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

Mémoire de fin d'études de Master en

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Commande d'un Onduleur Z-Source par la technique SBC en appliquant un Filtre Actif Parallèle et un Système Photovoltaïque

Présentés par :

BOUDIS Boubakeur

BABA Faisal

Proposés et Dirigés par :

Dr. MORSLI Abdelkader

Mr. BENFATAH Ahmed

Promotion 2022-2023

Remerciements

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir appris ce que nous ignorions, de nous avoir donné la santé et tout dont nous nécessitions pour l'accomplissement de ce mémoire.

Nous remercions, en deuxième position, nos chers parents, sans lesquelles nous n'aurons jamais pu arriver à terme dans la rédaction, et qui nous ont toujours entourés d'affection et de soutien dans les moments pénibles comme dans les moments de joie.

Également, nous remercions l'encadreur **Dr. MORSLI Abdelkader** pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité.

Notre gratitude s'exprime pareillement pour **Mr. BENFATEH Ahmed** Co-encadreur, pour sa générosité et son dévouement, et d'avoir sacrifié du temps de nous aider.

Enfin, nous ne pouvons oublier de remercier nos amis, nos collègues de département du Génie électrique, nos enseignants, techniciens, agents administratifs et sincèrement le jury **Dr. ABBADI Amel** et **Dr. HAMIDIA Fethia**.

Dédicace

Je dédie ce travail à ces êtres qui me sont chers :

A ma mère, source et symbole de tendresse, à qui je dois ma réussite, pour ses prières, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée, avec tous les moyens et aux prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné de puis mon enfance, pour son immense amour, je te souhaite une vie pleine de bonne santé, je t'aime maman,

A mon père, pour son amour et son immense sacrifice de toujours, lui qui m'a transmis les valeurs les plus justes et les plus nobles qui m'ont permis d'être un homme responsable et studieux,

A mes frères et sœurs,

A mes amis,

Amon binôme **BOUDIS Boubakeur** ainsi qu'à sa famille,

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, je ne saurais vous remercier autant.

BABA FAISAL

Dédicace

A mes parents BOUDIS MOHAMED et CHERIGUI HOURIA

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pourles sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être, pour tout le soutien et l'amour que vous me portez, merci, merci et merci. Avec toute ma tendresse.

A mes oncles, tantes.
A mes frères et sœurs, cousins et cousines.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Affectueusereconnaissance

Meilleurs vœux de succès dans vos études et dans votre vie.

A mes amis.

Vous m'avez encouragée et aidée quand j'avais besoin de vous. Je n'auraisjamais pu le faire sans vous. Mes sincères remerciements.

A tous mes enseignants, du primaire à l'université
A tous les amis que j'ai eus dans ma vie.
A mes camarades de la faculté des sciences et technologie de l'Université de Médéa.

BOUDIS BOUBAKEUR

ملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة يتضمن دراسة مموج ذو مصدر ممانع (z_soure) متصل بمولد كهروضوئي من اجل تحسين خصائص المموج .المموج المدروس يؤمن وظيفة المقطع الرافع (hachour survolteur) للتوتر والمموج في آن واحد .لتتحكم في هذا المموج تم اختيار طريقة تحكم (sbc) من خلال تطبيق عامل التصفية النشط المتوازي لتحسين جودة المموج وتقليل نسبة التشوه التوافقي الكلي (THD) بالإضافة لاستعمال تقنية تتبع الطاقة العضمى (MPPT) للحصول على المردود الأمثل للمولد الكهروضوئي .تم إجراء عمليات المحاكاة للمموج باستعمال برنامج / Simulink Matlab

الكلمات المفتاحية : المموج (z_soure) المولد الكهروضوئي تحكم (sbc) تقنية تتبع الطاقة العضمى (MPPT) عامل التصفية النشط المتوازي(FAP)

Résumé

Ce travail visé à étudier le cas d'un onduleur à Z-source en mode de connecter avec un générateur photovoltaïque pour le but d'améliorer les performances des convertisseurs classiques à deux étages. Cet onduleur assure la fonction d'un hacheur survolteur et d'un onduleur dans un seul étage. D'autre part, une méthode de contrôle de modulation de largeur d'impulsion (SBC) a été utilisée pour commander avec l'onduleur Z-source en appliquant un filtre actif parallèle , pour obtenir le meilleur rendement et une réduction de taux des Distorsions Harmonique Totale (THD). La technique MPPT est utilisée pour obtenir un fonctionnement optimal en puissance du générateur Les simulations sont effectuées par l'environnement Matlab/Simulink pour vérifier l'étude proposée.

Mots clés : Z-Source, Générateur photovoltaïque (GPV), filtre actif parallèle(FAP) technique MPPT, Modulation large impulsion (MLI).

Abstract

The aim of this work is to study of Z-source inverter connected with PV generator, to improve the performance of the classic inverter. Moreover, this inverter makes sure the both function of a booster chopper and an inverter in one stage . In addition, a modified Simple Boost Control (SBC) control method was used to control the Z source inverter by applying the active filter parallel to the Z source network together to achieve the best efficiency and reduce the total harmonic distortion (THD). The MPPT technique is used to obtain optimal power performance of the photovoltaic generator (GPV). The MPPT technique allowed obtaining the optimal power performance of the photovoltaic generator (GPV). The simulations results have been obtained by numerical MATLAB/Simulink Software to validate the propose study.

Keywords: Z-source inverter, photovoltaic generator (GPV), active filter parallel(FAP), PWM Control, MPPT technique.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale **01**

Chapitre I : Production d'énergie photovoltaïque

I.1.Introduction 03

I.2.Définition d'énergie renouvelable 03

I.2.1. L'énergie renouvelable en Algérie 03

I.3. L'énergie solaire 07

I.3.1. Rayonnement solaire 07

I.3.2. Spectre du rayonnement 07

I.4. L'énergie solaire photovoltaïque 08

I.4.1. Historique 08

I.4.2. L'effet photovoltaïque 09

I.4.3. Cellule photovoltaïque 09

I.4.3.1. Caractéristiques électrique d'une cellule PV 09

I.4.3.2. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque 11

I.5. Les différentes technologies des cellules PV 15

I.5.1.Les cellules à bas de Silicium monocristallines 15

I.5.2. Les cellules à bas de Silicium poly cristallines 15

I.5.3. Les cellules à bas de Silicium amorphe 16

I.5.4.Les cellules à bas organiques et plastiques 17

I.6. Panneau solaire (champ solaire) 18

I.6.1. Regroupement des cellules en série 18

I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle 20

I.6.3. Regroupement des cellules (séries et parallèle) 20

I.7. Protection classiques d'un générateur photovoltaïque 21

I.7.1. Les diodes parallèles (Diode by-pass.) 22

I.7.2. Les diodes séries (Diode anti-retour) 23

I.8. Les systèmes photovoltaïques 24

I.8.1.Les Systèmes autonomes 24

I.8.2. Les Systèmes hybrides 25

I.8.3.Les Systèmes PV raccordée au réseau 26

I.9.Classification des Centrales photovoltaïques connectés au réseau 26

I.9.1. Centrales de petite taille (P=1 à 10 KW) 26

I.9.2. Centrales de taille moyenne (P=10 à 100 KW) 26

I.9.3. Centrales de grande taille (P > 500 KW) 27

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 27

I.10.1. Les avantage 27

I.10. 2. Les inconvénients 27

I.11. Conclusion 28

Chapitre II : Modélisation d'un système photovoltaïque et la commande MPPT

II.1.Introduction 29

II.2. Générateur photovoltaïque 29

II.2.1. Modélisation d'un cellule Photovoltaïque 29

II.2.2. Caractéristique d'une cellule Photovoltaïque 33

II.2.3. Modélisation d'un GPV : 33

II.2.4. Influence de la température et l'ensoleillement sur le GPV 34

II.2.4.1 Influence de l'ensoleillement 34

II.2.4.2. Influence de la température 35

II.3. Modélisation du convertisseur classique DC/DC 36

II.3.1. Définition 36

II.3.2. Hacheur dévolteur (Buck) 37

II.3.3.Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) 38

II.3.4. Hacheur survolteur (Boost) 39

II.3.4.1. Etude et principe de fonctionnement 40

II.3.4.2. Analyse du fonctionnement 40

II.3.3.3. Avantage de convertisseur boost 42

II.4. La commande (MPPT) 42

II.4.1. Définition 42

II.4.2. Principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV 43

II.4.3. Différentes techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT 44

II.4.4. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) 44

II.4.4.1. Définition 44

II.4.4.2.Algorithme Perturbation et Observation (P&O) 44

II.4.5. Méthode de réseau de neurone artificiel ANN 46

II.4.5.1. Définition 46

II.4.5.2. Base biologique 46

II.4.5.3. Modélisation mathématique du neurone biologique 47

II.4.5.4. Réseaux neuronaux artificiels dans les algorithmes MPPT pour l'optimisation des systèmes d'énergie photovoltaïque 50

II.4.5.5. Réseaux neuronaux artificiels pour le contrôle MPPT dans les systèmes PV 51

II.5. Identification sélective des harmoniques de références par le référentiel synchrone de Park dq 52

II.5.1 Principe de fonctionnement 52

II.5.2. Identification de l'harmonique 52

II.6. Conclusion 54

Chapitre III : Modélisation d'onduleur Z-Source

III.1. Introduction 55

III.2. Convertisseurs DC/AC 55

III.2.1. Définition 55

III.2.2. Différents types d'onduleur 56

III.2.2. 1.Onduleur de tension 56

III.2.2.2.Onduleur de courant 56

III.2.2.3.Onduleur autonome 57

III.2.2.4. Onduleur non autonome 57

III.2.3. Onduleur monophasé 58

III.2.4. Onduleur triphasé 59

III.2.4.1.Modélisation de l'onduleur triphasé 59

III.3. Onduleur Z-source 61

III.3.1. Définition 61

III.3.2. Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source 62

III.3.3. Dimensionnements des inductances et des condensateurs 65

III.3.4. Les diffèrent stratégies de commande d'onduleur z-source par MLI 66

III.3.4.1. Simple Boost (MLI simple Boost Control SBC) 66

III.3.4.2. MLI Maximum boost control MBC 68

III.3.4.3. Commande de sur alimentation constante maximale MCBC 68

III.3.5. Simulation 70

III.3.5.1. Simulation de la commande Simple Boost 70

III.3.5.2. Résultats de simulation 71

III.3.5.3. Interprétation des résultats 72

III.4. Conclusion 72

Chapitre IV : Résultats de simulation et interprétations

IV.1. Introduction 73

IV.2. L'outil Matlab/Simulink 73

IV.3. Système du filtrage actif parallèle proposé 74

IV.3.1. Résultats de simulation 75

IV.3.2. Interprétations 78

IV.4.Conclusion 79

Conclusion générale et perspectives **80**

Références Bibliographiques **81**

NOMENCLATURE

MW	Méga watt
MWc	Watt-Crète
Ed	conversion du rayonnement direct
α	angle d'azimut
β	l'inclinaison
I-V	courant–tension
P-V	puissance–tension
Im	courant au point de puissance maximal
Vm	tension au point de puissance maximal
P	puissance
FF	facteur de forme
Icc	courant de court-circuit
Iph	photo-courant
Vco	Tension à circuit-ouvert
S	surfaces de la cellule en m²
E	l'ensoleillement en W/m
Gi	Source de courant parfaite.
R_{sh}	Résistance shunt
R_{se}	Résistance série
D	Diode
V_t	La tension thermique
T_c	La température absolue
M	Facteur idéal de la jonction
K	Constante de Boltzmann
E	Charge de l'électron
V_{opt}	La tension optimale
I_{opt}	Le courant optimale
R	Rendement
A_{pv}	Surface effective des cellules
AM	l'air Masse
STC	Standard Test Conditions
°C	degré Celsius
CA	courant alternatif
CC	courant continue
Kw	kilo watt

ID	Courant circulant dans la diode
IRP	Courant circulant dans la résistance *RP*
IPV /Icell	Courant généré par la cellule (générateur) photovoltaïque
VPV /Vcell	tension généré par la cellule (générateur) photovoltaïque
Vth	Tension thermique
Is	courant de saturation de la diode
K1	constante (1.2 A/cm^2k^3)
w/m^2	watt par mettre au carrée
k0	coefficient de température de Iph
T1, T2, T3, T4	Transistors de puissance.
D1, D2, D3, D4	Diodes de puissance.
Q1, Q2, Q3, Q4	Transistors avec une diode antiparallèle.
uc,ic	La tension et le courant de la charge
Van, Vbn ,Vcn	tensions simples
M	profondeur de modulation de l'onduleur
B	amplification de l'étage continu de Z-source
L1 , L2	Inducteur de l'onduleur Z source
C1 , C2	Condensateur de l'onduleur Z source
T_0	durée des courts-circuits de l'onduleur Z-source
T_1	la durée des états actifs de l'onduleur
R	Le taux de modulation
G	Le gain en tension de l'onduleur Z
r	Le taux de modulation
G	Le gain en tension de l'onduleur Z

ABREVIATIONS

ENR : Energies Renouvelables

Wc : watt-crête

Labo : Laboratoire

PV : Photovoltaïque.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, ‘Maximum Power Point Tracking’.

GPV Générateur Photovoltaïque.

NOCT : Nominal Operating Cell Température

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

CS : Convertisseur Statique

PPM : Point de Puissance Maximale.

IncCond : Incremental Conductance (Conductance Incrémentale).

CV : Constant Voltage

P&O : Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

PI : Proportional Integral

DSP : digital signal processor

MOSFET : Métal Oxide Silicon Field EffectTransistor

IGBT : insulated-gate bipolar transistor

DC/AC : conversion continue-alternative permet

MLI : modulation largeur impulsion

SBC : simple boost control

MBC : Maximum boost control

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1: Structure du parc de la production nationale en MW **06**

Figure I.2 : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale enTWh **06**

Figure I.3 : Les différents types de rayonnement **08**

Figure I.4 : Schéma d'une jonction PN **09**

Figure I.5 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque **10**

Figure I.6 : Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque **12**

Figure I.7: Courbe puissance-tension d'un module photovoltaïque **13**

Figure I.8 : Photos de cellules mono cristalline(a)et multi cristalline(b) **15**

Figure I.9 : Deux exemples de modules utilisant le Sia(Silicium amorphe) **17**

Figure I.10 : Cellule solaire tout organique sur substrat souple **17**

Figure I.11 : Association des modules en série **19**

Figure I.12 : Caractéristique I-V résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques **19**

Figure I.13 : Caractéristique P-V résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques **19**

Figure I.14 : Association des modules en parallèle **20**

Figure I.15: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des cellules identiques **20**

Figure I.16 : Association mixte des modules **21**

Figure I.17 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte **21**

Figure I.18 : Disposition des différentes protections voir :la diode by-pass et anti retour **22**

Figure I.19 : Illustre le fonctionnement de la diode by-pass **23**

Figure I.20 : caractéristique I-V d'une cellule solaire en soleillée et dans l'obscurité **23**

Figure I.21 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes **24**

Figure I.22 : Configuration du système hybride à bus continu **25**

Figure I.23 : Système connecté au réseau **26**

Chapitre II

Figure II.1 : Modèle électrique équivalant à la cellule solaire **33**

Figure II.2 : caractéristique (P-V) et (I-V) d'une cellule **33**

Figure II.3 : Caractéristique (I-V) et (P-V) d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable **35**

Figure II.4 : Caractéristique (I-V) et (P-V) d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable **36**

Figure II.5 : convertisseur continu/continu (hacheur) **37**

Figure II.6 : Schéma du hacheur Buck **37**

Figure II.7*:* Caractéristique du tension-courant **38**

Figure II.8 : Variation de v de charge avec i de charge pour le convertisseur Buck **38**

Figure II.9 : circuit d'un convertisseur Buck-boost **38**

Figure II.10 :caractéristique de tension et de courant d'un convertisseur Buck-boost **39**

Figure II.11 : schéma d'un hacheur Boost **39**

Figure II.12 : Interrupteur *Q* passant **40**

Figure II.13 : Interrupteur Q ouvert **40**

Figure II.14 : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT **43**

Figure II.15 : Organigramme de l'algorithme PandO **45**

Figure II.16 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer **45**

Figure II.17 : Forme d'un neurone artificiel **46**

Figure II.18 : Neurone biologique **47**

Figure II.19 : Modèle d'un neurone artificiel **48**

Figure II.20 : principes d'un neurone artificiel **48**

Figure II.21 : Schéma fonctionnel d'un contrôleur MPPT (ANN) 52

Figure II.22 : Algorithme identification des harmoniques de références 5 et 7 à base référentielsynchrone de Park d-q **54**

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma bloc de la conversion continue-alternative **55**

Figure III.2: Commande d'onduleur de tension, et la forme de tension $u_c(t)$ **56**

Figure III.3 : Onduleur de courant, la commande et les formes d'ondes de ic(t) **57**

Figure III.4 : Onduleur monophasé: Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet **58**

Figure III.5: Onduleur de tension triphasé V **59**

Figure III.6 : Onduleur de tension triphasé simplifié **60**

Figure III .7 : Modèle d'impédance Z-source lié avec un onduleur **61**

Figure III.8 : Schéma équivalent du mode 1 **63**

Figure III.9 : Schéma équivalent du mode2 **64**

Figure III.10 : Schéma équivalent du mode3 **64**

Figure III .11 : la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pendant la période **66**

Figure III.11 : La commande Simple Boost **67**

Figure III.12 : La commande maximum boost. **68**

Figure III.13 : La commande constante Boost **69**

Figure III.14:schéma de Z-source en MATLAB SIMULINK **70**

Figure III .15 : La tension *Vdc* **71**

Figure III.16 : Les tensions simples non filtrées **71**

Figure III.17 : Les tensions simples filtrées **71**

Figure III.18 : Les courants non filtrées 72

Figure III.19 : Les courants filtrées **72**

Chapitre IV

Figure IV. 1: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique **75**

Figure IV.2 : Tension de sortie du Gpv **75**

Figure IV.3 : Courant de la sortie du Gpv **75**

Figure IV.4 : Puissance de la sortie de la Gpv. **75**

Figure IV.5 : Tension de la sortie de l'hacheur boost **76**

Figure IV.6 : Tension de la sortie de Z-Source **76**

Figure IV.7 : Courant de la sortie de Z-Source **76**

Figure IV.8 : Forme d'onde du courant I_{Ca} avant le filtrage **76**

Figure IV.9 : Spectre du courant I_{Sa} avant le filtrage **76**

Figure IV.10 : Déphasage du courant I_{Sa} par rapport à la tension V_{Sa} après le filtrage **77**

Figure IV.11 : Courants de charge i_{ca}, de source i_{Sa} et du filtre i_{ha} **77**

Figure IV.12 : Spectre du courant I_{Sa} après filtrage **77**

Figure IV.13 : Schéma temporel du $THDi_{Sa}$ **77**

Figure IV.14 : Tension V_{Sabc} **77**

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Les centrales d'électricité à partir d'énergies renouvelables en Algérie2015-2016 **5**

Tableau I.2 : Paramètres d'un module photovoltaïque SIEMENSSM110-24 **14**

Tableau I .3 : Comparatif des rendements des différents types de cellules **18**

Chapitre II

Tableau II.1 : Conditions de test **31**

Tableau II.2 : Caractéristiques du module KC-60[22] **33**

Tableau II.3 : L'analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels **49**

Tableau II.4 : Fonctions d'activations **49**

Chapitre III

Tableau III.1 : Les états utilisés avec la commande Z-source **62**

Tableau III.2: les paramètres de simulation **70**

Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Paramètres du système de commande de filtrage actif parallèle **74**

Introduction générale

L'énergie est indispensable à la vie de tout le monde, peu importe quand et où ils sont. Cela est particulièrement vrai en ce nouveau siècle, où les gens continuent à poursuivre un haut niveau de vie. Parmi les différents types d'énergie que l'Homme a besoin au quotidien, l'électricité est la plus importante qui lui sert pour l'éclairage, le chauffage, la distraction, la communication et l'information, etc. Au cours du XXe siècle, on a abandonné d'utilisé les combustibles et les sources d'énergie à base d'hydrocarbures, ce qui s'est manifesté par le dégagement de grandes quantités de gaz notamment le dioxyde de carbone[62].

La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueux de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas. Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies.

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie PV se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, théorie de contrôle, et d'autres filières. D'ailleurs, on prévoit, pour commander la puissance électrique débitée, diverses méthodes : l'action sur les propriétés physico-chimiques des cellules, l'action sur les trackers mécaniques d'orientation automatique des panneaux solaires, et l'action sur l'interface d'électronique de puissance qui relie le générateur PV avec sa charge. Cette dernière action est communément appelée la commande électrique des systèmes PV.

Elle consiste en l'élaboration de topologies des convertisseurs statiques et de développement d'algorithmes de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la meilleure capture de la puissance maximale[62].

Le mémoire est divisé en quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la production d'énergie photovoltaïque, le gisement solaire, les influences météorologiques, les avantages et les inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation du système photovoltaïque et la commande de Poursuivre du Point de Puissance Maximale (MPPT) est présentée.

Au troisième chapitre, une commande d'un onduleur Z-Source par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion avec Simple Boost Control MLI-SBC a été faite.

A la fin, dans le quatrième chapitre, nous verrons les résultats obtenus par l'environnement MATLAB/Simulink.

Finalement nous terminerons ce travail par une conclusion générale et perspectives.

CHAPITRE I

PRODUCTION D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction

Nous parlons dans ce chapitre d'une manière brève sur les énergies renouvelables, et spécifiquement sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous faisons une étude approfondie sur le rayonnement solaire, qui se transforme en énergie électrique. Nous aborderons également la technologie utilisée dans les panneaux solaires et toutes leurs propriétés électriques et l'étendue de leur influence sur des facteurs externes tels que la chaleur et l'humidité. Nous n'oublions pas à la fin de prendre connaissance de tous les défauts des panneaux solaires et de les identifier de manière exhaustive, et par cela nous aurons terminé ce chapitre.

I.2. Définition d'énergie renouvelable

Est connue sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ressources naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau [1]. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs. De la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, "ENR". En plus de leur caractère illimité,ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [1].

I.2.1. L'énergie renouvelable en Algérie

L'Algérie joue un rôle clé dans les marchés mondiaux de l'énergie en tant que producteur et exportateur de gaz naturel et de gaz naturel liquéfié. Le mix énergétique de l'Algérie en 2010 aété presque exclusivement basé sur les combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel (93%). Cependant, le pays a un énorme potentiel d'énergie renouvelable, principalementsolaire, dont le gouvernement est (ou devrait) en essayant de l'exploiter en lançant un programme d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique ambitieux.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, dont 12 000 MW seront destinés à la consommation interne et le reste pour l'exportation. Le programme est axé sur le développement et l'expansion de l'utilisation des ressources renouvelables, comme l'énergie solaire, le vent, la biomasse, la géothermie et l'hydroélectricité, afin de diversifier les sources d'énergie et promouvoir le développement durable du pays [2, 3].

Les projets des énergies renouvelables pour la production de l'électricité dédiés au marché

national seront menés en trois phases :

- ✓ Phase 2011-2013 : pour tester les différentes filières d'énergies renouvelables. Comme exemples de projets pilotes, on peut citer la station photovoltaïque de 1MWc a Oued N'chou, 10km au nord de la commune de Ghardaïa, réalisée sur une superficie de 10 hectares, pour un coût global de près de 900 millions de DA, cette mini-centrale est composée de 6000 modules photovoltaïques de différentes technologies ainsi quela station de 10 MW à Adrar, composée de 12 éoliennes.
- ✓ Phase 2014-2015 : déploiement du programme électricité renouvelable et laconstruction des équipements.

  Une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;
- ✓ Phase 2016-2020 : déploiement à grande échelle.

Environ 60 centrales solaires photovoltaïques, en se concentrant sur les centrales solaires, parcs éoliens ainsi que des centrales électriques hybrides qui doivent être construites au cours des dix prochaines années.

Tableau I.1 : Les centrales d'électricité à partir des énergies renouvelables en Algérie 2015-2016[2,3].

Capacités des centrales entrées en service en 2015	**Capacités des centrales entréesen service en 2016**	**Capacités de centrales à mettre en service avant fin 2016**
➢ Djanet (illizi) 3 MW ➢ Adrar (Adrar) 20 MW ➢ Kaberten (Adrar) 3 MW ➢ Tamanrasset (Tamanrasset) 13MW ➢ Tindouf(Tindouf) 9MW	➢ Aoulef (Adrar) 5 MW ➢ Z.Kounta (Adrar) 6 MW ➢ Timimoune(Adrar) 9 MW ➢ Reggane (Adrar) 5 MW ➢ In Salah (Tamanrasset) 5 MW ➢ Ain Albel (Djelfa) 20 MW ➢ Telagh (Sidi-Bel-Abbes) 12 MW ➢ Sedrate Leghzel (Naama) 20 MW ➢ Ain Skhouna (Saïda) 30 MW ➢ El Khnag (Laghouat) 20 MW ➢ Oued El Kebrit (Souk Ahras) 15 MW	➢ Aïn Al Bel (Djelfa) 33 MW ➢ Laghouat 40 MW ➢ Oued El Ma (Batna) 2 MW ➢ Labiodh Sidi Chikh (E Bayadh) 23 MW ➢ Aïn El Melh (M'sila) 20 MW ➢ ElHedjira(Ouargla) 30MW
TOTAL— 48 MW	**TOTAL— 147 MW**	**TOTAL— 148 MW**
	TOTAL GENERAL: 343MW	

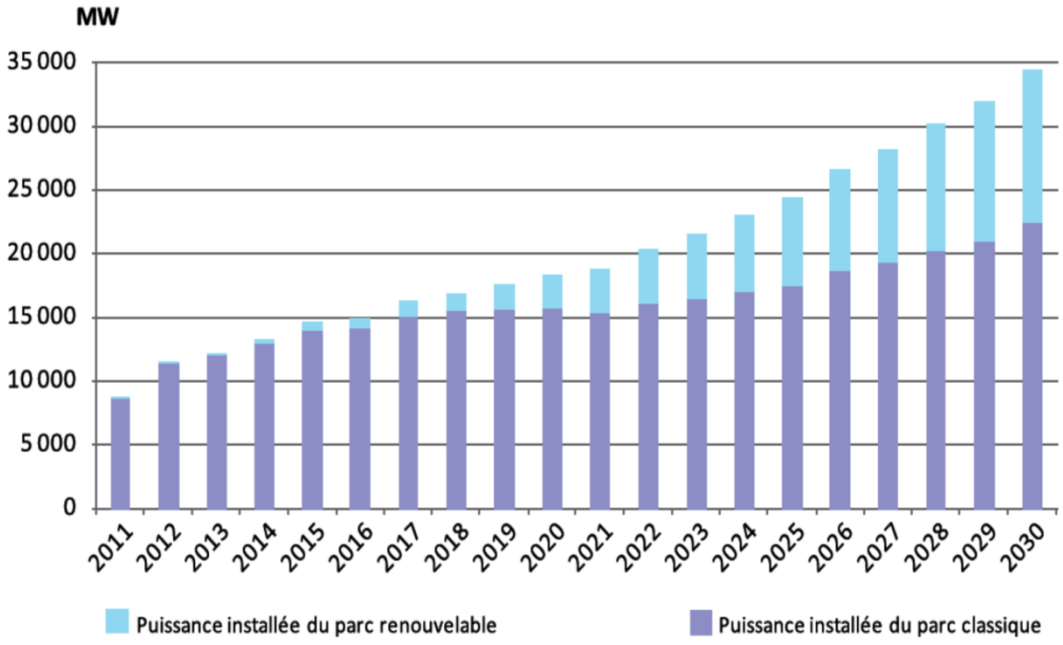


Figure I.1: Structure du parc de la production nationale en MW [4].

