu du Z-source.

Les tensions V_l , V_C peuvent être déterminées par les équations (I.7) et (I.8) :

$$V_l = V_{dc} - V_c \quad \text{(I.7)}$$

$$V_i = V_c - V_l = 2V_c - V_{dc} \quad \text{(I.8)}$$

- **Mode 2 : *Ds* passante et onduleur en roue libre (sans court-circuit)**

L'onduleur est en mode roue libre, est un cas particulier du mode 1 pour lequel *I0* est nul. Dans cet état, l'onduleur peut être modélisé comme un circuit ouvert (voir Figure I.37).

Dans cet état, les condensateurs C1 et C2 se chargent respectivement à travers les bobines L2 et L1. Les tensions, restent identiques aux équations (I.7) et (I.8).

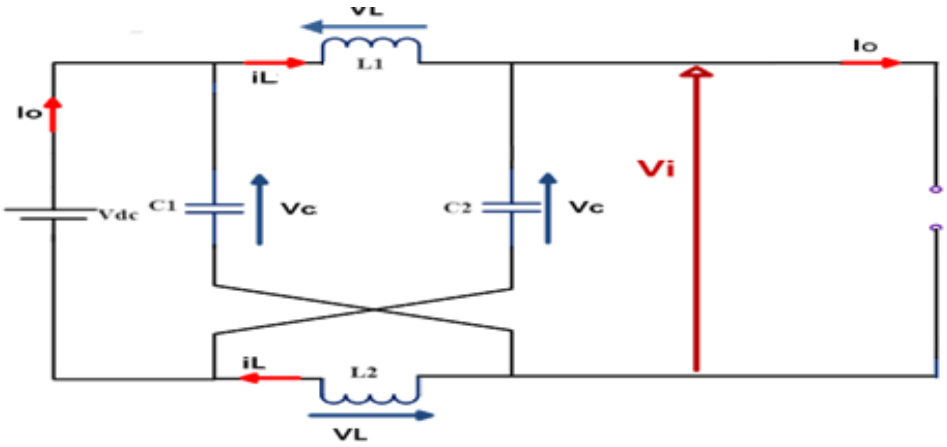


Figure I.37: Schéma équivalent du convertisseur Z-source en mode 2.

- **Mode 3 : *Ds* bloquée et Z-source court-circuité**

Dans ce mode, les condensateurs $C1$et $C2$ sont chargés et placés en série, ce qui entraîne le blocage de la diode *Ds* car (*Vdc* < *2Vc*), ainsi on oblige les condensateurs à se décharger dans les inductances.

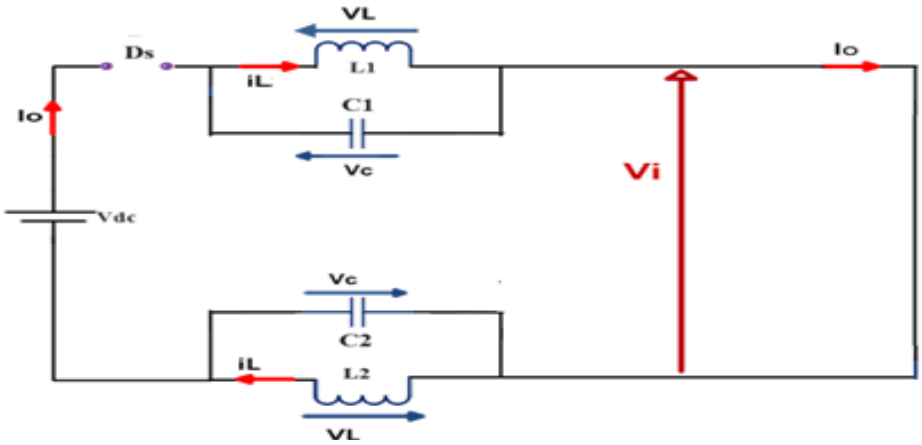


Figure I.38: Schéma équivalent du convertisseur Z-source en mode 3.

Durant cet état au moins un bras de l'onduleur est court-circuité, ce qui impose une tension nulle en sortie de l'étage continu Z-source (figure I.38).

A partir de la figure I.38 nous pouvons déterminer les équations suivantes : (I.9) et (I.10)

$$V_l = V_c \qquad \text{(I.9)}$$

$$V_i = 0 \qquad \text{(I.10)}$$

I.6.4. Facteur de survoltage B

Le facteur de survoltage B est un paramètre essentiel qui détermine la capacité du convertisseur Z-source à augmenter la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie plus élevée. Ceci dépend principalement du rapport cyclique (l'état de "shoot-through") qui doit être contrôlé avec soin pour assurer la sécurité et l'efficacité du système. I.1.1.1 [22]

Dans ce qui suit :

T_0 : D*urée de court-circuit dans l'onduleur Z source pendant les vecteurs nuls.*

T_1: *Durée de l'états actif de l'onduleur pendant* T.

T: *Période de commutation de la structure Z source, ou*

$$T = T_0 + T_1 \qquad \text{(I.11)}$$

D: *Rapport cyclique(Duty-cycle)* $D = \frac{T_0}{T}$ (I.12)

B : Amplification de l'etage continu

G : Amplification globale du système

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance lors d'une période de commutation est conçue pour être nulle, donc

$$< V_L > = \frac{T_0 * V_C + T_1 * (V_{dc} - V_c)}{T} = 0 \qquad \text{(I.13)}$$

A partir de l'équation (2.8) en déduit la tension aux bornes du capacité C.

$$V_{c1} = V_{c2} = V_c = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{dc} \qquad \text{(I.14)}$$

Pour calculer la tension maximale à l'entrée de l'onduleur $\hat{V}_i$ appelé tension de bus continu.

$$\hat{v}_i = 2v_c - V_{dc} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{dc} = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} V_{dc} \qquad \text{(I.15)}$$

On remplace $D = \frac{T_0}{T}$ le rapport cyclique de court-circuit dans l'équation (I.15),

On trouve le gain *B* de l'amplification de l'étage continu qui doit être supérieur ou égale à 1 :

$$B = \frac{\hat{V}_i}{\hat{V}_{dC}} = \frac{1}{1 - 2D_0} \geq 1 \qquad \text{(I.16)}$$

Et le gain *G* : amplification globale du système définie par

$$G = r.B = \frac{2\hat{V}_m}{\hat{V}_{dc}} \qquad \text{(I.17)}$$

La figure II.5 est le tracer de gain *B* en fonction du rapport cyclique *D*, démontrant ainsi le phénomène d'augmentation de tension $\hat{V}_i$ associé au Z-source.

Pour maintenir une tension continue positive V_i aux bornes de l'onduleur, il est essentiel de maintenir le rapport cyclique D en dessous de 0,5. Cette particularité constitue l'un des avantages du Z-source, puisque l'intégration d'un réseau d'impédance Z à un onduleur conventionnel permet d'augmenter la tension d'entrée continue sans nécessiter l'utilisation d'un hacheur de suralimentation, entraînant ainsi une diminution du nombre de commutateurs.

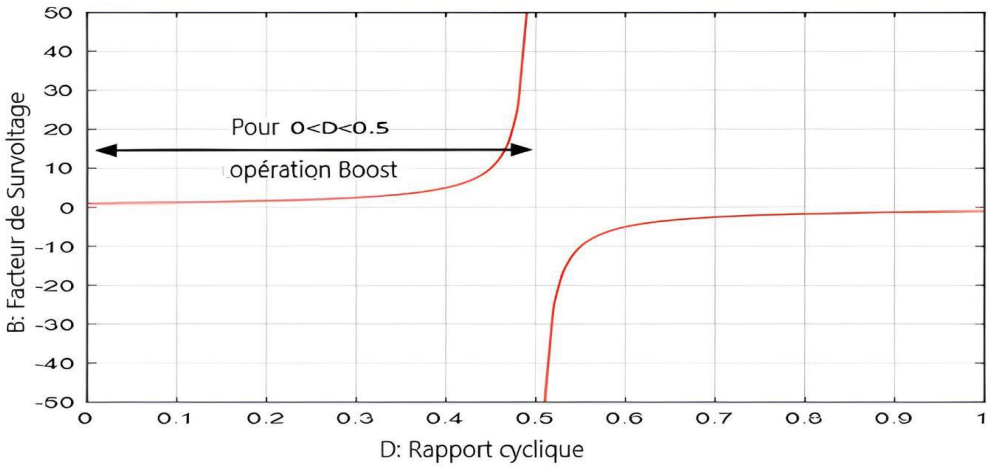


Figure I.39:le gain B en fonction du rapport cyclique D.

I.6.5. Simulation d'un hacheur à Z-Source

a) Simulation d'un hacheur à Z-Source en boucle ouverte

La figure I.40 représente un hacheur à Z-Source en boucle ouverte ou nous allons voir l'effet de rapporte cyclique sur la tension de sortie de l'hacheur.

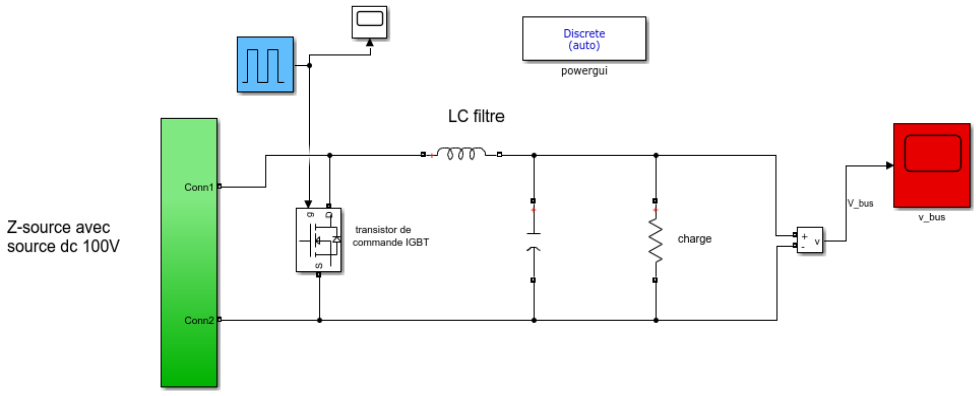


Figure I.40: Schéma fonctionnel Matlab Simulink de la topologie de conversion de la z-source en boucle ouverte.

Résultat de simulation :

- Pour un rapport cyclique D=10%.

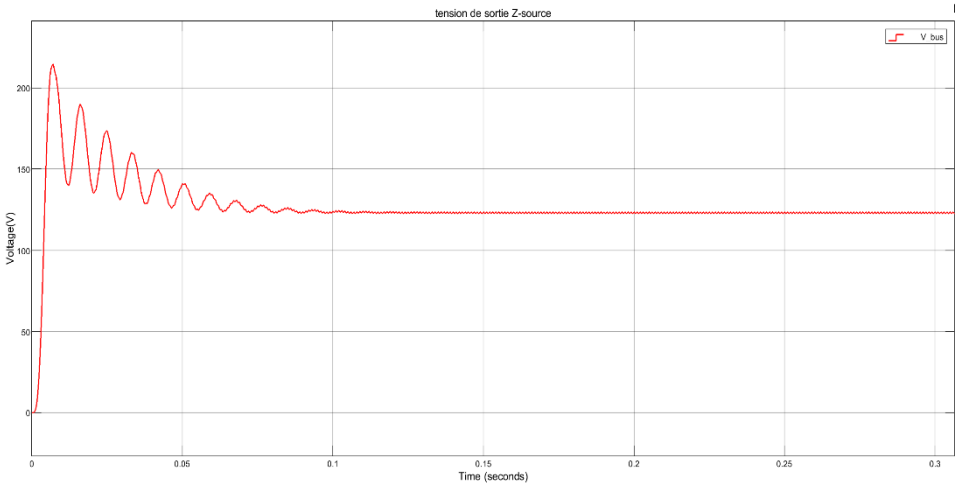


Figure I.41:Réponse en tension de la z-source 1.

- Pour un rapport cyclique D=40%.

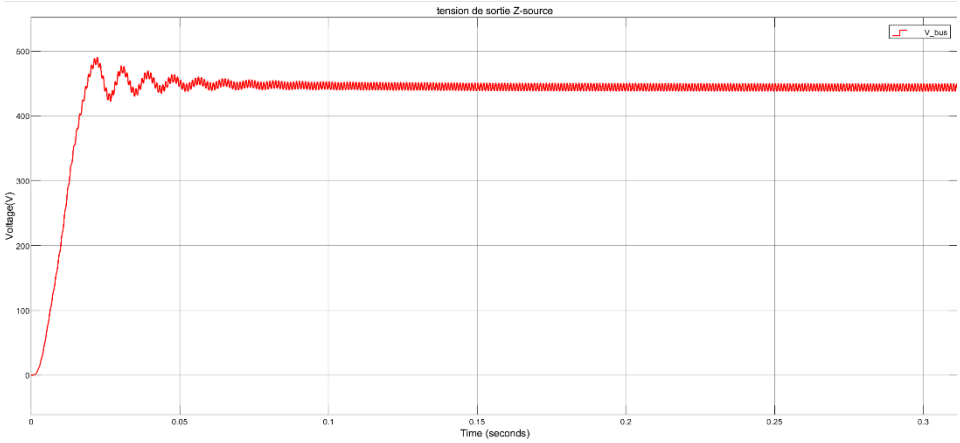


Figure I.42:Réponse en tension de la z-source 2.

Interprétation des résultats :

On remarque que lorsque le rapport cyclique D augmente, la tension de sortie de l'hacheur à source Z augmente également, conformément à la formule du facteur de survoltage (Equation I.16)

b) Simulation d'un hacheur à Z-Source en boucle fermée (Utilisation d'un régulateur PID) :

- Pour Ref= 200V

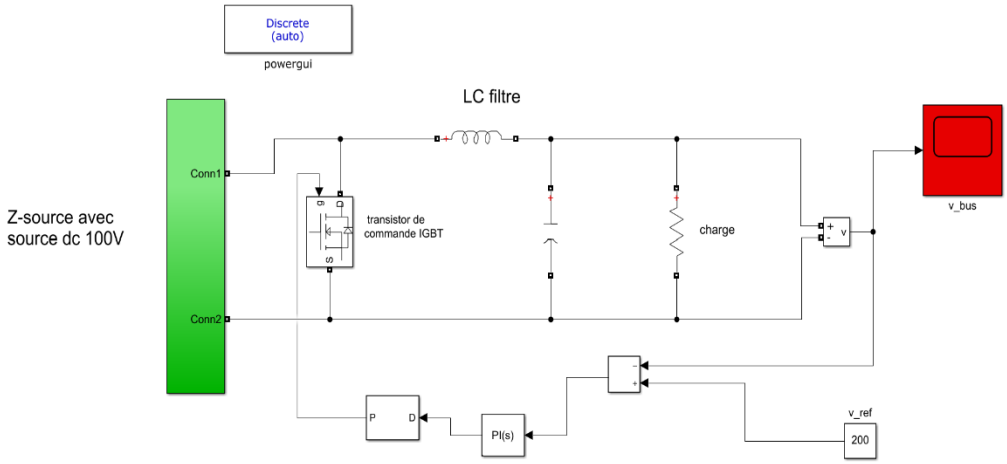


Figure I.43: Schéma fonctionnel Matlab Simulink de la topologie de conversion de la source Z en boucle fermée (commande PI).

Résultat de simulation :

- Pour Ref= 150V

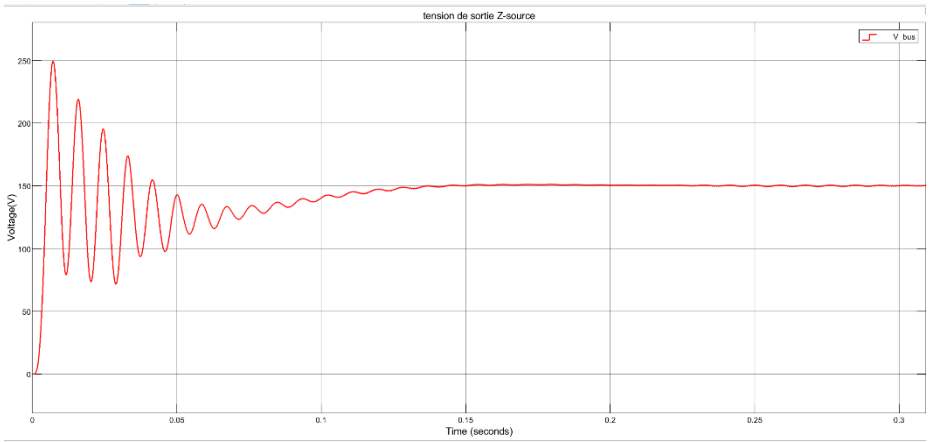


Figure I.44:Réponse en tension de la z-source 3.

Interprétation des résultats :

- On remarque que l'hacheur à source Z fonctionne en boucle fermée avec un régulateur PI. Les tensions de sortie sont atteintes pour différentes tensions de référence : 150 V (figure I.44) et 200 V (figure I.45)

c) Simulation d'un hacheur à Z-Source en boucle fermée (avec une commande intelligente) :

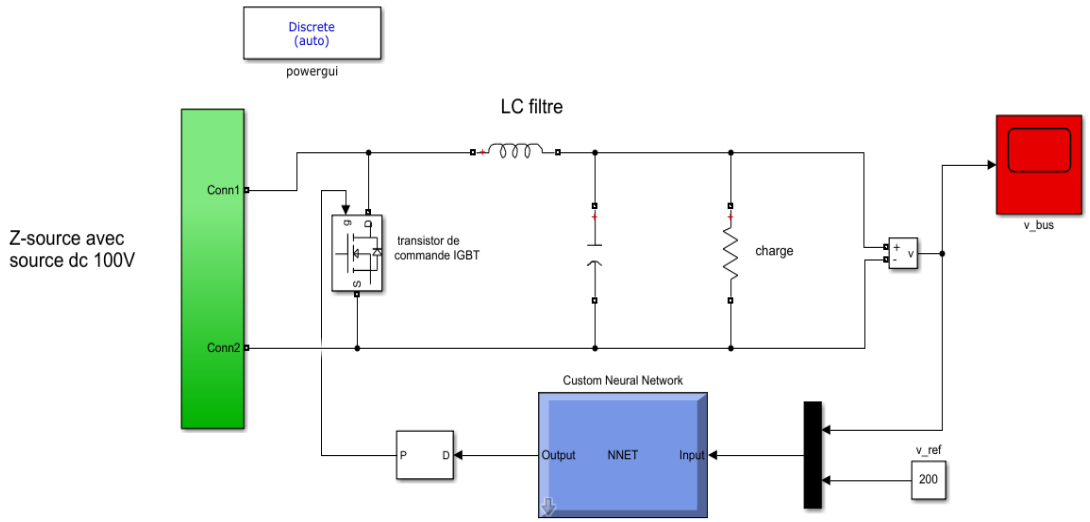


Figure I.45: Schéma fonctionnel Matlab Simulink de la topologie de conversion de la source Z en boucle fermée (commande intelligente).

Résultat de simulation :

- Pour Ref= 150V

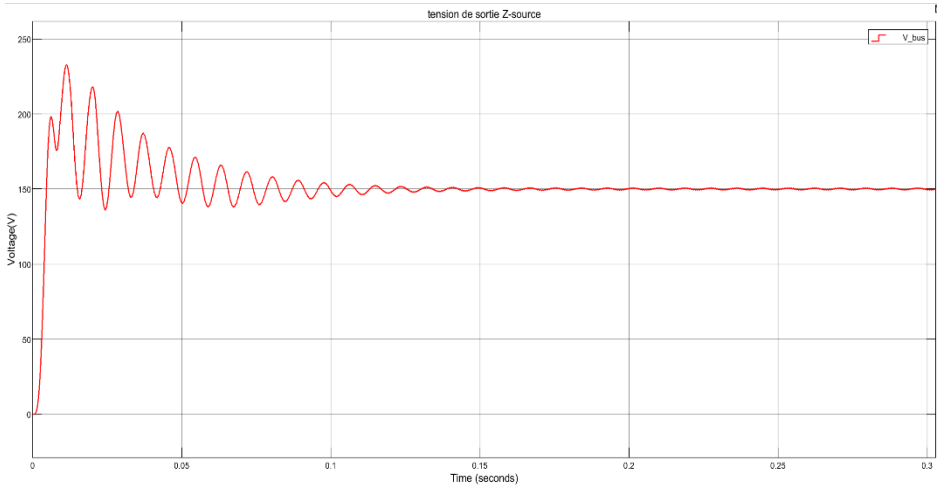


Figure I.46:Réponse en tension de la z-source 5.

