

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

THÈME

**Etude par simulation de la connexion d'une source
d'énergie photovoltaïque au réseau électrique a
travers un convertisseur de type Z-source**

Préparé par : Mr. HAMZAOUI Lakhdar

Mlle. ALLAOUI Amira

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Youcef MESSELEM	Pr	Président
Ahmed SAFA	MCB	Examineur
Ahmed TAHRI	MCB	Examineur
Belkacem BELABBAS	MCB	Encadreur
Souad LARIBI	MCB	Co-Encadreur

Promotion : 2019/2020

Remerciement

*Ce n'est qu'après l'achèvement de cet humble travail que nous ne pouvons que remercier **ALLAH** Tout-Puissant qui nous a donné la force et la patience pour continuer et achever cette recherche.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus chaleureux et beaucoup d'appréciation à notre encadreur Monsieur **BELLABES Belkacem**, Docteur au département de génie électrique à l'Université Ibn Khaldoun(Tiaret), pour son encadrement, pour sa présence et ses conseils. Nous sommes très fiers d'avoir collaborés avec cette personne de grande qualité humaine et scientifique.*

*Nous remercions aussi Madame **LARJBI Souad**, Maître de conférences au département de génie électrique à l'Université Ibn Khaldoun (Tiaret), Co-encadrant de cette mémoire pour sa disponibilité, son soutien et son implication pour le bon déroulement de ce travail.*

*Nous remercions Monsieur **Youcef MESSLEM**, Professeur au département de génie électrique, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de soutenance.*

*Nous tenons à remercier Messieurs **Ahmed SAFA** et **Ahmed TAHRI** d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

Nous adressons nos sincères remerciements également à tout le corps enseignant de département de génie électrique, pour leurs disponibilités et encouragement.

Enfin, nous réservons une place privée à nos parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de notre travail, sans lequel rien ne serait possible.

Finalement, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Energies renouvelables.....	4
I.3. Energie photovoltaïque	4
I.4. Contexte énergétique.....	5
I.4.1. Production Mondiale de l'énergie photovoltaïque	5
I.4.2. Production en Algérie de l'énergie photovoltaïque.....	6
I.4.3. Intérêt économique de la production l'énergie photovoltaïque	6
I.5. Raccordement des GPV	7
I.5.1. GPV raccordé au réseau électrique	7
I.5.2. GPV raccordé au réseau autonome	7
I.6. Avantages et inconvénients du système PV	8
I.6.1. Avantages.....	8
I.6.2. Inconvénients	8
I.7. Équipement d'électronique de puissance utilise dans les systèmes photovoltaïques PV.....	9
I.7.1. Convertisseurs CC/CC	10
I.7.2. Convertisseurs CC/CA	10
I.7.3. Poursuite du Point de Puissance Maximum (PPM)	10
I.8. Conclusion	11
Chapitre II : Modélisation et la commande d'un générateur PV connecté à un hacheur	12
II.1. Introduction.....	13
II.2. Cellule photovoltaïque.....	13
II.2.1. Type des cellules.....	13
II.2.2. Rendement d'une cellule :	14
II.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	14
II.3.1. Module photovoltaïque utilisé	16
II.3.2. Caractéristiques de module photovoltaïque	16
II.3.4. Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque	17

II.3.4.1. Influence de la température.....	17
II.3.4.2. Influence de l'irradiation.....	18
II.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	19
II.4.1. Câblage séries des cellules.....	19
II.4.2. Câblage parallèles des cellules.....	20
II.4.3. Association série/parallèle	20
II.5. Effet d'éclairement non homogène sur le GPV : Ombrage partiel	21
II.6. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque	23
II.7. Modélisation hacheur Boost	24
II.8. PPM basée sur la méthode de perturbe et d'observe (P&O)	26
II.9. Résultats de simulation	27
II.9.1. Données météorologiques nominales	28
II.9.2. Irradiation variable.....	29
II.10. Conclusion	31
Chapitre III : Convertisseur de type Z-source.....	32
III.1. Introduction	33
III.2. Les convertisseurs Z-source	33
III.3. Modélisation du convertisseur CC-CC de type Z-source	34
III.4. Facteur de conversion de la tension continue et le facteur de conversion en courant	37
III.4.1. Facteur de conversion de la tension continu.....	37
III.4.2. Facteur de conversion en courant	38
III.5. Commande par mode glissant	38
III.5.1.Principe de l'algorithme de PPM à base de mode glissant	38
III.5.2. Objectif de la commande par mode glissant.....	39
III.5.3. Mise en œuvre de la commande par mode glissant	40
III.5.3.1. Algorithme de PPM à base de mode glissant pour le système PV	40
III.6. Résultats de simulation.....	41
III.6.1. Données météorologiques nominales	42
III.6.2. Variations de l'éclairement.....	43
III.6.3. Variations de la température.....	44

III.6.4. Variation de l'éclairage et la température	46
III.6.5. Variations de la charge	48
III.7. Conclusion.....	50
Chapitre IV : Chaine de conversion d'énergie PV connecté au réseau électrique	51
IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Description du système globale.....	52
IV.2.1. Filtre LCL.....	53
IV.2.2. Réseau électrique.....	53
IV.2.3. Synchronisation PLL.....	53
IV.2.4. Adaptation de l'énergie produite par le GPV avec le réseau électrique	54
IV.3. Onduleurs de type NPC.....	54
IV.3.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC	54
IV.3.2. Principe de fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	55
IV.3.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	55
IV.4. Système de contrôle pour le système de conversion d'énergie PV connecté au réseau électrique	56
IV.4.1. Contrôle de la puissance instantané (P/Q).....	56
IV.4.2. Régulation de la tension du bus continu.....	58
IV.5. Résultats de simulation.....	60
IV.5.1. Conditions nominales	61
IV.5.2. Eclairage variable.....	64
IV.5.3. Charge variable	65
IV.6. Conclusion.....	67
Conclusion générale	70
Annexes	72
Annexe A.....	73
Annexe B.....	75
Annexe C.....	78
Références bibliographiques	79
Résumé	82

Liste des figures

Chapitre I

Figure. I. 1. La capacité de l'énergie photovoltaïque ajoutée et cumulée en 2019 dans le monde.	5
Figure. I. 2. Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau de distribution.	7
Figure. I. 3. Exemple d'un système PV/ stockage connecté au réseau autonome.	8

Chapitre II

Figure. II. 1. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.	14
Figure. II. 2. Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.	14
Figure. II. 3. Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.	17
Figure. II. 4. Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.	17
Figure. II. 5. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température et $G = 1000\text{W/m}^2$	18
Figure. II. 6. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température et $G = 1000\text{W/m}^2$	18
Figure. II. 7. Caractéristique courant – tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation et $T=25\text{ }^\circ\text{C}$	19
Figure. II. 8. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation et $T=25\text{ }^\circ\text{C}$	19
Figure. II. 9. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série.	20
Figure. II. 10. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.	20
Figure. II. 11. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en sérié/parallèle.	21
Figure. II. 12. Synoptique de simulation de l'effet d'ombrage.	21
Figure. II. 13. Influence de l'éclairement non homogène sur les caractéristiques du GPV.	22
Figure. II. 14. Caractéristique du GPV pour un éclairement homogène.	23
Figure. II. 15. Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.	24
Figure. II. 16. Schéma de principe d'un convertisseur Boost.	24
Figure. II. 17. Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) :K fermé, (b) : ouvert.	25
Figure. II. 18. Caractéristique puissance - tension d'un panneau photovoltaïque.	27
Figure. II. 19. Organigramme de l'algorithme PPM de la perturbation & observation.	27
Figure. II. 20. Tensions d'entrée V_e et de sortie V_s hacheur boost.	28
Figure. II. 21. Courants d'entrée I_e et de sortie I_s hacheur boost.	29
Figure. II. 22. Profil de l'éclairement en fonction du temps.	30
Figure. II. 23. Puissance générée par GPV et la puissance de la sortie de hacheur.	30
Figure. II. 24. Tension générée par GPV et la tension de la sortie de hacheur.	30
Figure. II. 25. Courant générée par GPV et le courant de la sortie de hacheur.	31

Chapitre III

Figure. III. 1. Convertisseur Z-source.	34
---	----

Figure. III. 2. Modèle d'un hacheur élévateur de type Z-source.....	35
Figure. III. 3. Topologies de circuit dans le convertisseur de source Z.	36
Figure. III. 4. Principe de la commande par mode glissant.....	39
Figure. III. 5. Contrôleur par mode glissant.....	41
Figure. III. 6. Tension générée par GPV et de la sortie de l'hacheur Z-source.	42
Figure. III. 7. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.	42
Figure. III. 8. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	43
Figure. III. 9. Tension générée par GPV et de la sortie de l'hacheur Z-source.	43
Figure. III. 10. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.	44
Figure. III. 11. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	44
Figure. III. 12. Profil de température en fonction du temps.....	45
Figure. III. 13. Tension générée par GPV et de la sortie de hacheur Z-source.....	45
Figure. III. 14. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.	46
Figure. III. 15. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	46
Figure. III. 16. Profil de l'éclairement en fonction du temps.....	47
Figure. III. 17. Profil de température en fonction du temps.....	47
Figure. III. 18. Tension générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	47
Figure. III. 19. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.	48
Figure. III. 20. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	48
Figure. III. 21. Tension générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	49
Figure. III. 22. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.	49
Figure. III. 23. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.....	49

Chapitre IV

Figure. IV. 1. Système photovoltaïque triphasé connecté au réseau électrique.	53
Figure. IV. 2. Topologie de l'onduleur trois niveaux de type NPC.	55
Figure. IV. 3. Schéma de la commande d'un onduleur triphasé.	57
Figure. IV. 4. Schéma fonctionnel du contrôleur Backstepping de la tension V_{dc}	59
Figure. IV. 5. Schéma de pont de serrage.....	60
Figure. IV. 6. Puissance active du PV, réseau, charge.	61
Figure. IV. 7. Puissance réactive du PV, réseau, charge.	61
Figure. IV. 8. Facteur de puissance.	62
Figure. IV. 9. La forme d'onde des courant : (a) PV, (b) Réseau et (c) Charge.	63
Figure. IV. 10. RMS des courants.	63
Figure. IV. 11. Tension du système PV.....	64
Figure. IV. 12. Puissance active du PV, réseau, charge.	64
Figure. IV. 13. RMS des courants.	65
Figure. IV. 14. Puissance active du PV, réseau, charge.	66
Figure. IV. 15. RMS des courants.	66

Figure. IV. 16. Tension V_{dc} de Bus Continu. 67

Chapitre II

Tableau. II. 1. Les différents types des cellules avec leur rendement.....	14
Tableau. II. 2. Paramètres d'un module photovoltaïque KC200GT.	16
Tableau. II. 3. Paramètre du convertisseur Boost.	28

Chapitre IV

Tableau. IV. 1. THD du courant de système pendant une irradiation variable.	65
Tableau. IV. 2. THD du courant de système lors du changement de charge.	67

Liste des symboles

I_{ph} : Le courant généré par la lumière (V).

I_d : Le courant de la diode (V).

I_p : Le courant traversant la résistance parallèle (A).

I_{pv} : Le courant net de la cellule PV (A).

V_{pv} : La tension de la cellule (V).

P_{pv} : La puissance de la cellule (W).

V_d : La tension de la diode (V).

R_p : Résistances parallèle de la cellule (Ω).

R_s : Résistances série de la cellule (Ω).

I_0 : Le courant de saturation de la diode (A).

a : Le facteur d'idéalité de la diode.

V_t : La tension thermique (V).

N_s : Le nombre de cellules connectées en série.

K : La Constante de Boltzmann (J/K).

T : La température réelle K.

q : La charge de l'électron (C).

$I_{sc,n}$: Le courant nominal de court-circuit (A).

I_{sc} : Le courant de court-circuit (A).

T_n : La température nominale (K).

G et G_n : L'irradiation et l'irradiation nominale (W/m^2).

$V_{oc,n}$: La tension nominale en circuit ouvert (V).

K_V : Le coefficient de tension (V/K).

K_I : Le coefficient de courant (A/K).

N_{SS} : Nombre de modules dans le panneau en série (2).

N_{pp} : Nombre de modules dans le panneau en parallèle (2).

V_{oc} : La tension de circuit ouvert (V).

T_s : La période (s).

d : Rapport cyclique.

L_f : L'inductance de filtre de convertisseur Z-source (H).

C_f : Capacité de filtre de convertisseur Z-source (F).

V_{dc} : La tension de bus continu (V).

u : Rapport cyclique.

U_{eq} : La commande équivalent.

U_n : La commande normale.

$S(x)$: Surface de glissement.

Liste des abréviations

SER : Source d'Energie Renouvelable.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

IEA : International Energy Agency.

IRENA : Agence Internationale des Energies Renouvelables.

P&O: Perturbation et Observation.

CC: Courant Continu.

CA: Courant Alternatif.

PPM : Point de Puissance maximale.

MG : Mode Glissant.

NPC : Neutre Point Commun.

PI : Proportionnel Intégral.

CPS : Circuit du Pont de Serrage

PLL : Boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop).

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et d'amélioration des conditions de vie des sociétés. En raison de l'augmentation du coût des énergies conventionnelles et des limitations de leurs ressources, l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses d'avantages tels que l'absence de pollution et de disponibilité partout dans le monde. Il faut cependant noter que les principaux inconvénients de cette puissance sont le coût du générateur, qui reste élevé, ainsi que le rendement énergétique relativement faible [1].

L'énergie produite par les systèmes photovoltaïques est très faible, mais le besoin de fournir des solutions d'électronique de puissance innovantes se pose toujours lorsque l'on veut optimiser l'énergie extraite de cette source. Les convertisseurs de puissance occupent une place de plus en plus importante dans le processus de production d'énergie [2], notamment parmi les éléments de la chaîne de conversion photovoltaïque qui imposant certaines limitations c'est l'hacheur. La topologie de convertisseur Z-source nouvellement développée est bien adaptée à la puissance produite par les systèmes photovoltaïques et à améliorer la qualité de l'énergie produite et pour des performances plus élevées.

Le rendement des systèmes photovoltaïques aussi peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du Point de Puissance Maximale (PPM).

Il existe plusieurs méthodes qui ont été largement mises en œuvre pour suivre la PPM. La méthode la plus courante est : « Perturber et observer » (P&O), Cette méthode montrée, lors des variations des conditions météorologiques, une mauvaise convergence ou une oscillation autour du point de puissance optimale dans les conditions normales de fonctionnement [3]. Pour rendre le rendement du système PV plus efficace on oriente vers des nouvelles techniques intelligentes telles que la logique floue, les réseaux de neurones et commande par mode glissant, Backstepping, etc...

La connexion du système photovoltaïque au réseau électrique via un onduleur crée un circuit, appelé bus continu, qui doit être régulé. L'étage CC-CA nécessite un contrôle pour obtenir un bon rendement d'une part, et d'assurer un transit d'énergie coté réseau, assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, coté réseau d'autre part.

Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux, Nous entamerons le premier chapitre par une présentation des différentes sources d'énergies renouvelables, et notre étude porte sur le photovoltaïque, nous présenterons également la production mondiale et locale (Algérie) d'énergie photovoltaïque. De plus, les différentes structures du système photovoltaïque sont présentées. Un

état d'art sera brièvement décrit sur équipement d'électronique de puissance utilise dans les systèmes photovoltaïques PV.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la cellule PV ainsi le convertisseur CC-CC de type hacheur Boost contrôlé par un algorithme PPM qui permettent d'extraire le maximum d'énergie des modules PV.

Le troisième chapitre se focalise sur l'application de la nouvelle méthode sur une architecture de système PV à base d'un convertisseur de type Z-source. Nous proposerons le contrôleur par mode glissant pour la poursuite de PPM ainsi une simulation sous logiciel Matlab/SimPowerSystem du hacheur survolteur de type Z-source avec PPM-MG sera exécuté pour déterminer l'influence du changement climatique (éclairage et température) et variation de la charge sur le fonctionnement du système.

Dans le dernier chapitre, consiste à l'interface de raccordement CC-CA au réseau électrique, nous présenterons la modélisation et la commande de l'onduleur, ainsi la régulation du bus continu de l'onduleur par une commande avancée qui permet le transit de la puissance extraite par GPV au réseau électrique.

Enfin, une conclusion générale résumant le travail effectué.

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables

1.1. Introduction

La demande d'énergie électrique motive les chercheurs à s'intéresser aux domaines des énergies renouvelables. Le réchauffement climatique est une autre cause de l'augmentation de la tendance d'énergies renouvelables car elle produit un impact environnemental très réduit.

Diverses sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie Photovoltaïque (PV) solaire jouent un rôle très important pour la production d'énergie électrique. L'énergie PV est disponible dans la plupart des régions du monde et s'est avérée être une source d'énergie économique [4].

Différents types de convertisseurs de puissance sont conçus pour connecter la source d'énergie renouvelable de type PV au réseau électrique tels que l'hacheur élévateur de tension et l'onduleur.

Dans ce chapitre, un rappel sur les différents types d'énergies renouvelables, ainsi que du contexte énergétique mondial, puis des différentes structures des systèmes de production d'électricité. Néanmoins, le système photovoltaïque connecté au réseau électrique est l'objectif de notre projet de fin de d'étude.

1.2. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont les énergies qui proviennent des sources naturelles pratiquement inépuisables. Ils ne génèrent pas de gaz à effet de serre comme les combustibles fossiles. L'efficacité énergétique de ces Sources d'Energie Renouvelables (SER) varie en fonction du type d'énergie. Les principales SER sont :

- Énergie éolienne ;
- Énergie hydroélectrique ;
- Énergie biomasse ;
- Énergie géothermique ;
- Énergie marine ;
- Énergie Photovoltaïque (PV).

Pour ce projet de fin d'étude, nous nous intéressons à étudier une SER de type Photovoltaïque.

1.3. Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique [5]. L'électricité produite par cette SER sera injectée dans le réseau électrique ou stockée dans les systèmes de stockages.

Un Générateur Photovoltaïque (GPV) est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elle en série et en parallèle. Ces performances dépendent à des données météorologiques (température, éclairement).

I.4. Contexte énergétique

I.4.1. Production Mondiale de l'énergie photovoltaïque

La croissance mondiale du photovoltaïque est extrêmement dynamique et varie fortement selon les pays. D'après les statistiques IEA (International Energy Agency), en 2020, il y avait au moins 37 pays dans le monde avec une capacité photovoltaïque cumulée de plus d'un gigawatt.

À la fin de 2019, une quantité cumulée de 629 GW d'énergie solaire avait été installée dans le monde. Début 2020, le principal pays de l'énergie solaire était la Chine avec 208 GW, représentant un tiers de la capacité solaire installée mondiale. À la fin de 2016, la capacité photovoltaïque cumulée a augmenté de plus de 75 gigawatts (GW) et atteint au moins 303 GW, suffisante pour fournir environ 1,8% de la consommation mondiale totale d'électricité. Les principaux installateurs de 2016 à 2019 étaient la Chine, les États-Unis et l'Inde.

La capacité solaire photovoltaïque disponible au Honduras est maintenant suffisante pour fournir 12,5% de l'énergie électrique du pays, tandis que l'Italie, l'Allemagne et la Grèce peuvent produire entre 7% et 8% de leur consommation d'électricité domestique respective [6]. La figure (I.1) représente la capacité solaire photovoltaïque ajoutée et cumulée mondiale en année 2019.

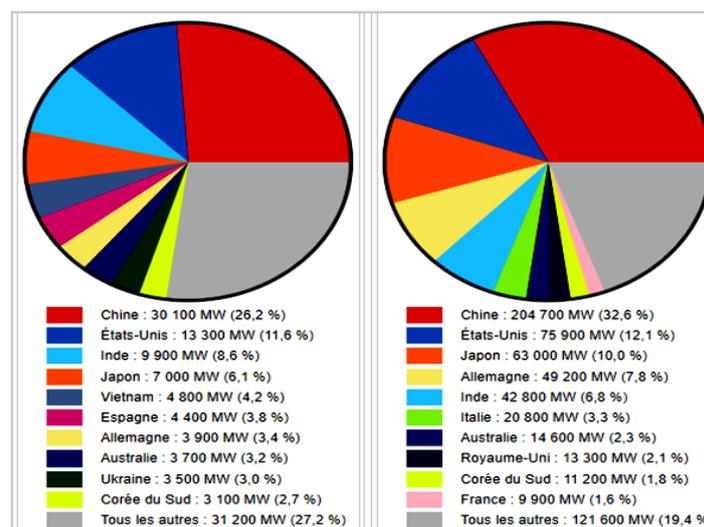


Figure. I. 1. La capacité de l'énergie photovoltaïque ajoutée et cumulée en 2019 dans le monde.

1.4.2. Production en Algérie de l'énergie photovoltaïque

L'Algérie dispose d'un grand potentiel dans les énergies renouvelables, dominées par l'énergie solaire. L'État considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers la création d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Il est donc temps de faire de l'accès aux énergies renouvelables une priorité pour favoriser le développement du secteur économique du pays.

Suivant la situation géographique de l'Algérie. Elle bénéficie des conditions favorables à l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire. L'Algérie reçoit annuellement sur l'ensemble de son territoire une énergie solaire des plus importantes du monde. Elle s'élève environ 5,2 million de milliards de *KWh/An*, soit l'équivalent de : 430 fois les réserves algériennes prouvées en hydrocarbures et 4,8 fois les réserves mondiales prouvées en pétrole [7].

Le solaire est le potentiel le plus important en énergies renouvelables en Algérie. Il représente 169,44 *TWh/An*, soit 5000 fois la consommation algérienne en électricité. Ainsi, avec plus de 2000 heures d'insolation par année et jusqu'à 3900 heures sur les hauts plateaux et au Sahara, l'énergie solaire reçue quotidiennement sur le territoire algérien est de l'ordre de 1700 *KWh/m²/An* au Nord et 2263 *KWh/m²/An* au Sud. Soit une moyenne de plus de 2200 *KWh/m²/An*.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale d'un mètre cube (m^3) est de l'ordre de 5 *KWh/m³/An* sur la majeure partie du territoire algérien, soit près de 1700 *KWh/m³/An* au Nord et 2650 *KWh/m³/An* au sud du pays [6].

L'Algérie comptait, en mai 2018, 24 centrales photovoltaïques d'une puissance totale de 344 *MW*. D'après les dernières statistiques faites en 2019 par l'Agence Internationale des Energies Renouvelables (IRENA), la capacité photovoltaïque cumulée en Algérie est d'ordre 423 *MW* [8].

1.4.3. Intérêt économique de la production l'énergie photovoltaïque

Le coût économique des énergies renouvelables, particulièrement celle du photovoltaïque, est la plus grande barrière à sa pénétration et sa dissémination. Néanmoins, le désir fort de réduire les émissions environnementales et de surmonter les problèmes des marchés électriques (dérégulés), sont considérés comme un grand appui des sources d'énergie du PV.

Le coût énergétique peut être réduit en diminuant l'investissement nécessaire ou en augmentant le rendement d'énergie d'un système. Le rendement des onduleurs d'aujourd'hui, pour le raccordement au réseau, est supérieur à 90%, ce qui est déjà très élevé. Néanmoins, il peut encore être augmenté par l'optimisation des aspects de conception. Les possibilités sont les techniques de conception des conditionneurs de différentes configurations et l'application de nouveaux composants plus efficaces [9].

1.5. Raccordement des GPV

Les GPV peuvent être classés en deux catégories :

- Raccordé au réseau,
- Autonome, isolé du réseau.

