

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf de M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

N° :

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE: Génie électrique

OPTION: Réseaux électrique



Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

Modélisation et simulation d'un
système photovoltaïque

Proposé et dirigé par:

D. GHADBANE ISMAIL

Réalisé par:

- **Boussaâdia Fouad**
- **Bouafia Laid**

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2020/2021

Remerciement

Avant tout nous remercions Allah d`avoir nous donner le courage et la force pour avoir compléter ce modeste travail.

Ce n`est pas qu`il est difficile de remercier tous ceux qui ont participés de près ou de loin à la réalisation de ce travail, mais il faut avoir que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile.

*Nous remercions notre encadreur monsieur D. GHADBANE
ISMAIL*

*Nous tenons à remercier aussi tous les professeurs de
Départements de génie mécanique M`SILA qui ont contribués à
notre formation.*

*Nos sincères gratitudes à tous les étudiants pour leurs soutiens
et leur encouragement tout long de ces années*

Dédicace

je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, A qui je dois un grand amour pour leur aide tout au long de mes études. Dieu les protèges.

Mes frères et sœurs qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus difficiles. Pour mes amis et tous les gens qui m'aiment. Je n'oublierai pas les étudiants promotion de

2020/2021

Abréviations

Liste des figures Liste des tableaux

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction général

1

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I-1 Introduction

4

I- 2 Le système photovoltaïque:

5

I-3 Energie photovoltaïque:

5

I-3-1 Définition:

5

I-3-2 Rayonnement solaire:

5

I-3-3 Différents types de rayonnement

5

I-4 Les filières technologiques

6

I-4-1 Le silicium

7

I-4-1-1 Le silicium mono-cristallin

4

I-4-1-2 Le silicium multi cristallin (Poly cristallin)

8

I-4-2 Les couches minces

8

I-5 Le photovoltaïque :

10

I-5-1 La cellule PV :

10

I-5-2 L'effet photovoltaïque

11

I-5-2-1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV

11

I-5-2-2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

12

I-6 Générateur photovoltaïque (GPV)

14

I-6-1 La constitution d'un module photovoltaïque

14

I-6-2-2 Mise en parallèle

15

II-6 Caractéristique électrique

17

II-6-1 Propriétés

17

I.7. Comportement d'un générateur photovoltaïque

18

I.7.1. Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement

18

I.7. 2. Influence de l'ensoleillement

18

I.7.3. Influence de la température

19

I.7.4. Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

20

I.8. Potentiel solaire en l'Algérie :

21

I.9.Types de Systèmes PV

23

I.9.1. Systèmes PV autonomes :

23

I.9.2. Systèmes PV hybrides :

23

I.9.3.Systèmes PV raccordés au réseau :

23

I.10.Les avantages et les inconvénients :

24

2I.10.1.Avantages :

24

I.10.2. Inconvénients:

24

I.11. Conclusion	25
Chapitre II Modélisation de la chaîne du système photovoltaïque	
II.1 Introduction :	27
II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :	27
II.2.1.1 Modèle à une diode :(Cellule réelle)	27
II.2.2 Modèle d'un GPV	32
II.2.2.1 Association des cellules photovoltaïque en parallèle :	33
II.2.2.2 Association des cellules photovoltaïque :	34
II.3.2.1 Représentation d'un hacheur survolteur :	39
II.3.2.2 Modélisation d'un hacheur survolteur :	41
II-5 Commande de maximisation de puissance :	45
II.6. La méthode de Perturbation et Observation P&O:	45
II-7 Association PV –Achoeur	47
II-8 Interprétation des résultats :	50
II.9. Convertisseur DC/AC:	50
II.9.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tensions et de sa commande MLI	50
II.10. Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion	52
II.10.1. Commande MLI sinus – triangle :	53
II.11. Avantages de la commande MLI :	55
II.12. Conclusion:	58
Chapitre III Simulation de système photovoltaïque	
III-1-Introduction :	60
III-A- premier signal irradiation	60
III-B deuxième signal irradiation	65
III-C troisième signal irradiation	70
III-2-Interprétation des résultats	74
III.3. Conclusion:	76
Conclusion générale.	77
Références bibliographiques:	79

Abréviations

GPV:Générateurphotovoltaïque

PV:Photovoltaïque

SPV:Système photovoltaïque

DC:Courant Continu(Direct Current)

AC:Courant Alternative(Alternating Current)

MPPT:Maximum Power Point Tracking

MOSFET:Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

MLI:Modulation de Largeur d'Impulsion

MLIST:Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle

FF: Facteur de Forme

P&O:Perturbation et Observation(Perturbe&Observe)

Liste des Figures

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Figure I-1 : Chaîne de conversion photovoltaïque

Figure I-2: Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV

Figure I-3: Structure basique d'une cellule solaire

Figure I-4: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).

Figure I-5 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

Figure I-5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

Figure I-7: Ruban métallique d'une cellule

Figure I-8: Encapsulation des cellules.

Figure I-9: Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en

Figure I-10. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle

Figure I-11 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

Figure I-12: Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^\circ\text{C}$

Figure I-13: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^\circ\text{C}$.

Figure I-14 : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure I-15: Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure I-16 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu Période 1992-2002 .

Chapitre II Modélisation de la chaîne du système photovoltaïque

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

Figure II.2 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

Figure II.3 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

Figure II-4 Schéma bloc détaillé d'un module photovoltaïque

Figure II-5 Résultats de simulation des caractéristique I-V et P-V , pour différents éclairément

Figure II.6: Résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension, pour différentes températures et un éclairément $G=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure II.7 : Schéma d'un convertisseurs DC-DC.(Boost)

Figure II.8 : Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

Figure II.9: Allure des variables dynamiques IL.

Figure II.10: schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

Figure II.11 : Tensions de sortie du convertisseur BOOST

Figure II-12: organigramme de l'algorithme[9]

Figure II-13 Schéma de converge vers le PPM par P&O

Figure II.14: schéma bloc PV -Acheur de simulation.

Figure II.15: Tensions de sortie – PV- Acheur

Figure II-16Tensions de sortie – PV- Acheur

Figure II- 17courant de– PV- Acheur

Figure II -18 Onduleur de tentions triphasé a deux niveaux

Figure II.19: principe de la MLI

Figure II.20 : Description de la Tceommpmsa(sn)de M.L.I. sinus – triangle [

Figure II-21 : Illustration de la MLI sinus-triangle

Figure II.22: Les tensions de sortie de l'onduleur.

Chapitre IIIsimulation système photovoltaïque

Figure III.1 :.01 Signal irradiation

Figure III.2:La tension (v) et le courant (i)

Figure III.3:Irradiation et la tension et la puissance PV après la filtration

Figure III.4 :Irradiation et la tension et la puissance PV avant la filtration

Figure III.5: 5 la tension de sortie de GPV

Figure III.6courant Id et Iq de VSC control

Figure III.7: La tension d'inventer

Figure III-802 signal irradiation

Figure III-9 La tension (v) et le courant (i) grid

Figure III-10 Irradiation et la tension et la puissance PV après la filtration

Figure III-11Irradiation et la tension et la puissance pv

Figure III-12la tension de PV

Figure III-13courant Id et Iq de VSC control

Figure III-14La tension d'inventer

Figure III-15Signal irradiation

Figure III-16Irradiation et la tension et la puissance PV

Figure III-17La tension (v) et le courant (i) grid

Figure III-18la tension de sortie de PV

Figure III-19courantId et Iq de VSC control

Figure III-20 La tension d'inventer

Figure III-21 schema de block globale

Listes des Tableaux

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie

Tableau II.1 Conditions de test.

Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC

Abréviations

VSG : tension de sortie d'un générateur

G : irradiation ou ensoleillement

Wc : Watt crête

Voc : tension en circuit ouvert

(V) Isc : courant de court-circuit (A)

Impp : courant maximum fournie par un module

Vmpp : tension maximale fournie par un module

Pmpp : puissance maximale fournie par un module

S : surface du module PV

ε : Albédo

I_{pv} : courant fournie par la cellule

(A) V_{pv} : tension aux bornes de la cellule

(V) Id : courant de diode (A)

I_{ph} : courant photonique (A)

I_{sh} : courant dérivé par la résistance parallèle

(A) I₀ : courant de saturation (A)

I_{scn} : courant de court-circuit nominal

(A) V_t : tension thermique (V)

Rsh: résistance en parallèle

(Ω) Rs : résistance en série (Ω)

T_n : température nominale ($^{\circ}\text{C}$ ou K)

K_v : coefficient de température en circuit ouvert

(V/K) a : facteur d'idéalité de la diode

q : charge de l'électron ($q = 1,6 \cdot 10^{19}$ C)

K : constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{23}$ J/K)

Ki: coefficient de la température (A/K)

Ns : nombre de cellule en Série

Np : nombre de cellule en parallèle

Introduction

générale

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entraînera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources.

D'autant plus que la demande ne cesse de croître et dès à présent à être supérieure l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque

Aujourd'hui, le soleil est une source énergétique inépuisable et propre, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois par rapport aux ressources globales d'énergie.

La localisation géographique de l'Algérie favorise un grand gisement du soleil (la longue durée de l'ensoleillement, la grande intensité du rayonnement). La région d'Adrar est considérée parmi les wilayas qui ont un grand potentiel solaire durant toute l'année, où l'ensoleillement dépasse huit (8) heures dans la saison estivale. Aussi, la propriété de la société agrarienne (plusieurs ksour réparties sur une grande superficie) encourage l'utilisation à grande échelle de l'énergie solaire, soit à l'échelle publique (sept (7) centrales photovoltaïques sont installées et mises en service avec une puissance générée de 53 Mwatt, éclairage public, ...etc), soit à l'échelle personnelle représentée par la vaste utilisation du pompage photovoltaïque. Cela reflète une ambition de prévoir sur l'exploitation des conditions géographiques pour augmenter l'utilisation de l'énergie solaire dans la région.

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque GPV, et d'un convertisseur DC/DC commandé par la commande MPPT. Ce dernier alimente une machine asynchrone à partir d'un onduleur commandé par la commande MLT type sinus-triangle.

Notre travail est basé sur un système PV autonome sans batterie afin de voir la performance d'un générateur PV alimentant un moteur asynchrone dans des conditions climatiques variables d'un côté. De l'autre côté, l'impact de ces variations sur

Introduction générale

une charge. Ce dernier peut alimenter lui-même une autre charge, telle que le système PV, un convoyeur, ... etc. Le mémoire est composé de trois chapitres qui sont répartis comme suit:

Le premier chapitre représente une généralité sur le système photovoltaïque en donnant un aperçu sur l'effet PV et la cellule qui est le cœur du panneau solaire afin de définir le champ et le générateur photovoltaïque.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation avec la simulation du système photovoltaïque en commençant par la modélisation de chaque élément. Pour le convertisseur DC/DC, on a choisi le hacheur Boost commandé par la stratégie MPPT afin d'extraire

la puissance maximale du GPV. Cette dernière a été faite par la méthode P&O. Un onduleur classique à deux niveaux commandé par la commande MLI type sinus-triangle est utilisé dont le but est de synchroniser sa puissance de sortie.

Le troisième et le dernier chapitre concerne la simulation d'un système photovoltaïque pour différents signaux d'irradiations.

Enfin, notre travail est clôturé par une conclusion générale à travers laquelle, on a exposé les principaux résultats qu'on a obtenus.

Chapitre I : **Généralité sur les** **systemes** **photovoltaïque**

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I-1 Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus encourageante (gratuite) et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen des cellules PV. Elles sont essentiellement constituées d'une jonction PN.

Les cellules peuvent être groupées pour former des modules. Les modules peuvent être regroupés pour former des champs photovoltaïques. Le terme module est habituellement utilisé pour décrire un système photovoltaïque (avec plusieurs cellules connectées en série et / ou parallèle). L'objectif de ce travail est de modéliser des modules PV d'une manière compréhensible et intelligible pour l'enseignement d'énergie solaire aux différents niveaux d'études. En outre, ce travail décrit le principe de fonctionnement du module PV. Cette étude simpliste est faite de telle manière à ne pas rebuter les étudiants et suffisamment claire pour bien comprendre le principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques. Elle sera une plateforme pour passer à l'élaboration d'un système embarqué afin de commander le hacheur qui va faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son maximum de puissance (MPPT) en dépit de la variation de la température, [7]

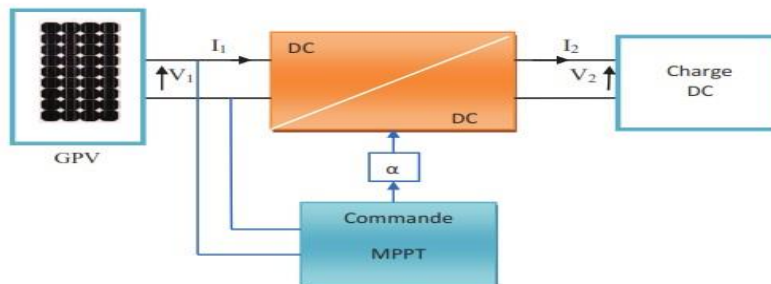


Figure I-1 : Chaîne de conversion photovoltaïque

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I- 2 Lesystème photovoltaïque:

Définition:

Lesystème photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre maximum d'énergie.

I-3 Energie photovoltaïque:

I-3-1 Définition:

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Ces derniers sont regroupés et sont appelés champ photovoltaïque.

I-3-2 Rayonnement solaire:

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0.8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$). [1]

I-3-3 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé au sol, on distingue plusieurs composantes :

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

a) Rayonnement direct:

Flux solaire sous forme des rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

b) Rayonnement diffus:

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

c) Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (neige, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de la surface appelé albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.

I-4 Les filières technologiques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre la figure I-2.

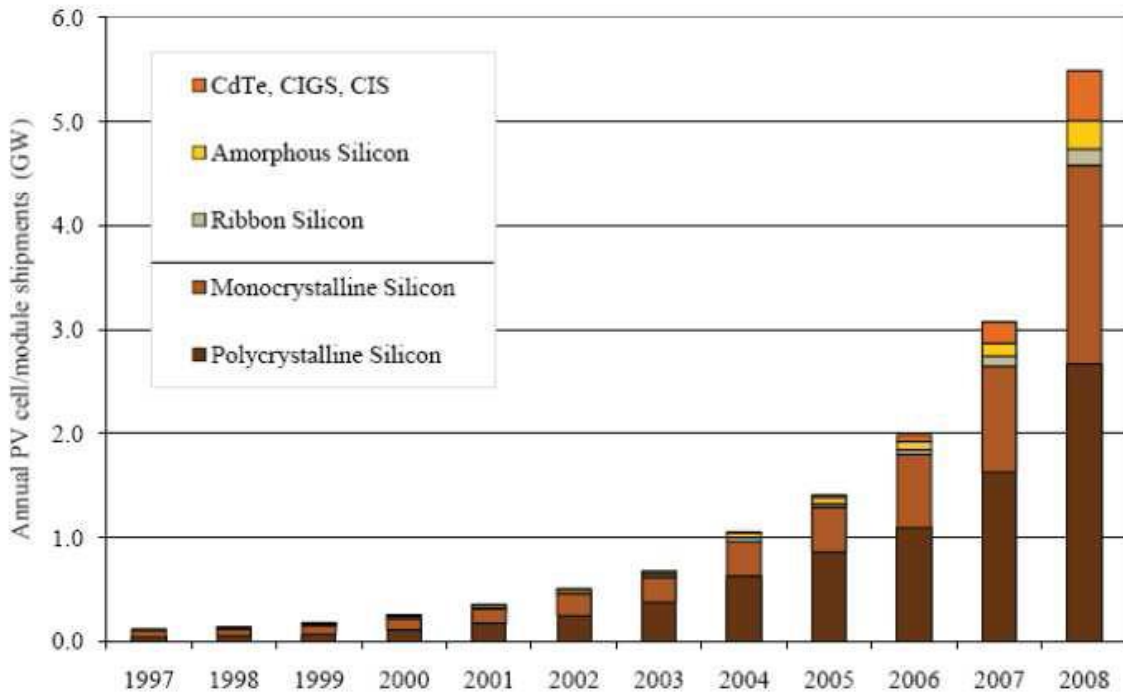


Figure I-2: Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [1].

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs.[2]

I-4-1 Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin

I-4-1-1 Le silicium mono-cristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

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

I-4-1-2 Le silicium multi cristallin (Poly cristallin)

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

I-4-2 Les couches minces

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kWc. Le kilo watt crête (kWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test

Standard (STC) (1000W.m⁻² et 25°C). La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

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

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (Figure II-6) et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entrées modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le

Tellure de Cadmium (CdTe), le di sélénure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS).

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

I-4-3 Cellules organiques et plastiques

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

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en

1986 lorsque l'équipe de Tang [3] montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion

[6]. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures)

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I-5 Le photovoltaïque :

I-5-1 La cellule PV :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation Photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- ❖ d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation

Extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le

Silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement

Bonne,

- ❖ d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- ❖ d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- ❖ les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches

Réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de

Rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

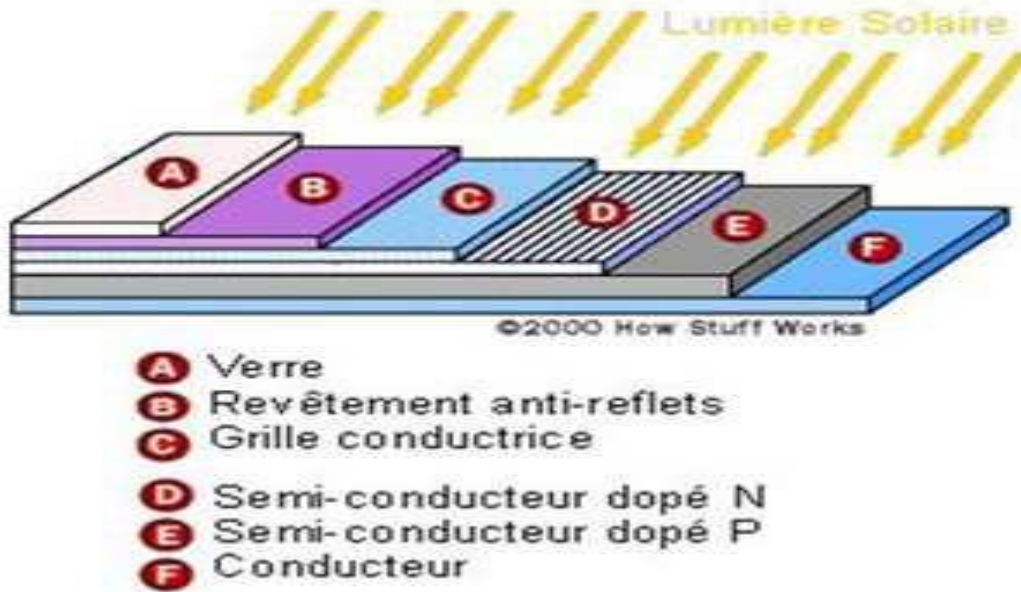


Figure I-3: Structure basique d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du Vieillissement de la cellule.[1.2]

I-5-2 L'effet photovoltaïque

I-5-2-1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure I-11.

Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se suit, selon les matériaux et la structure la jonction [2]

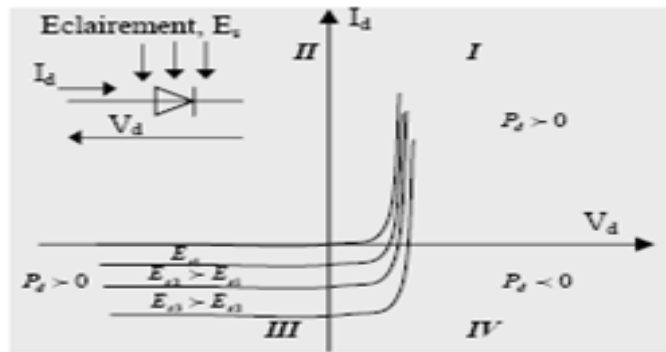


Figure I-4: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).

I-5-2-2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN.

D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I-5

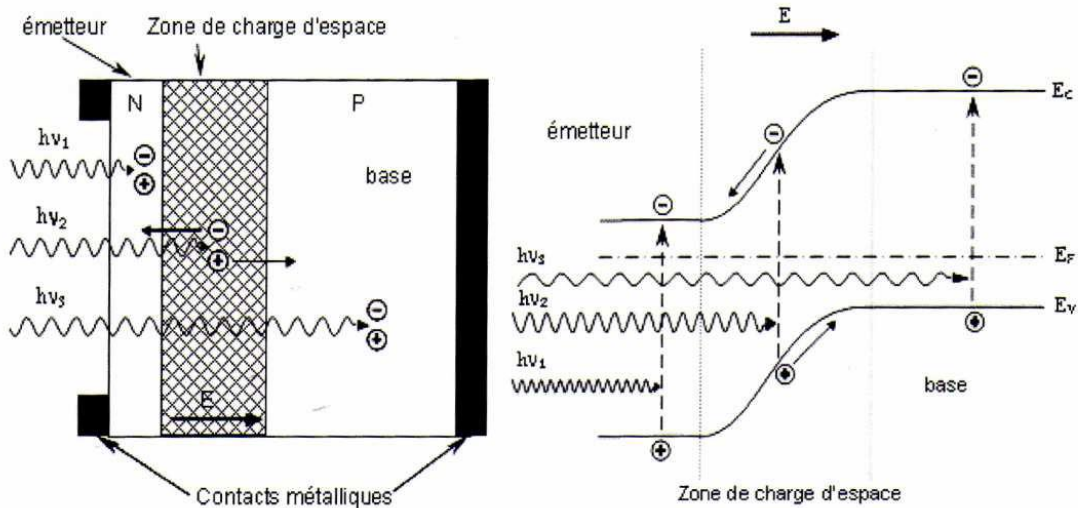


Figure I-5 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

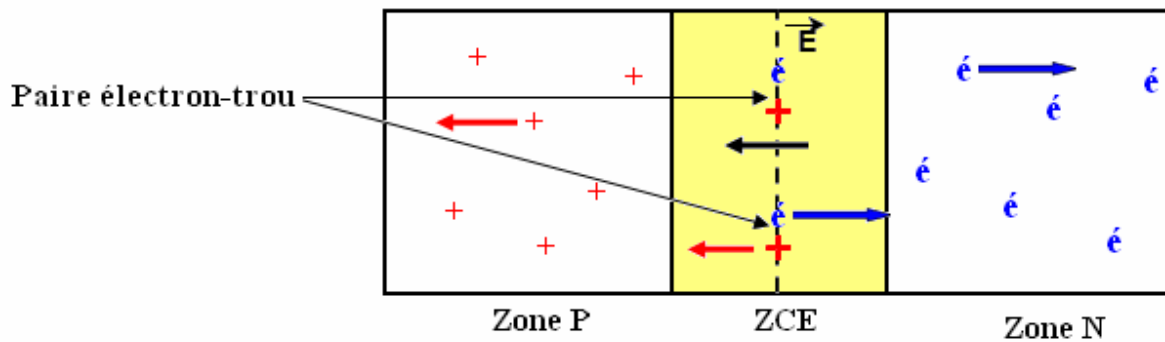


Figure I-5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.[7]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

- dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo courant

De diffusion

- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo courant de génération.

I-6 Générateur photovoltaïque (GPV)

I-6-1 La constitution d'un module photovoltaïque

- câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

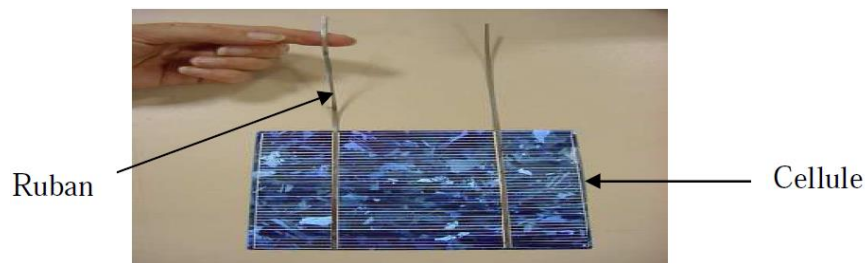


Figure I-7: Ruban métallique d'une cellule.

- les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents(EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR

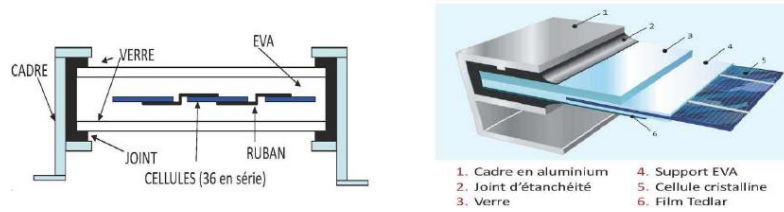


Figure I-8: Encapsulation des cellules.

- connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- les 2 câbles unipolaires sont raccordés

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot c \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (I - 1)$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV

P_{pv} : la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

I-6-2-1 Mise en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure II-15. L'équation (II-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (I - 2)$$

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Avec :

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série

($V_{cons}=0.6V*36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V.

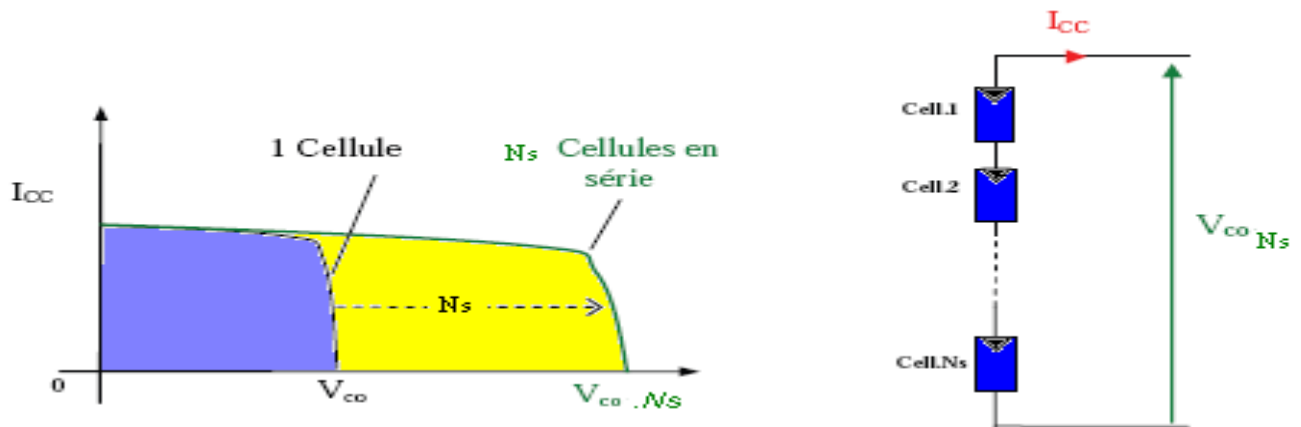


Figure I-9: Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en

I-6-2-2 Mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure I-09. L'équation (I-3) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

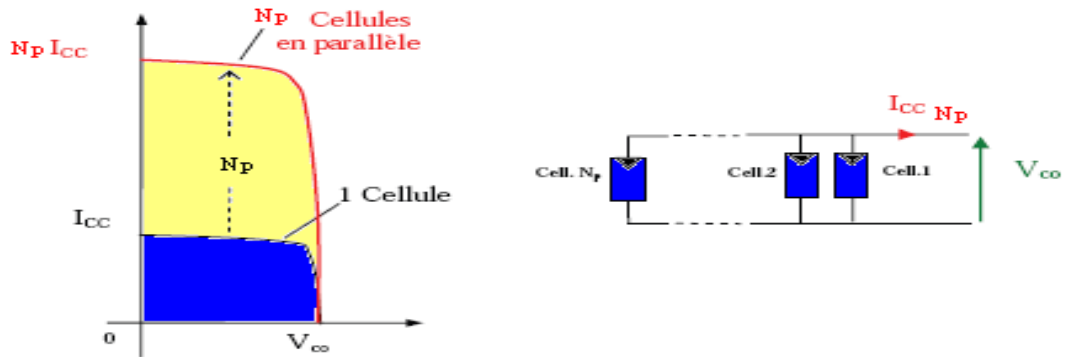


Figure I-10. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc}(1 - 3)$$

Avec

I_{cc} : le courant de court circuit[2]

II-6 Caractéristique électrique

II-6-1 Propriétés

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire (Figure I-10). La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants.

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant

1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.

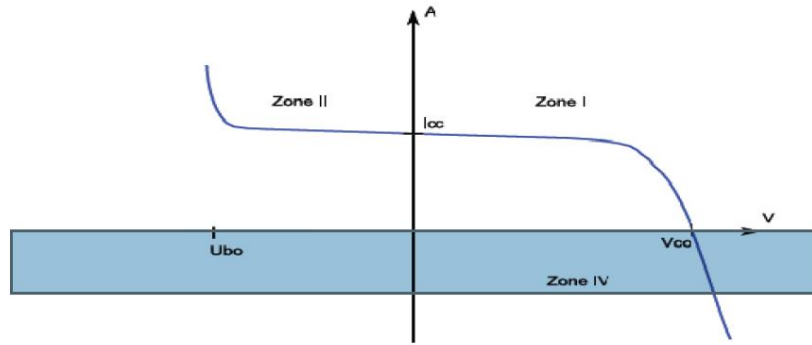


Figure I-11 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

I.7. Comportement d'un générateur photovoltaïque

De par sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance.

I.7.1. Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement

On peut remarquer que la caractéristique $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température. Ceci devient très évident en évaluant l'équation (I.26) pour des valeurs choisies de la température et de l'insolation et en traçant les résultats.[8]

I.7.2. Influence de l'ensoleillement

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

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}C$) et un ensoleillement variable.

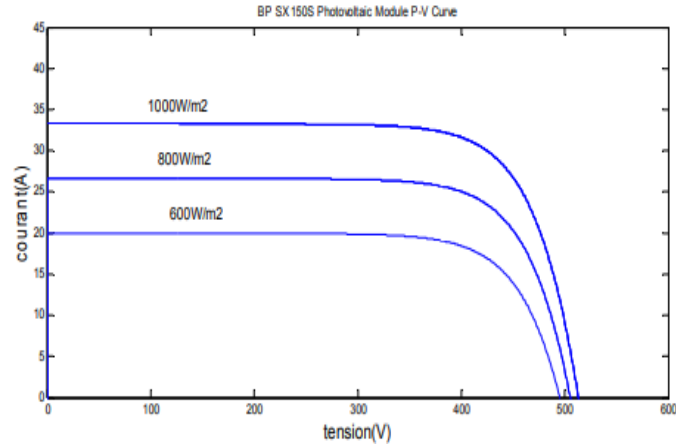


Figure I-12: Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

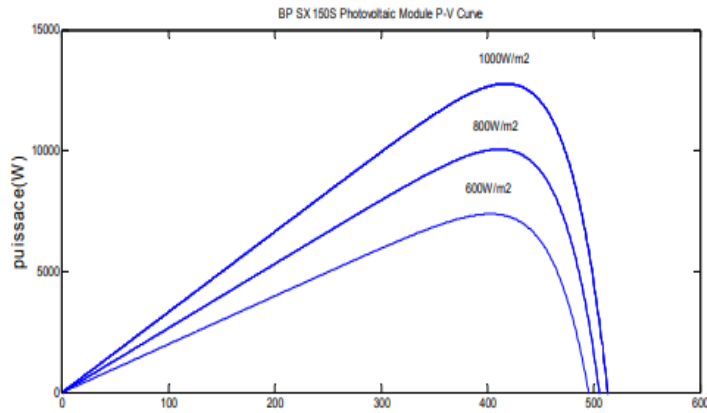


Figure I.13: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension. [6]

I.7.3. Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

De 25°C à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

I.7.4. Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

La figure (I.12) présente des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 100 W/m², la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique). Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin. Ceci va beaucoup contribuer dans notre choix de cellules.

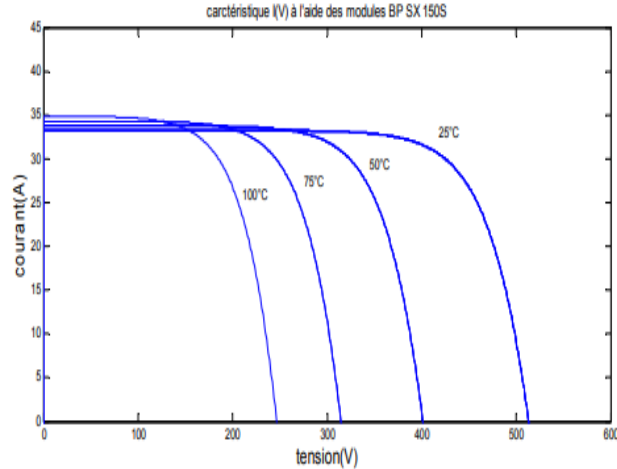


Figure I.14 : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$

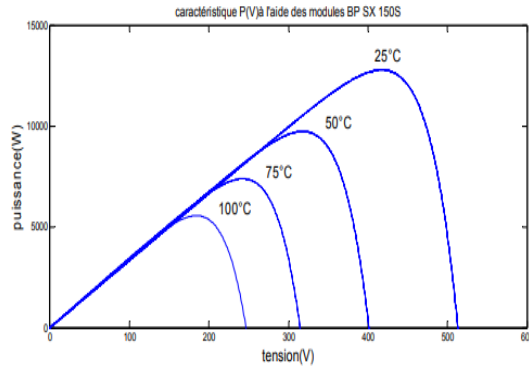


Figure I.15: Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$

I.8. Potentiel solaire en l'Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 (KW/h/m²)/an au Nord et 2263 (KW/h/m²)/an au Sud.

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

Le tableau suivant illustre les statistiques des degrés d'ensoleillement par zones :

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficies (%)	04	10	86
Durée moyen d'ensoleillement (H/A)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /An)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale.

Grace à sa position géographique (la latitude $\varphi = 27.8^\circ$, la longitude $\lambda = - 0.18^\circ$ et l'altitude = 230 m), la région d'Adrar est grossièrement ensoleillée et est considérée parmi les wilayas qui contiennent le plus grand potentiel de toute l'Algérie(figures I.15 et I.16)

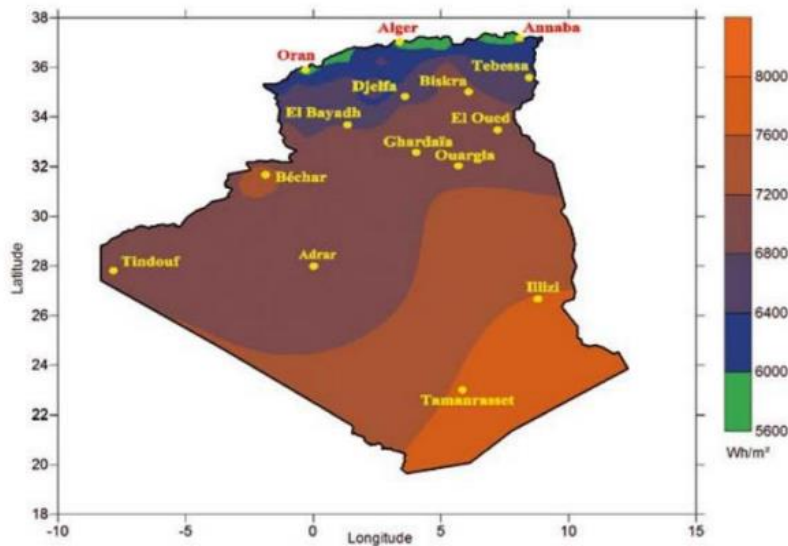


Figure I.16 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu Période 1992-2002 .

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.9. Types de Systèmes PV

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types: autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type choisi dépendra des besoins énergétiques et de l'emplacement. [3.4]

I.9.1. Systèmes PV autonomes :

Sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

I.9.2. Systèmes PV hybrides :

Reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, le générateur PV est souvent allié à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si le budget est limité.

I.9.3. Systèmes PV raccordés au réseau :

Permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans d'autres cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

Chapitre I Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.10. Les avantages et les inconvénients :

I.10.1. Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- ✓ Une haute fiabilité : elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- ✓ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits.
- ✓ non polluante, silencieuse et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

I.10.2. Inconvénients:

Le système photovoltaïque présente toutefois les 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.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesels que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Tributaire des conditions météorologiques.

I.11. Conclusion

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. L'interconnexion de cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché et ou cours de développement, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde une grande longueur d'avance sur les autres technologies. Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules.

Chapitre
III Modélisation de
la chaîne du
système
photovoltaïque

II.1 Introduction :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Le système photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque [2].

Généralement, un système photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, et Onduleur. Le système photovoltaïque étudié fonctionne au fil du soleil. Dans ce chapitre on présente la modélisation et simulation individuelle de chaque élément de l'architecture du système photovoltaïque (GPV –Achour-Onduleur).

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque :

La partie production d'énergie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité. Un panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins de 1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou un panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque [7].

Dans notre étude on se base sur l'élément de base du système photovoltaïque qui est la cellule solaire.

II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

II.2.1.1 Modèle à une diode :(Cellule réelle)

La caractéristique $I-V$ du générateur PV est basé sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par Figure II.1. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [4].

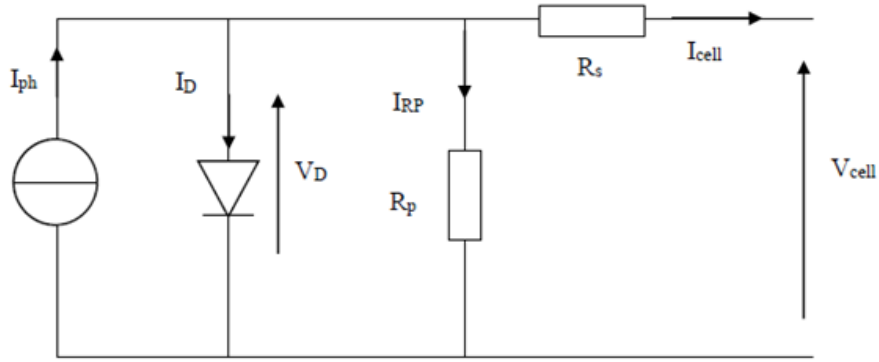


Figure II.1 : Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_p représente le courant de fuite. Une diode D en parallèle qui modélise la jonction PN. Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [4].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

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

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

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

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

Alors :

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

Avec :

I_s : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{KT}} \quad \text{II.6}$$

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

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

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

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

K_1 : constante ($1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$)

T : température effective de la cellule en Kelvin

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

Généralement la résistance (R_p) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant I_{Rp} [1][13], Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

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

Et la tension à ses bornes est donnée par :

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

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

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement $G_0=1000\text{W/m}^2$	Eclairement $G_{\text{nom}}=1000\text{W/m}^2$
Température de la cellule $T_0=25^\circ\text{C}$	Température ambiante $T_{a,\text{nom}}=25^\circ\text{C}$

Tableau II.1 Conditions de test.