- Pour Ref= 200V

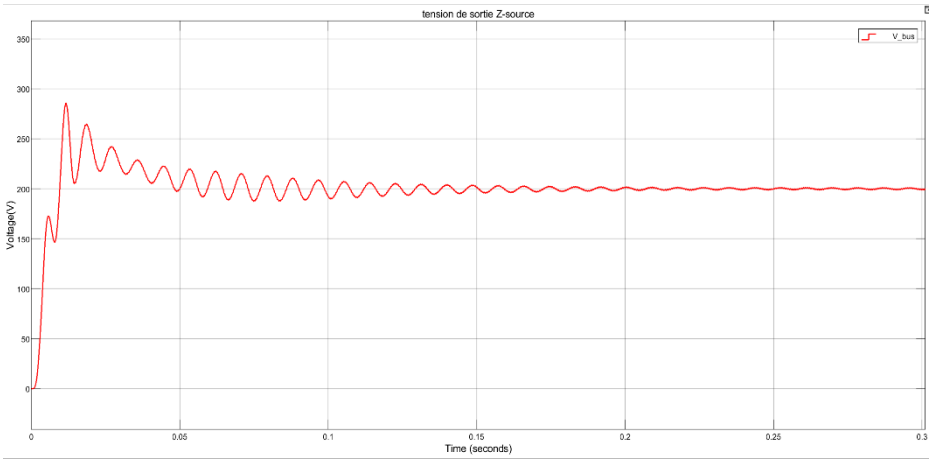


Figure I.47:Réponse en tension de la z-source 6.

Interprétation des résultats :

- On remarque que l'hacheur à source Z fonctionne en boucle fermée avec une commande intelligente. Les tensions de sortie sont atteintes pour différentes tensions de référence : 150 V (figure I.47) et 200V (figure I.48).

I.7.Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principales topologies d'onduleurs multiniveaux, en mettant particulièrement l'accent sur les convertisseurs en cascade et les techniques de modulation, telles que la modulation sinusoïdale en largeur d'impulsion (PSPWM). Les convertisseurs à source Z (ZSC) ont également été introduits pour leur capacité à combiner les fonctions buck et boost grâce à leur réseau d'impédance intégré. Cette caractéristique constitue un avantage majeur pour les systèmes alimentés par des sources d'énergie renouvelables, souvent soumises à des fluctuations.

Chapitre II

Les systèmes d'énergie photovoltaïque

Chapitre II : Les systèmes d'énergie photovoltaique

II.1.Introduction

Dans un contexte de transformation globale vers des énergies plus vertes, où chaque geste compte pour préserver notre planète, Ce chapitre explore les principes fondamentaux sur les différentes formes d'énergie, et les différents dispositifs de stockage telles que les batteries, les supercondensateurs …etc. qui compensent l'intermittence des énergies renouvelables et stabilisent l'approvisionnement énergétique, et les processus de la conversion énergétique. Les chaînes de conversion, comprenant des convertisseurs DC-DC, des onduleurs et des transformateurs, jouent également un rôle fondamental en adaptant et conditionnant l'énergie depuis la source jusqu'aux charges [23].

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque. Ainsi nous détaillons les éléments ayant traits à cette ressource et sa transformation en énergie électrique, On exploitant les techniques de la commande intelligente afin d'obtenir des résultats stables et convaincants avec différentes variations des conditions météorologiques.

II.2.Les differentes sources des énergies renouvelables

Il existe de nombreux types d'énergies renouvelables utilisés dans le monde, parmi lesquels on peut citer :

II.2.1. Énergie hydraulique

L'hydroélectricité est une forme d'énergie qui utilise l'eau comme source primaire pour produire de l'électricité. En exploitant l'écoulement naturel des rivières ou la force des chutes d'eau, des turbines hydrauliques transforment l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique. Comme les anciens moulins, la force de l'eau fait tourner une turbine, qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité. Dans une centrale gravitaire, la puissance électrique dépend du débit d'eau et de la dénivelée.

La **figure II.1** représente le principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire pour la production de l'électricité.

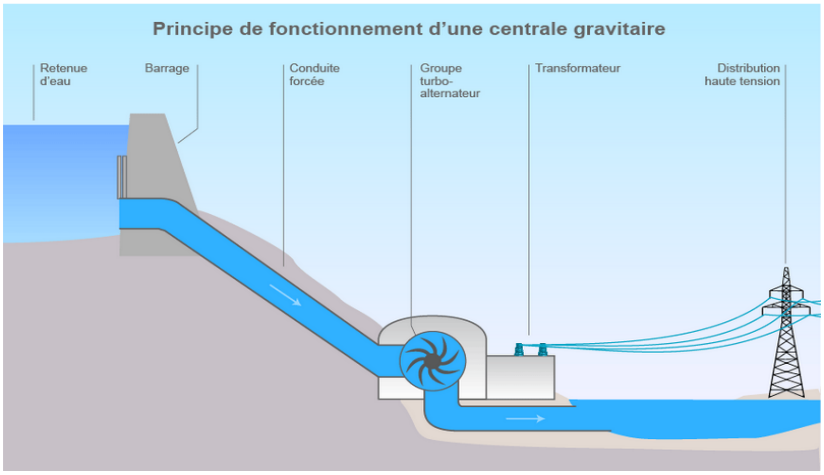


Figure II.1: le principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire pour la production de l'électricité [24].

II.2.2. Energie géothermique

L'énergie géothermique est dérivée de la chaleur interne de la Terre et est utilisée à des fins de production d'électricité ainsi que pour le chauffage. Actuellement, elle représente environ 0,4 % de la production mondiale d'électricité. Cette technologie est exploitée dans des pays tels que l'Italie, les États-Unis, l'Indonésie, le Japon et la Nouvelle-Zélande. Pour exploiter cette ressource, de l'eau froide est injectée sous la surface terrestre, où elle est chauffée par les roches souterraines. L'eau chaude ainsi obtenue est ensuite pompée à la surface et, en fonction du niveau de température disponible, peut être utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale géothermique, soit directement pour le chauffage des bâtiments (radiateurs, douches, etc.).

Parmi les différents types de centrales géothermiques, on trouve notamment la centrale géothermique à vapeur sèche. La Figure II.2 présente les principaux composants de ce type de centrale.

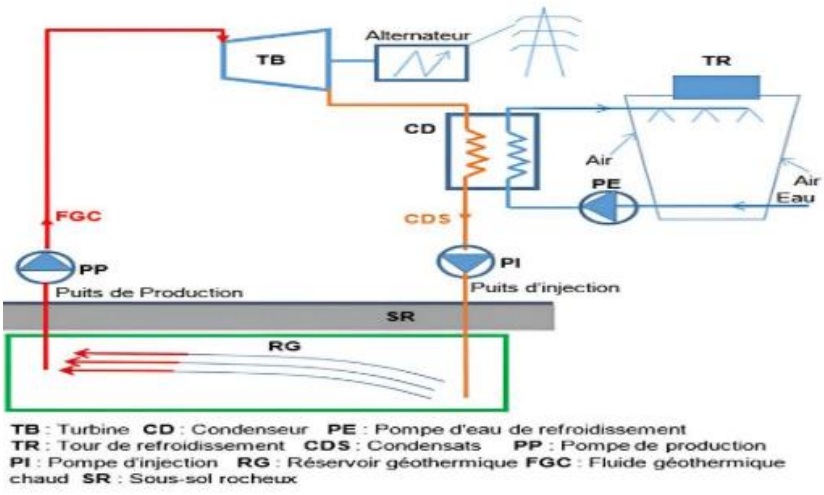


Figure II.2: Principaux composants de la centrale géothermique à vapeur sèche [25].

II.2.3. Energie eolienne

Les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement. La figure II.3 représente l'une des formes de l'eolienne

L'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours l'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moudre le grain ou pomper l'eau. L'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus « prometteuses » à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental. Pendant ces dernières années l'éolien c'est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. Les avancements technologiques dans ce domaine, ne cessent de progresser.

- **Production d'énergie électrique** : l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. [26]



Figure II.3: une eolienne**.**

II.2.4. Énergie solaire:

Le soleil fournit une énergie colossale à la terre (grande a des milliers de fois l'énergie nécessaire) sous forme rayonnement lumineuse. Ce rayonnement, d'une puissance moyenne de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m2), couvre tout le spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts terrestres reçoivent en seulement six heures plus d'énergie solaire que l'humanité n'en consomme sur une année entière [27]. Bien que cet apport soit significativement atténué lors de sa traversée de l'atmosphère, une quantité

considérable atteint néanmoins la surface du sol. En moyenne, on estime à environ 1000 W/m2 dans les régions tempérées et jusqu'à 1400 W/m2 dans les régions où l'atmosphère est peu polluée en particules ou en humidité [23]

II.3. Le système photovoltaïque

II.3.1. Cellule photovoltaïque

On appelle aussi photopile, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est une unité élémentaire d'un système photovoltaïque, génère une faible puissance électrique avec une tension environ de 0.6V.

II.3.2. Effet photovoltaïque

C'est la capacité d'un certain matériau de transformation directe de la lumière en électricité, Ce phénomène physique se produit lorsqu'un matériau libère des électrons sous l'influence de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée.[28]

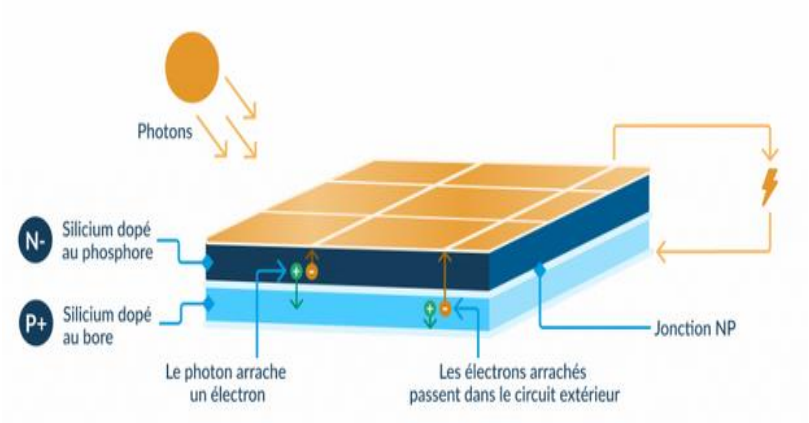


Figure II.4: Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [29].

II.3.3. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce schéma (figure II.5) représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R

représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt Rp représente le courant de fuite. Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. [30]

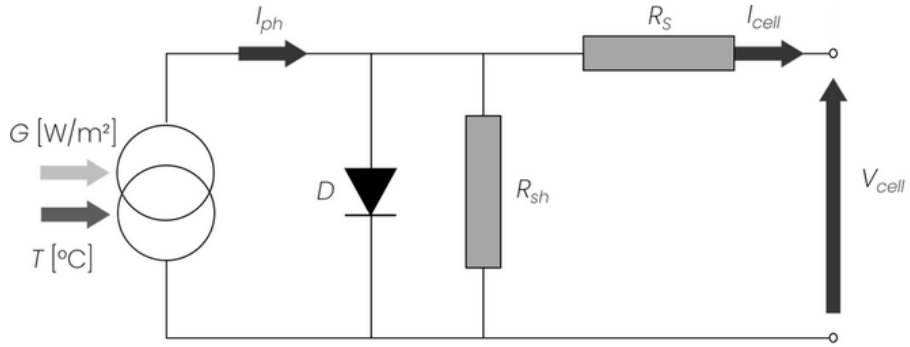


Figure II.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.[31]

II.3.4. Modèle mathématique de la cellule photovoltaïque :

En se basant sur le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque présenté dans la Figure IV.3, l'équation (II.1) illustre le modèle mathématique correspondant à cette cellule photovoltaïque [32][33][34].

$$I = [I_{ph}] - \left[I_{sat}(e^{\frac{(V+IR_S)}{k_0}} - 1)\right] - [\frac{V+IR_s}{R_{sh}}] \qquad \text{(II.1).}$$

Où $k_0 = \frac{AKT}{q}$.

I : *Courant de sortie de la cellule photovoltaïque.*

V :. *Tension de de sortie de la cellule photovoltaïque*

I_{ph}: *Courant généré par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux*

I_{sat} : *Courant de saturation inverse de la cellule.*

A : *facteur d'idéalité (=1)*

k : *Constant de boltzmann* (k = 1.3805 ∗ 10−23 $N \cdot \frac{m}{K}$).

T : *Température de la cellule* ($°C$).

q : *Charge d'électron* (q = 1.6 ∗ 10−19 C).

Rs : *Résistance série* (Ω).

Rsh : *Résistance Shunt* (Ω).

II.3.5. Association des cellules photovoltaïques:

Pour obtenir une puissance accrue, plusieurs cellules sont regroupées en un module, plusieurs modules forment un panneau, et plusieurs panneaux constituent un champ photovoltaïque. [23]

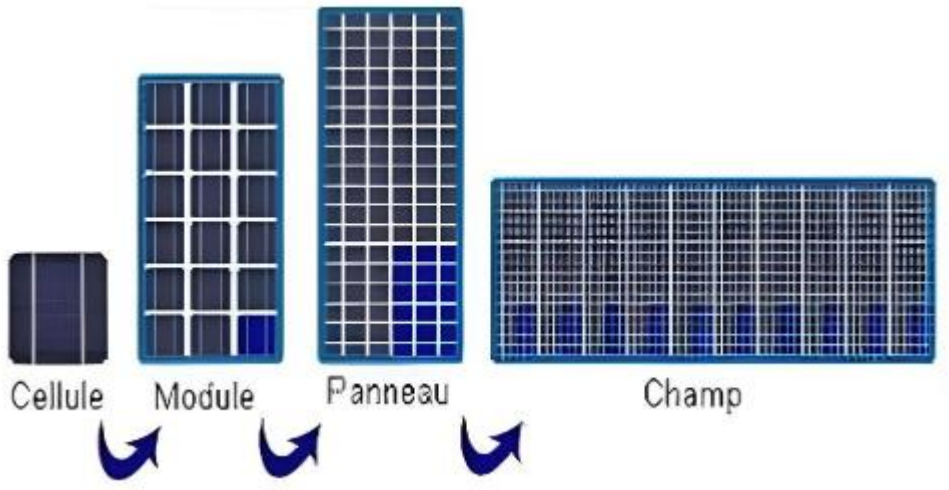


Figure II.6:Les composants photovoltaïques : cellule, panneau, module et champ.

II.3.5.1 Association série (Figure II.7)

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [35]. Les équations (II.2) et (II.3) donnent la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit de l'association série de ns cellules respectivement.

$$v_{co_{ns}} = ns * v_{co} \quad \text{(II.2)}$$

$$I_{cc_{ns}} = I_{cc} \quad \text{(II.3)}$$

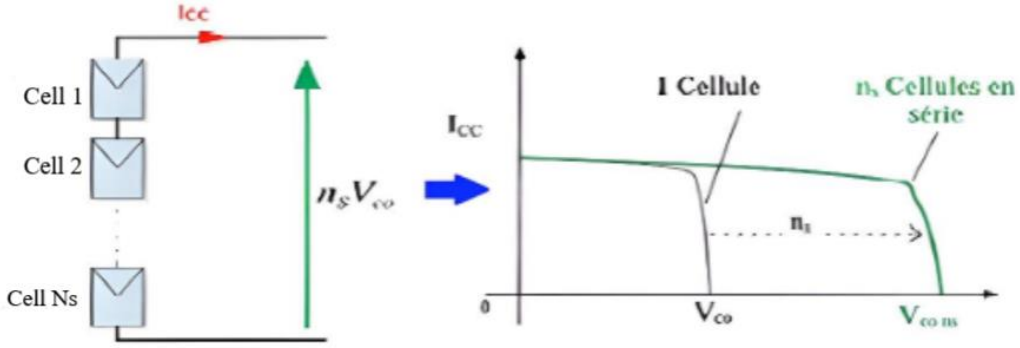


Figure II.7: l'association des cellules en série et la caractéristique I(V) d'un module Photovoltaïque [36][37].

II.3.5.2 Association en parallèle (Figure II.8)

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche [35]. Les équations (II.4) et (II.5) résument les caractéristiques électriques d'une association en parallèle de np cellules :

$$v_{co_{np}}=v_{co} \qquad \text{(II.4)}$$

$$I_{cc_{np}}=np * I_{cc} \qquad \text{(II.5)}$$

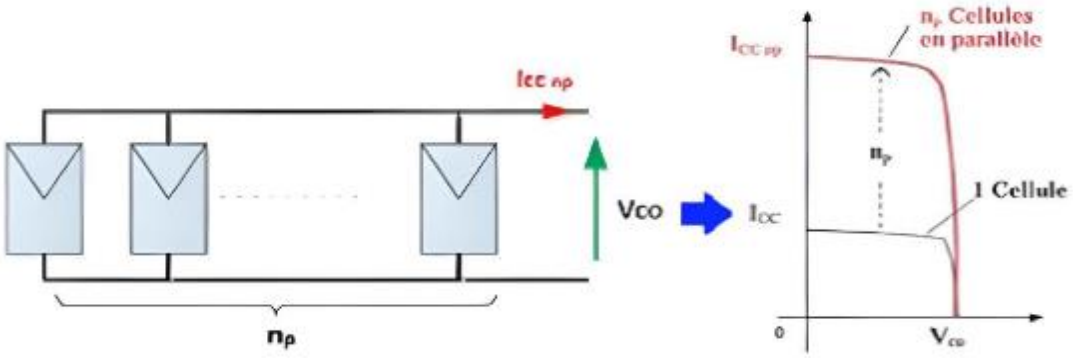


Figure II.8:l'association des cellules en parallèle et la caractéristique I(V) d'un module Photovoltaïque [37].

II.3.5.3 Association mixte (série- parallèle)

La caractéristique I(V) d'un générateur constitué de plusieurs cellules (ns cellules * np cellules) (voir figure II.9) a une allure générale assimilable à la cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule et que l'ensoleillement et la température soient uniformes.[38]

Les équations (II.6) et (II.7) résument les caractéristiques électriques d'une association (ns*np) cellules élémentaires.

$$v_{co_{ns}}=ns * v_{co} \qquad \text{(II.6)}$$

$$I_{cc_{np}}=np * I_{cc} \qquad \text{(II.7)}$$

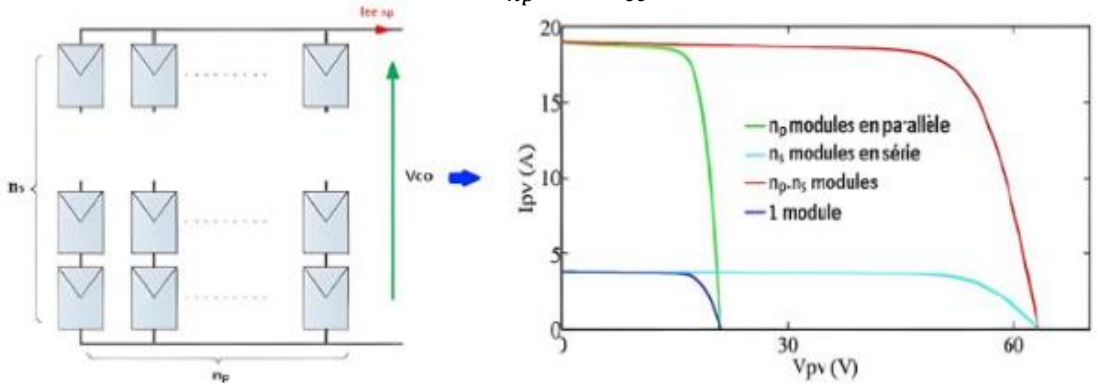


Figure II.9: caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque a association mixte des cellules [37]

II.4. Comportment d'une cellule photovoltaïque

II.4.1. Influence de l'ensoleillement E (W/m2)

La variation du l'éclairement (l'ensoleillement) solaire provoque une variation du courant proportionnelle à cette dernière et une variation de la tension relativement faible. En état de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.[39]

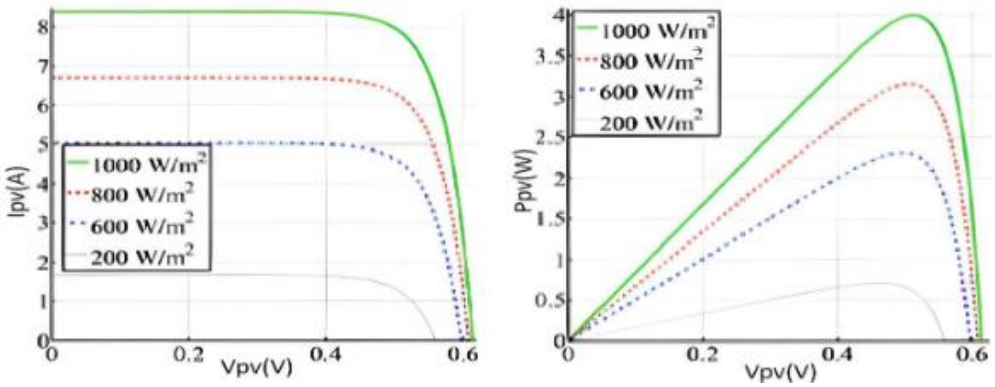


Figure II.10:Influence de l'éclairement sur les caractéristiques d'une Cellule photovoltaïque I(A) et P(W) à T=25°C. [23]

II.4.2. Influence de la temperature

La température et aussi un paramètre essentiel dans le comportement des cellules photovoltaïques car les semi-conducteurs sont sensibles à la température. La température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.[38]

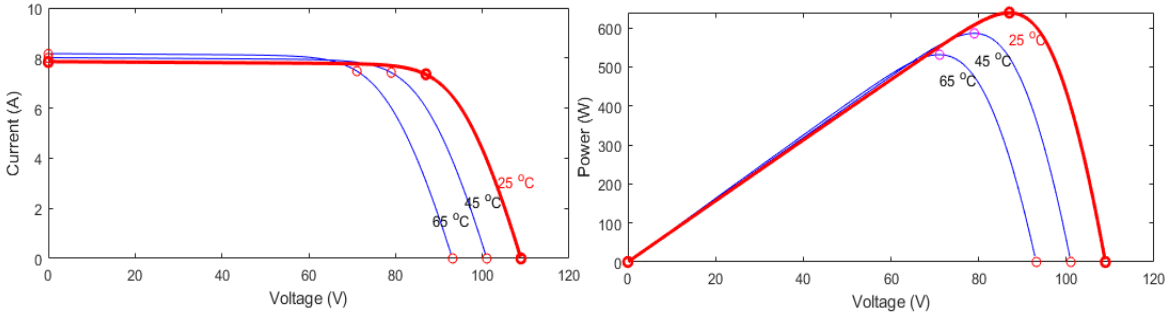


Figure II.11: Influence de la température sur les caractéristique V(v) et P(w) d'une cellule Photovoltaïque à E=1000W/m^2.

