

## Résumé :

Dans ce mémoire nous avons comme objectif, l'étude et la modélisation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique. Nous avons également utilisée ce système à une topologie de raccordement à deux étages, un hacheur survolteur (DC/DC) pour augmenter la tension de générateur photovoltaïque a une tension fixe au borne de l'onduleur, ce dernier est un onduleur de tension (DC/AC) avec un filtrage d'harmonique (LCL). Le générateur photovoltaïque il est dimensionné pour une puissance de 100 KW. La modélisation est basée sur un modèle d'une cellule photovoltaïque qui présente les caractéristiques (V-I) et (V-P) de système. Ces caractéristiques non lineaire permettent d'extraire le maximale d'énergie convertis vers le réseau électrique a travers les algorithmes d'extraction de maximum de puissance (MPP) par Perturbation et Observation (P&O) et Conductance Incrémentale (IC) avec une amélioration de la qualité de l'énergie. Le système de conversion est modélisé et simulé par MATLAB/SimpowerSystem

ملخص:

في هذه الأطروحة هدفنا هو دراسة ونمذجة النظام الكهروضوئي المتصل بشبكة الكهرباء. استخدمنا هذا النظام أيضًا في طوبولوجيا التوصيل على مرحلتين ، المروحية الداعمة (DC / DC) لزيادة جهد المولد الكهروضوئي إلى جهد ثابت عند طرف العاكس ، وهذا الأخير هو محول الجهد (DC / AC) مع التوافقي التصفية (LCL). حجم المولد الكهروضوئي بقوة 100 كيلو واط. تعتمد النمذجة على نموذج لخلية كهروضوئية لها خصائص (V-I) و (V-P) للنظام. هذه الخصائص غير الخطية تجعل من الممكن استخراج الطاقة القصوى المحولة إلى الشبكة الكهربائية من خلال خوارزميات استخراج الطاقة القصوى (MPP) عن طريق الإزعاج والمراقبة (O&P) والتحريض الإضافي (IC) مع تحسين جودة الطاقة. نظام التحويل الذي تم تصميمه ومحاكاته بواسطة MATLAB / SimpowerSystem

Abstact:

Inthis thesis we have as objective, the study and the modeling of photovoltaic system connected to the electricity network. We also used this system at two-stage connection topology, booster chopper (DC / DC) to increase the voltage of photovoltaic generator to a fixed voltage at the terminal of the inverter, the latter is a voltage inverter (DC / AC) with harmonic filtering (LCL). The photovoltaic generator is sized for a power of 100 KW. The modeling is based on a model of a photovoltaic cell which has the characteristics (V-I) and (V-P) of the system. These non-linear characteristics make it possible to extract the maximum energy converted to the electrical network through the algorithms of extraction of maximum power (MPP) by disturb and observe (P&O) and incremental inductance (IC) with an improvement of the energy quality. The conversion system modeled and simulated by MATLAB / SimpowerSystem

# REMERCIEMENT

Louange à Dieu le tout puissant, qui nous a donné le courage de finir ce travail en bonnes conditions et qui nous a permis de voir ce jour tant attendu.

A l'issue de ce travail je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de cette étude.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon encadreur Monsieur **RATNI**, Docteur à l'Université de M'HAMED BOUGERRA BOUMERDES, pour avoir d'abord proposé ce thème, son encadrement, son encouragements. J'ai eu le privilège de travailler avec vous et d'apprécier vos valeurs et vos qualités professionnelles et humaines.

Je remercie Monsieur **BOUREGBA** pour son Co-encadrement et pour avoir dirigé mes travaux ainsi que pour son disponibilité, son patience et son conseil.

# Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

## **A ma très chère mère**

A toi qui as toujours été là pour moi dans les meilleurs de mes moments comme dans les pires, affable et honorable tu représentes pour moi le symbole d'excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement.

## **A mon très cher père**

A toi qui as toujours veillé sur moi t'es une source d'inspiration via ton dévouement ta rigueur et ton sérieux je ne peux que rester en admiration face à ce que t'as accompli durant ta vie en tant qu'homme et en tant que père Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous vos sacrifices que vous n'avez cessé de faire depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, le témoignage de mon profond amour éternel, puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

## **A mes trois frères adorés**

Abdel-hak&Nour el-islam & Ali merci d'être présent pour moi.

## **A ma très chère Famille,**

A tous les membres de ma famille mes cousins mes cousines oncles et tantes, paternelles et maternels, merci d'être là.

Ma cousine Asma qui est là pour moi toujours et constamment et qui a contribué à ma réussite.

A ma très chère cousine Nada

A mon grand-père paternel, A mon grand-père maternel qu'Allah te fasse miséricorde et t'accorde le paradis.

A ma grand-mère paternelle A ma grand-mère maternelle.

### **A cette personne si spéciale**

A ma très chère cousine **Nada** tu quittais soudainement ce monde sans espoir de retour le 30 juin 2021 à l'Age de 6 ans. Tu es au paradis inchaa'Allah. Tu revis dans nous mémoire.

### **A mes très chères amies**

Aussi nombreux qu'elles soient merci vous avez d'une manière ou d'une autre contribué à faire de moi qui je suis et donc à ma réussite merci MOUNIRA, SIHAM, KOKI, ROUMAÏSSA, HADJER, LYNA, CHAHINEZ. Je vous témoigne ma plus profonde gratitude

## Listes des figures :

### Chapitre I :

Fig.I.1 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
Fig.I.2 : Illustration de la caractéristique .....	6
Fig.I.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	6
Fig.I.4 : Caractéristique I-V P-V d'une cellule photovoltaïque .....	10
Fig.I.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension.....	11
Fig.I.6 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension .....	11
Fig.I.7 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension .....	12
Fig.I.8 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension.....	12
Fig.I.9 :Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque .....	13
Fig.I.10 :Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un générateur photovoltaïque .....	13
Fig.I.11 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque .....	14
Fig.I.12 :Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension d'un générateur photovoltaïque .....	14
Fig.I.13 : Cellules du silicium monocristallin et poly cristallin .....	15
Fig.I.14 : Cellules du silicium amorphe en couche mince.....	16

Fig.I.15 : Couplage direct avec la charge non lineaire .....	17
Fig.I.16 : Structure d'un système hybride .....	18
Fig.I.17 : GPV raccordé au réseau électrique une étage de conversion DC-AC .....	18
Fig.I.18 : GPV raccordé au réseau électrique une étage de conversion DC-AC avec charge.....	19
Fig.I.19 : GPV raccordé au réseau électrique a deux étages de conversion production et consommation .....	19
Fig.I.20 : Raccordement d'un filtre passif.....	22
Fig.I.21 : Structure du filtre passif résonant .....	23
Fig.II.22 : Structure de filtre passif amorti .....	24
Fig.I.23 : Structure de filtre passif parallèle anti-résonant .....	25
Fig.I.24 : Montage du filtre actif parallèle.....	26
Fig.I.25 : Montage de filtre actif .....	27
Fig.I.26 : Filtre combine parallele-serie (UPQC).....	28
Fig.I.27 : Filtre actif hybride .....	28
Fig.I.28 :Filtre du troisième ordre.....	29

## **Chapitre II :**

Fig.II.1 : Circuit électrique de Hacheur abaisseur.....	31
Fig.II.2 : Formes d'ondes des courants et tensionsdu convertisseur Buck.....	32
Fig.II.3 : Le convertisseur BOOST.....	33

Fig.II.4 :Schéma d'un principe de fonctionnement d'un hacheur Boost.....	33
Fig.II.5 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....	37
Fig.II.6 : Courant d'entrée du convertisseur Boost.....	39
Fig.II.7 : Courant de sortie du convertisseur Boost .....	39
Fig.II.8 : Tension d'entrée du convertisseur Boost.....	40
Fig.II.9 : Tension de sortie du convertisseur Boost .....	40
Fig.II.10 : Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost.....	41
Fig.II.11 : Tensions et courants du convertisseur Buck-Boost .....	41
Fig.II.12 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC)contrôlé par une commande (PPM)sur charge DC .....	43
Fig.II.13 : Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation .....	44
Fig.II.14 : Méthode de la contre réaction en courant.....	44
Fig.II.15 : Caractéristique du point de puissance maximale MPP.....	45
Fig.II.16 : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O .....	45
Fig.II.17 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation .....	47
Fig.II.18 : Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance .....	48
Fig.II.19 : Structure de la PLL .....	49
Fig.II.20 : Schéma de fonctionnement de la PLL .....	50
Fig.II.21 : Repère de référence .....	51
Fig.II.22 : Schéma de l'onduleur triphasé .....	52
Fig.II.23 : Tension d'entrée de l'onduleur.....	54

Fig.II.24 : Tension de sortie de l'onduleur .....	55
Fig.II.25 : Commande 180° .....	56
Fig.II.26 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire .....	57
Fig.II.27 : La tension DC.....	58

### **Chapitre III :**

Fig.III.1 : Schéma descriptif de La chaine de conversion PV .....	59
Fig.III.2 : Schéma descriptif de la commande deux étages d'adaptation DC-DC-AC .....	60
Fig.III.3 : Schéma de simulation du GPV base sur l'algorithme P&O à éclairement variable et à température constante avec MLI-ST .....	61
Fig.III.4 : Les variations de l'éclairement .....	62
Fig.III.5 : Le courant de sortie de l'onduleur avant filtre .....	62
Fig.III.6 : Le courant de sortie de l'onduleur après filtre .....	63
Fig.III.7 : La tension de réseau.....	63
Fig.III.8 : La tension de sortie du hacheur.....	63
Fig.III.9 : La puissance active .....	64
Fig.III.10 : La puissance réactive.....	64
Fig.III.11 : Schéma de Simulation GPV base sur IC à éclairement variable et Température constante avec MLI-ST-Hystérésis .....	65
Fig.III.12 : Le courant d'irradiation.....	66
Fig.III.13 : Le courant de sortie de l'onduleur avant le filtrage .....	66

Fig.III.14 : Le courant de sortie de l'onduleur après le filtrage .....	67
Fig.III.15 : La puissance Active .....	67
Fig.III.16 : La puissance Réactive.....	67
Fig.III.17 : La tension de réseau.....	68
Fig.III.18 : La tension de capacité.....	68
Fig.III.19 : P&O 500 W/m <sup>2</sup> et 1000 W/m <sup>2</sup> avant filtrage.....	69
Fig.III.20 : IC 500 W/m <sup>2</sup> et 1000 W/m <sup>2</sup> avant filtrage.....	69
Fig.III.21 : P&O 500 W/m <sup>2</sup> et 1000 W/m <sup>2</sup> après filtrage .....	70
Fig.III.22 : IC 500 W/m <sup>2</sup> et 1000 W/m <sup>2</sup> après filtrage .....	70

## Liste des Tableau :

Tableau.III.1 : THD avant filtrage sur l'algorithme P&O avec IC .....	71
Tableau.III.2 : THD après filtrage sur l'algorithme P&O avec IC .....	71

## Liste des Acronymes et symbole :

### Acronymes :

PV : Photovoltaïque

DC/AC : Conversion continu/alternatif

DC/DC : Conversion continu/continu

GPV : Générateurs photovoltaïques

HF : Hill climbing IncCond Incrémentation de filtre

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions

PPM : Point de puissance maximale

MPPT : Maximum Power Point Tracking

P&O : Perturbation et observation

PI : Régulateur proportionnel intégral

STC : Standard test conditions

Wc : Watt-crête

I-V : Courant-tension

P-V : Puissance-tension

AsGa : Arséniure de Gallium

CdTe : Indium Gallium Phosphide.

CIS : Désélémeure Cuivre indium/sulfure de Cadium

F.A.S : Filtre Actif Série

UPQC : Combinaison parallèle série Actif

FAP :Filtre Actif Parallèle

THD : Total Harmonic Distorsion

P : Puissance instantané active

Q : Puissance instantané réactive

Vdc : Tension continue de l'onduleur

h : Rang de l'harmonique

UPQC : Power Quality Conditioner

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

FFT :Fast Fourier Transform

FPB :FiltrePasse-Bas

PLL: Phase Locked Loop

PI: Proportional Integral

IGBT: Insolated Gate Bipolar Transistor

IPQC: Improved Power Quality

## Symboles :

$I_c$  : Courant de la cellule

$V_c$  : Tension de la cellule.

$I$  : Courant délivré par la cellule

$I_{ph}$  : Courant photo généré par le générateur photovoltaïque sous éclairement [A]

$I_d$  : Courant qui traverse la diode[A]

$I_{sat}$ : Courant de saturation[A].

GPV : Générateur photovoltaïque.

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit[A].

$g$  : L'ensoliellement

KI : Le coefficient de température court-circuit.

$\theta$  : Température

$I_{pn}$  : courant photonique génère dans les conditions standard[A]

$E$  : Eclairement

$I_{sh}$  : Courant qui traverse  $R_{sh}$ [A].

$R_s$  : Résistance série du générateur[ $\Omega$ ].

$R_{sh}$  : Résistance parallèle du générateur[ $\Omega$ ].

$q$  : Charge de l'électron [ $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb].

$A$  : Facteur d'idéalité.

$K$  : Constante de Boltzmann [ $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K].

$S$  : Surface effective du générateur photovoltaïque en [ $m^2$ ].

$P_{\max}$  : Puissance maximale[W].

$I_{\max}$  : Courant maximal[A].

$V_{\max}$  : Tension maximale[V].

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert [V].

$P_c$  : Puissance crête [W].