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

- Le courant de court-circuit $I_{sc,0}$.
- La tension de circuit ouvert $V_{oc,0}$.
- La puissance maximale $P_{\text{max},0}$.

Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT : Nominal Operating Cellule Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

Le photo-courant I_{ph} est directement proportionnel à l'éclairement. Si $I_{sc,0}$ est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quelle autre valeur de G , est donné par :

$$I_{ph}|_{T_0} = \frac{I_{sc,0}}{G_0} \cdot G = G_1 \cdot G \quad \text{II.10}$$

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

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

D'où :

$$k_0 = \frac{I_{sc}|_{T_2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad \text{II.12}$$

Avec k_0 est le coefficient de température de I_{ph} (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius), et $T_2 = 75^\circ\text{C}$

La température de fonctionnement de la cellule T^C dépend de l'éclairement G et de la température ambiante T_a , selon l'équation empirique suivante :

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

Avec :

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

Si la température TNOCT n'est pas connue, la constante C₂ est approximée par 0.03°Cm²/W.
(en pratique C₂ varie entre 0.01 et 0.03°Cm²/W)

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

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

Où C₃ = -2.3mV/°C

Le courant de saturation I_s de la diode pour la température T₀, est donné par :

$$I_{s;0} = \frac{I_{sc,0}}{(e^{V_{oc,0}/V_{th,0}} - 1)} \quad \text{II.16}$$

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

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

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

$$I = I_{ph} - I_s (e^{(V+R_s I)/V_{th}} - 1) \quad \text{II.18}$$

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

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

$$X_V = \frac{I_{s,0}}{V_{th,0}} - e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{th,0}}} \quad \text{II.21}$$

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

$$R_s = R_s|_{T_0} (1 + k_3 (T - T_0)) \quad \text{II.22}$$

Avec k_3 coefficient de température de la résistance série.

II.2.2 Modèle d'un GPV

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant de court-circuit I_{CC} ou la tension en circuit ouvert V_{OC} . . Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_S (e^{(V_{cell} + R_S I_{cell})/V_{th}} - 1) \quad \text{II.23}$$

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

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [4] :

- Le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{(V + IR_s)/V_{th}} \gg 1$ Pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (II.24) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_S e^{(V_{cell} + R_S I_{cell})/V_{th}} \quad \text{II.24}$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) \quad \text{II.25}$$

D'où :

$$I_s = I_{sc} e^{\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad \text{II.26}$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{(V - V_{oc} + R_s I) / V_{th}} \right) \quad \text{II.27}$$

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

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

$$I^P = N_p I_{sc} \left(1 - e^{\left(V^P - N_s V_{oc} + \frac{N_s}{N_p} R_s I^P \right) / V_{th}} \right) \quad \text{II.28}$$

II.2.2.1 Association des cellules photovoltaïque en parallèle :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure II.2 montre la caractéristique résultante (I_{CS} , V_{CS}) obtenue en associant en série N_S cellules identiques (I_C , V_C) [19].

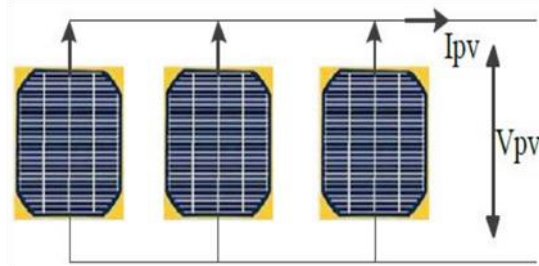


Figure II.2 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

$$I_{cp} = N_p * I_c \quad \text{II.29}$$

$$\text{Et : } V_{cp} = V_c ; I_{cs} = I_c$$

II.2.2.2 Association des cellules photovoltaïques :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure II.3 montre la caractéristique résultante (I_{cs} , V_{cs}) obtenue en associant en série NS cellules identiques (I_c , V_c) [19].

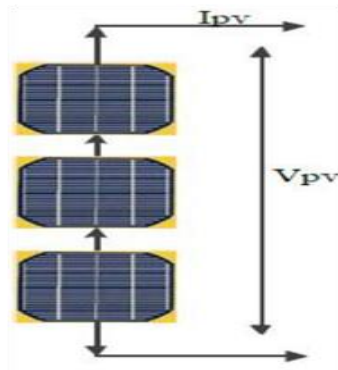


Figure II.3 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

Pour simplifier l'étude et réduire la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que [2] [4] :

caractéristique panneaux photo voltaïque

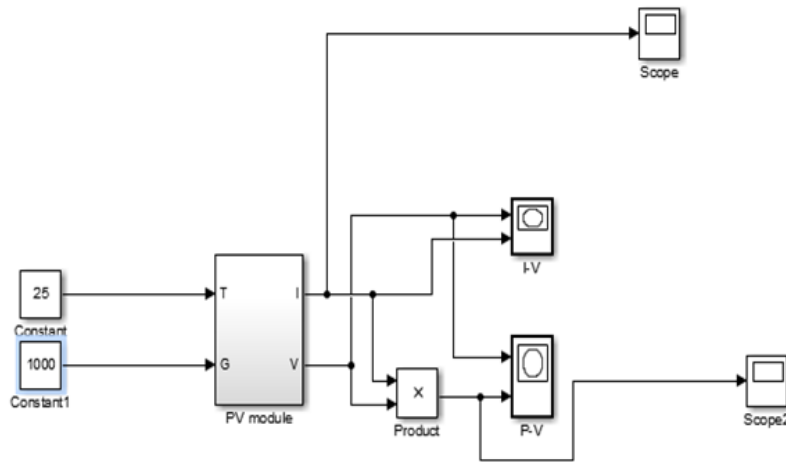
Avant de faire le regroupement des modules photovoltaïques pour former un GPV, on a commencé par la simulation d’un module photovoltaïque afin de voir sa performance et ses caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Caractéristique panneaux photo voltaïque

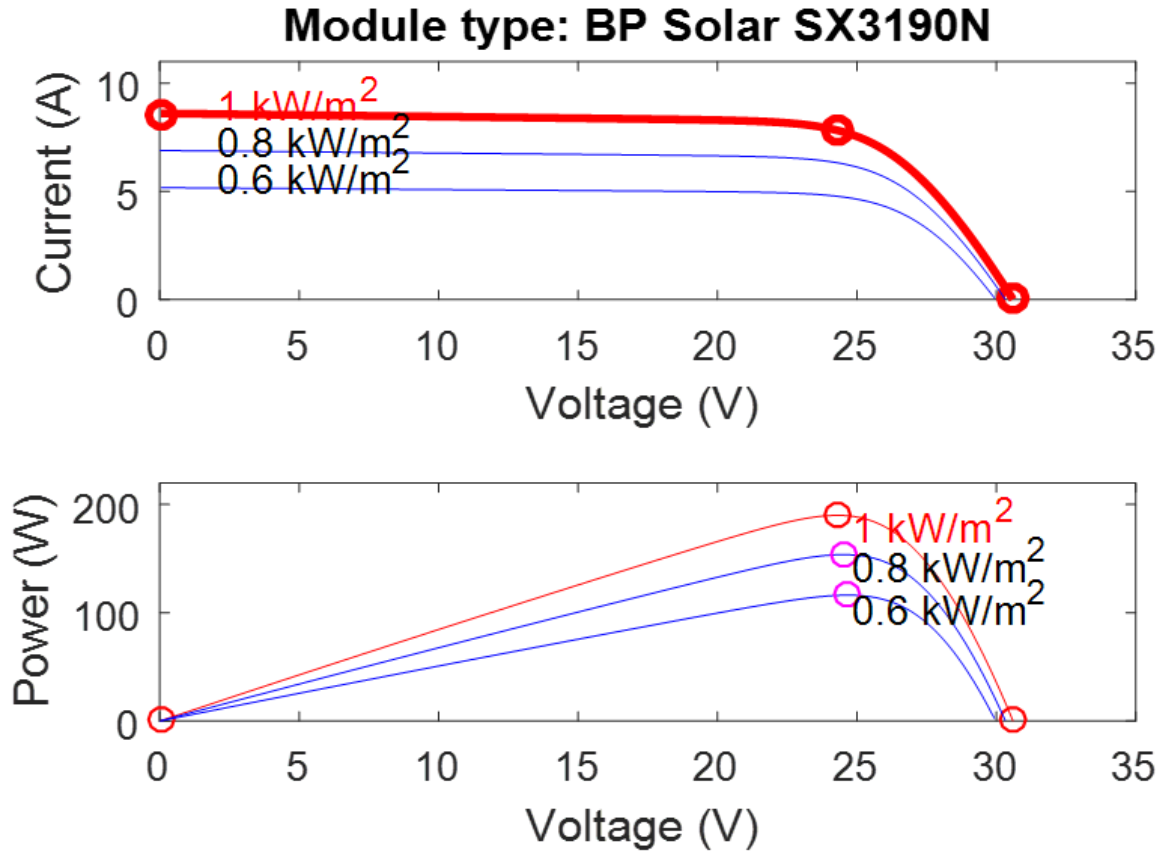
Le module choisi est un module solaire, Bpsolar SX3190 ses caractéristiques sont illustrées sur le tableau ci-dessous : Tabou II-2

Courant de court-circuit	Isc=8.5103 (A)
Tension en circuit ouvert	Voc=30.6021 (V)
Couant au point MPPT	Imp=7.8294 (A)
Tension au point MPPT	Vmp=24.3 (V)
Nombre de cellules en série	Ns=36
Coefficient de température de Isc	Ki=0.00532 (A/C)
Coefficient de température de Voc	Kv=-0.111 (V-C)
Résistance série	Rs=0.24841 (Ohm)
Résistance parallèle	Rp=1896748 (Ohm)
Température nominale	Tn=25(°c)
Irradiation nominale	Gn= 1000 (W/m^2)

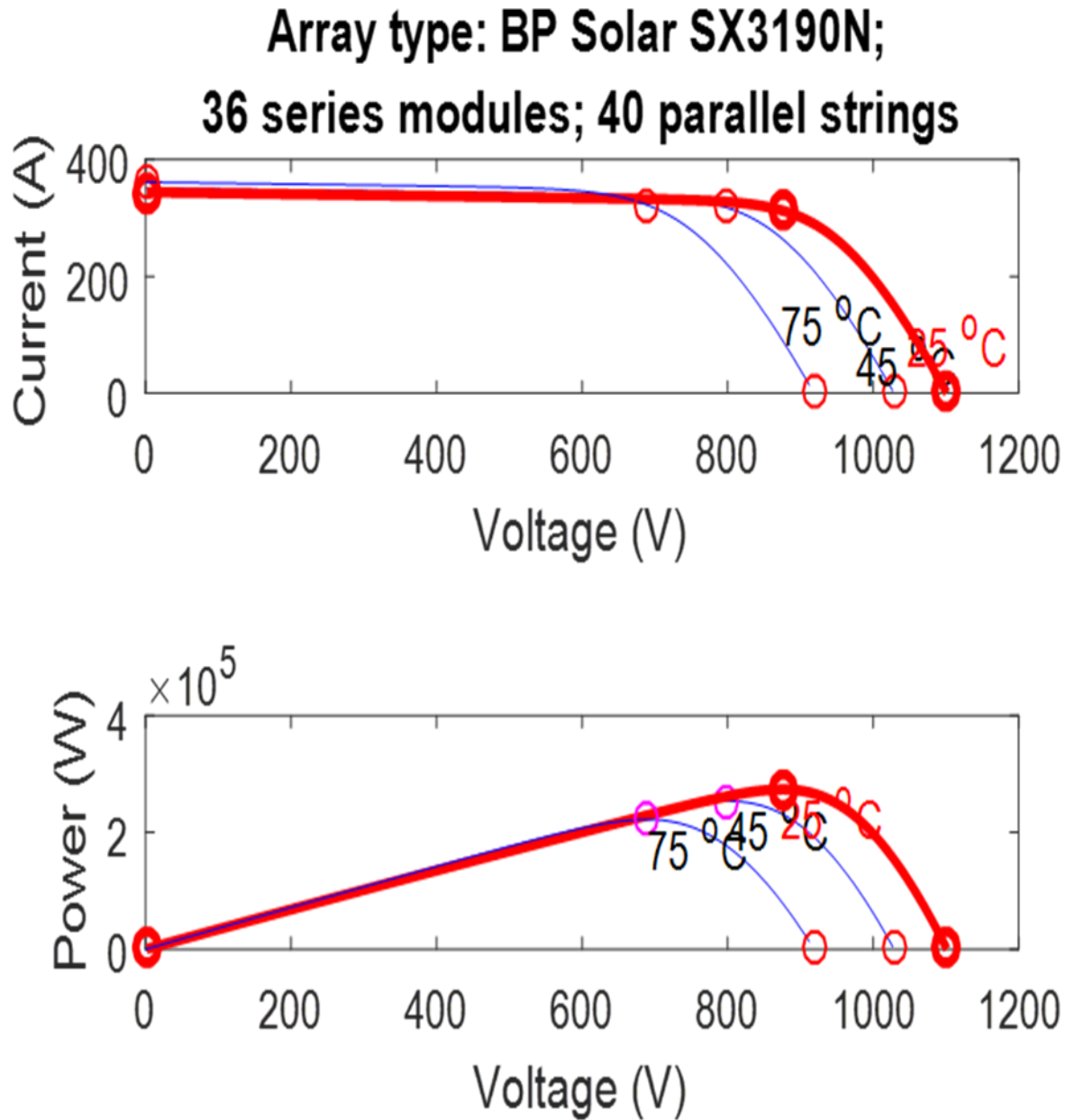
Tableau II.2 Conditions de test



FiguerII-4Schéma bloc détaillé d’un module photovoltaïque



Figuer II-5 Resultats de simulation des caractéristique I-V et P-V , pour différentes éclairement



Figurer II-6 Resultats de simulation des caractéristique I-V et P-V , pour différentes températures et un éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$

Interprétation des résultats :

A travers les courbes précédentes on remarque que la tension a la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieur a celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a

le rôle d'élever la tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.[7]

II.3. Convertisseur DC/DC (hacheur):

Le convertisseur BOOST est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit donné par la Figure II.2.

1-Hacheur dévolteur (Buck ou série) : la tension moyenne délivrée en sortie est inférieure à celle appliquée en entrée. **2-Hacheur survolteur (Boost ou parallèle) :** la tension moyenne délivrée en sortie est supérieure à celle appliquée en entrée.

3- Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost ou série-parallèle) : ce sont des hacheurs capables de fonctionner de deux manières (Buck –Boost) ou la tension moyenne de sortie est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée.

Dans notre étude, le convertisseur Boost est utilisé comme adaptateur de la charge, permettant la poursuite du point de puissance maximale.[6]

C'est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

II-3-2 Modélisation du convertisseur côté PV (hacheur) :

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [3].

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [18]:

- ✓ Convertisseur survolteur hacheur survolteur (ou parallèle) ;
- ✓ Convertisseur dévolteur (ou série) ;
- ✓ Convertisseur dévolteur- survolteur hacheur série - parallèle.

II.3.2.1 Représentation d'un hacheur survolteur :

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour cela qu'il est dit élévateur de tension [1].

La figure II.21 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

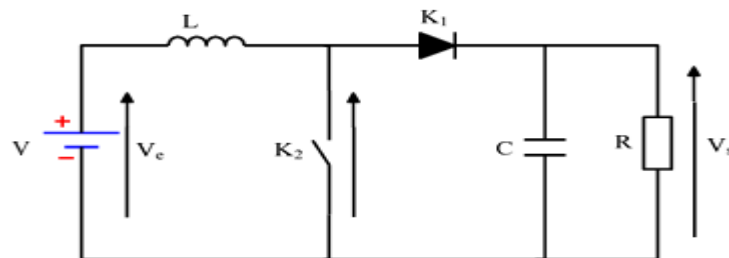


Figure II.7 : Schéma d'un convertisseurs DC-DC.(Boost)

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [18]. Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/Elévateur	1	1	Qui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/Elévateur	1	1	Qui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/Elévateur	2	2	Qui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/Elévateur	2	2	Qui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/Elévateur	4	4	Qui	Forte

Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [1]

Avantage de convertisseur BOOST

Malgré le rendement élevé du convertisseur BUCK dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le convertisseur BUCK. Le convertisseur BOOST est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur BUCK est employé pour abaisser la tension de sortie [1].

II.3.2.2 Modélisation d'un hacheur survolteur :

Considérons l'exemple de la figure II.13 correspondants à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [18]:

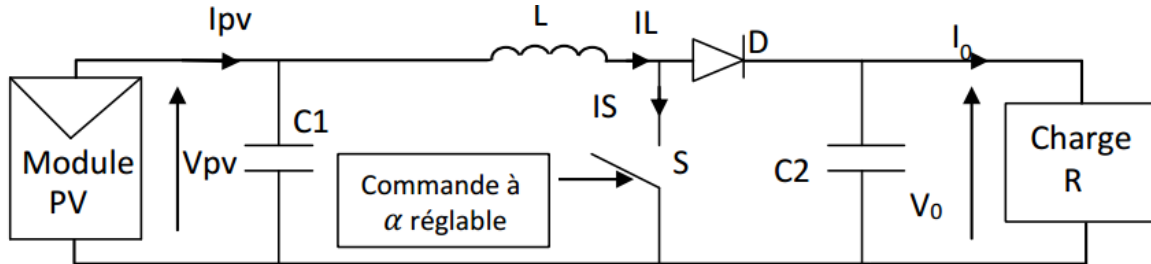


Figure II.13 : Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [31].

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle αTs :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad \text{II.30}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad \text{II.31}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L - I_L \quad \text{II.32}$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - \alpha) Ts$:

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad \text{II.33}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad \text{II.34}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L - V_0 \quad \text{II.35}$$

Les systèmes d'équations de base (II.33 et II.34) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_1 , V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($e^\xi \approx 1 + \xi$ si $\xi \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux intervalles du temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} \quad \text{II.36}$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle T_s . Cette relation est valide

si :

$$\frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} \alpha T_s \text{ et } \frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} \text{ sont constants sur les intervalles } \alpha T_s \text{ et } (1-\alpha)T_s \text{ respectivement}$$

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.13.

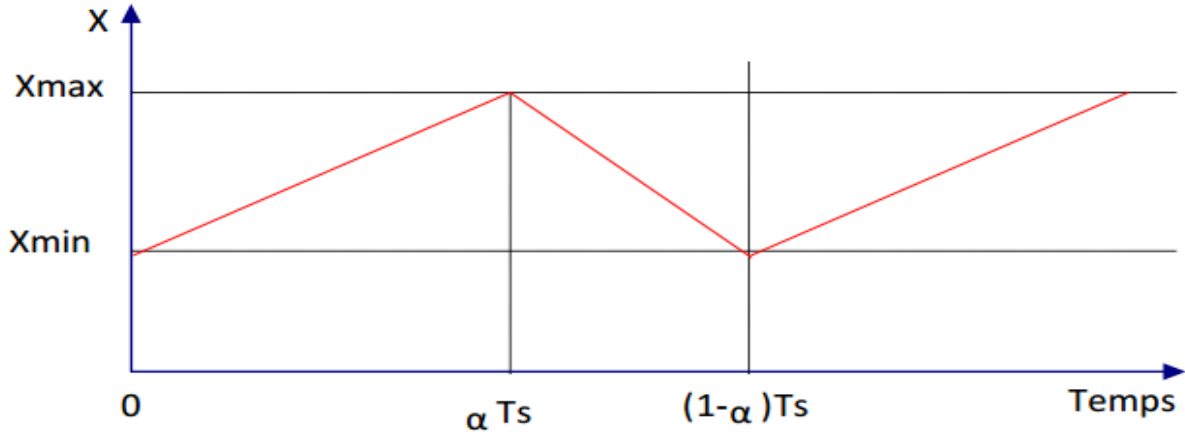


Figure II.8 : Allure des variables dynamiques II.