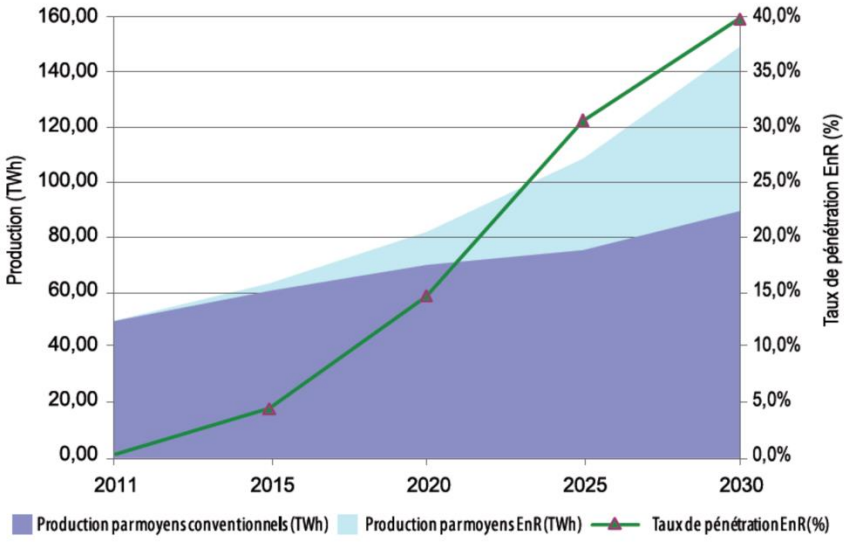


Figure I.2: Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh [4].

Des projets pilotes pour la construction de deux centrales solaires avec une capacité totale de stockage d'environ 150 MW chacune, ces derniers seront lancés au cours de la période 2011- 2013. Ceux-ci seront en plus du projet de la centrale hybride de Hassi R'Mel avec une capacité de puissance totale de 150 MW, dont 25 MW dans le solaire. Quatre centrales thermiques solaires d'une capacité totale d'environ 1200 MW doivent être construites au cours de la période 2016-2020.

La Centrale électrique mixte de Hassi R'Mel est l'une des premières centrales hybrides au monde. L'usine combine un creux parabolique de 25 MW concentrant un réseau d'énergie solaire et

couvrant une superficie de plus de 180.000 m^2, en conjonction avec une centrale à cycle combiné à turbine à gaz de 130 MW, afin de réduire les émissions de carbone par rapport à une centrale électrique traditionnelle. La turbine à gaz et le cycle de vapeur sont tirés par le gaz naturel, avec la turbine à vapeur recevant la vapeur solaire supplémentaire produite au cours de la journée. L'usine a commencé la production d'électricité en Juin 2011.

I.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire repose sur l'exploitation directe de la lumière solaire. Le fait que le soleil soit la principale source de production d'énergie peut être définie comme une masse très lourde, 333 000 fois plus lourde que la Terre. Elle contient également la plus grande proportion d'hydrogène, environ 70%, d'hélium. De 27% et le reste de 3% (lithium, carbone, azote, oxygène ...). L'énergie solaire est l'une des énergies les plus renouvelables que l'homme puisse exploiter. C'est une énergie propre qui ne laisse aucun résidu négatif et qui est permanente et continue tant que le soleil existe. À l'heure actuelle, la recherche et les expériences ont pour but d'utiliser l'énergie solaire et de la convertir en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques [5], qui auront un moderne et détaillé plus tard, L'énergie solaire est largement utilisée en la convertissant en énergie électrique et en énergie thermique par conversion photovoltaïque et conversion thermique de l'énergie solaire [6].

I.3.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques [7].

I.3.2. Spectre du rayonnement

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

A. Le rayonnement direct

La conversion du rayonnement direct *Ed* est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [6,7]. Le rayonnement direct est converti pour un plan avec un angle d'azimut α et d'inclinaison β selon l'équation suivant :

$$Ed_{Qa} = Ed\frac{\cos(\theta_i)}{\sin(\gamma)} \quad \text{(I.1)}$$

B. Le rayonnement diffus

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

C. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (Eau, neige, etc.).

D. Le rayonnement global

La figure I.3 représente le rayonnement global qui est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

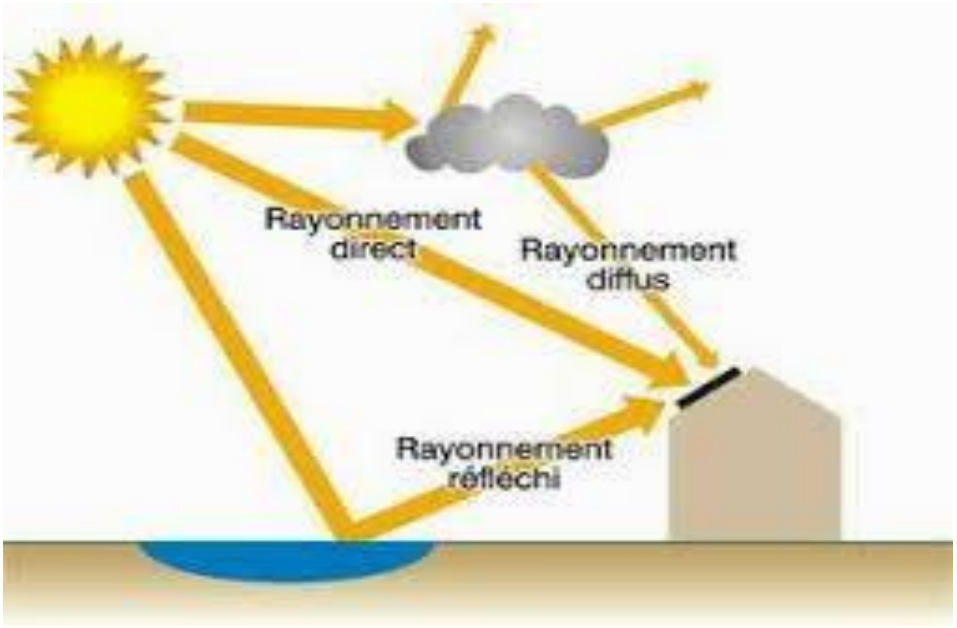


Figure I.3: Les différents types de rayonnement [8].

I.4. L'énergie solaire photovoltaïque

I.4.1. Historique

Elle a été découverte par Antoine-César Becquerel. Au XIXe siècle, quelques moteurs à miroirs ont été construits. Mais même malgré la découverte de l'effet du sélénium photovoltaïque en 1877 il a fallu attendre jusqu'en 1955 que les chercheurs de Bel Téléphone Laboratoires (aux Etats-Unis) soient capables de produire la cellule qui avait le rendement de conversion énergétique au moins 6% (ratio entre l'énergie utilisé pendant la fabrication et l'énergie que le système est capable de produire). Enfin pour pouvoir annoncer la naissance de la photopile solaire. Les années

70 peuvent être considérées comme le berceau de l'énergie solaire (photovoltaïque). La notion «photovoltaïque» provient du mot grec [phots] de la lumière et du nom d'un physicien italien Alessandro Volte. Ensuite, c'est l'augmentation de la consommation mondiale de l'énergie et la diminution des réserves mondiales de pétrole et de charbon qui a amené des problèmes dans le monde. Nous utilisons les sources renouvelables plus que nous pensons, il s'agit de la lumière, du soleil, du vent ... Par exemple, une pièce de la maison est chauffée par les rayons de soleil qui traversent la fenêtre, les voiliers sur l'océan sont poussés par le vent etc. les sources renouvelables occupent déjà une place plus importante et elles sont plus étendues que ce que l'on peut penser. Chaque année le soleil envoie des rayons à la Terre d'une puissance 40 000 fois plus que les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles [9].

I.4.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique, qui convertit la lumière (photons) en électricité grâce à l'utilisation d'un matériau semi-conducteur. Ce dernier possède des propriétés électroniques particulières. Pour constituer une cellule photovoltaïque il faut, à partir de ce matériau, constituer d'une jonction avec une couche supérieure présentant un excès d'électrons (zone dopée n) et une couche inférieure comportant un déficit d'électrons (zone dopée p) ou inversement, Figure (I.4) L'exposition du semi-conducteur au rayonnement solaire, va créer un excès de charges électriques dans les deux couches, et la mise en contact de deux matériaux de propriété électronique déférente, va provoquer un champ électrique [10].

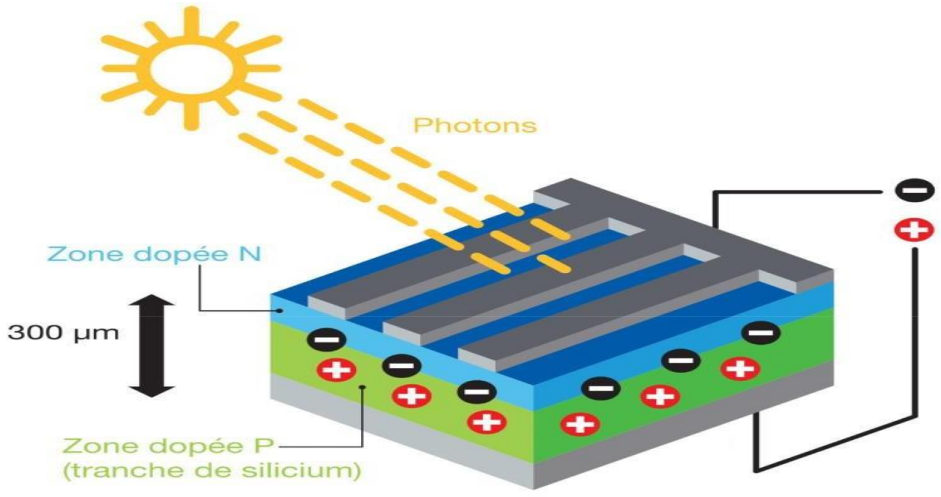


Figure I.4: Schéma d'une jonction PN.

I.4.3. Cellule photovoltaïque

I.4.3.1. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances. [11].

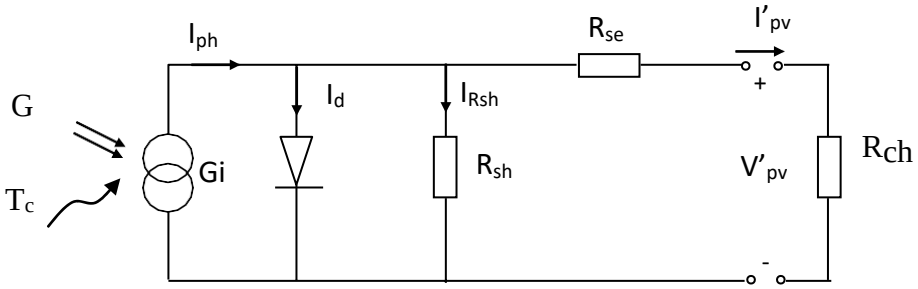


Figure I.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

Gi : Source de courant parfaite.

R_{sh}: Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

R_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courantrencontre sur son parcourt (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

R_{ch} : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants:

- **Courant de court circuit (I_{sc})**

C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle (V'_{pv}=0).

- **Tension en circuit ouvert (V_{oc})**

Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} (I_d =I_{ph}) quand (I'_{pv}=0). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquementpar :

$$V_{OC} = \frac{mkT_C}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad \text{(I.2)}$$

Où,

$$V_{OC} = \frac{mkT_C}{e} \quad \text{(I.3)}$$

Avec,

V_t : La tension thermique. T_c : La température absolue.

m : Facteur idéal de la jonction.

K : Constante de Boltzmann (K= 1.38 10^{-23} J/k)e : Charge de l'électron (e=1.6 10^{-19}).

- **Point de puissance maximale (P_{max})**

Est le point M(V_{opt},I_{opt}) de la figure (II.7) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt}$

Avec :V_{opt}: La tension optimale.I_{opt}: Le courant optimale.

- **Rendement maximum**

Est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \times I_{opt}}{A_{pv}.G} \quad \text{(I.4)}$$

Où :

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface(W/m^2).

A_{pv} : Surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1000W/m^2 d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort.

I.4.3.2. Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

A. Caractéristique courant - tension (I-V)

La Figure (I.6) présente la courbe courant-tension d'un moule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise.

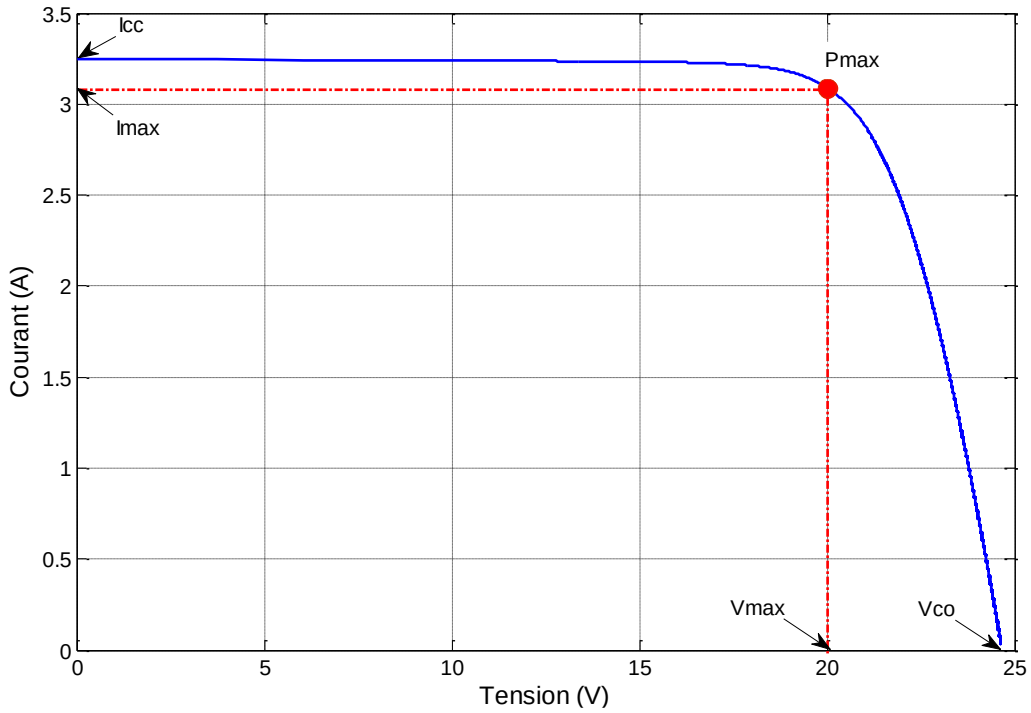


Figure I.6: Courbe courant-tension d'un module photovoltaïque.

Ainsi, si une résistance variable *R* est connectée aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique *I=f(V)* de la cellule avec la courbe de la charge.

Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente *1/R*. Par conséquent, si la résistance *R* est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région *MB* de la courbe. Le courant I varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance *R* est grande, la cellule fonctionne dans la région *CN*. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale àla tension de fonctionnement à vide. Dans la région *BC* sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température [12].

B. Caractéristique puissance - tension (P-V)

La caractéristique puissance-tension (P-V) d'un module PV est obtenue à partir de sa caractéristique courant-tension (I-V) (Figure I.7).

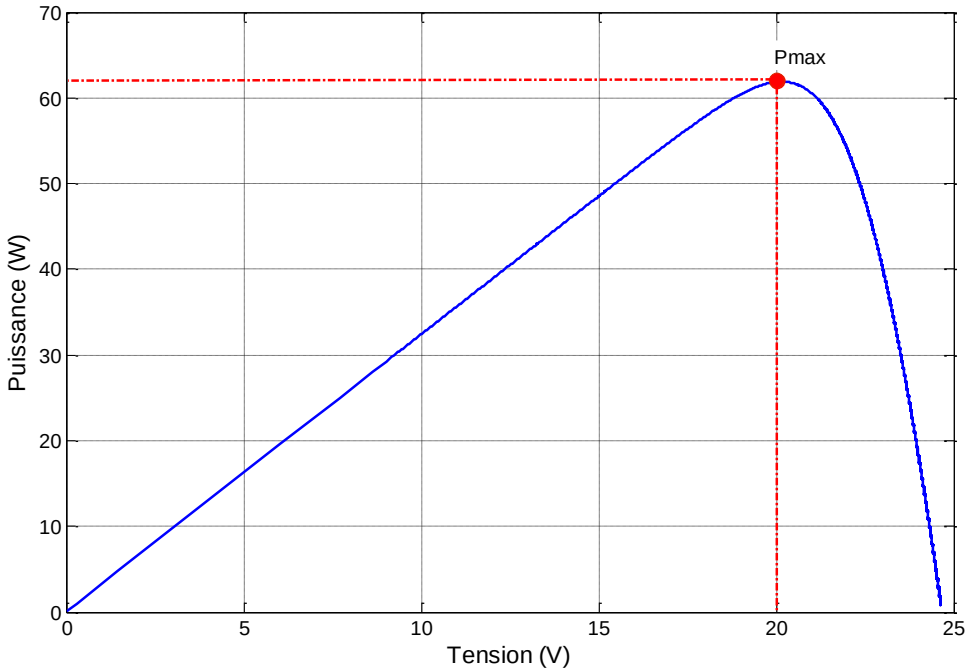


Figure I.7: Courbe puissance-tension d'un module photovoltaïque.

La puissance générée par une cellule PV est donnée par :

$$P = V.I \tag{I.5}$$

La puissance maximale P_m est obtenue lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \tag{I.6}$$

On désigne par I_m, V_m respectivement le courant et la tension avec lesquels la puissance produite est maximale.

C. Paramètres externes

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres dont le rendement de conversion, la tension de court- circuit et de circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme (FF). Ces paramètres sont extraits des caractéristiques courant-tension qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit [13] :

- **Facteur de forme**

Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de

circuit-ouvert par le courant de court-circuit.

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule ; il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{p_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad \text{(I.7)}$$

- **Exemple de module photovoltaïque**

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module (I_{cc}, I_{mpp}, V_{co}, V_{mpp}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolationde 1000W/m^2 et une température de 25°C, AM 1.5). Le tableau suivant montre les données d'un module photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24.

Tableau I.2: Paramètres d'un module photovoltaïque SIEMENS SM 110-24.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{co}	43.5 V
Coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} (α_{cc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} (β_{cc})	-152 mV/°C

I.5. Les différentes technologies des cellules PV

I.5.1. Les Cellules à base de Silicium monocristallines

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin [14,15].

I.5.2. Les cellules à base de silicium poly cristallines

Le silicium multi cristallin (ou Poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles [14,15].



Figure I.8: Photos de cellules monocristalline (a) et multi cristalline (b).

I.5.3. Les cellules à bas de silicium amorphe

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kWc. Le kilo watt crête (kWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test Standard (STC) (1000W.m^{-2} et 25°C). La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples Figure (I.9) et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en (Sia) est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%.

L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS).

Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques [14, 15].



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m²). *Module rigide Sharp (115Wc, 1.42 m²).*

Figure I.9: Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe).

I.5.4. Les cellules à base organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang [15] montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voix des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures) [14].

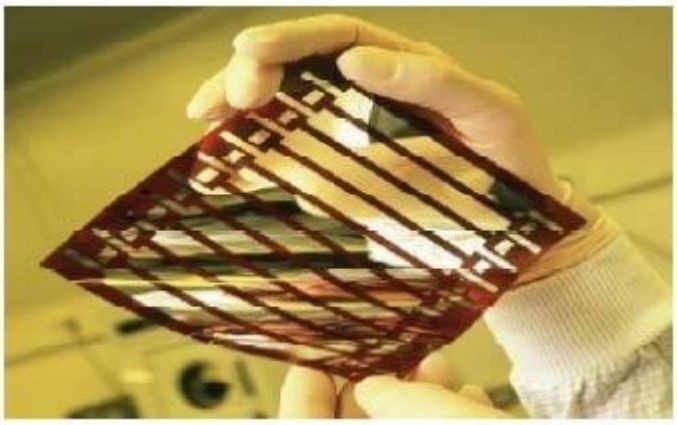


Figure I.10: Cellule solaire tout organique sur substrat souple.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposé en grande surface, à grande vitesse, pardes techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble rev enir beaucoup moins chères que leurs concurrentes [15].

Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules.

Tableau I.3: Comparatif des rendements des différents types de cellules [16].

Type	cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
1ère génération				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2e génération				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
3e génération				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production exclusivement applications spatiales

I.6. Panneau solaire (champ solaire)

I.6.1. Regroupement des cellules en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La Figure (I.11) montre la caractéristique résultante (I_S, V_S) obtenue par l'association en série (indice s) de N_S cellules identiques (I_{CC}, V_{CO}) [18].

Avec : $I_{SCC}=I_{CC}$: le courant de court-circuit. $V_{SCO} = N_S$ x V_{CO}: la tension de circuit ouvert.

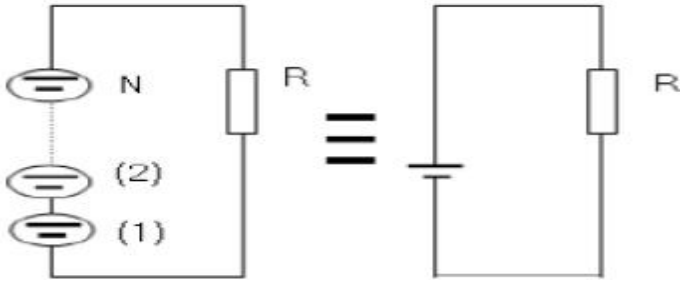


Figure I.11: Association des modules en série.

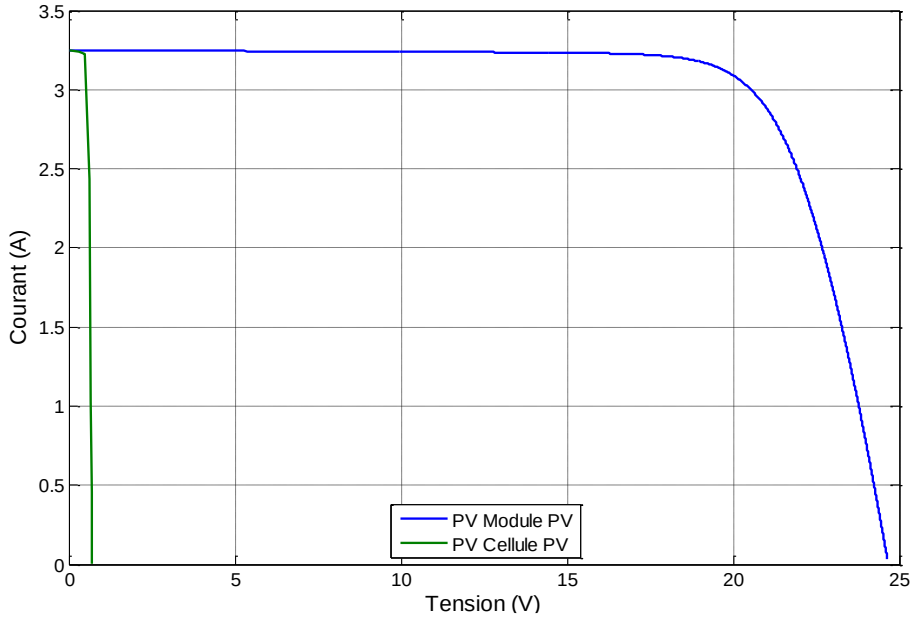


Figure I.12: Caractéristique I-V résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques.

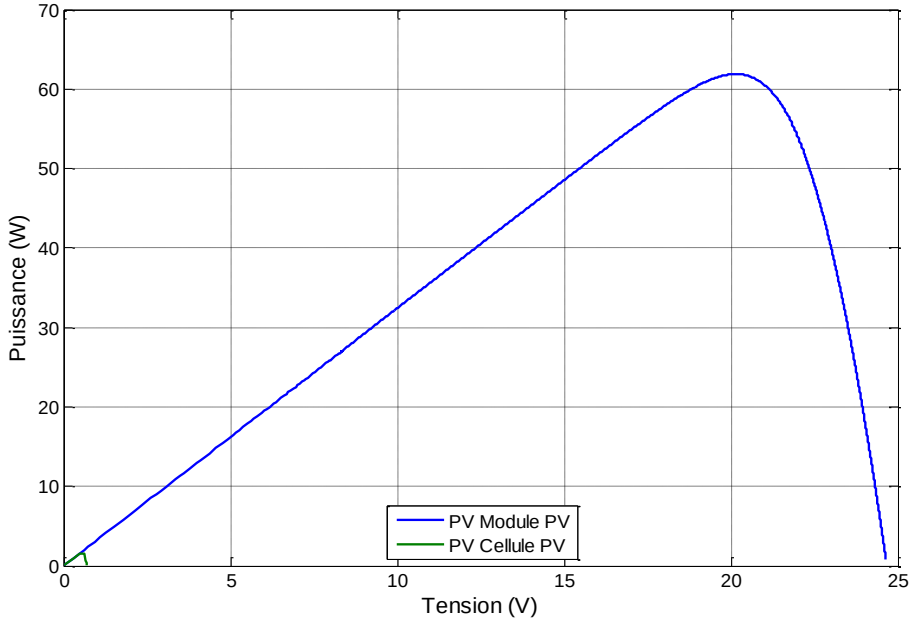


Figure I.13: Caractéristique P-V résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques.