FF : Facteur de forme

$\eta$  : Efficacité maximale de la conversion

L : Inductance

C : Capacité

R : Résistance

$C_f$  : Capacité de filtre

$i_f$  : Courant de filtre

$i_{ref}$  : Courant de référence

$R_f$  : Résistance de filtre de sortie

$L_f$  : Inductance de filtre de sortie

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Production d'énergie photovoltaïque</b>	
Introduction .....	4
I.2. Cellules photovoltaïques .....	4
I.2.1. Description de la cellule .....	4
I.2.2. Principe de fonctionnement .....	4
I.2.3. Caractéristique de la cellule photovoltaïque .....	5
I.2.3.1. Modélisation électrique d'une cellule PV .....	6
I.2.3.2. Paramètre d'une cellule Photovoltaïque .....	8
I.2.3.3. Caractéristiques I-V et V-P d'une cellule photovoltaïque .....	9
I.2.3.4. Influence de l'éclairement et de la température d'une cellule photovoltaïque .....	10
I.2.4. Caractéristique générateur photovoltaïque (GPV) .....	13
I.2.4.1. Influence de l'éclairement .....	13
I.2.4.2. Influence de la température .....	14
I.3. Différents technologies des cellules photovoltaïques .....	15
I.3.1. Cellule cristallines .....	15
I.3.1.1. Cellule monocristallin .....	15
I.3.1.2. Cellule poly cristallin .....	16
I.3.2. Cellule a couche mince .....	16
I.3.2.1. Silicium amorphe .....	16

<b>I.4. Classification d'un système solaire photovoltaïque .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.1. Systeme autonome .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2. Systeme hybride.....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3. Systeme PV raccordé au réseau électrique .....</b>	<b>18</b>
<b>I.5. Qualité de l'énergie électrique .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.1. Qualité de la tension électrique .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.1.1. Amplitude .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.1.2. Fréquence .....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.1.3. Forme d'onde.....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.1.4. Symétrie .....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.2. Qualité du courant.....</b>	<b>21</b>
<b>I.6. Réduction de la pollution harmonique (compensation des harmoniques) .....</b>	<b>21</b>
<b>I.6.1. Absorption sinusoidale .....</b>	<b>21</b>
<b>I.6.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant .....</b>	<b>21</b>
<b>I.6.3. Transformateur à couplage spécial .....</b>	<b>22</b>
<b>I.6.4. Filtres passifs d'harmoniques.....</b>	<b>22</b>
<b>I.6.4.1 Filtre passif résonant .....</b>	<b>23</b>
<b>I.6.4.2. Filtre passif amorti .....</b>	<b>24</b>
<b>I.6.4.3. Phénomène de l'antirésonance.....</b>	<b>24</b>
<b>I.6.5. Filtres actif d'harmoniques .....</b>	<b>25</b>
<b>I.6.5.1. Filtre actif parallèle .....</b>	<b>26</b>

I.6.5.2. Filtre actif série.....	27
I.6.5.3. Combinaison parallèle série actif.....	27
I.6.6. Filtre actif hybride.....	28
I.7. Filtre triphasé LCL.....	28
I.7.1. Modélisation de filtre LCL.....	28
I.8. Conclusion.....	29
<b>Chapitre II: Modélisation de système photovoltaïque connecté au réseau électrique</b>	
II.1. Introduction.....	31
II.2. Convertisseur de puissance de système photovoltaïque.....	31
II.2.1. Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	31
II.2.1.1. Hacheur dévolteur (Buck).....	31
II.2.1.2. Hacheur survolteur (Boost).....	32
II.2.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).....	41
II.3. Commande MPTT des convertisseurs DC/DC.....	42
II.3.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC/DC.....	42
II.3.2. Méthode poursuite de MPPT.....	43
II.3.2.1. Méthodes à contre réaction de tension.....	43
II.3.2.2. Méthode avec contre réaction du courant.....	44
II.3.2.3. Méthode à contre réaction de puissance.....	45
II.3.3. Technique de synchronisation avec le réseau électrique PLL.....	49
II.3.3.1. Principe de fonctionnement.....	49
II.4. Onduleurs.....	51

II.4.1.Structure d'onduleur .....	51
II.4.2.1.Commande plein d'onde (180°).....	55
II.4.2.2.Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	56
II.5.Conclusion.....	58
<b>Chapitre III: Simulation de système photovoltaïque connecté au réseau électrique</b>	
III.1.Introduction.....	59
III.2.Système photovoltaïque proposée.....	59
III.2.1 Description .....	59
III.2.2 Description de commande .....	59
III.3. Simulation du générateur PV .....	61
III.3.1. Simulation du GPV base sur l'algorithme P&O à éclairement variable et température constante avec MLI-ST .....	61
III.3.1.1. Schéma de simulation .....	61
III.3.1.2.Résultat de simulation ( $V_{abc}, I_{abc}, I_{abcf}, V_{dc}, Irrad, P, Q$ ).....	62
III.3.2. Simulation GPV base sur IC à éclairement variable et Température constante avec MLI-ST-Hystérésis .....	65
III.3.2.1. Schéma de simulation .....	65
III.3.2.2. Résultat de simulation ( $V_{abc}, I_{abc}, I_{abcf}, V_{dc}, Irrad, P, Q$ ) .....	66
III.3.3. Résultats de comparaison .....	69
III.3.3.1.Algorithme P&O avec IC avant et après filtrage .....	69
III.3.3.2.Algorithme P&O avec IC avant filtrage (THD) .....	71
III.3.3.3.Algorithme P&O avec IC après filtrage (THD) .....	71

<b>III.4. Conclusion .....</b>	<b>72</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>73</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>75</b>
<b>Référence .....</b>	<b>85</b>

### Introduction générale

L'économie algérienne reste fortement dépendante des hydrocarbures. La crise multidimensionnelle que traverse le Monde n'épargne pas l'Algérie. Il est difficile d'avoir des certitudes sur le court terme et les voies de sortie de crise que pourraient prendre certains pays. Il est évident qu'il n'y a pas de modèle universel de sortie de crise. Pour l'Algérie il s'agit d'adopter une vision globale pour son développement. Elle se doit de définir ses priorités au vu de la diminution de ses ressources financières, comme elle doit également garantir les quatre sécurités, à savoir la sécurité nationale, la sécurité alimentaire et la sécurité sanitaire, ainsi que la sécurité énergétique que nous allons voir dans cette étude [1].

L'énergie est un facteur essentiel du développement des sociétés [2]. En effet, une des possibilités consiste à accroître le taux de production de l'énergie électrique à partir des ressources de type non-fossiles et renouvelables [3]. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Mais malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas [4].

L'une des sources d'énergie renouvelable couramment utilisée est le soleil. Chacun sait que : "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" [5]. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie PV se développe très rapidement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, théorie de contrôle, et d'autres filières. D'ailleurs, on prévoit, pour commander la puissance électrique débitée, diverses méthodes : l'action sur les propriétés physicochimiques des cellules, l'action sur les trackers mécaniques d'orientation automatique des panneaux solaires, et l'action sur l'interface d'électronique de puissance qui relie le générateur PV avec sa charge. Cette dernière action est communément appelée la commande électrique des systèmes PV. Elle consiste en l'élaboration de topologies des convertisseurs statiques et de développement d'algorithmes de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la meilleure capture de la puissance maximale [4].

Cependant, il y a aussi quelques inconvénients potentiels de ces systèmes, à savoir les prix élevés des panneaux et le faible rendement énergétique de conversion [6]. Les systèmes PV génèrent une puissance dépendante du changement des conditions climatiques ; telles que le rayonnement solaire et la température des panneaux et de la variation de la charge. Par conséquent, une technique de recherche du point de puissance maximale (PPM) destinée à

contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC/DC est nécessaire pour garantir un fonctionnement optimal de la chaîne PV dans différentes conditions d'exploitation [7]. Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes MPPT.

L'objectif principal de ce travail est simulé la chaîne photovoltaïque raccordée au réseau électrique par les deux méthodes MPPT, P&O et IC. Pour le but d'améliorer la qualité d'énergie injectée sur le réseau électrique.

Pour atteindre cet objectif, il faut réaliser les tâches suivantes:

- Analyse du transfert d'énergie dans une source PV
- Étude comparative des différentes méthodes MPPT disponibles dans la littérature.
- Intégration l'algorithme (MPPT) étudié dans la littérature.
- Validation du système MPPT proposé par la simulation.

Ce travail est synthèse en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les cellules photovoltaïques nous allons étudier son principe de fonctionnement et les caractéristiques principales de la cellule et le générateur PV, ainsi que les différentes technologies des cellules PV. En passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir :

-système autonome,

-système hybride,

-système PV raccordée au réseau.

Ensuite, nous nous intéresserons d'intégrer l'énergie électrique dans le réseau électrique.

Le second chapitre se focalise sur les convertisseurs DC-DC et DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. On a décrit la commande MPPT du convertisseur DC-DC et la commande MLI du convertisseur DC-AC.

Le chapitre trois traite la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages raccordé au réseau électrique avec une topologie de raccordement (back to back). L'utilisation de deux techniques différentes comme Perturbe and observe (P&O) et inductance incrémentale (IC).

Les techniques de contrôle de l'onduleur sont contrôlées par deux techniques différentes comme MLI sinus-triangle et MLI hystérésis pour un meilleur contrôle d'énergie transféré vers le réseau électrique.

### I.1.Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet Photovoltaïque [7].

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [8].

L'importance de l'énergie solaire photovoltaïque a été émergente comme ressources énergétiques remplaçables à l'être humain [9]. En effet les systèmes PV sont l'une des sources verte d'énergie, qui se sont développées rapidement et ont joués un rôle très important dans le domaine de l'électronique de puissance en offrant une puissance électrique sans pollution.

### I.2.Cellules photovoltaïques

#### I.2.1.Description de la cellule

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs à semi-conducteurs, elles sont généralement faites du silicium sous ses différentes formes [10] [11]. Elles produisent de l'électricité du moment qu'elles sont exposées au rayonnement solaire [10] [12]. Les cellules photovoltaïques sont la façon la plus sûr et la plus écologique de produire de l'énergie [10][11].

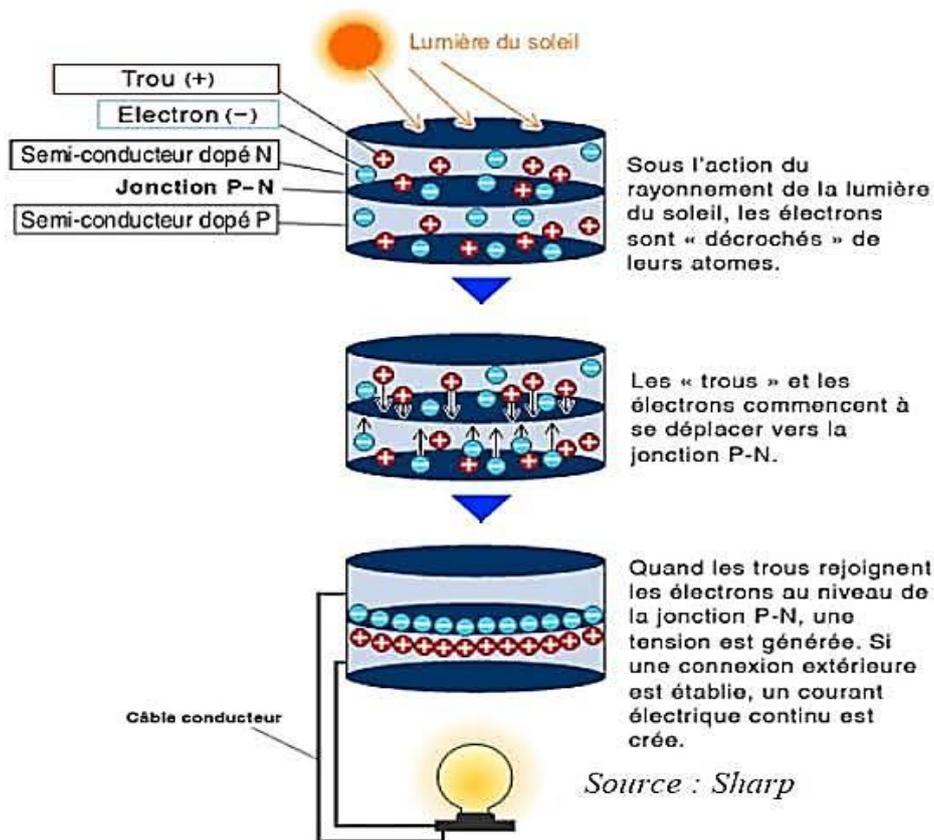
#### I.2.2.Principe de fonctionnement

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. À travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ).

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement. La

Fig.(I.1) représente le principe de fonctionnement [13].



**Fig.1.1 :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.2.3.Caractéristique de la cellule photovoltaïque

Le système PV à un comportement non linéaire, ce comportement peut illustrer par lacourbe  $i_c = f(v_c)$  et dans la Fig. I.2 suivant:

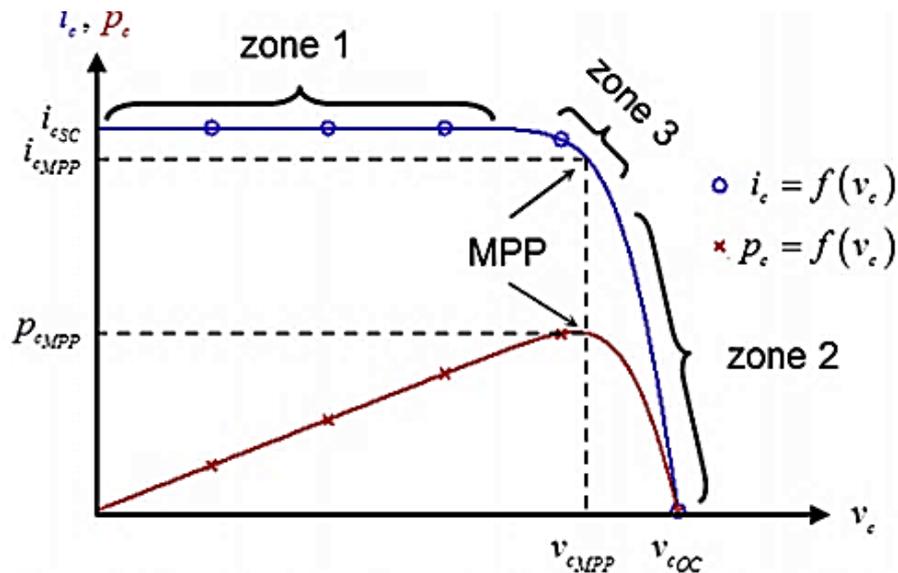


Fig.I.2 : Illustration de la caractéristique I-V

D'après cette figure, le comportement peut décomposer en trois zones :

- Zone 1 : fonctionnant comme source de courant.
- Zone 2 : fonctionnant comme source de tension.
- Zone 3 : mode de fonctionnement intermédiaire dans lequel se trouve le MPP.

### I.2.3.1. Modélisation électrique d'une cellule PV

Le circuit équivalent (réel) de la cellule PV est basé sur une diode, et deux résistances, séries  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$  comme le montre le schéma électrique de la Fig. I.3.

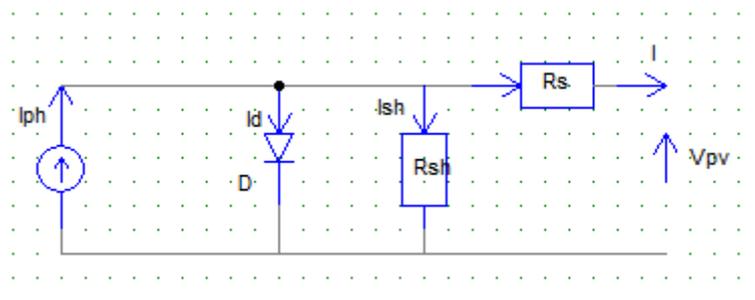


Fig.I.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant de sortie d'une cellule d'après la loi de Kirchhoff est donné par l'expression :

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

Avec :

$I$  : le courant délivré par la cellule (A) ;  $I_{ph}$  : Photo courant(A) ;  $I_d$  : Courant de diode(A)

$I_{sh}$  : Le courant de la résistance shunt(A).

La photo courant :

$$i_{ph} = \left(\frac{g}{g^*}\right)(i_{pn} + K_i(\theta - \theta^*)) \quad (I.2)$$

Avec :

$g^*$ : l'ensoleillement dans les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>),

$K_i$  : est coefficient de température court-circuit,

$\theta^*$  : La température dans les conditions standards (298° K),

$i_{pn}$  : Courant photonique généré dans les conditions standard (A).

Le courant de diode :

$$i_D = i_{D_{sat}} \left[ \exp\left(q\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right)\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Avec :

$i_{D_{sat}}$  : Courant de saturation de la diode

$$I_{D_{sat}} = \frac{(I_{cc} + K_i(\theta - \theta^*))}{\exp\left(\frac{(V_{co} + K_i(\theta - \theta^*))}{A V_t}\right) - 1} \quad (I.4)$$

Bien que :

$$V_T = \frac{K \theta}{q} \quad (I.5)$$

$K = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K. (constante de Boltzmann) ;  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C.

$I_{cc}$  : Courant court-circuit à  $T = 25$  °C,  $G = 1$  kW/m<sup>2</sup>

$V_{PV}$  : La tension à la borne de la cellule

A : facteur d'idéalité de la diode.