En appliquant la relation (II-34) sur les systèmes d'équations (II-26 à II-33) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \alpha T_s = (I_{PV} - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_{PV} - I_L) \quad \text{II.37}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 + (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad \text{II.38}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad \text{II.39}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_{c1} = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad \text{II.40}$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad \text{II.41}$$

$$V_{PV} = +(1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad \text{II.42}$$

II-4 Simulation du hacheur parallèle Pour montrer le rôle des convertisseurs (BOOST) nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation Figure II.10

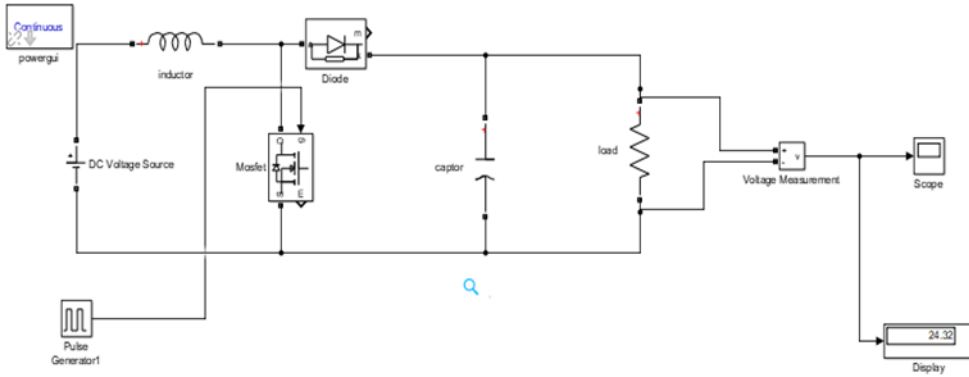


Figure II.9: schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la figure II.15 est obtenu à l'aide du modèle mathématique sous Matlab/Simulink, Figure II. 10.

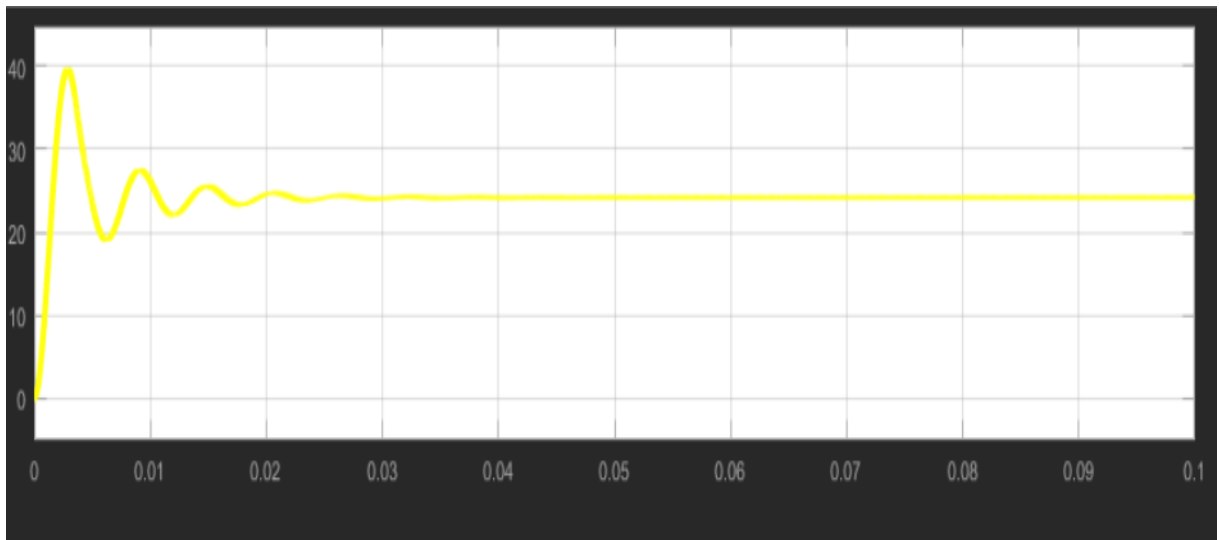


Figure II.10 : Tensions de sortie du convertisseur BOOST

On remarque que la tension de sortie ne pas le même que l'entrée ce qui exprime le rôle de convertisseur élévateur (BOOST).

II-5 Commande de maximisation de puissance :

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) permet au générateur photovoltaïque de débiter sa puissance maximale. Le traqueur est conçu généralement avec un convertisseur selon une technique de commande appropriée (hacheur élévateur Boost). Elles sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes. Ces dernières représentées généralement par la méthode de Perturbation & Observation et la méthode de l'incrémentation de la conductance.[7]

II.6. La méthode de Perturbation et Observation P&O:

II.6.1. Définition :

L'algorithme de poursuite du PPM est le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

Dans notre travail, on a opté à la méthode de Perturbation et Observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

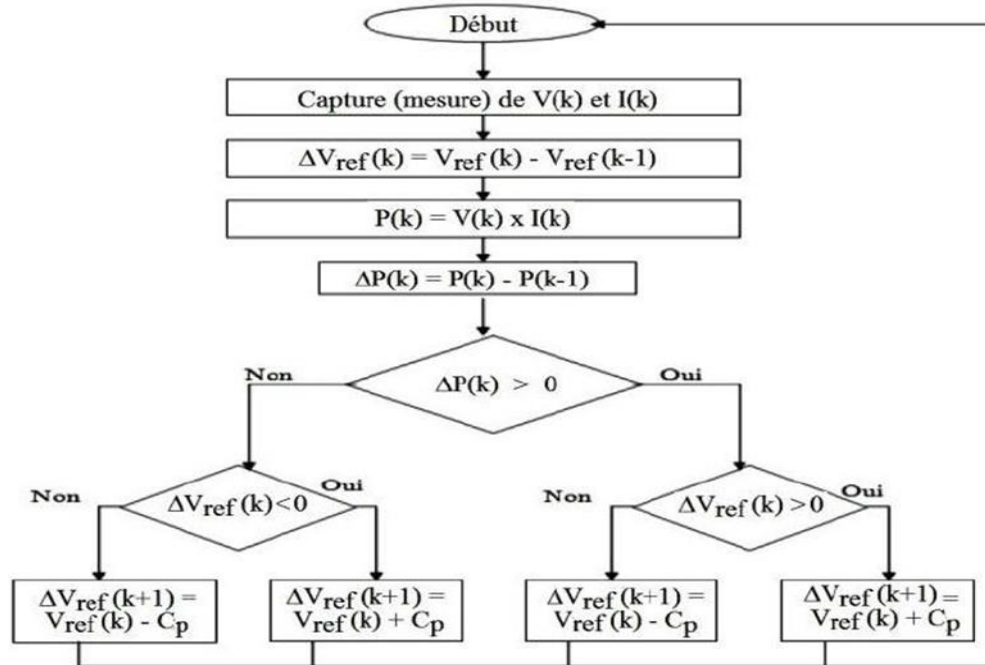


Figure II-11: organigramme de l'algorithme[9]

Avec :

C_p : la largeur du pas d'une perturbation simple

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance (k). Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure ($k-1$).

Si la puissance fournie par le panneau (ou le générateur) a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou des incréments du rapport cyclique α continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

Si $dV > 0$; cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire

$$(k+1) = (k) + \Delta\alpha$$

Si $dV < 0$; cela veut dire qu'on a décrémente V durant le dernier cycle

C'est-à-dire qu'on va mettre: $(k+1) = (k) - \Delta\alpha$ Donc, on termine dans le chemin où P continue à augmenter.

Si la puissance fournie par le panneau (le générateur) a diminué depuis la dernière mesure,

L'incrémentation [du rapport cyclique α sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dv . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle.[8]

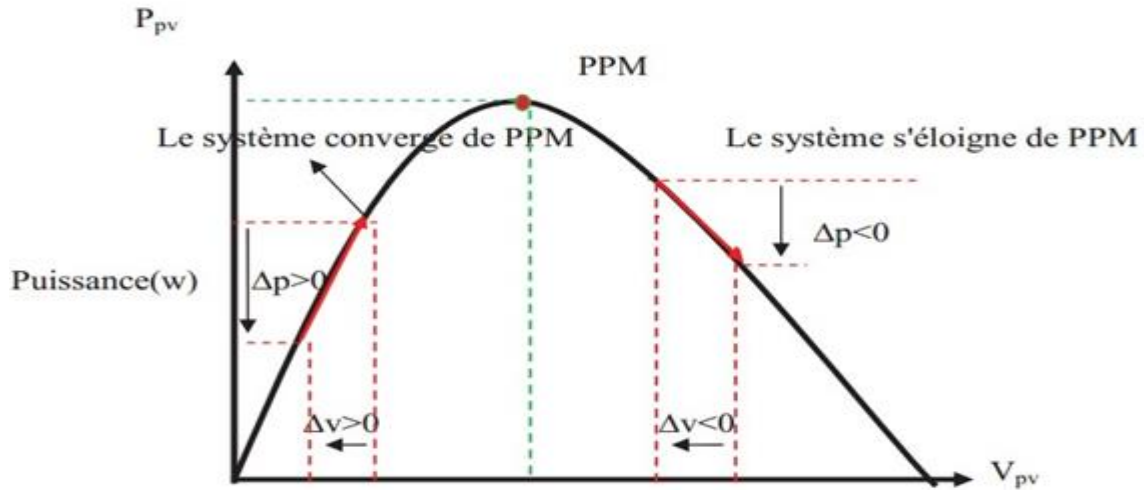


Figure II-12 Schéma de convergence vers le PPM par P&O

II-7 Association PV –Achoeur

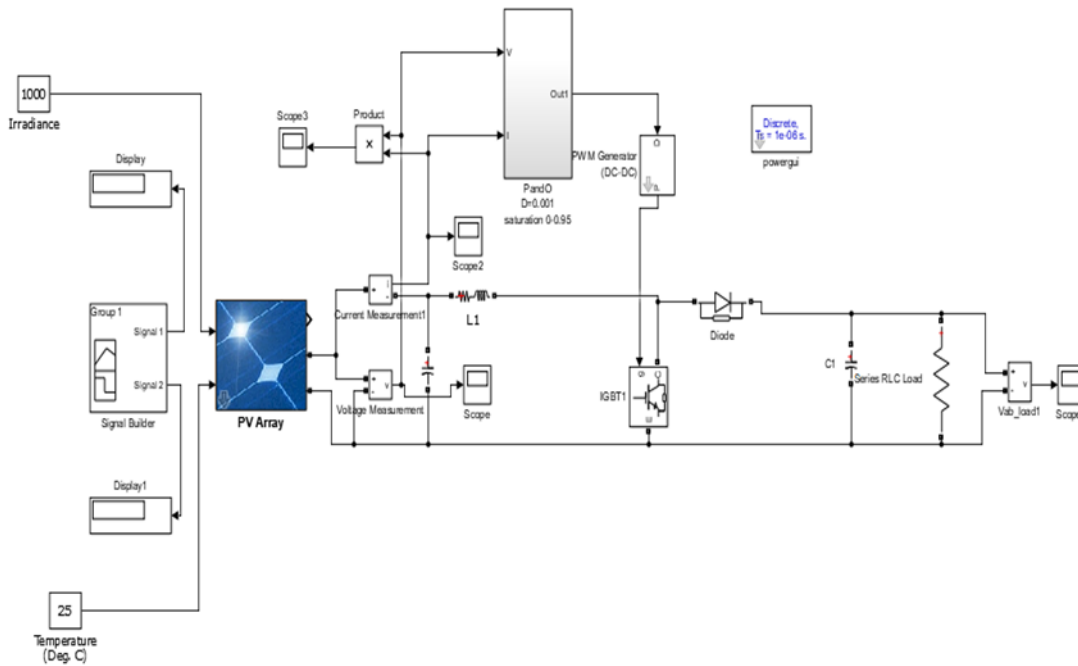


Figure II.13: schéma bloc PV -Achoeur de simulation

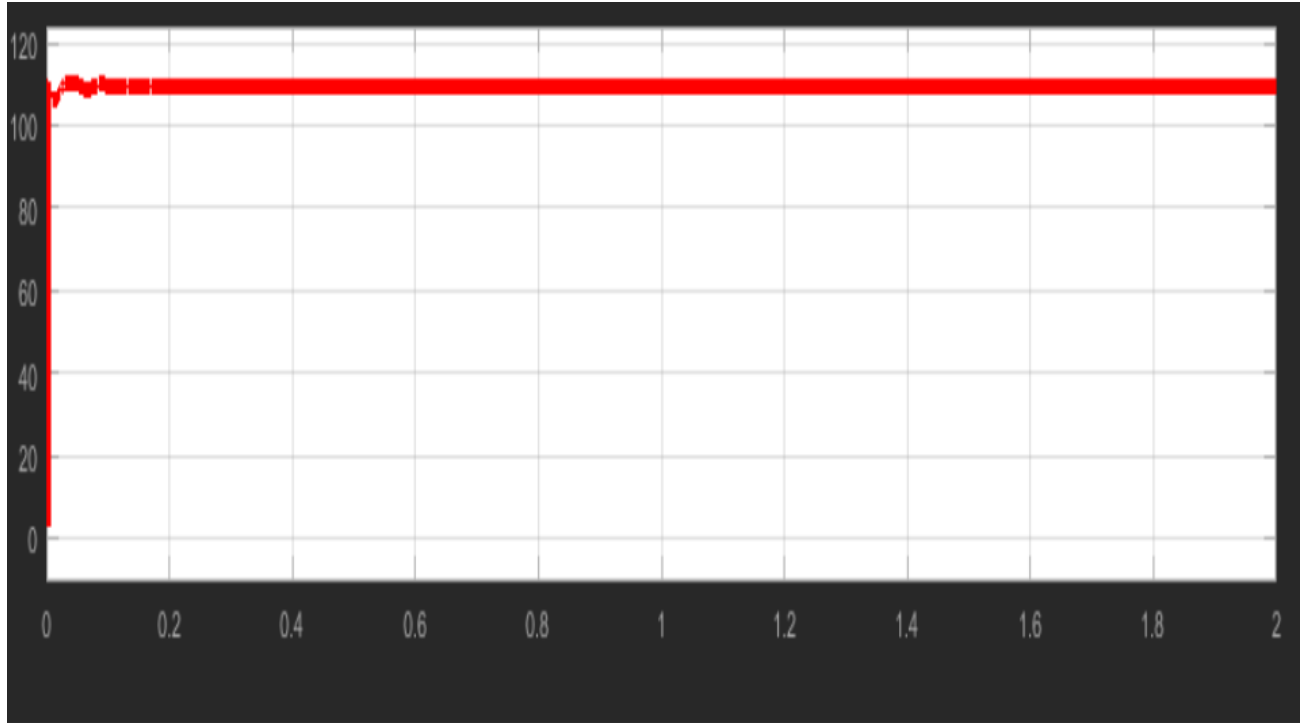
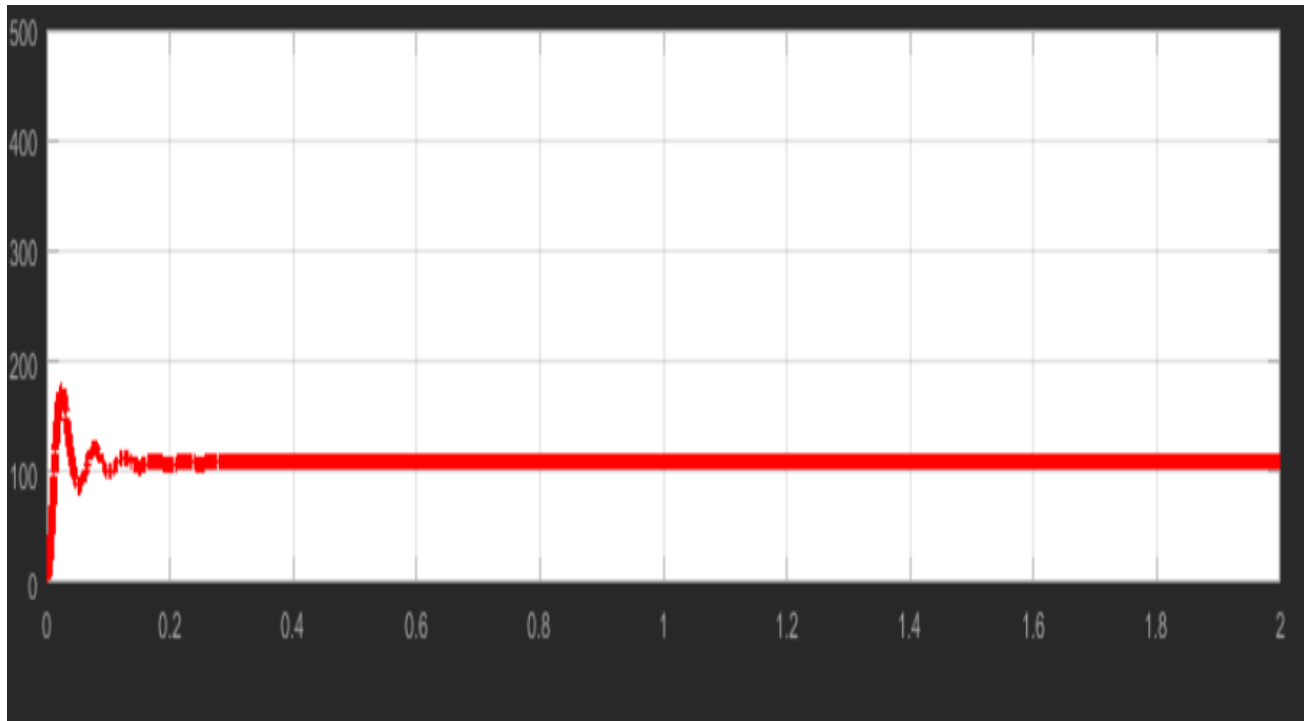
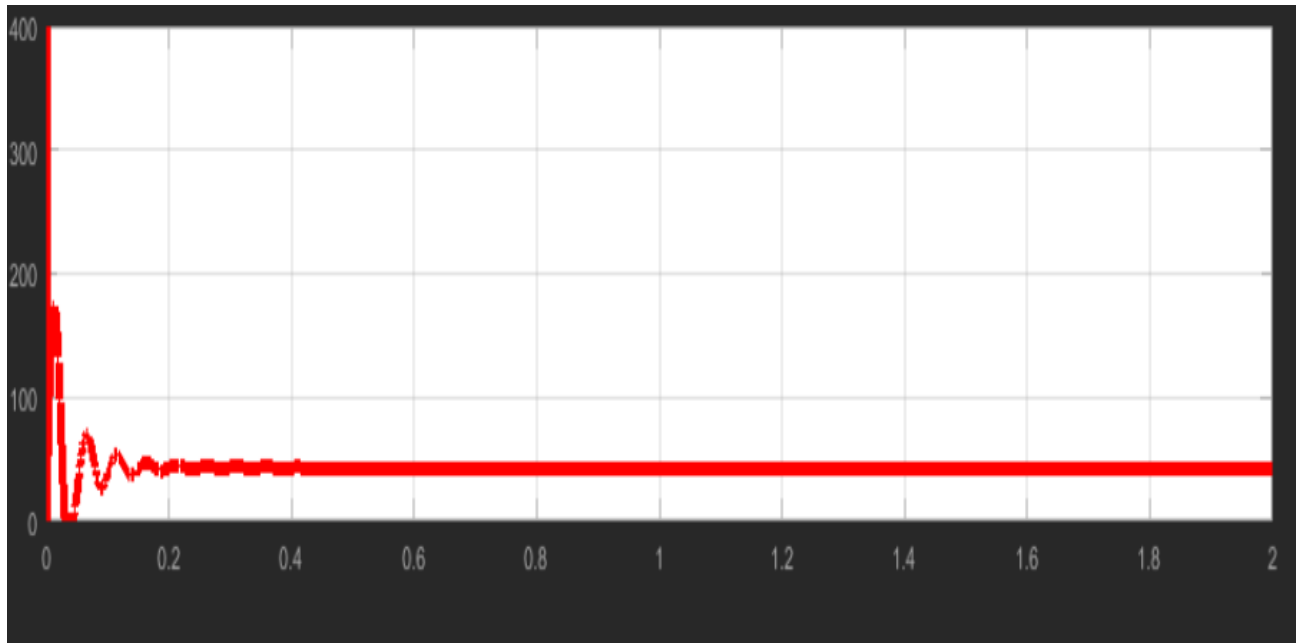