I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la mêmetension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure (I.15) montre la caractéristique résultante (I_{PCC}, V_{PCO}) obtenue en association en parallèle (indice *p*) N_P cellules identiques (I_{CC}, V_{CO}) [17].

$I_{PCC} = N_P$ x I_{CC}: le courant de court-circuit. $V_{PCO} = V_{CO}$: la tension de circuit ouvert.

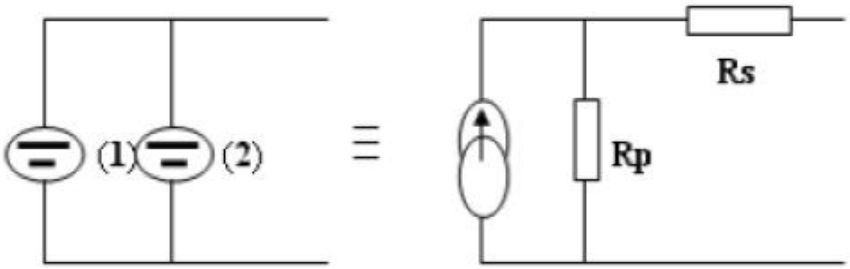


Figure I.14: Association des modules en parallèle.

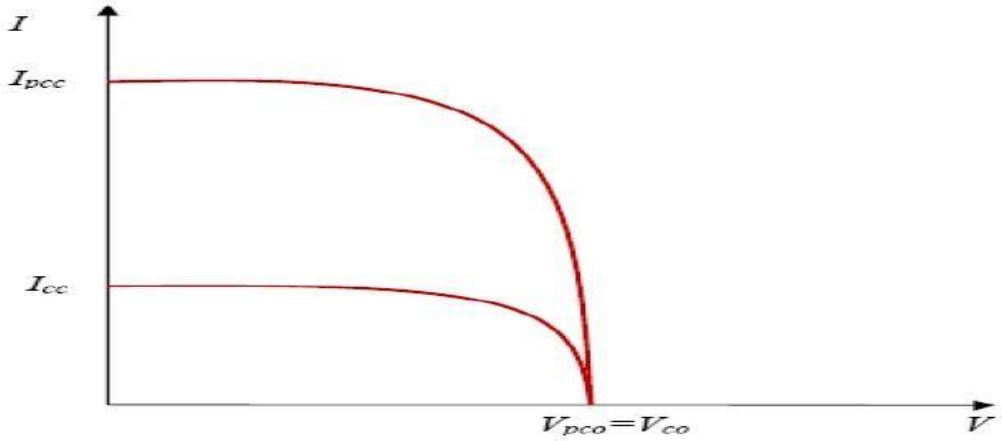


Figure I.15: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des cellules identiques.

I.6.3. Regroupement des cellules (séries et parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques [17]. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport ns parallèlement à l'axe des tensions et de rapport N_p parallèlement à l'axe des courants, N_s et N_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

I_{GCC}= N_P x I_{CC}: courant de court-circuit du module résultant. $V_{GCO} = N_s$ x V_{CO}: tension du circuit ouvert du module résultant.

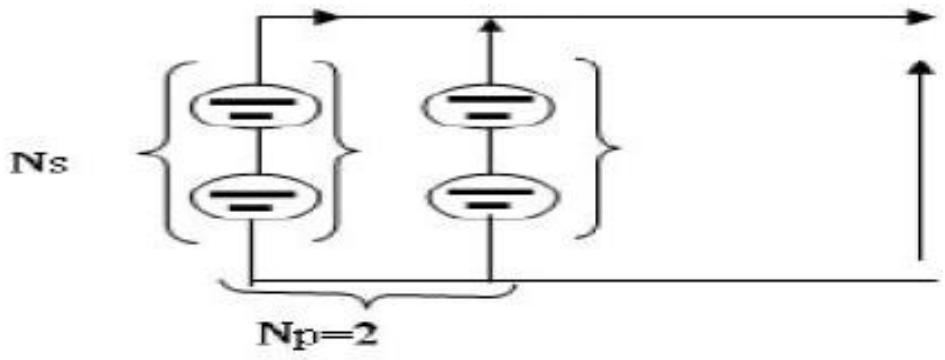


Figure I.16 : Association mixte des modules.

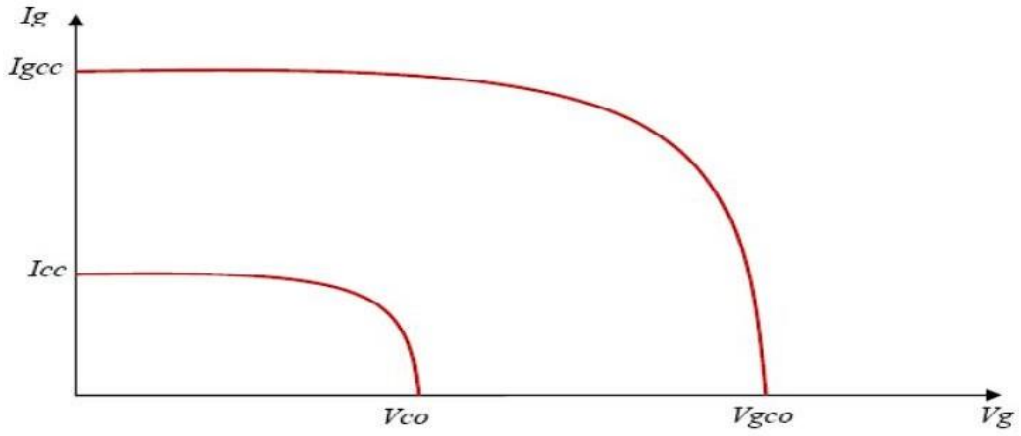


Figure I.17: Caractéristique résultante d'un groupement mixte.

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série**)** ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

I.7. Protection classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter la durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de

la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

La Figure (I.17) illustre ces deux protections.

Nous rappelons dans les paragraphes suivants le fonctionnement de ces deux protections.

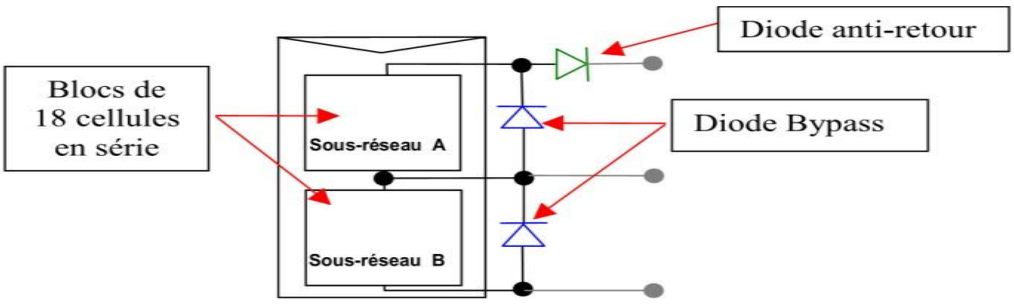


Figure I.18 : disposition des différentes protections voir : la diode by-pass et anti-retour.

I.7.1. Les diodes parallèles (Diode by-pass)

Il est possible, par exemple sous l'effet d'un ombrage ou de la température que toutes les cellules placées en série n'aient pas les mêmes caractéristiques, et les cellules grises (moins ombrées) ne seront pas en mesure de produire autant de courant que les cellules non ombrées, créant ainsi des déséquilibres et des échauffements ou même déformer ou éclater la plaque en verre des panneaux [19].

Par ailleurs, quand un module devient grisé sa diode de dérivation devient «polarisée» et commence à conduire. Tout le courant supérieur au nouveau courant de court-circuit de la cellule ombragée est «court-circuité» par la diode, cela réduit considérablement la quantité de chauffage local à la zone ombrée.

En fin lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode de by-pass pour empêcher le fonctionnement dans la zone II (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci.

Notons que dans les faits, pour des raisons économiques et de simplicité de réalisation, une diode de by-pass est placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module [19].

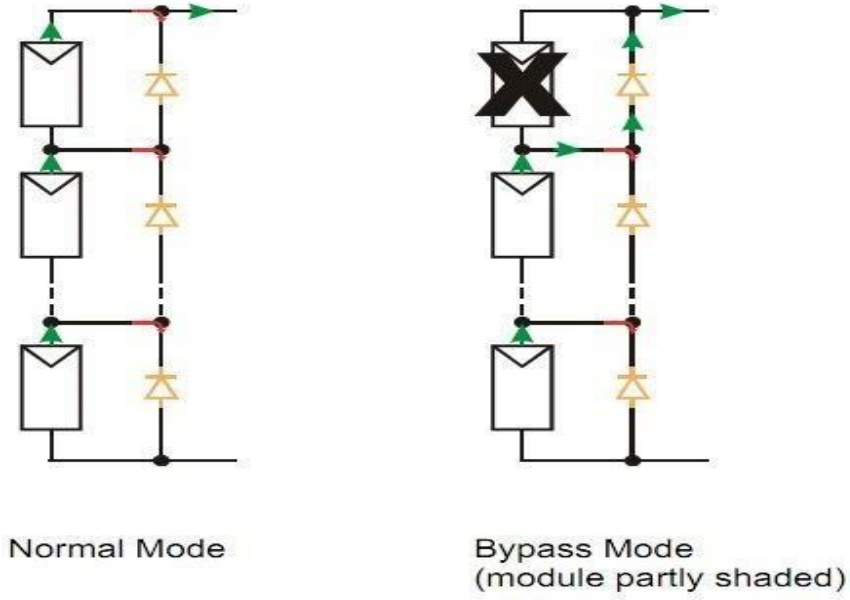


Figure I.19: Illustre le fonctionnement de la diode by-pass.

I.7.2. Les diodes séries (Diode anti-retour)

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge, le risque est que des chaînes de cellules éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la charge ne se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela de diodes anti-retour (de blocage) mises en série avec le GPV comme le montre la Figure (I.18). Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie de stockage ne débite sur le module PV pendant la nuit. La Figure (I.20) montre les caractéristiques I(V) d'une cellule solaire, ensoleillée, puis dans l'obscurité.

Comme nous pouvons le voir, quand la cellule est dans l'obscurité, une batterie pourrait se décharger à travers la cellule si nous ne disposons pas d'une diode de blocage [18].

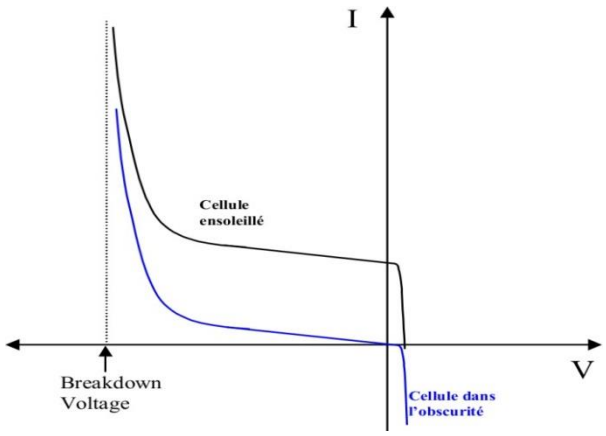


Figure I.20: Caractéristiques I-V d'une cellule solaire ensoleillée et dans l'obscurité.

I.8. Les systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.8.1. Les Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la Figure (I.21) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique. Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sou dans la plupart des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximales la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir)[20].

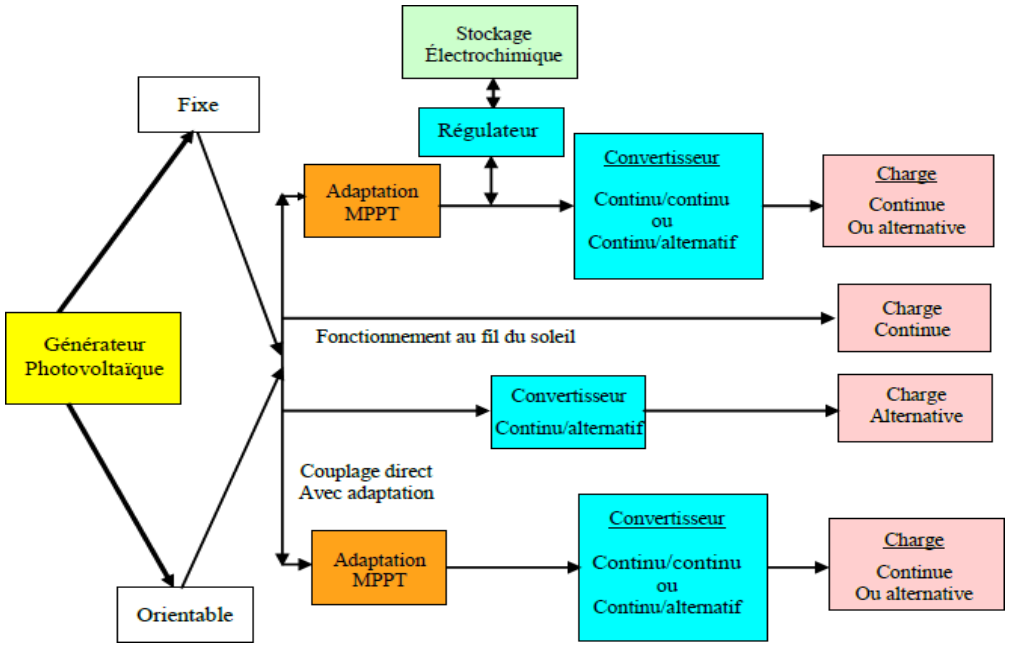


Figure I.21: Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

I.8.2. Les Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif.

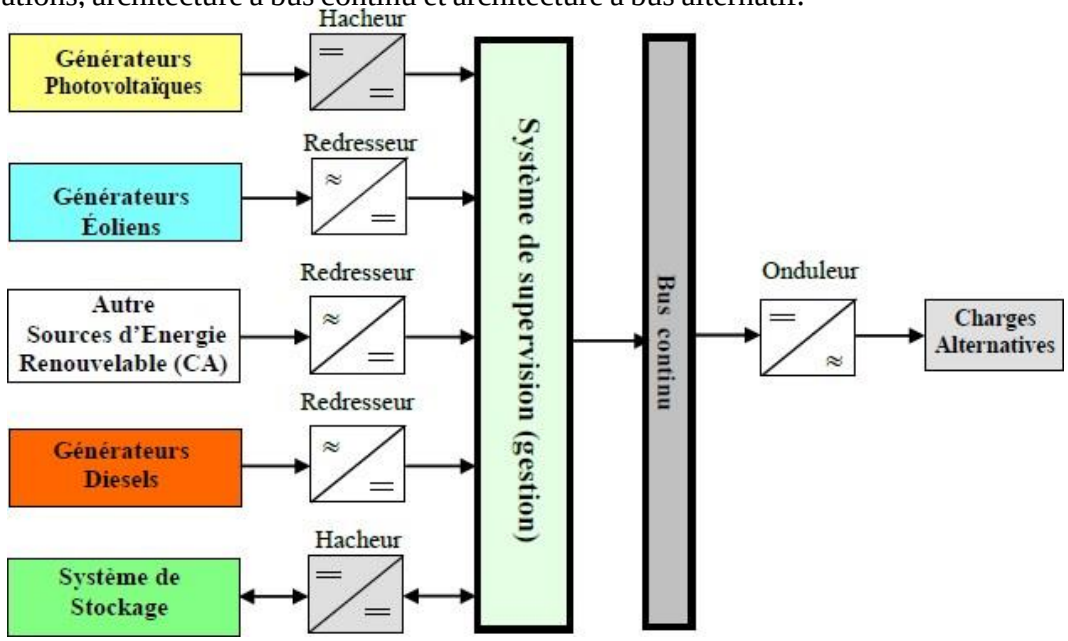


Figure I.22: Configuration du système hybride à bus continu.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative [20].

I.8.3. Les Systèmes PV raccordée au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (Figure I.23) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produitsa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau[20].

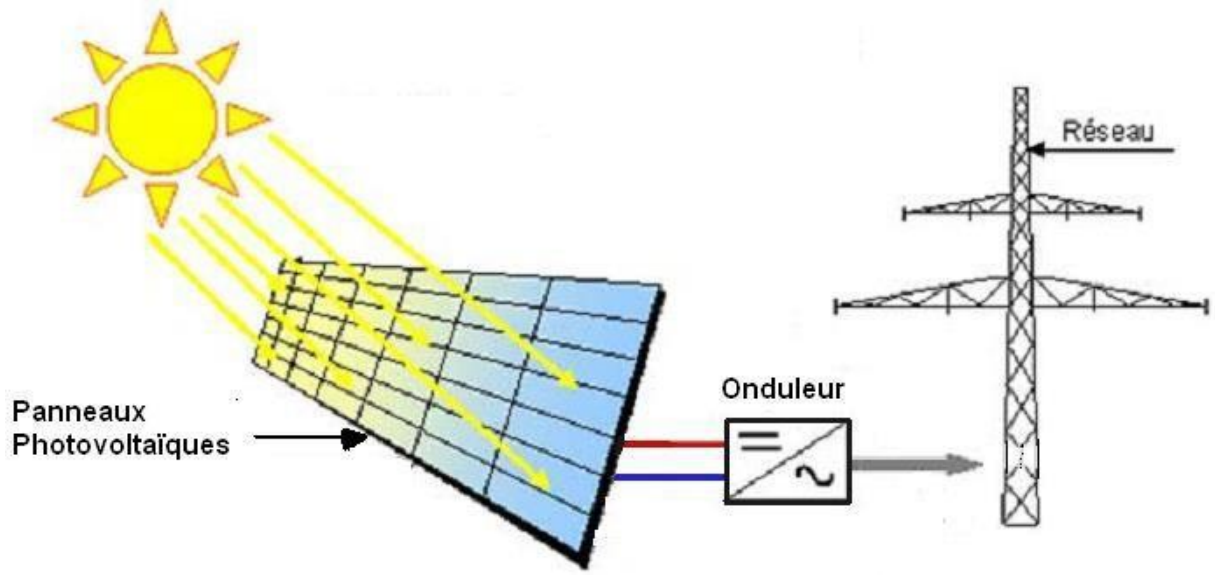


Figure I.23: Système connecté au réseau.

I.9. Classification des Centrales Photovoltaïques Connectés au Réseau (CPCR)

Une première classification des CPCR en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante[21] **:**

I.9.1. Centrales de petite taille (P=1 à 10 KW)

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension

I.9.2. Centrales de taille moyenne (P=10 à 100 KW)

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

I.9.3. Centrales de grande taille (P > 500 KW)

Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.10.1. Les avantage

- ✓ L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- ✓ L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
- ✓ Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- ✓ Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- ✓ En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.

Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes[22].

I.10.2. Les inconvénients

- ✓ Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- ✓ Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.
- ✓ Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.
- ✓ Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau de SONELGAZ).

Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisés par les panneaux photovoltaïques sont composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement[22].

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par donner une brève description de l'état d'art de la production mondiale d'électricité en général et celle d'origine renouvelable. Après, nous avons présenté le potentiel solaire en Algérie et l'importance du programme ambitieux des énergies renouvelables pour couvrir une partie de la demande nationale en électricité. L'objectif est d'atteindre d'ici 2030 un taux d'intégration supérieur à 40% de la production électrique. Dans la dernière partie; nous avons présenté les classifications des systèmes photovoltaïques. Les modes d'exploitation de ces systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être divisés en deux catégories : autonome et raccordé au réseau. Enfin, on a présenté les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation d’un système photovoltaïque et la commande MPPT

II.1. Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique I(V) entrainent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP.

Ces commandes sont connues sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking), associées à un hacheur DC\DC qui assure le couplage entre le générateur et la charge.

Le but de ce chapitre est de faire l'optimisation de la puissance du système PV, il consiste à l'analyse de la sortie du GPV afin d'extraire le maximum de puissance délivrée quelles que soient les conditions de la température et de l'éclairement.

II.2. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement [23].

II.2.1. Modélisation d'un cellule Photovoltaïque

La caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par Figure (II.1).Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances séries R_s et parallèle R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [24].

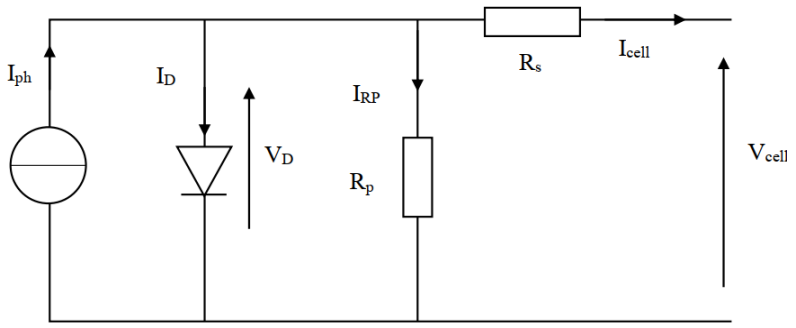


Figure II.1 : Modèle électrique équivalant à la cellule solaire.

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_S représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_P représente le courant de fuite. Une diode D en parallèle qui modélise la jonction PN .Ce circuit peut être utilisée aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [24].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell}=I_{ph}-I_D-I_{Rp} \quad \text{(II.1)}$$

$$I_{Rp}=\frac{V_D}{R_p} \quad \text{(II.2)}$$

$$I_D=I_S(e^{\frac{V_D}{V_{th}}}-1) \quad \text{(II.3)}$$

$$V_D=V_{cell}+R_s I_{cell} \quad \text{(II.4)}$$

Alors :

$$I_{cell}=I_{ph}-I_s\,(e^{(V_{cell}+R_s I_{cell})/V_{th}}-1)-\frac{V_{cell}-R_s I_{cell}}{R_p} \quad \text{(II.5)}$$

I_s : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s=k_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{K_T}} \quad \text{(II.6)}$$

V_{th} est la tension thermique à la température T :

$$V_{th}=\frac{KT}{q} \quad \text{(II.7)}$$

q : charge d'électron (1.602×10^{-19}C) ;

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23}J/k) ;

K_1 : constante (1.2 A/cm^2k^3) ;

T : température effective de la cellule en Kelvin ;

V_g : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV).

Généralement la résistance (R_P) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant I_{RP} [2, 20], Le courant délivré parla cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell}=I_{ph}-I_s\,(e^{(V_{cell}+R_s I_{cell})/V_{th}}-1)-\frac{V_{cell}-R_s I_{cell}}{R_p} \quad \text{(II.8)}$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell}=-R_s I_s+V_{th}\ln(\frac{I_{ph}-I_{cell}+I_s}{I_s}) \quad \text{(II.9)}$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte. En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

Tableau II.1 : Conditions de test.

Conditions de test standard	Conditions nominales
Eclairement G_0=1000W/m^2	Eclairement G_{nom}=800W/m^2
Température de la cellule T_0=25°C	Température ambiante $T_{a,nom}$=20°C

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- le courant de court-circuit $I_{cc,0}$;
- la tension de circuit ouvert $V_{co,0}$;
- la puissance maximale $P_{max,0}$.

Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT : Nominal Operating Cell Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant. Le photo-courant I_{ph} est directement proportionnel à l'éclairement. Si $I_{cc,0}$ est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quel autre valeur de G, est donné par :

$$I_{ph}\big|_{T0} = \frac{I_{sc,0}}{G_0} \cdot G = C_1 G \quad \text{(II.10)}$$

Le photo-courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph}\big|_{T_0} \cdot \left(1 + k_0(T - T_0)\right) \quad \text{(II.11)}$$

D'où,

$$K_0 = \frac{I_{sc}\backslash_{T2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad \text{(II.12)}$$

Avec k_0 est le coefficient de température de I_{ph} (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius), et T_2 = 75°C. La température de fonctionnement de la cellule T_C dépend de l'éclairement G et de la température ambiante T_a, selon l'équation empirique suivante :

$$T^C = T_a + C_2 G \tag{II.13}$$

Avec,

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \tag{II.14}$$

Si la température T_{NOCT} n'est pas connue, la constante C_2 est approximée par 0.03°Cm^2/W. (en pratique C_2 varie entre 0.01 et 0.03°Cm^2/W).

La tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{oc} = V_{oc,0} + C_3(T^C - T_0) \tag{II.15}$$

Où, C_3 = -2.3 mV/°C.

Le courant de saturation I_s de la diode pour la température T_0, est donné par :

$$I_{s,0} = \frac{I_{sc,0}}{\left(e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{h,0}}} - 1\right)} \tag{II.16}$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{s,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-\frac{qV_g}{nk}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \tag{II.17}$$

La résistance série R_s a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert V_{oc}. La valeur de R_s est alors donnée en évaluant la pente dV/dI de la courbe I-V pour $V = V_{oc}$. L'expression de R_s est donnée en dérivant I et en réarrangeant en fonction de R_s :

$$I = I_{ph} - I_s\left(e^{(V + R_s I)V_{th}} - 1\right) \tag{II.18}$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}}(dV + R_s dI) \cdot e^{(V + R_s I)/Vth} \tag{II.19}$$

$$R_s = -\left.\frac{dV}{dI}\right|_{V_{oc,0}} - \frac{1}{X_V} \tag{II.20}$$

$$X_V = \frac{I_{s,0}}{V_{th,0}} \cdot e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{h,0}}} \tag{II.21}$$

La résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_s|_{T_0}\left(1 + k_3(T - T_0)\right) \tag{II.22}$$

Avec k_3 coefficient de température de la résistance série.

II.2.2. Caractéristique d'une cellule Photovoltaïque

En prend par exemple une cellule de module KC-60. Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (W/m²) et 25°C.

Tableau II.2 : Caractéristiques du module KC-60 [25].

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension à circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
60W	3.37A	20V	3.55A	16.9V

Les Figures (II.2) représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température de 25°C.

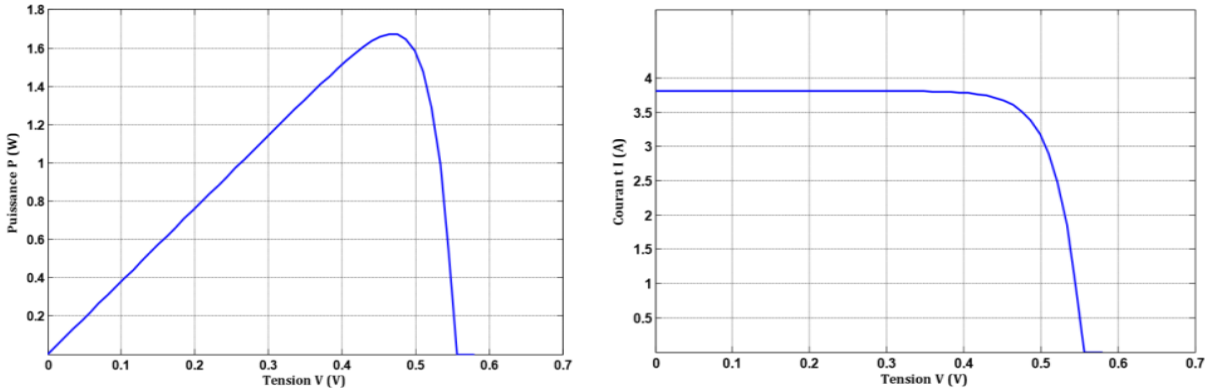


Figure II.2 : caractéristique (P-V) et (I-V) d'une cellule PV.