$I_{sh}$  : Le courant de la résistance shunt

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

### **I.2.3.2. Paramètre d'une cellule Photovoltaïque**

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{cc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$ , FF,  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

#### **I.2.3.1.1. Courant de court-circuit**

Le courant de court-circuit est le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire, augmente généralement avec l'intensité d'illumination.  $I_{cc}$  est la valeur du courant lorsque la tension  $V = 0$ . On peut écrire :  $I_{cc} (V = 0) = I_{ph}$  [14].

#### **I.2.3.1.2. Tension de circuit ouvert**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. On peut écrire [14] :

$$V_{co} (I = 0) = AV_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{Dsat}} + 1 \right) \quad (I.7)$$

**I.2.3.1.3. Puissance maximale**

La partie intéressante de la caractéristique I-V est celle qui génère de l'énergie et plus précisément au point P<sub>m</sub> de la puissance est maximale. A Ce point, on associe la tension maximale V<sub>m</sub> et le courant maximal I<sub>m</sub> [15,16].

$$p_{cmp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (I.8)$$

**I.2.3.1.4. Facteur de forme FF**

On appelle facteur de forme facteur de forme (FF), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite V<sub>mp</sub> . I<sub>mp</sub> de la cellule sous les conditions de mesures standardisées, et le produit I<sub>cc</sub> . V<sub>co</sub> [14] :

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.9)$$

**I.2.3.1.5. Efficacité (rendement) maximale de la conversion**

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [17].

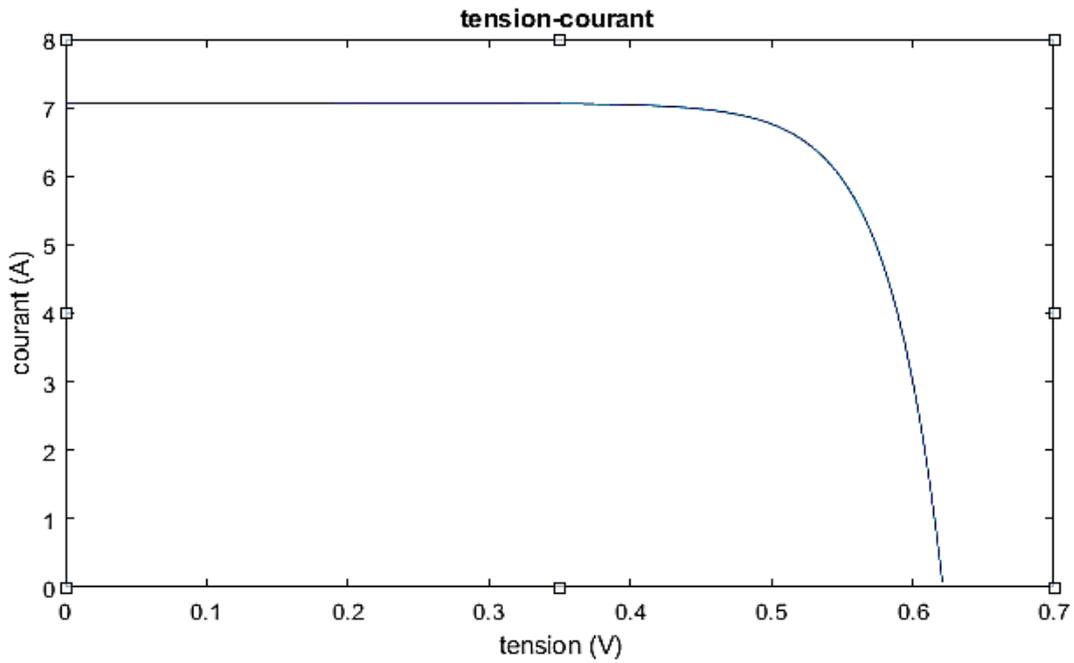
$$\eta = \frac{p_{cmp}}{E \cdot S} \quad (I.10)$$

Avec

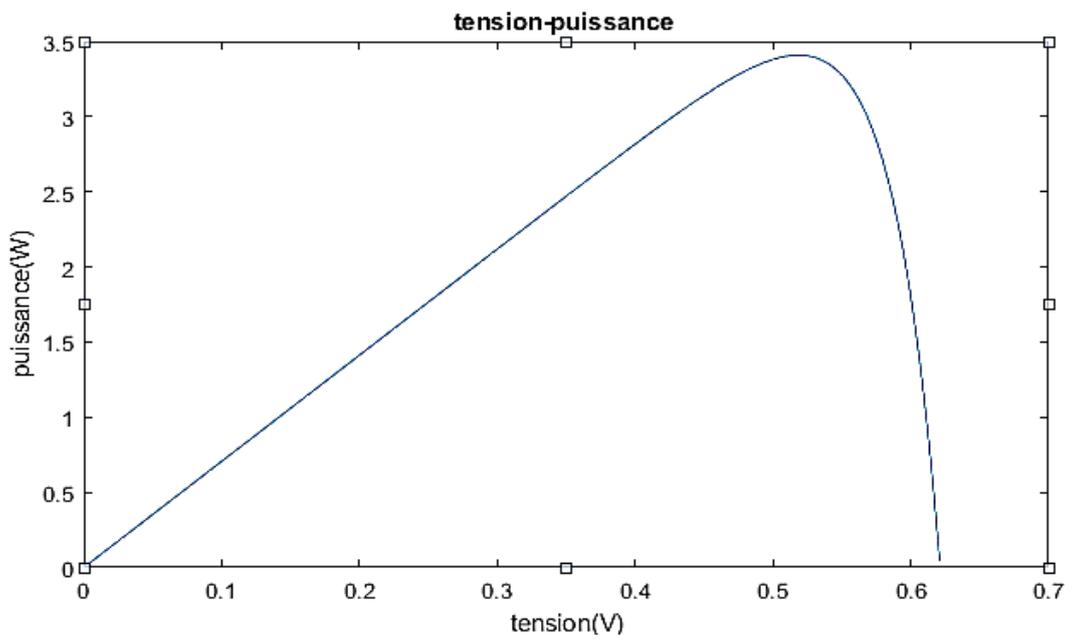
E: Éclairement en w/m<sup>2</sup>, S: Surface active de la cellule.

**I.2.3.3. Caractéristiques I-V et V-P d'une cellule photovoltaïque**

La Fig. I.4 Représente la caractéristique courant-tension I = f(V) et puissance-tension P= f(V) d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle sous conditions standards.



(a) Caractéristique courant-tension



(b) Caractéristique puissance-tension

**Fig.I.4** : Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque

#### I.2.3.4. Influence de l'éclairement et de la température d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

1.2.3.4.1. Influence de l'éclairement

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, Fig.I.5 et Fig. I.6, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale  $P_{max}$ . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (à vide) varie très peu.

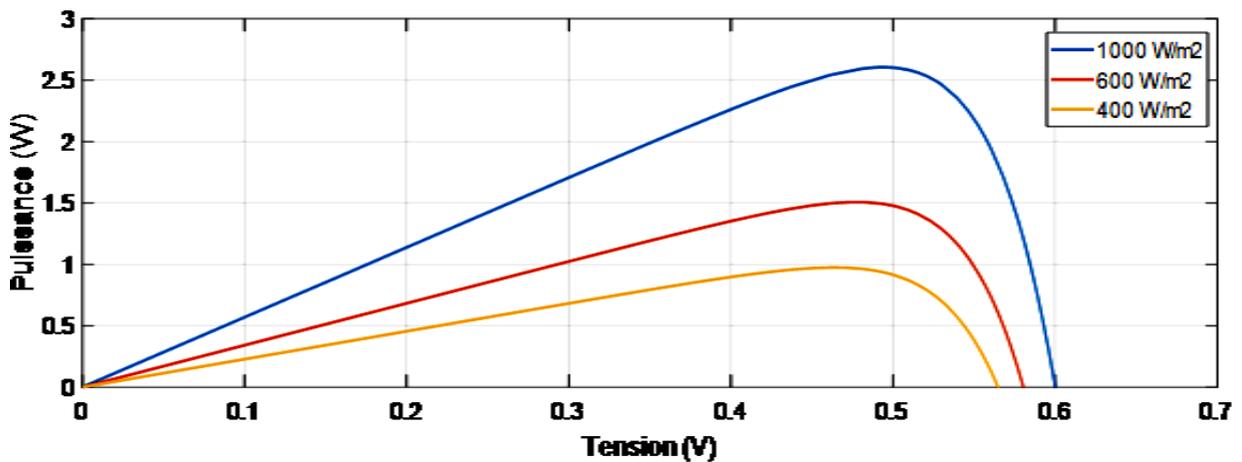


Fig.I.5 :Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension

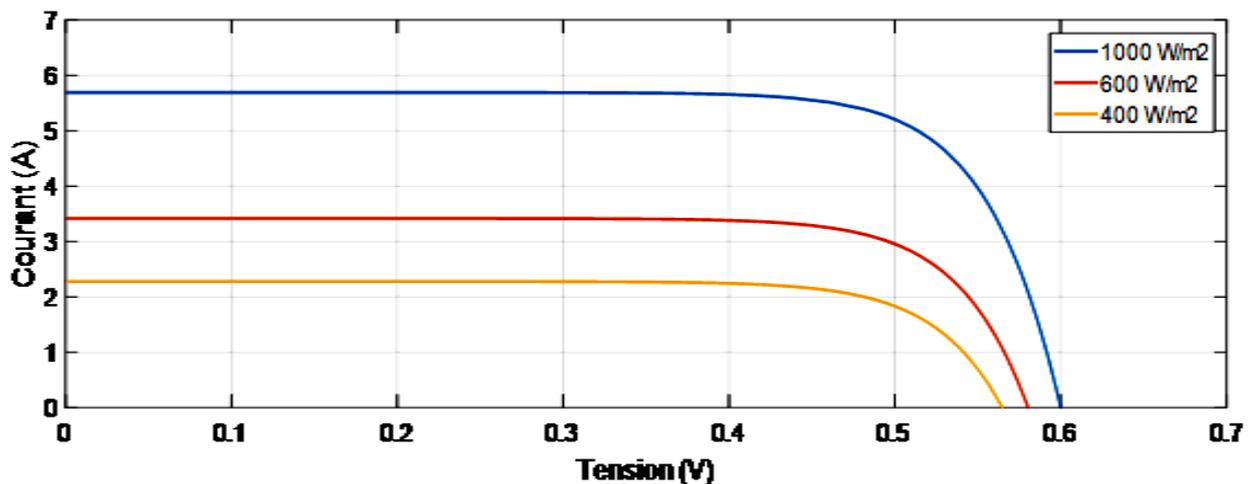


Fig.I.6 :Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension

D'après la figure I.16 nous remarquons que la tension de circuit ouvert augmente légèrement avec l'ensoleillement et le courant de court-circuit augmente avec une valeur importante. D'où l'éclairement influe sur le courant de court-circuit. La figure I.15 représente

l'influence de l'ensoleillement sur les différentes caractéristiques P-V qui ont pratiquement les mêmes formes, la puissance maximale augmente avec l'ensoleillement.

#### I.2.3.4.2. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. Les Fig. I.7 et la Fig. I.8 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. Un certain temps en fixe la température et vise vers ça.

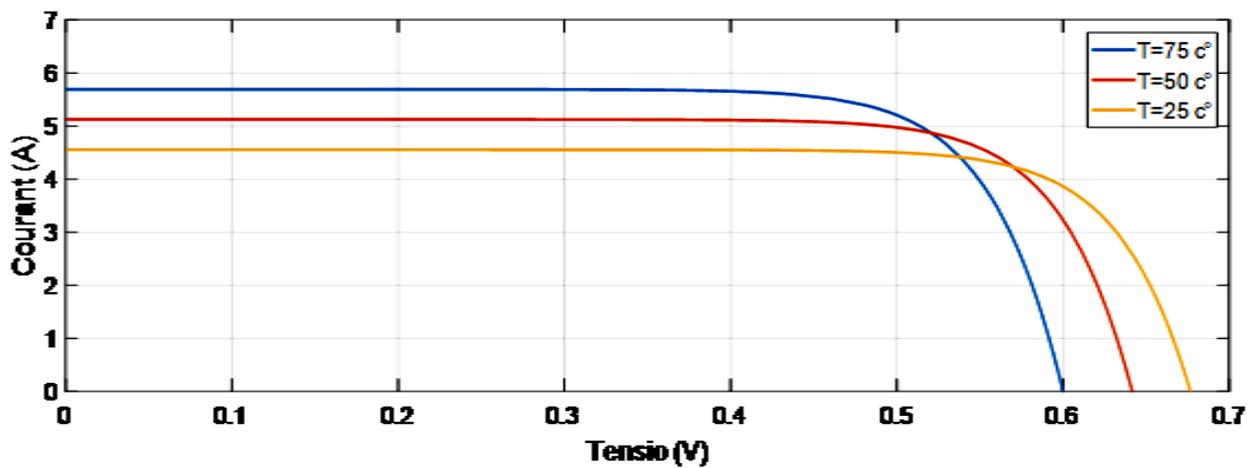


Fig.I.7 :Influence de la température sur la caractéristique courant-tension

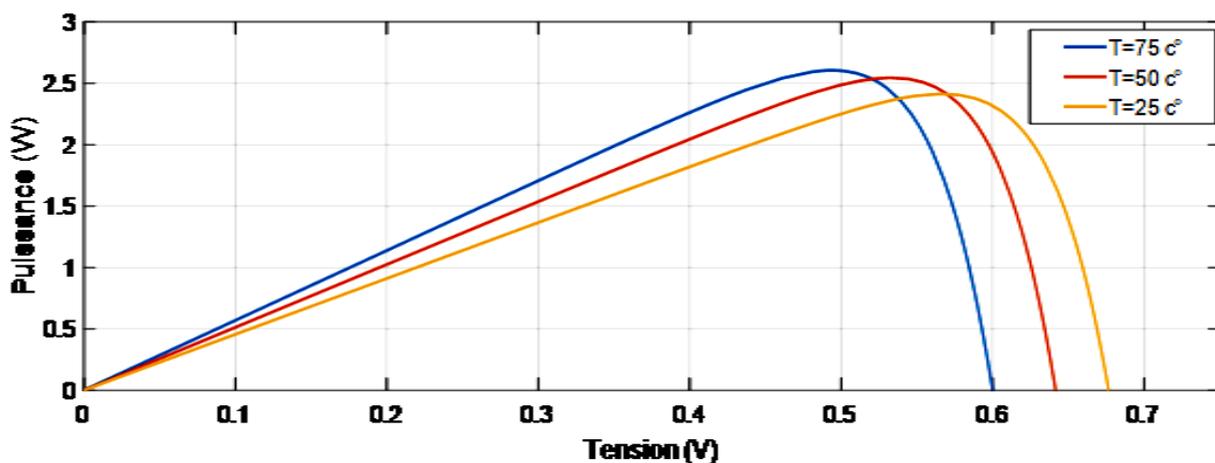


Fig.I.8 :Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension

On remarque que La puissance maximale diminue avec l'accroissement de la température comme le montre la fig. I.18. Par contre la fig. I.17, montre que l'augmentation

de la température implique une diminution importante de la tension de circuit ouvert, alors que le courant de court-circuit augmente légèrement. D'où la température influe sur la tension de circuit ouvert.