1.5.1. GPV raccordé au réseau électrique

Les systèmes PV, connectés au réseau sont utilisés le plus souvent pour vendre la totalité de l'énergie produite. Dans le cas d'une installation PV domestique, l'électricité issue du GPV peut être auto consommée et le surplus est vendu à l'opérateur du réseau. Dans ce cas, le réseau est utilisé pour l'alimentation en manque d'énergie du GPV. La figure (I.2) présente un système PV connecté au réseau électrique.

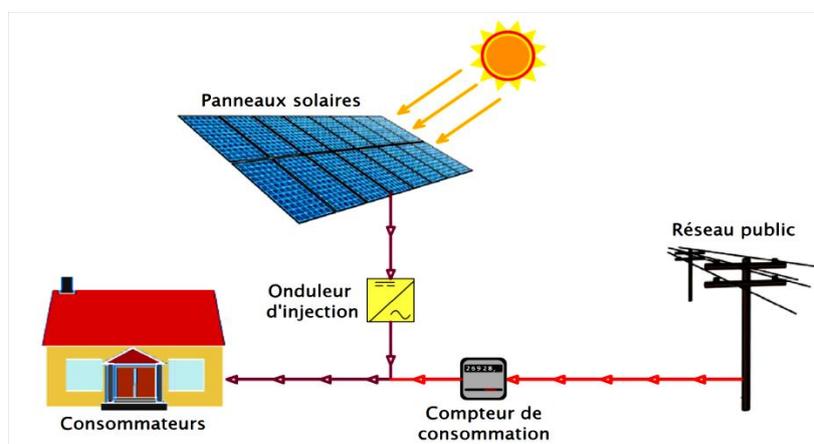


Figure. I. 2. Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau de distribution.

1.5.2. GPV raccordé au réseau autonome

Les systèmes autonomes sont employés pour alimenter directement les demandes des charges. Ce mode de fonctionnement nécessite une association d'un système de stockage afin d'assurer l'alimentation en cas de panne du GPV. La figure (I.3) représente l'exemple d'un système PV / stockage connecté dans le réseau autonome. Le système de stockage est associé au GPV à travers

un convertisseur DC-DC bidirectionnel pour assurer l'alimentation continue au fur et à mesure malgré l'intermittence de la production.

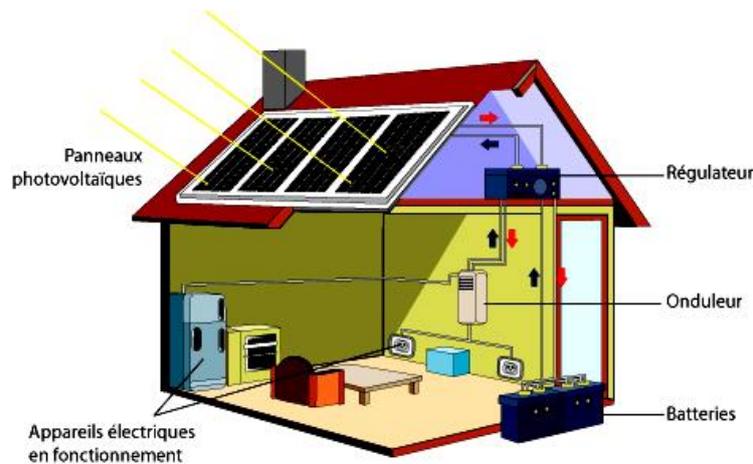


Figure. I. 3. Exemple d'un système PV/ stockage connecté au réseau autonome.

1.6. Avantages et inconvénients du système PV

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

1.6.1. Avantages

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [10].

1.6.2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergies en régions isolées. Sous un ensoleillement nominal de $1000 W/m^2$, $12 m^2$ de capteurs PV sont nécessaires pour fournir $1KWc$, ce qui induit un coût élevé du watt crête.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du système est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste étant dissipé sous forme de chaleur. C'est cette chaleur qui peut donc être exploitée et nous pouvons augmenter ainsi le rendement global (électrique et thermique des capteurs photovoltaïques)
- Les systèmes raccordés au réseau sont économiques, surtout si le coût de la technologie PV devient compétitif à celui de l'énergie traditionnelle. Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux, le choix d'un système photovoltaïque dépend souvent d'une décision personnelle axée sur le style de vie tout comme le type de maison ou de voiture que vous pourriez avoir [11], [12].

1.7. Équipement d'électronique de puissance utilisé dans les systèmes photovoltaïques PV

Actuellement, les systèmes PV utilisés dans les applications industrielles et particulières connaissent un grand progrès et évolution, cette progression est due au développement des équipements de l'électronique de puissance. Les deux équipements principaux dans les systèmes PV sont les convertisseurs statiques, tel que les convertisseurs CC et CA [13].

En générale, un système photovoltaïque comporte un ensemble de sous systèmes distincts en relation entre eux. Parmi les sous systèmes qui permettent de relier aisément un Générateur Photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue, c'est ce qu'on appelle l'étage d'adaptation CC/CC, qui a une efficacité de conversion très élevée.

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur [14].

L'adaptateur communément utilisé en photovoltaïque est un convertisseur statique (convertisseur de puissance CC/CC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survolteur ou dévolteur [14].

De plus l'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue donc pour quelle soit compatible avec le réseau dans le cas où on veut injecter cette électricité dans ce dernier il faut insérer un onduleur (CC/CA) entre le champ de production et le réseau électrique.

1.7.1. Convertisseurs CC/CC

Dans le système PV, les convertisseurs de puissance CC/CC sont utilisés pour changer la tension de sortie d'un niveau à un autre niveau de tension. En règle générale, le convertisseur CC/CC est connecté entre le panneau et la charge, séquentiellement pour extraire la puissance disponible du panneau à l'aide de méthodes de suivi [15]. Généralement les hacheurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes PV, les systèmes photovoltaïques subissent de nombreuses pertes en raison du manque d'optimisation, qui est souvent dû aux utilisations difficiles des convertisseurs CC/CC.

Pour cette raison, nous recherchons une nouvelle structure qui offre de bonnes performances dans la chaîne de conversion pour améliorer la qualité énergétique produite par le PV, en utilisant notamment un hacheur survolteur de type Z-source.

Dans ce travail on utilise deux structures hacheur élévateur (Boost), et hacheur survolteur de type Z-source.

1.7.2. Convertisseurs CC/CA

Convertisseurs CC/CA ce sont des appareils servant à convertir la tension continue fournie par les panneaux pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant avec une tension alternative, Ce convertisseur est appelé les onduleurs.

1.7.3. Poursuite du Point de Puissance Maximum (PPM)

L'efficacité de conversion d'énergie d'un GPV est plutôt faible et varie en fonction de l'éclairement et la température. Le contrôle du suivi du point de puissance maximale d'un module PV est un problème compliqué. Par conséquent, pour surmonter ces problèmes et obtenir une efficacité maximale, le système PV nécessite une application d'un algorithme de PPM pour le but

d'extraire une puissance optimale pour différentes conditions de fonctionnement. Pour atténuer ces problèmes, diverses stratégies de contrôle de suivi de la puissance optimale étaient déjà discutées dans la littérature pour l'obtention d'une meilleure efficacité de conversion énergétique pour toutes les données météorologiques, telles que l'algorithme Perturbe et Observe (P&O) et conductance incrémentale sont les plus couramment utilisées dans les algorithmes du PPM.

Ces stratégies de contrôle présentent certains inconvénients tels que la robustesse, le coût élevé, la complexité et la difficulté pour la mise en œuvre. Pour surmonter ces inconvénients et assurer l'efficacité de conversion d'énergie maximale d'un GPV, plusieurs recherches dans le cadre de l'approche d'intelligence artificielle comme la logique floue et le Réseau Neuronal [16]. Il se caractérise par sa fiabilité, la robustesse et rapidité, et d'autres lois de commandes peuvent être utilisées pour avoir de meilleures performances, comme les modes glissants [17].

Dans notre travail, deux méthodes de recherche ont été sélectionnées et mises en œuvre :

- Méthode de perturbe et observe (P&O)
- L'algorithme PPM basé sur le mode glissant.

1.8. Conclusion

Les systèmes photovoltaïques ont connu un développement profond ces dernières années en raison de l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes ressources énergétiques permettant de produire de l'électricité par sources d'énergie renouvelables. Nous sommes intéressés uniquement au cas de l'énergie photovoltaïque. Nous avons aussi exposé contexte énergétique mondial et la potentielle énergie solaire photovoltaïque en Algérie. Ainsi qu'on a exposé brièvement quelques topologies de base des hacheurs élévateurs de tension.

Dans le deuxième chapitre qui est consacrée à la modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque connectée à un hacheur de type survolteur (Boost) contrôlé par un algorithme de PPM.

***Chapitre II : Modélisation et la
commande d'un générateur PV
connecté à un hacheur***

II.1. Introduction

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée [18].

Le problème de connexion GPV-charge et la nécessité d'un étage d'adaptation. En effet, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge. Cet étage est constitué d'un convertisseur CC-CC élévateur de tension (Boost).

Afin de maximiser l'efficacité du système d'énergie photovoltaïque, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (PPM) de la source d'entrée.

Dans ce contexte, un algorithme de PPM basé sur la méthode classique P&O pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV et d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

Dans ce chapitre, nous décrivons une modélisation d'une cellule photovoltaïque afin de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du module PV en montrant l'influence des conditions météorologiques (éclairage et température). Ensuite un modèle mathématique d'un hacheur survolteur commandé par méthode P&O pour la recherche du point maximal de puissance du GPV.

II.2. Cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre-elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire reçue. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (SI), c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [19].

II.2.1. Type des cellules : La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type mono, poly cristallin ou amorphe [20].

- Cellules monocristallines : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- Les cellules poly cristallin : Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

- Les cellules amorphes : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

II.2.2. Rendement d'une cellule : Le tableau (II.1) présente les différents types des cellules avec leur rendement

Tableau. II. 1. Les différents types des cellules avec leur rendement.

<i>Technologie de cellules</i>	<i>Rendement en laboratoire</i>	<i>Rendement production</i>
<i>Silicium amorphe (a-Si)</i>	13%	5 à 9%
<i>Silicium poly cristallin (p-Si)</i>	19,8%	11 à 15 %
<i>Silicium monocristallin (m-Si)</i>	24,7%	13 à 17%

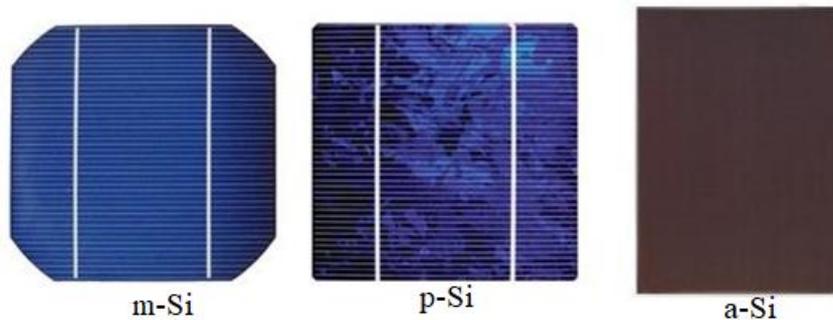


Figure. II.1.

Figure. II. 1. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.

II.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

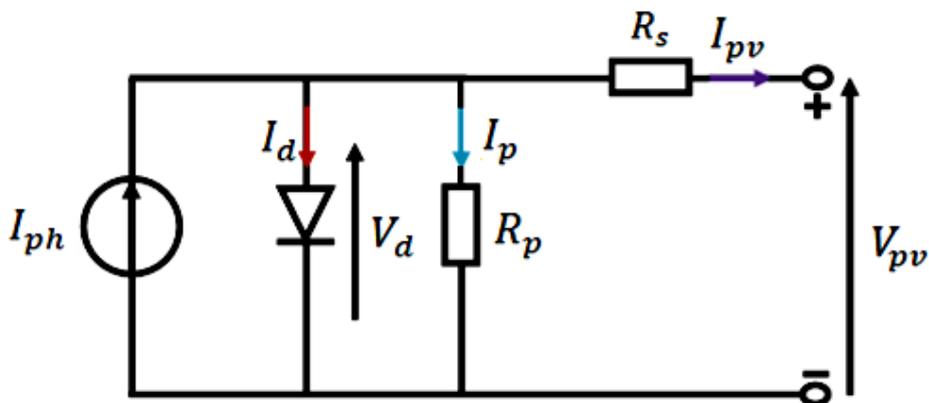


Figure. II. 2. Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.

Un modèle de circuit équivalent de base d'une cellule PV est illustré à la figure (II.2). Où I_{ph} est le courant généré par la lumière (LGC), I_d est le courant de la diode, I_p est le courant traversant la

résistance parallèle R_p , I_{pv} est le courant net de la cellule PV, V_{pv} est la tension de la cellule, V_d est la tension de la diode, R_p et R_s sont les résistances parallèle et série de la cellule respectivement. En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant I_{pv} est donné par [21]:

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

Le courant délivré d'une jonction P-N en Silicium et le courant a ses bornes, est donnée par : (I_d et I_p) par leurs équations dans l'équation (II.2) et (II.3) respectivement.

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 2})$$

$$I_p = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II. 3})$$

On remplace ces courants (I_d et I_p) par leurs équations dans l'équation (II.1) on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II. 4})$$

$$V_t = \frac{K \cdot N_s \cdot T}{q} \quad (\text{II. 5})$$

Où I_o est le courant de saturation de la diode, a est le facteur d'idéalité de la diode, V_t est la tension thermique, N_s représente le nombre de cellules connectées en série, K désigne la Constante de Boltzmann, T est la température réelle et q est la charge de l'électron.

Le courant généré par la photopile (LGC) d'une cellule photovoltaïque élémentaire est difficile à déterminer car il est influencé par les deux résistances. Les fiches techniques fournissent uniquement le courant nominal de court-circuit $I_{sc,n}$ qui est le courant maximum qui peut être généré à partir de la cellule PV. Un commun l'hypothèse utilisée dans les modèles PV est $I_{sc} \approx I_{pv}$ car dans les dispositifs pratiques, R_p est élevé et R_s est faible. Avec cette hypothèse, le courant généré par la photopile peut être exprimé comme:

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_I \cdot \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II. 6})$$

Où I_{sc} est un courant de court-circuit, $\Delta_T = T - T_n$ (T_n est la température nominale), G et G_n sont respectivement l'irradiation et l'irradiation nominale sur la surface du dispositif.

I_o Le courant inverse de saturation de la diode s'exprime en fonction des caractéristiques du matériau et de la température comme suit :

$$I_0 = \frac{K_I \cdot \Delta T + I_{sc,n}}{\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \cdot \Delta T}{a \cdot V_t}\right)^{-1}} \quad (\text{II. 7})$$

Où $V_{oc,n}$ est la tension nominale en circuit ouvert, K_V et K_I sont les coefficients de tension et courant respectivement.

II.3.1. Module photovoltaïque utilisé

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module ($I_{sc,n}$, $V_{oc,n}$ et P_{pv} ...) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C). Le tableau suivant montre les données d'un module photovoltaïque, de type KC200GT.

Tableau. II. 2. Paramètres d'un module photovoltaïque KC200GT.

Paramètres	Unités	Valeurs
P_{pv}	W	200.143
$V_{oc,n}$	V	32.9
$I_{sc,n}$	A	8.214
$I_{0,n}$	A	$9.825 \cdot 10^{-8}$
I_{mp}	A	7.61
V_{mp}	V	26.3
$I_{pv,n}$	A	8.21
R_p	Ω	415.405
R_s	Ω	0.221
K_V	V/K	-0.123
K_I	A/K	0.0032
G_n	W/m^2	1000
T_n	K	298.15
a	-	1.3
N_s	-	54
K	J/K	$1.381 \cdot 10^{-23}$
q	C	$1.602 \cdot 10^{-19}$

II.3.2. Caractéristiques de module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module

KC200GT (voir tableau (II.2)) sont présentées dans les conditions standards de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C).

D'après la figure (II.3) on peut voir 3 zones principales :

- **Zone 1** : le GPV est un générateur de courant (le courant est constant).
- **Zone 2** : c'est la zone de travail du GPV (où se trouve le point de puissance maximale).
- **Zone 3** : le GPV est un générateur de tension (la tension est presque constante).

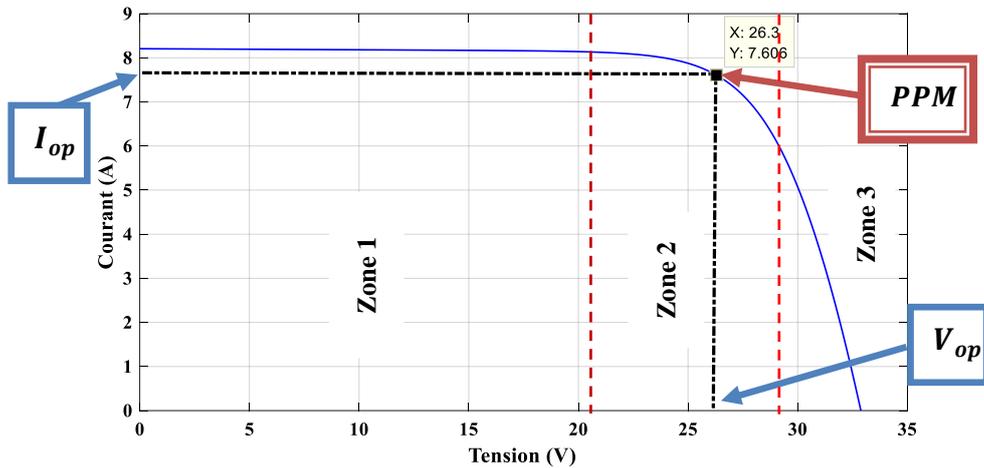


Figure. II. 3. Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.

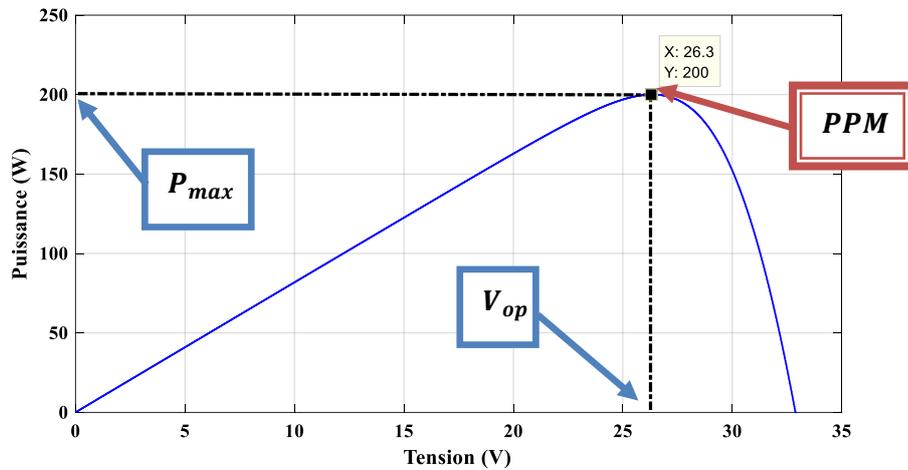


Figure. II. 4. Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.

II.3.4. Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque

II.3.4.1. Influence de la température

Suivant les figures (II.5) et (II.6), on constate que lorsque la température augmente à irradiation constante la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue fortement et le courant de court circuit I_{sc} augmente légèrement.

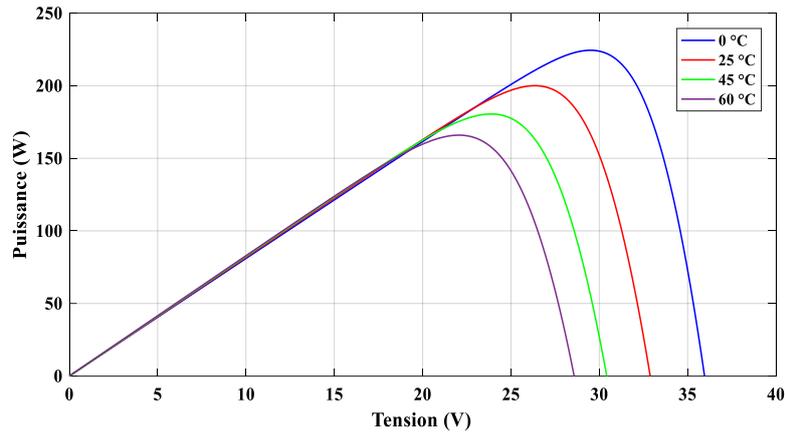


Figure. II. 5. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température et $G = 1000\text{W/m}^2$.

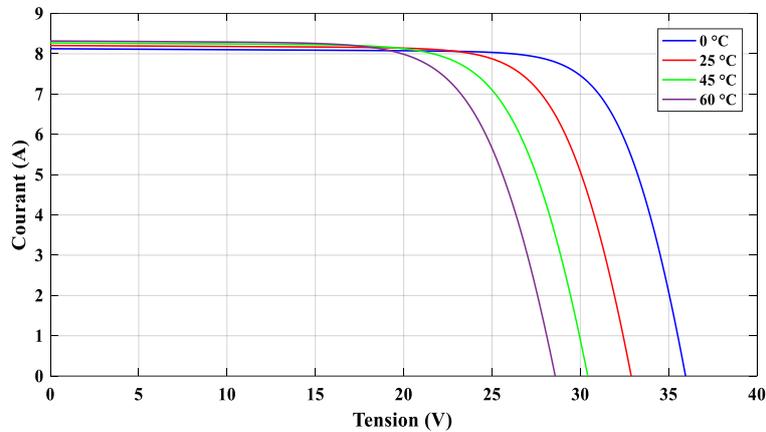


Figure. II. 6. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température et $G = 1000\text{W/m}^2$.

II.3.4.2. Influence de l'irradiation

Les caractéristiques des figures (II.7) et (II.8) montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement.

On peut constater l'existence des points optimaux sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée.

On peut constater aussi que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'irradiation. D'autre part, la tension de circuit ouvert V_{oc} varie très peu.

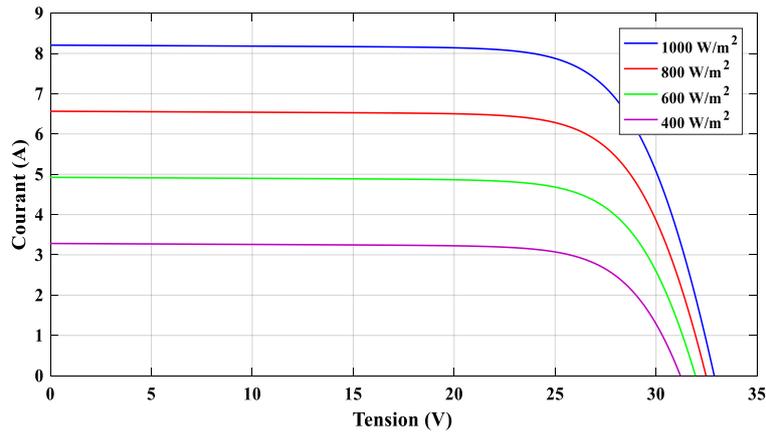


Figure. II. 7. Caractéristique courant – tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiation et $T=25\text{ °C}$.

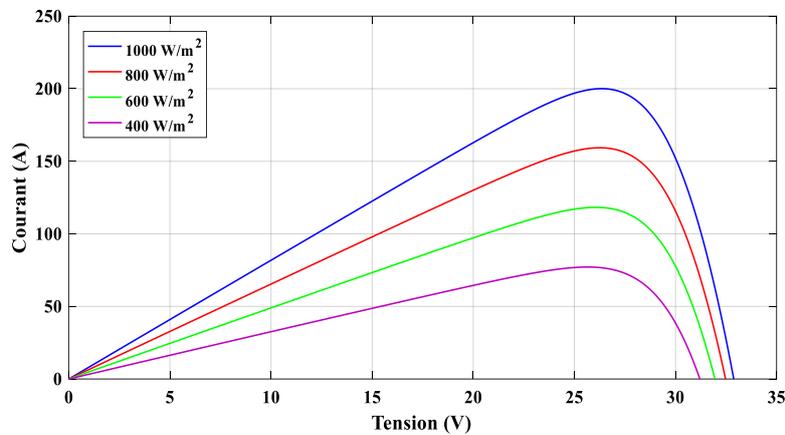


Figure. II. 8. Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiation et $T=25\text{ °C}$.