II.2.3. Modélisation d'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s(e^{\frac{V_{cell}+R_S I_{cell}}{V_{th}}} - 1) \qquad \text{(II.8)}$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres, I_{ph} et I_s en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de I_{CC} , V_{CO} et P_{max} qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [24]:

- le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux ;
- $e^{(V+\frac{IR_S}{V_{th}})} \gg 1$ pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (II.23) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{\frac{V_{cell}+R_S I_{cell}}{V_{th}}} \quad \text{(II.23)}$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln(\frac{I_{sc}}{I_s}) \quad \text{(II.24)}$$

D'où,

$$I_s = I_{sc} e^{-\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad \text{(II.25)}$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc}(1 - e^{\frac{V-V_{oc}+IR_S}{V_{th}}}) \quad \text{(II.26)}$$

Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

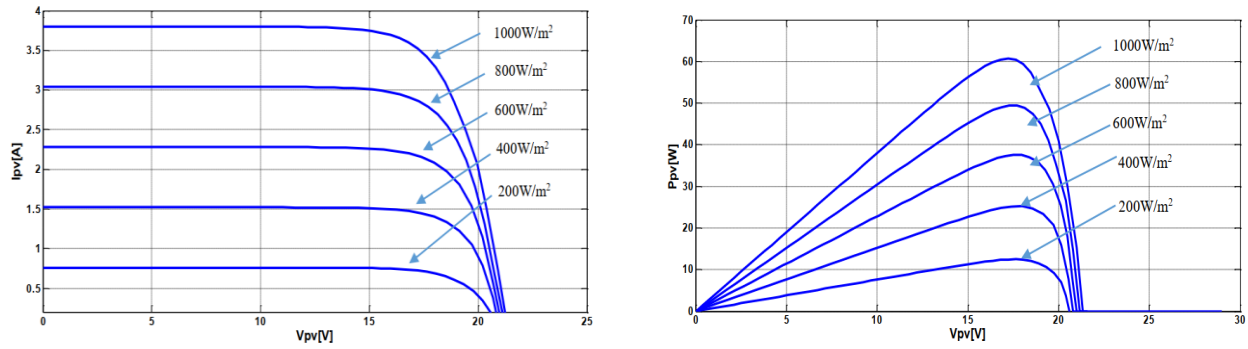
Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent N_P branches en parallèle, chacune avec N_S cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant I_P, généré par le module PV sera exprimé par:

$$I^p = N_p I_{sc}(1 - e^{(V^p - N_S V_{os} \frac{N_s}{N_p} R_s I^p / V_{th})}) \quad \text{(II.27)}$$

II.2.4. Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV

II.2.4.1. Influence De L'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{CCM} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{COM} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures



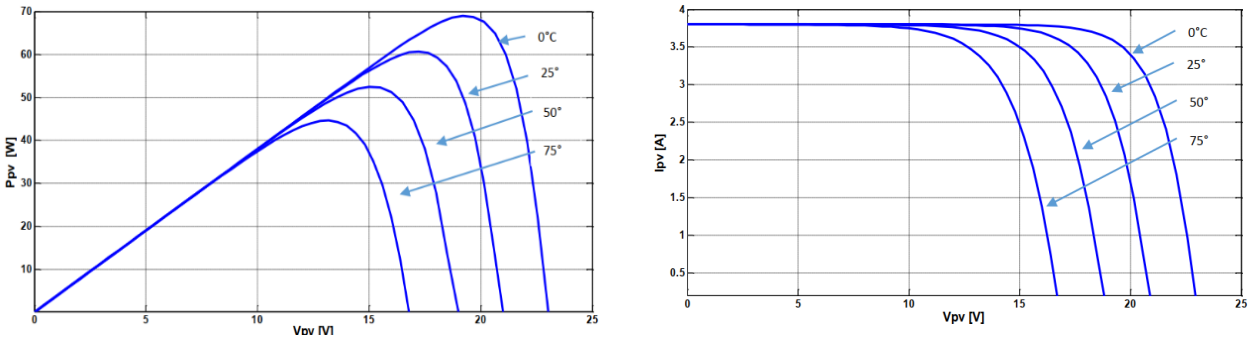
(a) (b)

Figure II.3 : Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, il est clair que la valeur du courant de court circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [26].

II.2.4.2.Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°Cà 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer que l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV. Les figures suivantes représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour un rayonnement constant et différentes températures.



(a) (b)

Figure II.4 : Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible [26].

II.3. Modélisation du convertisseur statique DC/DC

II.3.1. Définition

Le hacheur, ou convertisseur continu-continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandent, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Durant ces dernières années, la technologie des convertisseurs de puissance a connues un développement fabuleux grâce au développent des technologies des semi- conducteurs et des techniques numériques. Le développent est assuré que ce soit sur le volet architecture que la capacité de conversion. Le développent dans le domaine énergétique a poussé l'intégration de ces derniers dans les réseaux de transport d'énergie. Nous présentons dans ce qui suit des généralités sur les hacheurs et plus particulièrement le hacheur boos t, qui est souvent utilise dans le domaine de photovoltaïque pour charger pour augmenter la tension délivrée par des panneaux [27].Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les suivants*(DC-DC)* .On va présenter dans ce qui suit le principe des trois types de convertisseurs *DC/DC* (Buck, Boost et Buck photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités).

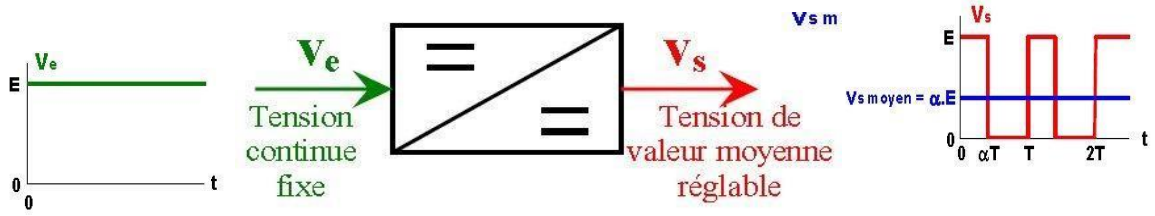


Figure II.5 : Convertisseur continu/continu (hacheur) [28].

II.3.2. Hacheur dévolteur (Buck)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [29].

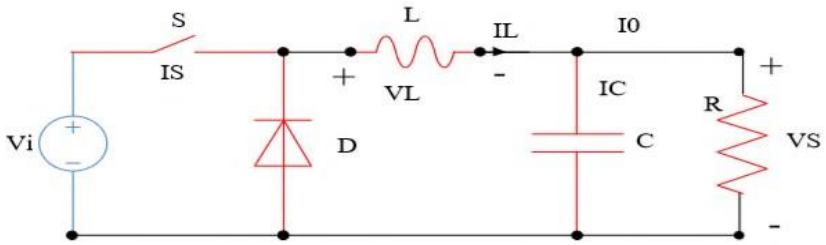


Figure II.6 : Schéma du hacheur Buck.

L'équation caractéristique du courant de l'inductance est :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{Vi - Vs}{L} \tag{II.28}$$

Où, L représente l'inductance [H].

Le processus de commutation décrit par la position de l'interrupteur, dans le premier laps de temps ($D.T$), l'inductance se décharge. Dans le deuxième laps de temps (D-1)T, l'inductance libère avec une diminution de courant I_L.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{Vi}{L} \tag{II.29}$$

Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par les Figures suivantes :

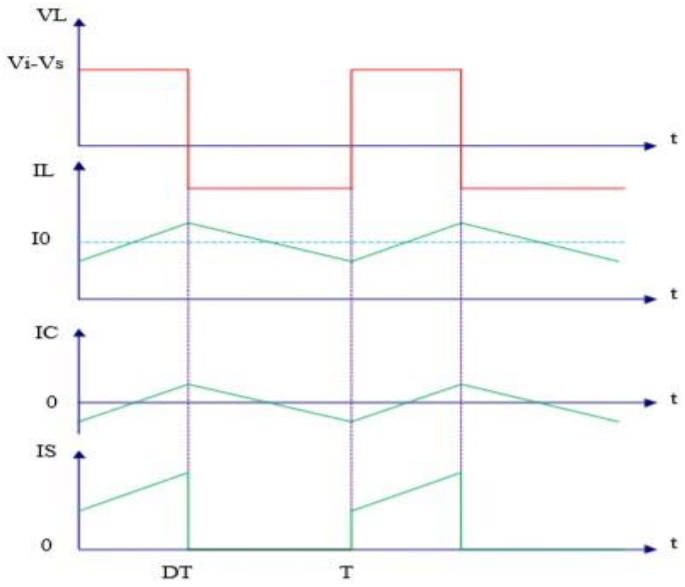


Figure II.7 : Caractéristique du tension-courant.

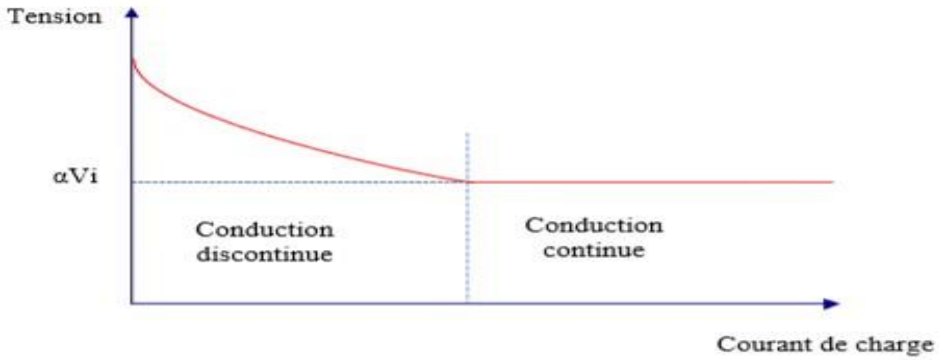


Figure II.8 : Variation de V de charge avec I de charge pour le convertisseur Buck.

II.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue de plus faible en une plus grande. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de bornes reliées au zéro, compliquant ainsi sa commande.

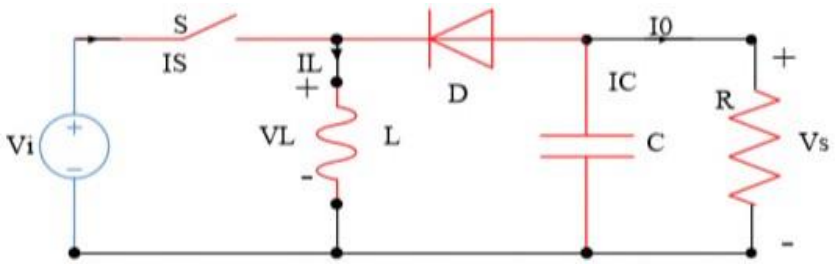


Figure II.9 : Circuit d'un convertisseur Buck-BOOST.

Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$Vs = \frac{D}{1-D} V_t \quad \text{(II.30)}$$

Les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la Figure (II-10).

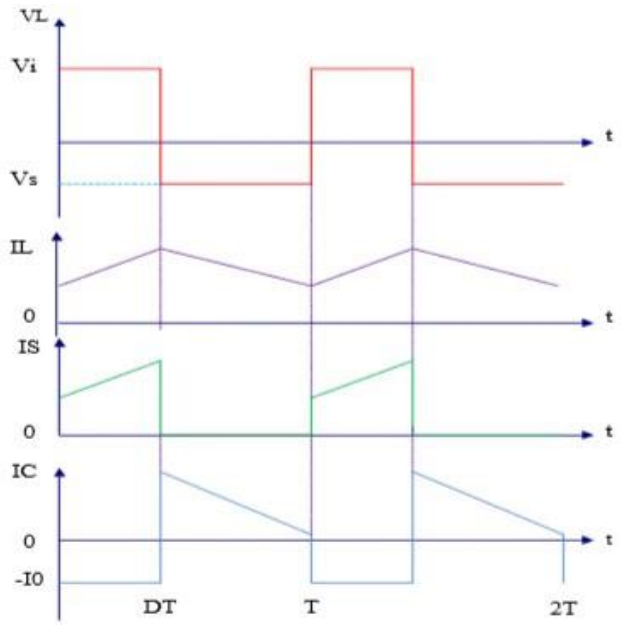


Figure II.10 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck-Boost.

II.3.4. Hacheur survolteur (Boost)

Un Hacheur série est un convertisseur continu-continu ou DC/DC [30] qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [31]. Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue on peut utiliser le hacheur parallèle de type Boost, appelé également hacheur survolteur [30].

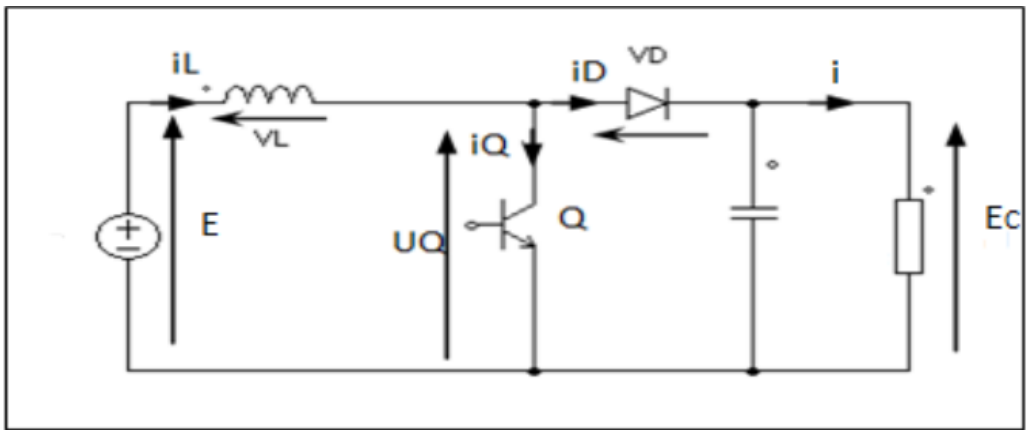


Figure II.11 : Schéma d'un hacheur Boost.

Il est considéré comme une liaison directe entre une source de courant continu et un récepteur de tension continue. Le récepteur proprement dit, constitué par la résistance *R* et le condensateur de filtrage *C* monté en parallèle à ses bornes, a le comportement de source de

tension exigé par le convertisseur. Par contre, il faut placer une bobine d'inductance *L* en série avec l'alimentation de tension *E* pour la transformer en une source de courant DC [32].

II.3.4.1. Etude et principe de fonctionnement

Nous allons diviser en deux phases distinctes le fonctionnement du hacheur Boost selon l'état de l'interrupteur *Q* de 0 à αT : phase d'accumulation d'énergie. L'interrupteur *Q* est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode *D* est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

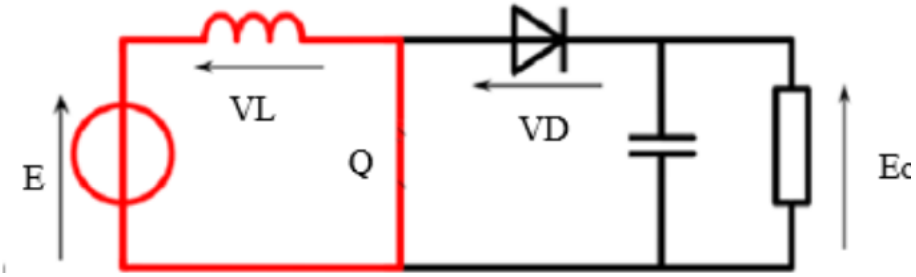


Figure II.12 : Interrupteur *Q* passant [30].

De αT à *T* : L'interrupteur *Q* est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode *D*, le condensateur *C* et la charge *R*. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie .

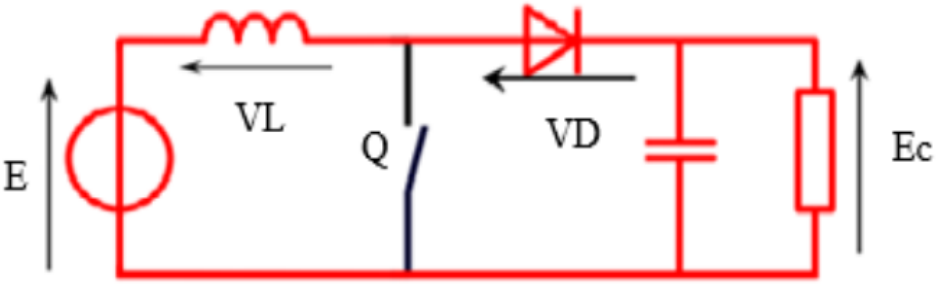


Figure II.13: Interrupteur *Q* ouvert [30].

II.3.4.2. Analyse du fonctionnement

- **Première séquence de conduction [0 à αT] :**

Pendant cette phase, L'interrupteur Q est fermé et la diode D bloquée. Par conséquent :

$$U_Q = 0\ , V_D = -E_C\ ,\ i_D = 0\ , i_Q = i_L\ ,\ V_L = E \qquad \text{(II.31)}$$

On a E≫ $Ri_L(t)$, donc, l'intensité du courant dans l'inductance $i_L(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$$E = L\frac{diL(t)}{dt} \quad \text{(II.32)}$$

Soit :

$$i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_{LMIN} \quad \text{(II.33)}$$

- **Deuxième séquence de conduction [αT à T] :**

Pendant cette phase, la diode *D* est fermée et l'interrupteur *Q* bloquée. Par conséquent :

$$U_Q = E_C \text{ , } V_D = 0 \text{ , } i_D = I_L \text{ , } i_Q = 0 \text{ , } V_L = E\text{-}E_c \quad \text{(II.34)}$$

L'intensité du courant dans l'inductance $i_L(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$$E = E_C\, L\frac{diL(t)}{dt} \quad \text{(II.35)}$$

Soit :

$$i_L(t) = \frac{E-E_C}{L}(t\text{-}\alpha T) + I_{LMAX} \quad \text{(II.36)}$$

Calcul de la valeur moyenne :

La tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle, donc :

$$V_L = \frac{1}{T}\int_0^T U_L(t)\,dt = 0 \quad \text{(II.37)}$$

$$E_C = \frac{E}{1-\alpha} \quad \text{(II.38)}$$

La valeur moyenne du courant de sortie est donnée par :

$$i = (1 - a).i_L \quad \text{(II.39)}$$

Le hacheur parallèle (survolteur) est équivalent à courant continu élévateur de tension et abaisseur de courant Par ailleurs ; si on néglige les pertes dès l'inductance, on peut écrire que les puissances d'entrées et de sorties sont égales soit [33] :

$$E.i_{smoy} = E_{cmoy} \,.\, i_{cmoy} \quad \text{(II.40)}$$

Ondulation du courant dans l'inductance :

On a :

$$I_{LMAX}=\frac{E}{L}\alpha T+I_{LMIN} \quad \text{(II.41)}$$

Donc :

$$\Delta i_L = I_{LMAX}\text{-}I_{LMIN} = \frac{E}{L}\alpha T = \frac{E}{Lf}\alpha \quad \text{(II.42)}$$

II.3.4.2. Avantage de convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT), grâce à ces avantages :

- ✓ Le convertisseur Boost fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir de générateur photovoltaïque.
- ✓ Ce convertisseur a l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance *L*.
- ✓ Il peut fonctionner même avec une tension d'entrée fiable, ceci permet de récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclairement. Aussi le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension de sortie plus élevée, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie[34].

II.4. La commande (MPPT)

De nombreuses recherches sur les commandes MPPT ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrémales présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du PPM. Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie.

II.4.1.Définition

C'est un montage électronique au niveau du régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque.

Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% :

pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [35].

Les cellules PV utilisent pour fournir de l'énergie dans le but d'obtenir la puissance maximale du panneau.

Un serveur MPPT est utilisé pour la commande du hacheur. Cette technique a été développée depuis 1968 et il a eu un rôle essentiel pour le fonctionnement du panneau.

Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique *D* automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau, ainsi quels que soient les conditions météorologiques *T* et *G*, la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum (V_{mpp}, I_{mpp}) [35].

II.4.2. Principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. La plupart de ces commandes rencontrées dans la littérature adoptent comme fonctionnement celui décrit dans la Figure (II.14).

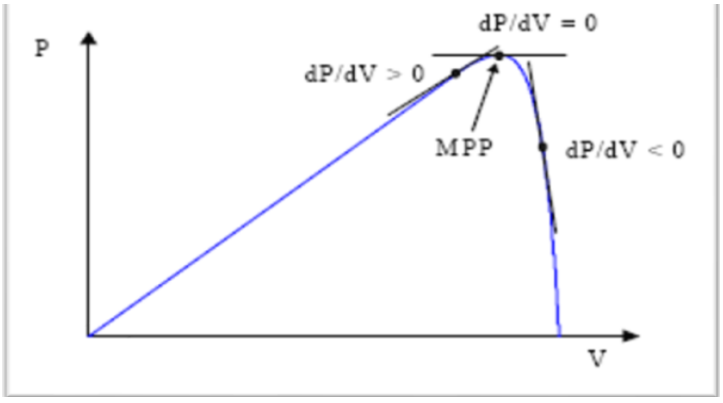


Figure II.14 : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

(Source : *Energy storage for sustainable microgrid*, 2015. David Wenzhong Gao.)

Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant VPV, lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV}, lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est négatif. Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge [33].

II.4.3. Différentes techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT

Il existe plusieurs méthodes de recherche de point de puissance maximal MPPT on site :

- Méthode de perturbation et observation (P&O) ;
- Méthode de conductance Incrémentale (IncCond) ;
- Méthode de logique floue (FL) ;
- Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).

II.4.4. Méthode de Perturbation et d'Observation (P&O) [36, 37]

II.4.4.1. Définition

La méthode P&O est une approche largement répandue dans les MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement la mesure de V_{PV} et I_{PV}. Cette méthode peut dépister le point de puissance maximum tout à fait exactement malgré les variations d'éclairement et de température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O utilise la perturbation de la tension V_{PV} et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque. La Figure (II.14) est un organigramme de l'algorithme P&O.À chaque cycle, V_{PV} et I_{PV} sont mesurés pour calculer P_{PV} *(k)*. Cette valeur *de* P_{PV} *(k)* est comparée à la valeur P_{PV} *(k-1)* calculée au cycle précédent. Si la puissance obtenue a augmenté, V_{PV} est ajusté plus loin dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance obtenue a diminué, V_{PV} est ajustée dans la direction opposée comme dans le cycle précédent. V_{PV} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximum est atteint, V_{PV} oscille autour de la valeur optimale $V_{PV,mpp}$. Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec la taille du pas de la perturbation. Si ce pas est grand, l'algorithme de MPPT répond rapidement aux changements soudains de la condition de fonctionnement. D'autre part, si le pas est petit les pertes de puissance diminuent selon les conditions climatiques changeantes. Le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'irradiance.

II.4.4.2. Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cet Algorithme utilisée comme entrée les valeurs de tension V_{pv} et de courant I_{pv}, et comme sortie la valeur de rapport cyclique α [38]. Le principe de cet algorithme (Comme son nom l'indique) et comme représente la Figure (II-2) est d'effectuer une perturbation sur la tension V_{pv}

tout en agissant sur le rapport cyclique α puis suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau P(k) et la compare à la précédente *P* (*k*-1) [39] : Si la puissance augmente, on s'approche du (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. Comme illustre la Figure (II-14) [40].

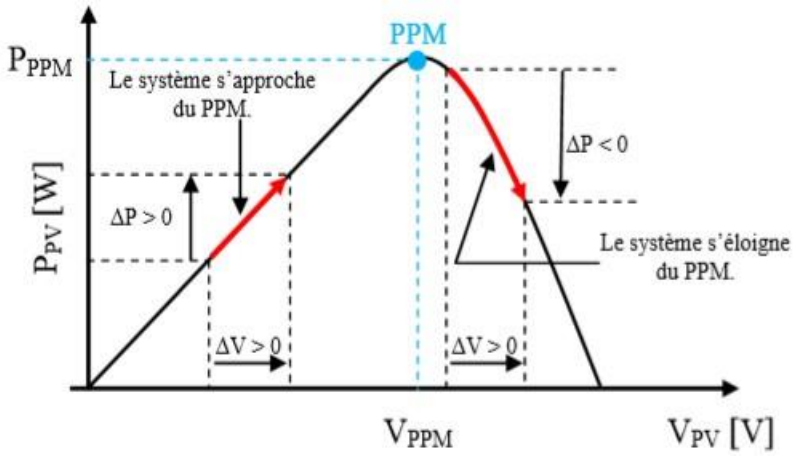


Figure II.15 : Organigramme de l'algorithme P&O.