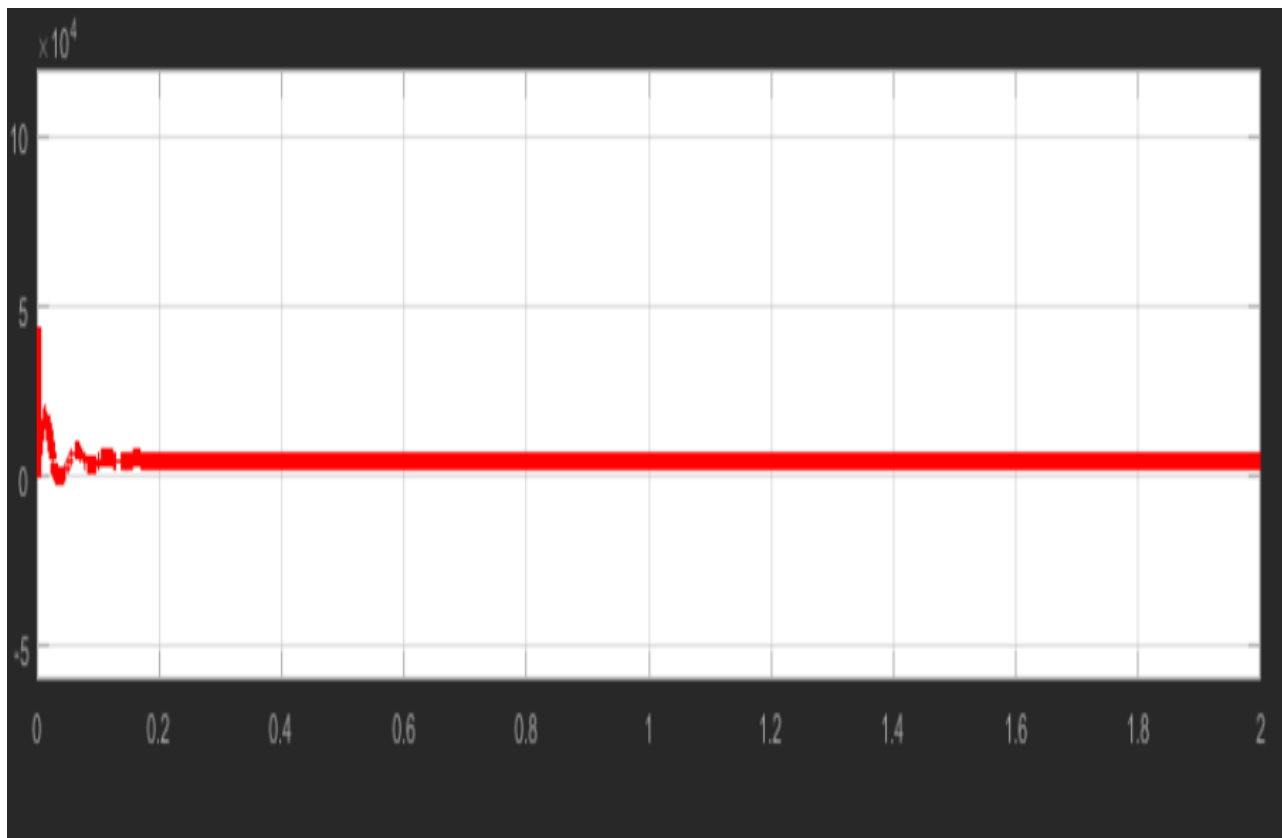
Figure II.14: Tensions de sortie – PV- Acheur



Figuer II-15 la tension -PV-acheur



Figuer II-16 latension PV



Figuer II- 17 le courant de sortie PV-acheur

II-8 Interprétation des résultats :

A travers les courbes précédentes on remarque que la tension a la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieure à celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.

II.9. Convertisseur DC/AC:

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.

Dans le système d'alimentation du moteur asynchrone par le générateur photovoltaïque, le courant continu fourni devrait être converti en courant alternatif afin d'alimenter le moteur. Dans cette condition, un onduleur triphasé de tension est exigé.[3]

II.9.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tensions et de sa commande MLI

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est obtenue par un hacheur Boost. L'onduleur est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer au récepteur dans les deux sens. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs,

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels. Les couples d'interrupteurs de chaque bras sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statiques de la machine asynchrone, et pour éviter de court-circuiter la source.

Chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche. La figure suivante

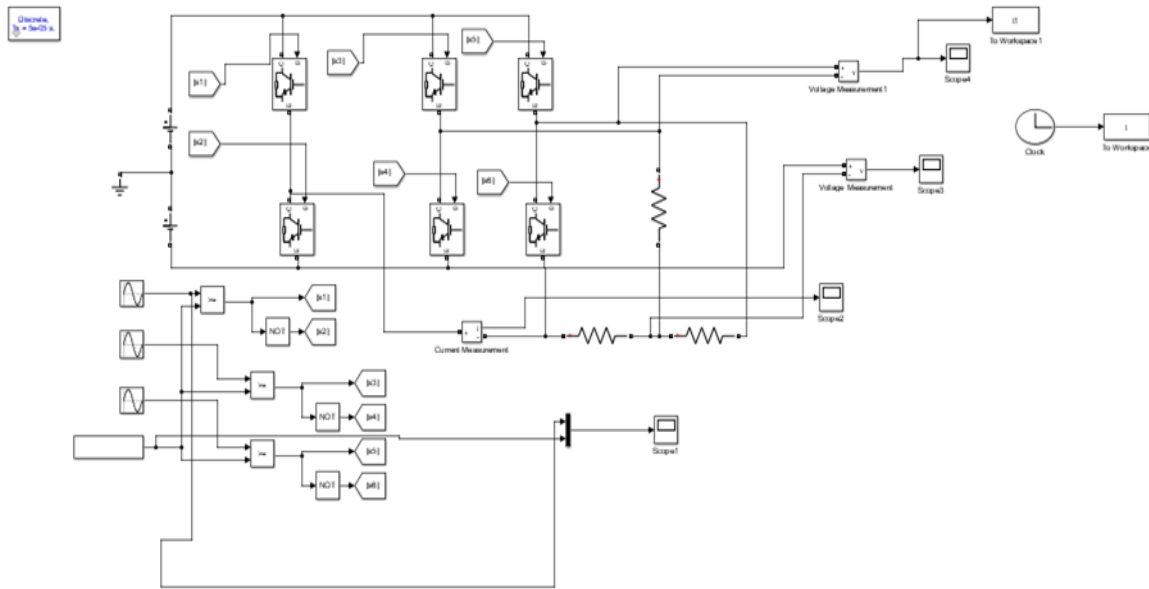


Figure II -18 Onduleur de tensions triphasé a deux niveaux

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

La commutation des interrupteurs est instantanée.

La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.

La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile.

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$,

nous pouvons écrire, figure (II.11)

$$v_{an} = v_{ao} + v_{on}$$

$$\{ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \quad \text{II.43}$$

$$v_{cn} = v_{co} + v_{on}$$

En faisant la somme des équations du système (II.43), on obtient

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} + v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad \text{II-44}$$

D'où :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad \text{II-45}$$

Donc :

$$v_{on} = -1/3 (v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad \text{II-46}$$

En substituant l'équation (II.46) dans le système (II.43), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad \text{II-47}$$

Selon la condition des interrupteurs statiques (S_k) de l'onduleur (S_k) est égale à 1 si

L'interrupteur est fermé et 0 si non. Avec $k = a, b, c$,

$$S_k = 1 \text{ si non } S_k = 0$$

Les tensions de branches v_{ko} peuvent être exprimées en fonction des interrupteurs « S_k » par

$$v_{ko} = (2S_k - 1).E/2 \quad \text{II-48}$$

Après simplification, le modèle mathématique de l'onduleur à deux niveaux de tensions est donné par l'équation II.49.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II-49}$$

II.10. Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion

La commande de l'onduleur par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) permet de produire à partir d'une source à fréquence et à tension fixes, des tensions alternatives variables en amplitude et en fréquence, avec un faible taux d'harmoniques. [5],[5]

La technique de commande MLI sinus – triangle va être développées dans cette section.

II.10.1. Commande MLI sinus – triangle :

La modulation de largeur d’impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d’une bande modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d’intersection entre la porteuse

et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s . [5]

Il s’agit d’une modulante sinusoïdale d’amplitude A_r et de fréquence f_r combinée à une porteuse triangulaire d’amplitude A_p de haute fréquence f_p , les angles de commutation de la tension d’entrée d’un pont sont situés aux intersections de la porteuse et de la modulante (figureII.7).

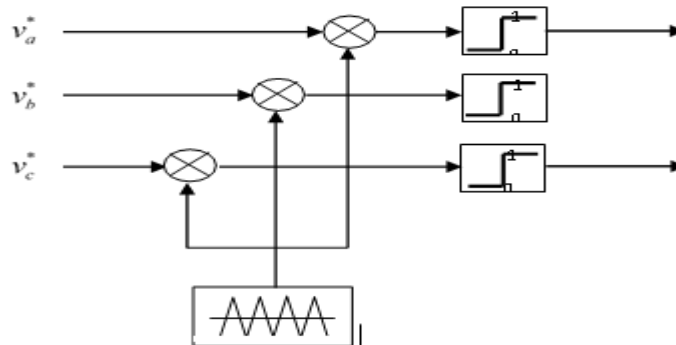


Figure II.19: principe de la MLI

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$V_a = V_m \sin(\omega t)$$

$$V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

II-49

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left[-4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases}$$

II-50

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états Sa, Sb et Sc des interrupteurs de l'onduleur.

Ceux-ci sont donnés par l'équation II.50 suivante :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) < 0 \end{cases}$$

II-51

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence

$$(f_r), (m = \frac{f_n}{f_r}).$$

2- Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_r) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_p),

$$r = \frac{V_r}{V_p}.$$

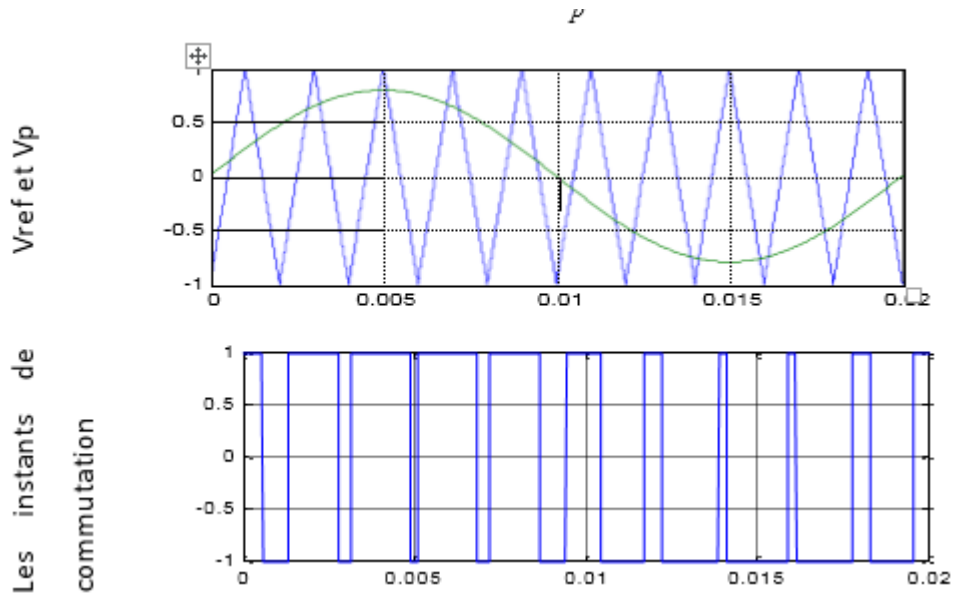


Figure II.20 : Description de la commande MLI sinus – triangle [

Avantages de la commande MLI :

Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette MLI sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées

D'autre part les conséquences de ces deux avantages sont :

- Minimisation de la distorsion du courant
- Faible coût du filtre de sortie

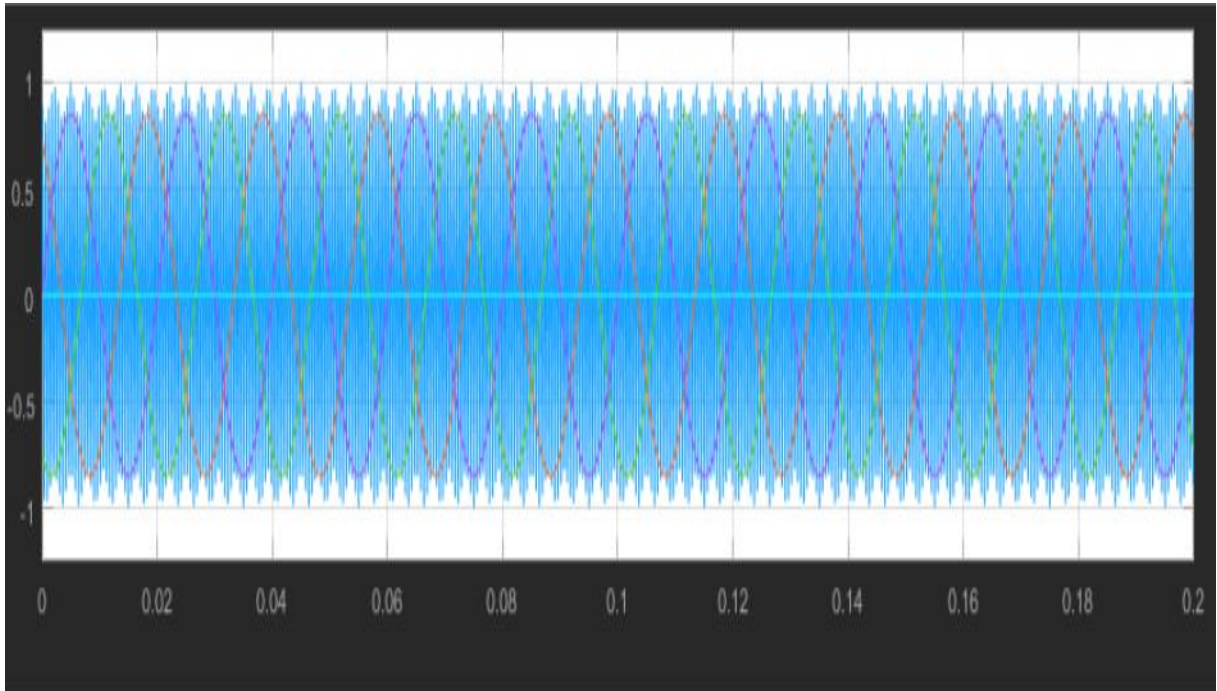
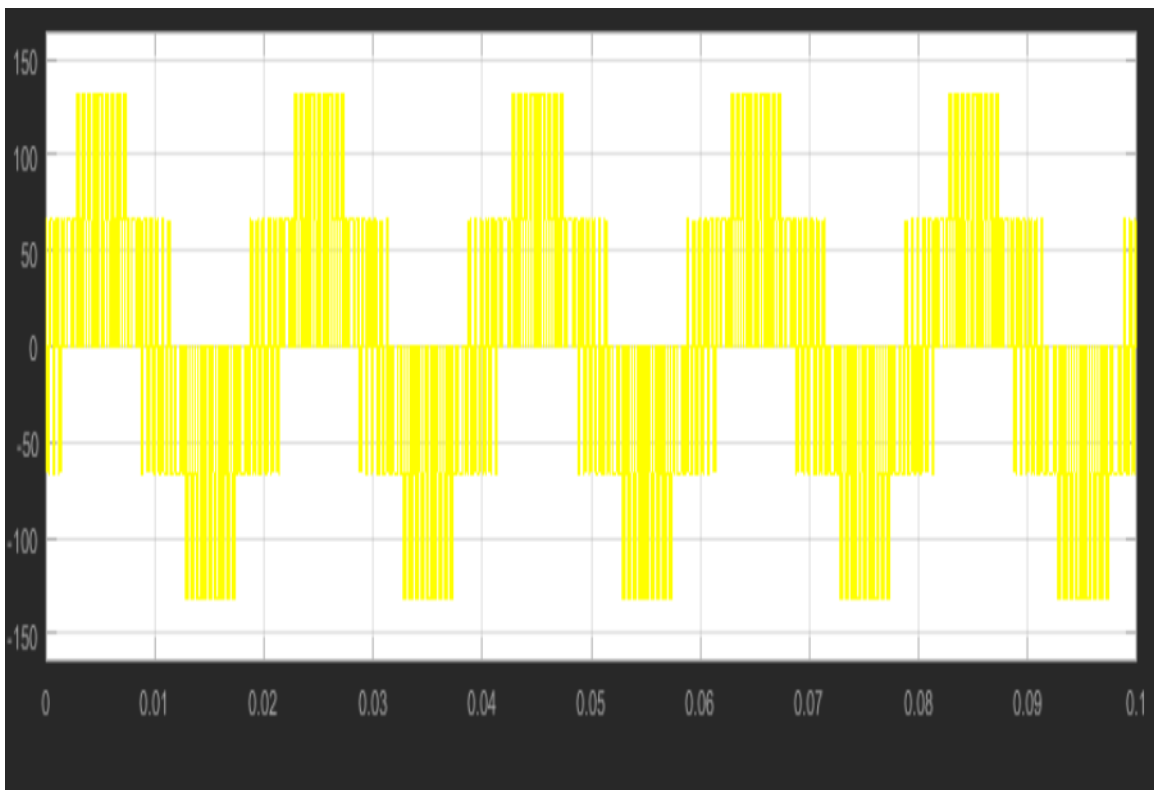


Figure II-21 : Illustration de la MLI sinus-triangle

Après la simulation, on a obtenu à la sortie de l'onduleur les signaux des trois phases suivant