II.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur.

D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmente. Généralement on utilise un montage série/parallèle qui permet de régler à la fois la tension et le courant. Les cellules sont associées entre elles en série et les modules sont associés en parallèle.

II.4.1. Câblage séries des cellules

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Les tensions de toutes les cellules s'ajoutent et le courant est le même que celui d'une seule cellule. C'est pourquoi il faut toujours des cellules de même courant pour les mettre en série. En fabrication, on appelle cela l'appairage : on

trie les cellules selon leur courant pour les câbler en série. Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet.

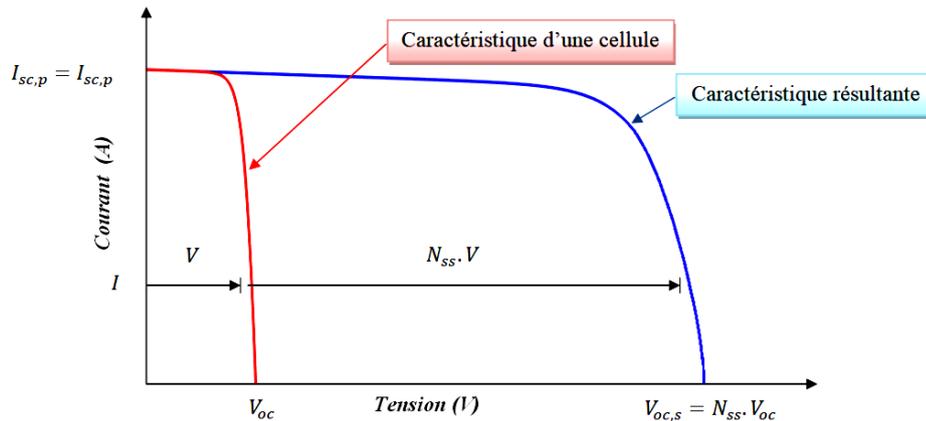


Figure. II. 9. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série.

II.4.2. Câblage parallèles des cellules

Lorsque les cellules sont connectées en parallèles, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante. Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant.

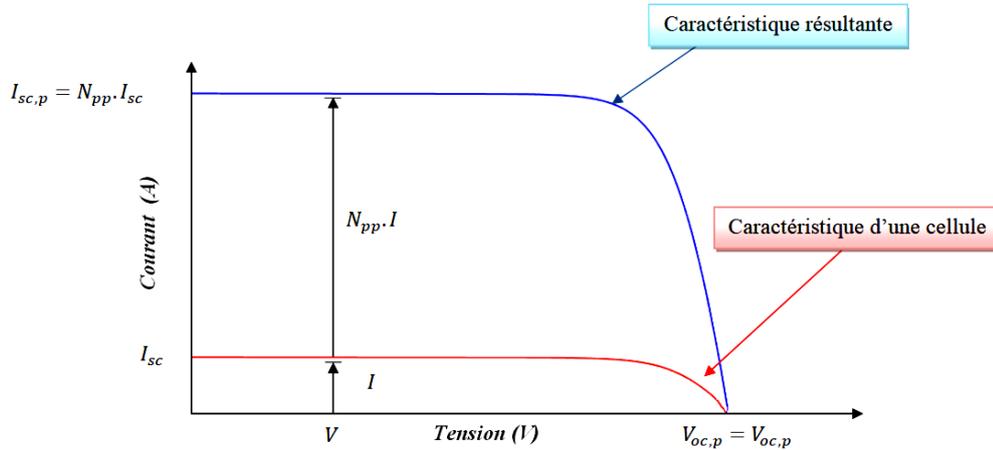


Figure. II. 10. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.

II.4.3. Association série/parallèle

Comme on a dit précédent lors une association série parallèle le problème qui se pose lorsque on a une cellule moins performantes devient consommatrice donc on utilise une diode by-pass pour éviter ce problème et les diodes anti retour pour éviter le retour de courant des autres modules lors disfonctionnement.

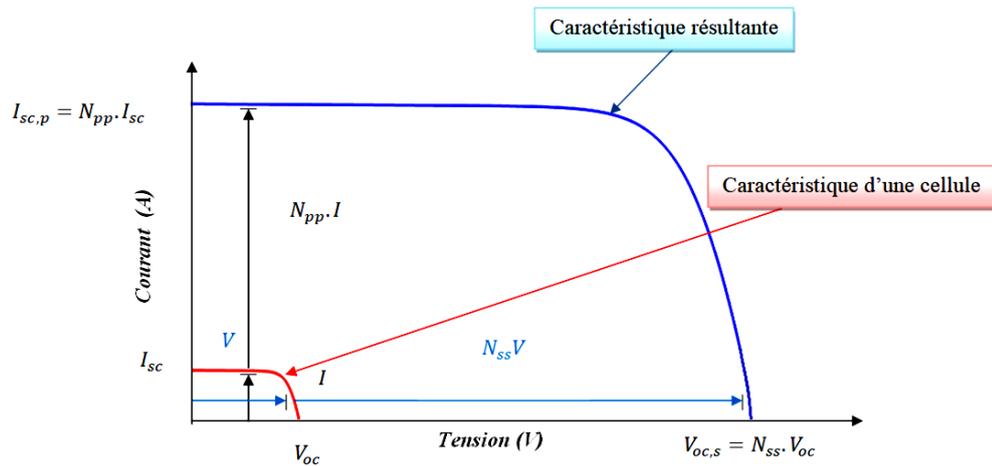


Figure. II. 11. Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série/parallèle.

II.5. Effet d'éclairement non homogène sur le GPV : Ombrage partiel

Cette section a pour but de marquer l'effet de l'ombrage partiel ou d'éclairement constant et non homogène sur le GPV. Pour cela, on considère un GPV composé de quatre modules type **KC200GT**. Chacun est capable de fournir une puissance crête de 200.143 W dans les conditions standard (25 °C, 1000 W/m²). On fixe la température à la valeur de référence et on met les quatre modules à des éclaircements constants mais différents. Les deux premiers sont soumis à 1000 W/m², et les deux derniers à 500 W/m² comme le montre le synoptique de simulation dans la figure (II.12).

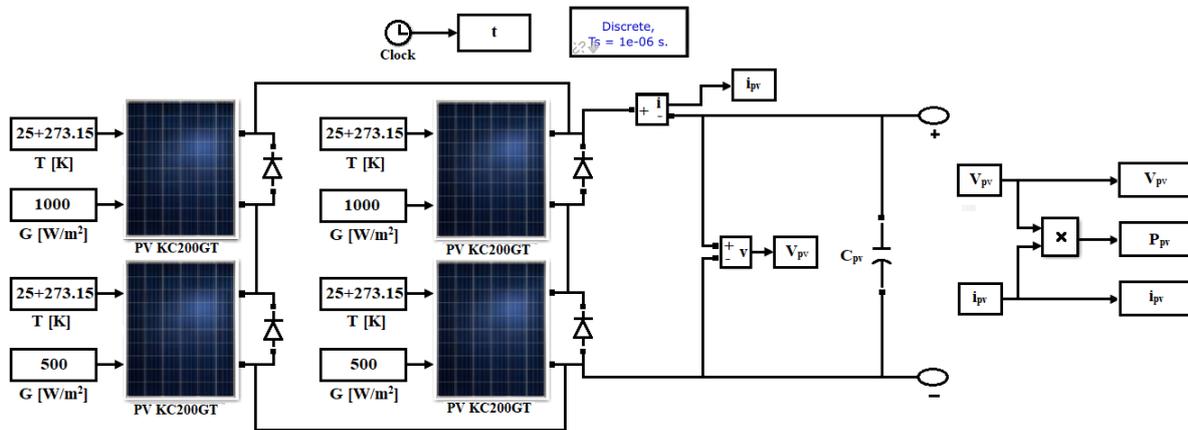
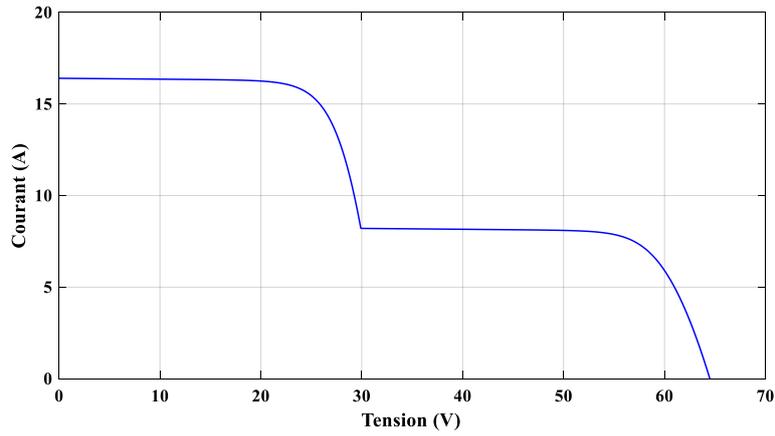


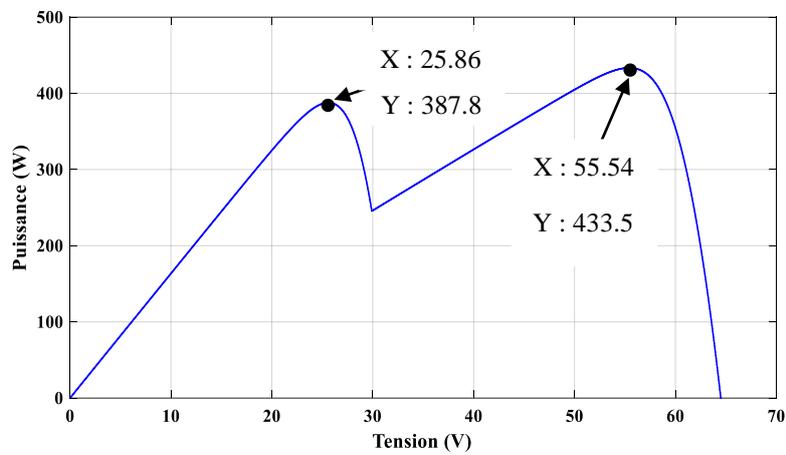
Figure. II. 12. Synoptique de simulation de l'effet d'ombrage.

L'influence de l'ensoleillement non homogène sur les caractéristiques P-V et I-V est respectivement illustrée dans la figure II.13 (a, b).

On constate l'existence deux PPM locaux et un PPM global d'environ 433.5 W. Pour le même GPV.



a) Caractéristique courant – tension du GPV

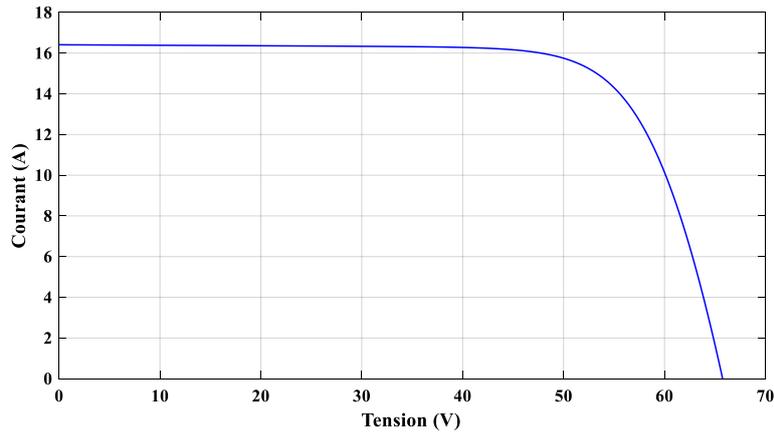


b) Caractéristique puissance – tension du GPV

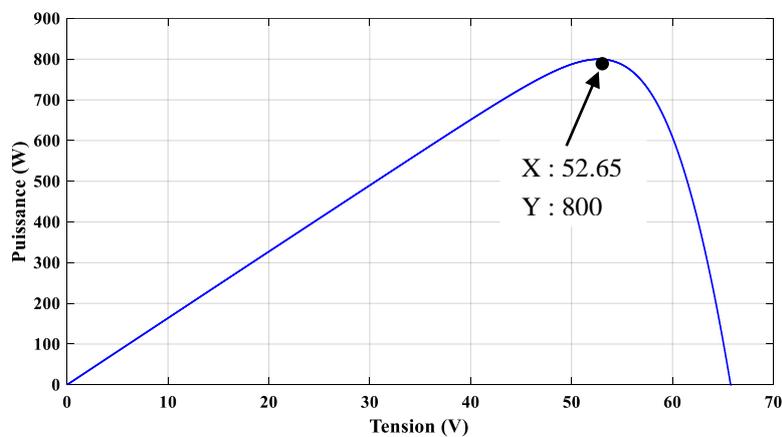
Figure. II. 13. Influence de l'éclairement non homogène sur les caractéristiques du GPV.

On refait le test en considérant un éclairement constant et homogène de 1000 W/m^2 , c'est-à-dire les deux modules ombragés (à 500 W/m^2) deviennent bien éclairés (à 1000 W/m^2 dans les conditions standard).

Le résultat de simulation est présenté dans la figure II.14 (a, b). Dans ce cas, on obtient un PPM de 800 W .



a) Caractéristique courant – tension du GPV



b) Caractéristique puissance – tension du GPV

Figure. II. 14. Caractéristique du GPV pour un éclairement homogène.

En résumé, l'effet de l'ensoleillement non homogène se résume par une perte de puissance d'environ de 45.8125%. Si on considère que les quatre modules opèrent indépendamment l'un de l'autre et sous leurs propres conditions, on aura la puissance de crête de l'ensemble en série égale à la somme des quatre puissances de chacun, soit $97.69W + 200W + 97.69W + 200W$. Avec l'éclairement non homogène on peut tirer que 72.8106% de la puissance que normalement on doit avoir.

Le programme qui permet de calculer les différents pourcentages au cas d'un ombrage partiel est présenté dans l'annexe A.

II.6. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa 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 utilisés dans les installations actuelles [22]:

- 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.

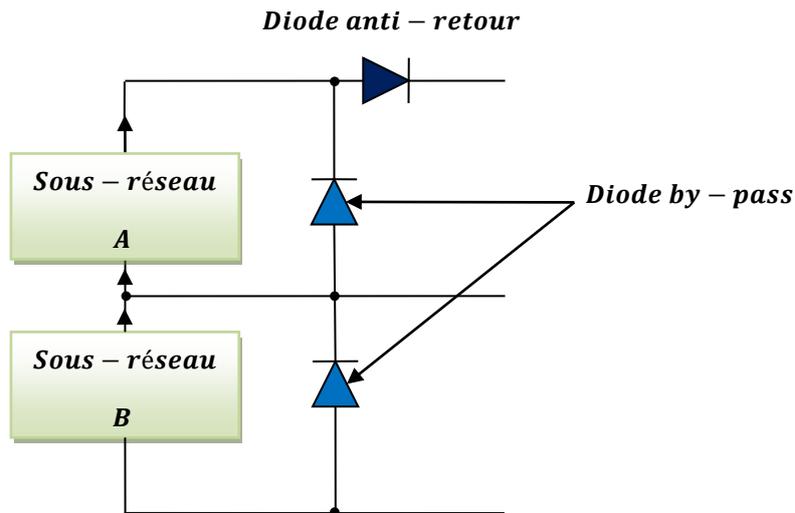


Figure. II. 15. Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

II.7. Modélisation hacheur Boost

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et la charge, connu aussi sous le nom de « Boost », elle permet d'augmenter la tension d'entrée à niveau supérieur ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.16).

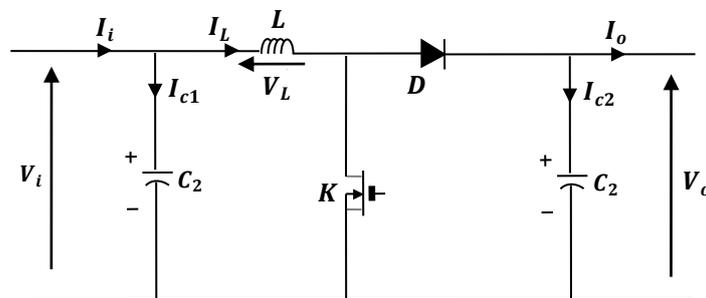


Figure. II. 16. Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.17) des deux phases de fonctionnement donne [23]:

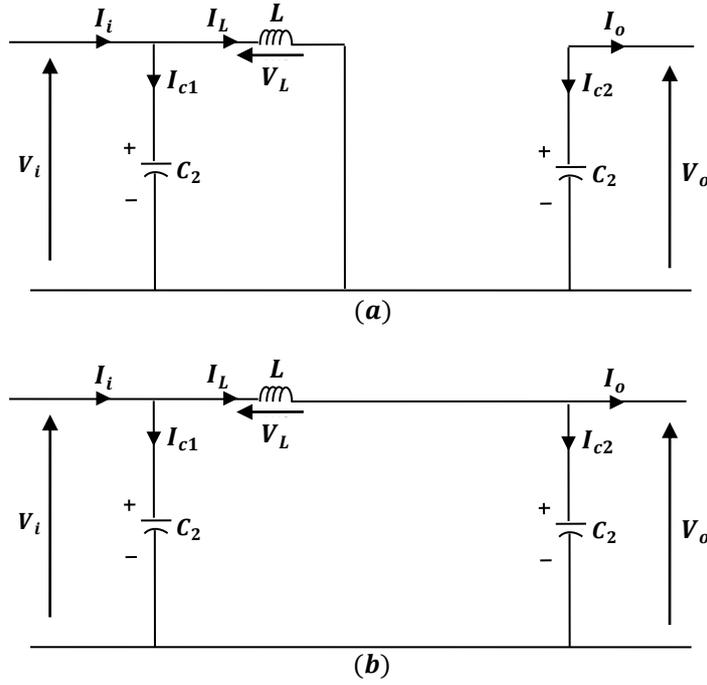


Figure. II. 17. Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) :K fermé, (b) : ouvert.

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (II. 8)$$

Pour la deuxième période $(1 - d)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (II. 9)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt} dT_s + \frac{dx}{dt(1-d)T_s} (1 - d)T_s \quad (II. 10)$$

En appliquant la relation (II.10) sur les systèmes d'équations (II.8) et (II.9), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s(i_i - i_L) \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} T_s = -dT_s i_0 + (1-d)T_s(i_L - i_0) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = -dT_s V_i + (1-d)T_s(V_i - V_0) \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

Où le gain de transfert de tension est :

$$G = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-d} \quad (\text{II. 13})$$

II.8. PPM basée sur la méthode de perturbe et d'observe (P&O)

L'algorithme Perturbe et Observe (P&O) est la méthode de suivi couramment utilisée pour l'extraction de la maximum puissance de la source PV. L'algorithme est simple et pratique, les considérations de mise en œuvre sont plus faciles [15]. Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance. La figure (II.18) montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite [24].

De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM [24].

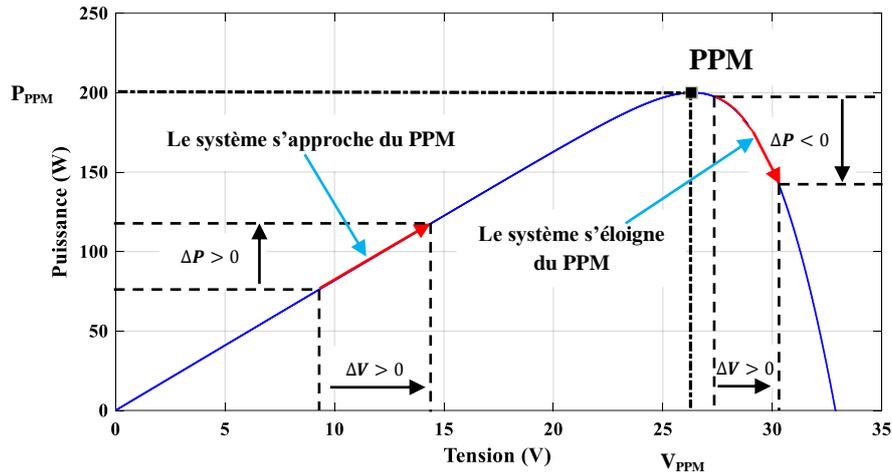


Figure. II. 18. Caractéristique puissance - tension d'un panneau photovoltaïque.

La figure (II.19) illustre l'organigramme de la commande PPM de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant.

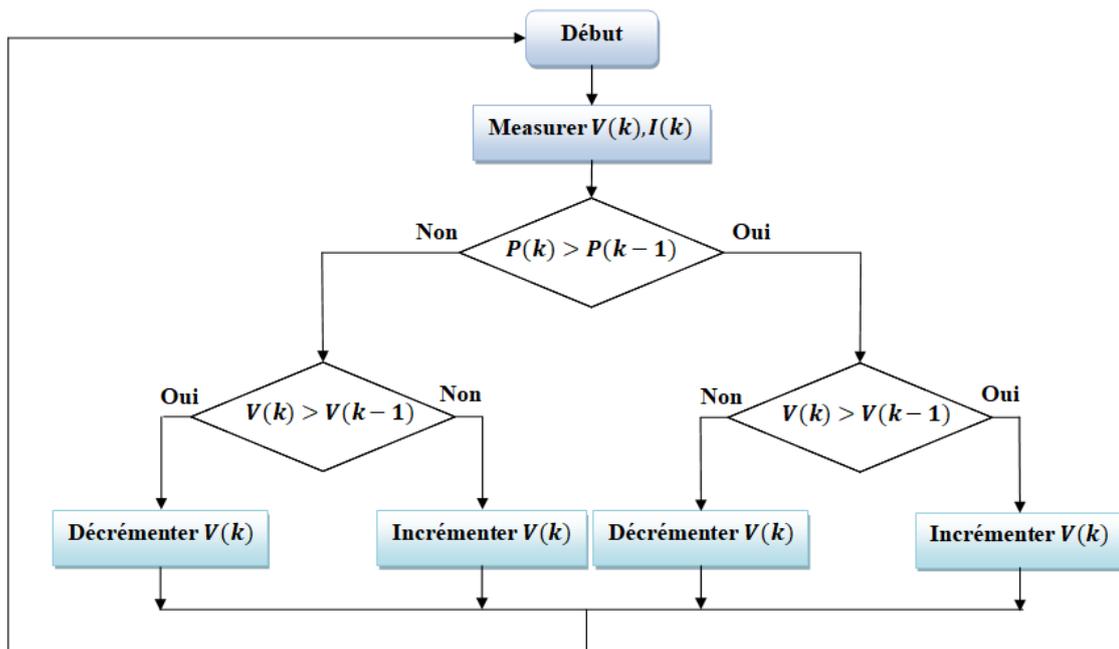


Figure. II. 19. Organigramme de l'algorithme PPM de la perturbation & observation.

II.9. Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la simulation du générateur PV connecté à un hacheur boost commandé par PPM-P&O, évalué à l'aide du logiciel MATLAB / SimPowerSystem. Les paramètres du système proposés sont répertoriés dans tableaux II.2 et II.3.

Tableau. II. 3. Paramètre du convertisseur Boost.

Paramètres	Unités	Valeurs
C_1	μF	100
C_2	μF	12000
L	mH	5

II.9.1. Données météorologiques nominales

Dans ce teste, nous avons considéré que l'irradiation est fixée sur sa valeur nominale de $1000 W/m^2$ et la température à une valeur de $298 ^\circ K$.