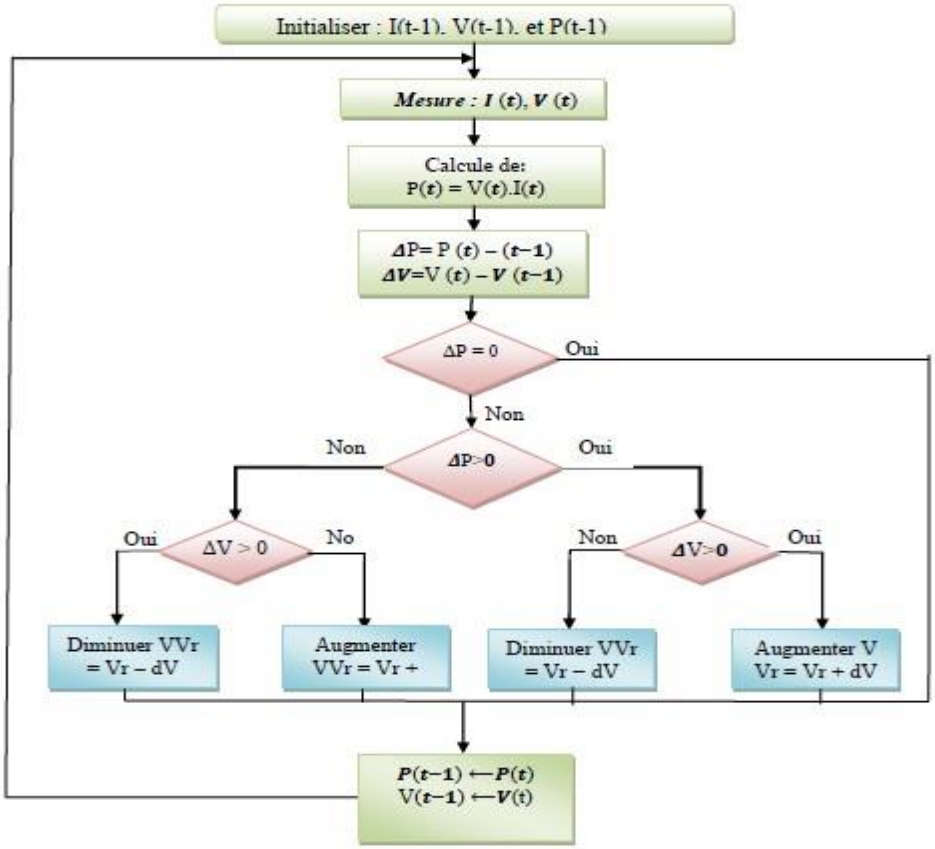


Figure II.16 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer.

II.4.5. Méthode de réseau de neurone artificiel (ANN)

II.4.5.1. Définition

Un réseau de neurone artificiel est une inspiration de neurones biologiques. C'est Une structure composée de neurones interconnectés, capables d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement [41]. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre d'entrée des neurones amont, à chacune de ces entrées est associée un poids qui définit la force de cette interconnexion. De plus, chaque neurone à une sortie unique qui se ramifie pour alimenter un nombre de neurones avals [42].

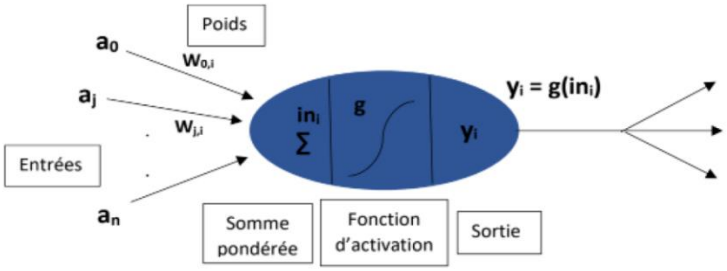


Figure II.17: Forme d'un neurone artificiel

(Source : *In Renewable and Sustainable Energy Conference*, 2015. IEEE.)

Parfois, on peut trouver un biais (seuil), il s'agit d'une entrée à valeur fixe ±1 (fixé par l'utilisateur) qui agit indirectement sur la sortie en élevant ou minimisant la somme pondérée. En gros il faut fixer une constante et laisser notre réseau neuronal décider le poids avec lequel ce terme constant devrait être multiplié par pour obtenir la fonction désirée.

En effet, un réseau de neurone typique consiste en une couche d'entrée, une ou des couche(s) cachée(s) et une couche de sortie, tous interconnectés avec des interconnexions pondérées. En raison de ces interconnexions, le réseau neuronal peut se modifier lui-même, ce qui permet l'apprentissage et la résolution de problèmes sans algorithme, donc sans programmation classique [41].

II.4.5.2. Base biologique

Un neurone est une cellule particulièrement complexe spécialisée dans le traitement de signaux électriques. Son rôle est de recevoir, stocker et transmettre des informations, figure

(II.17). Le neurone peut être décomposé en trois régions principales : le corps cellulaire les dendrites et l'axone [43].

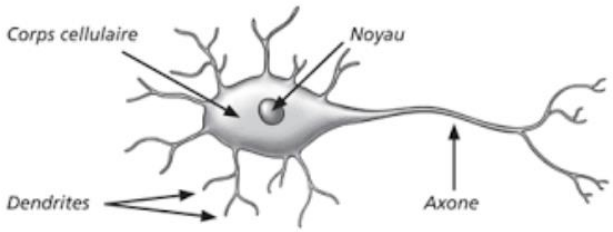


Figure II.18: Neurone biologique.

II.4.5.3. Modélisation mathématique du neurone biologique

A. Le neurone artificiel

Le modèle mathématique du neurone artificiel est présenté dans la figure (II.18). Un neurone est essentiellement un intégrateur qui effectue une somme pondérée de ses entrées. Le résultat n de cette somme est ensuite transformé par la fonction de transfert f, qui produit la sortie du neurone D. L'entrée R du neurone correspond au vecteur P = [p_1 p_2 ... p_R], tandis que W = [$W_{1,1}$ $W_{1,2}$ …$W_{1,R}$] représente un vecteur de poids du neurone. La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante [42, 44] :

$$n = \sum_{j=1}^{R} W1,j.p - b \quad \text{(II.43)}$$

$$n = W_{1,1}.p_1 + W_{1,2}.p_2 + \ldots\ldots + W_{1,R}.P_R\text{-}b \quad \text{(II.44)}$$

$$D = f(n) = f(\sum_{i=1}^{R} W_{i,j}.p_i - b) \quad \text{(II.45)}$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = W^T.P - b \quad \text{(II.46)}$$

$$D = f(n) = f(W^T.P - b) \quad \text{(II.47)}$$

$$W = \begin{bmatrix} W1,1 & W1,R \\ Ws,1 & Ws,R \end{bmatrix} \quad \text{(II.48)}$$

$$P = [p_1\ p_2\ \ldots\ p_R] \quad \text{(II.49)}$$

Où, p : dimension matricielle est $R\times1$, W : dimension $S \times R$.

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais b du neurone. Le résultat n de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais b s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau

d'activation atteint ou dépasse le seuil *b*, alors l'argument de f devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif [42, 44].

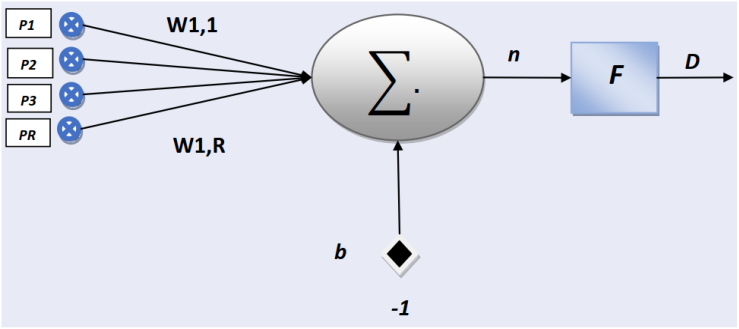


Figure II.19: Modèle d'un neurone artificiel.

Où, *S* : le nombre de neurones d'une même couche ;

i : le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche ;

j : le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée.

B. Principes d'un neurone artificiel

- pas de notion temporelle ;
- coefficient synaptique : coefficient réel ;
- sommation des signaux arrivant au neurone ;
- sortie obtenue après l'application d'une fonction de transfert.

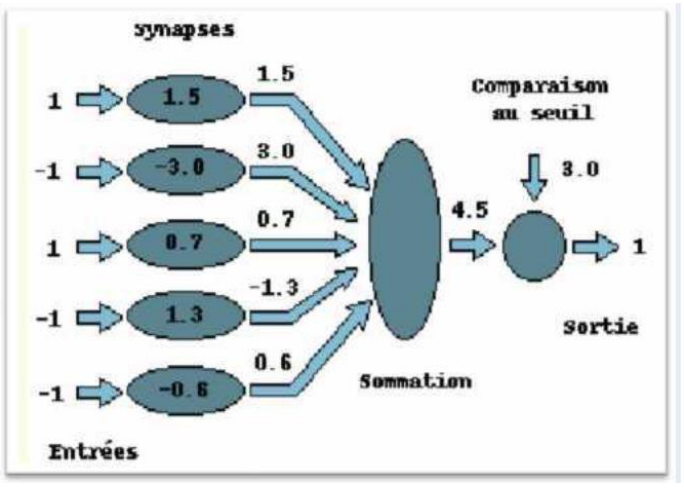


Figure II.20 : principes d'un neurone artificiel [45].

Il y a une analogie évidente (Tableau II.3) avec les neurones biologiques :

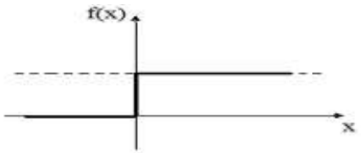
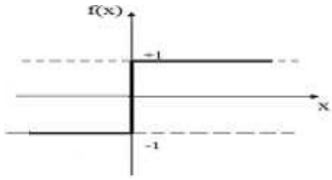
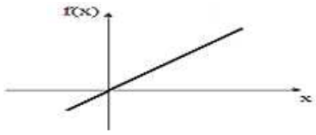
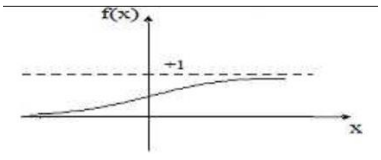
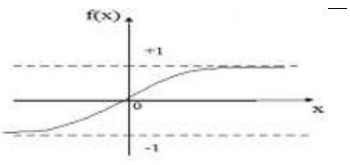
Tableau II.3 : L'analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels.

Neurones biologiques	Neurones artificiels
Synapses	Connections pondérées
Axons	Sorties
Dendrites	Entrées
Sommateur	Fonction d'activation

C. Fonctions d'activations

La fonction d'activation définit l'état du neurone en fonction de son entrée totale. Elle présente la relation qui lie l'ensemble des potentiels d'activation et décision duneurone. Le tableau (II.4) donne quelques fonctions d'activations les plus utilisées [46] :

Tableau II.4 : Fonctions d'activations.

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	L'allure
Seuil	$F(x)\begin{cases}0\ si\ x<0\\1\ si\ x\geq 0\end{cases}$	
Seuil symétrique	$\mathrm{F(x)}\begin{cases}-1\ si\ x<0\\1\ si\ x\geq 0\end{cases}$	
Linéaire	$f(x)=x$	
Sigmoïde	$f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}$	
Tangente hyperbolique	$F(x)=\frac{e^{1}-e^{-i\omega t}}{e^{1}+e^{-i\omega t}}$	

II.4.5.4. Réseaux neuronaux artificiels dans les algorithmes MPPT pour l'optimisation des systèmes d'énergie photovoltaïque

A. Instruction

L'utilisation de systèmes photovoltaïques pour produire de l'énergie électrique propre a augmenté. Cependant, en raison de leur faible rendement, les chercheurs ont cherché des moyens d'augmenter et d'améliorer leur efficacité. Les onduleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) nous permettent de maximiser l'extraction d'autant d'énergie que possible des panneaux PV. Extraction d'autant d'énergie que possible des panneaux PV, et ils nécessitent des algorithmes pour extraire le point de puissance maximale (MPP). Plusieurs algorithmes intelligents montrent des performances acceptables ; Cependant, peu d'entreeux envisagent d'utiliser des réseaux neuronaux artificiels (ANN). Ceux-ci ont l'avantage de donner un suivi rapide et précis du MPP. L'efficacité du contrôleur dépend de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de l'efficacité de l'algorithme. Dans la couche cachée et de la qualité de l'entraînement du réseau neuronal. Les articles publiés au cours des six dernières années ont été étudiés. Une revue des différents articles, rapports et autres documents utilisant les ANN pour le contrôle MPPT est présentée. MPPT est présentée. Les algorithmes sont basés sur ANN ou dans une combinaison hybride avec FL ou un algorithme métaheuristique. Les algorithmes ANN-MPPT offrent une performance moyenne de 98% dans des conditions uniformes. Conditions uniformes, présentent une vitesse de convergence plus rapide et ont moins d'oscillations autour du MPP, selon cette recherche.

B. Bases théoriques

Cette section est divisée en sous-sections. Son but est de présenter une brève introduction au sujet des ANN et des techniques FL et de donner un contexte plus large aux nomenclatures spécifiques pour une meilleure compréhension.

B.1. Système de réseaux neuronaux artificiels

Un réseau neuronal artificiel ou ANN est un système de traitement de données inspiré des neurones biologiques. Neurones biologiques. Il peut être dérivé de l'article de [47]. Ils ont modélisé un neurone simple (voir Figure II.20 en utilisant des circuits électriques en 1943, mais la technologie était limitée à l'époque. ANN a fait des progrès considérables depuis lors. Il possède une capacité exceptionnelle à dériver du sens de données complexes. Il peut également détecter des tendances et des modèles dans des données trop complexes pour être classées par des techniques humaines ou informatiques [48].

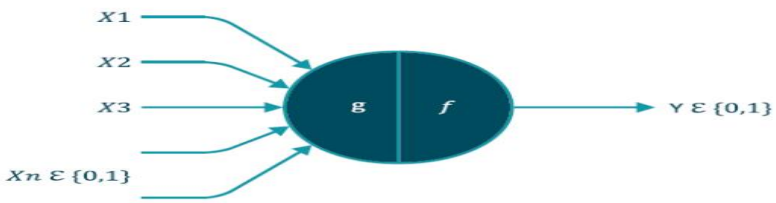


Figure II.21 : Modèle de neurone artificiel.

B.2. Architecture de l'ANN

Le type de connexions, de modèles ou de structures que possède l'ANN est appelé architecture. Pour l'organisation des neurones qui peuvent être regroupés en structures appelées couches. Un ANN est un ensemble de ces couches. On distingue trois couches pour les modèles de base : la couche d'entrée, la ou les couches cachées, et enfin, la couche de sortie. La couche d'entrée est l'endroit où les données sont reçues. Il peut s'agir de capteurs qui captent les signaux de l'environnement. La couche de sortie est la réponse à tous les processus synaptiques au sein du réseau, et peut être un effecteur dans le cas d'un système robotique. La couche cachée est chargée d'effectuer les processus (calculs, corrections) représentant l'environnement à modéliser [49].

II.4.5.5. Réseaux neuronaux artificiels pour le contrôle MPPT dans les systèmes PV

Pour réaliser cette revue, nous avons utilisé des moteurs de recherche académiques tels que « Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Scopus, MDPI, Semantic Scholar » des moteurs de recherche conventionnels tels que Google Scholar ou Microsoft Academic, ou des moteurs inédits tels que « connected papers », en plus des dépôts institutionnels tels que celui de l'Université Autonome de Queretaro UAQ, de l'Université Nationale Autonome du Mexique UNAM et d'autres, pour réaliser une recherche et une analyse exhaustive d'articles de revues scientifiques, de conférences, de livres, de doctorats, MD et de thèses de licence, sur les algorithmes MPPT qui utilisent des ANN et des techniques hybrides, afin de fournir les articles les plus représentatifs dans ce domaine. Les résultats ont été filtrés selon les critères suivants :

- Algorithmes utilisant ANN ;

- Algorithmes utilisant ANN + FL ;

- Algorithmes hybrides (ANN plus algorithmes métaheuristiques ou d'optimisation).

Le contrôle ANN MPPT a fait l'objet de nombreuses recherches dans les systèmes PV. L'ANN peut effectuer le MPPT dans des conditions atmosphériques uniformes et variables. Un

schéma général de son fonctionnement est présenté à la figure (II.22).

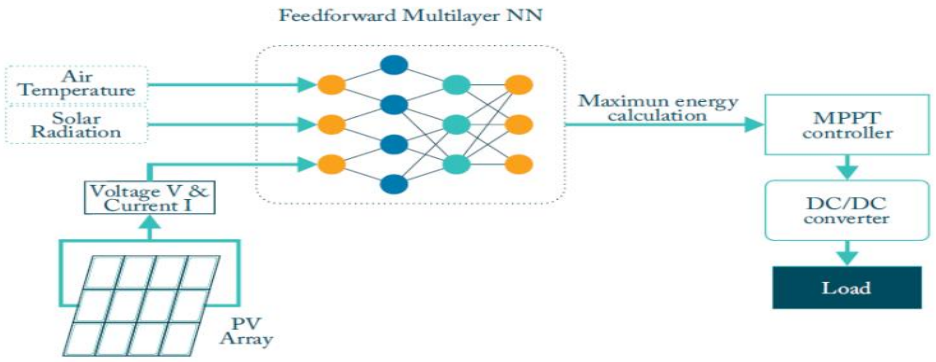


Figure II.22 : Schéma fonctionnel d'un contrôleur MPPT-ANN.

II.5. Identification sélective des harmoniques de références par le référentiel synchrone de Park d-q

II.5.1. Principe de fonctionnement

Le principe d'identification sélectif à base de référentiel synchrone de Park d-q est basé sur la transposition des systèmes triphasés des courants de charge à un axe diphasé tournant d-q tourne par une vitesse angulaire de la fréquence harmonique désirée à filtré [50]. Ainsi, dans l'axe d-q, l'harmonique choisi à identifie devient un signal continu, et les autres harmoniques changent leur fréquences, ils prennent la valeur h =± 6□ . Cette opération permet de séparer cette composante des autres courants par un filtrage simple à réaliser (filtre passe bas de premier ordre) [50].

II.5.2. Identification de l'harmonique 5

Le système triphasé des courants de la charge peut se décomposer en deux sous systèmes directe et inverse [50]. Les harmoniques inverses du courant de charge sont données par la relation h=6n-1 (h=5, 11, 17…etc.). Ils se propagent dans le sens inverse par rapport le fondamentale du courant de charge par une vitesse angulaire $w_h = -hw$=-hw. Cela est régit par l'Equation (II.50).

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = T_{32}^{T} \begin{bmatrix} ich1 \\ ich2 \\ ich3 \end{bmatrix} \quad \text{(II.50)}$$

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch1} \begin{bmatrix} \cos(wt-\alpha_1) \\ \sin(wt-\alpha_1) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch1} \begin{bmatrix} \cos(-5wt-\alpha_5) \\ \sin(-5wt-\alpha_5) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ch1} \begin{bmatrix} \cos(7wt-\alpha_7) \\ \sin(7wt-\alpha_7) \end{bmatrix} + \sum_{\substack{h=\pm 6n \\ n\notin N}}^{n} \sqrt{\frac{3}{2}} I_{chh} \begin{bmatrix} \cos(hwt-\alpha_h) \\ \sin(hwt-\alpha_h) \end{bmatrix} \quad \text{(II.51)}$$

La première partie représente les courants fondamentaux et la seconde représente la somme des distorsions harmoniques. Ces courants peuvent s'écrire dans l'espace à l'aide de la transformée

de Concordia exprimée par la matrice. En appliquant une transformation de Park avec un angle de ($\theta 5 = -5wt$), les courants s'écrivent dans l'espace d-q comme indiqués ci-dessous.

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = p\,(-5wt) \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} \tag{II.52}$$

$$P\,(-5wt) = \begin{bmatrix} cos(-5wt) & -sin(-5wt) \\ sin(-5wt) & cos(-5wt) \end{bmatrix} \tag{II.53}$$

$$\begin{bmatrix} id5 \\ iq5 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} Ich1 \begin{bmatrix} \cos(6wt - \alpha 1) \\ \sin(6wt - \alpha 1) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} Ich5 \begin{bmatrix} \cos(-\alpha 5) \\ \sin(-\alpha 5) \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} Ich5 \begin{bmatrix} \cos(-\alpha 7) \\ \sin(-7) \end{bmatrix} + \cdots +$$
$$\sum_{\substack{h=1\pm 6n \\ n \notin N}}^{n} \sqrt{\frac{3}{2}} Ichn \begin{bmatrix} \cos\big((hw + 5w)t - \alpha h\big) \\ \sin((hw + 5w)t - \alpha h) \end{bmatrix} \tag{II.54}$$

Chacune de ces courants peuvent être séparé en deux parties, une composante alternative ainsi qu'une composante continue soit respectivement Equations (II.55) et (II.56):

$$\begin{bmatrix} \iota_{d5} \\ \iota_{q5} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} Ich5 \begin{bmatrix} \cos(-\alpha 5) \\ \sin(-\alpha 5) \end{bmatrix} \tag{II.55}$$

$$\begin{bmatrix} \iota_{d5} \\ \iota_{q5} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} Ich1 \begin{bmatrix} \cos(6wt - \alpha_1) \\ \sin(6wt - \alpha_1) \end{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} Ich7 \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_5) \\ \sin(-\alpha_5) \end{bmatrix} +$$
$$\ldots \sum_{\substack{h=1\pm 6n \\ n \notin N}}^{n} \sqrt{\frac{3}{2}} Ichn \begin{bmatrix} \cos\big((hw + 5w)t - \alpha h\big) \\ \sin((hw + 5w)t - \alpha h) \end{bmatrix} \tag{II.56}$$

Donc on peut simplifier l'Equation (III.56) comme suite:

$$\begin{bmatrix} \iota_{d5} \\ \iota_{q5} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}}\, \mathrm{I}_{\mathrm{ch5}} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_5) \\ -\sin(\alpha_5) \end{bmatrix} \tag{II.57}$$

Le calcul des courants de références se fait en convertissant les courants données par l'Equation (II.58) dans l'espace des courant triphasé en appliquant successivement les transformations inverses de Park et de Concordia avec les matrices T_{32} et p = - (5wt).

$$\begin{bmatrix} i_{ref5_1} \\ i_{ref5_2} \\ i_{ref5_3} \end{bmatrix} = T_{32} p(-5wt) \begin{bmatrix} \iota_{d5} \\ \iota_{q5} \end{bmatrix} \tag{II.58}$$

L'identification de l'harmonique d'ordre 7 se fait par la même manière et le résultat final donné par de référentiel synchrone et Park *d-q*. *r* l'Equation (II.59).

$$\begin{bmatrix} iref5_1 \\ iref5_2 \\ iref5_3 \end{bmatrix} = T_{32} p(7wt) \begin{bmatrix} \iota d5 \\ \iota q5 \end{bmatrix} \tag{II.59}$$

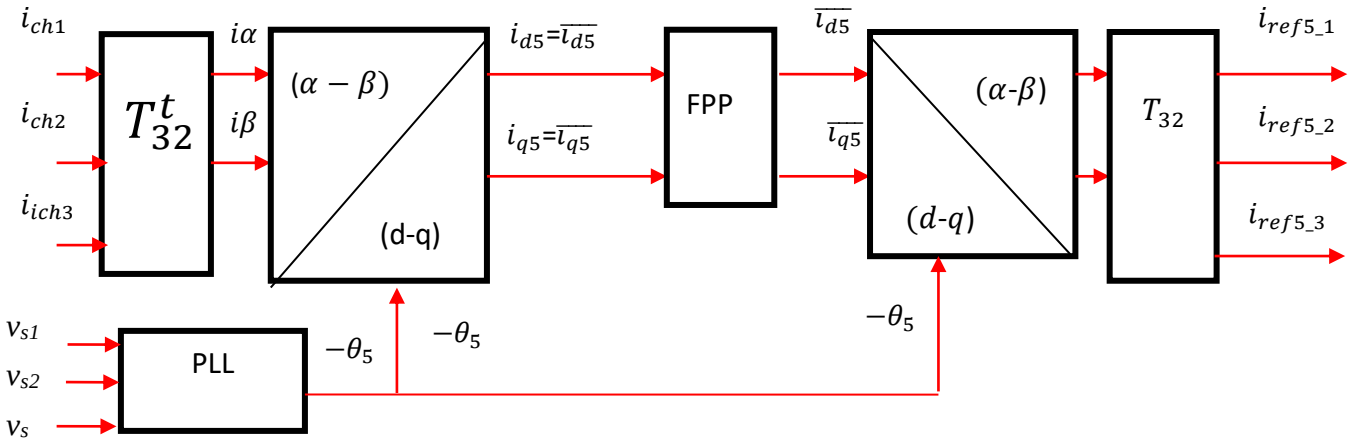


Figure II.23 : Algorithme identification des harmoniques de références 5 et 7 à base référentiel synchrone de Park d-q [50].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé mathématiquement le panneau solaire et le BOOST. Pour obtenir un modèle exploitable sur Simulink, les équations développées ont été réalisées dans des schémas blocs. Ensuite nous avons présentés différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par la méthode classique (P&O) puis par la méthode neuronale (ANN) ; on a présenté l'organigramme ensuite le schéma bloc réalisé sous le Simulink. Ce dernier sera utilisé dans le dernier chapitre, qui présente les résultats de la commande MPPT.

Chapitre III

MODÉLISATION D'UN ONDULEUR Z-SOURCE

III.1. Introduction

Les onduleurs à Z source évaluent la possibilité de remplacer une structure associant un Convertisseur DC/DC et un onduleur DC/AC par une topologie d'onduleur DC/AC qui est apparue il y a une dizaine d'année. Cette structure, nommée par son inventeur onduleur à source impédance, est de type DC/AC. Elle permet non seulement de convertir un signal continu en un signal alternatif mais possède également la fonction élévatrice lui permettant d'élever la tension de la source à un niveau supérieur. Les convertisseurs DC/AC de types onduleurs à source impédante, sont apparus dans la littérature scientifique dans les années 2000 a travers les travaux du Professeur Fang Zheng Peng publies dans l'article de congres paru en 2002 [51].

III.2. Convertisseurs DC/AC

III.2.1. Définition

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

- ✓ Soit pour fournir des tensions ou courants de fréquences et d'amplitudes variables. Exemple : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable.
- ✓ Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. Exemple : alimenter un système alternatif à partir d'une source continue (batterie).

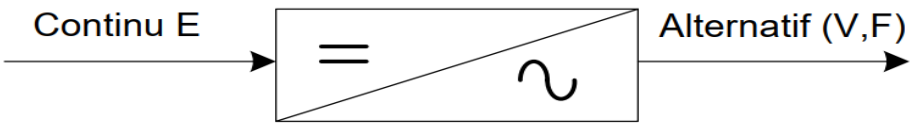


Figure III.1 : Schéma bloc de la conversion continue-alternative.

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminée ou permettant des performances recherchées, on distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [52].

III.2.2. Différents types d'onduleur

Les structures des convertisseurs nous conduisent à distinguer deux types d'onduleurs :

- ✓ Les onduleurs de tension ;
- ✓ Les onduleurs de courant.

III.2.2. 1. Onduleur de tension

On appelle onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue. Le principe des onduleurs de tension dans le cas où la sortie est monophasée et utilisons l'onduleur en pont à quatre interrupteurs : Q_1, Q_2, Q_3 et Q_4.