II.5.Les systèmes energies photovoltaique

II.5.1. Les systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes avec stockage

Les systèmes photovoltaïques autonomes fonctionnent indépendamment du réseau électrique et sont conçus pour fournir de l'électricité à des charges en utilisant uniquement l'énergie solaire. Ils comprennent des batteries pour stocker l'énergie excédentaire produite pendant la journée, assurant ainsi une alimentation électrique continue même lorsque la lumière du soleil n'est pas disponible.

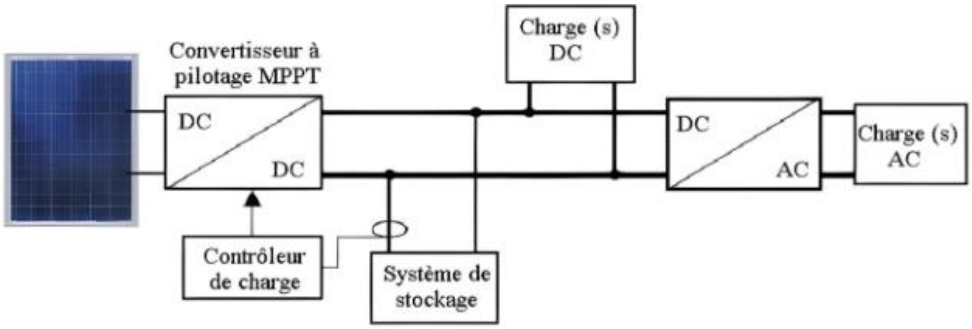


Figure II.12: Systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes avec système de stockage [40].

II.5.2. Les systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes sans stockage

Les systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes sans stockage fournissent de l'électricité directement à la charge en temps réel. Ces systèmes sont principalement utilisés pour des applications diurnes ou dans des conditions où une alimentation continue n'est pas essentielle.[23]

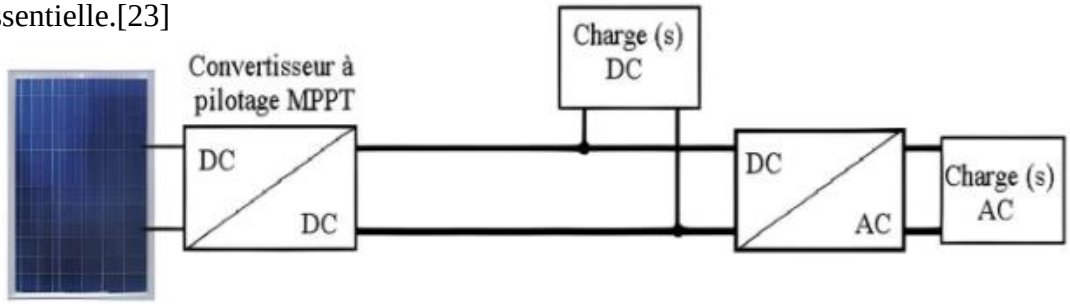


Figure II.13:Systèmes d'énergie photovoltaïque autonomes sans système de stockage.

II.6.Les systèmes de stockage

Pour stocker l'énergie il y'a plusieurs méthodes sont disponibles, notamment le stockage sous forme d'eau, d'hydrogène, dans des volants d'inertie, des batteries électrochimiques (plomb, lithium) ou des supercondensateurs. Ces dispositifs de stockage jouent un rôle crucial dans les systèmes en site isolé, assurant l'autonomie en accumulant l'excès d'énergie lors des périodes de production excédentaire et en la restituant lorsque la production est insuffisante. [41]

II.6.1. Les batteries

Les batteries d'accumulateurs sont la solution la plus utilisée pour un stockage d'énergie électrique à petite échelle. La batterie fonctionne grâce à une réaction chimique d'oxydoréduction entre deux électrodes plongées dans des solutions électrolytiques.

- Une électrode agit comme anode (où se produit l'oxydation) → elle libère des électrons.
- L'autre électrode agit comme cathode (où se produit la réduction) → elle capte des électrons.
- Les électrons quittent l'anode, circulent dans le circuit électrique externe (générant un courant électrique I_{batt} **)** et arrivent à la cathode.
- À l'intérieur de la batterie, les ions circulent à travers le pont électrolytique pour maintenir l'équilibre électrique entre les deux solutions.

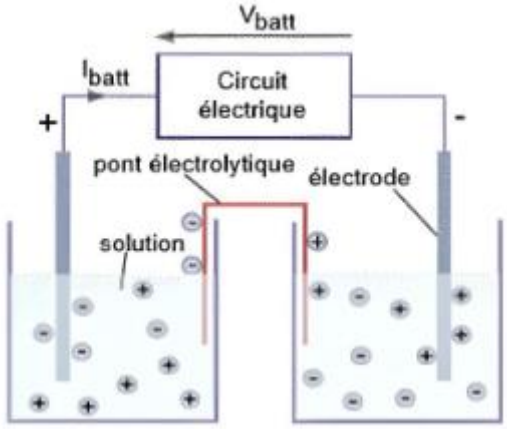


Figure II.14:Principe de la batterie [41]

II.6.1.1 Caractéristiques clés des Batteries

- **Capacité Nominale (Ah ou Wh) :** indique la quantité d'énergie que la batterie peut stocker, déterminant ainsi la durée d'alimentation d'une charge avant rechargement. Exprimée en ampères-heures (Ah) ou en watt-heure (Wh).
- **Tension Nominale (V)** : Représente la tension électrique délivrée par la batterie en fonctionnement normal, variant selon le type (ex. : 12 V pour plomb-acide, 3,6 V pour lithium-ion)
- **Courant de Charge et de Décharge (A) :** Indique la quantité de courant que la batterie peut accepter ou fournir sans dommage. Le courant de charge est la vitesse de recharge, et le courant de décharge est la vitesse de restitution d'énergie, crucial pour les applications à forte demande.

- **L'état de charge SOC (State Of Charge) :** Est rapport entre l'énergie restante dans la batterie et la capacité totale de la batterie, selon la formule suivante :

$$SOC = (\frac{Qrestante}{Qtotale}) \times 100 \quad \text{(II.8)}$$

Qrestante : La charge (capacité) restante dans la batterie (en Ah ou Wh).

Qtotale : La capacité totale de la batterie (en Ah ou Wh).

Le SOC est crucial pour une gestion optimale de l'énergie, en particulier dans les systèmes photovoltaïques où la production d'énergie est intermittente. Permet de savoir combien de temps la batterie pourra encore alimenter un appareil avant de devoir être rechargée.[23]

II.6.1.2 Connexions des batteries

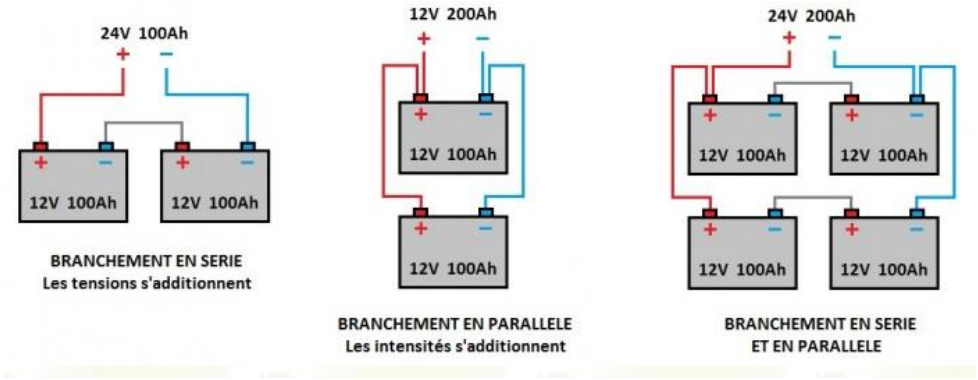


Figure II. 15: Principe de connexions des batteries.[41]

- **Connexion série :** sert à augmenter la tension.
- **Connexion parallèle :** sert à augmenter la capacité Nominale et la quantité d'énergie que la batterie peut stocker ou extraire.
- **Connexion série parallèle :** sert à augmenter à la fois la tension et quantité d'énergie que la batterie peut stocker ou extraire.

II.6.2. Les supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des solutions alternatives aux batteries, elles s'apparentent à des condensateurs possédant une très grande capacité. Selon le même principe que les batteries [43].

II.6.2.1 Structure et fonctionnement

- Un supercondensateur est composé de deux électrodes immergées dans un électrolyte, séparées par un isolant poreux appelé séparateur.
- Contrairement aux condensateurs conventionnels qui stockent l'énergie dans un champ électrique, les supercondensateurs stockent l'énergie à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte, en formant une double couche électrochimique.
- Cela leur permet de stocker plus d'énergie que les condensateurs traditionnels tout en conservant une capacité de décharge rapide.[23]

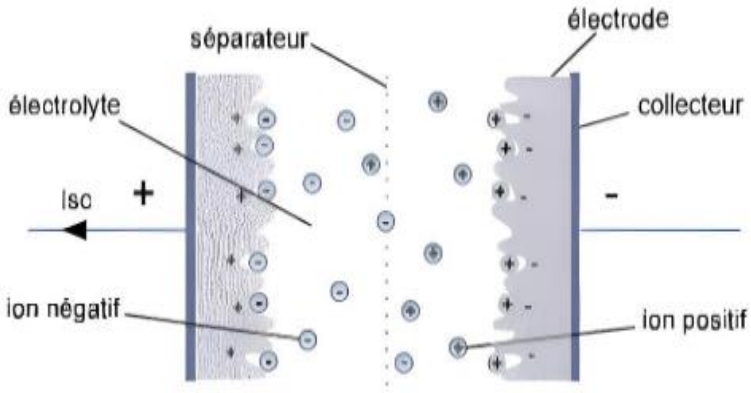


Figure II.16: Principe des supercondensateurs.[41]

II.6.3. Les piles à combustible:

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique d'un carburant (souvent l'hydrogène) en électricité, avec de la chaleur et de l'eau comme sous-produits. Contrairement aux batteries, elles n'ont pas besoin d'être rechargées, tant qu'un apport de carburant et d'oxygène est fourni.[44]

II.6.3.1 Principe de fonctionnement:

La pile à combustible illustré dans la figure II.17 transforme directement l'énergie chimique de l'hydrogène (H_2) et de l'oxygène (O_2) en électricité**,** eau et chaleur**.**

À l'anode :

- L'hydrogène (H_2) arrive et réagit en libérant des protons H^+et des électrons e^-:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

- Les électrons partent dans le circuit externe pour produire un courant électrique**.**

À travers la membrane :

- Les protons H^+ traversent une membrane électrolytique spéciale pour rejoindre la cathode.

À la cathode :

- L'oxygène (O_2) venant de l'air capte les protons H^+et les électrons e^- pour former de l'eau (H_2O) :

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

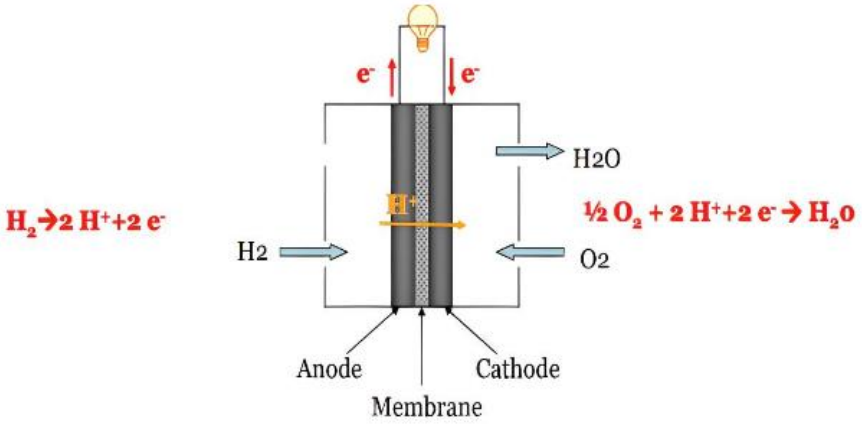


Figure II.17: Principe de la pile à combustible [45]

II.7.Étage d'adaptation continu-continu à Z source

Afin d'exploiter au maximum l'énergie produite par un système photovoltaïque, il est nécessaire d'ajouter un étage d'adaptation entre la source photovoltaïque et la charge. Cet étage peut inclure un convertisseur DC-DC Buck, Boost, Buck-Boost. Notre étude se base principalement sur les convertisseurs DC-DC à source Z.

La Figure I.29 présente le synoptique d'une chaîne de conversion photovoltaïque à base de Z source. L'étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) (poursuite du point de puissance maximale) qui lui permet de suivre le point de puissance maximale que peut fournir un générateur photovoltaïque.[23]

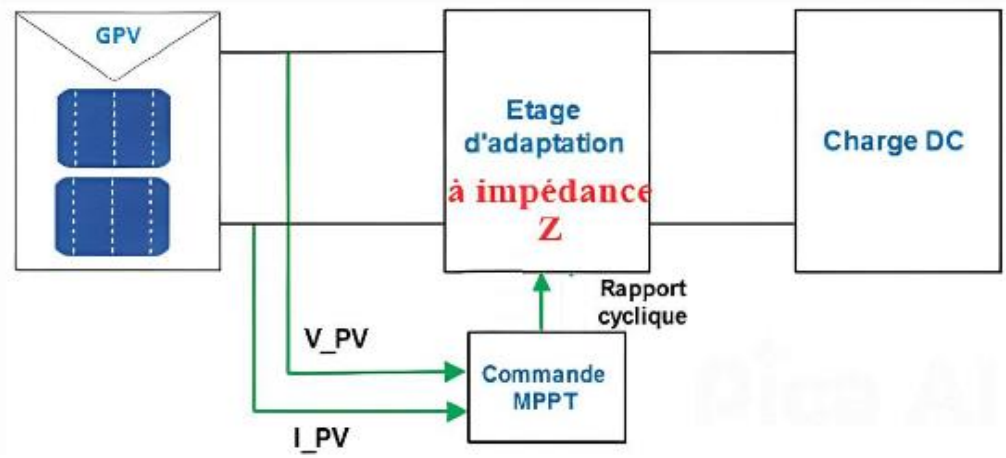


Figure II.18: Chaîne de conversion photovoltaïque a impédance Z [23].

II.8.Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe dans la littérature des nombreux algorithmes de recherche de MPP depuis la première utilisation de cette commande. Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance en ajustant automatique le rapport cyclique D.

En intégrant un convertisseur DC-DC entre le module PV et la charge, cette technique garantit un transfert efficace de la puissance maximale.

Plusieurs méthodes directes et indirectes ont été développées pour atteindre cet objectif, chacune présentant ses propres avantages et limitations. Quelques-unes de ces méthodes sont étudiées ci-dessous en utilisant un convertisseur DC-DC à source Z. [23]

II.8.1. Technique de Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme *Perturb and Observe* (P&O) est l'une des techniques les plus couramment utilisées pour le suivi du point de puissance maximale *(Maximum Power Point Tracking* ou MPPT) dans les systèmes photovoltaïques PV en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Son principe consiste à perturber la tension Vpv d'une faible valeur autour de sa valeur initiale, puis à analyser la variation de puissance Ppv qui en résulte. Comme illustré dans la figure II.19.[46][47]

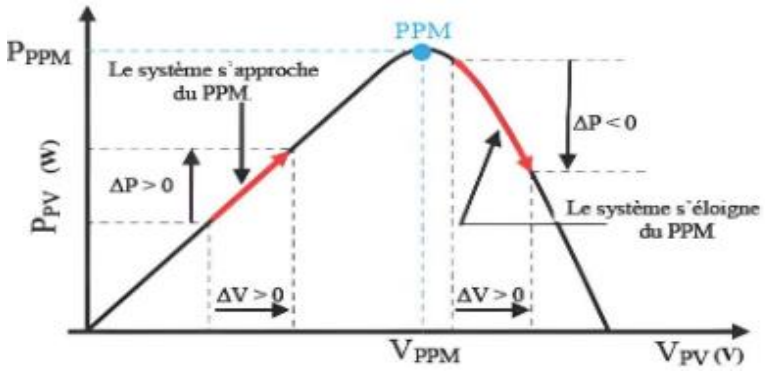


Figure II.19: Schéma du principe de la méthode P&O. [48]

Fonctionnement de l'organigramme :

L'algorithme suit trois étapes clés : mesure**,** comparaison et décision (Figure II.20)**.**

- **La mesure :** Tout commence par une mesure initiale de la puissance, de la tension et du courant délivrés par le générateur photovoltaïque (PV). Ces mesures permettent de stocker les valeurs précédentes de la puissance $P(k-1)$ et de la tension $v(k-1)$.
- **La comparaison :** à chaque itération, le système mesure la puissance $P(k)$et la tension $v(k)$ actuelles du générateur et compare ensuite la puissance actuelle avec la puissance précédente $P(k-1)$ pour déterminer si elle a augmenté ou diminué.

- **La décision :**
  - Si la puissance a augmenté, cela signifie que la dernière action sur le rapport cyclique D (qui modifie la tension) a rapproché le système du point de puissance maximale (MPP)**.** Dans ce cas, le système continue à perturber dans la même direction (c'est-à-dire continuer à augmenter ou diminuer la tension) pour tenter d'atteindre ce point optimal.
  - Si au contraire la puissance diminue, cela indique que le changement précédent s'est éloigné du MPP. Le système va alors inverser la direction de la perturbation afin de retrouver la trajectoire menant au point optimal.