Le système photovoltaïque génère une faible tension, il est donc nécessaire d'utiliser un hacheur survolteur (Boost) afin d'augmenter cette tension pour quelle être exploitable.

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (II.20), (II.21). Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur.

Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée avec une démunissions du courant. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

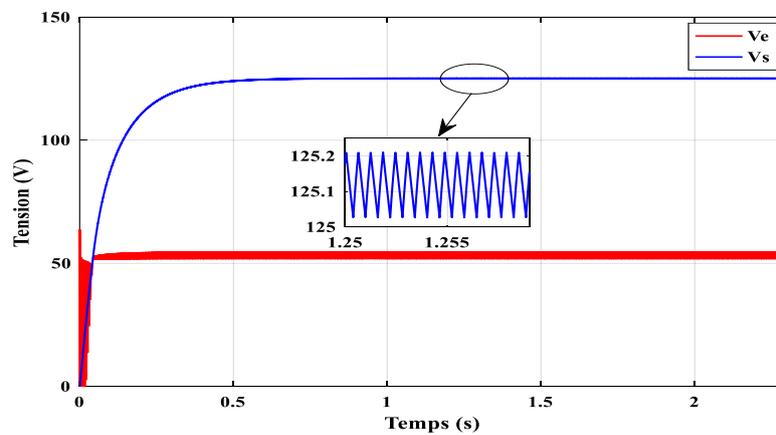


Figure. II. 20. Tensions d'entré V_e et de sortie V_s hacheur boost.

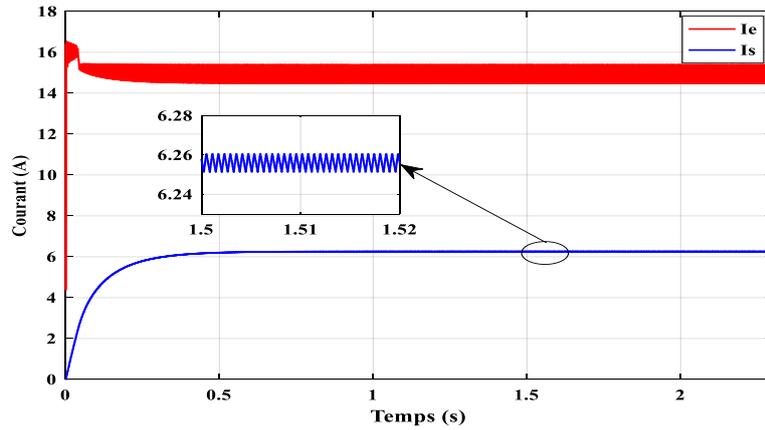


Figure. II. 21. Courants d'entrée I_e et de sortie I_s hacheur boost.

II.9.2. Irradiation variable

Dans ce cas, l'irradiation est initialement définie sur 1000 W/m^2 , à $t = 0,7 \text{ s}$, l'irradiation passe à 500 W/m^2 , et puis il augmente à 800 W/m^2 et se termine à 300 W/m^2 , à $t = 1,3 \text{ s}$ et $t = 1,9 \text{ s}$ respectivement.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande PPM-P&O sont représentés par les figures (II.22), (II.23) et (II.24), (II.25).

Ces figures représentent profile de l'éclairement, la puissance, la tension, et le courant générées par le GPV, ainsi que la puissance, la tension, et le courant à la sortie du système PV.

Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande PPM-P&O effectuée correctement leur rôle.

L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le GPV et l'algorithme de PPM adapte le GPV à la charge pour transférer la puissance maximale fournie par le GPV.

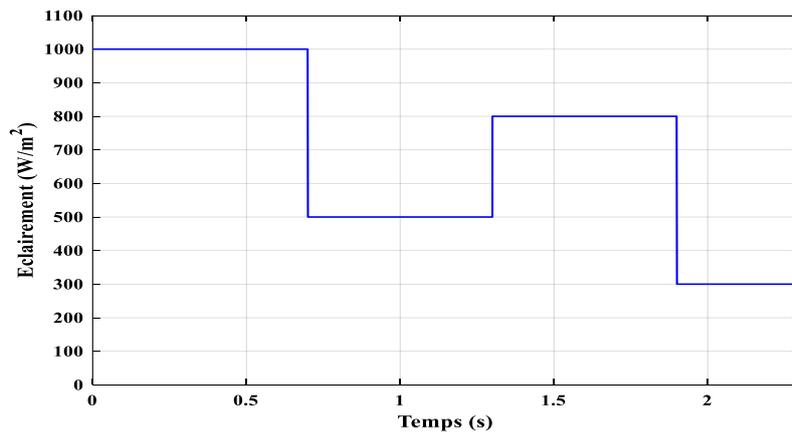


Figure. II. 22. Profil de l'éclairement en fonction du temps.

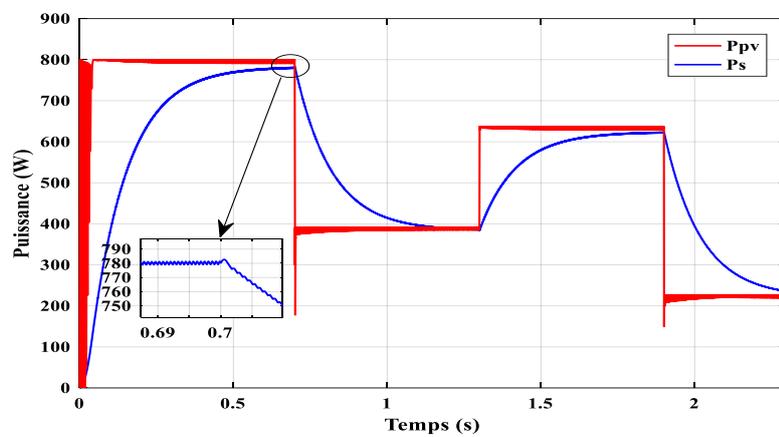


Figure. II. 23. Puissance générée par GPV et la puissance de la sortie de hacheur.

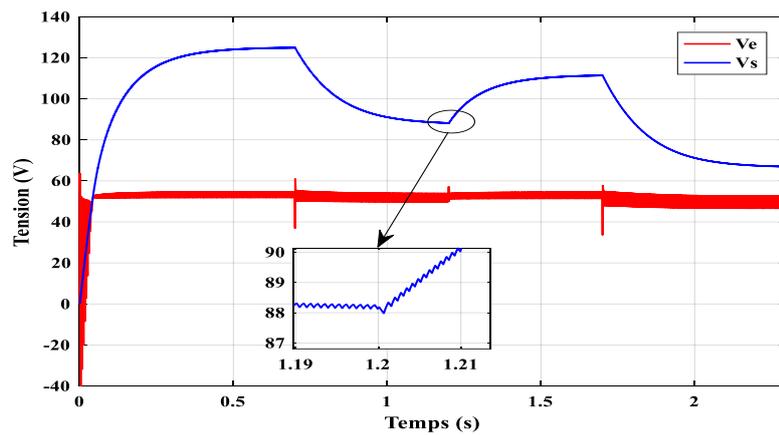


Figure. II. 24. Tension générée par GPV et la tension de la sortie de hacheur.

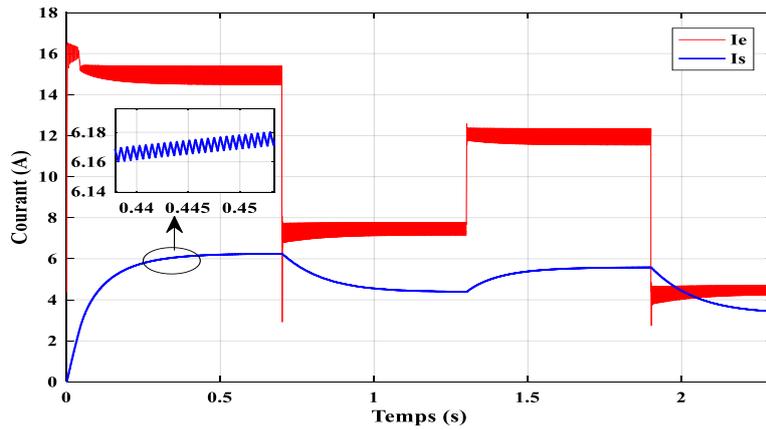


Figure. II. 25. Courant générée par GPV et le courant de la sortie de hacheur.

II.10. Conclusion

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé afin d'éviter la dissipation de la puissance et les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Les systèmes photovoltaïques subissent de nombreuses pertes en raison du manque d'optimisation, qui est souvent dû au convertisseur CC/CC.

La méthode P&O présente certains inconvénients comme la robustesse, en plus, les variations brusques des conditions climatiques, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM.

Pour surmonter ces problèmes, il est nécessaire d'utiliser une nouvelle architecture du hacheur élévateur de tension comme hacheur de type Z-source, et on passe aux commandes plus avancées comme la commande en mode glissant, que nous étudierons dans le prochain chapitre.

Chapitre III : Convertisseur de type Z-source

III.1. Introduction

La production d'électricité photovoltaïque (PV) devient plus prometteuse depuis l'introduction de la technologie de la couche mince PV en raison de son coût inférieur, excellentes performances (température élevée), faible poids, flexibilité et sans verre facile installation [25].

Cependant, il y a encore deux facteurs principaux limitant l'application généralisée des systèmes d'énergie PV. Le premier est le coût de la cellule et le système de convertisseur d'interface. Le deuxième est la variabilité du rendement (diurne et saisonnier) des cellules photovoltaïques [25].

L'utilisation de convertisseur traditionnelle (hacheur classique) et ses problèmes que nous avons vus dans le chapitre précédent, il n'est donc pas fiable comme requis. Par conséquent, le choix d'un convertisseur Z-source en raison de son efficacité et de sa fiabilité réduit les coûts et les pertes pour que les systèmes photovoltaïques deviennent une solution parmi les différentes structures.

Dans le but d'extraire la puissance optimale du GPV pour les différentes données météorologiques, le convertisseur Z-source doit être muni d'un algorithme PPM, qui va agir sur son rapport cyclique en fonction des variations des conditions météorologiques ou de la charge pouvant survenir.

Un type de lois de commande robuste, simple à calculer et à mettre en œuvre, même pour des systèmes PV, est la commande par Mode Glissant (MG) qui présente plusieurs avantages tels que le comportement dynamique du système et la robustesse [26].

Dans ce chapitre nous décrivons la modélisation et la simulation sous le logiciel MATLAB /SimPowerSystem d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque connecté à une charge à travers un hacheur de type Z-source commandé par un algorithme PPM-MG. Pour cela, différents scénarios de simulation seront présentés pour des données météorologiques (Température, éclairage) variables et pour la variation brusque de la charge.

III.2. Les convertisseurs Z-source

Un nouveau type de convertisseur Z-source de conversion de puissance a été introduit en 2002 [27], le convertisseur de puissance Z-source fournit une nouvelle topologie pour surmonter les limitations des convertisseurs traditionnels, tel que ne peut pas tolérer au court-circuit, dégradée la qualité d'énergie. [28].

La grande et unique caractéristique du réseau Z-source est que contrairement à la source traditionnelle, il peut être ouvert et court-circuité, ce qui fournit un mécanisme pour le circuit de

convertisseur à une tension élévatrice ou abaissée selon les besoins. Le réseau Z-source offre une grande flexibilité pour la source, circuit principal et charge [28].

Le réseau Z-Source est symétrique, Il utilise une combinaison de deux inductances et deux condensateurs, connecté en forme de X comme montre la figure (III.1). Ce sont des éléments de stockage d'énergie et de filtrage. Comme la fréquence de commutation est beaucoup plus élevée que celle de la source, les inductances et les condensateurs devraient être faibles [29].

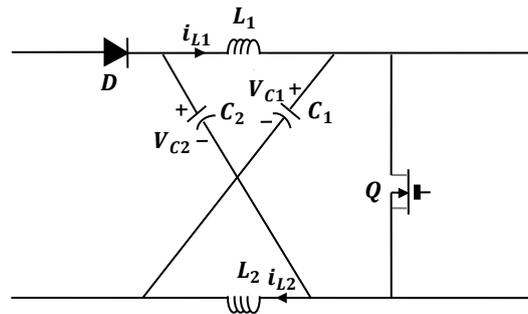


Figure. III. 1. Convertisseur Z-source.

III.3. Modélisation du convertisseur CC-CC de type Z-source

Le circuit du convertisseur CC-CC de type Z-source avec interrupteurs réalisé au moyen de dispositifs à semi-conducteurs (Q, D) est illustré à la figure (III.2). La diode et le transistor fonctionnent dans un mode complémentaire c'est-à-dire lorsque le transistor Q , qui fonctionne comme interrupteur, est en mode conducteur puis la diode D est polarisée inversement et vice versa [30].

En utilisant modèle symétrique du convertisseur Z-source, les inductances du convertisseur Z-source (L_1, L_2) sont définies comme égales, ainsi que ses valeurs de capacités (C_1, C_2) [30].

$$C_1 = C_2 = C , L_1 = L_2 = L \tag{III. 1}$$

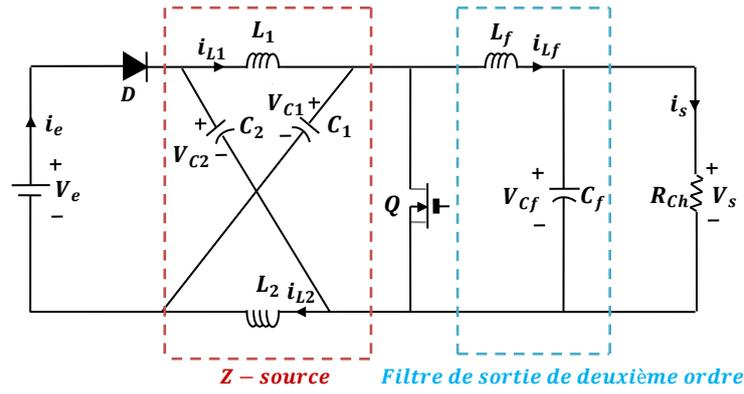


Figure. III. 2. Modèle d'un hacheur élévateur de type Z-source.

Cette symétrie a l'avantage que les formes d'onde de courant des deux inductances seront les mêmes en plus les formes d'onde de la tension des deux capacités aussi seront les mêmes. Aussi les équations de l'espace d'états seront réduites de six à quatre.

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C \quad , \quad V_{L1} = V_{L2} = V_L \tag{III. 2}$$

La dérivation de l'équation pertinente peut être expliquée par la fonction de commutation. Lorsque le transistor Q est allumé et la diode D est bloquée. Le circuit équivalent du montage est représenté sur la figure (III.3.a).

La tension aux bornes de la diode sera $V_e - 2V_C$, ainsi la diode d'entrée D est polarisée en inverse et la source d'entrée V_e sera isolée du reste du circuit. Dans cet intervalle de temps, la tension aux bornes de l'inductance V_L est :

$$V_L = V_C \tag{III. 3}$$

On obtient donc le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L \\ L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = V_{Lf} \\ C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} = i_{Cf} \end{cases} \tag{III. 4}$$

Dans l'intervalle de temps suivant, la diode d'entrée D est en avant polarisé et le transistor Q est bloqué correspondant à la fonction de position de commutation Q : arrêt.

Puisque la tension aux bornes de la diode est nulle, le convertisseur Z-source agit comme un protecteur tampon entre la charge et la source d'énergie.

Un circuit équivalent de cette position est représenté sur la figure (III.3.b). La tension aux bornes de l'inductance V_L est :

$$V_L = V_e - V_C \tag{III. 5}$$

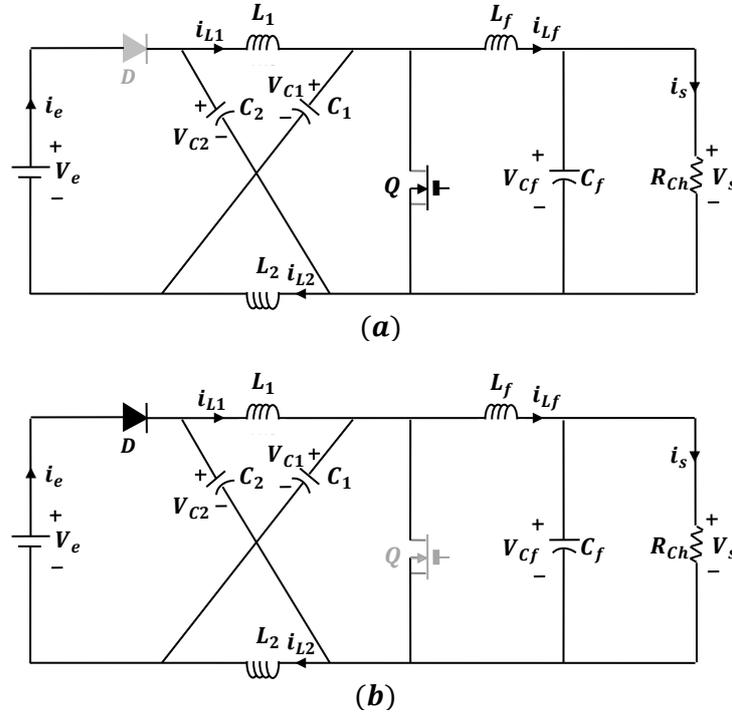


Figure. III. 3. Topologies de circuit dans le convertisseur de source Z.

(a) Position du commutateur à Q : activé, (b) Position du commutateur sur Q : désactivé.

Compte tenu de la tension aux bornes du filtre de sortie condensateur V_{Cf} comme tension de sortie V_s ($V_s = V_{Cf}$), l'expression suivante peut être obtenue en appliquant la loi de Kirchhoff.

$$V_C - V_{Lf} - V_s - V_L = 0 \tag{III. 6}$$

On obtient donc le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L + i_{Lf} \\ L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = V_C - V_s + V_L \\ C_f \frac{dV_C}{dt} = i_{Cf} \end{cases} \tag{III. 7}$$

On a:

$$V_s = V_{Cf} \tag{III. 8}$$

On remplace les équations (III.5) et (III.8) dans l'équation (III.6), on obtient :

$$2V_C - V_{Cf} - V_e = V_{Lf} = L_f \frac{di_{Lf}}{dt} \quad (\text{III. 9})$$

Donc le système devient :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L + i_{Lf} \\ L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = 2V_C - V_{Cf} - V_e \\ C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} = i_{Cf} \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

Pour résumer les deux états on aura le système suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = (2u - 1)V_C + (1 - u)V_e \\ C \frac{dV_C}{dt} = (1 - 2u)i_L + (1 - u)i_{Lf} \\ L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = 2(1 - u)V_C - V_{Cf} - (1 - u)V_e \\ C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} = i_{Cf} \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

On a:

$$i_{Lf} = i_{Cf} + i_s \quad (\text{III. 12})$$

$$\Rightarrow i_s = \frac{V_s}{R_{Ch}} = \frac{V_{Cf}}{R_{Ch}} \quad (\text{III. 13})$$

Les équations du convertisseur Z-source peuvent être écrire comme suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = (2u - 1)V_C + (1 - u)V_e \\ C \frac{dV_C}{dt} = (1 - 2u)i_L + (1 - u)i_{Lf} \\ L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = 2(1 - u)V_C - V_{Cf} - (1 - u)V_e \\ C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} = i_{Lf} - \frac{1}{R_{Ch}} V_{Cf} \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

III.4. Facteur de conversion de la tension continue et le facteur de conversion en courant

III.4.1. Facteur de conversion de la tension continu

Puisque les valeurs moyennes de V_L et V_{Lf} sont nulles, la tension moyenne de capacité du convertisseur Z-source V_C est [30], [31]:

$$V_s = V_C \quad (\text{III. 15})$$

Alors :

$$(1 - u)V_e = (1 - 2u)V_c \quad (\text{III. 16})$$

Donc le gain l'augmentation de tension d'entrée-sortie comme suit :

$$G_v(u) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1-u}{1-2u} \quad (\text{III. 17})$$

III.4.2. Facteur de conversion en courant

En négligeant toutes les pertes dans le convertisseur, et en utilisant les expressions de la puissance, on trouve que la puissance d'entrée est égale à la puissance à la sortie, donc :

$$P_e = P_s \Rightarrow V_s i_s = V_e i_e \Rightarrow V_s = (i_e/i_s)V_e \quad (\text{III. 18})$$

On remplace cette expression dans l'équation précédente, on obtient :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{i_e}{i_s} = (1 - u)/(1 - 2u) \quad (\text{III. 19})$$

Donc :

$$G_i(u) = \frac{i_s}{i_e} = \frac{(1-2u)}{(1-u)} \quad (\text{III. 20})$$

Ce rapport exprime le facteur de conversion en courant.

III.5. Commande par mode glissant

La Commande par Mode Glissant, (Sliding Mode Control, SMC) apparue en union soviétique pendant les années 60 [32], qui présente plusieurs avantages telle que le comportement dynamique du système et la robustesse, rapidité, fiabilité.

Cependant, la discontinuité de la commande engendre des oscillations de fréquence élevée une fois atteint le régime glissant, phénomène connu sous le nom de Chattering. Ce phénomène est le plus grand défaut des commandes par mode glissant, car il peut causer une perte de précision, et surtout une usure prématurée des actionneurs ou du système, en plus de générer un bruit sur des systèmes mécaniques [26].

III.5.1. Principe de l'algorithme de PPM à base de mode glissant

La commande par mode glissant est une commande robuste basée sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée [33].

Le contrôleur par mode glissant se base sur l'hypothèse d'une hystérésis nulle sur la surface de glissement $S(x, t)$, et donc sur une fréquence de commutation variable et théoriquement infinie. Il est clair que, du point de vue pratique, il n'est pas possible de vérifier cette hypothèse. En raison des limitations technologiques liées à l'utilisation de fréquences de commutation élevées, il est préférable de limiter cette fréquence [33].

L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée : « surface de glissement ». Cette surface délimite deux sous-espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande (Figure. III.4) [33].

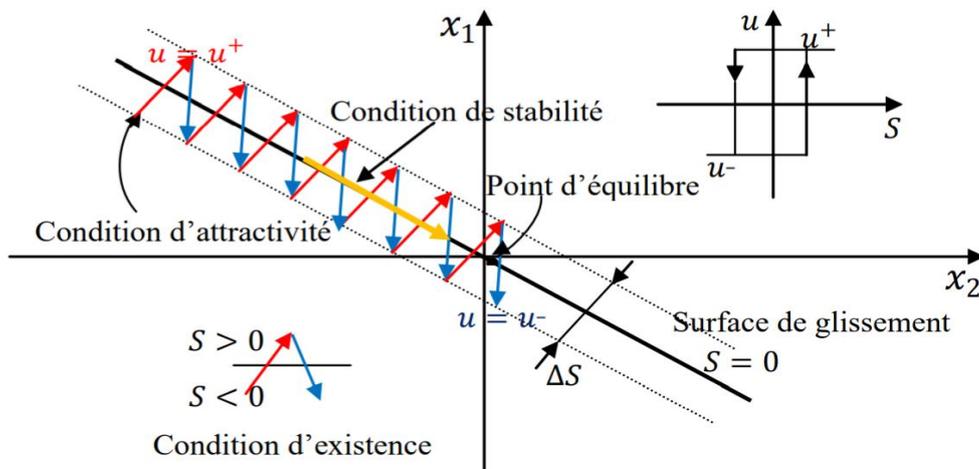


Figure. III. 4. Principe de la commande par mode glissant.

La stabilisation sur la surface de glissement est obtenue à l'aide d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision. Ce principe de commande repose donc essentiellement sur l'utilisation d'une commande discontinue afin de maintenir l'évolution du système sur une surface de glissement judicieusement choisie.