### I.2.4. Caractéristique générateur photovoltaïque (GPV)

#### I.2.4.1. Influence de l'éclairement

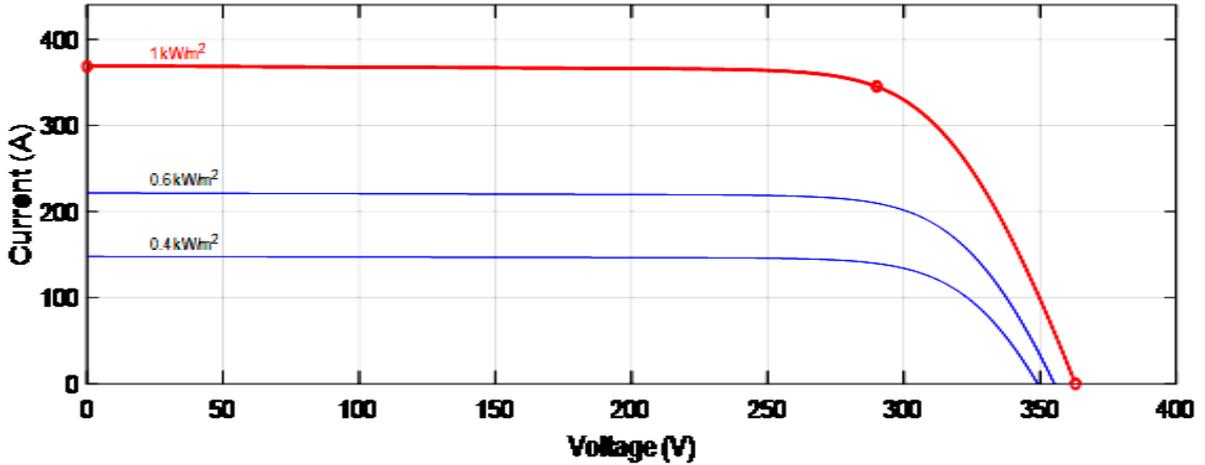


Fig.I.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque

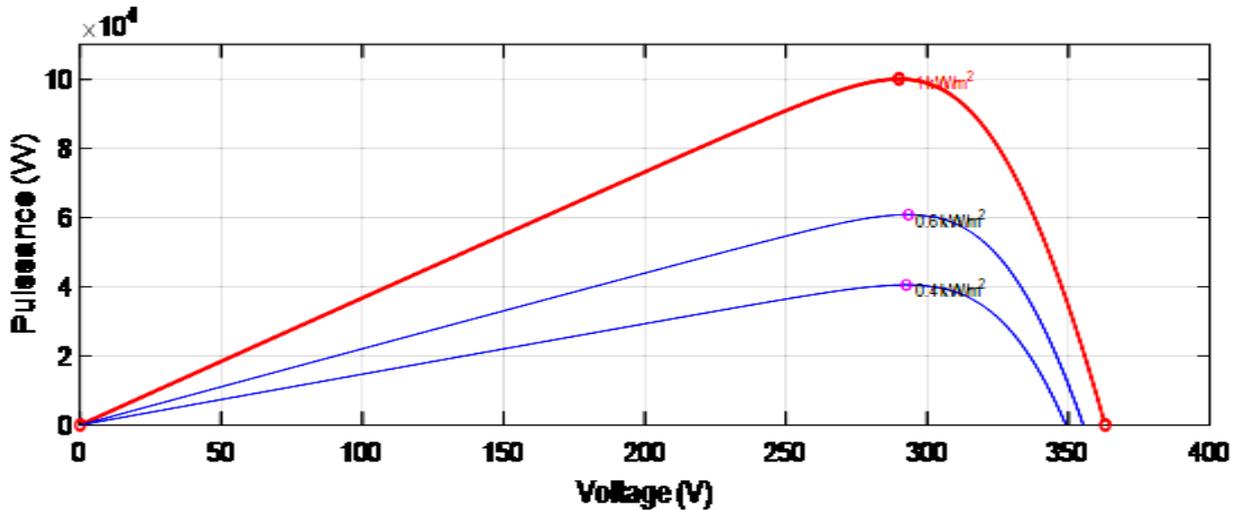


Fig.I.10 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un générateur photovoltaïque

D'après les différentes caractéristiques représentées à les fig. I.9 et I.10, on remarque que la tension  $V_{max}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très

peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{\max}$  qui augmente fortement avec ce dernier.

### 1.2.4.2. Influence de la température

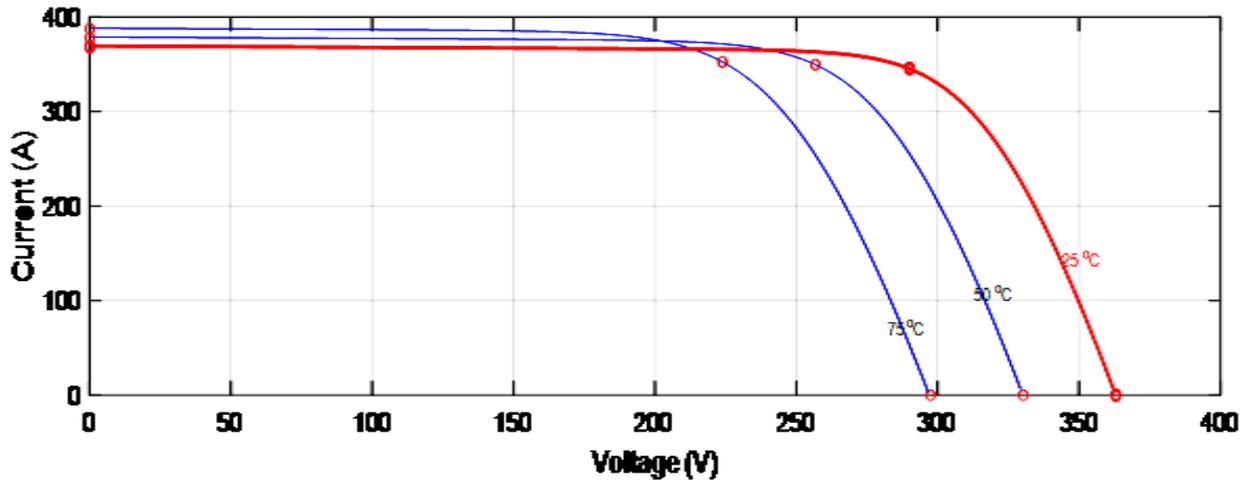


Fig.I.11 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque

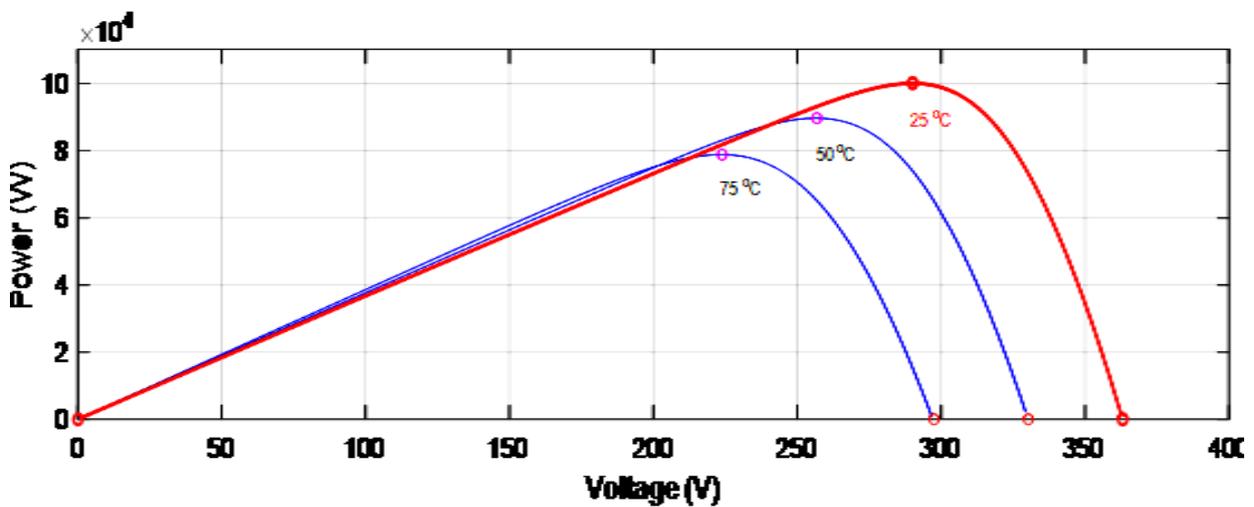


Fig.I.12 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension d'un générateur photovoltaïque

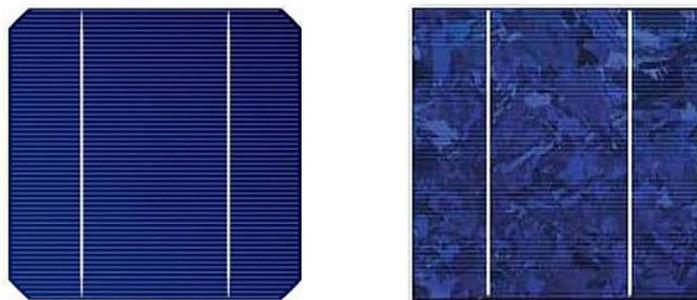
D'après les différentes caractéristiques de variation de température représentées à les fig I.11et I.12, on voit que la température influe sur la tension  $V_{\max}$ . En effet, cette dernière change beaucoup contrairement au courant qui varie très légèrement

### **I.3. Différents technologies des cellules photovoltaïques**

Le matériau de base, utilisé dans la fabrication des cellules PV, est dans la plupart des cas le silicium. Cette technologie présente plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multi-cristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP). Le choix parmi ces différentes technologies dépend du prix et du rendement énergétique [3].

#### **I.3.1. Cellule cristallines**

C'est la filière dominante. L'élément du silicium est le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, il a l'avantage de pouvoir être produit à partir d'une ressource naturelle quasi inépuisable, la silice, un composant de granit, des sables et des grès [3].



**Fig.I.13** : Cellules du silicium monocristallin et poly cristallin [19]

Il a été étudié pendant plus de 30 ans afin d'en améliorer le rendement, la première cellule solaire au silicium a été fabriquée en 1954 aux laboratoires Bell aux Etats-Unis avec un rendement de 6% [18]. Cette filière à base de silicium cristallin comprend le monocristallin et le poly cristallin.

##### **I.3.1.1. Cellule monocristallin**

Les cellules monocristallines font partie de la première génération de photopiles. Elles ont un taux de rendement excellent de 24,7% en laboratoire (record obtenu en 1999). SimPower commercialise une cellule de même nature avec un bon rendement qui peut atteindre 24,2%. Cependant, leur méthode de production est laborieuse et difficile, et donc, très chère. Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur [19].

### I.3.1.2. Cellule poly cristallin

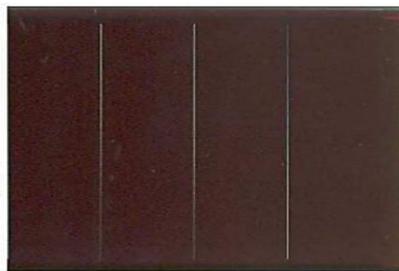
Les cellules poly cristallines ont un coût de production moins élevé, et utilisant un procédé moins gourmand en énergie, avec un rendement de 11 à 15% (19,8% en laboratoire) [19].

### I.3.2. Cellule a couche mince

Les principales filières couches minces sont le Silicium amorphe utilisé depuis de longues années, dans les montres et calculatrices notamment, le CdTe (hétéro jonction Cadmium Telluride, Sulfure de Cadmium), le CIS (hétéro jonction de diséléne cuivre indium/ sulfure de cadmium) [19].

#### I.3.2.1. Silicium amorphe

Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement avec un rendement plus bas 5 à 8% (13% en laboratoire). Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0,3 à 1,0 micromillimètres seulement (500  $\mu$  mm pour les deux autres types). Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement. Cependant, ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffusée et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées [19].



**Fig.I.14 :** Cellules du silicium amorphe en couche mince

### I.4. Classification d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes PV peuvent être autonomes ou connectés aux réseaux publics, comme on peut rajouter aux GPV d'autres sources, par exemple éoliennes et/ou groupes électrogènes pour éviter le surdimensionnement des panneaux et des batteries. Dans ce cas, le système PV est devenu système hybride. En dehors des applications spatiales à l'origine du

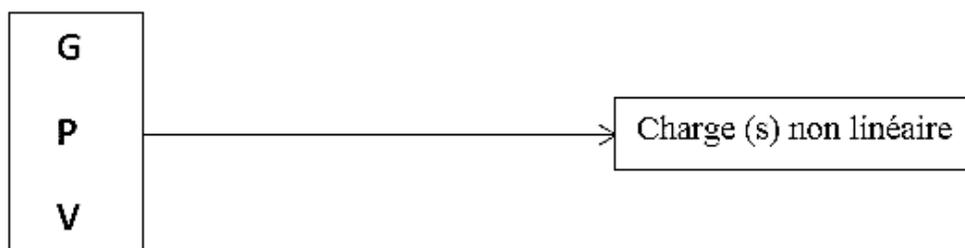
développement des techniques PV et des applications en électronique (alimentation de calculatrice, de montres...), on trouve deux grandes familles d'applications :

-Les générateurs autonomes pour l'alimentation en électricité de bâtiments ou d'installations isolées du réseau de distribution (habitat, relais hertzien, pompage, balisage en mer, électrification rurale des pays sous-développés...) ont des puissances généralement moins de 100 kWc.

-Les centrales PV connectées au réseau (en très fort développement dans les pays industrialisés) ont atteint plus de 300 MWc en janvier 2014 [3].

### I.4.1. Système autonome

Dans le cas d'installations autonomes, les systèmes PV fonctionnent indépendamment des réseaux électriques. L'énergie produite par les panneaux solaires PV est utilisée immédiatement (pompage d'eau, ventilation, ...etc.) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. La configuration la plus simple des systèmes autonomes est le couplage direct où le GPV est directement connecté à la charge continue Fig I.15. Dans cette connexion, la charge ne peut être opérationnelle que pendant les périodes d'ensoleillement suffisant. Ce qui est faisable pour des applications qui n'ont pas besoin de fonctionner la nuit ou dans l'obscurité comme le pompage de l'eau.



**Fig.I.15** :Couplage directe d'une charge non lineaire

Pour des applications qui ont besoin de l'énergie électrique même la nuit et lors des moments d'obscurité, un système de stockage peut être ajouté au système. L'énergie produite par le dispositif solaire est emmagasinée dans l'accumulateur d'énergie en vue d'être utilisée au moment du manque de l'éclaircissement.

Deux architectures plus courantes des systèmes PV autonomes avec stockage d'énergie alimentant à la fois des charges DC et AC. La seule différence entre les deux réside dans le

fait que la sortie du GPV est connectée à un convertisseur DC/AC pour la première, et à un convertisseur DC/DC pour la seconde [3].

### I.4.2. Systeme hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité [20].

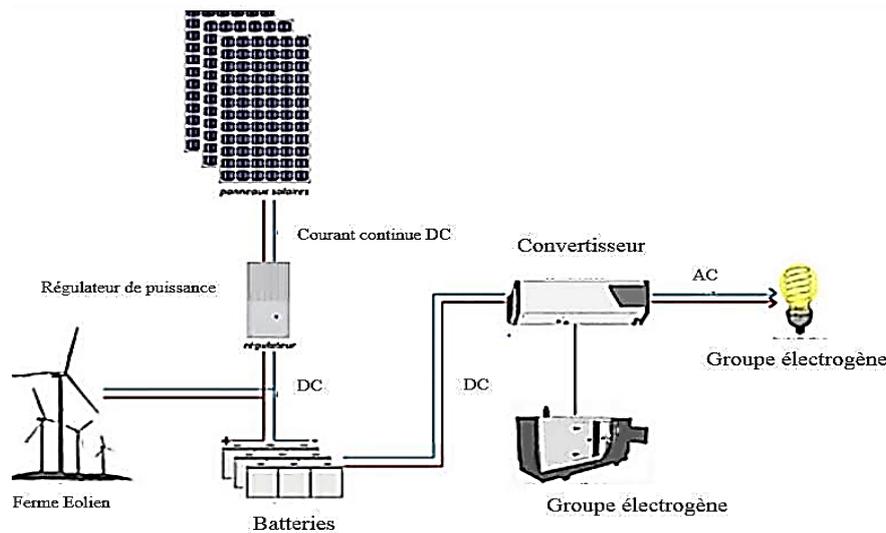


Fig.I.16 : Structure d'un système hybride

### I.4.3. Systeme PV raccordé au réseau électrique

Dans cette catégorie, trois types de systèmes sont généralement rencontrés dans les applications PV.