Après chaque cycle, les valeurs mesurées P(k) et v(k) deviennent les nouvelles références pour l'itération suivante (elles remplacent P(k – 1) et v(k – 1)). Ce processus se répète en boucle, permettant au système de se rapprocher progressivement du MPP puis de se stabiliser autour de ce point**.**

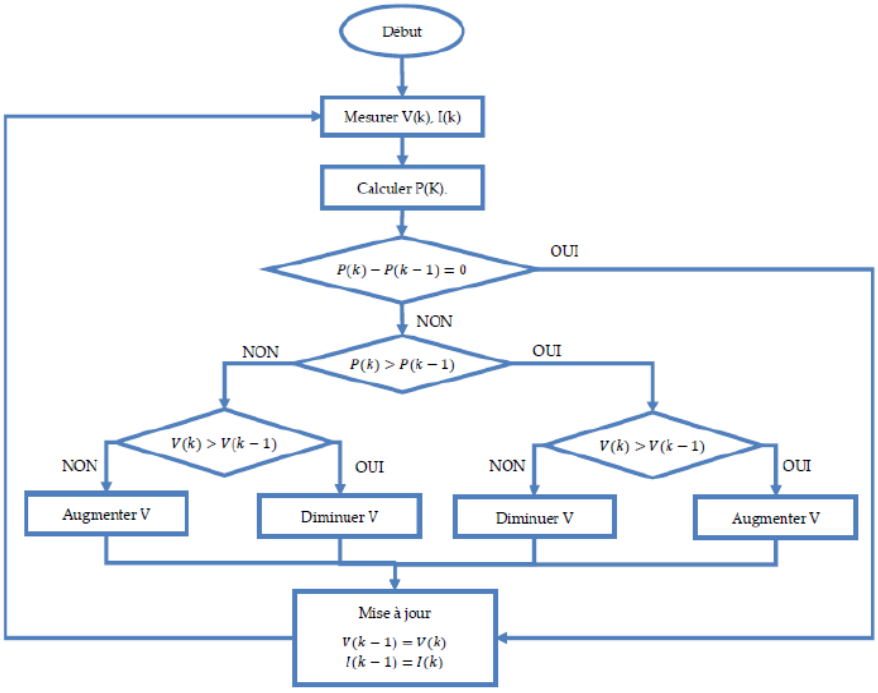


Figure II.20: Organigramme de la méthode P&O [49]

II.8.2. La technique d'incrémental Conductance (INC)

La technique de l'Incrémental Conductance (INC) est une méthode avancée de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques (PV). Elle repose sur L'analyse directe des dérivées de la puissance par rapport à la tension.[28] Cette méthode

exploite la relation mathématique entre le courant et la tension du générateur PV pour déterminer précisément si le système fonctionne au point de puissance maximale (MPP)

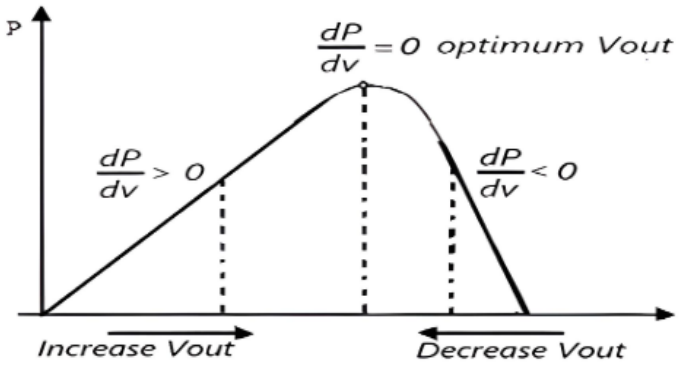


Figure II.21: Principe de la technique Incrémental conductance.[23]

À partir de la relation $P = VI$, on peut décomposer $\frac{dP}{dV}$ en fonction du courant et de la Tension

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = V\frac{dI}{dV} + I \qquad \text{(II.9)}$$

- Au point de MPP si $\frac{dP}{dV} = 0$ ou $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ (II.10)
- A gauche du MPP (La tension doit être augmentée pour atteindre le MPP)

  Si $\frac{dP}{dV} > 0$ ou $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ (II.11)
- A droite du MPP (La tension doit être réduite pour atteindre le MPP)

  Si $\frac{dP}{dV} < 0$ ou $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ (II.12)

L'algorithme repose sur l'analyse de l'équation I.7, qui conduit à la comparaison entre la conductance instantanée ($\frac{I}{V}$) et la conductance incrémentale ($\frac{dI}{dV}$). Les équations II.10, II.11 et II.12 devient respectivement.

À partir de cette comparaison, l'algorithme peut ajuster la tension du générateur PV pour maximiser la puissance.

La figure II.22 montre l'organigramme de l'algorithme de la technique Incrémental Conductance, qui inclut successivement une étape de mesure, une comparaison, puis une prise de décision.[23]

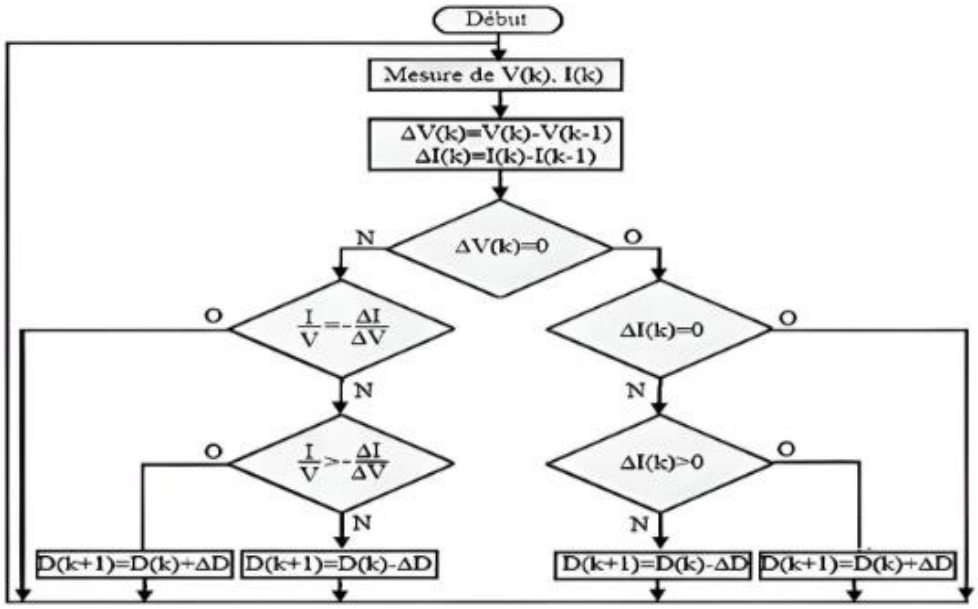


Figure II.22: Algorithme de la technique de l'incrémental conductance INC.

II.8.3. Approche basée sur les réseaux de neurones

II.8.3.1 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque neurone artificiel reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w abréviation de Wight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids. (Voir la figure II.23) [51].

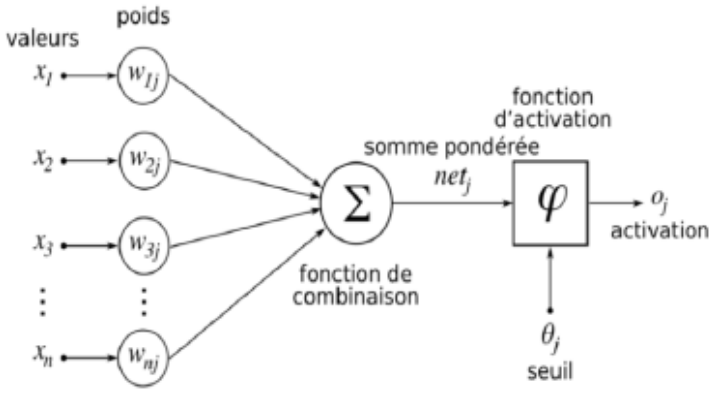


Figure II.23: neurone formel.

II.8.3.2 Les fonctions d'activation:

La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone. [52]

Les fonctions de seuillage présentent généralement trois intervalles :

1. En dessous du seuil, le neurone est non-actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou -1).
2. Aux alentours du seuil, une phase de transition.
3. Au-dessus du seuil, le neurone est actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 1)

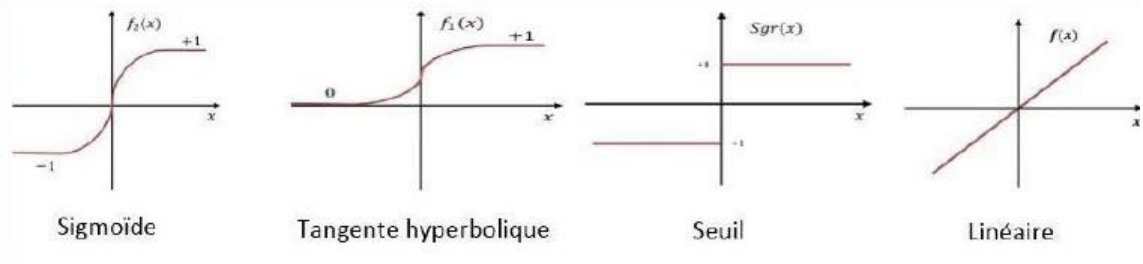


Figure II.24:Exemples de fonctions d'activation. [52]

II.8.3.3 Architectures des réseaux de neurones

Il existe principalement deux types d'architectures : réseaux bouclés et réseaux non bouclés. Les réseaux non bouclés sont unidirectionnels sans retour arrière (feed-forward). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Si tous les neurones ne sont pas des organes de sortie, on parle de neurones cachés figure II.25. Les réseaux de neurones bouclés ou avec retour en arrière (feedback network ou récurrent Network), sont dans la figure II.26.

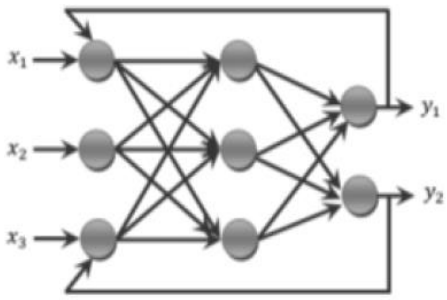


Figure II.26:Réseau bouclé.[52]

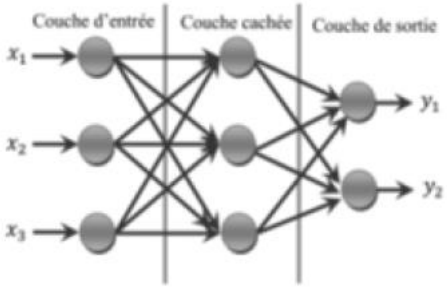


Figure II.25:Réseau non bouclé.[52]

II.8.3.4 Types d'apprentissages

Il existe principalement trois types d'apprentissage [53] :

1. **Apprentissage supervisé :** (figure II.27) qui nécessite un 'professeur' qui présente au réseau des couples de vecteurs entrée-sortie désiré. Il est effectué de la façon suivante : On présente au réseau les valeurs d'entrées et on calcule sa sortie correspondante, ensuite les poids sont ajustés de manière à réduire l'erreur de sortie. La rétropropagation est la méthode d'apprentissage la plus utilisée pour l'entraînement des réseaux statiques.
2. **Apprentissage non supervisé :** (figure II.28) où la connaissance de la sortie désirée n'est pas nécessaire. Dans ce cas, le réseau organise lui-même les entrées qui lui sont représentées de façon à optimiser un critère de coût donné et sans qu'on lui fournisse d'autres éléments de réponses. Cette propriété est appelée propriété d'auto organisation [apprentissage].
3. **Apprentissage auto-supervisé** : où le réseau de neurone évalue lui-même ses performances, sans l'aide d'un « professeur ». Un objet est présenté à l'entrée du réseau de neurones, on a indiqué la classe à laquelle appartient cet objet. Si le réseau ne le classe pas correctement, il mesure lui-même l'erreur qui le faîte, et propage cette erreur vers l'entrée. Le réseau procède à autant d'itérations qu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la réponse correcte.

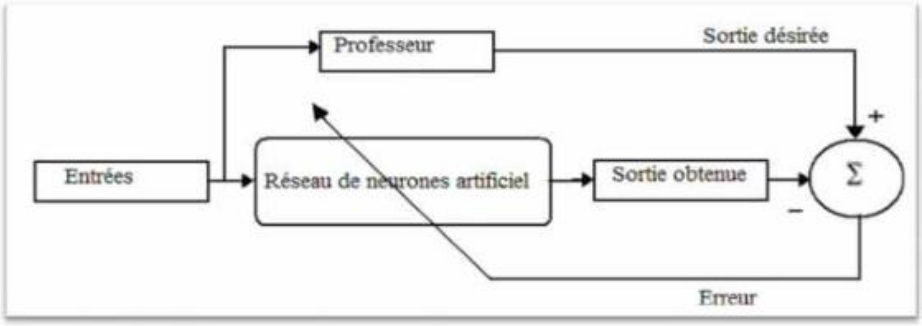


Figure II.27: Schéma bloc de l'apprentissage supervisé d'un réseau de neurone.[54]

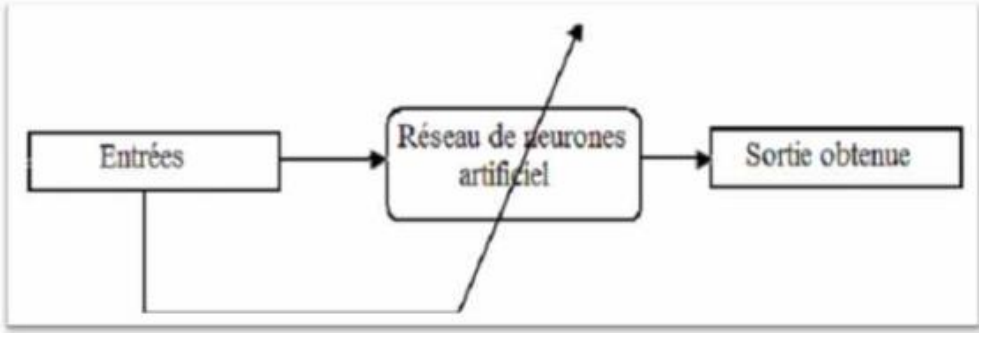


Figure II.28: Schéma bloc de l'apprentissage non supervisé d'un réseau de neurone.[54]

II.8.3.5 Le Perceptron

- **Perceptron a une seule couche :** La perception à une seule couche est le premier de trois réseaux d'après la taxonomie de la Figure II.29 qui peuvent être employés avec des entrées binaires ou continues. Ce réseau simple a suscité beaucoup d'intérêt, quand initialement, a été développé en raison de sa capacité d'apprendre à identifier des modèles simples.[54]

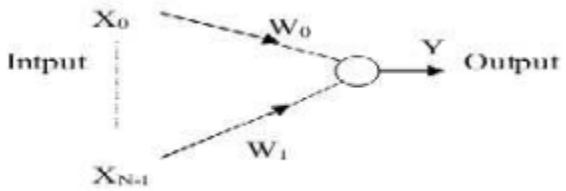


Figure II.29: Perceptron à une seule couche

- **Le perceptron multicouche :** Les perceptrons multicouches sont des réseaux non-récurrents avec une ou plusieurs couches de neurones entre les couches d'entrée et de sortie. Ces couches additionnelles contiennent des unités cachées ou des neurones qui ne sont pas directement reliés aux neurones des couches d'entrée et de sortie. Un perceptron avec trois couches dont deux couches cachées est montré dans la Figure II.30. Ils sont de plus en plus employés avec le développement de nouveaux algorithmes d'apprentissage.[54]

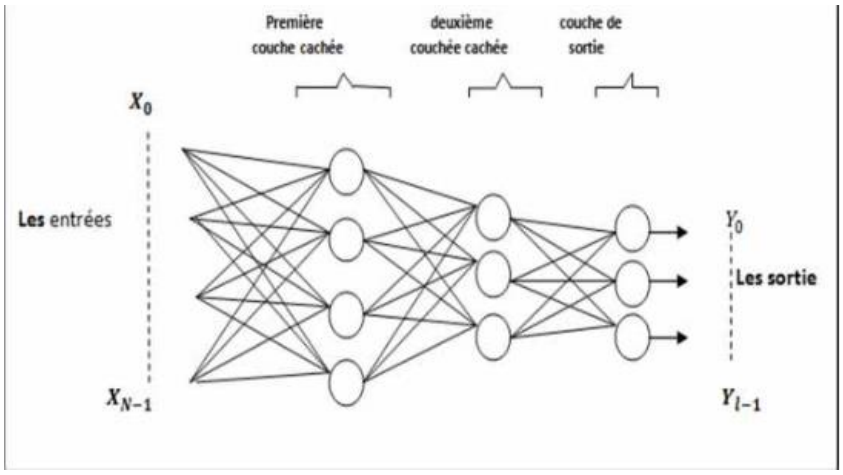


Figure II.30:Perceptron Multicouche

On va voir l'apprentissage de notre modèle à base de la technique MPPT *(Perturb and Observe)* dans le dernier chapitre.

II.9.Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales sources d'énergie, en mettant particulièrement en avant l'énergie solaire. Comme on a décrit les différentes associations de cellules solaires et leur comportement ainsi les systèmes photovoltaïques autonomes. L'optimisation de la puissance extraite a été étudiée à travers les techniques MPPT, notamment les méthodes de Perturbation et Observation (P&O), de Conductance Incrémentale (INC) et l'approche basée sur les réseaux de neurones. Le rôle fondamental des algorithmes MPPT dans l'adaptation aux variations d'ensoleillement et de température a été mis en évidence, assurant une extraction énergétique optimale. Par ailleurs, les concepts de base des réseaux de neurones, leur fonctionnement et leurs méthodes d'apprentissage ont été introduits. Dans les chapitres suivants, l'intégration du convertisseur Z-source et la mise en œuvre d'une commande MPPT intelligente basée sur l'intelligence artificielle (RNA), visant à améliorer un système énergétique autonome.

Chapitre III

Chaine de conversion d’énergie photovoltaïque autonome

Chapitre III : Chaine de conversion d'énergie photovoltaïque autonome

III.1.Introduction

Après avoir étudié, dans les chapitres précédents, les composants essentiels d'une chaîne de conversion photovoltaïque, tels que le convertisseur Z-source, l'onduleur multiniveaux cascade (5,7 et 9) et les techniques MPPT. Ce chapitre se consacre à la mise en œuvre d'un système autonome complet de conversion d'énergie photovoltaïque. Il présente la modélisation sous MATLAB/Simulink de l'ensemble de la chaîne, intégrant un algorithme MPPT intelligent basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA), un convertisseur Z-source pour l'élévation de la tension, ainsi qu'un onduleur multiniveaux commandé par la technique de modulation Phase Shift PWM. Les différents résultats de simulation permettent d'évaluer les performances énergétiques du système, ainsi que la qualité de la tension alternative générée. L'étude prend également en compte les variations de l'irradiation a une température idéale ($25°c$), afin d'analyser la robustesse et la stabilité du système face aux conditions environnementales changeantes.

III.2.Schéma synoptique de la chaine proposé

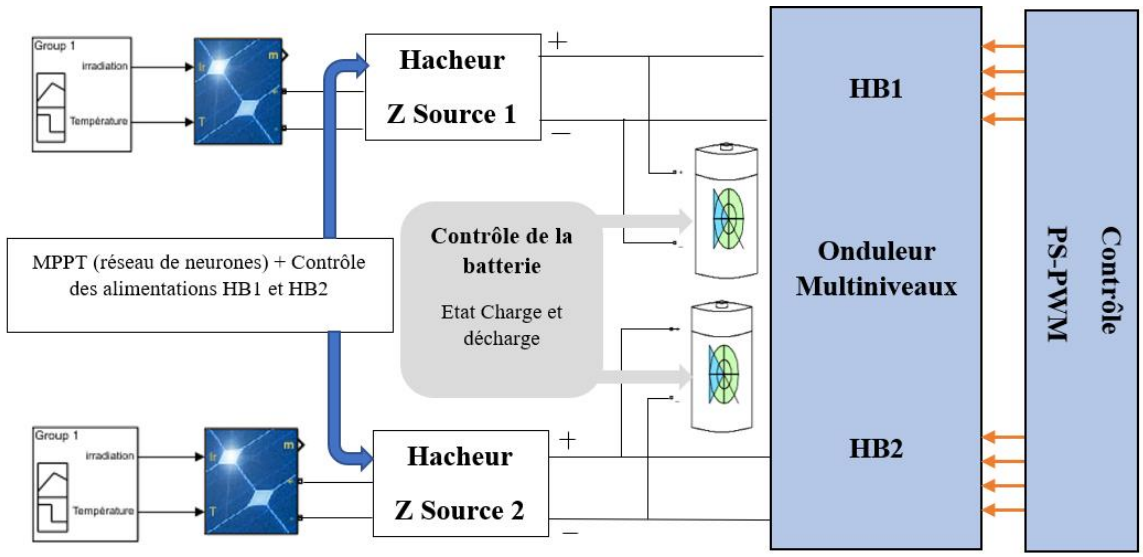


Figure III.1 : Synoptique du Système Non connecté PV-Batterie avec onduleur Multiniveaux à H-Bridge.

Ce système comprend :

- Deux hacheurs Z-source décentralisés, chacun optimisant indépendamment la puissance des générateurs PV.

- Deux batteries avec contrôleurs de charge et décharge individuels.
- Un onduleur Multiniveaux H-Bridge (5 ,7 ou 9 niveaux).
- Un système de commande.

III.3.Système de commande

Le système repose sur trois commandes principales**,** assurant un fonctionnement autonome de la chaîne de conversion photovoltaïque.

- Commande MPPT intelligente **:** Elle permet d'optimiser la puissance extraite des générateurs photovoltaïques en ajustant dynamiquement les deux hacheurs Z-source (ZS1 et ZS2), chacun opérant autour de son point de puissance maximale (MPP).
- Commande du convertisseur bidirectionnel **:** Elle assure la gestion énergétique de la batterie. Le système décide intelligemment de charger la batterie en cas de surplus de production ou de la décharger pour alimenter la charge lorsque l'énergie solaire devient insuffisante.
- Commande de tension fixe **:** Appliquée aux hacheurs Z-source, cette commande stabilise les tensions de sortie, garantissant un niveau de tension constant et approprié pour alimenter les ponts H (HB1 et HB2) de l'onduleur multiniveaux.