La synthèse doit donc viser à rendre la surface de glissement attractive (condition d'attractivité) depuis tout point de l'espace d'état. Une fois la surface atteinte, il faut assurer le glissement le long de cette surface (condition de glissement) et la stabilité du système (condition de stabilité). En d'autres termes, il faut trouver la condition pour laquelle la dynamique du système glisse sur la surface vers le point d'équilibre désiré (Figure. III.4). Sur la surface, la dynamique du système est indépendante de celle du processus initial, ce qui implique que ce type de contrôle entre dans le domaine des commandes robustes [33].

III.5.2. Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels :

- Synthétiser une surface $S(x, t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité ;
- Déterminer une loi de commande $U(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface [32].

III.5.3. Mise en œuvre de la commande par mode glissant

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :

- L'établissement des conditions d'existences.
- Choix de la surface de glissement.
- Détermination de la loi de commande

III.5.3.1. Algorithme de PPM à base de mode glissant pour le système PV

a) Conditions d'existences

La condition du point de puissance maximale PPM est donnée par:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (\text{III. 21})$$

b) Choix de surface de glissement

La première étape de la conception de la commande est le choix de la surface de commutation, qui peut être choisie comme suit:

$$S(x) = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III. 22})$$

Avec P_{pv} , V_{pv} , I_{pv} , est la puissance, la tension, et le courant de GPV.

Si le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, la commande doit le déplacer vers la surface de glissement en incrémentant la tension V_{pv} , ceci n'est possible que si $U = 0$. En revanche, si le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM, la commande doit le déplacer vers la surface de glissement en décrémentant la tension V_{pv} , et ceci n'est possible que si $U = 1$. Pour cela, la loi de commande de commutation adoptée est celle présentée par l'équation suivant [29]:

$$U = \begin{cases} 0 & \text{pour } S(x) > 0 \\ 1 & \text{pour } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

c) Détermination de la loi de contrôle

$$U = U_{eq} + U_n \tag{III. 24}$$

L'expression de la commande équivalente peut déduire du gain du hacheur de type Z-source :

$$G_v(u) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1-u}{1-2u} \tag{III. 25}$$

On peut donc extraire U_{eq} selon l'équation (III. 25) :

$$U_{eq} = \frac{V_s - V_{pv}}{2V_s - V_{pv}} \tag{III. 26}$$

Pour assurer la convergence de la fonction Lyapunov, nous définissons :

$$U_n = -K_1 \text{sign}S(x) \tag{III. 27}$$

Où K_1 est un gain positif. Par conséquent, la loi de contrôle peut être donnée par l'équation (III.28):

$$U = \frac{V_s - V_{pv}}{2V_s - V_{pv}} - K_1 \text{sign}S(x) \tag{III. 28}$$

V_s C'est la tension de la sortie du convertisseur Z-source.

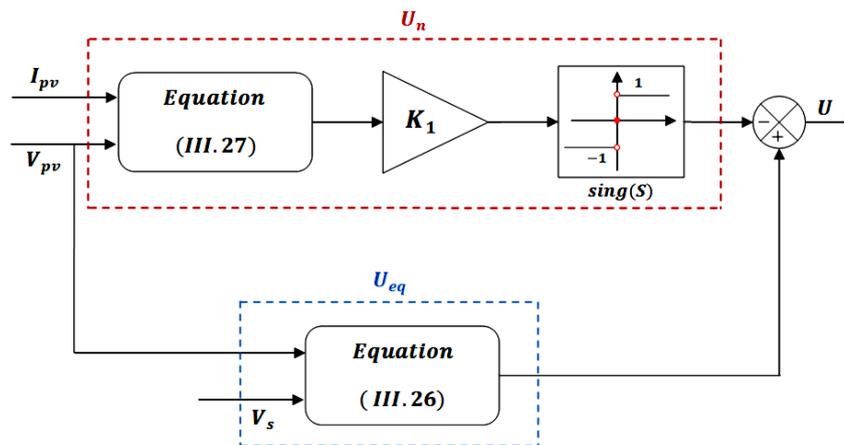


Figure. III. 5. Contrôleur par mode glissant.

III.6. Résultats de simulation

D'après les résultats obtenus dans le deuxième chapitre, hacheur boost présente des inconvénients pour utilisation dans les systèmes PV, pour cela le convertisseur de type Z-source est utilisé pour surmonter ces problèmes.

Pour évaluer les performances de système, un algorithme de PPM basée sur la technique de Mode Glissant (MG) appliqué pour contrôler le convertisseur de type Z-source vis-à-vis des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

III.6.1. Données météorologiques nominales

Dans un premier lieu, ont effectué le teste dans les conditions standard ($\psi = 1000 W/m^2, T = 298 \text{ }^\circ K$).

Les figures (III.6) et (III.7) représentent respectivement les allures de la tension d’entrée, tension de sortie et le courant de sortie d’un hacheur élévateur de type Z-source.

Ces résultats montrent que la tension de sortie d’hacheur élévateur de type Z-source est supérieure à celle d’entrée avec une démunissions du courant. Donc l’hacheur élévateur de type Z-source effectue correctement son rôle.

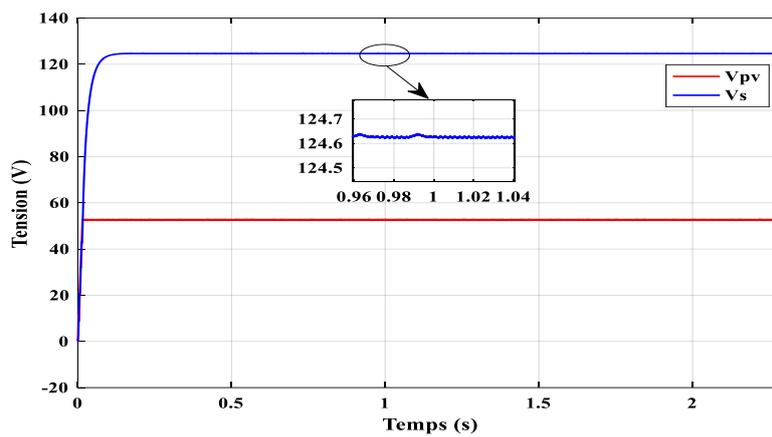


Figure. III. 6. Tension générée par GPV et de la sortie de l’hacheur Z-source.

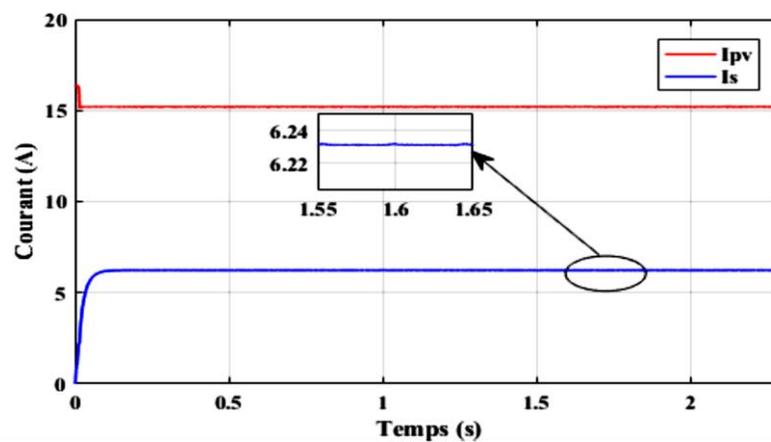


Figure. III. 7. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.

La figure (III.8) montre la puissance du système PV. On remarque que le point de puissance maximale est atteint après 0.15s et que cette puissance reste stable tout au long de cette simulation parce que on travaille avec des données météorologiques nominales.

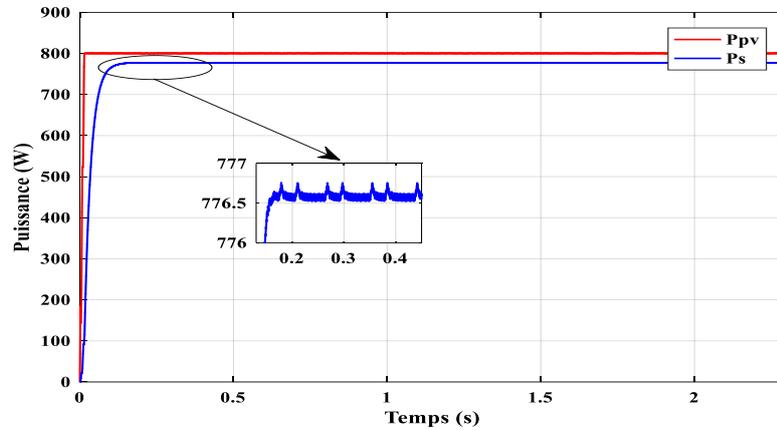


Figure. III. 8. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.

III.6.2. Variations de l'éclairement

Dans ce cas, l'irradiation est initialement définie sur $1000 W/m^2$, à $t = 0,7 s$, l'irradiation passe à $500 W/m^2$, et puis il augmente à $800 W/m^2$ et se termine à $300 W/m^2$, à $t = 1,3s$ et $t = 1,9s$ respectivement, sous une température constante $T = 298^{\circ}K$.

La figure (III.9) présente l'allure de la tension de sortie d'un hacheur élévateur de type Z-source. On constate clairement que ce type de convertisseur fonctionne correctement parce que la tension varie avec la variation de l'éclairement.

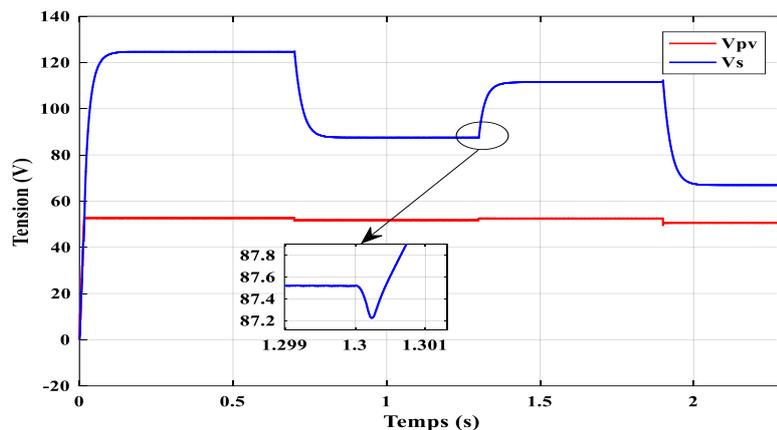


Figure. III. 9. Tension générée par GPV et de la sortie de l'hacheur Z-source.

Les figures (III.10) et (III.11) présentent le courant et la puissance d'entrée et de sortie du convertisseur Z-source. On constate que la puissance P_{pv} du panneau PV augmente avec

l'éclairement et le contraire est vrai, mais l'algorithme de PPM-MG assure le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale avec un temps de réponse faible et une stabilité de toutes les allures.

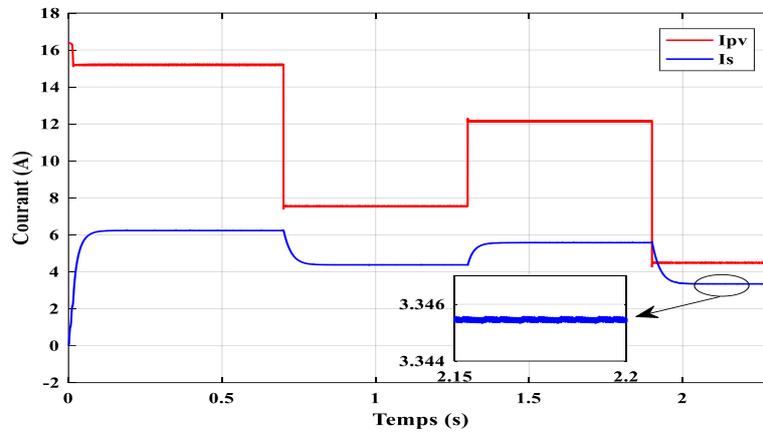


Figure. III. 10. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.

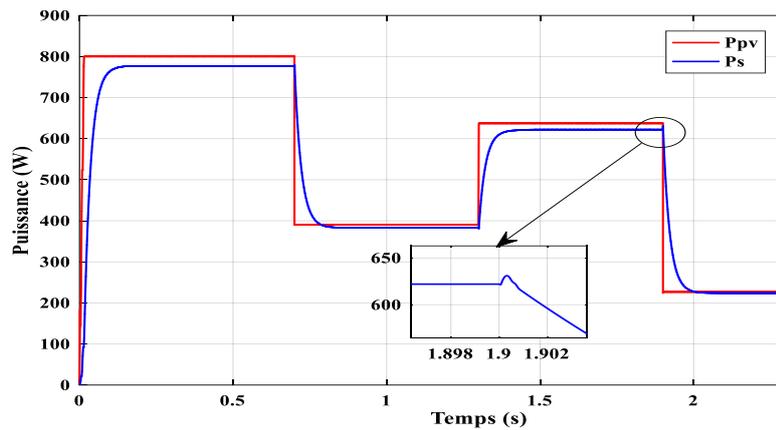


Figure. III. 11. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.

III.6.3. Variations de la température

Dans cette partie, nous étudions l'effet du changement de la température sur le fonctionnement du GPV commandé par l'algorithme PPM-MG.

Pour un éclairement de 1000 W/m^2 , on augmente la température de 298°K à 318°K , puis on la diminue jusqu'à 308°K en fin 298°K comme montre figure (III.12).

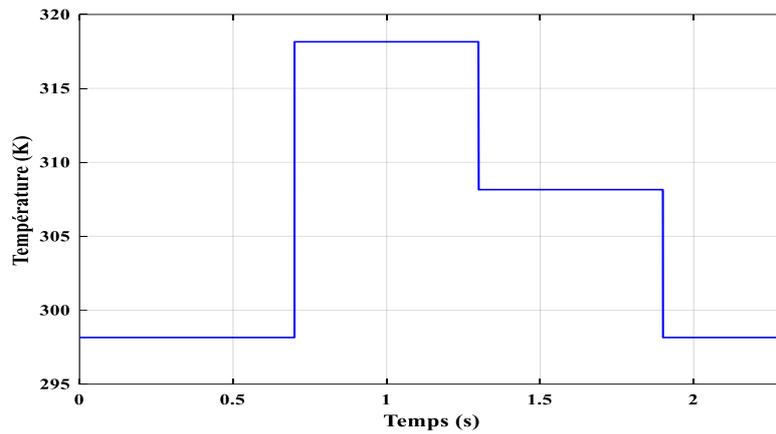


Figure. III. 12. Profil de température en fonction du temps.

Les réponses du système vis-à-vis aux variations de température sont représentées par les figures (III.13) et (II.14), (III.15).

On constate que ces variations provoquent l'effet contraire sur P_{pv} que l'éclairement (augmente avec diminution de température et le contraire est vrai). Mais le système fonctionne avec une puissance maximale et avec de bonne performance-

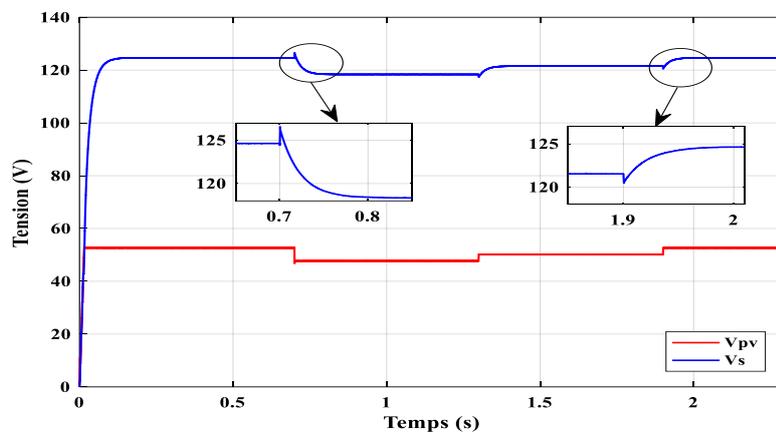


Figure. III. 13. Tension générée par GPV et de la sortie de hacheur Z-source.

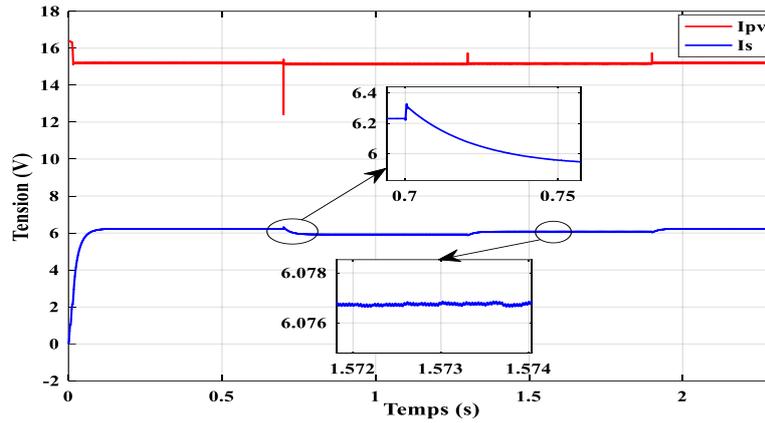


Figure. III. 14. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.

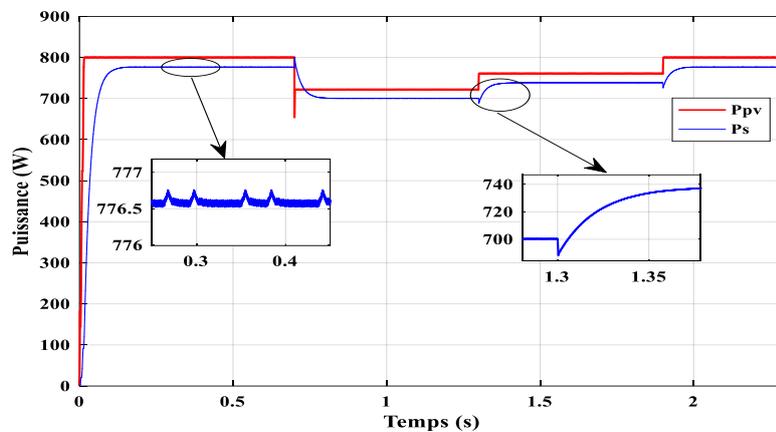


Figure. III. 15. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.

III.6.4. Variation de l'éclairement et la température

Les profils d'irradiation et de température sont indiqués dans figure (III.16) et (III.17), les intervalles de changement sont de $[0 \ 0.7]s$, $[0.71 \ 1.3]s$, $[1.31 \ 1.9]s$ et $[1.9 \ 2.3]s$, où les niveaux de l'irradiation, température est de 1000 W/m^2 à $298^\circ K$, 500 W/m^2 à $298^\circ K$, 800 W/m^2 à $318^\circ K$ et 300 W/m^2 à $298^\circ K$ respectivement.

Dans ces conditions, les réponses de l'algorithme PPM-MG sont montrées dans les figures (III.18), (III.19) et (III.20).

Comme on peut le voir, l'algorithme PPM-MG converge dans des temps plus petits. Il montre une bonne dynamique avec une bonne robustesse dans les variations des données météorologiques. Les réponses se stabilisent après un temps 0,15s après chaque irradiation niveau appliqué.

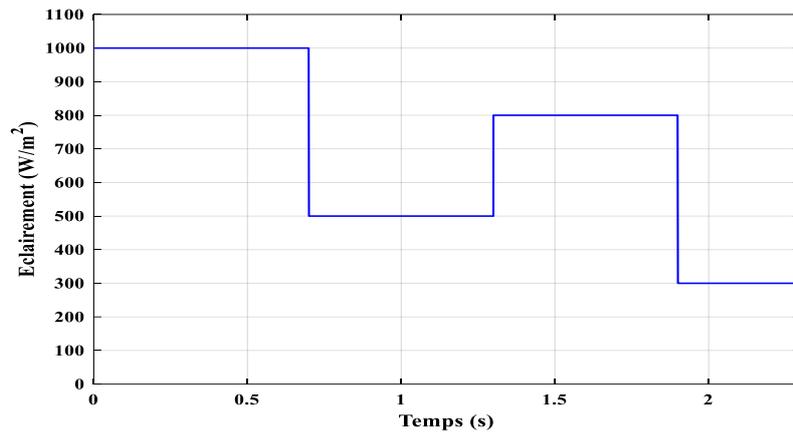


Figure. III. 16. Profil de l'éclairement en fonction du temps.

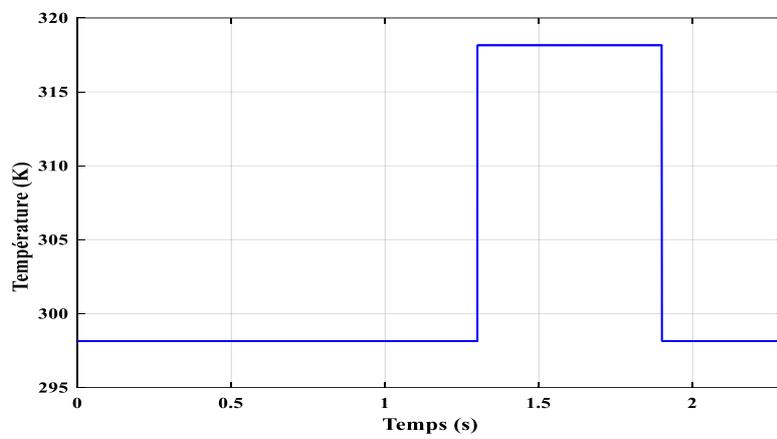


Figure. III. 17. Profil de température en fonction du temps.

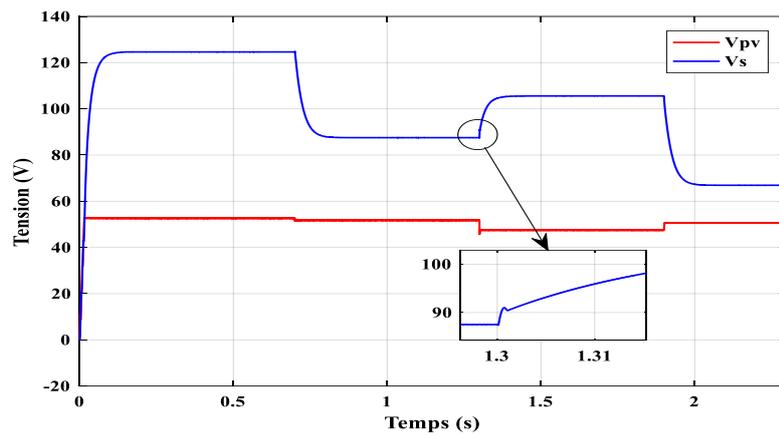


Figure. III. 18. Tension générée par GPV et de la sortie de Z-source.

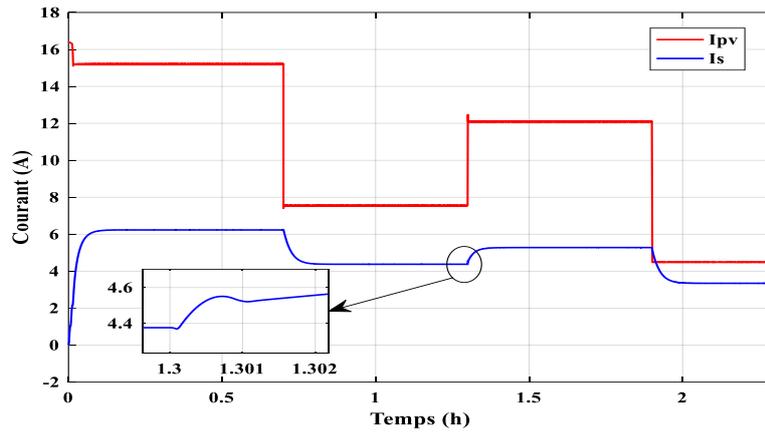


Figure. III. 19. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.