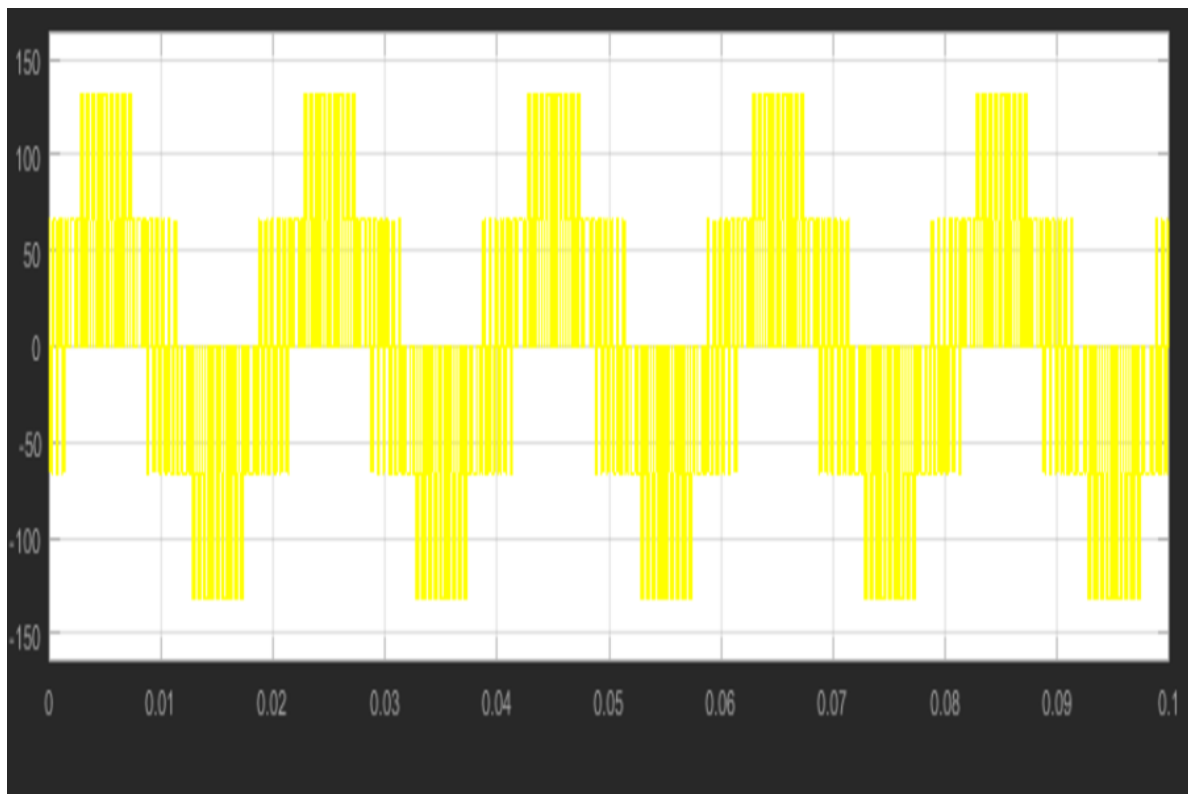
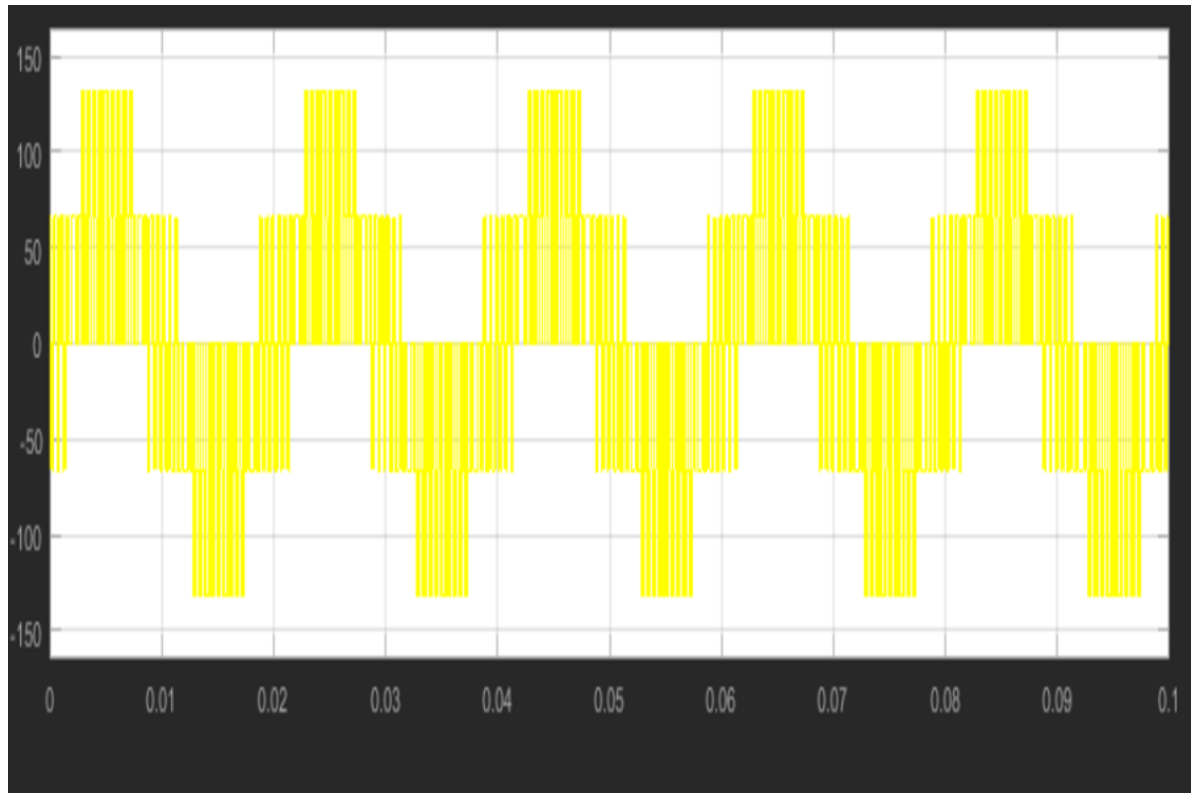


Figure II.22: Les tensions de sortie de l'onduleur

II.12. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a étudié les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur Boost et l'onduleur à MOSFET, .

On a présenté la modélisation d'une cellule PV à une seule diode, le cœur du GPV, et le hacheur Boost commandé par un algorithme MPPT. Nous avons choisi pour cela, la méthode P&O (perturbation & Observation). La commande de l'onduleur a été faite par la commande MLI type sinus-triangle.

Dans la dernière phase du chapitre, on a présenté la simulation d'un association d'un GPV avec le hacheur Boost commandé par un algorithme MPPT et l'onduleur a été faite par la commande MLI type sinus-triangle.

Chapitre
III simulation de
systeme
photovoltaïque

III- 1-Introduction :

Dans le dernière chapitre on a présenté la simulation système photovoltaïque qui alimente un charge, par le biais d'un hacheur commandé par la méthode P&O au but d'atteindre le point maximum de la puissance quel que soit l'ensoleillement et la température. Un onduleur de tentions triphasé a deux niveaux a commandé par MLI sinus-triangle.

La simulation de ce système a été faite à base du logiciel MATLAB SIMULINK.

L'objectif de ce travail est de voir la performance de système PV lors de la variation de trois signaux irradiations et de la température fixe. Pour cela, on a fait la simulation de système globale pour trois signal irradiation différant avec l'analyser et d'interpréter les résultats obtenus(courant, tension, puissance) .

En utiliser 03 signaux de irradiations

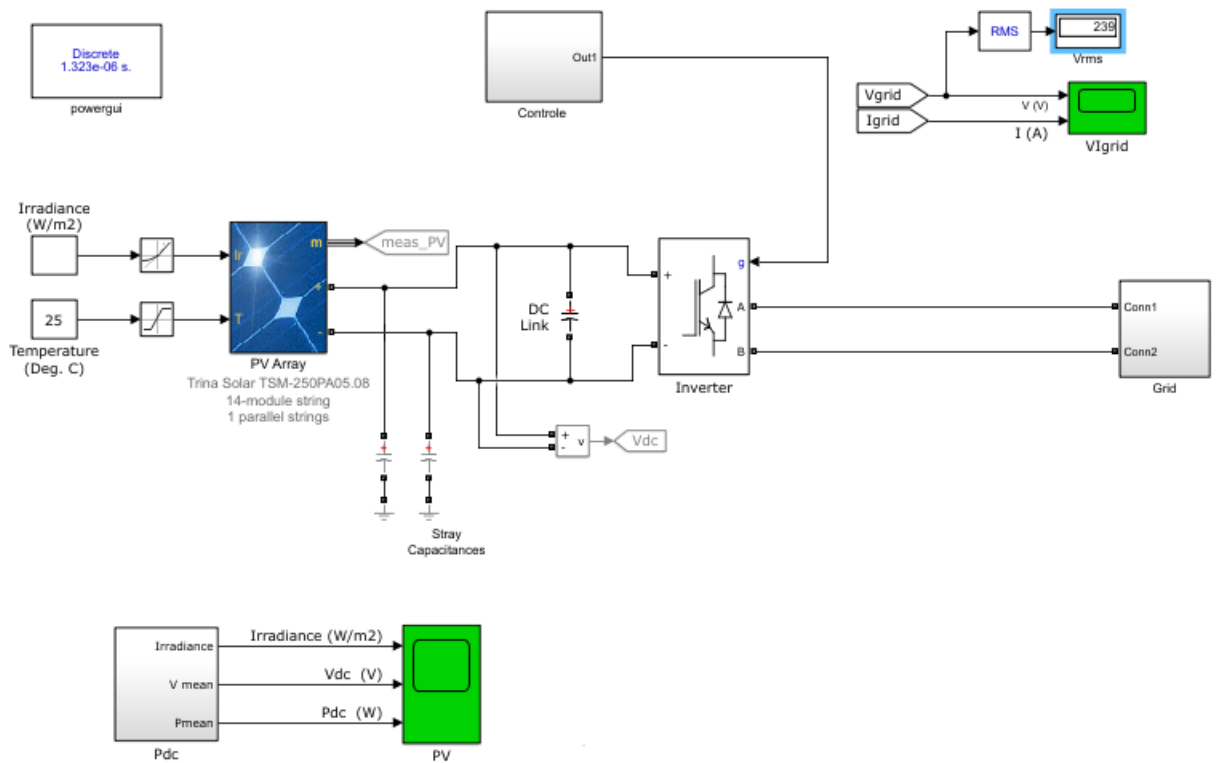
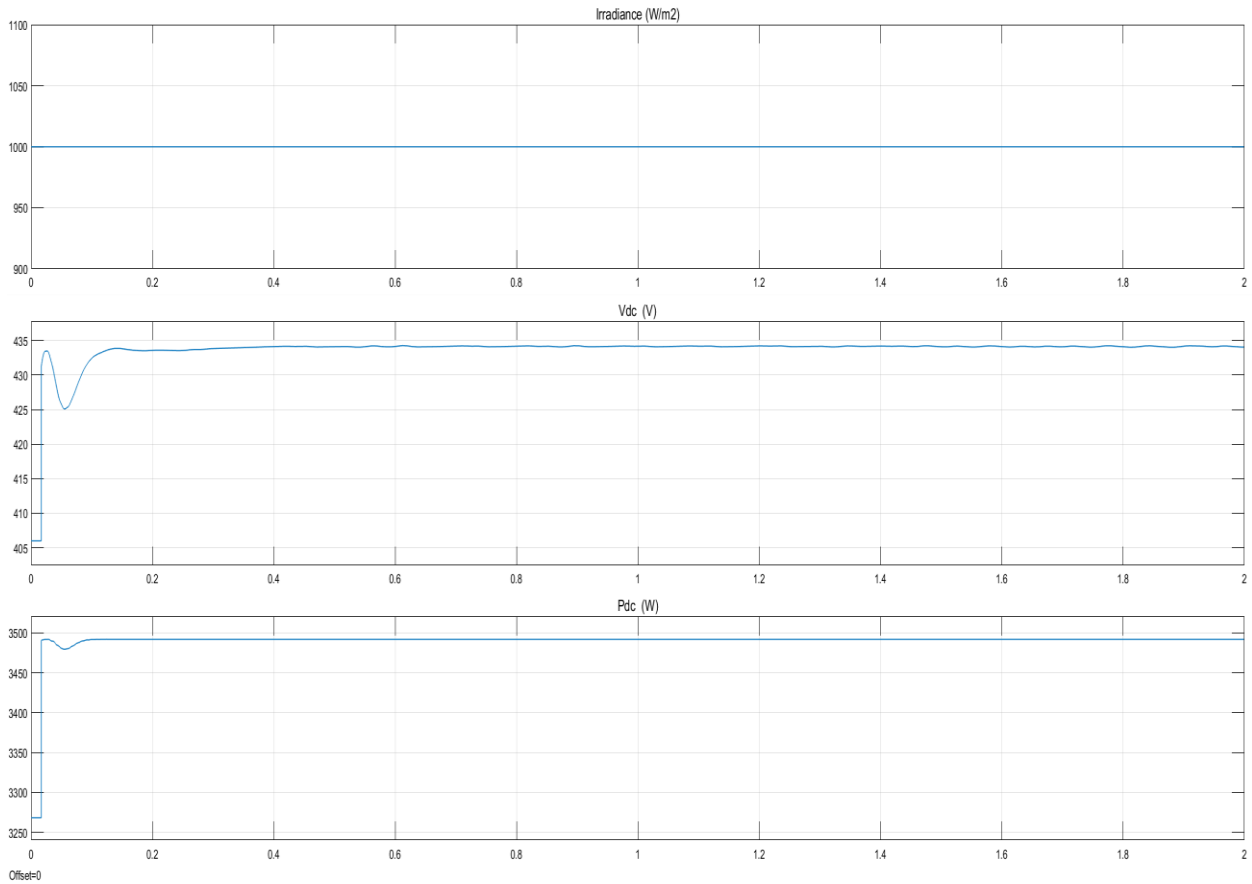


Figure III-1 Schéma de système complet

b- Les figures ci-dessous montre le comportement de l’algorithme MPPT aux conditions climatiques constantes : $E = 1000\text{W/m}^2$ et $T = 25$