L'objectif de la dernière commande est de maintenir la tension de sortie Vbus de l'hacheur Z-source à un niveau stable, en la comparant à une tension de référence prédéfinie, nécessaire au bon fonctionnement H-Bridge de l'onduleur.
Par ailleurs, un courant de référence IBref est défini pour réguler la consommation énergétique du système, permettant ainsi un contrôle optimal de l'ensemble de la chaîne de conversion. Comme illustré dans la Figure III.2.

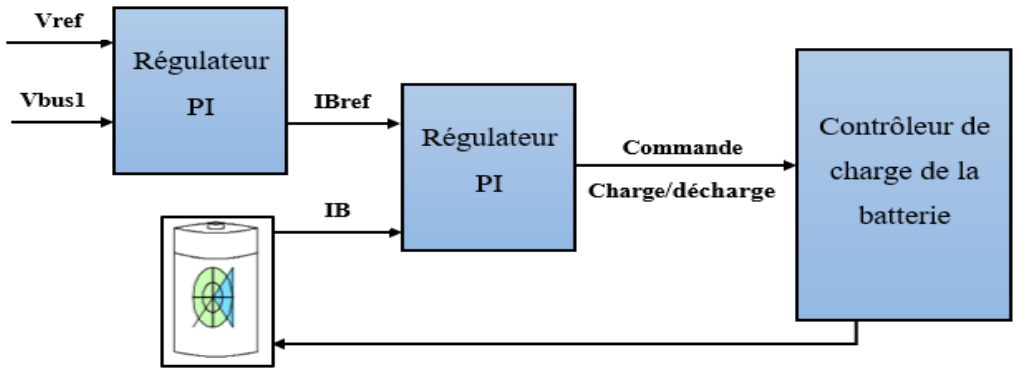


Figure III.2: Synoptique de la gestion de la tension Vbus et contrôle de la consommation du système.

III.4.Apprentissage et configuration des réseaux de neurones

Dans cette section, nous présentons la démarche d'apprentissage et de configuration des réseaux de neurones artificiels (RNA) basé sur la commande MPPT (P&O). Le but est de permettre un suivi rapide et précis du point de puissance maximale.

III.4.1. Structure du réseau de neurones

Le réseau utilisé est de type MLP (Multi-Layer Perceptron), composé de :

- Une couche d'entrée avec 2 neurones : tension PV (Vpv), irradiance (G),
- Deux couches cachées avec fonctions d'activation de type sigmoïde.
- Une couche de sortie donnant le rapport cyclique à appliquer à le convertisseur Z-source.

III.4.2. Génération de la base de données d'apprentissage

Les données sont générées via des simulations sous Simulink de l'algorithme MPPT *(Perturb & Observe)*, en faisant varier l'irradiance de 0 à 1000 W/m², Pour chaque condition, la valeur optimale de Vpv et Ipv est extraite. Les données sont ensuite normalisées (Vpv, Ipv, irradiation, rapport cyclique) et séparées en ensembles d'apprentissage (70 %), de validation (15 %) et de test (15 %).

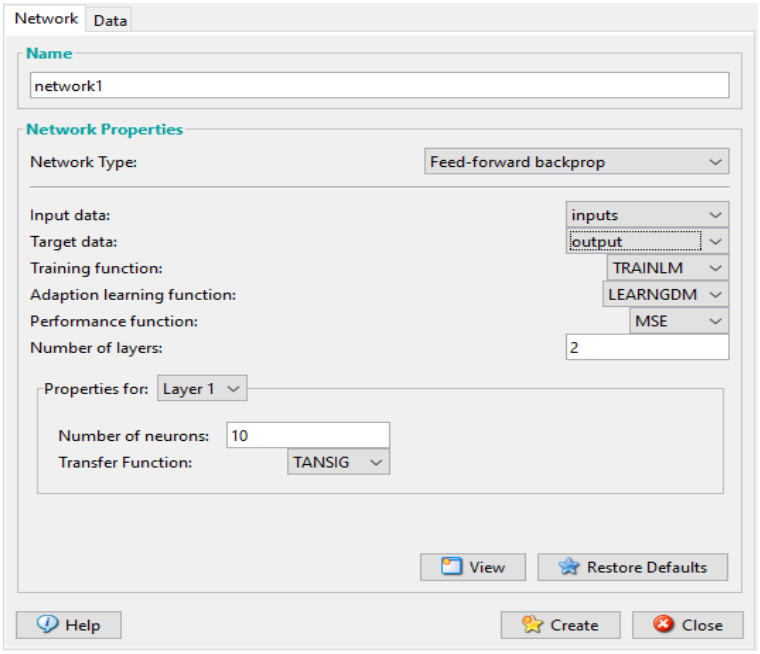


Figure III.3: Configuration de réseau de neurones.

La figure III.3 illustre la configuration de réseau de neurones, avec input data (inputs)représente la tension et le courant de PV et l'irradiation

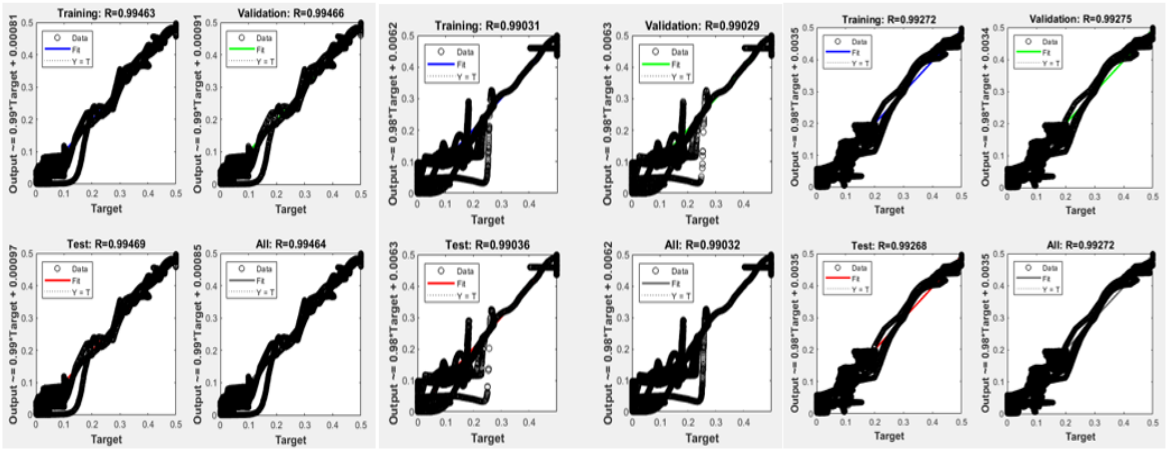


Figure III.4: résultat de l'entrainement obtenus

III.5.Les résultats de simulation pour la chaine de conversion proposé

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour la chaîne de conversion photovoltaïque soumise à des variations météorologiques, en utilisant les techniques MPPT Perturb and Observe (P&O) et les réseaux de neurones artificiels (RNA), afin d'évaluer leur influence sur les tensions Vbus générées par chaque hacheur Z-source (ZS1,ZS2).Ces tensions Vbus sont ensuite appliquées aux différents onduleurs à 5, 7 et 9 niveaux, constitués de deux ponts en H (H-bridges) en cascade, commandés selon la technique de modulation à décalage de phase (Phase-Shift PWM).

Les composants utilisés pour les simulations :

- Caractéristique de la batterie : Voltage Nominal : 72V (en 5 et 7 niveaux [HB2])) /96V (en 9 niveaux [HB2]), Capacité :50Ah, Soc initial : 50**%**.
- Caractéristiques des panneaux PV illustre dans figure III.5.

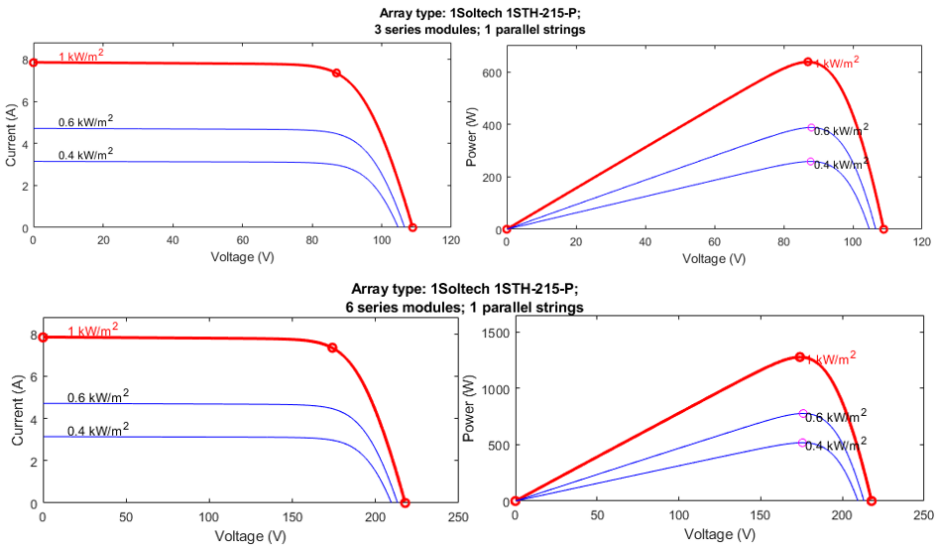


Figure III.5: Caractéristique des panneaux PV.

III.5.1. Les résultats de simulations avec MPPT (*P&O*) et RNA

Dans cette section, nous présentons et comparons les résultats de simulation obtenus pour la chaîne de conversion photovoltaïque intégrant un onduleur multiniveau (5, 7 et 9 niveaux), commandé successivement par deux méthodes MPPT : la méthode classique Perturb & Observe (P&O) (figure III.6) et la méthode intelligente basée sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) (figureIII.7). L'analyse porte sur la réponse dynamique du système face aux variations d'irradiation, la stabilité de la tension intermédiaire Vbus, ainsi que sur la qualité de l'onde de sortie en termes de distorsion harmonique (THD) sous charge resistive Rload = 200 Ω. Ces simulations permettent d'évaluer l'efficacité de chaque stratégie de commande dans l'exploitation optimale de l'énergie solaire et l'amélioration de la qualité de l'énergie délivrée.

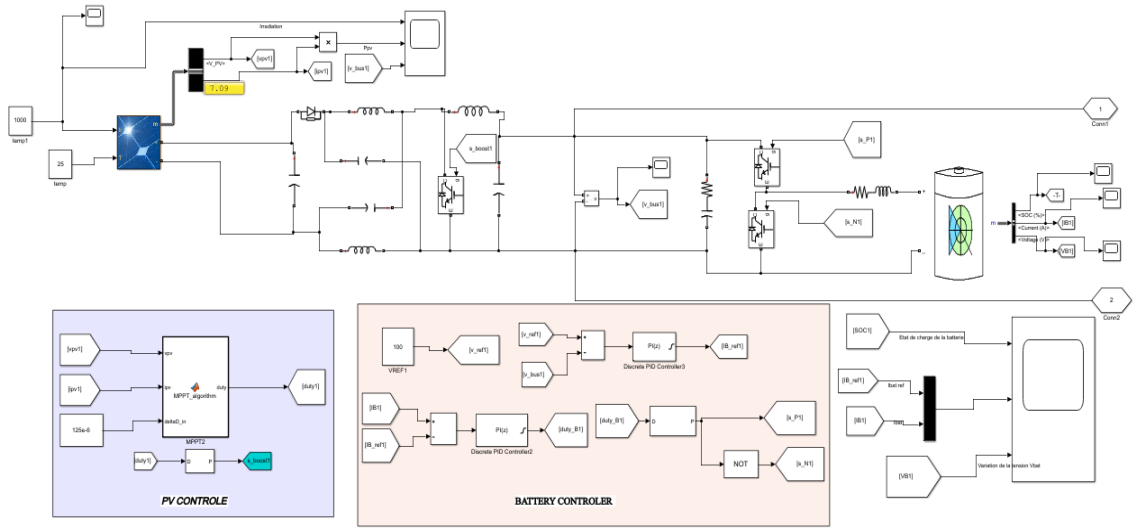


Figure III.6:Architecture de Simulation d'un Système autonome PV–Batterie avec Contrôle MPPT et Gestion de l'Énergie dans Simulink.

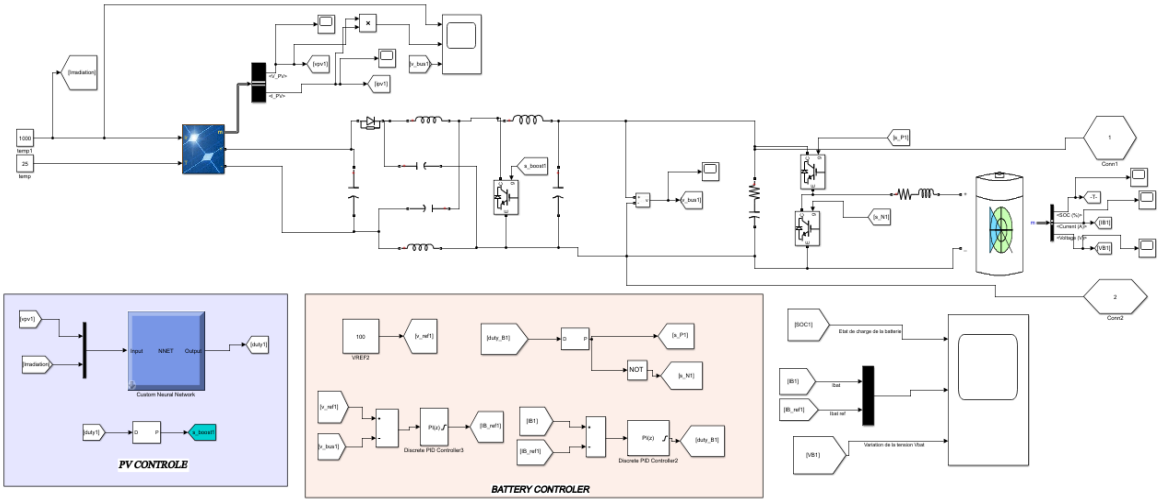


Figure III.7: Architecture de Simulation d'un Système autonome PV–Batterie avec Commande intelligente (RNA) et Gestion de l'Énergie dans Simulink.

III.5.1.1 Chaine de conversion avec onduleur à 5 niveaux

Dans cette configuration, la chaîne de conversion intègre un onduleur à 5 niveaux constitué de deux ponts H (pour une seule phase). Les ponts HB1 et HB2 est alimenté par une tension de 100 V, (Vref=100) (figure III.6). La commande MPPT adoptée ici est la méthode Perturb and Observe (P&O), appliquée en amont sur le convertisseur Z-source. Cette partie présente les résultats de simulation en analysant la variation de l'irradiance, la stabilité de la tension continue (Vbus), la réponse de la puissance PV et la variation de courant et la tension et SOC de la batterie, ainsi que les performances de l'onduleur en termes de qualité de l'onde et de THD

✓ Variation de l'irradiation, puissance PV (Ppv) et tension Vbus

La figure III.8 présente la réponse dynamique du système photovoltaïque face aux variations de l'irradiance, en illustrant l'évolution de la puissance générée (Ppv) et de la tension de bus continu (Vbus) sous l'effet de deux techniques de commande MPPT : la technique P&O **figure III.8(a, b, c)** et la commande RNA **figure III.8(d, e, f)**.

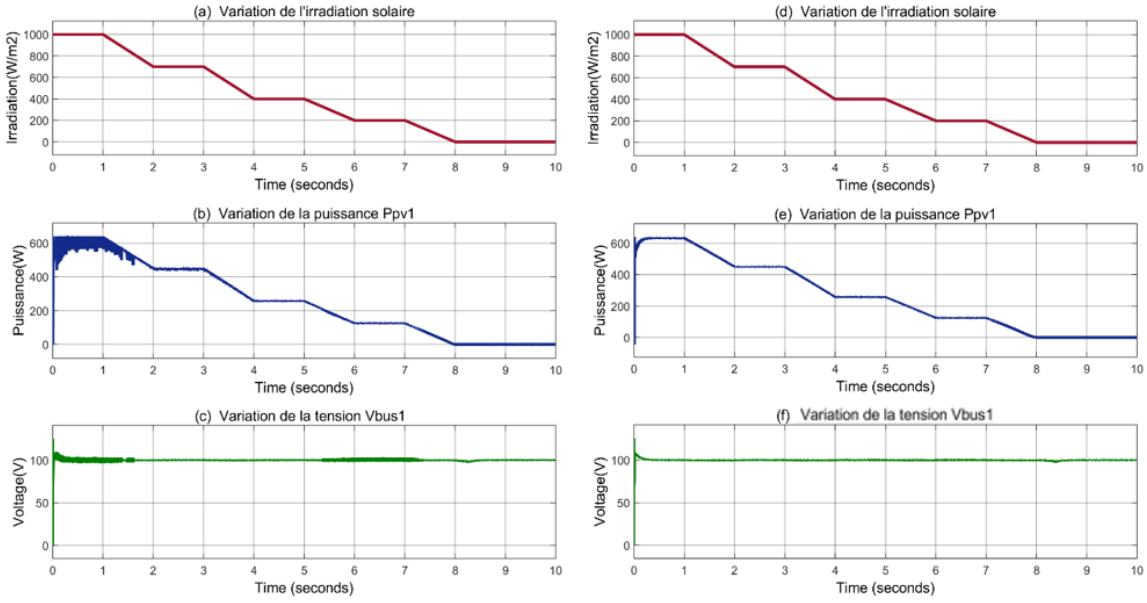


Figure III.8: L'impact des variations d'irradiance sur Ppv et Vbus

La méthode P&O assure un suivi acceptable du MPP et une régulation correcte de Vbus. Cependant, la commande intelligente par réseaux de neurones (RNA) se distingue par une convergence plus rapide, une meilleure stabilité de la tension continue (Vbus) et une grande robustesse face aux variations rapides de l'irradiance. Ces performances traduisent une

adaptation dynamique supérieure du système, confirmant l'efficacité des RNA dans des environnements photovoltaïques à conditions fluctuantes.

✓ Variation du courant de la batterie (Ibat), tension batterie (Vbat) et état de charge (SOC) :

La figure III.9 montre le courant de charge/décharge de la batterie (Ibat), la tension de la batterie (Vbat) ainsi que son état de charge (SOC) avec la technique P&O **figure III.9 (a,b,c)** et commande RNA **figure III.9(d,e,f).**

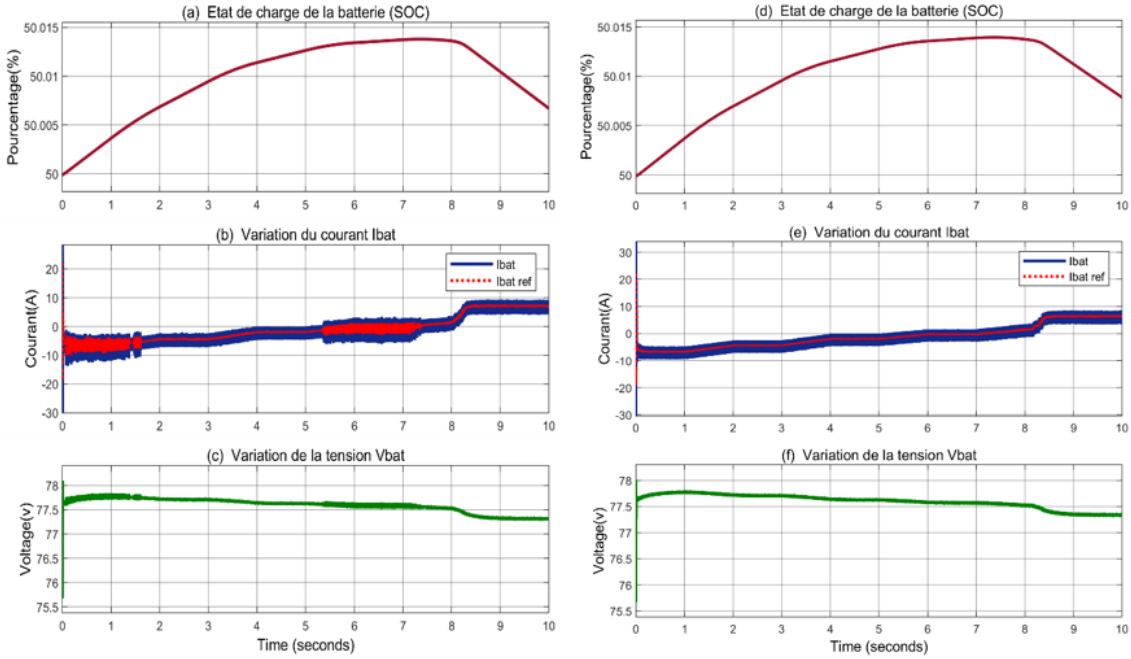


Figure III.9:SOC et le courant de la batterie Ibat et tension Vbat

La commande MPPT intelligente par réseau de neurones (RNA) surpasse nettement la méthode classique P&O, notamment en matière de stabilité du courant (Ibat) et de la tension batterie (Vbat). Elle réduit efficacement les oscillations et le ripple, assurant un transfert d'énergie plus fluide et limitant le stress sur la batterie. Cette régulation plus rapide et précise reflète une dynamique transitoire optimisée, renforçant la fiabilité et la robustesse du système photovoltaïque avec stockage, même sous des conditions d'ensoleillement variables.