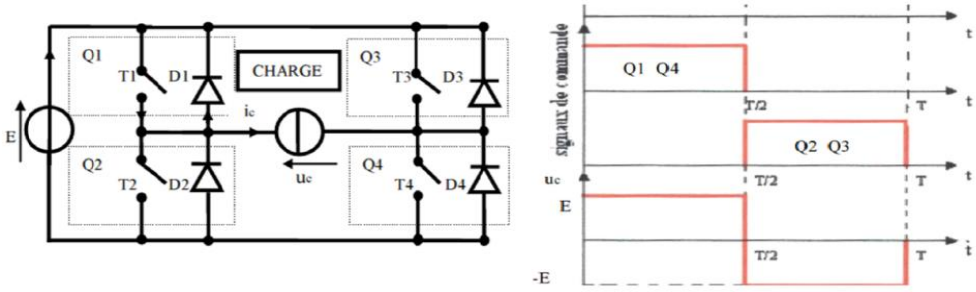


Figure III.2: Commande d'onduleur de tension, et la forme de tension $u_c(t)$.

Notant que les interrupteurs Q_i de l'onduleur (Figure III.2) sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur T_i commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode D_i. Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie [53].

III.2.2.2. Onduleur de courant

On dit onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continue.

Comme exemple, on prend le montage de la Figure (III.3) ci-dessous illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance Q_1, Q_2, Q_3 et Q_4, [53].

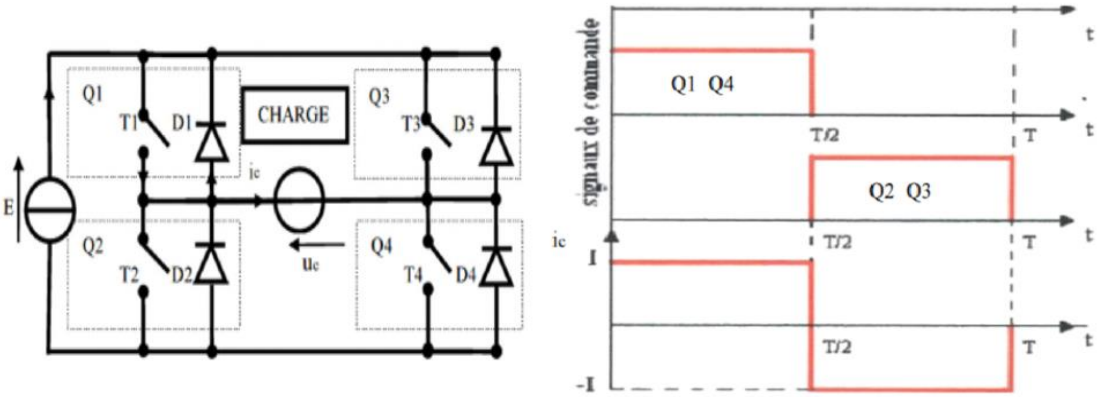


Figure III.3 : Onduleur de courant, la commande et les formes d'ondes de $i_c(t)$.

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de i_c si le courant d'entrée est constant et égal à I, quel que soit E:

- Pour 0 <t <T / 2 : les interrupteurs, Q_1, Q_4 passants et Q_2, Q_3 bloqués : i_c= +i.
- Pour T / 2 <t <T : les interrupteurs, Q_2, Q_3 passants et Q_1, Q_4 bloqués : ic= -i.

La tension $u_c(t)$ de la sortie est donc la tension U à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le coté alternatif. Dans ce cas; l'interrupteur est formé d'un semi-conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle [55].

III.2.2.3. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des IGBTs ou d'autres semi-conducteurs, dans ce cas, nous commandons la fréquence de l'onde de tension de sortie [54, 55].

III.2.2.4. Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tout thyristors qui en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur. À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternative, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO, [54-54].

III.2.3. Onduleur monophasé

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de fabriquer un échange d'énergie entre une source de tension continue fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif .Cette fonction est schématisée sur la Figure (III.4). La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composant à semi-conducteur entièrement commandables, puissants et robuste et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des technique dites de modulation de largeur d'impulsion [55], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique.

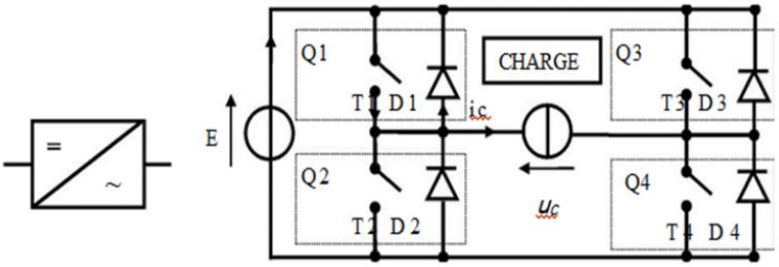


Figure III.4 : Onduleur monophasé: Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet.

On notera que:

T_1, T_2, T_3, T_4 : Transistors de puissance ;

D_1, D_2, D_3, D_4 : Diodes de puissance ;

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4: Transistors avec une diode antiparallèle ;

E : Tension continue ;

u_c ,i_c: La tension et le courant de la charge.

La Figure (III.4) rappelle le schéma symbolique de l'onduleur et le montage d'un onduleur en pont complet. Le montage consiste deux bras chaque bras est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux composant semi-conducteur (transistors IGBT ou MOSFET) avec une diode en antiparallèle. Les diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde à la sortie.

III.2.4. Onduleur triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de 120°. En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasée à six interrupteurs représenté par la Figure (III.5) dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires [57], c'est-à-dire dans chaque instant l'un fermé et l'autre ouvert afin d'éviter tout court-circuit au niveau de la source de tension.

La fermeture/ouverture des interrupteurs est réalisée par les signaux de commande (commutation) S_1, S_2, et S_3. Ces interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOSFET ou bipolaires, des IGBT ou des GTO associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [56]. Les onduleurs monophasés sont utilisés pour des applications de faible puissance, alors que les onduleurs triphasés couvrent la gamme des moyennes et des fortes puissances. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [58].

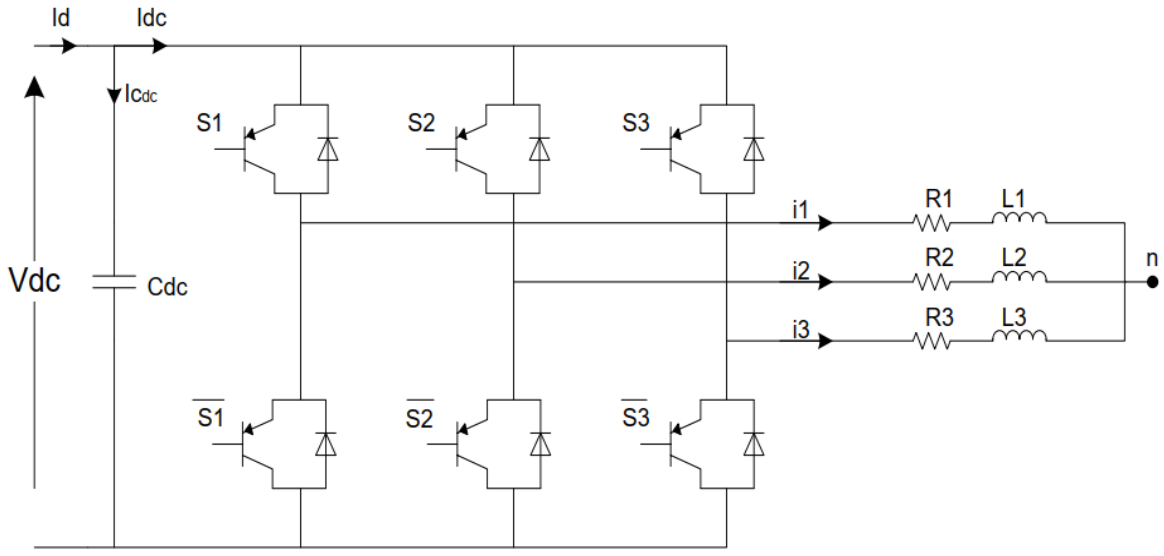


Figure III.5 : Onduleur de tension triphasé.

III.2.4.1. Modélisation de l'onduleur triphasé

Pour simplifier l'étude du convertisseur, on utilise le fonctionnement de convertisseur comme onduleur et on utilise un point fictif (o) pour réaliser le diviseur de tension de la source continu comme la montre la Figure (III.6) :

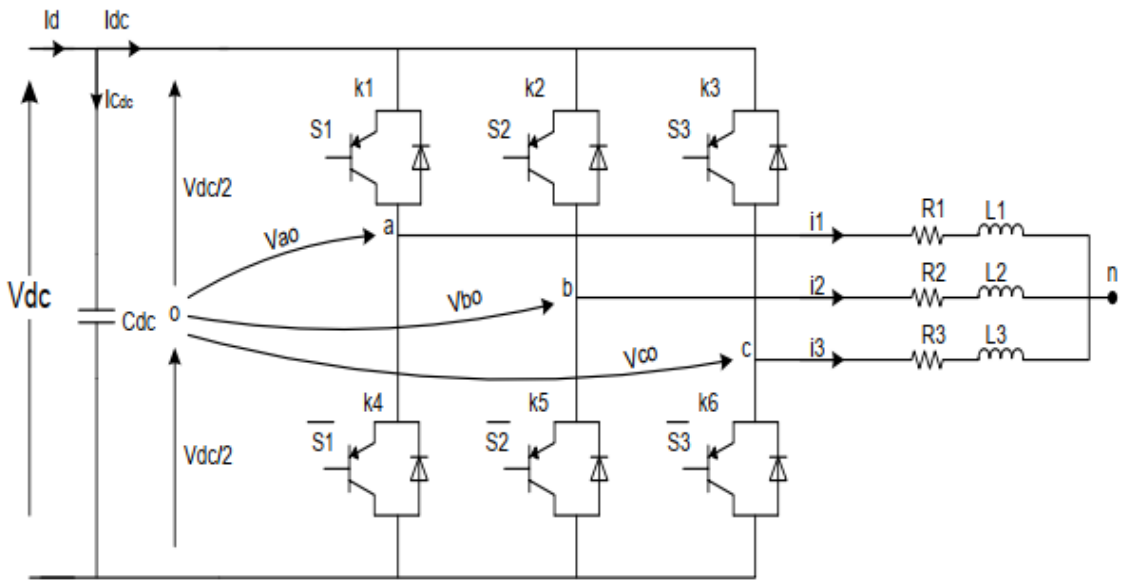


Figure III.6 : Onduleur de tension triphasé simplifié.

Les grandeurs de sortie V_{an}, V_{bn} et V_{cn} sont des tensions simples.

Si S_1=1 alors k_1 fermé (k_1 ON) :

$$V_{ao} = \frac{Vdc}{2} S1 \qquad \text{(III.1)}$$

Si $\bar{S}1$ =1 alors k_4 fermé (k_1 OFF):

$$V_{ao} = -\frac{Vdc}{2} \bar{S}1 \qquad \text{(III.2)}$$

$$V_{ao} = V_{ao}.OFF + V_{ao}.ON = \frac{Vdc}{2} S1 + (-\frac{Vdc}{2} \bar{S}1) \qquad \text{(III.3)}$$

On a $\bar{S}1 = (1-S_1)$ donc :

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{Vdc}{2}(2S_1 - 1) \\ V_{bo} = \frac{Vdc}{2}(2S_2 - 1) \\ V_{co} = \frac{Vdc}{2}(2S_3 - 1) \end{cases} \qquad \text{(III.4)}$$

Lorsque le système triphasé générer par l'onduleur est un système équilibré $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$, les tensions composé sont donné par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \qquad \text{(III.5)}$$

Les tensions simples seront exprimées en fonction des tensions V_{ao},V_{bo} et V_{co} par:

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{CO} \end{pmatrix} \quad \text{(III.6)}$$

En remplaçant l'équation (III.4) dans l'équation (III.6), nous trouvons les tensions simples seront exprimées en fonction des états des interrupteurs par :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{Vdc}{3}\begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} S1 \\ S2 \\ 档\ 3 \end{pmatrix} \quad \text{(III.7)}$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur I_{dc} est donné par :

$$I_{dc} = [S1 \quad S2 \quad S3]\begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.8)}$$

III.3. onduleur Z-source

III.3.1. Définition

Un Onduleur à Z-source avec réseau d'impédance unique, condensateurs C_1 et C_2 et les inducteurs L_1 et L_2 sont connectés en forme de X pour coupler la puissance source avec circuit principal de l'onduleur comme indiqué dans la Figure (III.7). L'impédance de base réseau source est la combinaison de deux éléments linéaires de stockage d'énergie, c. à-d. L et C. Cependant, pour améliorer les performances du circuit, différentes configurations réseau sont possibles avec l'ajout d'éléments non linéaires tels que diodes ou commutateurs dans le réseau d'impédance.

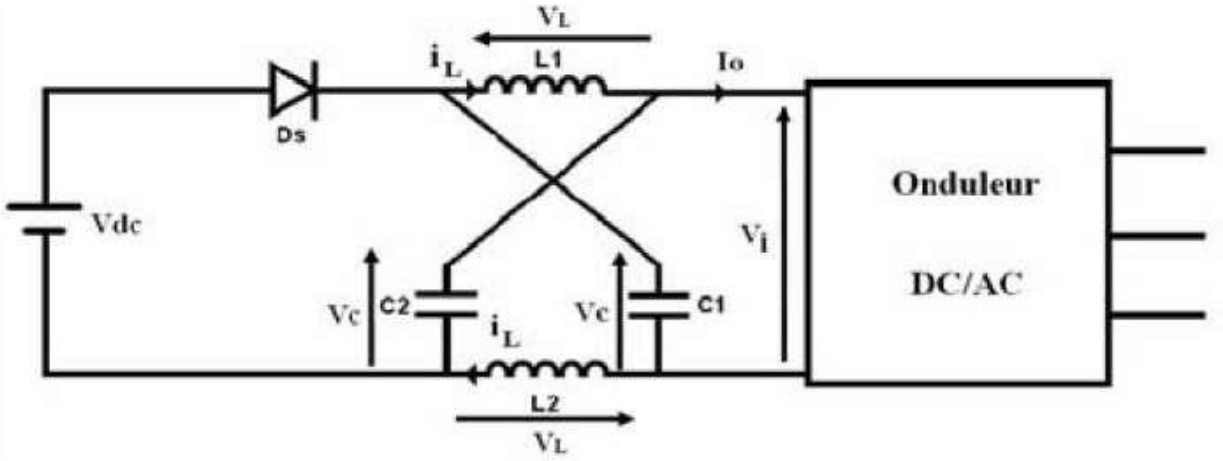


Figure III.7 : Modèle d'impédance Z-source lié avec un onduleur.

III.3.2. Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source

On définit V_i la tension d'entrée de l'onduleur Figure (III.6), $V_{M\ max}$ la valeur crête du fondamental de la tension simple de sortie de l'onduleur, $V_{i\ max}$ la valeur crête de la tension d'entrée de l'onduleur *m*, profondeur de modulation de l'onduleur est définie par :

$$m = \frac{2V_{M\ max}}{V_{i\ max}} \quad \text{(III.9)}$$

b, amplification de l'étage continu de Z source est définie par :

$$b = \frac{V_{i\ max}}{V_{DC}} \quad \text{(III.10)}$$

B, amplification globale du système est définie par :

$$B = mb = \frac{2V_{m\ max}}{V_{DC}} \quad \text{(III.11)}$$

Les tensions aux bornes de capacités C_1 et C_2 sont identiques (notées V_c) ainsi que les courants dans les bobines L_1 et L_2 (notés I_L).

$$L_1 = L_2 = L \quad \text{(III.12)}$$

$$C_1 = C_2 = C \quad \text{(III.13)}$$

Le fonctionnement du dispositif est lié aux comportements des éléments non linéaires entourant l'étage continu Z-source :

- ✓ l'état de la diode *Ds* : passante ou bloquée ;
- ✓ l'état de l'onduleur : roue libre, état actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), court-circuit des bras de l'onduleur.

Le tableau (III.1) montre les différentes configurations réellement présentes avec les commandes classiques.

Tableau III.1 : Les états utilisés avec la commande Z-source.

Etat de la diode *Ds*	Onduleur en roue libre	Onduleur actifs	Z-source court-circuit
Passante	Oui	Oui	Non
Bloquée	Non	Non	Oui

En effet, le fonctionnement normal du montage ne permet pas la présence des 6 combinaisons au niveau du Z-source [51]:

- ✓ Si les bras de l'onduleur sont court-circuités, la diode est nécessairement bloqué (lié au mode élévateur du montage) ;
- ✓ Si l'onduleur est actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), alors la diode Ds est passante ;
- ✓ Si l'onduleur est en roue libre, Ds est normalement passante, ceci étant lié au choix de la fréquence de découpage de l'onduleur et aux valeurs usuelles de L et C.

Mode 1 : D_S passante et onduleur actif

Durant cet état l'onduleur peut être représenté comme une source de courant vu de l'étage continu Z-source (Figure III.8).

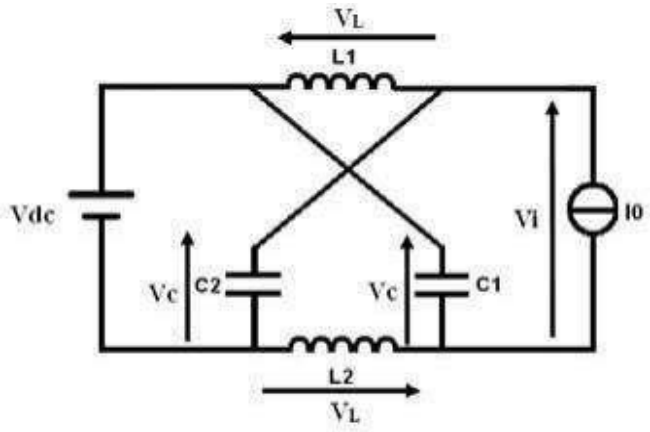


Figure III.8 : Schéma équivalent du mode 1.

Les valeurs des tensions (III.14) et (III.15) peuvent être déterminées.

$$V_L = V_{dc} - V_c \tag{III.14}$$

$$V_i = V_c - V_L = 2V_c - V_{dc} \tag{III.15}$$

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

Durant cet état, l'onduleur peut être représenté comme un circuit ouvert (Figure III.9) et les tensions V_c et vi restent identiques aux équations (III.14) et (III.15). C'est un cas particulier pourlequel i_0 est nul.

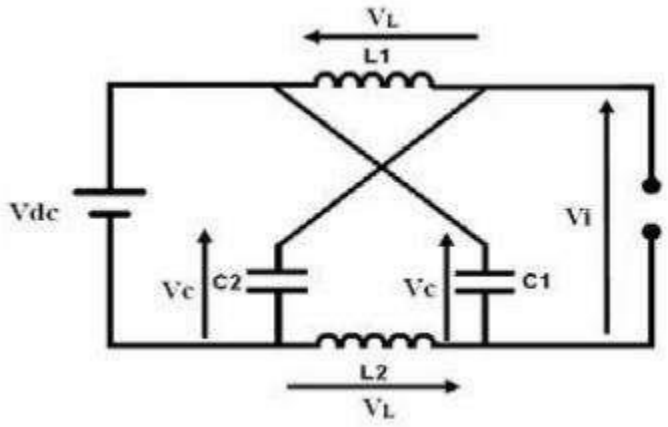


Figure III.9 : Schéma équivalent du mode 2.

Mode 3 : D_S bloquée et Z-source court-circuité

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 III.10).

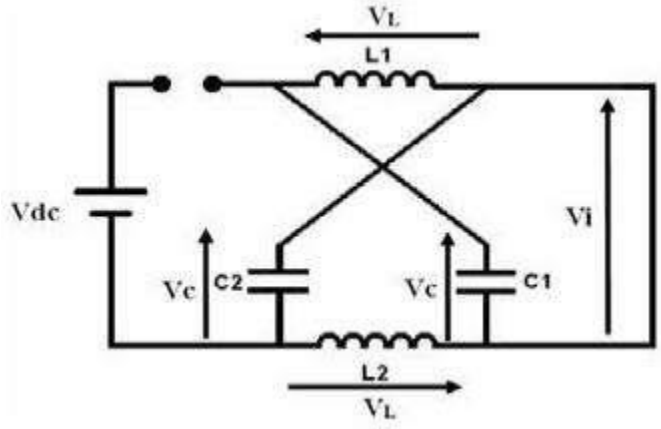


Figure III.10 : Schéma équivalent du mode 3.

Donc la tension de la charge est nulle (V_i=0) : il n'y a pas de transfert d'énergie. La durée de l'état court-circuit est égale à T_0, et la période de commutation est égale à T. A partir de la Figure (III.10) nous pouvons déterminer les équations des tensions (III.16) et (III.17).

$$V_L = V_c \quad \text{(III.16)}$$

$$V_i = 0 \quad \text{(III.17)}$$

De ces équations électriques, il est possible de déduire la valeur des tensions du montage durant une période de modulation et de déterminer les valeurs des amplifications. T désigne la demi-période de la commande de la structure.

Z-source, la commande étant élaborée à partir de porteuses triangulaires :

$$T = T_1 + T_0 \tag{III.18}$$

avec T_0 durée des courts-circuits de l'onduleur Z-source (V_i=0) et T_1 la durée des états actifs de l'onduleur durant T.

Le rapport cyclique de court-circuit T_0/T est noté D_0.

On peut déduire la valeur moyenne de l'inductance L, tension à la borne de la capacité e valeur moyenne du V_i :

$$\begin{cases} < V_L >= \frac{T0 \times V_c + T1 \times (V_{dc} - V_c)}{T} = 0 \\ V_{C1} = V_{c2} = V_c = \frac{T1}{T1 - T0} V_{dc} \\ < V_i >= \frac{T1x(2V_c - V_{dc})}{T} = \frac{T1}{T1 - T0} V_{dc} = V_c \end{cases} \tag{III.19}$$

Pour calculer la tension maximale de l'onduleur $V_{i\,max}$. On utilise les coefficients d'amplification de la structure :

$$V_{i\ \ max} = \frac{T1}{T1 - T0} V_{dc} = 2V_c - V_{dc} = \frac{1}{1 - 2\frac{T0}{T}} V_{dc} \tag{III.20}$$

On remplace l'équation (III.20) dans le rapport d'amplification de l'étage continu (b) :

$$b = \frac{V_{i\ \ max}}{V_{dc}} = \frac{1}{1 - 2\frac{T0}{T}} = \frac{1}{1 - 2D0} \geq 0 \tag{III.21}$$

Avec

$$D_0 = \frac{T0}{T} \tag{III.22}$$

III.3.3. Dimensionnements des inductances et les condensateurs

L'évolution simplifiée des grandeurs de l'étage Z-source est représentée dans Figure (III.11). Si l'ondulation est suffisamment petite, cette courbe est supposée linéaire. Ce n'est pas l'évolution réelle car des hypothèses simplificatrices ont été effectuées comme :

1. Utiliser une seule phase active de durée T_1 alors que l'onduleur a classiquement quatre phases de fonctionnement
2. introduire le temps de court-circuit T_0 en une seule partie au lieu de trois parties séparées. Ces hypothèses surévaluent la valeur de l'ondulation de V_c et I_L.+

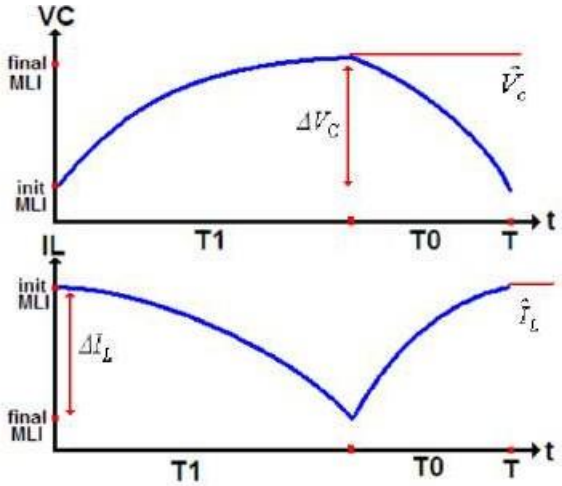


Figure III.11 : La tension des condensateurs et du courant dans la bobine pendant la période T.

Alors : $$\Delta V_c = \frac{<ic>}{C}\Delta t \quad et \Delta I_L = \frac{<VL>}{L}\Delta t$$

(III.23)

On déduit : $$C = \frac{<iL>}{2\Delta V_c}T0 \quad et \quad L = \frac{<VC>}{2\Delta i_L}T0$$

(III.24)

Le coefficient d'ondulation K(III.25) est défini par rapport à la valeur moyenne des grandeurs d'état (III.17) et est choisi ici identique pour les deux grandeurs.

$$K = \frac{0ndulation V_c}{<V_c>} = \frac{0ndulation i_L}{<i_L>} \quad \text{(III.25)}$$

Cette valeur est définie par l'utilisateur et est valable pour une période de MLI et permet de dimensionner *L* et *C* :

$$\begin{cases} C = \frac{I_0}{2KV_{DC}}T_0 et C = \frac{V_{DC}}{2KI_0}T_0 \\ C = \frac{I_0 \times T}{2KV_{DC}}D_0 et C = \frac{V_{DC}\times T}{2\,档 I_0}D_0 \end{cases} \quad \text{(III.26)}$$

III.3.4. Les diffèrent stratégies de commande d'onduleur z-source par MLI

III.3.4.1. Boost Simple (MLI simple Boost Control SBC)

La commande simple de suralimentation utilise deux lignes droites égales à la valeur de crête des références triphasées pour contrôler le rapport de service à travers, comme le montre la Figure (III.12).

Lorsque la forme d'onde triangulaire est supérieure à la ligne supérieure Vp, ou plus bas que la ligne de fond Vn, le circuit se transforme en état de tir à travers (*Shoot-Through*). Sinon, il fonctionne comme un transporteur traditionnel basé MLI [61].

La relation entre le taux de modulation (r) et le rapport cyclique maximal de l'état de tire (D) est exprimée comme suit :

$$D_{max}=1-r \quad \text{(III.27)}$$

Avec :

$$D=\frac{T_0}{T} \quad \text{(III.28)}$$

Le gain en tension de l'onduleur Z-source peut être écrit comme suit :

$$G=B.r \quad \text{(III.29)}$$

$$B=\frac{1}{1-2D} \quad \text{(III.30)}$$

$$G=\frac{r}{1-2D} \quad \text{(III.31)}$$

Avec, B : Facteur d'amplification ;

r : Le Taux de modulation ;

G : Le gain en tension de l'onduleur Z.