.Figure III-1 Signal D’enseleiment et Tension Vdc et Puissance Vdc

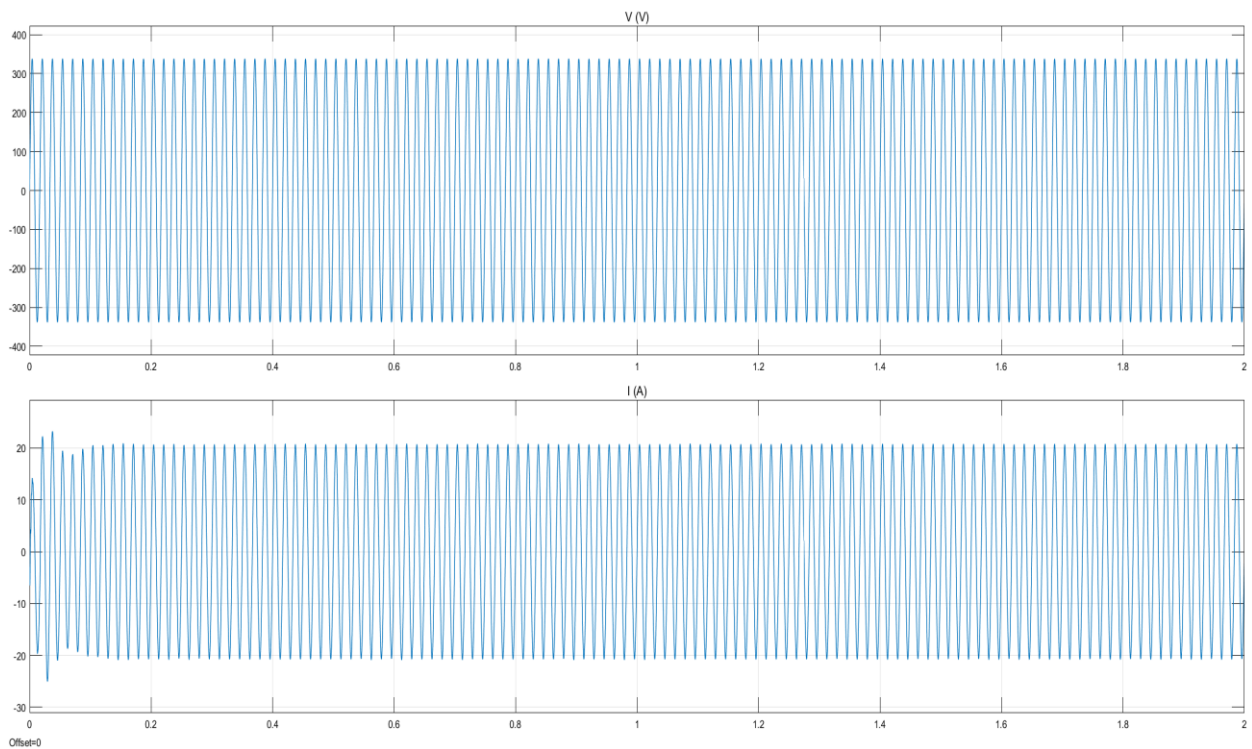


Figure III-2 La tension (v) et le courant (i) de réseau

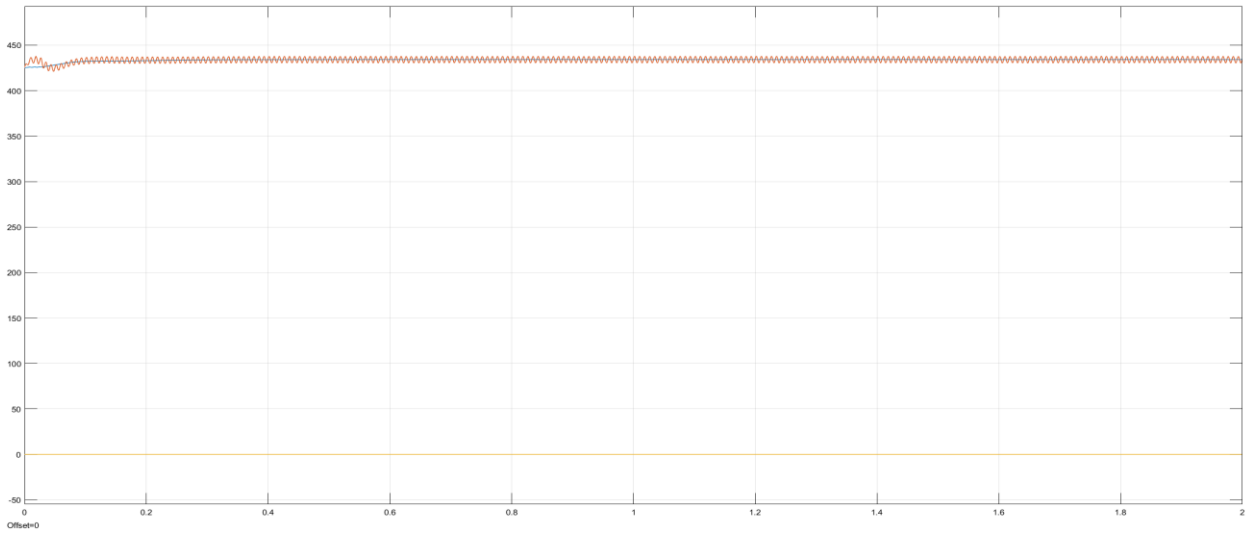


Figure III-3 Tension V_{dc} et $V_{dc\ ref}$

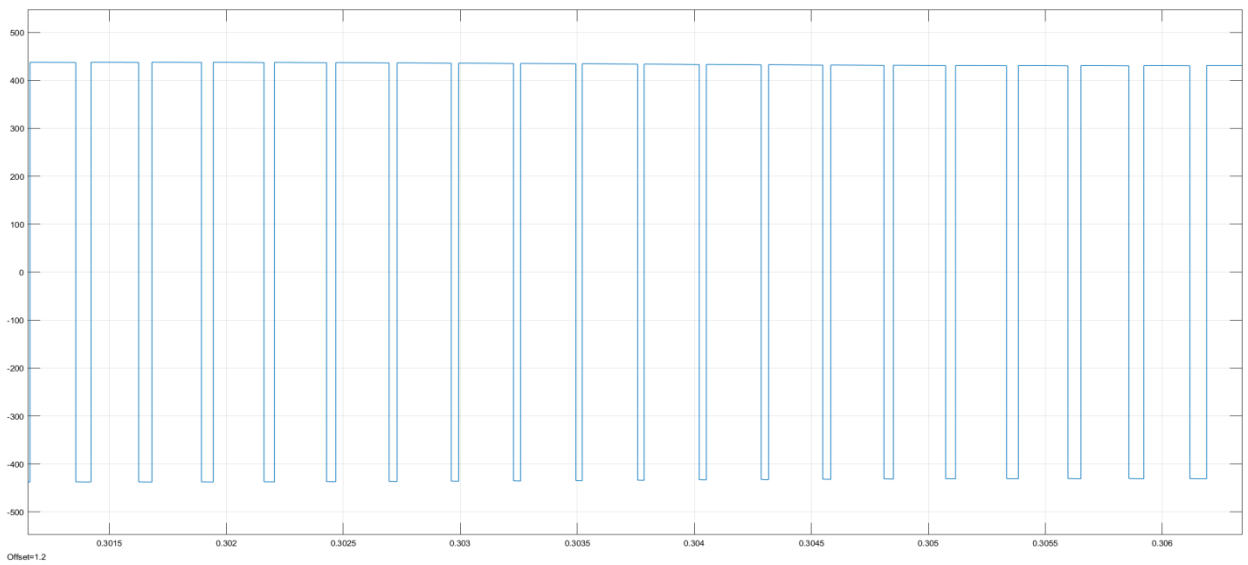


Figure III-4 Tension de l'onduleur avant le filtrage

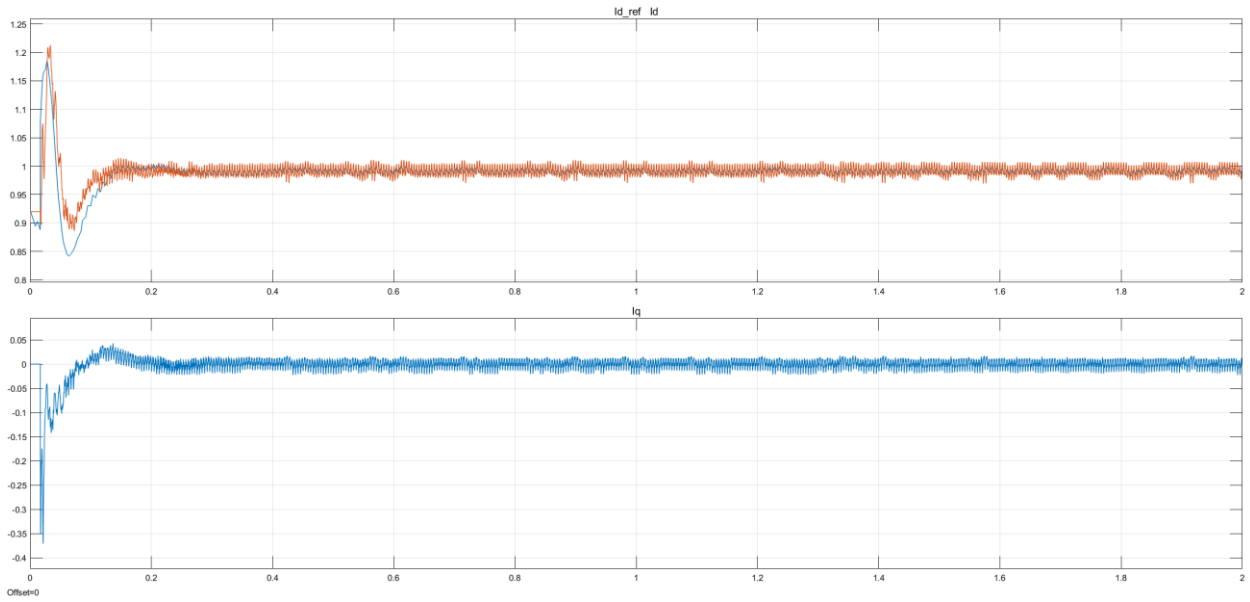


Figure III-5 Courant I_d et leur référence dans le repère (d,q)

b- Les figures ci-dessous montrent le comportement de système photovoltaïque aux conditions climatiques Time (0, 0.4), Amplitude (0.25, 0.75)*1000

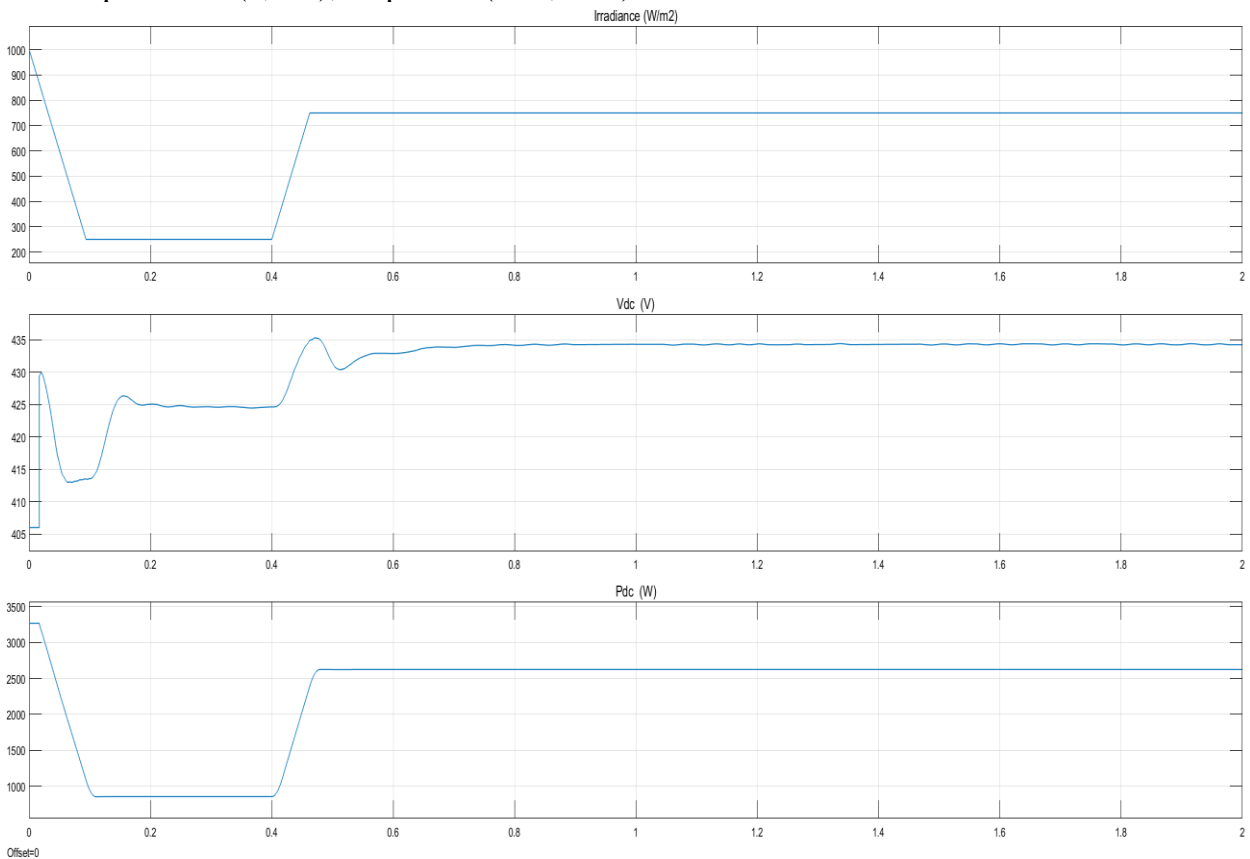


Figure III-6 Signal irradiation et Tension V_{dc} et Puissance V_{dc}

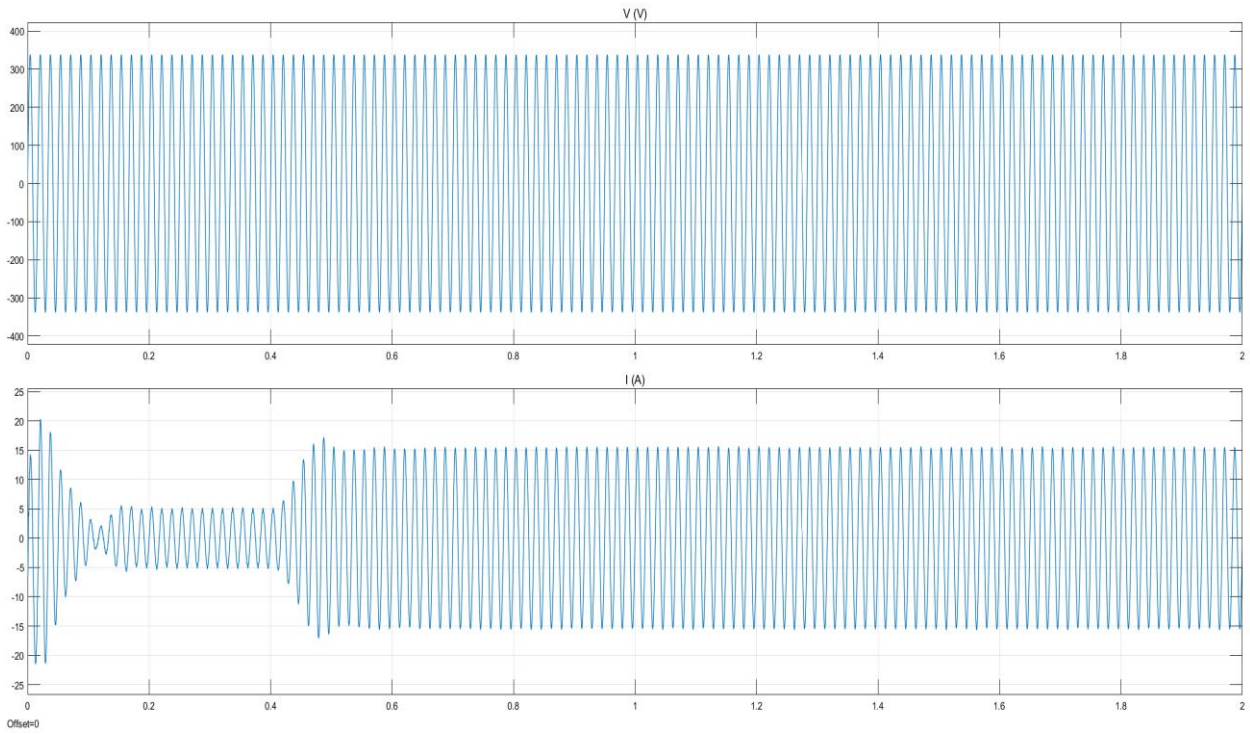


Figure III-7 La tension (v) et le courant (i) de réseau

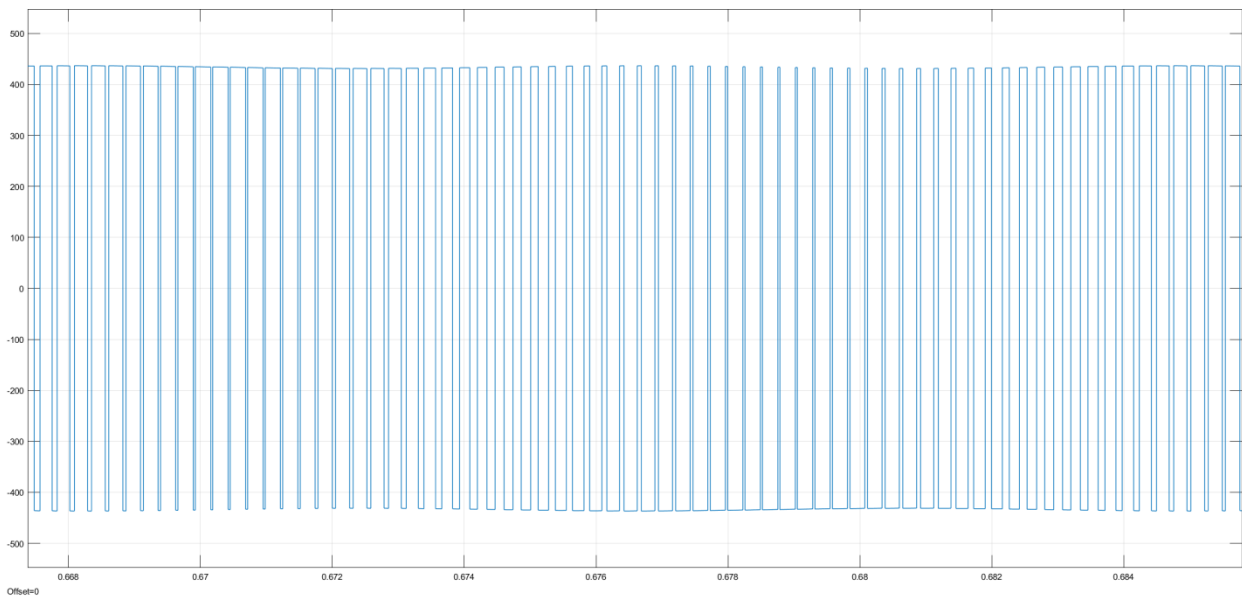


Figure III-8 Tension de l'onduleur avant le filtrage

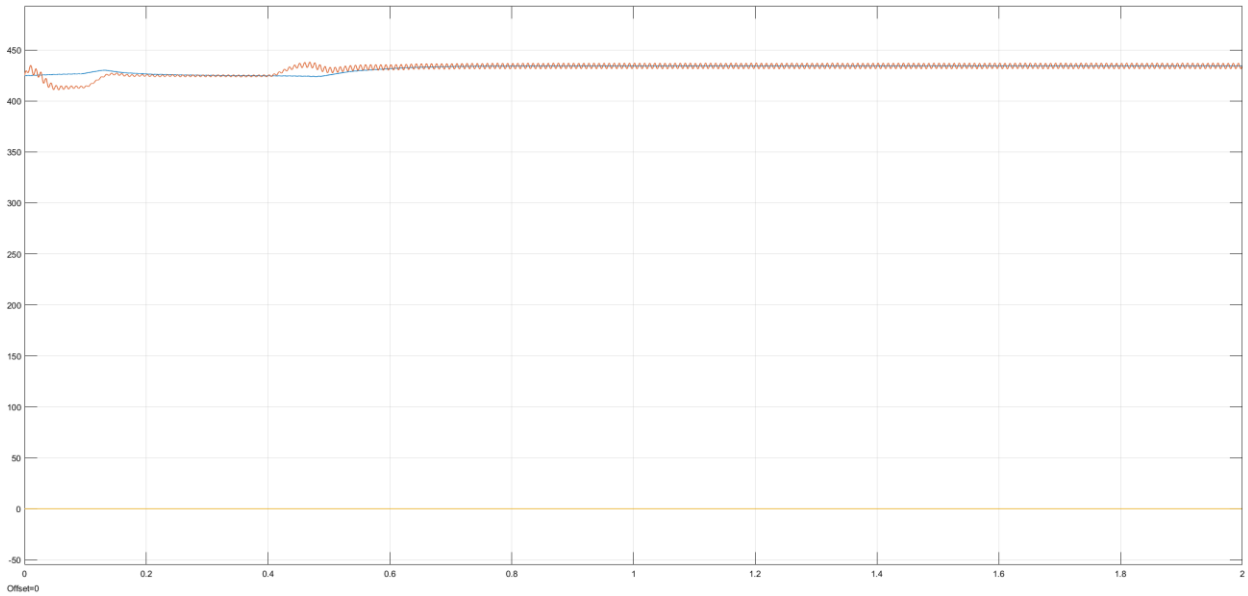


Figure III-9 Tension Vdc et Vdc ref

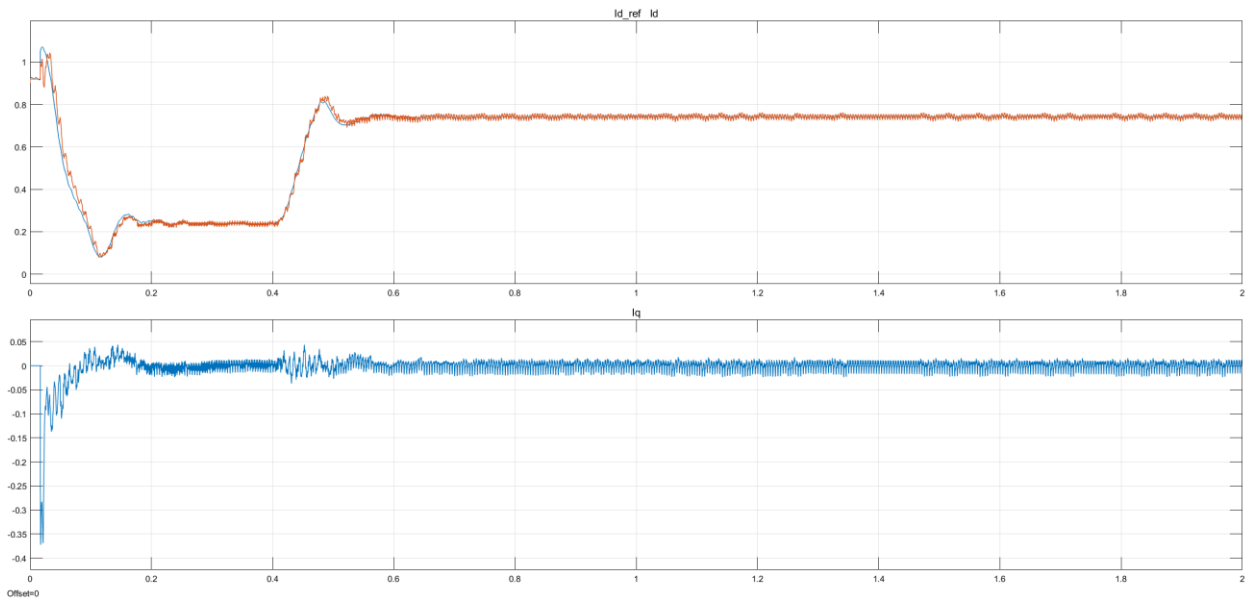
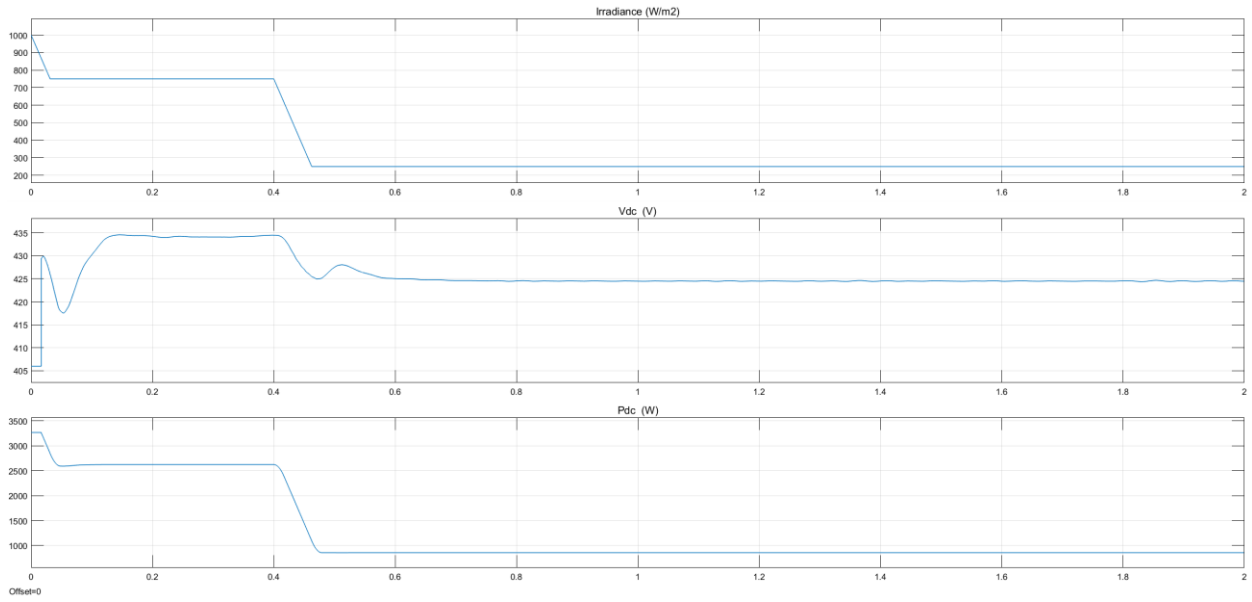