Fig I.17, Fig I.18 et Fig I.19 montre un exemple typique de grande centrales PV qui ont pour objectif la fourniture d'électricité en haute (50 à 400 kV) ou en moyenne tension (3 à 50 kV) aux réseaux électriques (Grid dans la littérature Anglo-Saxonne). La totalité de l'énergie produite sera vendue et les charges sur place seront alimentées par le réseau public [3].

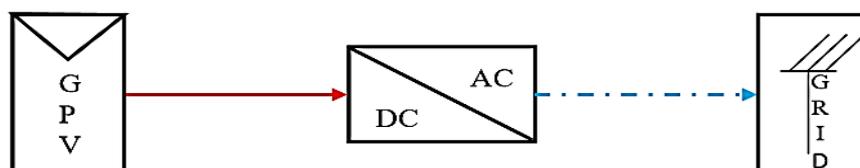


Fig.I.17 :Gpv raccordé au réseau électrique avec un étage de conversion DC-AC

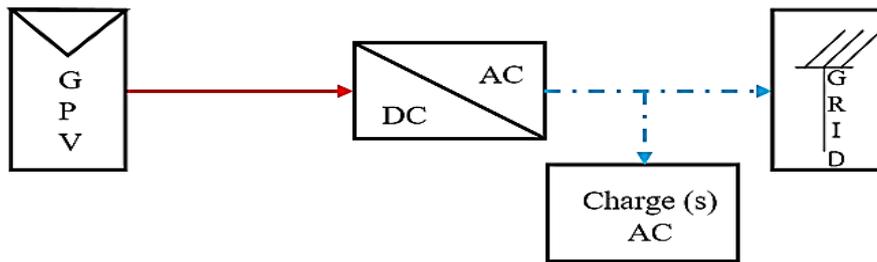


Fig.I.18 :Gpv raccordé au réseau électrique avec un étage de conversion DC-AC avec charge

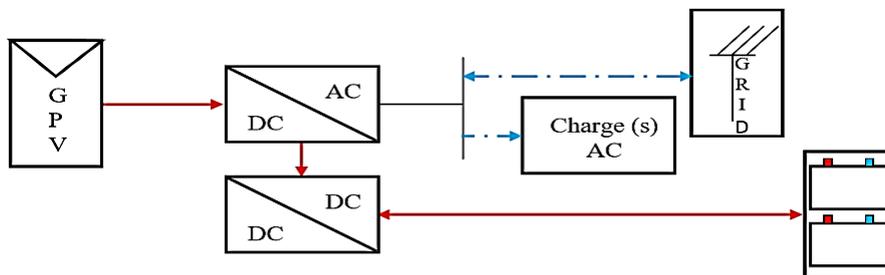


Fig.I.19 : Gpv raccordé au réseau électrique a deux étages de conversion production et consommation

## I.5. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe [22].

### I.5.1. Qualité de la tension électrique

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie [22].

#### I.5.1.1. Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie.

Habituellement l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante.

Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations [22]:

Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

### **I.5.1.2. Fréquence**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays [22].

### **I.5.1.3. Forme d'onde**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50 Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non périodiques (bruits) [22].

### **I.5.1.4. Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pourcent).

Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension [22].

### I.5.2. Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale [22].

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce mémoire, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension [22].

## I.6. Réduction de la pollution harmonique (compensation des harmoniques)

### I.6.1. Absorption sinusoïdale

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire. Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée PWM (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés [22].

### I.6.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire [22].

### I.6.3. Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [22].

### I.6.4. Filtres passifs d'harmoniques

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur est faible à la fréquence à filtrer et élevée à la fréquence fondamentale du réseau [23]. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné. Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, alors les éléments passifs sont choisis de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence  $5 \times$  la fréquence fondamentale, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus élevée à la fréquence fondamentale que l'illustre la Fig I.20.

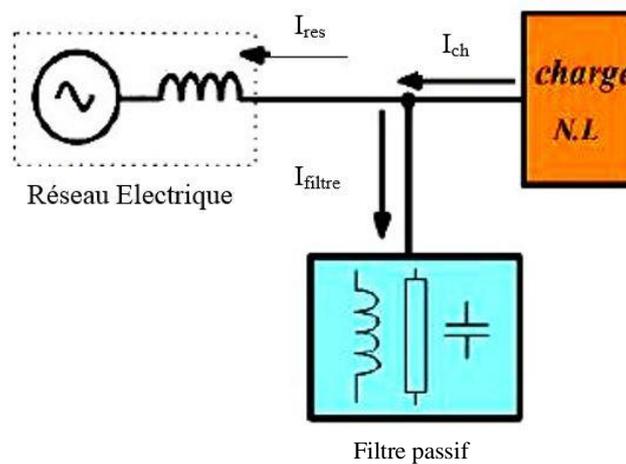


Fig.I.20 : Raccordement d'un filtre passif

Equation des courants :

$$i_c = i_{\text{filtre}} + i_{h5} + i_{h7} + i_{h11} + \dots \quad (\text{I.11})$$

$$I_{\text{filtre}} = i_{h5} \quad (\text{I.12})$$

$$i_c = i_{\text{filtre}} + i_{h7} + i_{h11} + \dots \quad (\text{I.13})$$

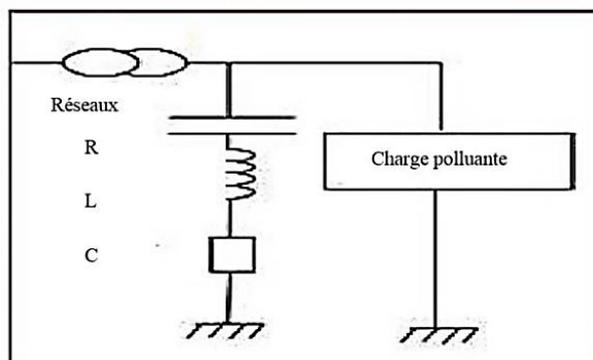
Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs [23].

- Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite plusieurs filtres.
- Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence de réseau électrique
- Equipements volumineux.

#### **I.6.4.1 Filtre passif résonant**

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la Fig I.30 son impédance équivalente est [23].

$$Z_{eq}(w) = (1 - LCw^2 + jRCw) / (jCw) \quad (\text{I.14})$$



**Fig.I.21 : Structure du filtre passif résonant**

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtre, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmonique d'ordre supérieurs, c'est pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haute pur toutes les harmoniques au de la de 11<sup>eme</sup>

#### I.6.4.2. Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constituer d'une inductance en parallèle avec une résistance le tout en série avec un condensateur comme décrit sur a Fig I.31 Son impédance équivalente est

$$Z_{eq}(w) = (1 - LCw^2 + j(L/R)w) / ((L/R)Cw^2 + jCw) \quad (I.15)$$

Ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de h=13) [23].

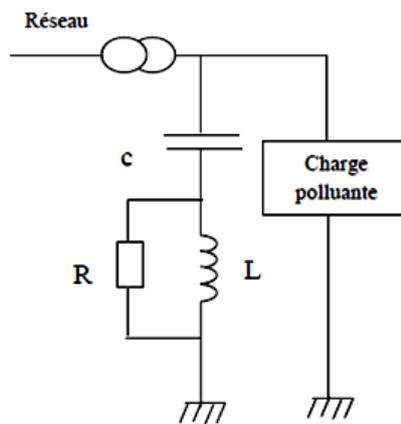
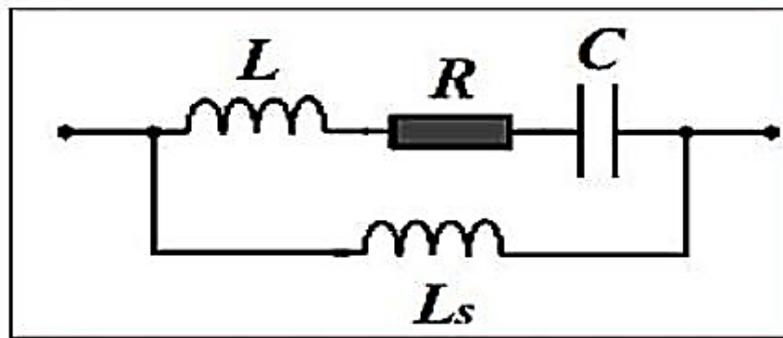


Fig.I.22 : Structure de filtre passif amorti

#### I.6.4.3. Phénomène de l'antirésonance

Le phénomène de l'antirésonance FigI.23 se rencontre dans les réseaux électriques quel que soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonant est

$$Z_{eq}(w) = jLsw (1 - LCw^2 + jRCw) / (1 - (L-Ls)Cw^2 + jRCw) \quad (I.16)$$



**Fig.I.23** : Structure de filtre passif parallèle anti-résonant

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent [2].

#### I.6.5. Filtres actif d'harmoniques

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants Semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (A. P. F) [23].

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser.

Nous citerons configurations possibles des filtres actifs [23].

- Le filtre actif parallèle (FAP): conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

- Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

- La combinaison parallèle série actif (UPQC): solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants

- Le volume physique du filtre est plus réduit.
- La capacité de filtrage est supérieure.
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

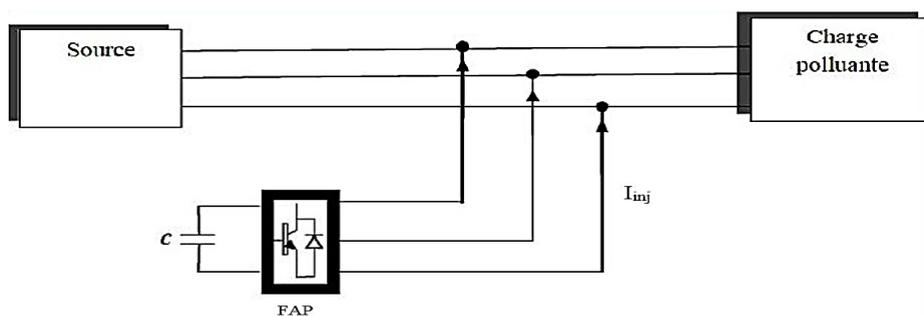
Pourtant, ils présentent quelques inconvénients.

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

### I.6.5.1. Filtre actif parallèle

Est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution

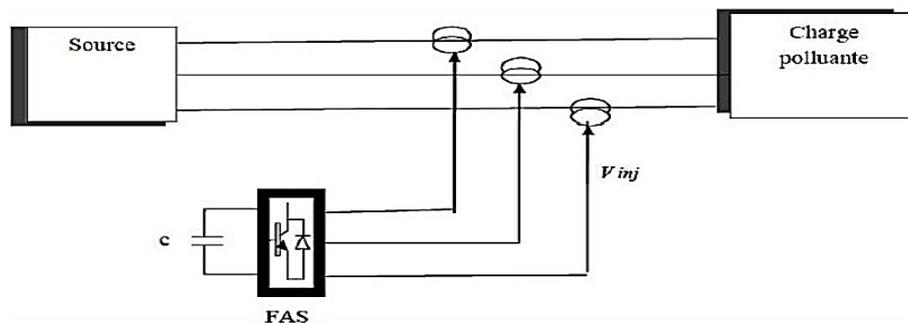
Fig (I.13).Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques  $I_{inj}$  égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau  $I_s$  soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension [23].



**Fig.I.24** : Montage du filtre actif parallèle

### I.6.5.2. Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau le montré la Fig I.25. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [23].



**Fig.I.25 :** Montage de filtre active

### I.6.5.3. Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série Fig I.35. Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais "Unified Power Quality Conditionner"(UPQC)[23].

Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci-dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices ; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

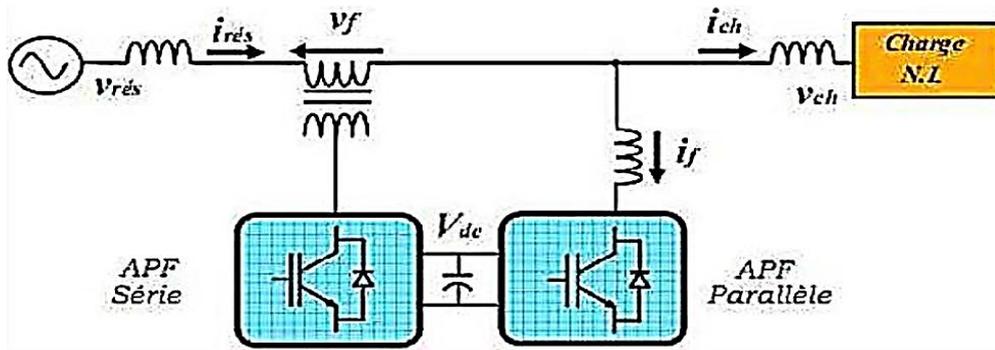


Fig.I.26 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

### I.6.6. Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride Fig I.36est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence [23].

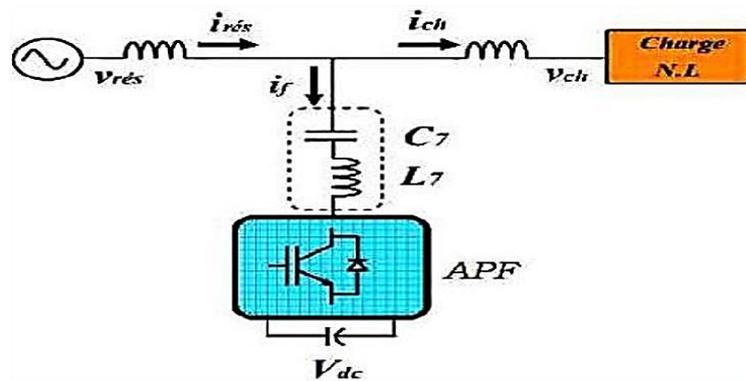


Fig.I.27 : Filtre actif hybride

## I.7. Filtre triphasé LCL

### I.7.1. Modélisation de filtre LCL

On représente le filtre du troisième ordre ( $L_{f1}, L_{f2}, C_f$ ), Supposant que  $R_1, R_2$  sont respectivement les résistances séries des inductances  $L_{f1}, L_{f2}$ . puisque la résistance de la résistance série de la capacité  $C_f$  est supposée nulle.