La commande Simple Boost est simple et facile à mettre en œuvre. Toutefois, le rapport cyclique l'état de tire obtenu D diminue avec l'augmentation du taux de modulation « r ». Le rapport cyclique état de tire maximum de la commande Simple Boost est limité à 1-r pour une opération particulière, atteignant zéro pour un taux de modulation égale à 1. L'opération avec un taux de modulation élevé pour la commande Simple Boost, conduit à une faible tension de sortie. Afin de générer une tension de sortie qui nécessite un gain en tension élevée, un faible taux de modulation doit être utilisé [59 ,60].

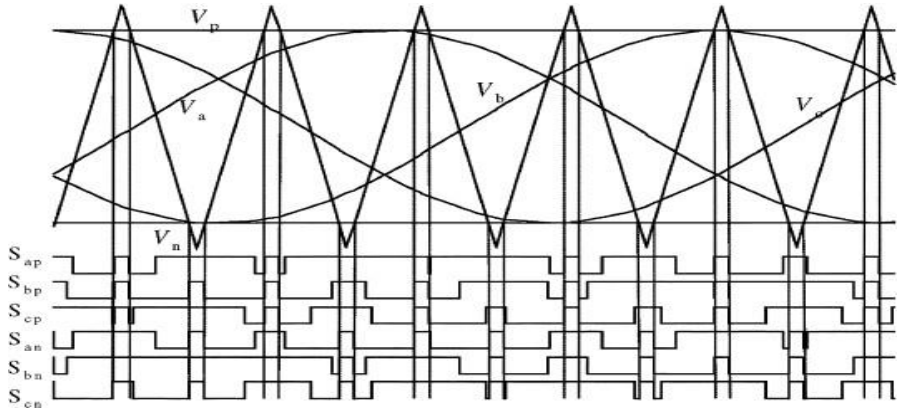


Figure III.12 : La commande Simple Boost.

III.3.4.2. MLI Maximum boost control MBC

Dans le cas de MBC, la période de temps totale à l'état zéro est convertie en état de tir, ce qui entraîne un meilleur résultat que le SBC. Comme on peut le voir sur la figure III.13, dans cette stratégie, le circuit est en état de tir lorsque l'onde porteuse triangulaire est supérieure à la courbe maximale des références (V_a, V_b, V_c) ou inférieure au minimum des références [61].

$$D=\frac{2\pi-3\sqrt{3}r}{2\pi} \quad \text{(III.32)}$$

$$B=3\sqrt{3}G-1=\frac{\pi}{3\sqrt{3}r-\pi} \quad \text{(III.33)}$$

$$G=B.r=\frac{\pi.r}{3\sqrt{3}r-\pi} \quad \text{(III.34)}$$

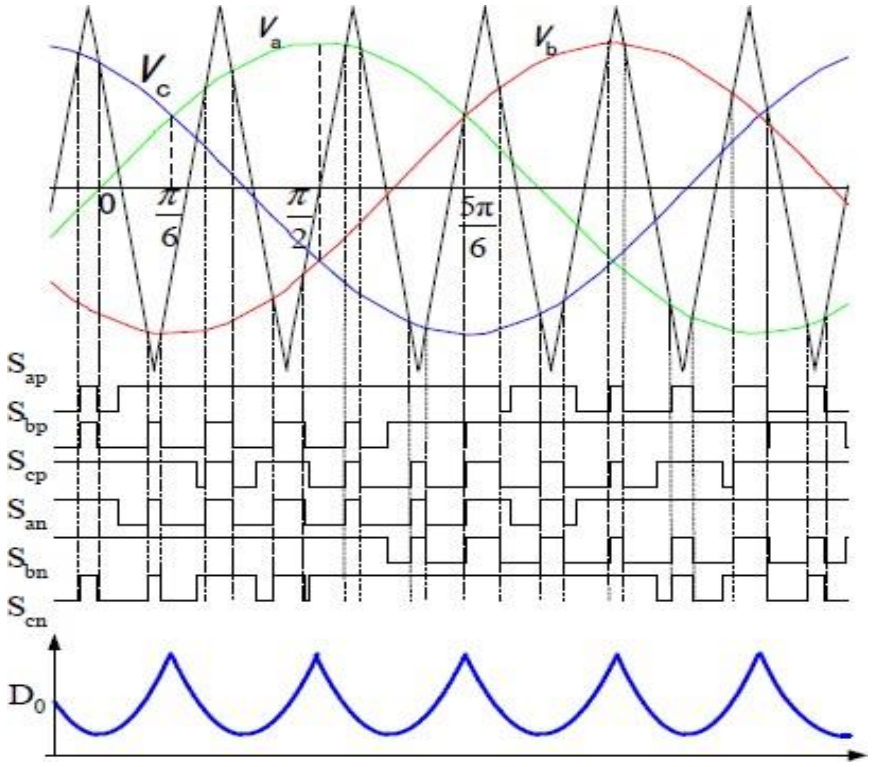


Figure III.13 : La commande maximum boost.

III.3.4.3. Commande de suralimentation constante maximale MCBC

Afin de réduire le volume et le coût, il est important de toujours maintenir le rapport de service de tir continu constant. Dans le même temps, une augmentation de la tension pour un indice de modulation donné est souhaitée pour réduire la tension à travers les commutateurs.

La commande de suralimentation constante maximale atteint le gain de tension maximal tout en conservant toujours le rapport de service continu constant. La Figure (III.14) montre la carte schématique de la commande de poussée constante maximale avec la troisième injection harmonique.

Dans cette méthode, la troisième harmonique est injectée avec le signal de modulation. Cela signifie que la référence (sinusoïde) est ajoutée avec une autre sinusoïde ayant une fréquence exactement trois fois plus que la référence et l'amplitude généralement un sixième (1⁄6) de l'onde modulatrice [61].

$$D_0 = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2}.r \quad \text{(III.35)}$$

$$B=3\sqrt{3}G-1=\frac{1}{\sqrt{3.r-1}} \quad \text{(III.36)}$$

$$G=B.r=\frac{r}{\sqrt{3.r-1}} \quad \text{(III.37)}$$

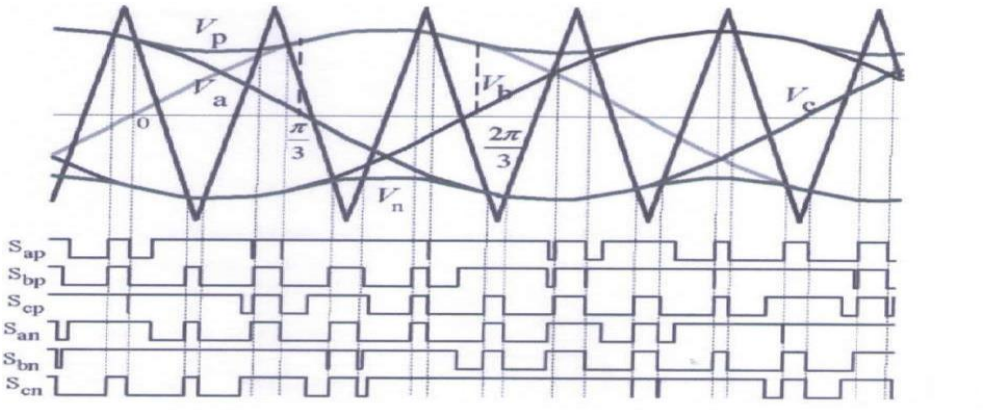


Figure III.14 : La commande constante Boost.

III.3.5. Simulation

III.3.5.1. Simulation de la commande Simple Boost

L'architecture générale du système étudié est représentée dans la figure (III.15).

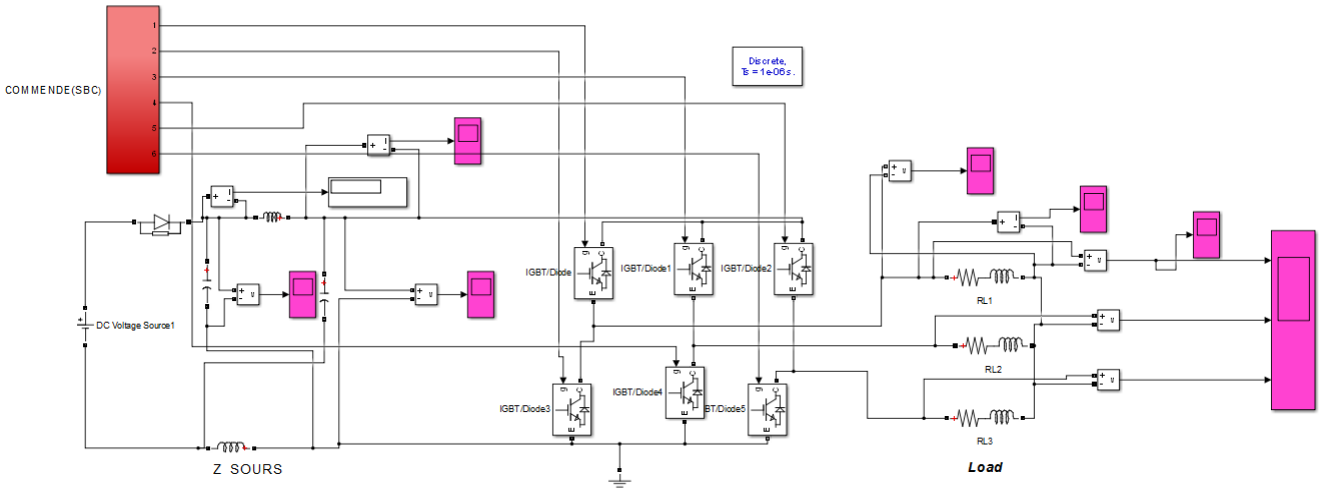


Figure III.15 : Schéma de Z-source en MATLAB/Simulink.

Les Paramètres utilisés pour la simulation sont indiquées dans le Tableau (III.3).

Tableau III.3: les paramètres de simulation

Paramètre	Valeurs
VDC	663.87V
Inducteur de Z-Source (L_1 et L_2)	0,0002H
Capacité de Z-Source (C_1 et C_2)	0,0009F
Fréquence fondamentale	50HR
Fréquence de commutation	10KHR
Resistance de la charge	10Ω
Rapport cyclique (D)	0.9

III.3.5.2. Résultats de simulation

La figure (III.16) représente la tension V_{dc} du bus continu virtuel.

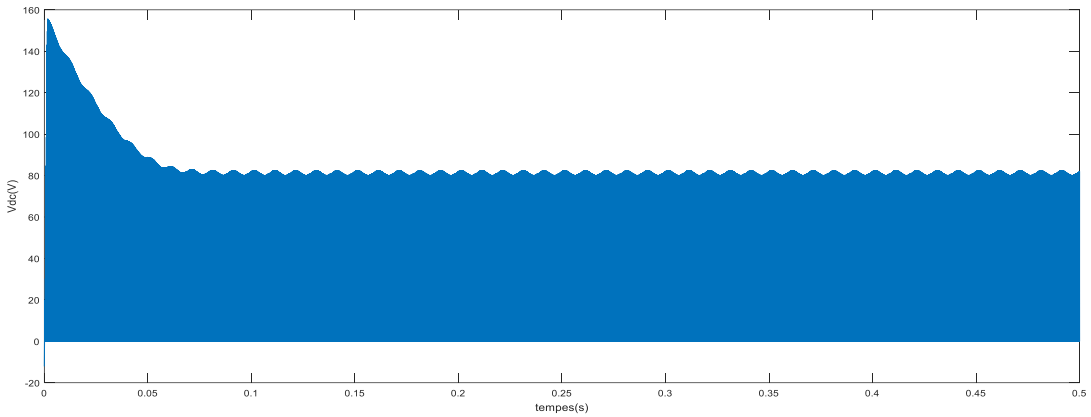


Figure III.16 : La tension V_{dc}.

La figure (III.17) montre les tensions simples $v_{a,}$ non filtrées.

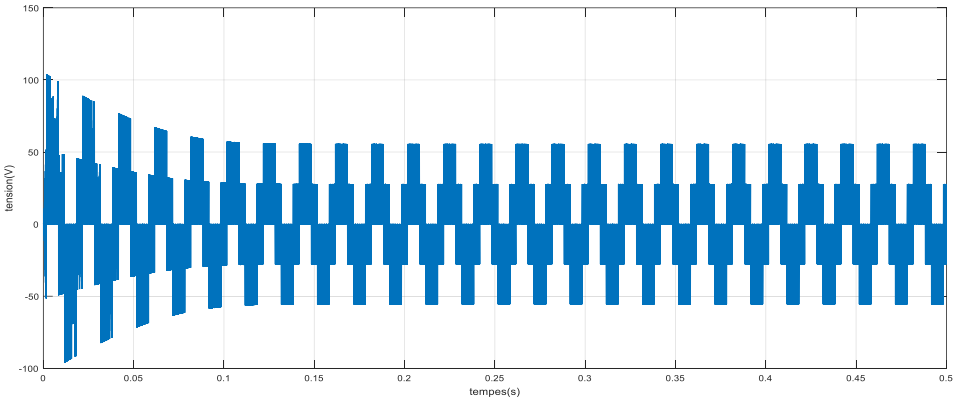


Figure III.17 : Les tensions simples non filtrées.

La figure (III.18) montre les tensions simples v_a ,filtrées.

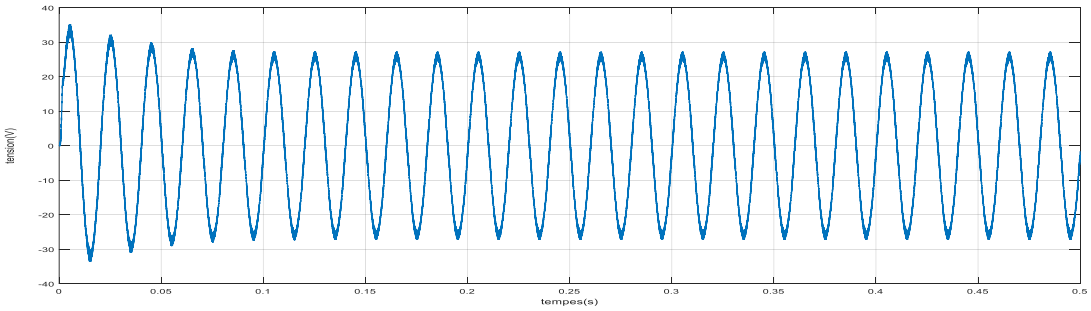


Figure III.18 : Les tensions simples filtrées.

La figure (III.19) montre les courants simples $i_{a,b,c}$ non filtrés.

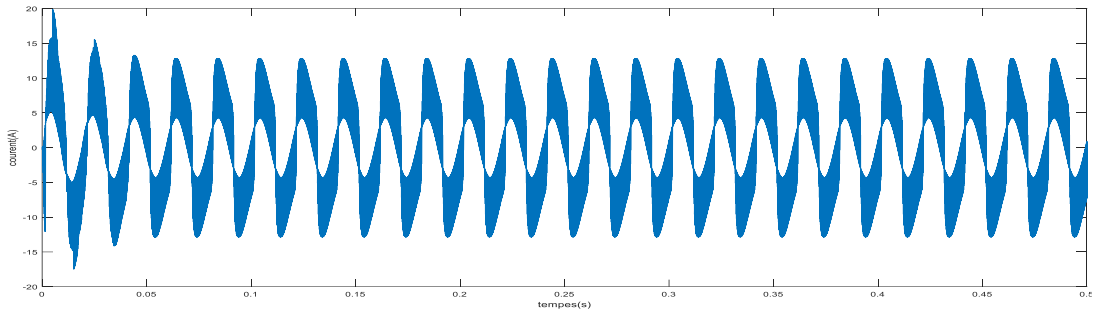


Figure III.19 : Les courants non filtrés.

La figure (III.20) montre les courants simples i_a, filtrés.

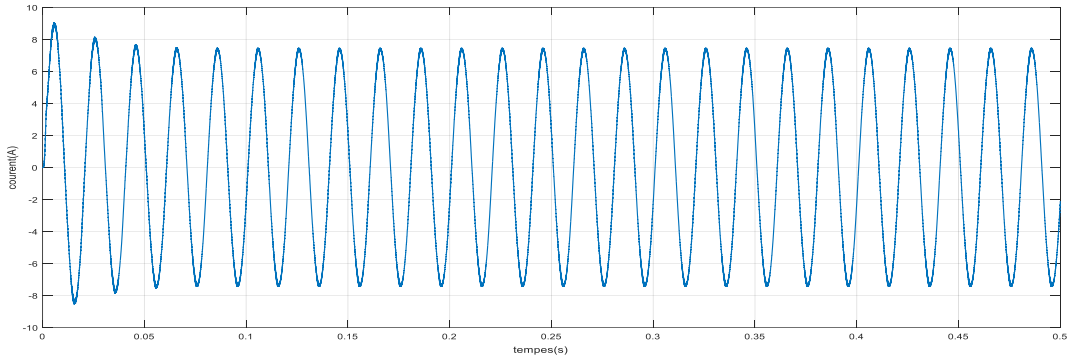


Figure III.20 : Les courants filtrés.

III.3.5.3. Interprétation des résultats

Les tensions de sortie de l'onduleur montrées dans la figure (III.18) ont devenues sinusoïdales de valeurs maximales égales à 28 V. De même pour la figure (III.20), les courants de ligne ont devenues sinusoïdales de valeurs maximales égales à 7,5 A.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu analyser théoriquement le fonctionnement de l'onduleur à structure Z-source qui nous a permis d'établir les équations de sortie du convertisseur.

Le rendement de l'onduleur Z-source sera limité par les pertes introduites par la modulation et la création des courts-circuits.

La zone d'utilisation du Z-source est intéressante pour un B faible associé à un b le plus petit possible, en ayant conscience de l'augmentation des pertes introduites par les courts-circuits.

Chapitre IV

RÉSULTATS DE SIMULATION ET INTERPRÉTATIONS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera une étude de simulation d'un commande d'un onduleur z source par la technique SBC en appliquant un filtre actif parallèle et un système photovoltaïque raccordé au réseau adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ».et une commande de intelligent artificiel (ANN) Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation et ANN » un onduleur z source avec sa commande SBC et un filtre actif parallèle ainsi qu'un réseau.
l'algorithme de contrôle pourla détection des harmoniques est basée sur la méthode dq . et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2. L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes) ;
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ;
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets) ;
- D'autres modules dont un compilateur, un générateur de code C, un accélérateur ;
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINKest une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [61].

IV.3. Système du filtrage actif parallèle proposé

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la Figure (IV.1)

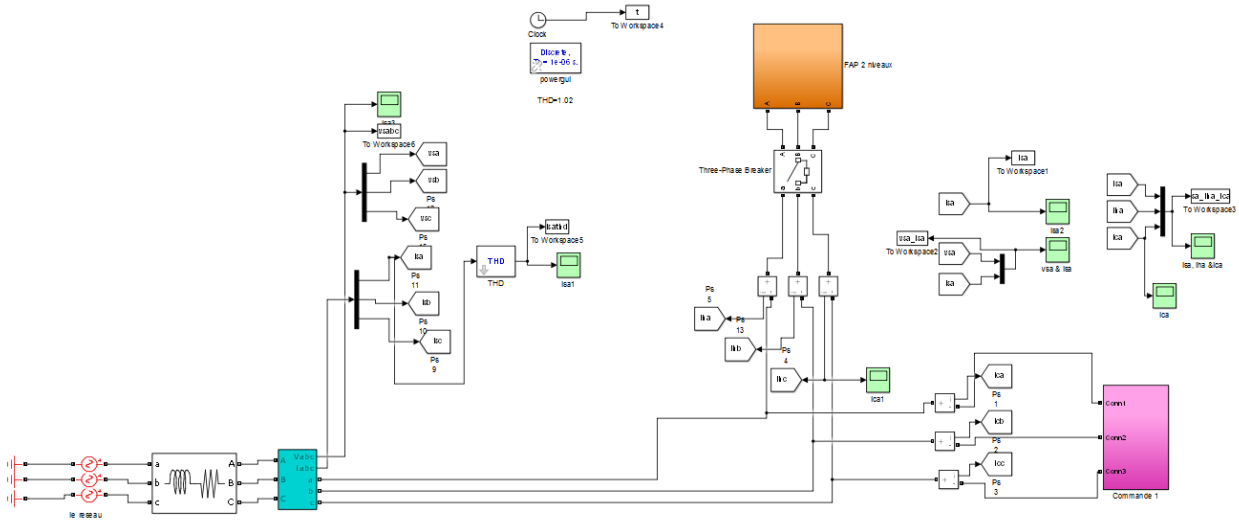


Figure IV.1: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Les paramètres du système de filtrage actif parallèle quenous avons présentés précédemment sont montrés dans le Tableau (IV.1).

Tableau IV. 1 : Paramètres du système de commande de filtrage actif parallèle.

	Paramètres	**Valeurs numériques**
Réseau d'alimentation	Tension efficace$E_{S,RMS}$	220 V
	Fréquence$f$	50 Hz
	Résistance R_{fa}	0.25mΩ
	Filtre de sortie L_{fa}	19,4uH
Filtre actif	Tension du filtreV_{dc}	620 V
	Fréquence de commutation (fréquence de la porteuse)	10 KHz
	Résistance R_{fa}	0.2 Ω
	Filtre de sortie L_{fa}	1,22 mH
Inductance de correction	Résistance en amont de la charge polluante R_f	0,3 Ω
	Inductance en amont de la charge polluante L_f	0,3mH

IV.3.1. Résultats de simulation

Les simulations ci-dessous sont faites grâce à l'environnement MATLAB/Simulink. Tout d'abord, nous avons commencé par les résultats du système avant l'application du FAP. Le THD du courant de charge qui est supérieur à 5 % nous a obligé de connecter un onduleur de tension Z-Source en parallèle qui joue le rôle d'un générateur de courant a pour objectif de compenser tous les harmoniques en même temps. L'optimisation de la qualité d'énergie électrique est faite par deux sortes :

- ✓ Le régulateur de Perturbation et Observation (P&O) du système PV associé avec unonduleur Z-Source commandé par la technique MLI-SBC) ;
- ✓ Le régulateur de Réseaux de Neurones Artificiel (ANN) du système PV associé avec un onduleur Z-Source commandé par la technique MLI-SBC) ;

Les résultats de simulation du filtrage actif parallèle obtenus par l'environnement MATLAB/ Simulink sont présentés sur les Figures (IV.2) à (IV.14).

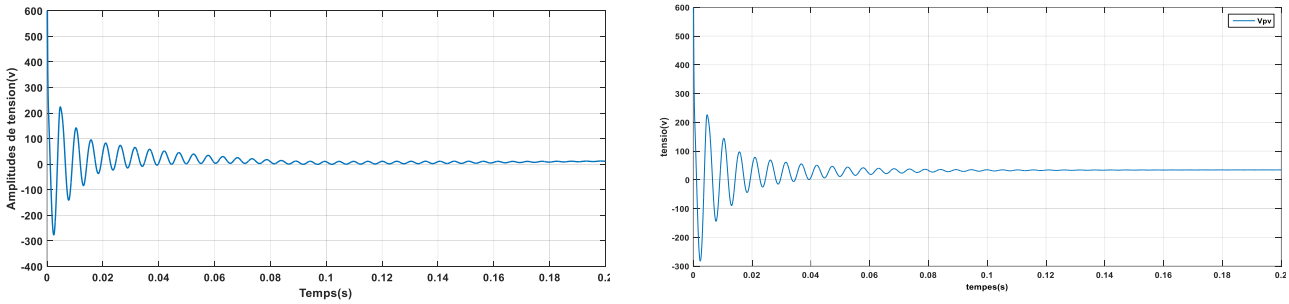


Figure IV.2 : Tension de sortie du Gpv.

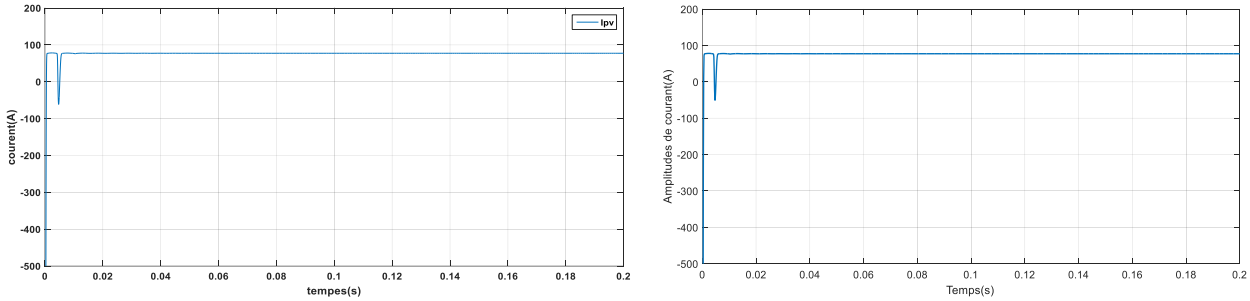


Figure IV.3 : Courant de la sortie du Gpv.

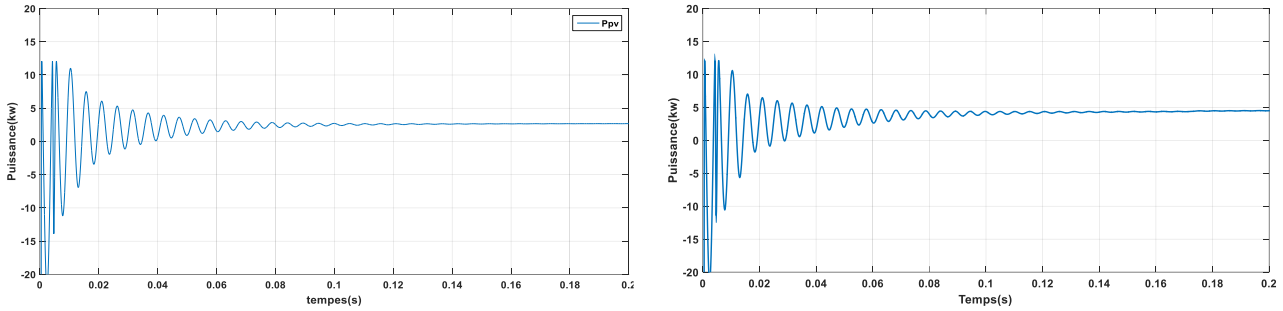


Figure IV.4 :Puissance de la sortie de la Gpv.