Figure III-10 Courant I_d et leur référence dans le repère (d,q)

c- Les figures ci-dessous montre le comportement de système photovoltaïque aux conditions climatiques Time (0, 0.4), Amplitude (0.75, 0.25)*1000



.Figure III-11 Signal irradiation et Tension Vdc et Puissance Vdc

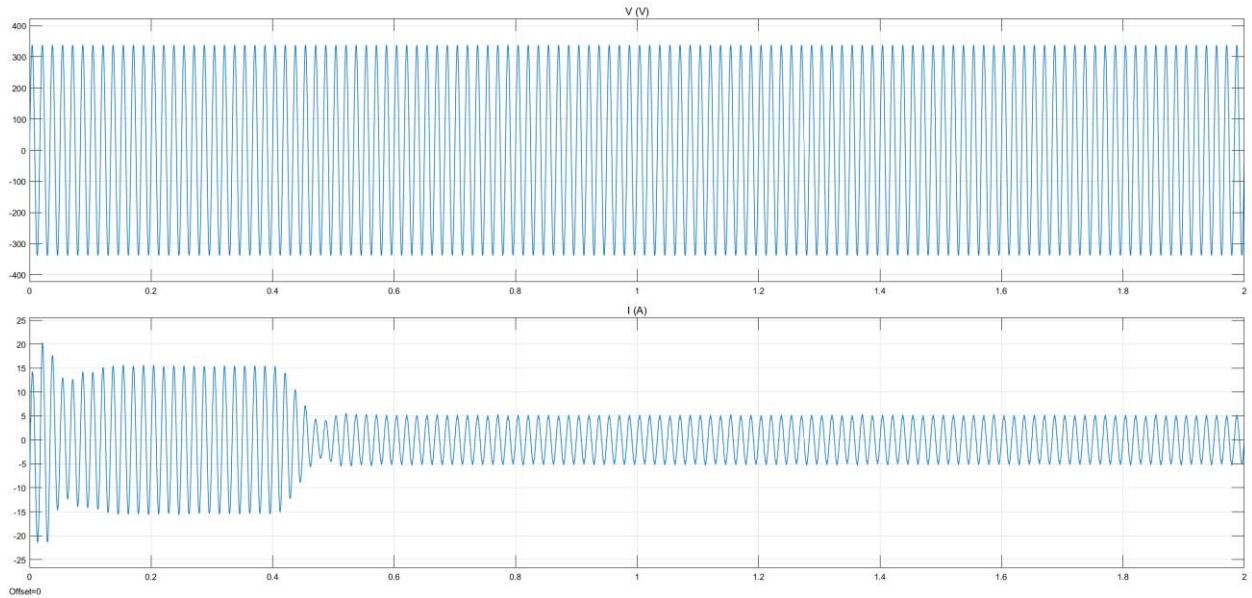


Figure III-12 La tension (v) et le courant (i) de réseau

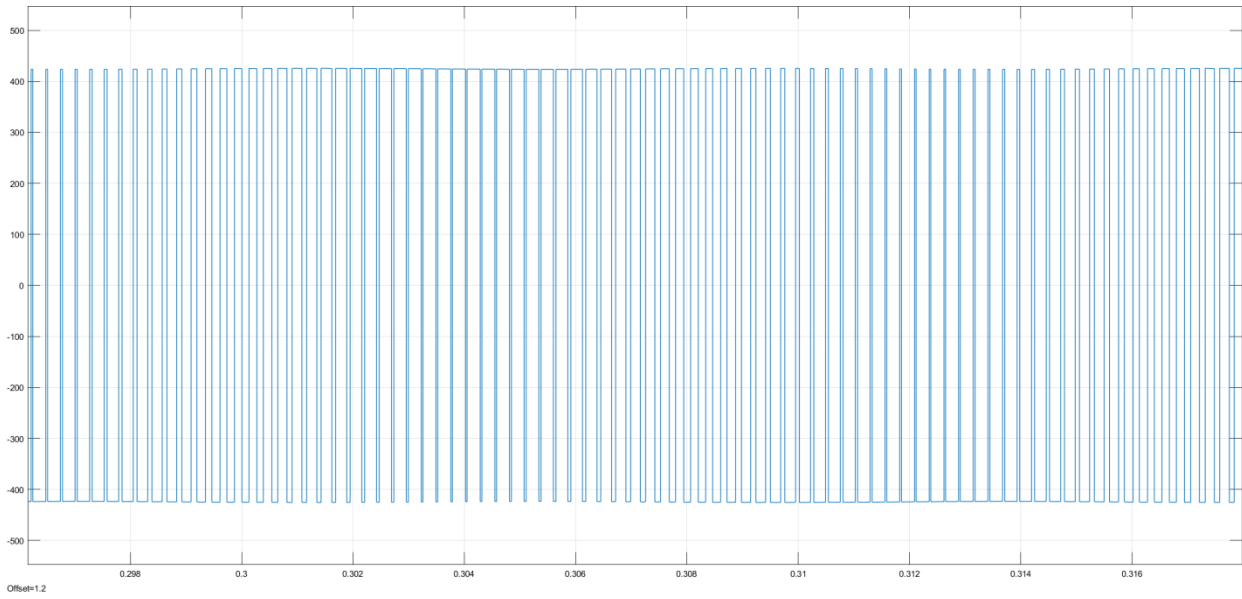


Figure III-13 Tension de l'onduleur avant le filtrage

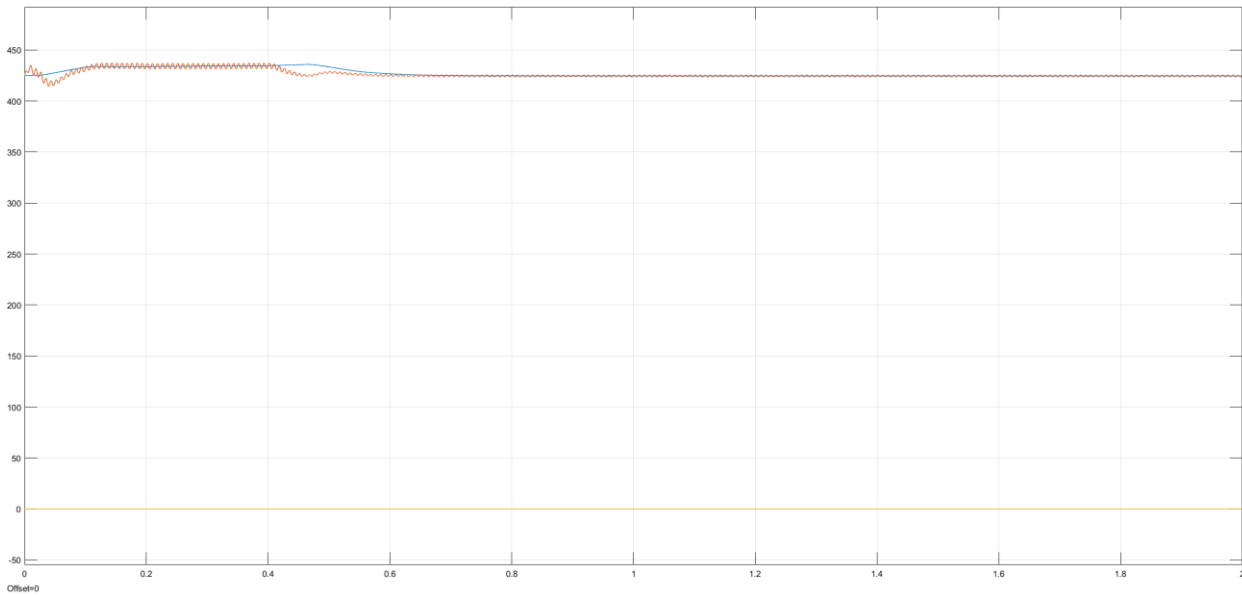


Figure III-14 Tension Vdc et Vdc ref

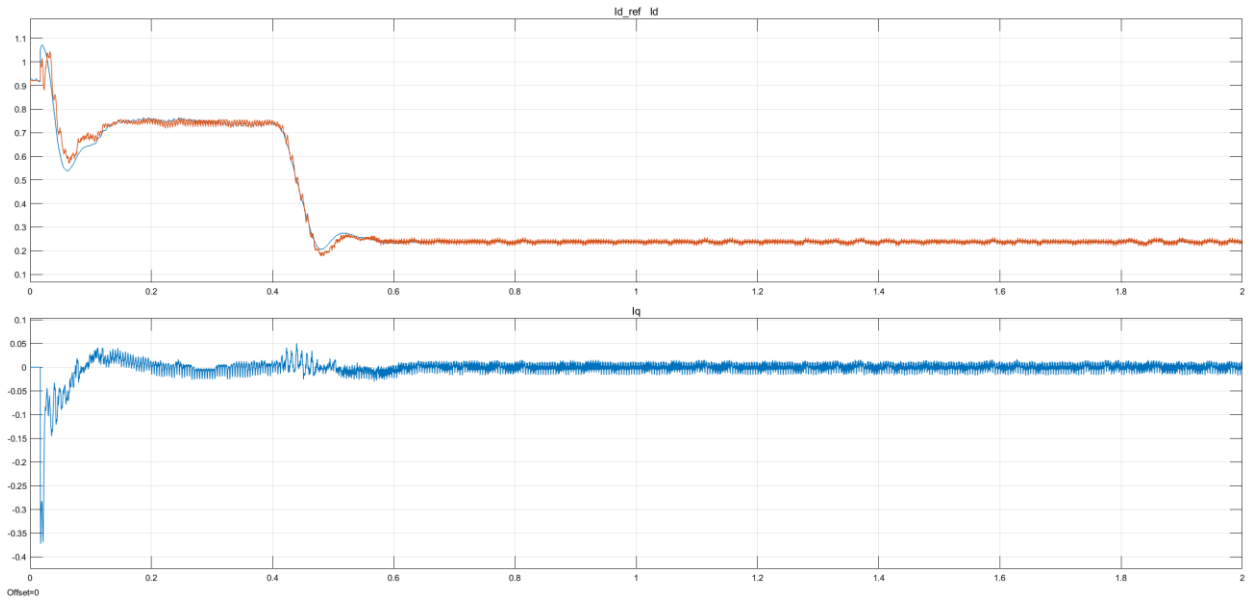


Figure III-15 Courant I_d et leur référence dans le repère (d,q)

III-2- Interprétation des résultats :

La simulation de système photovoltaïque nous donne des bons résultats en commençant par le panneau photovoltaïque. Les caractéristiques I(V) et P(V) et puissance P(w) de ce dernier sont illustrées dans les figures, et représentent l'influence de variation de trios signaux irradiations avec la température consent .

Dans (III-7,III-14,III-20) pour les trois signaux d'irradiationsLa tension d'inventer presque le même avec un peut changement des valeurs de tensons .

On remarque les courbes des puissances avec les courbes des courants de sortied'épande directement avec Schéma de signal irradiation

On remarque l'augmentation de l'irradiation engendre une augmentation au niveau du courant et de la puissance, mais elle n'influe pas beaucoup sur la tension.

III.3.Conclusion:

La dernier chapitre, présentela simulation d un système photovoltaïque connecté ou charge en utilisant Matlab/Simulink.

Dans ce chapitre, on a présenté de notre système photovoltaïque nous permettra de faire la simulation du système PV avec trois signal irradiation variable , d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus(courant, tension, puissance) .

Conclusion

générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail, qui est destiné à modéliser et à simuler un système photovoltaïque comporte un générateur photovoltaïque, associé à un hacheur. Survolteur contrôlé par la commande MPPT P&O et un onduleur. Commandé par MLI Sinus- Triangle afin d'entraîner un charge (réseau électrique.....)

Pour cela, le début de notre étude décrit l'effet photovoltaïque et les caractéristiques courant – tension et puissance-tension d'un modèle mathématique d'une cellule à une seule diode. Cela, nous permet de modéliser un panneau solaire et prendre une idée sur le comportement d'un champ photovoltaïque et d'un générateur Photovoltaïque. Ce dernier, est destiné, lui-même à alimenter un charge . On a présenté aussi les applications possibles du système photovoltaïque, sans oublier d'illustrer la grande exploitation de cette énergie gratuite au niveau de la région d'Adrar.

L'objectif de la simulation est de voir l'influence les signaux irradiations et de l'ensoleillement sur le fonctionnement desystème PV. et implicitement sur sa caractéristique courant-tension. La conclusion qu'on a aboutie est que la performance du panneau solaire est dépendante de l'irradiation variable . On a remarqué que le courant augmente quand la l'irradiation augmentent, tandis que cela engendre une considérable diminution au niveau de la tension et implicitement sur le rendement énergétique du panneau et du GPV. Par contre, l'augmentation de l'irradiation engendre une augmentation au niveau du courant et de la puissance, mais elle n'influe pas beaucoup sur la tension.

Afin d'extraire, en permanence, le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la générer au moteur asynchrone, un hacheur Boost a été associé et doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. Dans notre étude, on a intéressé seulement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation P&O, puisqu'elle est simple et donne un bon rendement Un onduleur à deux niveaux a été utilisé afin de convertir la tension continue en tension alternative. Il joue aussi le rôle d'adaptateur source-charge lors il a commandé par la technique MLI.

On a conclu que, la présence de l'électronique de puissance est primordiale, dans le système photovoltaïque au but d'adapter et d'assurer son bon fonctionnement. L'onduleur engendre généralement des harmoniques qui peuvent perturber le système. Donc, un filtrage entre l'onduleur et la charge est nécessaire au but de minimiser les signaux non sinusoïdaux générés par l'onduleur.

Conclusion générale

Comme perspectives, une suite de ce travail peut être enrichie par :

- * L'évaluation des performances du système lors du raccordement du GPV au charge (réseau électrique).
- * L'utilisation d'autres algorithmes MPPT.
- * L'utilisation d'autres commandes MLI.
- * L'utilisation d'autres types de convertisseurs DC-DC.
- * L'utilisation d'un onduleur directement commandé par l'algorithme MPPT.
- * L'ajout d'un filtre entre l'onduleur pour une charge comme réseau électrique

Références bibliographiques:

- [1] Ghaitaoui elmoulat et Khelifi houda alimentation d'un moteur asynchrone a partir d'un générateur photovoltaïque, mémoire de master. Université Ahmed Daria Adrar. 2019.
- [2] Helali Kamelia, Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque ETUDE COMPARATIVE, mémoire d'ingénieur. Université MOULOUD MAMMERI (TIZIOUZOU) . 2012.
- [3] Aziz Rachid, Modélisation Et Simulation Sous Matlab/Simulink Dun Systeme Photovoltaïque Adapte Par Une Commande De Mppt, thèse de doctorat. Mémoire de master, Université MOULOUD MAMMERI (TIZIOUZOU) . 2014.
- [4] : GOAR NOUREEDINE, MAHMOUDI ABDELKADER, Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, mémoire de master. Université Larbi ben m hidi (Oum elbuaghi) . 2017
- [5] MAYOUF Somia, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle, mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- [6] Jazia Mohamed et zikem houssam, amélioration de la qualité d'énergie électrique issue d'un système photovoltaïque utilisant la méthode du courant de source maximum, mémoire de master. , mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2017.
- [7] Ayoub abdi et Yassine Bouchlaghem, étude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque. Mémoire de master. Université Abou bekr belkaid Tlemcen . 2017.
- [8] Chelabi Anis et Ibelhoulen Aziz, Etude d'un système hybride autonome, mémoire de master. Université de Bejaia. 2012.
- [9] AL IDRISSE Ramzi, Dimensionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau, Rapport de stage de fin d'études, EST Fès. Année universitaire 2015-2016.
- [10] BELFEDHAL Abdelmalek, Etude et Simulation d'une Centrale Photovoltaïque Connectée au Réseau Electrique a la Région d'Adrar, mémoire de Magister. Université Africaine Ahmed Daria Adrar. 2013.
- [11] Yacoubi BOUMEDIENE, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau, mémoire de master, université Belkaid Tlemcen, 2016.

ملخص

الطاقة الشمسية هي أحسن طاقة بديلة ومتجددة والمتوفرة في العالم كله خاصة في الجزائر والمناطق الجنوبية بالتحديد مثل إدرار حيث أن استغلال هذه الطاقة يوفر الكثير ويدر على الميزانية مبالغ معتبرة

حيث أن الهدف من هذا العمل هو تسليط الضوء على هذه الطاقة وكيفية استعمالها وكذلك الرفع من مردوديتها وإيجاد العلاقة المباشرة بين شكل الإشارة الضوئية المطبقة على الألواح الشمسية ومردود النظام الضوئية من حيث شدة التيار وفرق الكمون والاستطاعة المنتجة

الكلمات المفتاحية :

الطاقة الشمسية ، موج ، لوح كهروضوئي

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est considérée parmi les énergies renouvelables les plus exploitées dans le monde et plus précisément en Algérie, surtout dans la région d'Adrar, soit à l'échelle publique, soit à l'échelle personnelle représentée par sa vaste utilisation dans l'irrigation.

L'objectif de ce travail est l'évaluation de la performance d'un générateur photovoltaïque sous les différentes signaux irradiations et lors son raccordement avec une charge comme réseau électrique . Ce système photovoltaïque comporte un convertisseur DC-DC commandé par MPPT P&O et un onduleur à deux niveaux commandé par la technique MLI.

Mots Clés : générateur photovoltaïque, MPPT, hacheur Boost, onduleur, commande MLI.

Abstract:

Photovoltaic solar energy is considered among the most exploited renewable energies in the world and more specifically in Algeria, especially in Adrar region, either on a public scale or on personal one represented by its vast use in irrigation.

The aim of this work is the performance evaluation of a photovoltaic generator under different signals irradiations and when connected with an electrical network . This photovoltaic system comprises a DC-DC converter controlled by MPPT P&O and a two-level inverter controlled by the STPWM technique.

Keywords: photovoltaic generator PVG, MPPT, Boost chopper, inverter, .