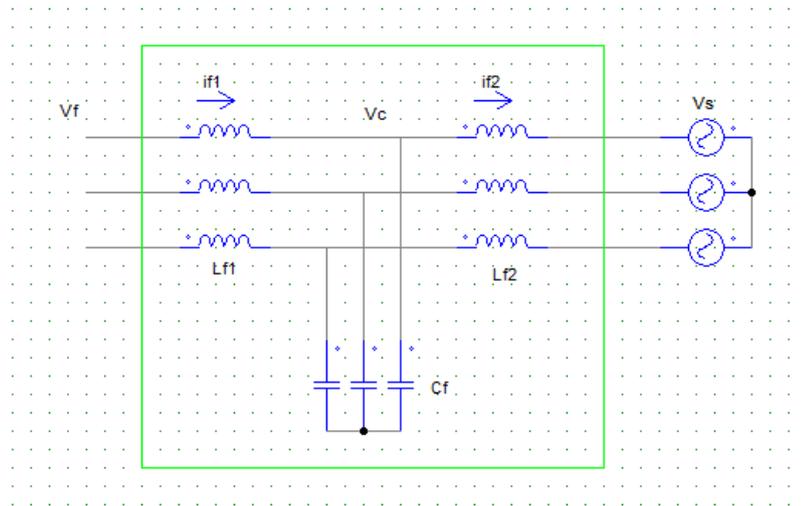


Fig.I.28 :Filtre du troisième ordre

A partir de la figure nous pouvons écrire les équations différentielles du filtre LCL, dans le repère ( $\alpha\beta$ ), suivante :

$$\frac{d}{dt} i_{f1}^{\rightarrow\alpha\beta} = -\frac{R_1}{L_{f1}} i_{f1}^{\rightarrow\alpha\beta} + \frac{1}{L_{f1}} (V_f^{\rightarrow\alpha\beta} - V_c^{\rightarrow\alpha\beta}) \quad (I.17)$$

$$\frac{d}{dt} V_c^{\rightarrow\alpha\beta} = \frac{1}{C_f} (i_{f1}^{\rightarrow\alpha\beta} - i_{f2}^{\rightarrow\alpha\beta}) \quad (I.18)$$

$$\frac{d}{dt} i_{f2}^{\rightarrow\alpha\beta} = -\frac{R_2}{L_{f2}} i_{f2}^{\rightarrow\alpha\beta} + \frac{1}{L_{f2}} (V_c^{\rightarrow\alpha\beta} - V_s^{\rightarrow\alpha\beta}) \quad (I.19)$$

Le filtre LCL est utilisé pour interconnecter l'onduleur au réseau. Comme l'onduleur est basé sur des composants de commutations et des signaux de déclenchement sous forme d'impulsions, Le courant de sortie peut contenir des perturbations d'harmoniques importantes avec tendance à réduire la qualité de l'énergie [16].

Calcul des composants du filtre LCL (voir l'annexe 2)

### I.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement et les différents types d'une cellule photovoltaïque, ainsi que la caractéristique I(V) non linéaire du panneau et l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Ensuite les classifications d'un système solaire photovoltaïque.

On a rappelé le concept qualité de l'énergie électrique et on a donné les définitions des principales perturbations affectant le réseau comme les creux de tension, les harmoniques et le non symétrie (déséquilibre). Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application : de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire même à la mise en danger des personnes. Une idée sur les filtres de compensation a été donnée.

Nous allons maintenant nous intéresser à la poursuite de point maximum de puissance maximale par un convertisseur DC-DC.

### II.1.Introduction

Pour qu'un module photovoltaïque fournisse sa puissance maximale disponible, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation peut être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite MPPT «Maximum Power Point Tracking».

Plusieurs dispositifs nécessitent l'énergie alternative, donc pour l'alimenter par un générateur photovoltaïque il faut utiliser un convertisseur DC-AC. Il y a plusieurs commandes et le but de ces commandes est d'avoir un signal sinusoïdal.

### II.2.Convertisseur de puissance de système photovoltaïque

#### II.2.1.Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire

##### II.2.1.1.Hacheur dévolteur (Buck)

Le convertisseur DC/DC abaisseur, montré dans la Fig II.1, convertit la tension de la source  $V_s$  en une tension plus basse  $V_0$  [24].

Ce convertisseur est constitué d'un commutateur S, de la diode D, qui protège S, et du filtre inductif L. ( $V_s : V_{source}$  et  $V_0 : V_{out}$ ).

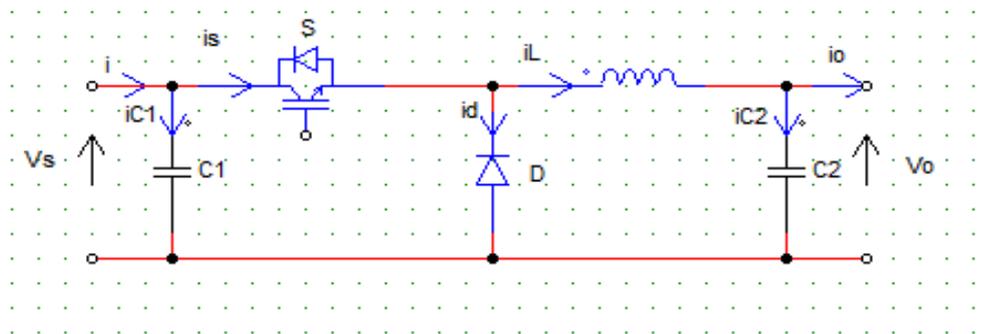


Fig.II.1 : Circuit électrique de hacheur abaisseur

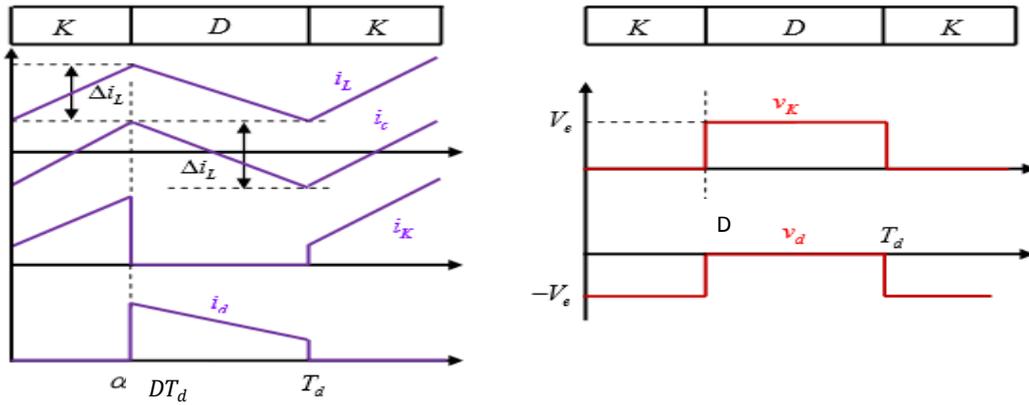


Fig.II.2 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck [4].

Le rapport de conversion du hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = D \quad (\text{II.1})$$

D : le rapport cyclique de commutation

Le rapport de conversion  $M(D)$  varie proportionnellement avec D.

### I.2.1.2.Hacheur survolteur(Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. 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 K 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) [25] (Fig. II.3).

Il s'agit du montage Boost bien connu sous le nom d'élévateur de tension abaisseur de courant.

Le schéma de principe d'un hacheur Boost est donné par la Fig. II.3.

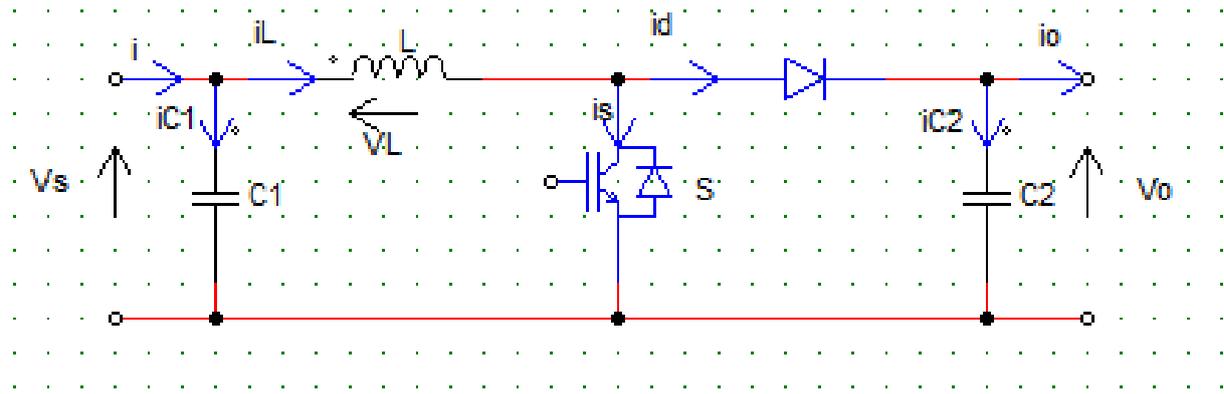


Fig.II.3 :Convertisseur BOOST.

### Principe de fonctionnement

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Le principe de base de fonctionnement du hacheur survolteur se résume en deux états distincts Fig II.4

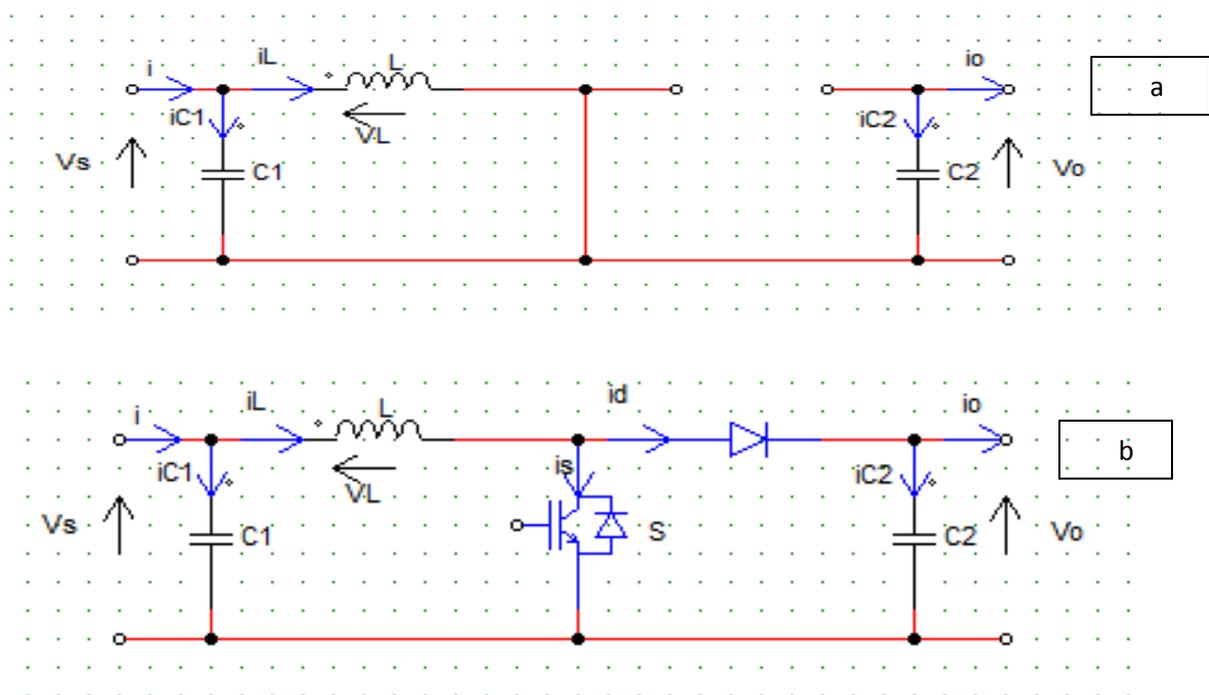


Fig.II.4 :Schéma d'un principe de fonctionnement d'un hacheur Boost

Lorsque le transistor **S** est à l'état fermé et la diode est polarisée en inverse pour  $t \in [0, DT_d]$  (position 1). Le courant dans l'inductance ( $L, r$ ) augmente et l'énergie sera stockée dans l'inductance. Pendant cet intervalle de temps on a :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Lorsque le transistor **S** est à l'état ouvert pour  $t \in [DT_d, T_d]$  (position 2): le courant continue à traverser l'inductance à travers la diode **D**, **L** libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge .on obtient l'ensemble suivant d'équations :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

A partir des équations (1) et (2), on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_s)DT_s = (V_0 - V_s) * (1 - D) * T_s \quad (\text{II.4})$$

### **Nature du hacheur Boost**

$$\langle V_L \rangle_T = 0V \Leftrightarrow \left[ \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt \right] = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT_d} V_L dt + \int_{DT_d}^T V_L dt \right] = 0 \quad (\text{II.6})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT_d} V_s dt + \int_{DT_d}^T (V_s - V_0) dt \right] = 0 \quad (\text{II.7})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T} [V_s(DT_d - 0) + (V_s - V_0)(T - DT_d)] = 0 \quad (\text{II.8})$$

Simplification :

$$\Rightarrow V_s D + (V_s - V_0)(1 - D) = 0 \quad (\text{II.9})$$

D'où

$$V_s - V_0(1 - D) = 0 \quad (\text{II.10})$$

Le rapport de conversion  $M(D)$  :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{II.11})$$

Finalement, on obtient la relation suivante :

$$V_0 = \frac{V_s}{1-D} \quad (\text{II.12})$$

Grâce à cette dernière expression (5), on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1). Théoriquement elle peut être infinie lorsque  $D$  se rapproche de 1. C'est pour cela on parle de survolteur. [15]

Si on néglige les pertes de commutation des interrupteurs, on peut écrire :

$$P_s = P_0 = i_s \cdot v_s = i_0 \cdot v_0 \quad (\text{II.13})$$

Ce qui conduit à :

$$i_0 = (1 - D) \cdot i_s \quad (\text{II.14})$$

Cette expression montre que le hacheur boost est abaisseur en courant.

### **Formes d'ondes des principaux signaux**

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à la fig.II.5

A partir de ces formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes des courants qui traversent la diode et l'interrupteur .

Nous pouvons également en déduire les ondulations en tension et courant. Ces relations seront utilisées

Lors du dimensionnement des différents composants de la structure.

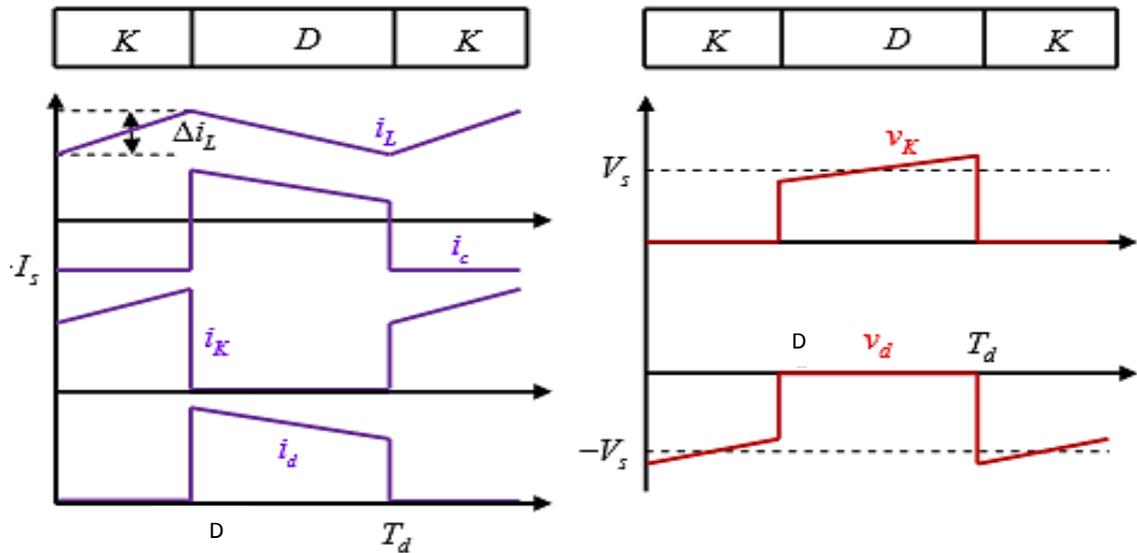


Fig.II.5 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [4]

### Dimensionnement des composants de le hacheur Boost

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source  $V_s$ . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

### Calcul de l'inductance L

Calculons l'ondulation du courant :

$0 < t < DT_d$ :

$$V_L = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = V_s \quad (\text{II.15})$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$I_L(t) = \frac{V_s}{L} \cdot t + I_{L-min} \quad (\text{II.16})$$

En  $t=DT_d$ :

$$I_L(DT_d) = \frac{V_s}{L} \cdot (DT_d) + I_{L-min} = I_{L-max} \quad (\text{II.17})$$

$$\Delta I_L = I_{L-max} - I_{L-min} = \frac{V_s}{L f_p} \cdot D \quad (\text{II.18})$$

Or:

$$V_0 = \frac{V_s}{1-D} \quad (\text{II.19})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta I_L = \frac{D(1-D)}{L f_p} \cdot V_0 \quad (\text{II.20})$$

Ou :

$V_s$ : La tension aux bornes du générateur(V) ;  $V_0$ : Tension de sortie du convertisseur(V).