✓ Variation de la sortie de l'onduleur et analyse harmonique

La figure III.10 présente de la tension simple aux bornes de la charge, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.9(a)** et de la commande RNA **figure III.9(b).**

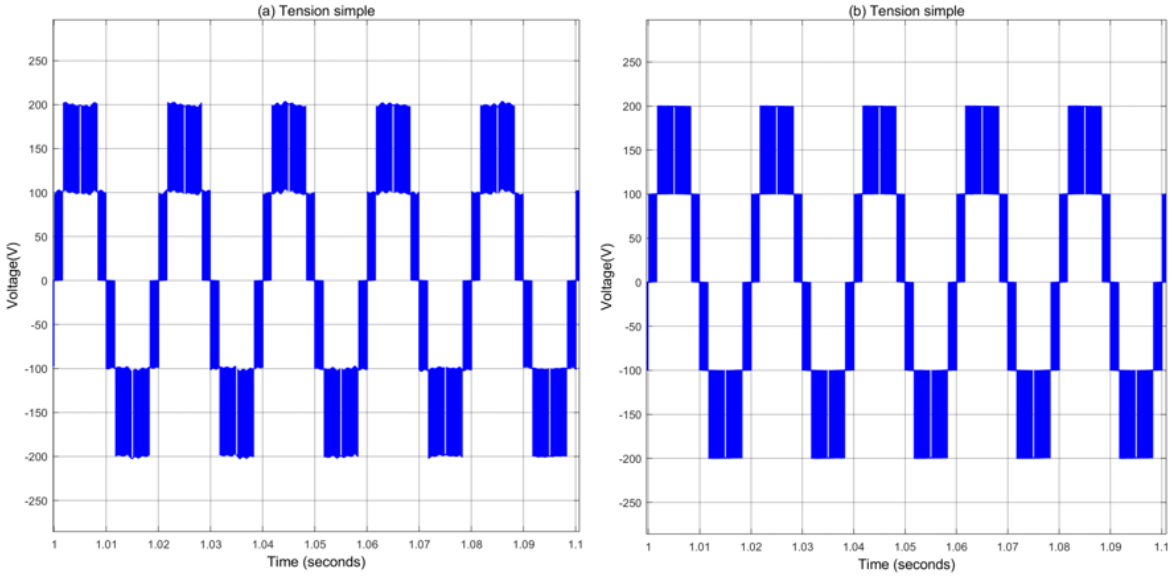


Figure III.10: Variation de la tension simple

L'analyse spectrale figure III.11 réalisée autour t=1.4 s donne un THD de 27.22 % pour la technique P&O **figure III.11(a)** et 27.21 % pour la commande RNA **figure III.11(b)**.

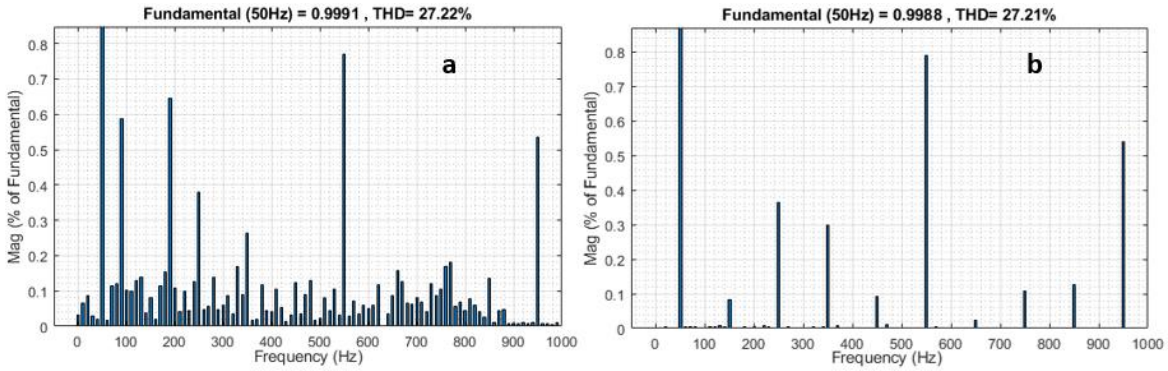


Figure III.11:THD Tension simple

La figure III.12 présente de la tension composée, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.12(a)** et de la commande RNA **figure III.12(b**).

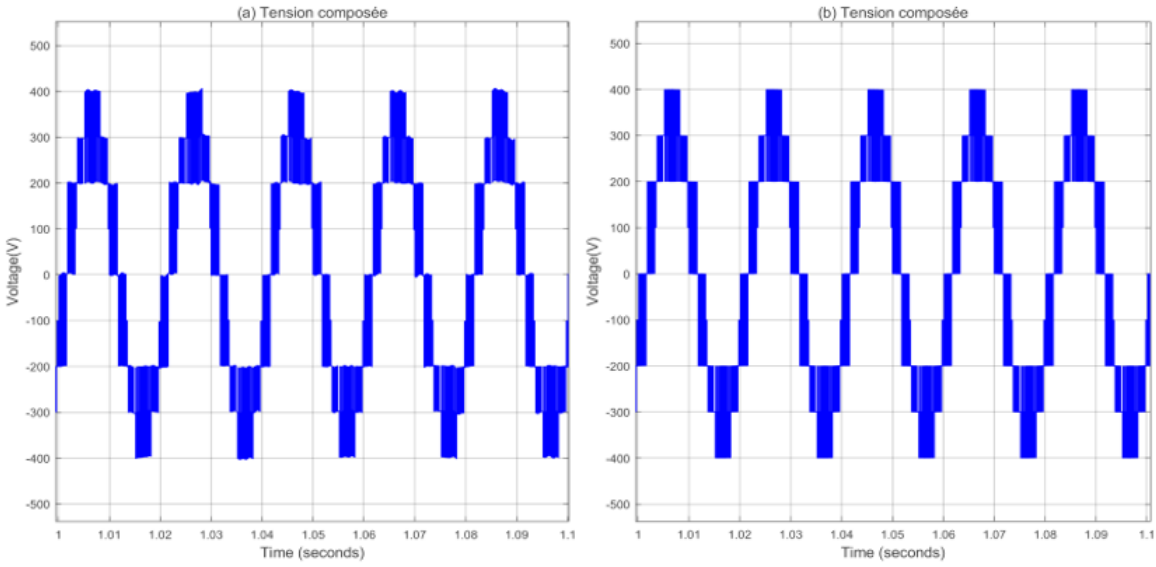


Figure III.12: Variation de la tension composée

L'analyse spectrale figure III.13 réalisée autour t=1.4 s donne un THD de 26.08 % pour la technique P&O **figure III.13(a)** et 26.09 % pour la commande RNA **figure III.13(b)**.

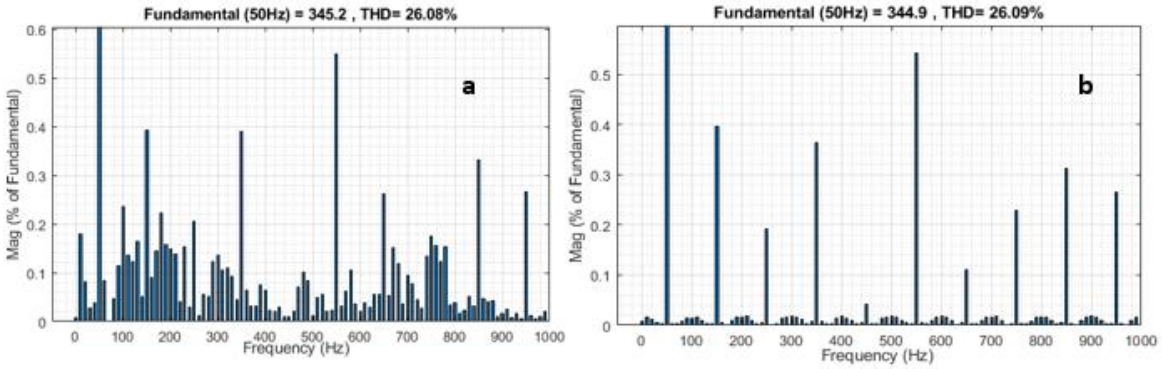


Figure III.13:THD Tension composée

La figure III.14 présente de la tension simple filtré avec un filtre passe-bas du second ordre (fc = 150 Hz) aux bornes de la charge, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.14(a)** et de la commande RNA **figure III.14(b**)

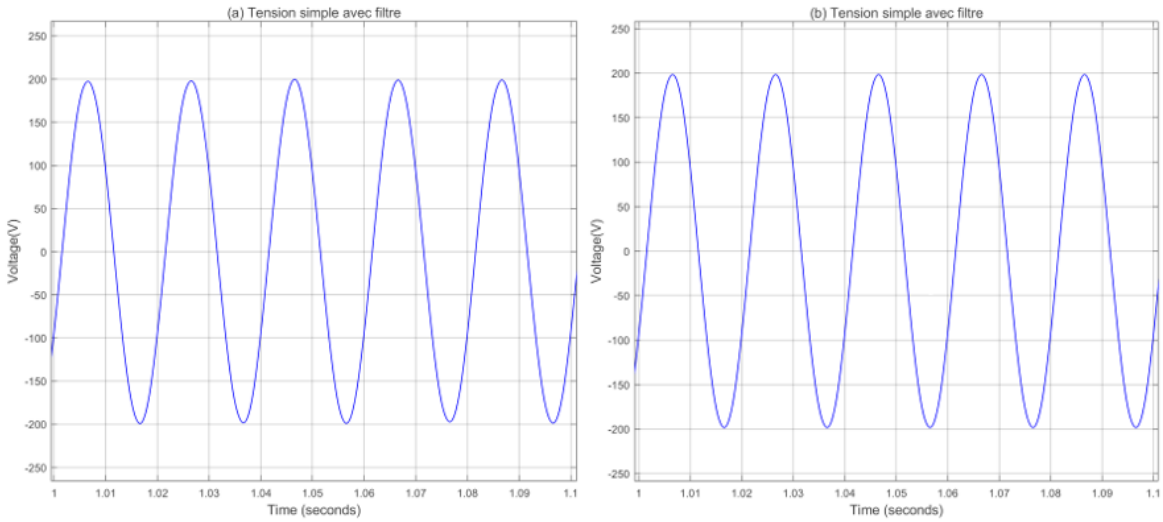


Figure III.15: Tension simple filtré

L'analyse spectrale figure III.15 réalisée autour t=1.4 s donne un THD de 0.67 % pour la technique P&O **figure III.15(a)** et 0.09 % pour la commande RNA **figure III.15(b).**

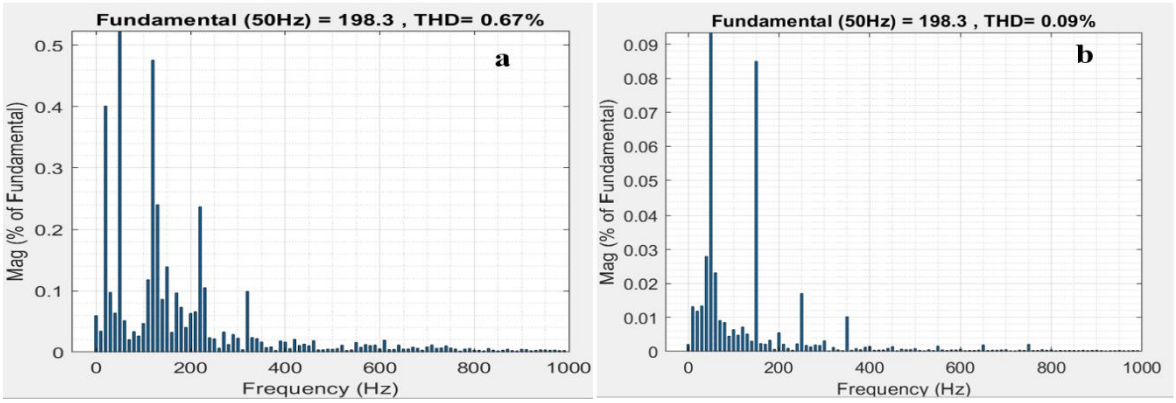


Figure III.14:THD Tension simple filtré

III.5.1.2 Chaine de conversion avec onduleur à 7 niveaux

Dans cette configuration, la chaîne de conversion intègre un onduleur à 7 niveaux constitué de deux ponts H (pour chaque bras). Le premier pont HB1 est alimenté par une tension de 100 V, identique à celle utilisée dans la structure à 5 niveaux, tandis que le second pont HB2 est alimenté par une tension de 200 V (Vréf=200).

✓ Variation de l'irradiation, puissance PV (Ppv) et tension Vbus :

La figure III.16 présente la réponse dynamique du système photovoltaïque face aux variations de l'irradiance, en illustrant l'évolution de la puissance générée (Ppv) et de la tension de bus continu (Vbus) sous l'effet de deux techniques de commande MPPT :la technique P&O **figure III.16(a, b, c)** et la commande RNA **figure III.16(d, e, f)**.

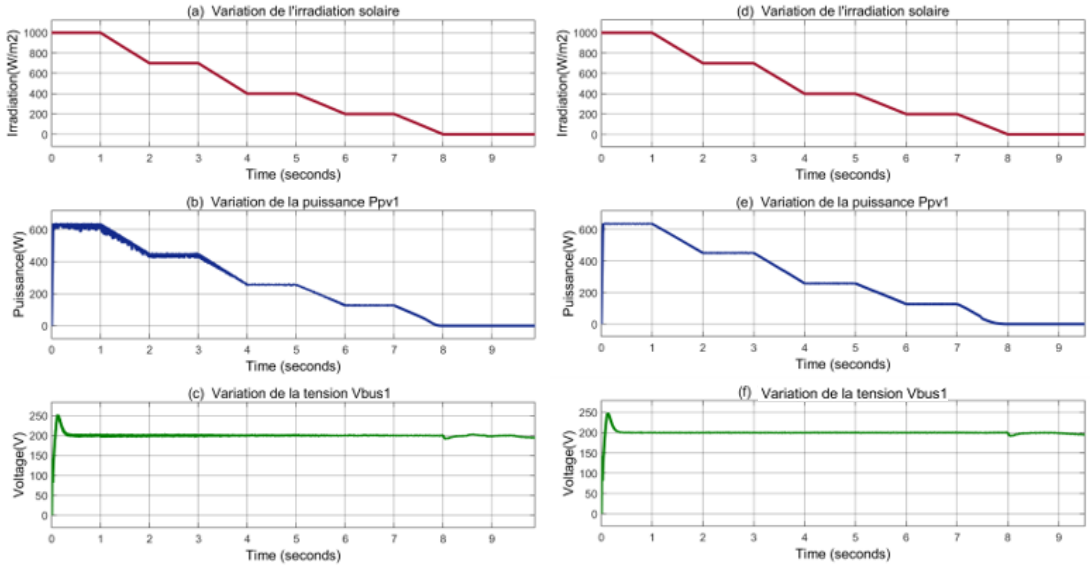


Figure III.16: L'impact des variations d'irradiance sur Ppv et Vbus

On constate La commande intelligente (RNA) montre un comportement cohérent avec celui observé pour l'onduleur à 5 niveaux, ce qui témoigne de la robustesse et de la fiabilité de ses performances. Cette continuité confirme l'efficacité de la stratégie RNA pour optimiser la qualité de la tension et la réponse dynamique du système, indépendamment de la complexité de l'architecture de l'onduleur.

✓ Évolution du courant de la batterie (Ibat), tension batterie (Vbat) et état de charge (SOC) :

La figure III.17 montre le courant de charge/décharge de la batterie (Ibat), la tension de la batterie (Vbat) ainsi que son état de charge (SOC) avec la technique P&O **figure III.17 (a,b,c)** et commande RNA figure III.17(d,e,f)

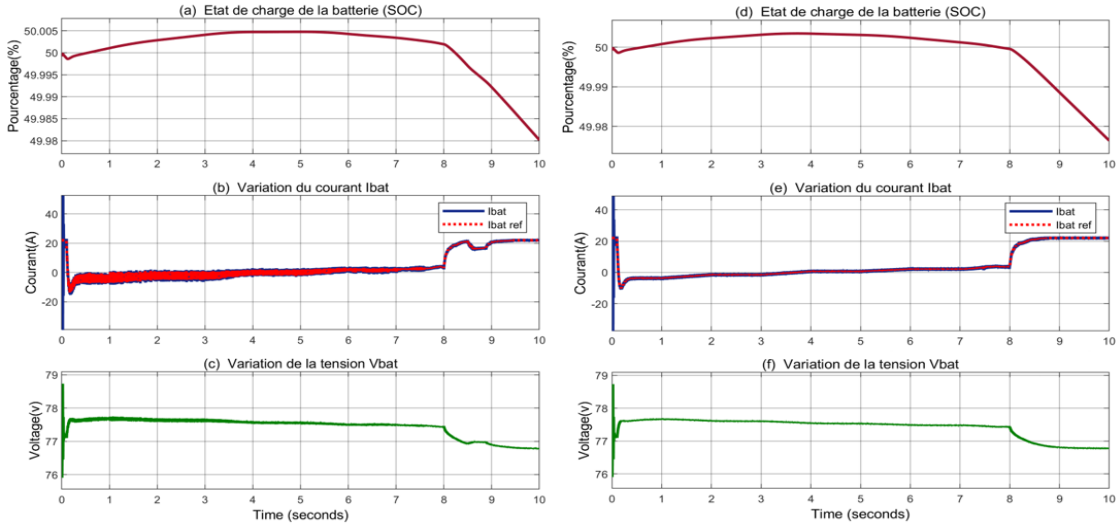


Figure III.17:SOC et le courant de la batterie Ibat et tension Vbat

La commande intelligente (RNA) présente un comportement constant et performant, similaire à celui observé avec la topologie à 5 niveaux, y compris dans le cas de l'onduleur à 7 niveaux. Cette régularité atteste de la robustesse de la stratégie RNA, capable d'assurer une régulation efficace du courant et de la tension batterie, tout en maintenant une dynamique transitoire optimisée, quelles que soient les caractéristiques de l'architecture d'onduleur utilisée**.**

✓ La sortie de l'onduleur et analyse harmonique :

La figure III.18 présente de la tension simple aux bornes de la charge, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.18(a)** et de la commande RNA **figure III.18(b).**

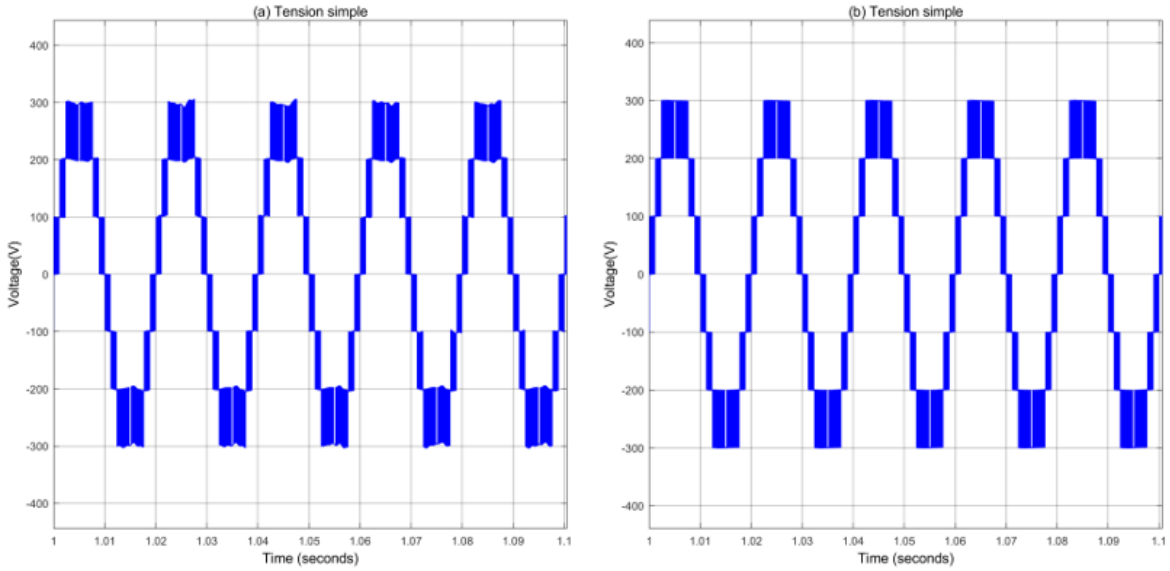


Figure III.18: Variation de la tension simple

L'analyse spectrale figure III.19 réalisée autour t=2s donne un THD de 18.07 % pour la technique P&O **figure III.19(a)** et 18.03 % pour la commande RNA **figure III.19(b)**.