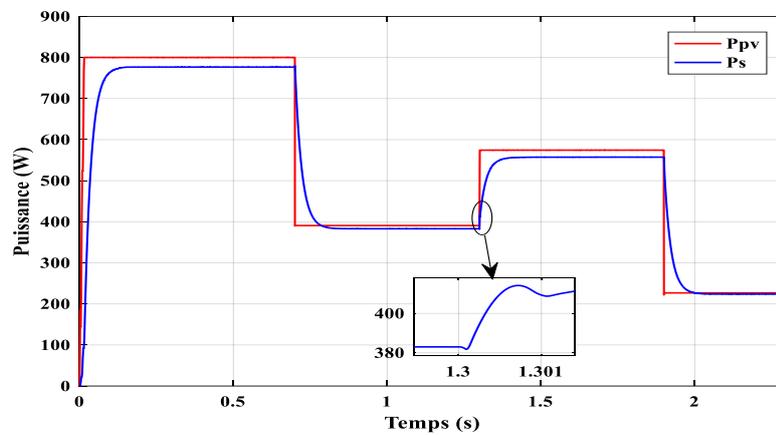


Figure. III. 20. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.

III.6.5. Variations de la charge

Afin de voir le comportement du système photovoltaïque pour les variations de la charge, nous avons procédé à faire de teste en provoquant une variation brusque de la charge.

Pour cela, nous avons pris une charge une résistance de valeur 20Ω au début. A l'instant $t = 1.2s$, nous insérons une résistance de valeur 10Ω en série, ce qui fait que la valeur de la charge équivalente devient égale à 30Ω , ont effectué le teste dans les conditions standard ($\psi = 1000 W/m^2, T = 298 K$).

Les figures suivantes (III.21), (III.22) et (III.23) montrent les résultats de simulation des tensions, courants et puissances d'entrée et de sortie du convertisseur Z-source.

Ces résultats montrent que le système est stable pour des variations brusques de la charge. En effet, le système converge dans des temps plus petits ($0.08 s$), avec une bonne dynamique et une bonne robustesse.

L'augmentation de la valeur de la charge se traduit par une augmentation de la tension qui provoque une diminution de courant, et puissance stable.

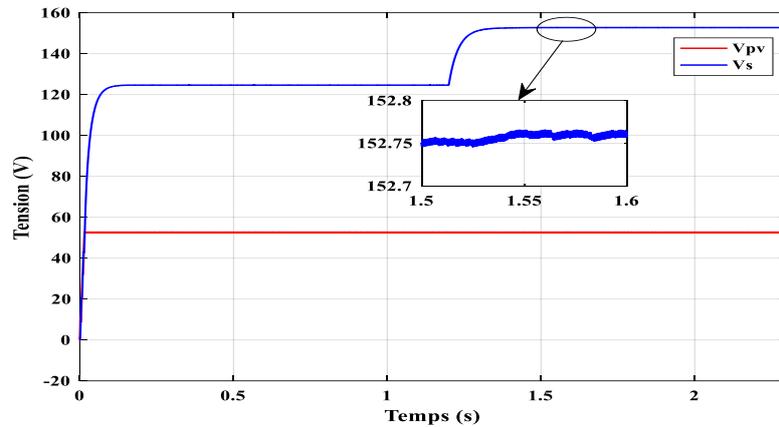


Figure. III. 21. Tension générée par GPV et de la sortie de Z-source.

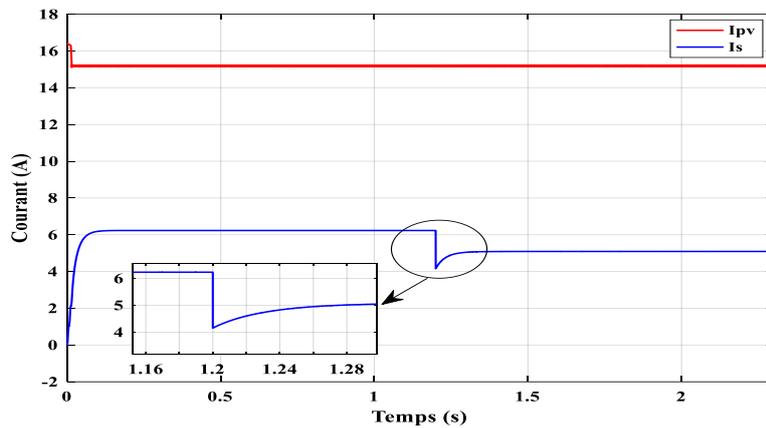


Figure. III. 22. Courant généré par GPV et de la sortie de Z-source.

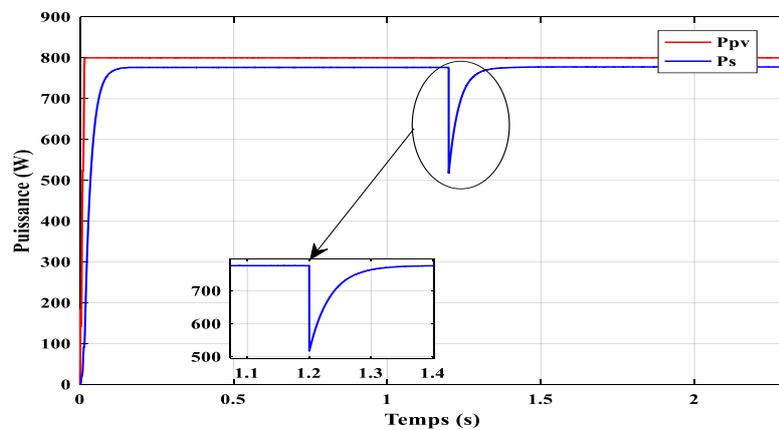


Figure. III. 23. Puissance générée par GPV et de la sortie de Z-source.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'application d'une commande avancée de type mode glissant utilisé dans l'algorithme de PPM afin d'extraire la puissance optimale d'un GPV connecté à une charge à travers un hacheur élévateur de type Z-source. Ce dernier montre des bonnes performances dans le système PV.

L'algorithme PPM-MG assure un fonctionnement au point de puissance maximale et présente des performances meilleures en régime statique et dynamique quelles que soient les conditions de fonctionnement même en présence des variations de la température, de l'éclairement, et aussi la variation brusque de la charge.

Dans le dernier chapitre, nous étudions les performances d'intégrer une source d'énergie renouvelable de type PV au réseau électrique à travers un onduleur (CC-CA).

***Chapitre IV : Chaîne de
conversion d'énergie PV
connecté au réseau électrique***

IV.1. Introduction

Le système de génération photovoltaïque (PV) est l'un des meilleures sources d'énergie renouvelables disponibles pour faire face à la crise énergétique. Il est sûr, propre, sans pollution et nécessite moins d'entretien et est inépuisable. Le système PV autonome est largement utilisé dans les régions éloignées où la production d'électricité est nécessaire. L'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie dans le système autonome augmente le coût global du système. Par conséquent, le système connecté au réseau électrique est considéré comme réduisant le coût d'investissement [34].

En général, la tension obtenue à partir du champ PV est de type continu. On utilise un onduleur monophasé ou triphasé pour convertir la puissance continu en alternative. Pour notre études on a utilisé un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC contrôlés par la technique de MLI est utilisé pour convertir la puissance continue en puissance alternative pour raccordement au réseau.

Le GPV est connecté au réseau électrique public via convertisseurs et onduleurs. En raison de la présence de dispositifs électroniques de puissance, il est nécessaire d'améliorer la qualité d'énergie produite par une source d'énergie renouvelable de type PV par l'utilisation des convertisseurs multiniveaux afin de maintenir les normes de THD du courant de système.

Ce chapitre présente un modèle de simulation d'un GPV raccordée au réseau, le modèle contient une représentation détaillée de convertisseur CC-CA, un contrôleur avancé est exposé dans le but maintenir la tension de bus continu constante.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel Matlab/SimPowerSystem. Ce contrôle nous permettra d'injecter la puissance active désirée au réseau électrique avec une qualité d'énergie souhaitable.

IV.2. Description du système globale

Un système photovoltaïque triphasé connecté au réseau électrique est illustré à la figure (IV.1) avec opération de contrôle en deux étapes. La première étape utilise un convertisseur survolteur de type Z-source, ce convertisseur permet au GPV de fonctionner de manière optimale au point de fonctionnement pendant la variation des conditions environnementales en utilisant l'algorithme commande PPM-MG.

Dans la deuxième étape, un onduleur de type NPC est utilisé pour convertir la puissance en CC en une alimentation à CA commandé par la technique de MLI, un filtre de type LCL est utilisé pour éliminer les harmoniques de hautes fréquences dues aux commutations des interrupteurs statiques. Ce dernier relie la sortie de l'onduleur avec le réseau électrique.

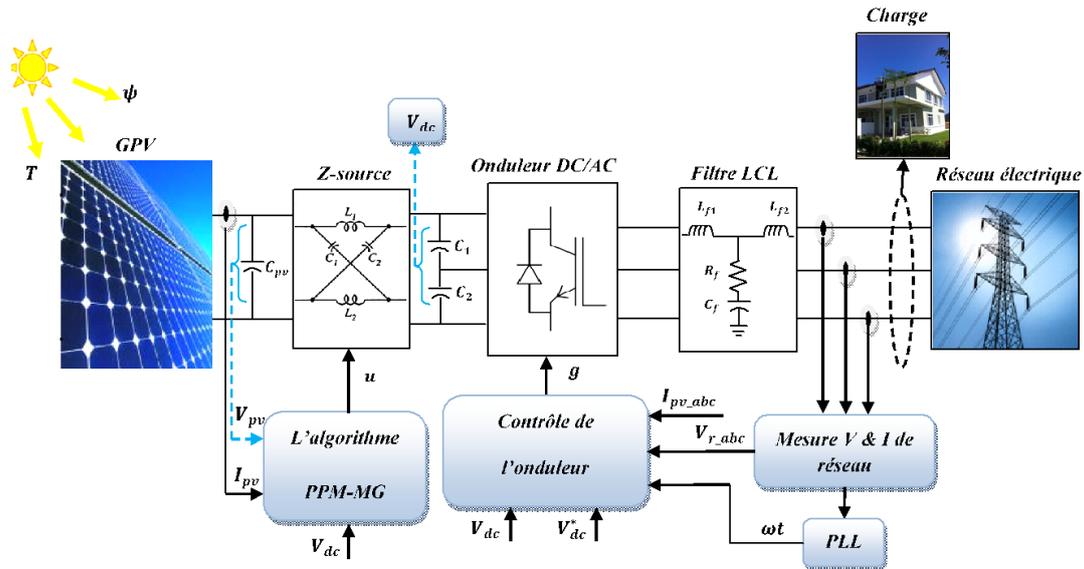


Figure. IV. 1. Système photovoltaïque triphasé connecté au réseau électrique.

IV.2.1. Filtre LCL

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale [14].

Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée, cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système [14].

Le filtre (LCL) est l'autre alternative de raccordement. Pour des fréquences plus petites que la fréquence de coupure, le comportement de ces deux filtres est similaire, et la principale différence est la meilleure atténuation en haute fréquence du filtre (LCL) et le déphasage supplémentaire qu'il introduit [14]. Une dimension de filtre LCL est représenté dans l'annexe B.

IV.2.2. Réseau électrique

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 220 V$ et de fréquence $f = 50 Hz$

IV.2.3. Synchronisation PLL

Les courants de référence injectés dans le réseau, sont déduits de la mesure des tensions du réseau. En effet, les tensions du réseau au point de connexion peuvent contenir divers défauts

(creux de tension, harmoniques, brèves interruptions) qui peuvent passer au courant fourni par l'onduleur [32].

Pour atténuer ce problème, en utilisant la boucle à verrouillage de phase (PLL) exprimée dans le repère de Park ($d - q$) frame. Cette méthode est capable de fournir la fréquence du réseau et informations de phase. La phase de sortie fournie par la PLL sera utilisée comme entrée pour le contrôleur PI afin d'avoir l'accord par rapport à la fréquence de réseau [32].

IV.2.4. Adaptation de l'énergie produite par le GPV avec le réseau électrique

Un système PV est un générateur qui produit une énergie de forme continue. Il est connecté au réseau électrique à travers l'interfaçage d'électronique de puissance, qui représente la partie principale de la conversion de l'énergie PV de sa forme continue à la forme alternative, qui est appelé onduleur.

IV.3. Onduleurs de type NPC

L'onduleur à point neutre à trois niveaux (NPC) est largement utilisé dans tous les systèmes électriques est spécialement dans les systèmes de conversion d'énergie renouvelable [36].

L'onduleur à point neutre (NPC) a été initialement développé par Nabae, Takahashi et Akagi en 1981. Ces principaux avantages de cette configuration sont une meilleure efficacité, moins de distorsion harmonique en raison de plus de niveaux de tension et la moitié de la tension nominale requise pour les dispositifs de commutation. De plus, les transistors à basse tension peuvent fonctionner plus rapidement, ce qui permet d'utiliser une fréquence de commutation plus élevée.

Des niveaux de tension accrus et une fréquence de commutation plus élevée diminuent les harmoniques de sortie du variateur [36], [37].

IV.3.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

La topologie NPC à trois niveaux se compose de 12 commutateurs dont 6 diodes. Il est nécessaire de connecter deux condensateurs en série tous deux chargés avec V_{dc} . Chaque bras de phase contient 4 interrupteurs en série avec deux diodes serrées en série. La principale fonction des diodes est de fixer les commutateurs supérieurs à un potentiel plus élevé au point zéro de la liaison continue [38].

Le schéma de circuit illustré ci-dessous sur la figure (IV.2), les diodes sont disposées de telle manière qu'elles produisent différents étages de tensions avec par rapport au point neutre N . La division du niveau de tension est considérée selon les condensateurs C_1 et C_2 disposés en séries les

unes avec les autres ayant un point neutre N entre elles. La division des tensions est obtenue par $V_{dc}/2, 0, -V_{dc}/2$. Il est donc nommé topologie à trois niveaux.

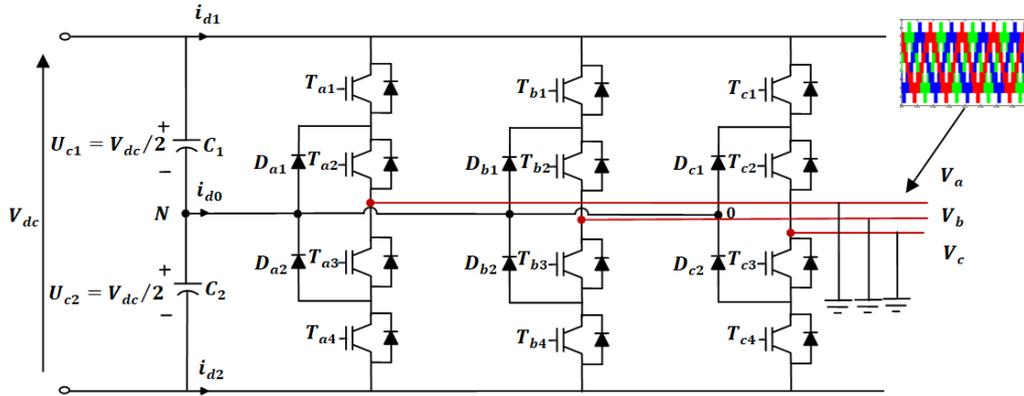


Figure. IV. 2. Topologie de l'onduleur trois niveaux de type NPC.

IV.3.2. Principe de fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

Dans cette topologie, les commutateurs T_{a1} et T_{a2} sont activés donnant $V_{dc}/2$. Pour $-V_{dc}/2$, les commutateurs T_{a3} et T_{a4} sont activés et pour 0, T_{a3} et T_{a2} doivent être activés. Ce circuit de puissance donnera alors les trois niveaux topologie. La différence entre l'onduleur conventionnel et la topologie à trois niveaux est que les diodes utilisées pour le but de diviser les tensions. Le niveau de tension du bus CC devient de moitié lorsque les diodes D_1 et D_2 sont utilisées. Lorsque les commutateurs T_{a1} et T_{a3} activent la tension aux bornes de a et 0 est V_{dc} . Dans ce cas, la diode D_2 équilibre le partage de tension entre T_{a4} et T_{a3} . T_{a3} , aide à bloquer la tension entre C_1 et T_{a4} aide à bloquer la tension à travers C_2 [38].

IV.3.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

Afin de déduire le modèle de connaissance de l'onduleur, nous introduisons la fonction de connexion S_{is} de l'interrupteur qui décrit l'état de chaque interrupteur (1 = fermé, 0 = est ouvert). Dans cette fonction « i », est le numéro de la cellule de commutation, $i \in \{1,2,3\}$, s , est le numéro du semi-conducteur. Les tensions de sortie de l'onduleur par rapport au point médian M en utilisant la fonction de connexion du demi-bras (S_{i1}^b, S_{i0}^b) sont définies comme suit [39] :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} S_{11}^b \\ S_{21}^b \\ S_{31}^b \end{bmatrix} \times U_{c1} - \begin{bmatrix} S_{10}^b \\ S_{20}^b \\ S_{30}^b \end{bmatrix} \times U_{c2} \right\} \tag{IV. 1}$$

Avec :

$$S_{i1}^b = S_{i1} \times S_{i2} \quad (IV.2)$$

$$S_{i0}^b = S_{i3} \times S_{i4} \quad (IV.3)$$

Les courants d'entrée de l'onduleur sont donnés comme suit :

$$\begin{cases} i_{d1} = S_{11}^b \times i_1 + S_{21}^b \times i_2 + S_{31}^b \times i_3 \\ i_{d2} = S_{10}^b \times i_1 + S_{20}^b \times i_{d1} + S_{30}^b \times i_3 \\ i_{d0} = (1 - S_{11}^b - S_{10}^b) \times i_1 + (1 - S_{21}^b - S_{20}^b) \times i_2 + (1 - S_{31}^b - S_{30}^b) \times i_3 \end{cases} \quad (IV.4)$$

Le tableau (VI.1) résume les états de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux illustrés dans le tableau IV.1.

Tableau. IV.1. État de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux.

V	T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	T_a
$V_{dc}/2$	1	1	0	0	(+)
0	0	1	1	0	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1	(-)

IV.4. Système de contrôle pour le système de conversion d'énergie PV connecté au réseau électrique

Après avoir modélisé les différents composants du système photovoltaïque dans les chapitres précédemment. Cependant, la connexion du système PV au réseau électrique nécessite plusieurs boucles de régulation pour le but d'intégrer cette Source d'Energie Renouvelable (SER) au réseau électrique avec des bonnes performances.

Dans cette partie, nous étudions un système de contrôle de la puissance injectée au réseau électrique instantané et la tension du bus continu.

IV.4.1. Contrôle de la puissance instantané (P/Q)

Le système à contrôler est un onduleur triphasé trois niveaux de type NPC reliant le GPV au réseau électrique. L'objectif principal du contrôle est de transférer la puissance PV produite au réseau électrique. La figure (IV.3) illustre le système global à contrôler.

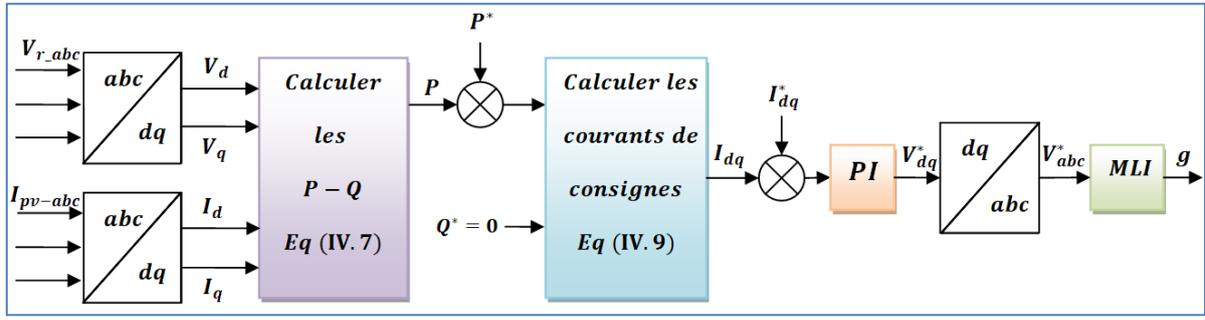


Figure. IV. 3. Schéma de la commande d'un onduleur triphasé.

Pour le passage du système triphasé au système diphasé ($d - q$) sans les composantes homopolaires est obtenu par utilisation de la matrice de Park suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pv1} \\ I_{pv2} \\ I_{pv3} \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

Avec (V_{r1}, V_{r2}, V_{r3}) et $(I_{pv1}, I_{pv2}, I_{pv3})$, sont les tensions simples et les courants de ligne du système triphasé respectivement. θ est l'angle de phase, l'information de l'angle est obtenue par le bloc PLL.

Les puissances actives (P) et réactives (Q) sont calculées dans la trame stationnaire $d - q$ par les équations suivantes :

$$\begin{cases} P = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \\ Q = V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q \end{cases} \quad (IV.7)$$

Les courants de consigne à la sortie de la commande amont seront injectés au point de raccordement GPV. Ces courants sont calculés grâce aux références de puissance et à la mesure de tension au point de raccordement ; ceux-ci seront calculés dans le référentiel Park :

$$\begin{cases} I_d^* = \frac{2(P \cdot V_d + Q \cdot V_q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \\ I_q^* = \frac{2(P \cdot V_q - Q \cdot V_d)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \end{cases} \quad (IV.8)$$

En injectant uniquement la puissance active générée par le GPV et on impose que la puissance réactive injectée soit égale à zéro ($Q^* = 0$) dans le but d'assurer un facteur de puissance unitaire.

L'équation (IV.8) devient :

$$\begin{cases} I_d^* = \frac{2(P.V_d)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \\ I_q^* = \frac{2(P.V_q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \end{cases} \quad (IV.9)$$

Les composants actuels sont comparés à leurs références. Les différences entre les courants passent par les régulateurs PI, qui donnent les composantes de la tension de référence du MLI à Park.

Enfin, pour contrôler les interrupteurs de l'onduleur, les références de tension doivent être converties en passant par la conversion inverse de Park en un système de coordonnées abc, nous obtenons les références MLI pour contrôler la tension de l'onduleur. Selon l'équation (III.10):

$$\begin{bmatrix} V_a^* \\ V_b^* \\ V_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^* \\ V_q^* \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

IV.4.2. Régulation de la tension du bus continu

Le déséquilibre des tensions (V_{c1}, V_{c2}) d'entrée de l'onduleur à trois niveaux cause le problème de flottement du potentiel du point milieu(0). Aussi, pour avoir un fonctionnement parfait de l'onduleur à trois niveaux, ces deux tensions d'entrée doivent être constantes et égales [40].

Utilisation des régulateurs classiques (PI) pour le réglage de tension de bus continu introduisent des inconvénients et limitations tel que la robustesse et fiabilité lors de brusques variations de la charge.

Donc pour maintenir la tension du bus continu constante, des contrôleurs avancés sont utilisés pour assurer la stabilité de système tel que commande par mode glissant, contrôleur Backstepping, et commande par intelligence artificielle comme la logique floue et réseau neuronale.

Pour atteindre cet objectif, on se propose d'étudier pour ce projet de fin d'étude l'asservissement de ces deux tensions (V_{c1}, V_{c2}) par un contrôleur de Backstepping. Il est utilisé pour maintenir la tension V_{dc} à sa valeur de référence pour que le courant qui circule dans le condensateur Cest égal à zéro.