T : période de découpage du signal de l'interrupteur  $T = \frac{1}{f_p}$  en secondes (s) ;

$I_{L-min}$  : Courant minimum dans l'inductance(A)

$I_{L-max}$  : Courant maximum dans l'inductance(A)

$\Delta I_L$ : Ondulation de courant dans l'inductance(A)

L: Valeur de l'inductance de lissage (H);D: Rapport cyclique du signal de l'interrupteur

$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$

L'ondulation est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaitée

L'ondulation maximale de courant est donc donnée par :

$$\Delta I_{max} = \frac{V_0}{4 \cdot L \cdot f_p} \quad (\text{II.21})$$

Ainsi l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$L = \frac{V_0}{4 \cdot f_p \cdot \Delta I_{-max}} \quad (\text{II.22})$$

### Calcul du condensateur $C_1$ et $C_2$

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension  $\Delta V_0$  on fait l'hypothèse que le courant  $i_0$  est parfaitement constant. Durant la première séquence, on a la relation suivante :

$$i_{c2} = C_2 \cdot \frac{dv_0}{dt} = -i_0 \quad (\text{II.23})$$

La résolution de cette équation différentielle donne :

$$v_0(t) = \frac{-i_0}{C_2} t + v_{0-max} \quad (\text{II.24})$$

A  $t = DT_d$ , on a :

$$v_0(DT_d) = \frac{-i_0}{C_2} (DT_d) + v_{0-max} = v_{0-min} \quad (\text{II.25})$$

Par suite, on a :

$$\Delta v_0 = \frac{D \cdot i_0}{C_2 \cdot f_p} = \frac{D(1-D) i_s}{C_1 \cdot f_p} \quad (\text{II.26})$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation  $f_p$  ou la valeur du condensateur  $C_2$  augmente.

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée  $C_1$  est donnée par :

$$C_1 = \frac{i_s}{2 \cdot \Delta v_s \cdot f_p} \quad (\text{II.27})$$

Le dimensionnement du condensateur  $C_2$ , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'équation suivante :

$$C_2 = \frac{i_s}{4 \cdot \Delta v_0 \cdot f_p} \quad (\text{II.28})$$

Simulation du hacheur parallèle (Boostconverter)

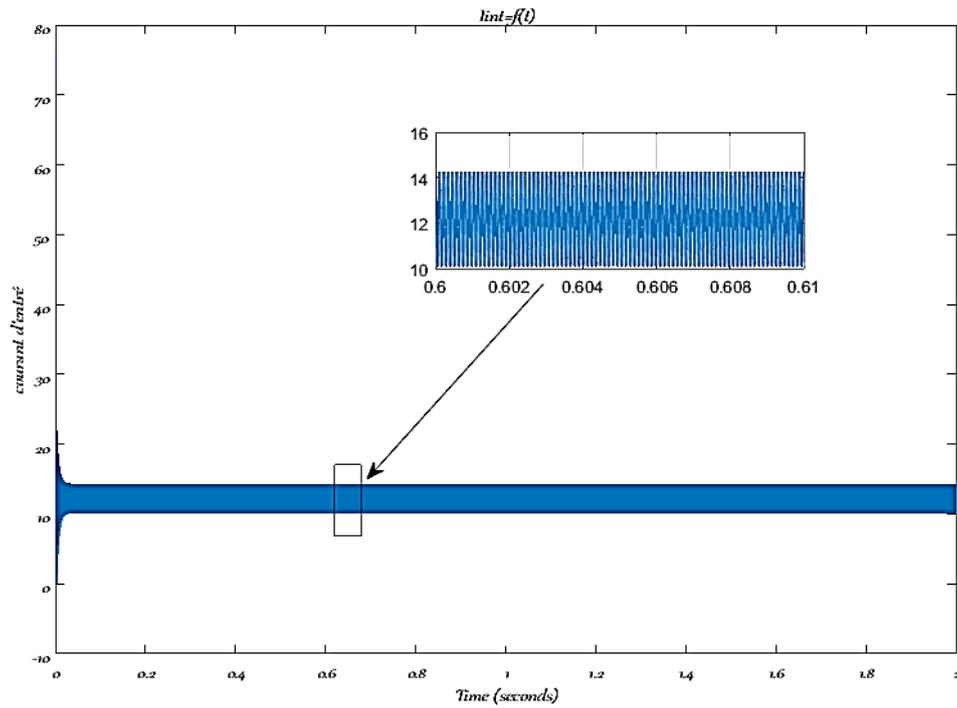


Fig.II.6 : Courant d'entrée du convertisseur Boost.

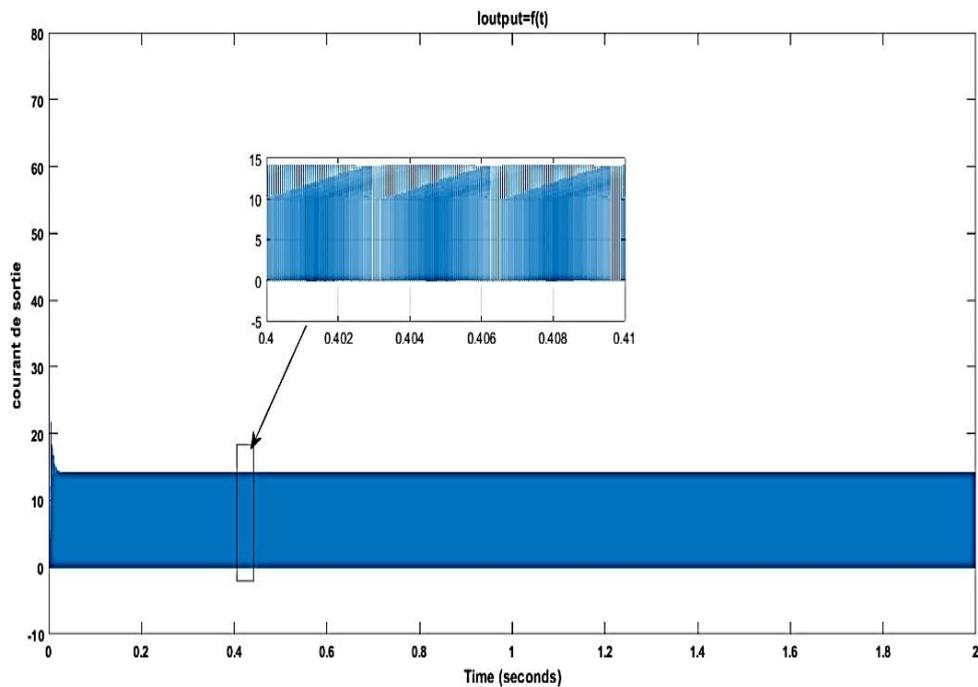


Fig.II.7 : Courant de sortie du convertisseur Boost.

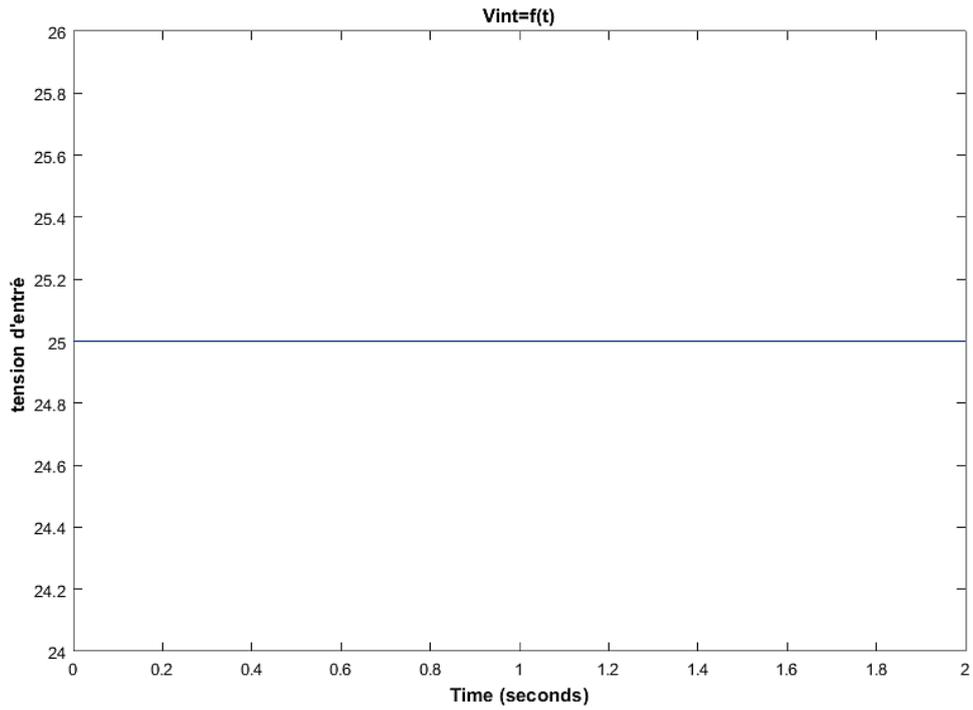


Fig II.8 Tension d'entrée du convertisseur Boost

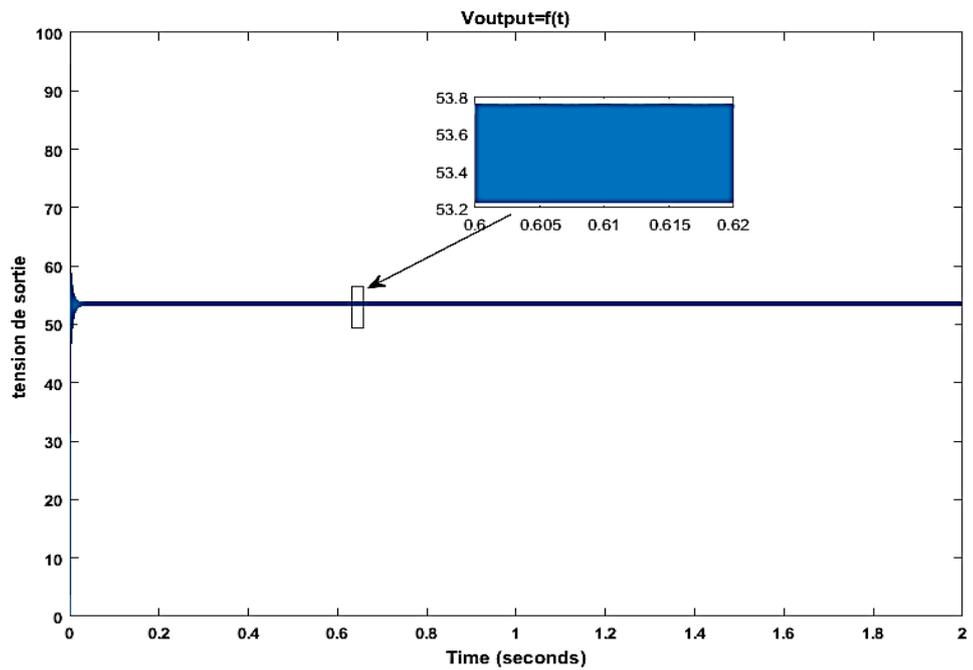
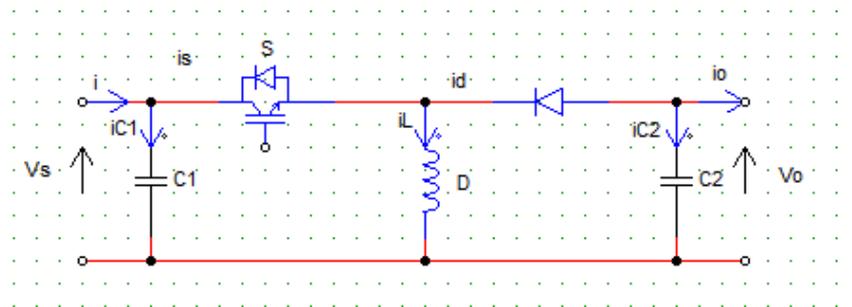


Fig.II.9 :Tension de sortie du convertisseur Boost.

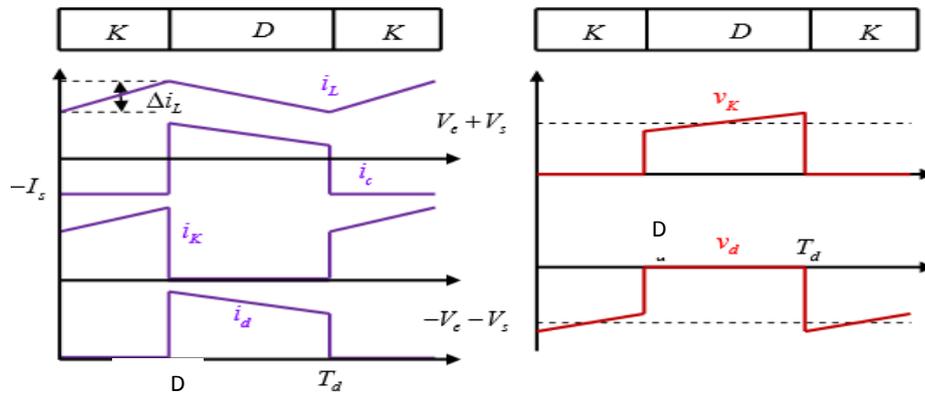
On remarque que la tension de sortie ne pas la même que l'entrée ce qui exprime le rôle de convertisseur élévateur (Boost).

**I.2.1.3.Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)**

Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée continue à n'importe quelle tension de sortie continue désirée [26] Fig.II.10.