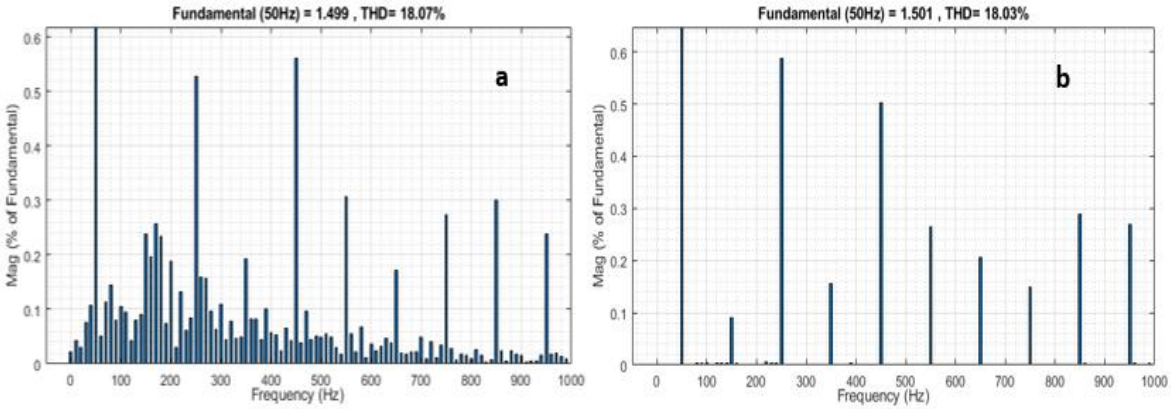


Figure III.19:THD Tension simple

La figure III.12 présente de la tension composée, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.20(a)** et de la commande RNA **figure III.20(b**).

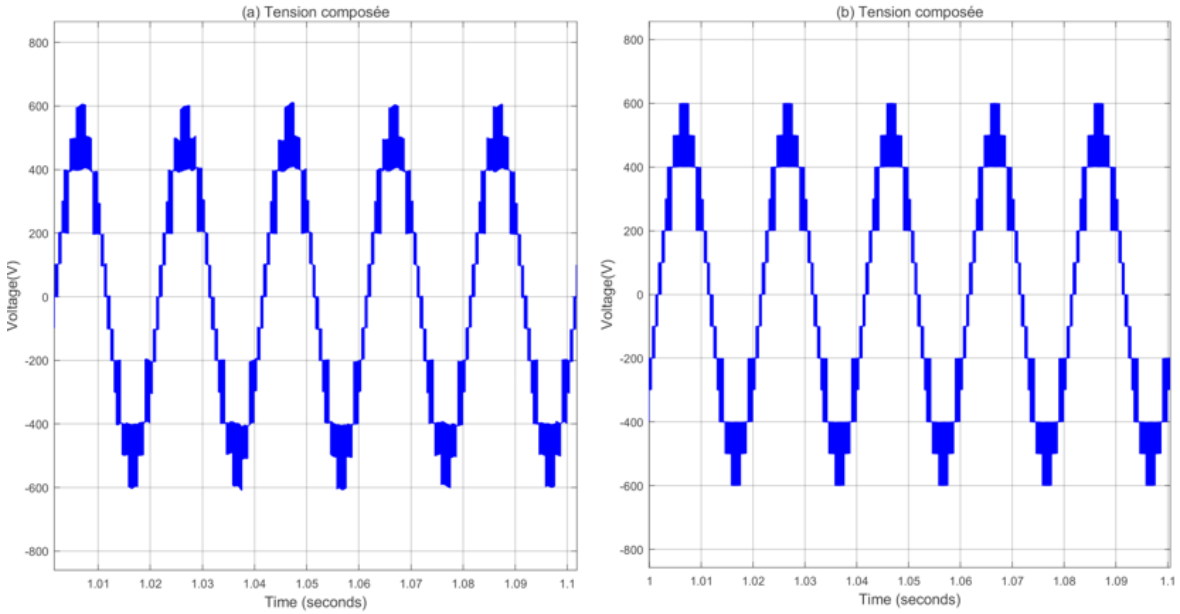


Figure III.20: Variation de la tension composée

L'analyse spectrale figure III.21 réalisée autour t=2s donne un THD de 14.85 % pour la technique P&O **figure III.21(a)** et 14.80 % pour la commande RNA **figure III.21(b)**.

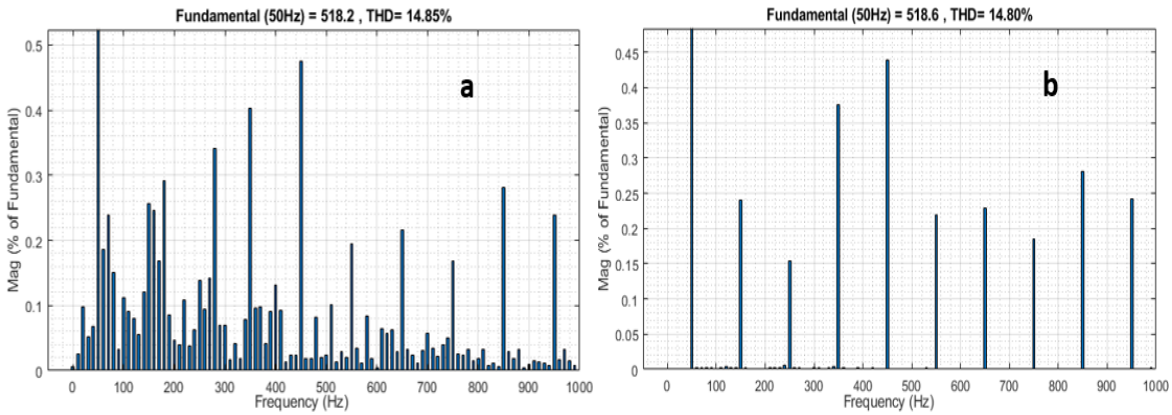


Figure III.21:THD Tension composée

La figure III.22 présente de la tension simple filtré avec un filtre passe-bas du second ordre (fc = 150 Hz) aux bornes de la charge, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.22(a)** et de la commande RNA **figure III.22(b**)

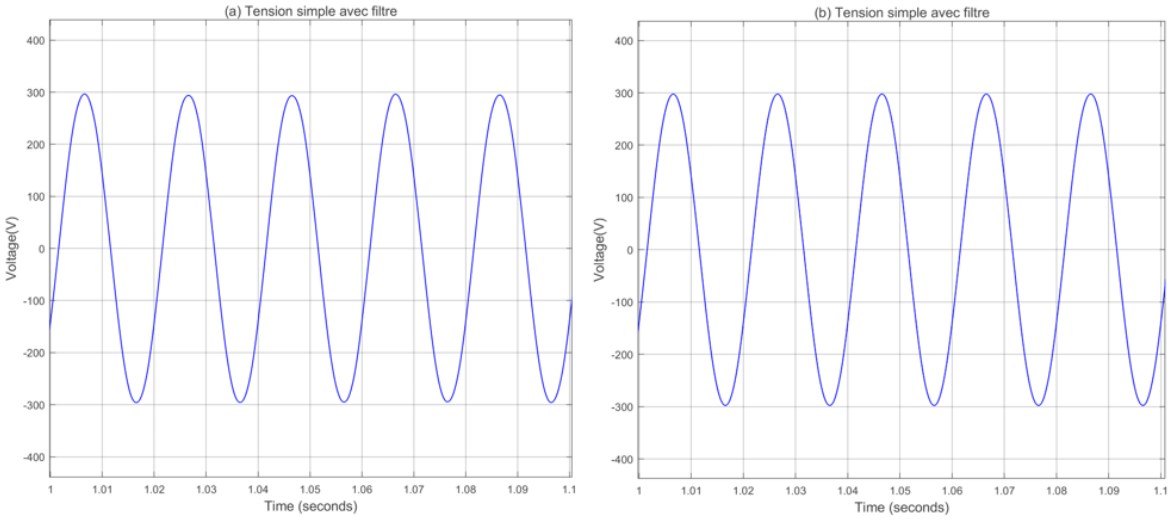


Figure III.22: Tension simple filtré

L'analyse spectrale figure III.23 réalisée autour t=2s donne un THD de 0.43 % pour la technique P&O **figure III.23(a)** et 0.06 % pour la commande RNA **figure III.23(b)**.

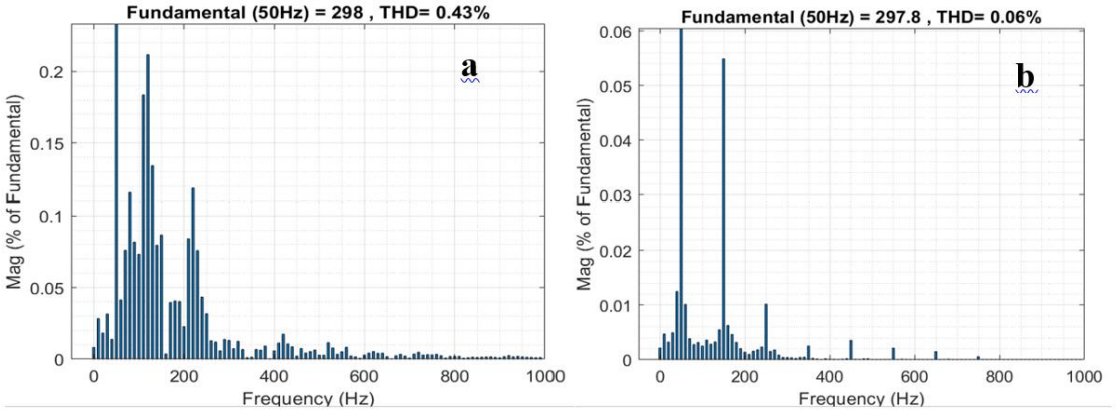


Figure III.23:THD Tension simple filtré avec la technique P&O et la commande intelligente

III.5.1.3 Chaine de conversion avec onduleur à 9 niveaux :

Dans cette configuration, la chaîne de conversion intègre un onduleur à 9 niveaux constitué de deux ponts H (pour chaque bras). Le premier pont HB1 est alimenté par une tension de 100 V, identique à celle utilisée dans la structure à 5 niveaux, tandis que le second pont HB2 est alimenté par une tension de 300 V (Vréf=300).

✓ Suivi de l'irradiation, puissance PV (Ppv) et tension Vbus :

La figure III.24 présente la réponse dynamique du système photovoltaïque face aux variations de l'irradiance, en illustrant l'évolution de la puissance générée (Ppv) et de la

tension de bus continu (Vbus) sous l'effet de deux techniques de commande MPPT :la technique P&O **figure III.24(a, b, c)** et la commande RNA **figure III.24(d, e, f)**.

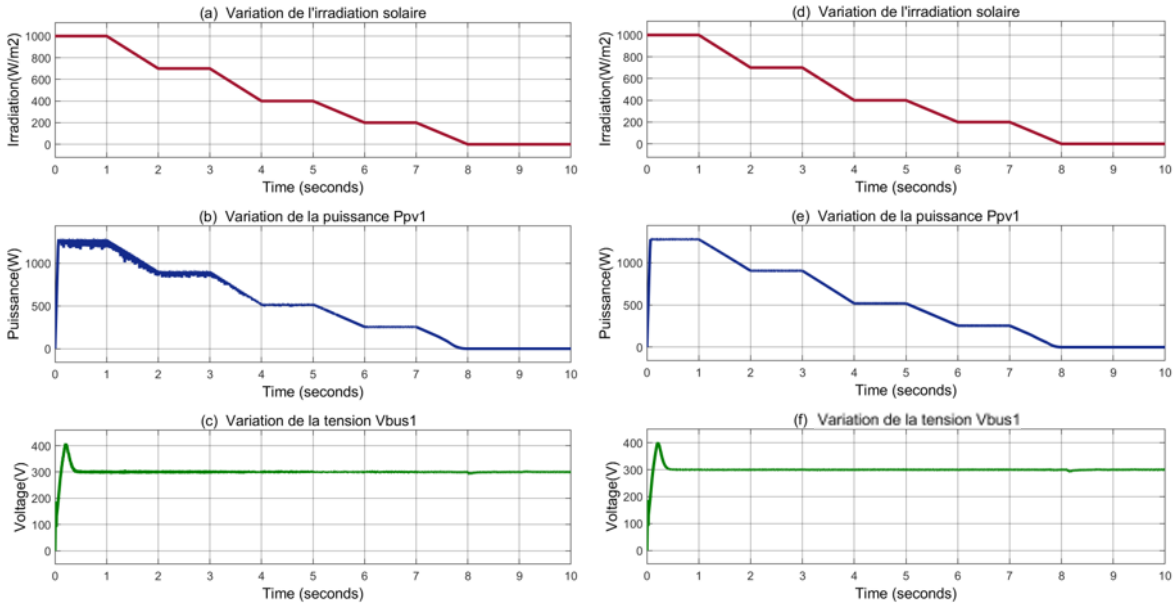


Figure III.24: L'impact des variations d'irradiance sur Ppv et Vbus

L'analyse de la réponse du système face aux variations d'irradiance, dans le cas de l'onduleur à 9 niveaux, révèle une dynamique similaire à celle observée avec les topologies à 5 et 7 niveaux. La commande intelligente (RNA) y maintient une régulation stable de Vbus et une adaptation efficace de Ppv, confirmant la cohérence et la robustesse de ses performances indépendamment du niveau de complexité de l'onduleur.

✓ Évolution du courant de la batterie (Ibat), tension batterie (Vbat) et état de charge (SOC) :

La figure III.25 montre le courant de charge/décharge de la batterie (Ibat), la tension de la batterie (Vbat) ainsi que son état de charge (SOC) avec la technique P&O **figure III.25(a,b,c)** et commande RNA **figure III.25(d,e,f)**

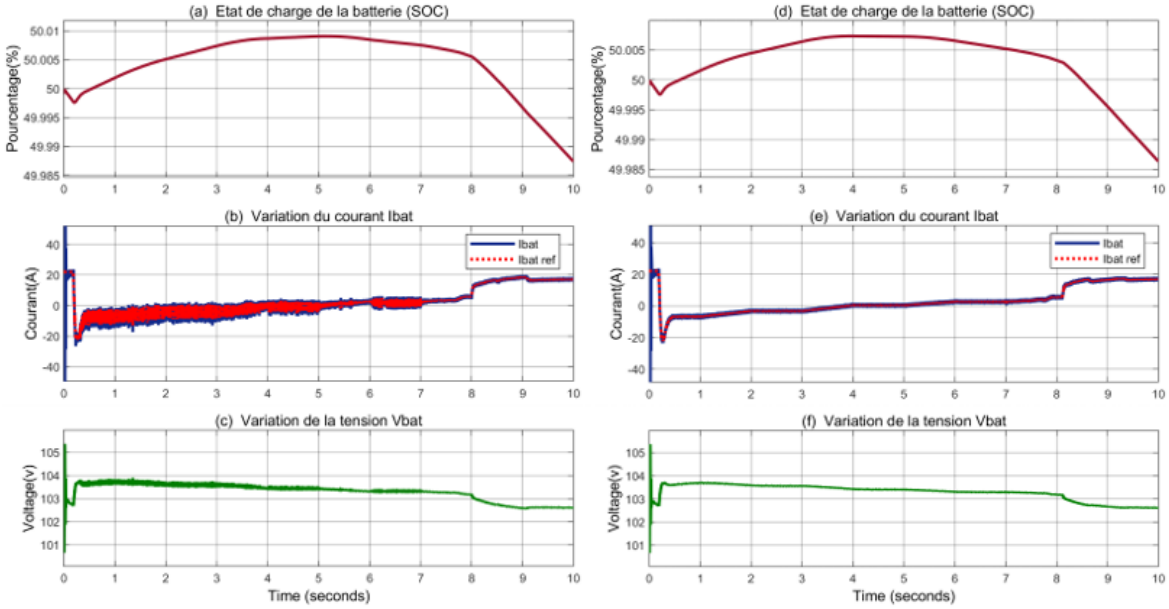


Figure III.25: SOC et le courant de la batterie Ibat et tension Vbat

Concernant l'évolution du SOC, du courant batterie (Ibat) et de la tension (Vbat), la commande intelligente (RNA) maintien des performances constantes avec la topologie à 9 niveaux, en cohérence avec les comportements observés pour les configurations à 5 et 7 niveaux. Cette continuité valide la robustesse et l'efficacité de la stratégie RNA, indépendamment de la complexité de l'architecture d'onduleur.

✓ La sortie de l'onduleur et analyse harmonique :

La figure III.26 présente de la tension simple aux bornes de la charge, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.26(a)** et de la commande RNA **figure III.26(b).**

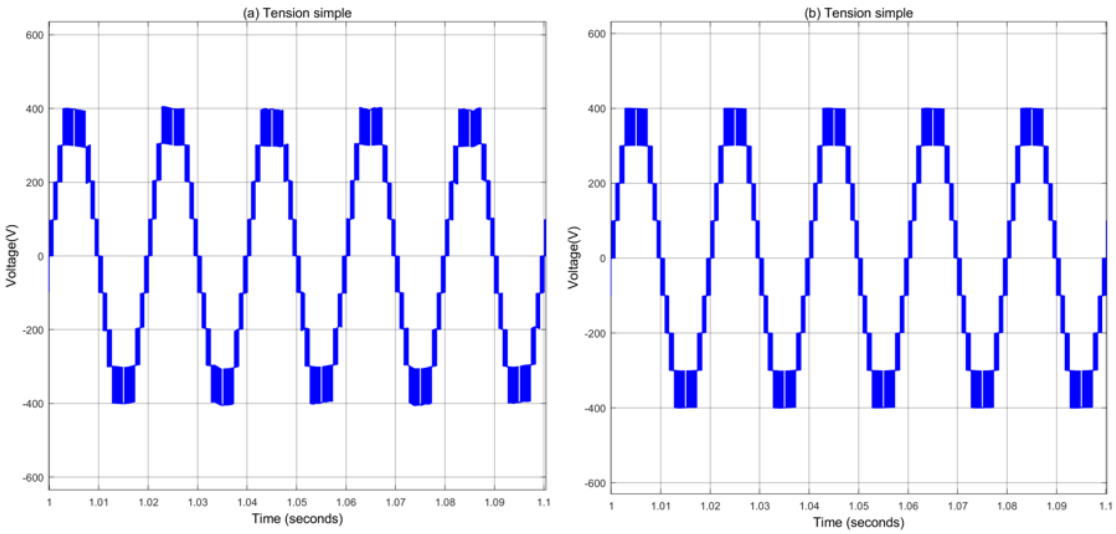


Figure III.26: Variation de la tension simple

L'analyse spectrale figure III.27 réalisée autour t=1.1s donne un THD de 13.74 % pour la technique P&O **figure III.27(a)** et 13.72 % pour la commande RNA **figure III.27(b)**.

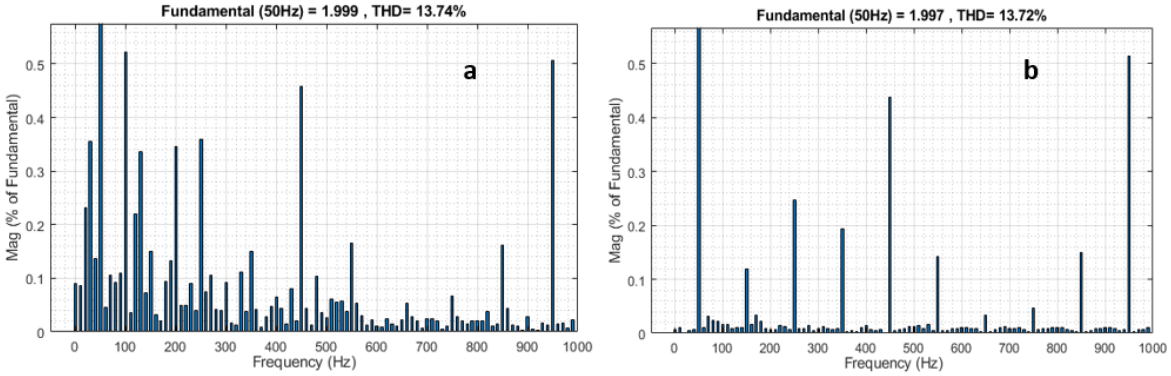


Figure III.27:THD Tension simple

La figure III.12 présente de la tension composée, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.28(a)** et de la commande RNA **figure III.28(b**).