La synthèse de dimensionnement du contrôleur Backstepping est présentée en détail comme suit :

L'erreur₁ de la tension de bus continu est défini comme suit :

$$e_1 = V_{dc}^* - V_{dc} \quad (IV.11)$$

La dérivée de l'erreur est la suivante :

$$\dot{e}_1 = \dot{V}_{dc}^* - \dot{V}_{dc} = \dot{V}_{dc}^* - \frac{1}{C} I_{dc}^* \tag{IV.12}$$

La fonction candidate Lyapunov est choisie comme suit :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \tag{IV.13}$$

La dérive de la fonction V_1 exprimée comme :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = -K_1 e_1^2 \tag{IV.14}$$

Pour assurer la stabilité du système, la dérivée de la fonction Lyapunov doit être négative. Ceci peut être établi en choisissant la dérivée de e_1 comme:

$$\dot{e}_1 = \dot{V}_{dc}^* - \frac{1}{C} I_{dc}^* = -K_2 e_1 \tag{IV.15}$$

Où K_1 est un gain positif. Par conséquent, la loi de commande peut être donnée par l'équation ci-dessous et son schéma fonctionnel de contrôleur est présenté sur la figure (IV.4)

$$I_{dc}^* = C(\dot{V}_{dc}^* + K_2 e_1) \tag{IV.16}$$

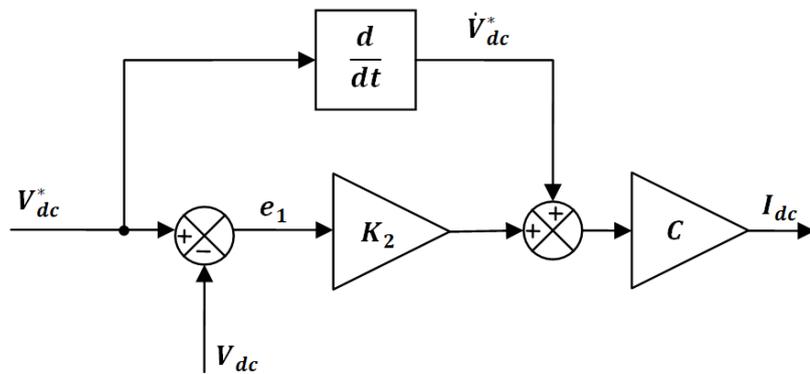


Figure. IV. 4. Schéma fonctionnel du contrôleur Backstepping de la tension V_{dc} .

L'instabilité et le déséquilibre de la tension continue de sortie sont considérés comme le problème principal dans les convertisseurs. Cela peut être surmonté en insérant un Circuit de Pont de Serrage (CPS) en parallèle avec le condensateur comme indiqué sur la figure (IV.5) [21].

Le pont de serrage est constitué d'un transistor T en série avec résistance r_p , insérée pour améliorer et stabiliser la tension continue dynamique [21].

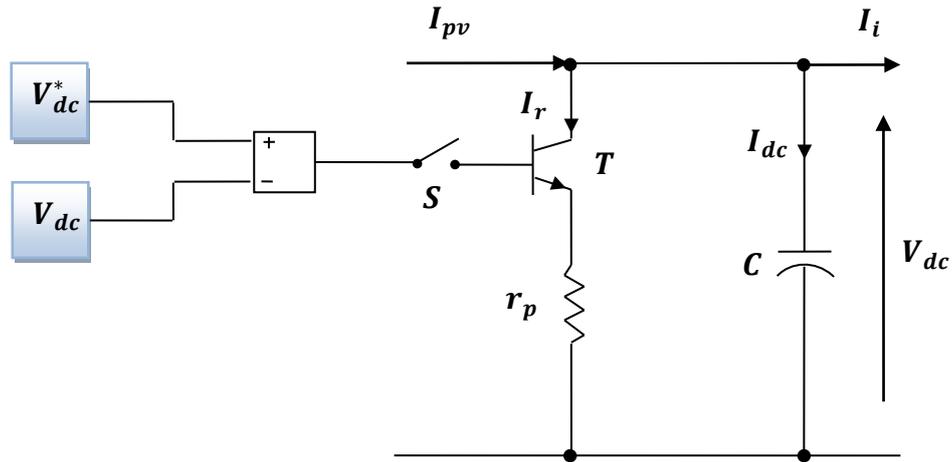


Figure. IV. 5. Schéma de pont de serrage.

D'après la figure (IV.5) on a :

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int (I_{pv} - I_r - I_i) dt \quad (\text{IV. 17})$$

Où I_r est le courant circulant sur r_p et I_i est le courant d'entrée de l'onduleur.

$$I_r = T \frac{V_{dc}}{r_p} \quad (\text{IV. 18})$$

Le pont de serrage compare l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence. Si l'erreur est différente de 0, l'énergie supplémentaire sera dissipée à travers la résistance, cet algorithme de contrôle est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{dc}^* - V_{dc} = \varepsilon & \text{avec } V_{dc}^* = 350 \text{ V} \\ \text{Si } \varepsilon \geq 0 & \text{alors } T \Rightarrow I_r = \frac{V_{dc}}{r_p} \\ \text{Si non} & T = 0 \Rightarrow I_r = 0 \end{cases} \quad (\text{IV. 19})$$

IV.5. Résultats de simulation

Le système est simulé et vérifié avec logiciel MATLAB / SimPowerSystem. Les paramètres choisis pour simuler le système sont présentés dans l'annexe C. On a effectué trois tests pour l'évaluation des performances du système étudié.

Nous soumettons le système à différentes conditions environnementales :

1. D'abord on maintient une température et un éclairement constants (conditions standards : $T = 25^\circ\text{C}$ et $\psi = 1000\text{W}/\text{m}^2$), et une charge constante.
2. Après, on maintient une température constante ($T = 25^\circ\text{C}$) et on varie l'éclairement avec une charge constante.

3. Ensuite, on maintient une température et un éclairement constants (conditions standards : $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $\psi = 1000\text{W}/\text{m}^2$) et on varie la valeur de la charge.

IV.5.1. Conditions nominales

Dans ce test, nous avons considéré que l'éclairement est fixé sur sa valeur nominale de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et la température à une valeur de 25°C , et une charge constante de 2000W .

Les figures (IV.6) et (IV.7) présentent respectivement la puissance active et réactive, on remarque que la puissance absorbée par la charge est égale à la somme de la puissance de réseau et la puissance délivrée par notre générateur photovoltaïque. La puissance réactive suivre sa référence ($Q^* = 0\text{VAR}$) qui implique que le facteur de puissance est unitaire comme elle est illustrée dans la figure (IV.8).

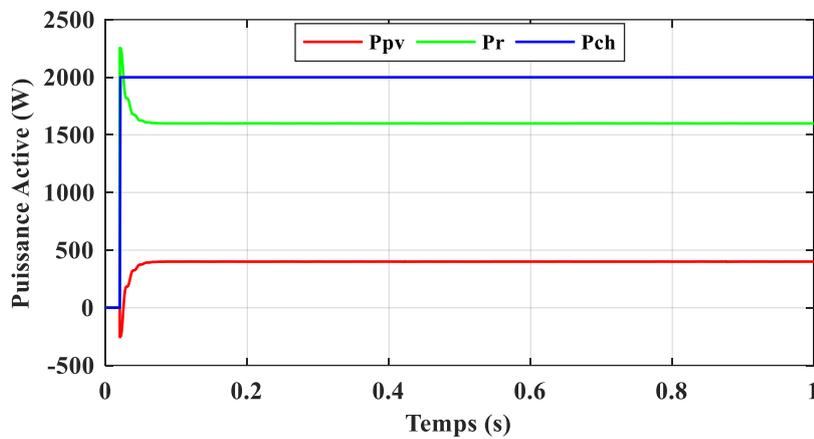


Figure. IV. 6. Puissance active du PV, réseau, charge.

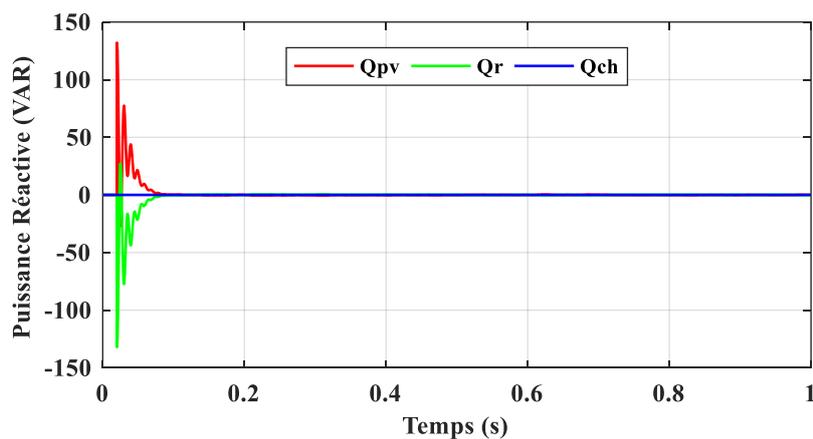


Figure. IV. 7. Puissance réactive du PV, réseau, charge.

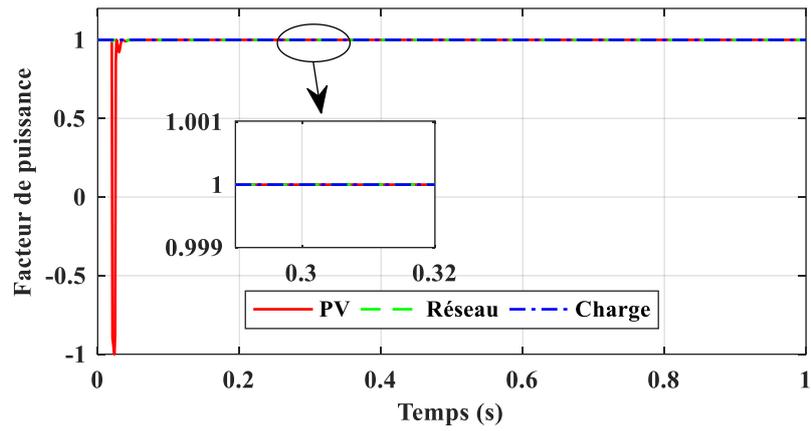
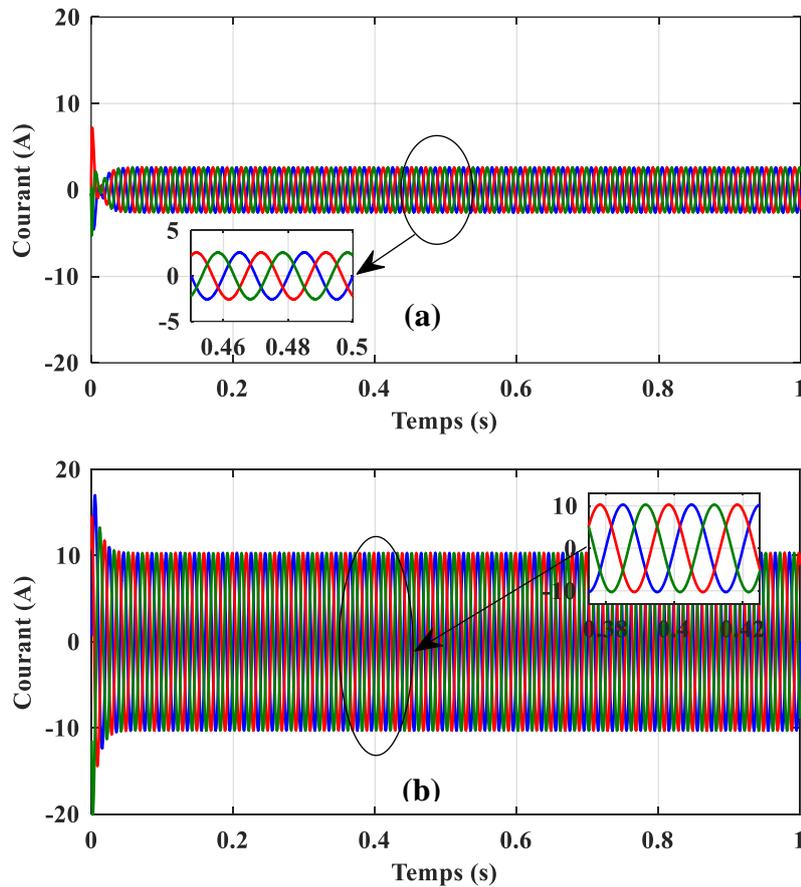


Figure. IV. 8. Facteur de puissance.

La figure (IV.9) montre la forme d'onde du courant PV, du courant de réseau et du courant de charge respectivement, d'après ces figures on remarque que les formes d'onde sont sinusoïdales et la fréquence est maintenue à 50 Hz.



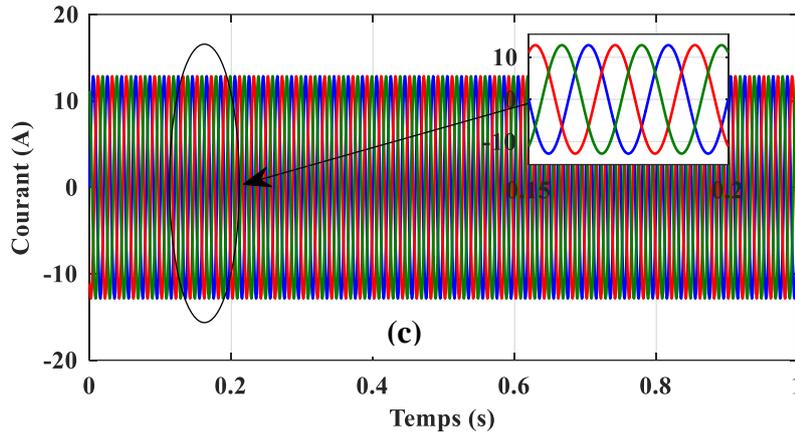


Figure. IV. 9. La forme d'onde des courant : (a) PV, (b) Réseau et (c) Charge.

La figure 9 montre le RMS du courant PV, le courant du réseau et le courant de charge, nous remarquons que le RMS de la charge actuelle égale à la somme du courant du réseau et du courant PV, dans ces simulations est basée l'équation suivante :

$$I_{charge} = I_{pv} + I_{réseau} \tag{IV. 20}$$

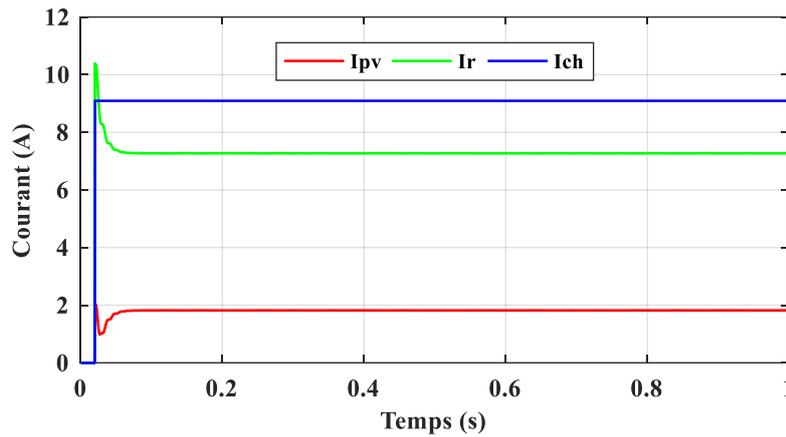


Figure. IV. 10. RMS des courants.

La figure (IV.11) représente la tension de sortie de l'onduleur, la tension est de forme triphasée sinusoïdale équilibrée $V = 220 V$ telle de la tension réseau électrique.

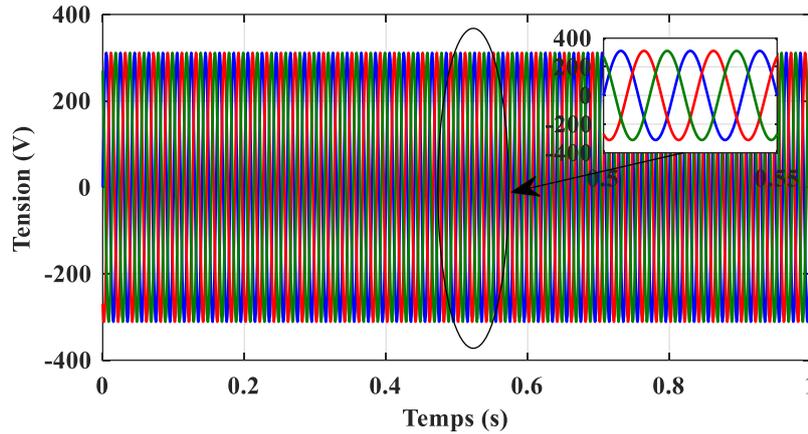


Figure. IV. 11. Tension du système PV.

IV.5.2. Eclairage variable

Dans ce cas, au départ, l'irradiation est fixée à 1000 W/m^2 . A $t = 0,3 \text{ s}$, l'irradiation passe à 500 W/m^2 , puis elle augmente à 800 W/m^2 et se termine à 300 W/m^2 à $t = 0,5 \text{ s}$ et $t = 0,7 \text{ s}$ respectivement.

Les figures (IV.12) présente la puissance active. La puissance active délivrée par l'onduleur lors de l'irradiation de 1000 W/m^2 est de $400,5 \text{ W}$. A $t = 0,3 \text{ s}$ l'irradiation réduite à sa valeur nominale, la puissance générée par GPV est réduite mais la puissance générée par le réseau augmentée dans un but de stabilité énergétique entre la demande et la production.

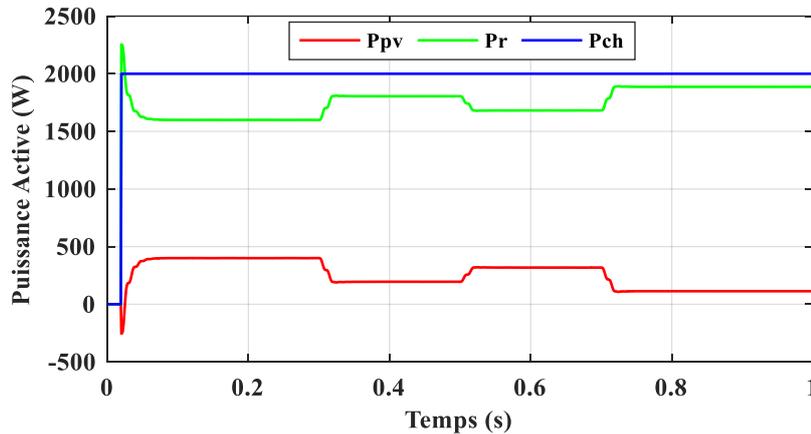


Figure. IV. 12. Puissance active du PV, réseau, charge.

La figure (IV.13) représente RMS des courants de système pour différents niveaux d'irradiation appliquées [1000 et $500, 800$ et 300] W/m^2 respectivement. D'après ces résultats de simulation on constate clairement que le courant absorbé par la charge est égal à la somme du courant de réseau et de PV.

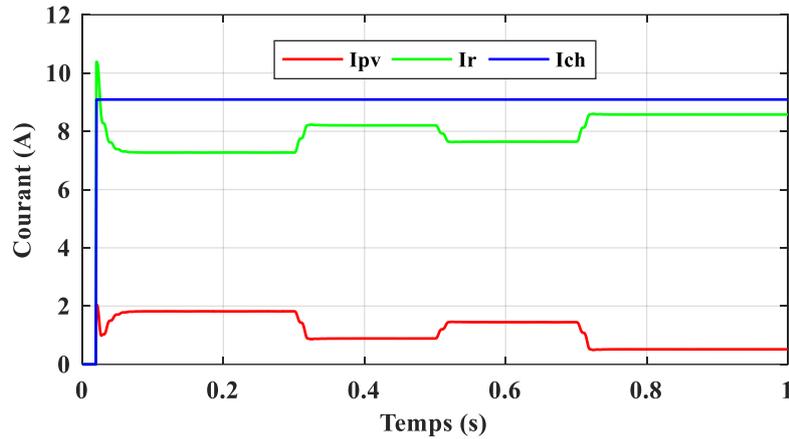


Figure. IV. 13. RMS des courants.

Le THD des courants du système est tabulé pour une irradiation variable. Il est noté dans le tableau (IV.2) que le contenu THD de système pour différents niveaux d'irradiation est inférieur à 5% de la norme IEEE.

Tableau. IV. 1. THD du courant de système pendant une irradiation variable.

<i>Irradiation (W/m^2)</i>	$1000 W/m^2$	$800 W/m^2$	$500 W/m^2$	$300 W/m^2$
<i>THD (%)</i>				
<i>GPV</i>	0.65	0.81	1.29	2.43
<i>Réseau</i>	0.98	0.74	0.57	0.50
<i>Charge</i>	00	00	00	00

IV.5.3. Charge variable

Dans cette partie le système est simulé sous les conditions standard ($\psi = 1000 W/m^2, T = 298 K$) et une charge variable. La charge est initialement fixée à 400 W. À $t = 0,4$ s il est brusquement changé à 1500 W, puis réduit à 700 W à nouveau à $t = 0,7$ s.

D'après la figure (IV.14) on peut remarquer :

De $[0, 0,4]$ s la puissance photovoltaïque égale à la puissance de la charge, la puissance assurée au réseau est zéro à l'état permanent. Toute l'énergie produite par le générateur photovoltaïque sert à l'alimentation de la charge.

Dans deuxième temps, on varie brusquement la charge à une valeur de 1500 W entre 0,4 et 0,7 s, on remarque que la puissance assurée au charge sera la somme entre les valeurs de la puissance

photovoltaïque et la puissance de réseau ce qui signifie que le réseau fournit de la puissance à la charge selon sa demande. Pour une puissance 1500 W de la charge, le système photovoltaïque fournit 400 W et le reste 1100 W est assuré à partir du réseau.

La charge est démunie à une valeur de 700 W à l'instant $t = 0.7\text{ s}$, on remarque que le GPV reste produire une puissance de 400 W , et le reste assuré par le réseau électrique 300 W pour le but de stabilité énergétique entre la demande et la production.

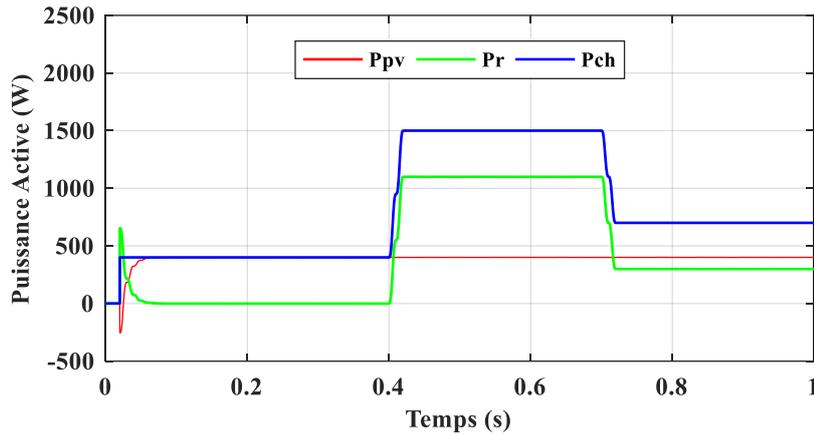


Figure. IV. 14. Puissance active du PV, réseau, charge.

La figure (IV.15) montre les valeurs efficaces du courant de système, on remarque que depuis la période 0 à 0.4 s, le réseau ne fournit aucun courant ($I_r = 0$), parce que tout l'énergie produite par système PV satisfait l'énergie demandé par la charge.