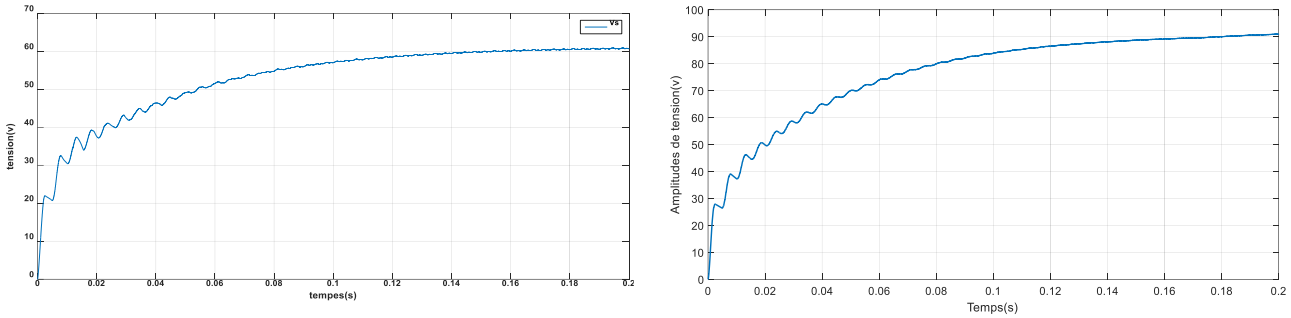


Figure IV.5 :Tension de la sortie de l'hacheur boost.

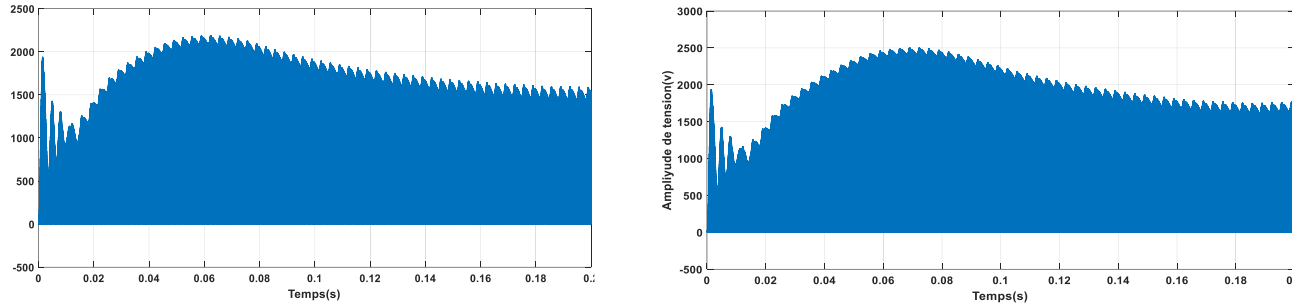


Figure IV.6 :Tension de la sortie de Z-Source.

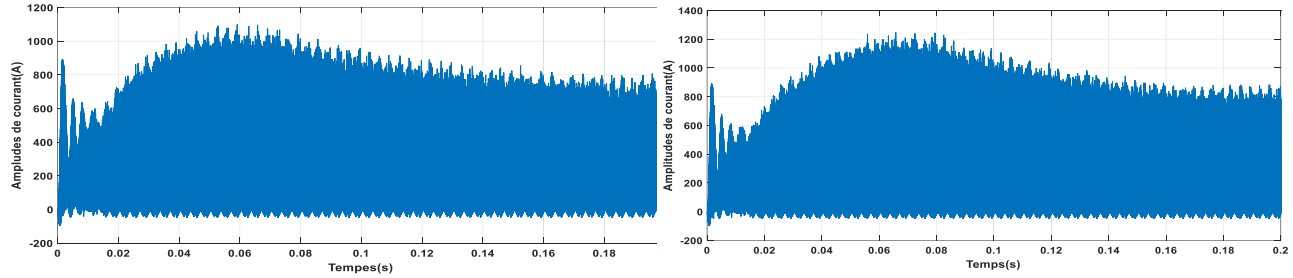


Figure IV.7 : Courant de la sortie de Z-Source.

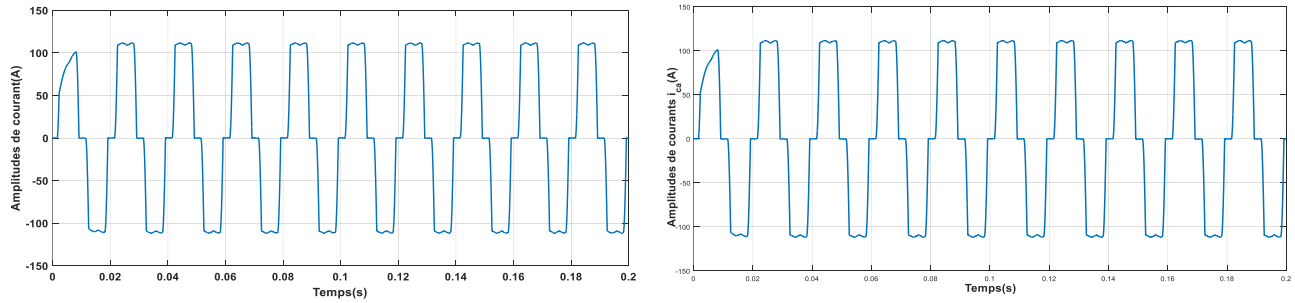


Figure IV.8 : Forme d'onde du courant i_{Ca} avant le filtrage.

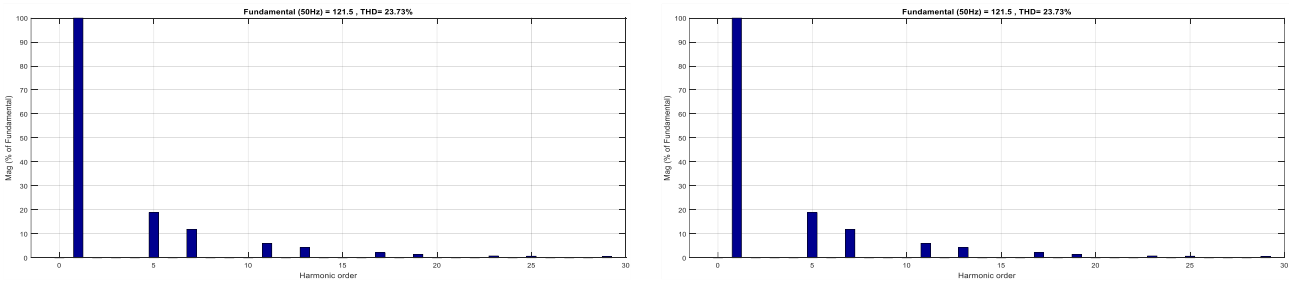


Figure IV.9 : Spectre du courant i_{Sa} avant le filtrage.

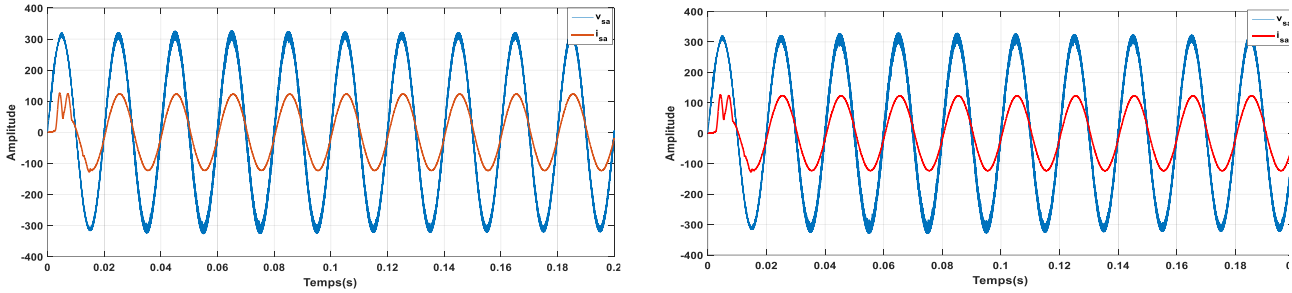


Figure IV.10 :Déphasage du courant i_{Sa} par rapport à la tension v_{Sa} après le filtrage.

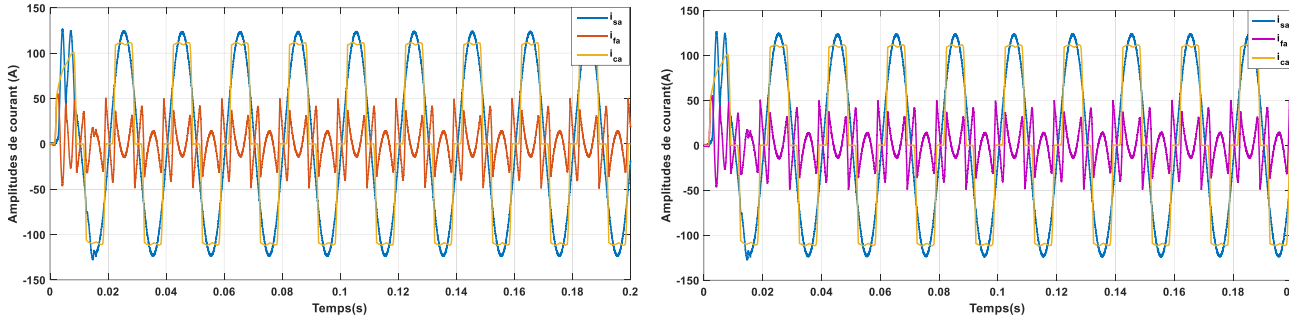


Figure IV.11 : Courants de charge i_{ca}, de source i_{Sa} et du filtre i_{fa}.

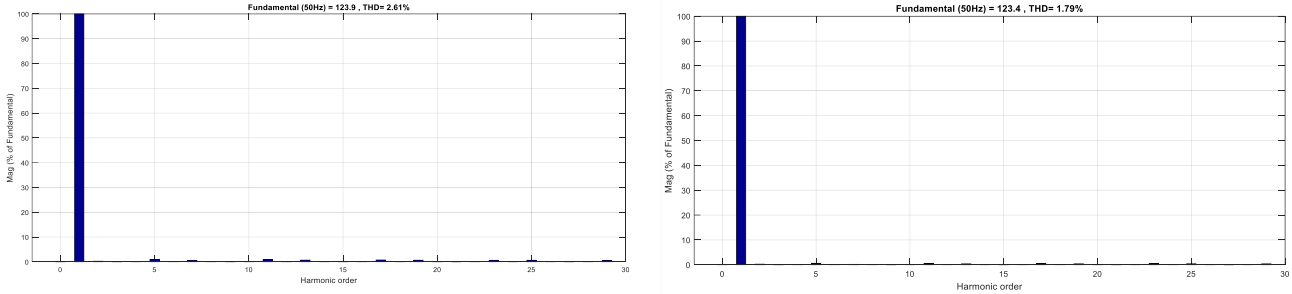


Figure IV.12 : Spectre du courant i_{Sa} après filtrage.

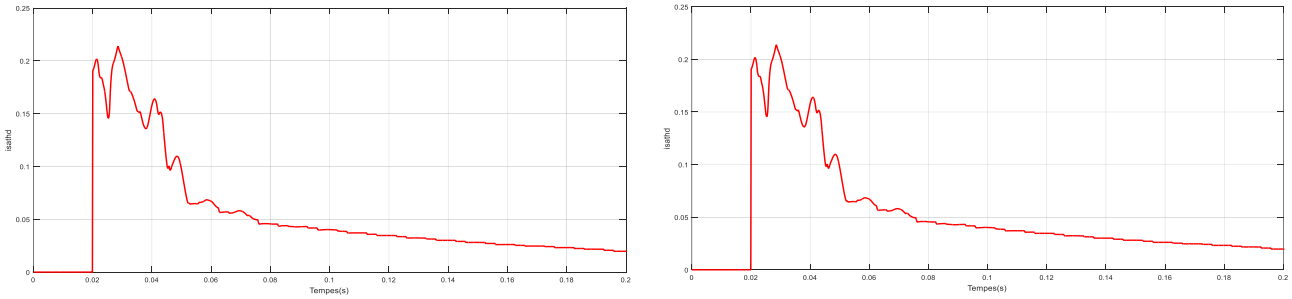


Figure IV.13 : Schéma temporel du $THDi_{Sa}$.

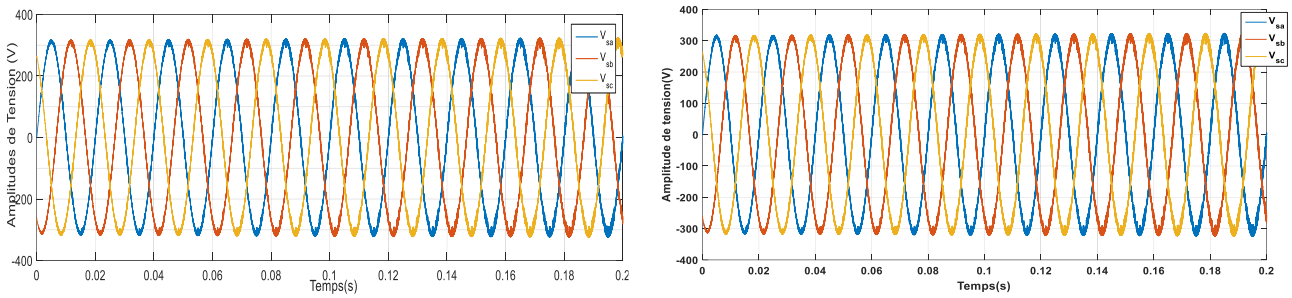


Figure IV.14 : Tension V_{Sabc}.

P&O **ANN**

IV.3.2. Interprétations

Les résultats de simulation obtenus sous *MATLAB/Simulink* dans les Figures (IV.2) à (IV.14) présentent les principaux signaux du système après filtrage actif parallèle par la méthode classique P&O et la méthode intelligente ANN du régulateur MPPT.

D'abord, nous observons que l'allure de la tension du générateur photovoltaïque de la Figure (IV.2) atteint à une valeur bien stable et fixe égale à 30 V pour le régulateur P&O et 57 V pour le régulateur ANN, tandis que l'allure de la tension du hacheur boost de la Figure (IV.5) atteint à une valeur bien stable et fixe égale à 60 V pour le régulateur P&O et 91 V pour le régulateur ANN cela nous prouve que le rapport cyclique *D* atteint à une valeur aussi stable égale à 0,5pour le régulateur P&O et 0.62 pour le régulateur ANN.

La Figure (IV.3) montre le courant de sortie du générateur photovoltaïque stabilise à la valeur de 80 A dans les deux régulateurs.

Nous voyons dans la Figure (IV.4) que la puissance photovoltaïque prend la valeur 3 kW pour le régulateur P&O et 4.4 KW pour le régulateur ANN.

Nous observons dans la Figure (IV.6) que la tension de sortie de Z-Source atteint à la valeur de 1450 Vpour le régulateur P&O et 1630 V pour le régulateur ANN stable et fixe afin d'alimenter le FAP.

Le courant de sortie de Z-Source stabilise à la valeur de 780 Apour le régulateur P&O et 690 A V pour le régulateur ANN comme le montre la Figure (IV.7).

On constate une distorsion symétrique du courant i_{ca} (avec i_{ca}=i_{sa}) par rapport au point de demi période (Figure IV.8), ce qui signifie que les harmoniques multiples de 2 et 3 sont inexistants dans le spectre de i_{ca} et que seuls ceux de rang (6h ± 1) sont présents; ceci est confirmé par le spectre de i_{ca} (Figure IV.9) représentant les 30 premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THD de i_{ca} est de 23.73 % pour une durée d'observation de 0.2 s.

Nous voyons clairement que le déphasage entre la tension v_{sa} et le courant i_{sa}de source est amélioré vers le zéro avec les deux types de régulateurs comme nous observons ainsi que le courant de source a été amélioré vers le sinusoïdal (Figure IV.10).

La présentation des trois courants, de charge (i_{ca}), de source (i_{sa}) et de filtre (i_{fa}) de la Figure (IV.11) montre que la déformation du courant de charge i_{ca} est compensée par le courant de filtre i_{fa}et résultant le courant de source i_{sa}qui devenu sinusoïdal par la formule (III.7).

$$i_{sa} = i_{ca} - i_{fa} \quad \text{(IV.1)}$$

La Figure (IV.12) montre que le spectre du courant de source THDi_{sa} est égal à 1,79 % avec le régulateur ANN. Tandis qu'au régulateur P&O est égal à 2,61 %. Ce qui signifie que le régulateur à base d'intelligence artificiel est bien robuste et efficace que le régulateur classique.

L'analyse temporelle du THDi_{sa} de la Figure (IV.13) explique ce que nous avons dit dans l'analyse fréquentiel précédente.

Enfin, dans la dernière Figure(IV.14), nous voyons les tensions de source équilibrées et même amplitude de valeurs maximales égales à 311,12 V.

IV.4.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la simulation de chaque équipements représentant la commande d'un onduleur z source par la technique SBC appliquant un filtre actif parallèle et un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Et dans ce travail , nous avons exposé la résolution des problèmes des harmoniques dans les réseaux de distribution par l'insertion du type de filtres actifs parallèle alimentés par les systèmes PV, le premier utilise l'algorithme (P&O) largement utilisé dans les Systèmes photovoltaïques et le deuxième basée sur la commande réseau de neurones artificielles(ANN).

Les résultats démontrent que ANN fonctionne mieux en termes de vitesse de convergence, de fluctuations transitoires et performances en régime permanent et améliore encore la qualité de puissance des courants de source.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons fait l'étude des systèmes photovoltaïques qui se compose essentiellement d'un générateur PV (GPV), convertisseur (DC/DC boost), la commande (MPPT) et une charge.

Dans notre travail nous avons présenté les systèmes photovoltaïques en se basant particulièrement au système photovoltaïque raccordés au réseau qui est constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur DC-DC Boost, un onduleur Z-Source.

Commandé par MLI et le réseau électrique.

On a simulé ce système sous MATLAB/Simulink, on a pris en compte le MPPT où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

La commande MPPT permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle le force de fonctionner toujours au point de puissance maximale.

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques du système solaire, en l'exploitant-le pour alimenter le Filtre Actif Parallèle de Puissance commandé par la technique PWM-SBC avec deux types de régulateurs MPPT, Perturbation et Observation (P&O) et Réseaux de Neurones (ANN).

Les résultats obtenus sous MATLAB/Simulink montrent que le système du filtrage actif parallèle réagi mieux avec ANN qu'avec P&O.

Enfin comme **perspectives** et travaux futures, nous proposons :

Application d'une commande plus performante que SBC, c'est la commande MBC qui est le meilleur choix pour capturer les signaux analogiques avec une précision ;

Utilisation différents niveaux de l'onduleur pour assurer plus de commutations et d'éliminer mieux les harmoniques.

Références Bibliographiques

[1]ABBAD IMANE, «Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température ,poussière et éclairement)sur le rendement d'une cellule solaire», mémoire de Magister ,Université Larbi Ben M'Hidi / Oum ElBouaghi ,2018 / 2019

[2]Bouzeria Hamza, "modélisation et commande d'une chaine de Conversion photovoltaïque", thèse doctorat3ème cycle LMD, 2016.

[3]J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada S.Y., "Le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA,1998.

[4] http://www.sonelgaz.dz.

[5] Hallali Kamālia," Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative», mémoire de Magister en Electronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,(2012).

[6] Salam Fatah, "Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecté au réseau électrique», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif-UFAS, (2011).

[7]https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/.

[8] http:/go.microsoft.com/fwlink/linkId=141450.

[9] Fellah Nadia, Sidibe Oumar,"Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque Du DECANAT de lafaculté ST", MEMOIRE DE MASTER Université Badis Ibn Abdelhamid Mostaganem ,2018/2019.

[10] P.Joly."Focus Technique Photovoltaïque Un Nouvel Éclairage".L'Institut National de l'Energie Solaire(INES) Paris, mars 2011.

[11] Mehdi M., "Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique", Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaïd, Tlemcen,2010.

[12] SALAMA F., "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", Mémoire de Magister, Université de Sétif,2011.

[13]BELAID LALOUNI Sofia., "Cours Energie Solaire Photovoltaïque", Université A.MIRA de BEJAIA, Annéeuniversitaire2014/2015.

[14] Vighetti Stéphane, «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :Choix et dimensionnement des étages de conversion". Thèse de doctorat, Université Grenoble,2010

[15] Loïc Bailly, «Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface". Thèse de doctorat, Université Bordeaux,2010.

[16] José Miguel Navarro "Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible".

Thèse de doctorat. Université Toulouse III –Paul Sabatier, 2008.

[17] TRAORE Massitan "GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVEE CONNECTE AU RESEAU". UNIVERSITE BADJIMOKHTAR ANNABA ,juin 2017.

[18] M. Angel Cid Pastor"Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electrique "Thèse Doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse_29septembre2006.

[19] Stéphane VIGHETTI "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion" Doctorat Université de Grenoble Institut polytechnique de Grenoble _24 septembre2010.

[20] TOUMI Nihed, KOUDA Iskandar "ENERGIESOLAIREPHOTOVOLTAIQUEET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME "Université BadjiMokhtar –Annaba ,Année Universitaire2020/2021.

[21] F.Bouchtouchecherfa "Etude etréalisation d'une centrale photovoltaïque connectée auréseaudedistributionélectriqueBT".Mémoiredemagister,EcoleNationalPolytechniqueElharach ,2004.

[22]-http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/lenergie-photovoltaïque/avantages-et-inconvenients-du-photovoltaique.html

[23] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm " etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 Sénégal, 2008

[24] A.Benayad, " modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing. " mémoire de magister, département de génie electrique, université de béjaia 2011.

[25] S. Liu And R.A. Dougal, "dynamic multi physics model for solar array", IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, n°2, pp. 285 – 294, june 2002.

[26] BENADEL F. "Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour SystèmePV"CSE_208.2015/2016

[27] André T.T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, D. Bonkoungou, "modélisation simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension(boost) avec le logiciel matlab/simulink", journal international de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'énergie et de l'environnement, issn, 2016.

[28] Mr ZEMOURI AZEDDINE"ETUDE EXPERIMENTALE D'UNCONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUSTE ".Mémoire de magister, l'Université de Batna, 2014.

[29] Bouzghaya Imed "Etude d'un Hacheur à Stockage Capacitif ". Mémoire fin d'étude,université Larbi Ben M'hidi-Oum El-Bouaghi, 2014

[30] Benaoual ibrahim elkhalil" étude et simulation des hacheurs entrelacés ". Mémoirefin d'étude, Université Biskra, 2017.

[31] ATCHOUM Safa " Réalisation d'un convertisseur BUCK - MPPT. ". Mémoire fin d'étude, université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi, 2017.

[32] A.Luque, S. Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering Ltd,2003.

[33] N Aouchiche, M.A.C., and A Malek, "Poursuite du point de puissance maximaled'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductanceet la perturbation & observation". Revue des Energies Renouvelables, 2013.

[34] KHETTAL MOHAMED ,LARABA ABD MOUMENE , "Commande MPPT par réseaux de neurones d'un générateur TEG " Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj ,2022.

[35] : Cabal, C. (2008). "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque " (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

[36] Xuejun Liu, et al. "An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays". 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany, 2004.

[37] Tyson Den Herder. " Design and simulation of photovoltaic super system using Simulink".Senior Project, California Polytechnic State University, 2006.

[38] A.Talha, "Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque, Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables", Ghardaïa, Algeria: SIENR'2010, Ghardaïa, Algeria, 2010.

[39] F.BENADEL, " Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour SystèmePV" ,mémoire de Master Académique, M'SILLA: département de génieélectrique: université de Mohamed Boudiaf - M'SILLA, 2016.

[40] H. Abbes, H. Abid et A. Toumi, "Etude comparative de cinq algorithmesde commande MPPT pour un système photovoltaïque", Tunisie, 2013.

[41] Touzet, C., "Les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme cours, exercices et travaux pratiques préf". de Jeanny Hérault. Collection de l'EERIE. 1992, Nanterre: Ec2. 148.

[42] L Bous elham, B.H., and H Hajji., " Comparative study of different mppt methods for photovoltaic system". In Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC),2015: p. 1-5.

[43] R. Tahar "Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité".

[44] M. Parizeau, "Réseaux de neurones", Livre PDF ,2004. ".

[45] F. Sorin, L. Broussard, P. Roblin, " Régulation d'un processus industriel par réseaux de".

[46] Gérald PETITJEAN "INTRODUCTION AUX RESEAUX DE NEURONES".

[47] McCulloch, W.; Pitts, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull. Math. Biophys. 1943, 5, 115–133..

[48] Grosan, C.; Abraham, A. Intelligent Systems: A Modern Approach; Intelligent Systems Reference Library; Springer: ".

[49] R. Tahar "Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité".

[50] HAMIAN Lamia, ABDELLATIF Wafaa , "commande par réseaux de neurone d'un filtrage actif parallèle de puissance alimente par un source photovoltaïque (théorie et pratique) " , Université Yahia Fares de Médéa, 2020/2021

[51] : F.Z. Peng.Z-source inverter ». In 37th IAS Annual Meeting. ConferenceRecord of the Industry Applications Conference, volume 2, pages 775 –781 vol.2,oct. 2002

[52] Violaine Didier, " Les onduleurs des systèmes photovoltaïques", Fonctionnement, Etat del'Art et Etude des Performances- Août 2007

[53] S. MECHERI, " Réalisation d'un onduleur de tension monophasé centrale par carteARDUINE ", Université de Constantine I, 2013/2014.

[54] Muhammad H. Rachid, "Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications ",PrenticeHall, Englewood CMs, New Jersey, 1993.

[55] C. Canudas de Wit, "Modélisation, Contrôle Vectoriel et DTC, Commande desMoteurs asynchrones ", Editions Hermés

[56] BOUKAROURA Abdelkader, " Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph ", Magister en Electrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.

[57] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).

[58] MESBAHI Nadhir, " Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multi-niveaux sur les Réseaux de Distribution ", Thèse de Doctorat, Option Réseaux Electriques. Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.

[59] BENZIADA .Mohamed Abdelghani, OUAIL Mohamed. " Utilisation convertisseur Z-source dans un système photovoltaïque ", thèse d'ingénieur d'État en Électrotechnique, juin 2015 à l'ENP

[60] Jin LI, Jinjun LIU, Zeng LIU, "Loss Oriented Evaluation and Comparison of Z-Source Inverters Using Différent Puise Width Modulation Stratégies", IEEE Applied Power Electronics Conférence and Exposition, pp. 851 -856, 2009.

[61] A. Meflah, "*Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque*", Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011

[62] Zidane Achref eddine, Sahtout Mehdi , "LES SYSTEMS PHOTOVOLTAIQUES CONNECTES AU RESAU",MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, juin 2017