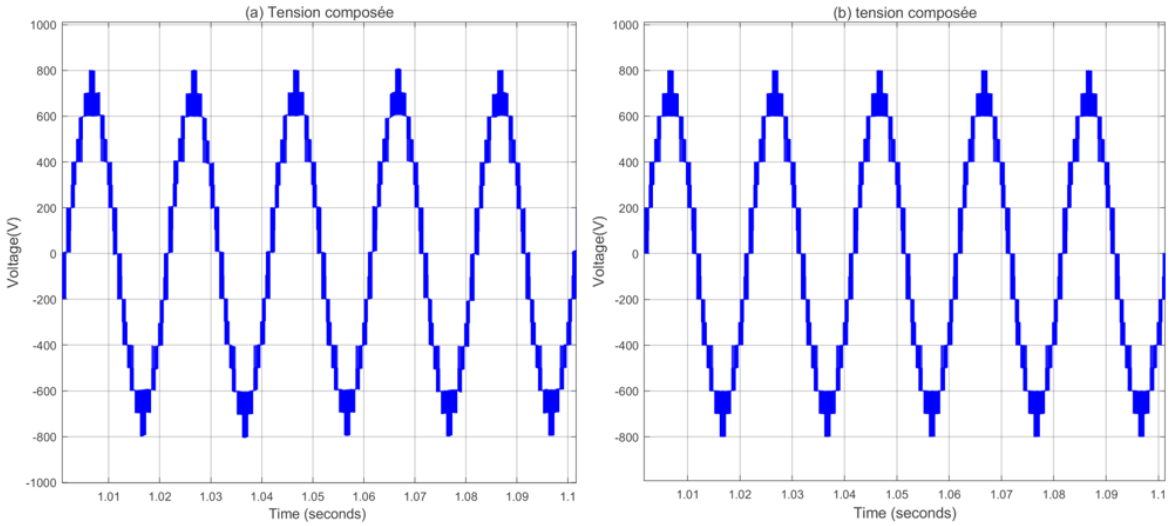


Figure III.28: Variation de la tension composée

L'analyse spectrale figure III.29 réalisée autour t=1.1s donne un THD de 12.34 % pour la technique P&O **figure III.29(a)** et 12.33 % pour la commande RNA **figure III.29(b)**

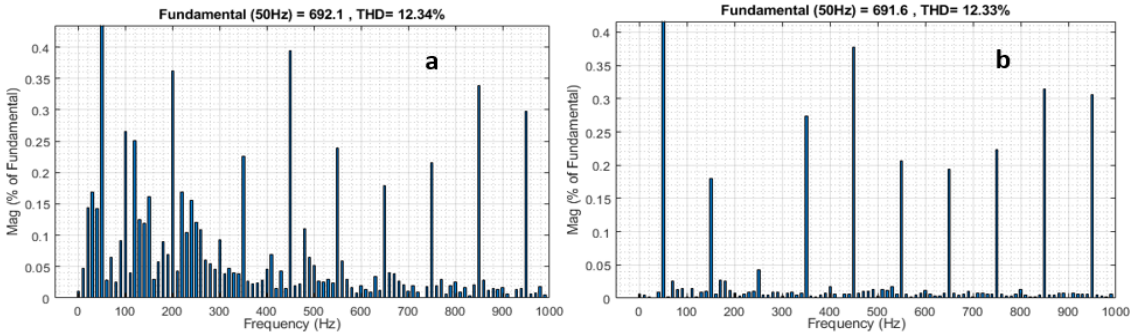


Figure III.29:THD Tension composite avec la technique P&O et la commande intelligente.

La figure III.30 présente de la tension simple filtré avec un filtre passe-bas du second ordre (fc = 150 Hz) aux bornes de la charge, mettant en parallèle les performances de la technique P&O **figure III.30(a)** et de la commande RNA **figure III.30(b**).

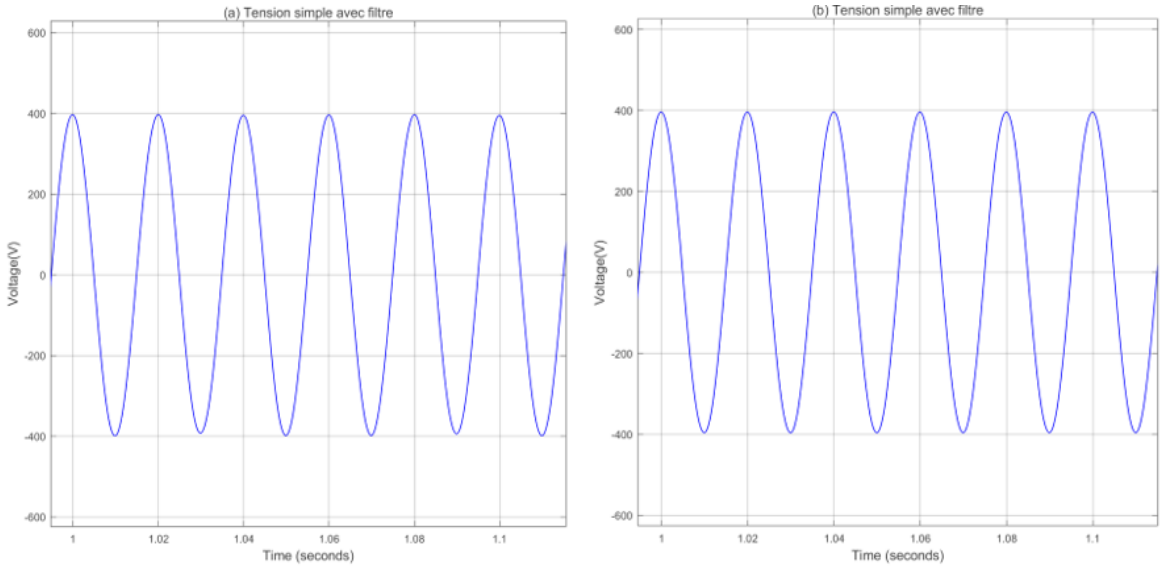


Figure III.30: Tension simple filtré

L'analyse spectrale figure III.31 réalisée autour t=1.1s donne un THD de 0.28 % pour la technique P&O **figure III.31(a)** et 0.04 % pour la commande RNA **figure III.31(b)**..

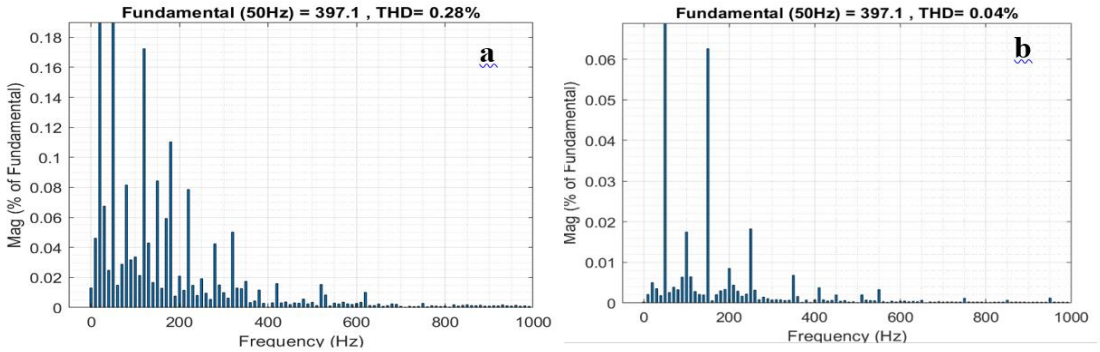


Figure III.31: THD Tension simple filtré

Comparaison des performances de la qualité de la tension et du THD de la méthode P&O et la commande intelligente :

L'analyse comparative des tensions simple, composée et filtrée met en évidence l'efficacité accrue de la commande intelligente (RNA) par rapport à la méthode classique P&O. Bien que les deux stratégies atteignent des niveaux de THD similaires à l'état brut, la signature spectrale sous RNA se révèle beaucoup plus structurée, avec des harmoniques mieux localisées et plus facilement filtrables. Après application du filtre passe-bas, la tension

obtenue sous commande RNA devient quasi sinusoïdale, avec un THD nettement plus faible, traduisant une réduction significative du contenu harmonique. Ces résultats confirment la capacité de la commande intelligente à générer une tension de sortie de meilleure qualité, avec une régulation plus précise, une réponse dynamique optimisée et une robustesse renforcée face aux perturbations, ce qui renforce considérablement la fiabilité et la performance globale du système photovoltaïque autonome.

Tableau III.1 : Tableau recapulatif des performances de sortie de l'onduleur THD avec les deux techniques P&O et (RNA)

		THD Tension simple	**THD Tension composite**	**THD Tension simple filtré**
P&O	5 niveaux	27.22%	26.08%	0.67%
	7 niveaux	18.07%	14.85%	0.43%
	9 niveaux	13.74%	12.34%	0.28%
RNA	5 niveaux	27.21%	26.09%	0.09%
	7 niveaux	18.03%	14.80%	0.06%
	9 niveaux	13.72%	12.33%	0.04%

III.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué de manière systématique la performance d'une chaîne de conversion photovoltaïque autonome intégrant un système de stockage, en testant successivement trois topologies d'onduleurs (5, 7 et 9 niveaux) avec deux techniques de commande MPPT : l'algorithme conventionnel P&O et la commande intelligente à base de réseaux de neurones artificiels (RNA). Les résultats obtenus montrent que la commande intelligente (RNA) offre une meilleure adaptation aux variations d'irradiance, avec une régulation plus stable de la tension continue (Vbus) et une extraction plus efficace de la puissance Ppv. Sur le plan du stockage, le courant batterie (Ibat) et la tension Vbat présentent moins d'ondulations avec la RNA, préservant ainsi la durée de vie de la batterie. L'analyse harmonique révèle également une structure spectrale plus ordonnée témoignant d'une qualité de tension et de courant supérieure. Ainsi, l'approche RNA couplée aux onduleurs multiniveaux constitue une solution performante et robuste pour les systèmes photovoltaïques autonomes à haut rendement.

Conclusion Générale

En conclusion, la réalisation de ce projet a mis en évidence que l'exploitation optimale de l'énergie solaire nécessite l'intégration de solutions technologiques avancées, capables de faire face à sa variabilité et son intermittence naturelles. Dans ce cadre, une chaîne de conversion photovoltaïque autonome et intelligente a été développée, intégrant un convertisseur à source Z, un onduleur multiniveau en cascade avec deux H-Bridges (5,7 et 9 niveaux) commandé par la technique PSPWM, un système de stockage, ainsi qu'un algorithme MPPT basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA).

Une analyse approfondie des structures de conversion DC-DC et DC-AC a mis en évidence l'intérêt du convertisseur à source Z. Cette topologie a montré sa capacité à introduire des états de shoot-through, tout en assurant une élévation de la tension d'entrée. Son intégration dans une architecture photovoltaïque offre une alternative robuste, compacte et efficace, particulièrement adaptée aux systèmes soumis à des variations rapides de l'environnement.

Le chapitre II a détaillé les caractéristiques des cellules solaires, leurs configurations d'association, ainsi que les différents dispositifs de stockage, tels que les batteries et les supercondensateurs. Il a également abordé les méthodes classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), notamment les algorithmes P&O et INC, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement. La méthode P&O a été retenue comme base de l'étude, avant d'être améliorée par apprentissage à l'aide des réseaux de neurones artificiels (RNA). Par ailleurs, les concepts fondamentaux des RNA ont été introduits, notamment leur architecture, les fonctions d'activation, les types d'apprentissage, ainsi que le rôle du perceptron.

L'un des principaux avantages de ce projet réside dans l'utilisation d'un onduleur multiniveaux comportant seulement deux H-Bridges en cascade, permettant de générer des niveaux de tension à 5, 7 et 9 niveaux grâce à la technique de modulation par décalage de phase (PSPWM). Le convertisseur Z-source a été implémenté pour élever la tension d'entrée Vdc vers des tensions de bus Vbus égales à 2Vdc et 3Vdc, nécessaires respectivement pour les configurations à 7 et 9 niveaux. Par ailleurs, l'intégration d'un système de stockage d'énergie a apporté une valeur ajoutée significative, en assurant une alimentation électrique stable même en l'absence de production solaire. Le comportement dynamique observé de la

batterie confirme la pertinence de cette solution, notamment pour les systèmes isolés ou soumis à une forte variabilité de l'ensoleillement.

Aprés la modélisation et simulation de la chaîne de conversion autonome sous Simulink/Matlab. Les simulations ont montré que la commande RNA améliore la précision du suivi MPPT (erreur réduite, temps de réponse plus court) et stabilise efficacement les tensions Vbus et Vbat. La commande neuronale a également permis d'obtenir une forme d'onde de tension plus sinusoïdale.

Les THD obtenues pour les différents niveaux de l'onduleur (5,7 et 9 niveaux) ont donné des meilleures THD malgré l'introduction de convertisseur a source Z.

Ce mémoire constitue une contribution à l'optimisation des chaînes de conversion autonomes d'énergie, en proposant une architecture capable d'augmenter le nombre de niveaux de tension tout en réduisant le nombre d'interrupteurs, grâce à l'utilisation de sources d'alimentation asymétriques obtenues via des convertisseurs à source Z. En perspective, cette dissymétrie pourrait être éliminée par l'introduction d'une stratégie de commande adaptée au niveau des onduleurs, permettant ainsi une alimentation plus équilibrée et un fonctionnement plus efficace du système.

Références Bibliographies

[1] N. C. Jaouad, H. Chaikhy, F. Belhora, and A. Hajjaji, “Comparison between two levels and multi-level (NPC and Cascad) inverters,” Mater. Today Proc., vol. 66, pp. 162–180, 2022.

[2] K. A. Tehrani, “Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux,” thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2010.

[3] I. Colak, E. Kabalci, and R. Bayindir, “Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes,” Energy Convers Manag, vol. 52, no. 2, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006.

[4] B. P. McGrath and D. G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 858–867, Aug. 2002.

[5] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, Sept. 1981. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992

[6] I. Colak, E. Kabalci, and R. Bayindir, “Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes,” Energy Convers Manag, vol. 52, no. 2, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006.

[7] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002. doi: 10.1109/TIE.2002.801052.

[8] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M. A. Pérez, “A survey on cascaded multilevel inverters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2197–2206, juillet 2010. doi:10.1109/TIE.2009.2030767

[9] Balal, A., Dinkhah, S., Shahabi, F., Herrera, M., & Chuang, Y. L., "A review on multilevel inverter topologies," Emerging Science Journal, vol. 6, no. 1, pp. 185-200, 2022.

[10] Mariéthoz, J. S., "Étude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques: topologies, modulation et commande," Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[11] V. Ramu, P. S. Kumar, and G. N. Srinivas, “LSPWM, PSPWM and NLCPWM on multilevel inverters with reduced number of switches,” Mater Today Proc, vol. 54, pp. 710–727, 2022.

[12] P. Omer, J. Kumar, and B. S. Surjan, “A Review on Reduced Switch Count Multilevel Inverter Topologies,” IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969551.

[13] R. Ramya and T. S. Sivakumaran, “Performance analysis of Z-source fed cascaded multilevel inverter,” International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, vol. 8, no. 11, 2019, doi: 10.35940/ijitee.K1960.0981119.

[14] Patel, H., & Agarwal, V. (2008). Carrier-based PWM techniques for better utilization of DC bus voltage in multilevel inverters. IEEE Trans. Power Electron. 23(3), 1272–1279.

[15] Performance Evaluation of 21-level Reduced Switch Multi-level Inverter with Phase-Shift PWM, IJRES, publié il y a ~4 ans. Permet de justifier les formules (I.2) et (I.3).

[16] S. Ketsakoon & S. Polmai, Comparison Between Phase-Shifted and Level-Shifted PWM Schemes for Flying Capacitor Multilevel Inverter, ECTI 2007. Explique les comparateurs PWM = 1/0 selon sinusoïde vs porteuse.

[17] R. W. Erickson, D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed., Springer, 2001.

[18] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003.

[19] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, and D. P. Kothari, “A review of single-phase improved power quality AC–DC converters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, no. 5, pp. 962–981, Oct. 2003.

[20] F. Z. Peng, "Z-source inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no.2, pp.504–510, Mar./Apr.2003. DOI : 10.1109/TIA.2003.808920

[21] F. Gruson, A. Videt, P. Le Moigne, P. Delarue, P. Baudesson, and J. Ecrabey, “Intérêt de la structure onduleur Z-source”, in European Patients' Forum (EPF), Jul. 2008.

[22] F. Z. Peng, “Z-source inverter,” IEEE Trans Ind Appl, vol. 39, no. 2, pp. 504–510, Mar. 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.808920.

[23] KADDOUR Benyoucef, “ Modélisation et commande des chaines de conversion des énergies renouvelables à base des convertisseurs z-source ”, Thèse de doctorat, université Yahia fares Médéa, 2025.

[24] https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite/

[25] J. M. Zinsalo and L. Lamarche, "Produire de l’électricité par géothermie profonde", Substance ÉTS, 2017, Canada.

[26] Belaid Nada Hibat Errahmen, "Energie éolienne", UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA,2021.

[27] S. Petibon, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques”, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, France, 2009

[28] B. Flèche & D. Delagnes, *Energie solaire photovoltaïque*, juin 2007

[29] https://mon-panneau-solaire.info/panneaux-solaires/cellules-photovoltaiques/

[30] Djriou. Simulation d’un système photovoltaïque alimentant une machine. Thèse magistère. Sétif : université Ferhat Abbas, 2011

[31] https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Medias/Actualites/2024/Booster-diagnostic-par-Courbe-IV-centrales-solaires.aspx.

[32] El Basri, Y., "Architecture de puissance distribuée reconfigurable dédiée à l'optimisation de l'énergie photovoltaïque," thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse IV, France, 2013

[33] B. M. Salih, R. A. Mohmeed, and M. A. Ibrahim, “The environment coefficients effect on IV and PV characteristics curves of photovoltaic cell using Matlab/Simulink, International Journal of Engineering & Technology, vol. 7, no. 4, pp. 2651–2654, 2018.

[34] Cabal, C., "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque," thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse IV, France, 2008

[35] R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.

[36] I. Caluianu, G. Notton, I. Colda, S. Caluianu, and A. Damian, "Photovoltaic energy generation under partially shading conditions," in 2009 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009, pp. 1–6.

[37] Energie Plus, "Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques," [En ligne]. Disponible sur : https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/. [Accédé : 15 avril 2024].

[38] B. E. B. Bi, P. Gbaha, K. B. Koua, and M. P. E. Koffi, "Dimensionnement et Gestion de l'Energie au Sein d'un Système Hybride de Production d'Energie," European Scientific Journal ESJ, vol. 14, no. 36, 2018, doi: 10.19044/esj.2018.v14n36p260.

[39] I.Touaïbia, E. Kechar E.Azzag et. Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Tlemcen : Thèse de doctorat Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.

[40] H. Belmili, M. Ayad, E. M. Berkouk, and M. Haddadi, "Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes-Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil", Revue des Energies Renouvelables CICME, vol. 8, pp. 27-39, 2008.

[41] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien

[42] http://energie-abordable.com/batteries.html

[43] J.C. Lassègues, "Supercondensateurs", Techniques de l'Ingénieur, no. D3334, 2001.

[44] M. Zandi, "Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2010, ffNNT : 2010INPL071N.

[45] B. Mimi and O. Abdelghani, "Etude des différents étages d'un système hybride (photovoltaïque–éolien–pile à combustible)," Communication Science et Technologie, vol. 12, no. 1, pp. 9–24, 2014

[46] B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," IEEE Trans Sustain Energy, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2012.

[47] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," IEEE Trans Power Electron, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.

[48] S. Bouri, O.-A. Mekkaoui, and A. M. Mamem, "Comparative Study of Different MPPT Methods of a Boost Chopper of PV Generator," Acta Electrotechnica et Informatica, vol. 22, no. 3, pp. 24–31, 2022.

[49] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008 .

[50] Zerhouni, F. Z., Zegrar, M., & Stambouli, A. B., "Connexion directe source d'énergie renouvelable verte non polluante photovoltaïque à une charge," Journal of Renewable Energies, vol. 12, no. 4, pp. 585–595, 2009.

[51] M. Rafik, « Contribution à la surveillance dynamique des systèmes de production évolutifs par les systèmes Neuro-Flous Temporels », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2012.

[52] Merouah Mustapha & Mira Ali ,'Application du contrôle intelligent d'un hacheur boost dans un système de conversion d'énergie solaire' ,Mémoire de Master, Université Ibn-Khaldoun de Tiaret,2020.

[53] O. Ben Cheikh et Y. Biteur, « Étude et réalisation d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant les réseaux de neurones artificiels », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018.

[54] HARENDI Amine & ARBAOUI Ali « Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque», Mémoire Master , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,2015.