Après l'augmentation brusque de la puissance demandée à 1500 W traduite par la valeur 6.81 A du courant de la charge à partir de l'instant 0.4 s, le courant du réseau s'élève à 4.99 A pour assurer cette augmentation qui signifie stabilité énergétique entre la demande et la production.

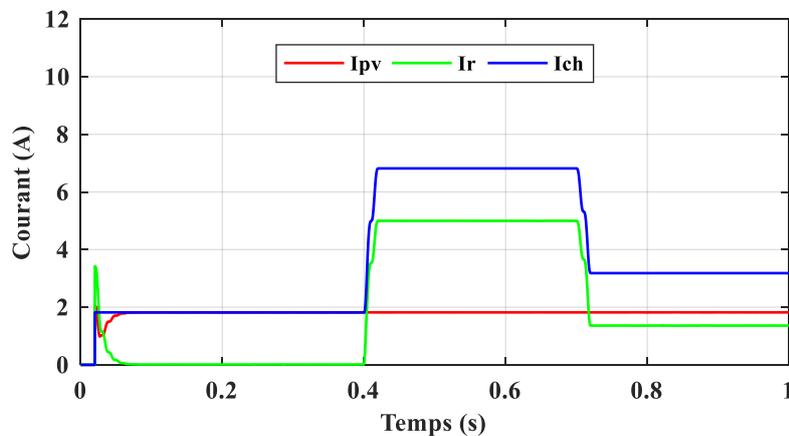


Figure. IV. 15. RMS des courants.

Le tableau (IV.3) représente le THD des courants du système pour une charge variable. On remarque que THD de système pour différentes variations de la charge est inférieur à 5% de la norme IEEE.

Tableau. IV. 2. THD du courant de système lors du changement de charge.

<i>Charge (W)</i>	400 W	700 W	1500 W
<i>THD (%)</i>			
GPV	0.65	0.64	0.62
Réseau	00	0.86	0.23
Charge	00	00	00

La figure (IV.16) illustre la tension continue de sortie de convertisseur Z-source qui représente la tension de bus continue V_{dc} , on remarque qu'elle suit sa valeur de référence $V_{dc}^* = 700 V$, et reste constante pour les différentes conditions environnementales qui montre l'efficacité du contrôleur utilisé.

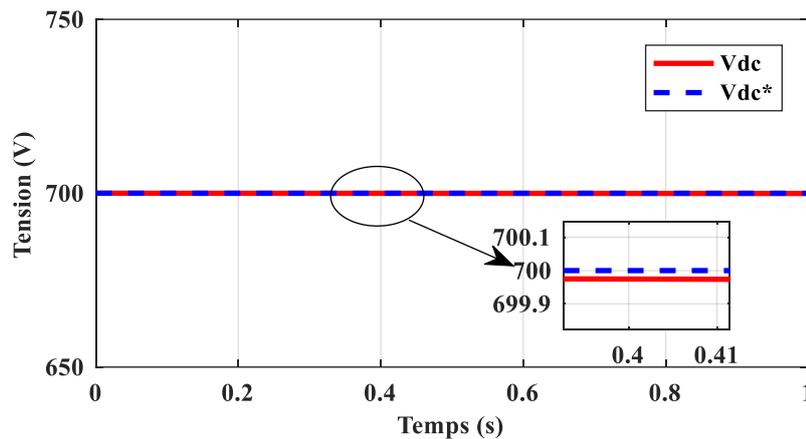


Figure. IV. 16. Tension V_{dc} de Bus Continu.

IV.6. Conclusion

Le but de ce chapitre est pour étudier les performances et dynamiques de système photovoltaïque connecté au réseau électrique à travers convertisseur de type Z-source pour que le système fonctionne avec bonne performance.

Un contrôleur avancé est conçu est contrôleur Backstepping son principal l'objectif est permis le contrôle de la tension de bus continue afin de transférer la puissance PV vers le réseau électrique.

De plus, contrôleur avancée, a présenté de bonnes performances en conditions climatiques variables et condition de charge. La variation des ces conditions n'a aucune d'influence sur la

tension du bus continu. Aussi, les résultats de la simulation ont montré que stratégie de commande par la puissance instantanée permet de fournir la puissance PV et d'injecter l'énergie dans le réseau à un facteur de puissance unitaire et un courant à faible THD (inférieur à 5%), pendant les différentes conditions environnementales.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire se concentrent sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite par les systèmes photovoltaïques afin qu'ils puissent être connectés au réseau électrique.

Les Sources des Energies Renouvelables (SER) telles que l'énergie photovoltaïque, est de nature variable car ils dépendent aux conditions climatiques (température et éclairage). La variation de ces conditions influe sur les paramètres électriques tels que la puissance, la tension et le courant.

Donc l'implémentation d'un ensemble de techniques PPM pour une utilisation fiable d'un tel système dans ces conditions. Pour une extraction maximale de l'énergie PV, des algorithmes PPM sont utilisés pour l'optimisation de cette source d'énergie renouvelable.

Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB. Nous avons procédé à cette étude en quatre étapes : état de l'art des énergies renouvelables, la modélisation du système photovoltaïque, le convertisseur boost, et un algorithme PPM, convertisseur z-source commandé par un commande avancée pour poursuite de point de puissance maximale, enfin le système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Après un bref rappel sur les ressources énergétiques renouvelables, nous nous sommes intéressés aux énergies photovoltaïques. Ensuite nous sommes intéressés aux modes d'intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant : la source primaire, le convertisseur statique : l'hacheur survolteur (Boost), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite PPM.

De plus, ce convertisseur statique est un générateur de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur, qui implique une dégradation de l'énergie photovoltaïque. L'algorithme P&O est largement utilisé dans les recherches. Ce dernier monté certes une bonne efficacité mais il a aussi montré des limites, tel que la lenteur et une erreur dynamique lors la brusque variation de l'irradiation solaire.

Une autre configuration PV à base d'un convertisseur élévateur de type Z-source pour surmonter les limitations du convertisseur traditionnel. Le convertisseur Z-source commandé par un algorithme basé sur le mode glissant, ce dernier est capable d'atteindre le point de fonctionnement

optimal lors d'un changement brusque des conditions météorologiques et conditions de charge avec une performance élevée dans les deux états stables et dynamiques, soit en croissance ou en décroissance. La réponse du système aux profils de variation de l'éclairement, température et la charge, prouve que la technique appliquée permet de réduire les erreurs de trajectoire de la poursuite du PPM. Cela peut se traduire par la minimisation des pertes de puissance engendrées.

L'intégration du système PV au réseau électrique, nécessite un convertisseur CC-CA. Un contrôle de puissances instantané a été effectué, le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive injectées au réseau. Le filtre LCL utilisé améliore la qualité d'énergie produit par système PV, tout en assurant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

La régulation du bus continu par contrôleur Backstepping, a été suggérée pour avoir une stabilisation du bus continu durant les changements qui se produisent dans le système à cause de l'influence des conditions environnementales sur le bus continu. Les résultats obtenus ont prouvé que la stratégie démontre des bonnes performances en qualité de suivre la référence désirée.

Annexe A

Annexe A

Programme qui calcule les différents pourcentages au cas d'un ombrage partiel :

PPMG=433.5; % Un PPM global d'environ 433.5 W dans le cas de l'ensoleillement non homogène
PPM=800; % Un PPM d'environ 800 W dans le cas de l'ensoleillement homogène (conditions standard)

Perte=100-(PPMG*100)/PPM; % l'effet de l'ensoleillement non homogène se résume par une perte de puissance

Perte = 45.8125%

PPMG = 433.5; % Un PPM global d'environ 433.5 W dans le cas de l'ensoleillement non homogène

PT = 97.69*2+200*2; % La somme des quatre puissances de chacun sous leurs propres conditions

PP = (PPMG*100)/PT; % Avec l'éclairage non homogène on peut tirer que 72.8106% de la puissance que normalement on doit avoir

PP=72.8106%

Annexe B

Annexe B

Conception du filtre LCL pour onduleur triphasé connecté au réseau

Il est nécessaire d'utiliser un filtre à la sortie de l'onduleur. Le signal de la sortie de l'onduleur contient des harmoniques à la fréquence de commutation et ses multiplicateurs. Le filtre utilisé dans la sortie de l'onduleur est le filtre LCL. La raison la plus importante de la sélection de ce filtre est qu'il peut être utilisé à de basses fréquences de commutation, ses avantages en termes de dimensions de filtre par rapport aux filtres conventionnels "L" et "LC", sa chute de tension plus faible et un meilleur amortissement par rapport au "L" conventionnel et Filtres "LC". La modélisation du circuit onduleur triphasé connecté au réseau est donnée à la figure suivante [41] :

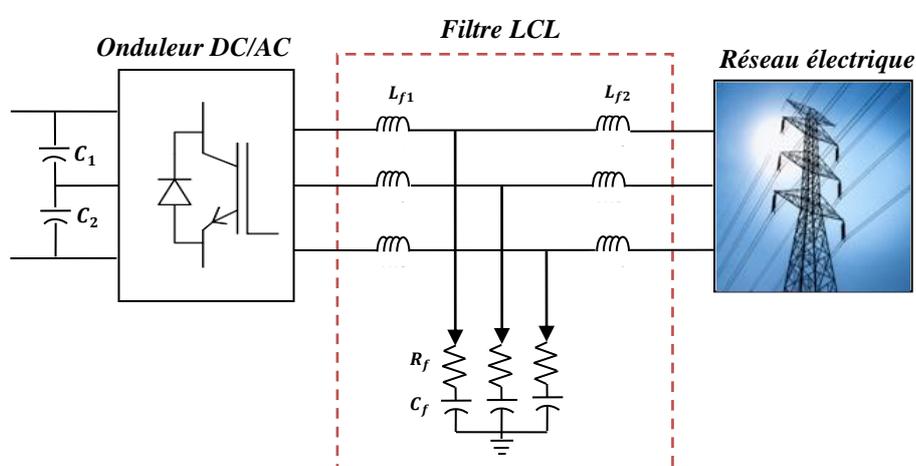


Figure. B.1. Modélisation du circuit onduleur triphasé connecté au réseau via filtre LCL.

$$Z_b = \frac{V_n^2}{P} \quad (\text{B.1})$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g \cdot Z_b} \quad (\text{B.2})$$

$$I_{max} = \frac{P \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot V_f} \quad (\text{B.3})$$

Avec : V_n est la tension efficace monophasée, P est la puissance active de la charge, C_b est la capacité de base, ω_g est la vitesse angulaire du réseau, Z_b est l'impédance de base, V_f est la tension du filtre.

Si le courant nominal est autorisé à fluctuer de 10% pour les paramètres de conception, les valeurs de (B.4) et (B.5) sont obtenues.

$$\Delta I_{L-max} = \%10 \cdot I_{max} \quad (\text{B.4})$$

$$L_{f1} = \frac{V_{dc}}{6.f_{sw}.\Delta I_{L-max}} \quad (B.5)$$

Où, L_{f1} est la valeur de l'inductance côté onduleur, f_{sw} est la fréquence de commutation, V_{dc} est la tension de liaison CC.

La valeur du condensateur est limitée par la réduction du facteur de puissance (moins de 5%) de la capacité nominale. La valeur de capacité, le facteur d'atténuation, la valeur de résonance et la fréquence de résonance sont donnés par (B.6) et (B.9).

$$C_f = 0.05 . C_b \quad (B.6)$$

$k_a = 0.2$ (20%) Le facteur d'atténuation.

$$L_{f2} = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_a^2}+1}}{C_f . \omega_{sw}^2} \quad (B.7)$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_{f1}+L_{f2}}{L_{f1}.L_{f2}.C_f}} \quad (B.8)$$

$$f_{res} = \frac{\omega_{res}}{2\pi} \quad (B.9)$$

La fréquence de résonance doit être choisie égale à la moitié de la fréquence de commutation et à 10 fois la fréquence du réseau. La fréquence de commutation et la plage de fréquences du réseau sont illustrées ci-dessous :

$$10f_r < f_{res} < 0.5f_{sw} \quad (B.10)$$

Cette résistance doit représenter jusqu'à un tiers de l'impédance du condensateur du filtre à la fréquence de résonance nominale. Le calcul de la valeur de résistance est donné en (B.11).

$$R_f = \frac{1}{3.C_f.\omega_{res}} \quad (B.11)$$

Les paramètres utilisés dans l'étude de simulation sont indiqués dans le tableau suivant :

<i>Paramètres de système</i>	<i>Paramètres de filtre LCL</i>
$V_n = 220V$	$L_{f1} = 18.101933e - 3 H$
$f_r = 50Hz$	$L_{f2} = 0.41083196e - 3 H$
$P = 2000 W$	$C_f = 6.5766505e - 6 F$
$f_{sw} = 10kHz$	$R_f = 2.605148855 Ohms$

Annexe C

Annexe C

Tableau.1. Paramètres du convertisseur Z-source

Paramètres	Unités	Valeurs
C_1	μF	0.888
C_2	μF	0.888
C_f	μF	2200
L_1	mH	0.009
L_2	mH	0.009
L_f	mH	1

Tableau. 2. Paramètres de l'onduleur

Type de commutateur à semi-conducteur	-	MOSFET/Diodes
Snubber résistance	Ω	$1e5$
Snubber capacitance	F	inf
Internal résistance	Ω	$1e - 3$
Fréquence	Hz	50
V_{dc}^*	V	700
C	F	$2200e - 2$

Tableau. 3. Paramètres du contrôleur.

K_1	$1e2$
K_2	$3e - 4$

Références bibliographiques

- [1]. A. T. PATRICK, M. SONIA, S. J. RACHIDA, J. N. RAZAFINJAKA, A. C. BERNARD, « Optimisation du rendement énergétique d'un système photovoltaïque par algorithme MPPT flou », téléchargé depuis le site ResearchGate, article, Décembre 2014, pp.1-13.
- [2]. N. KARAMI, N. MOUBAYED, et R. OUTBIB, « General review and classification of different MPPT Techniques », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, 2017, p. 1-18.
- [3]. Z. A. HASSANI, « Stratégie de commande et réglage du bus continu dédiée aux systèmes de production d'énergie éolienne et solaire », Sujet De Mémoire D'ingénieur, Ecole Polytechnique d'Antsiranana Madagascar, Avril 2007, disponible sur le site internet <https://www.memoireonline.com/09/13/7351/> , consulté le 15/08/2020.
- [4]. N. KALAIARASI, S. PARAMASIVAM, S. KUNTU, « Comparison of Z-source Inverter with DC-DC Boost converter fed VSI for PV applications », *IEEE 2nd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2014, Chennai, India, pp 87-91.
- [5]. http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp, site internet, consulté le 02/07/2020.
- [6]. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country , site internet, consulté le 07/07/2020.
- [7]. N. BOUBOU-BOUZIANI, « Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie », *Communication Science & technology COST*, vol 19. July 2017, pp120-132.
- [8]. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Alg%C3%A9rie#Énergie_solaire , site internet consulté le 07/07/2020
- [9]. M. DJARALLAH, « contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », thèse de doctorat, Université de Batna, 2008.
- [10]. F. SALAMA, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
- [11]. M. ZEGRAR, « Optimisation de l'association GPV- onduleur multi niveau », thèse de doctorat, Université de Sciences et Technologie D'Oran, 2017.
- [12]. A. JELALI, « Interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique », Thèse Canada, Université du Québec à Trois-Rivières, Aout 2012.
- [13]. R. MERAHI, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [14]. A. LYESS, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Thème de Magister, Université de Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2011.
- [15]. R. RAJESH, M. C. MABEL, « A comprehensive review of photovoltaic systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 51, November 2015, Pages 231-248.
- [16]. B. BELABBAS, A. SOBH, T. ALLAOUI, S. LARIBI, et M. ABID, « Connexion d'un Générateur Photovoltaïque au Réseau Electrique à travers un Convertisseurs de type onduleur

- Z-source contrôlé par l'algorithme PPM- Logique Floue », *Conferences on Renewable Energies & Advanced*, 2020. pp.1-6.
- [17]. F. BOUTLILIS, « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique », thèse doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2018.
- [18]. M. SARVI, I. SOLTANI, N. NAMAZYPOUR, and N. RABBANIA, « New sliding mode controller for dc/dc converters in photovoltaic systems », *Hindawi Publishing Corporation. Journal of energy*, 2013, p 1-7.
- [19]. I. BENJAMAA, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », *Mémoire de Magister*, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2012.
- [20]. N. DEBILI, « Etude et optimisation en environnement Matlab/ Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », *Mémoire de Magister*, Université de Constantine, 2015.
- [21]. B. BELABBAS, T. ALLAoui, M. TADJINE, M. DENAI, « Power management and control strategies for off- grid hybrid power systems with renewable energies and storage », *Energy Syst*, 2017, p. 1–30.
- [22]. C. PASTOR, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », *Thèse de doctorat*, Institut National de Science Appliquée (INSA) de Toulouse, 2007
- [23]. N. ABOUCHABANA, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », *Mémoire de Magistère*, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [24]. Y. LASMI, « Optimisation de la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un Système Photovoltaïque par les Techniques Intelligentes », *Mémoire de Magister*, Université Sétif, 2013.
- [25]. P. RAJIVGANDHI, P. SELVARAJ, A. ADHITHAN, P. VELMURUGAN, « Comparison Between Traditional Inverter And Z-Source Inverter », *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Volume 2, Issue 5, May – 2017 ISSN No: - 2456 – 2165, pp.639-644.
- [26]. A. BOUYEKNI, R. TALEB, Z. BOUDJEMA et M. MOUMNA, « Commande par mode glissant d'ordre 2 pour une capture maximale d'énergie d'une turbine éolienne », *Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°1,2018*, pp.19 – 26.
- [27]. F. Z. PENG, « Z-Source Inverter », *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Volume: 39, No.2, March/April 2003, Pages 504-510.
- [28]. F. Z. PENG, « Z-Source Networks for Power Conversion », *Michigan State University 2120 EB, East Lansing, MI 48824, USA, May 2008*, pp.1258-1265,
- [29]. A. BATTISTON, « Modélisation, commande, stabilité et mise en œuvre des onduleurs à source impédante : application aux systèmes embarqués », thèse doctorat, Université de Lorraine, 2014.

- [30]. S. AHMADZADEH, G. A. MARKADEH, N. ABJADI, « Back-Stepping Sliding Mode Control of a Z-Source DC-DC Converter », 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), pp.414-418.
- [31]. O. KHERIF, « Analyse d'un convertisseur Z-source DC-DC commandé par MLI dans le mode de conduction continu en régime permanent. », Ecole Nationale Polytechnique, Avenue des Frères Oudaï, Hacen Badi, B.P.182, El-Harrach, 16200 Alger, 2014-2015 pp.1-9.
- [32]. F. CHEDDADI, I. BOUMHIDI, S. SEFRITI, « Comparaison entre la Commande MPPT par mode glissant et la Perturbation et Observation pour les systèmes Photovoltaïques », International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering, 2018, pp.1-5.
- [33]. A. BELKAID, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », thèse doctorat Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2015.
- [34]. M. LAKSHMI, S. HEMAMALINI, « Decoupled control of grid connected photovoltaic system using fractional order controller », Ain Shams Engineering Journal, 2016, p 1-11.
- [35]. N. HAMROUNI , M. JRAIDI , A. DHOUBIC, A. CHERIF, « Design of a command scheme for grid connected PV systems using classical controllers », Electric Power Systems Research, Volume 143, February 2017, Pages 503-512.
- [36]. R. BENIAK, K. ROGOWSKI, « A Method of Reducing Switching Losses in Three-Level NPC Inverter », Power Electronics and Drives Vol. 1(36), No. 2, 2016, pp.55-63.
- [37]. R. BENIAK, K. ROGOWSKI, « A Method of Reducing Switch Count In Three- -Level NPC Inverter – Analysis in Steady States », Power Electronics and Drives 2(37), No. 2, 2017, pp.117-126.
- [38]. A. S. PABBEWAR , M. KOWSALYA, « Three Level Neutral Point Clamped Inverter using Space Vector Modulation with Proportional Resonant Controller », ScienceDirect, Energy Procedia, 103, 2016, pp.286 – 291.
- [39]. F. BOUCHAFAA, A. CHOUDER and S. BOUKHALFA, « Stability of input voltages of a three-level inverter NPC fed by photovoltaic sources », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15 N°3, 2012, pp.501- 512.
- [40]. B. BELABBAS, « Gestion des Flux Energétiques d'un Système de Production d'Energie de Sources Renouvelables avec Stockage en Vue de la Conception des Réseaux Electriques Intelligents "Smart GRID" », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, Alger, 2018.
- [41]. M. DURSUN, M. K. DÖŞOĞLU, « LCL Filter Design for Grid Connected Three-Phase Inverter », IEEE, 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 2018, pp.1-4.

Résumé

La contribution de ce mémoire est d'utiliser un convertisseur de type Z-source dans le système de conversion d'énergie photovoltaïque connectée au réseau électrique. Ce sujet traite la modélisation et la simulation de ce système PV qui se compose d'un Générateur Photovoltaïque (GPV), convertisseur Z-source, onduleur à trois niveaux à structure NPC et le réseau électrique. Pour que le système fonctionne avec des bonnes performances, un algorithme PPM robuste basé sur un contrôleur par Mode Glissant (MG) sera utilisé pour extraire la maximum énergie produite par le système PV. Application d'un contrôleur avancé de type de Backstepping pour contrôler la tension du bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC. Cette chaîne de conversion d'énergie PV est étudié à l'aide du logiciel Matlab / SimPowerSystem. Les résultats des simulations montrent de bonnes performances en termes de l'efficacité et la qualité de l'énergie produite par le système PV connecté au réseau électrique.

Mots clés : Photovoltaïque, Z-source, Onduleur à trois niveaux, mode glissant, Backstepping.

ملخص

تتمثل مساهمة هذه المذكرة في استخدام محول نوع Z-source في نظام تحويل الطاقة الكهروضوئية المتصل بشبكة الكهرباء. يتناول هذا الموضوع نمذجة ومحاكاة هذا النظام الكهروضوئي الذي يتكون من مولد كهروضوئي (GPV)، ومحول مصدر Z، وعاكس ثلاثي المستويات بهيكل NPC وشبكة الكهرباء. لكي يعمل النظام بأداء جيد، سيتم استخدام خوارزمية PPM قوية تعتمد على وحدة التحكم في الوضع المنزلق (MG) لاستخراج الطاقة القصوى التي ينتجها النظام الكهروضوئي. تطبيق وحدة تحكم متطورة من نوع Backstepping للتحكم في جهد ناقل DC لعاكس ثلاثي المستويات بهيكل NPC. تمت دراسة سلسلة تحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام برنامج Matlab / SimPowerSystem. تظهر نتائج المحاكاة أداءً جيدًا من حيث كفاءة وجودة الطاقة التي ينتجها النظام الكهروضوئي المتصل بشبكة الكهرباء.

كلمات مفتاحية : الكهروضوئية، المصدر Z، عاكس ثلاثي المستويات، الوضع الانزلاقي، Backstepping.

Abstract

The contribution of this memory is to use a Z-source type converter in the photovoltaic energy conversion system connected to the electricity grid. This topic deals with the modeling and simulation of this PV system which consists of a Photovoltaic Generator (GPV), Z-source converter, three-level inverter with NPC structure and the electricity grid. For the system to operate with good performance, a robust PPM algorithm based on a sliding mode controller (MG) will be used to extract the maximum energy produced by the PV system. Application of an advanced Backstepping type controller to control the DC bus voltage of a three-level inverter with NPC structure. This PV energy conversion chain is studied using Matlab / SimPowerSystem software. The results of the simulations show good performance in terms of the efficiency and quality of the energy produced by the PV system connected to the electricity grid.

Keywords: Photovoltaic, Z-source, Three-level inverter, sliding mode, Backstepping.