**Fig.II.10** :Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost



**Fig.II.11** : Tensions et courants du convertisseur Buck-Boost [4].

Le rapport de conversion :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = \frac{D}{1-D} \tag{II.29}$$

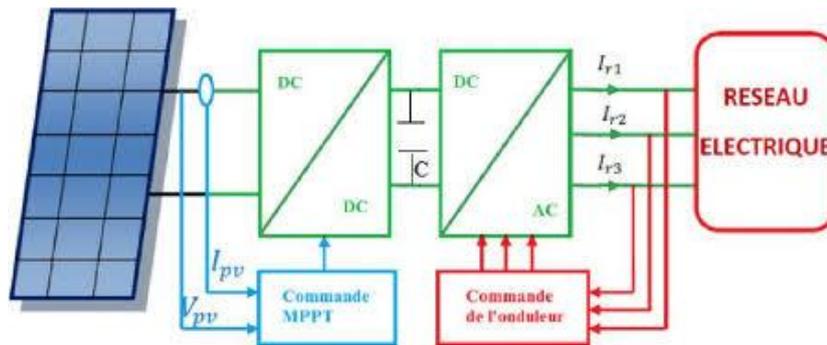
### **II.3. Commande MPTT des convertisseurs DC/DC**

#### **II.3.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC/DC**

La Fig II.12 présente le schéma d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (*DC-DC*) entre le (*GPV*) et la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (*MPPT*) (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le (*PPM*) que peut fournir un module solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche (*MPPT*) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes (*MPPT*) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (*PPM*) selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Les commandes (*MPPT*) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe (P&O).

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes des commandes extrêmes présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du (*PPM*). Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie [27].



**Fig.II.12** :Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC)contrôlé par une commande (PPM)sur charge DC

### II.3.2.Méthode poursuite de MPPT

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [25]. Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV. La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs  $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$  [25].

#### II.3.2.1.Méthodes à contre réaction de tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence.

Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la Fig. II.13 [28].

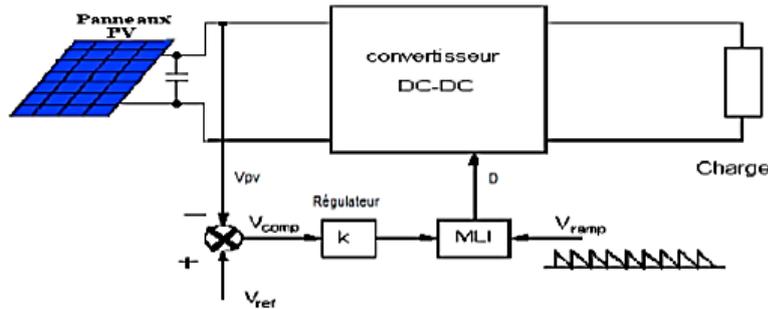


Fig.II.13 :Méthode avec contre-réaction de tension et modulation [28].

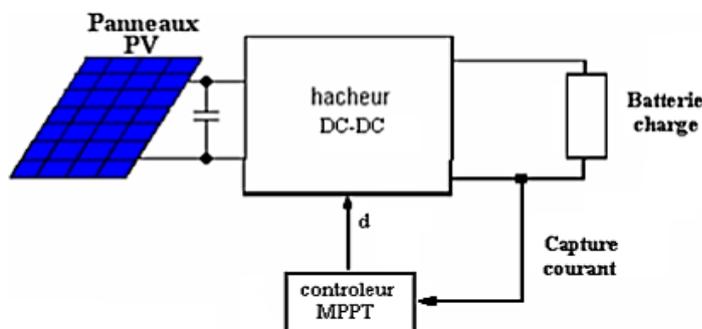
Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du module
- Méthode MPPT avec cellule pilote

### II.3.2.2.Méthode avec contre réaction du courant

Dans toutes les méthodes (*MPPT*) présentées jusqu'ici, une mesure de ( $I_{PV}$ ) et ( $V_{PV}$ ) a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (*MPPT*) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [29].

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

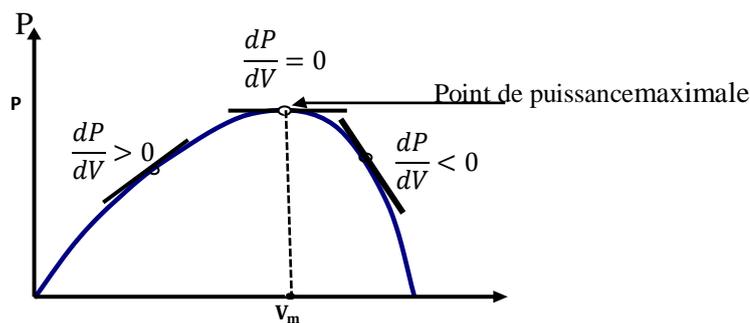


FigII.14 :Méthode de la contre réaction en courant [28].

### II.3.2.3.Méthode à contre réaction de puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance PV obtenue directement de la caractéristique ( $G_{PV}$ ).Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport a la tension s'annule,c'est -à-dire, lorsque ( $\frac{dP}{dV} = 0$ )[30].

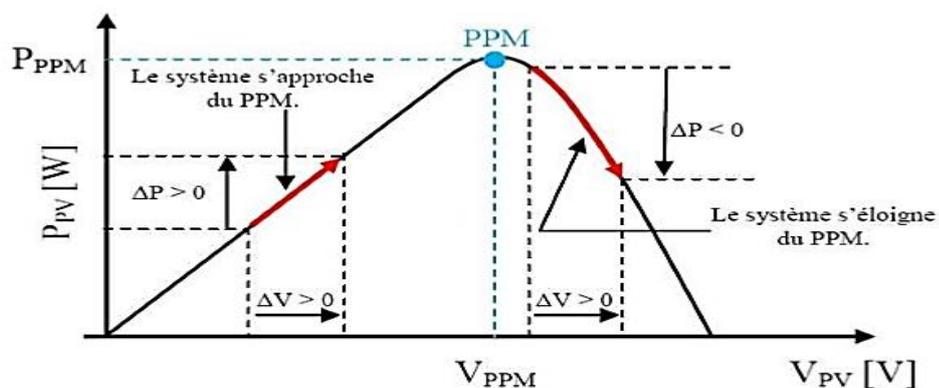
Le point de puissance maximale (PPM) est donné par la Fig II.15 :



**Fig.II.15 :**Caractéristique du point de puissance maximale MPP [30]

#### II.3.2.3.1.Algorithme Perturber et Observer, ‘P&O’

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k, puis on la compare à la précédente de l'instant (k-1). Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, ‘PMP’ et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, ‘PMP’. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [32].



**Fig.II.16 :**Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O [33].

On résume la Fig II.16 dans quatre cas à savoir [34] :

**Premier cas :  $\Delta P_{pv} > 0$  et  $\Delta V_{pv} > 0$**

Dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; en plus  $\Delta V_{pv}$  est positive, on est donc dans la bonne direction. Pour la prochaine itération, on augmente la tension du champ photovoltaïque. Ceci peut être réalisé par une diminution du rapport cyclique. Soit donc :  $\alpha(k) = \alpha(k-1) - \Delta\alpha$ .

**Deuxième cas :  $\Delta P_{pv} > 0$  et  $\Delta V_{pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; en plus  $\Delta V_{pv}$  est négative, la recherche du MPP se fait dans la bonne direction.

On va donc pour la prochaine itération continuer à diminuer la tension (donc à augmenter le rapport cyclique). Soit donc :  $\alpha(k) = \alpha(k-1) + \Delta\alpha$ .

**Troisième cas :  $\Delta P_{pv} < 0$  et  $\Delta V_{pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et comme  $\Delta V_{pv}$  est négative on se dirige dans le mauvais sens.

Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens de la recherche en augmentant la tension

Soit donc :  $\alpha(k) = \alpha(k-1) - \Delta\alpha$ .

**Quatrième cas :  $\Delta P_{pv} < 0$  et  $\Delta V_{pv} > 0$**

Le point de fonctionnement actuel est à droite du MPP ; en plus  $\Delta V_{pv}$  est positive, la recherche se fait donc dans la mauvaise direction. Pour la prochaine itération, on va diminuer la tension (donc augmenter le rapport cyclique). Soit donc,  $\alpha(k) = \alpha(k-1) + \Delta\alpha$ .

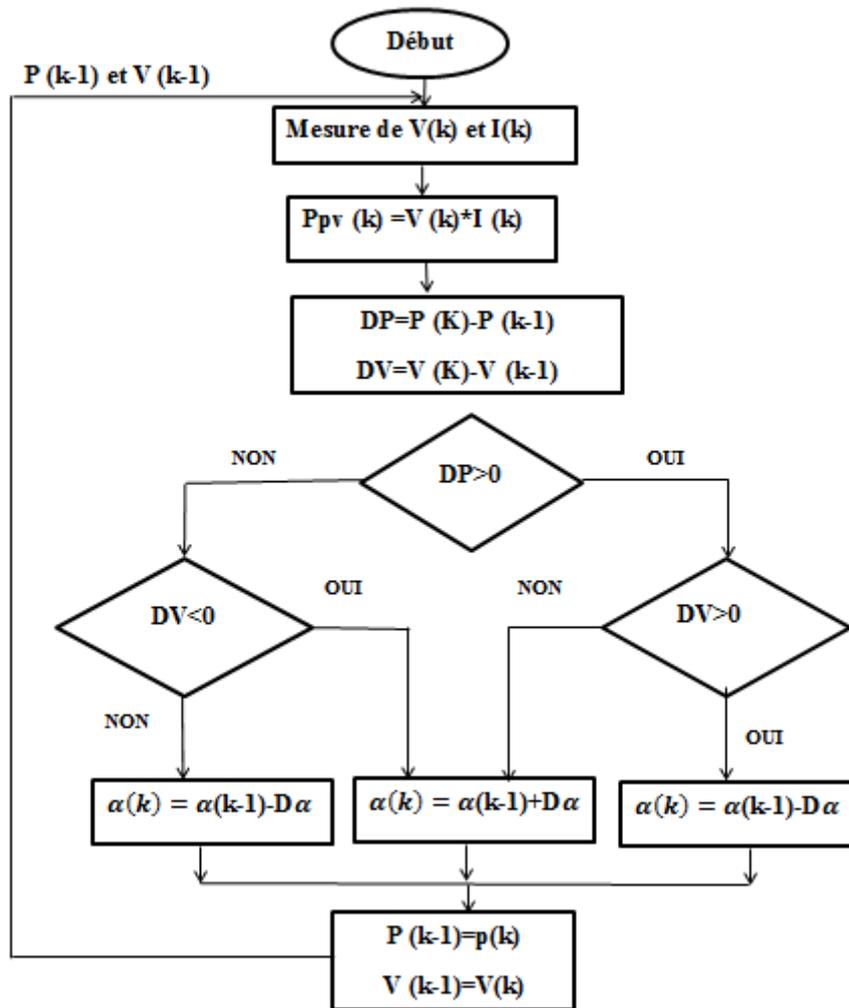


Fig.II.17 : Organigramme de l’algorithme perturbation et observation [34].

### II.3.2.3.2.Algorithme Incrément de la conductance ‘IC’

L’algorithme de l’incrément de conductance (IC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour la mesure de la tension V de fonctionnement et du courant I du module PV. Cette méthode repose sur le fait que la dérivée de la puissance P de sortie par rapport à la tension V du module PV est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP). Donc on a l’ensemble d’équations suivant [24].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (II.30)$$

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (II.31)$$

Selon l'algorithme IC représenté sur la Fig II.18, la fonction centrale utilise les conditions suivantes afin d'atteindre le MPP :

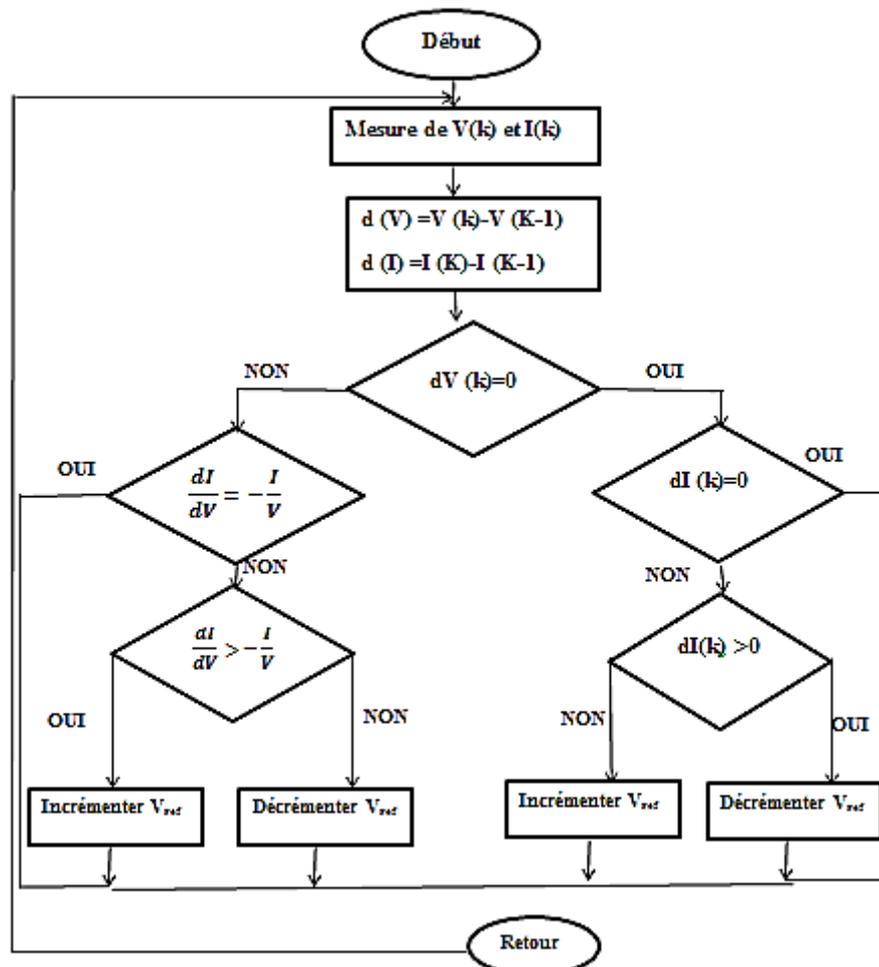
$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ pour } V = V_{mp} \tag{II.32}$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ pour } V < V_{mp} \tag{II.33}$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ Pour } V > V_{mp} \tag{II.34}$$

$V_{mp}$  : La tension correspondant au MPP.

Si l'équation (II.34) est vérifiée, donc le système PV a atteint le MPP et aucun changement de la tension de fonctionnement n'est nécessaire, sinon la tension de fonctionnement est modifiée en conséquence.



**Fig.II.18** : Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance [31]

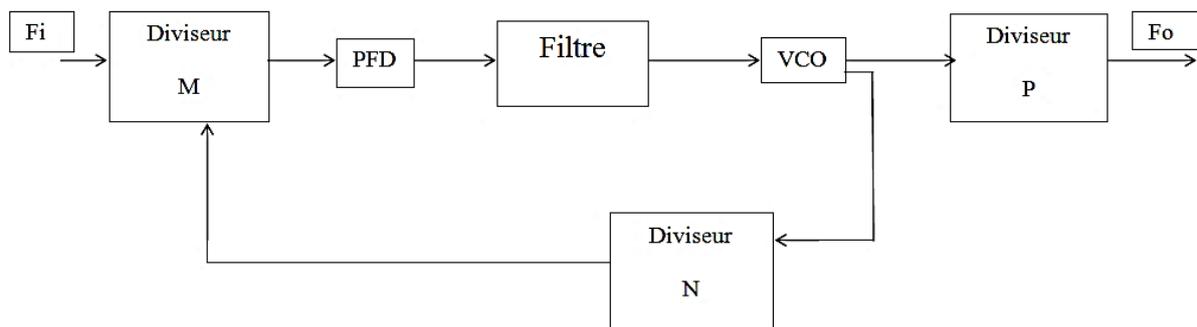
### II.3.3. Technique de synchronisation avec le réseau électrique PLL

#### II.3.3.1. Principe de fonctionnement

La synchronisation de système PV avec le réseau électrique revient à l'identification précise des propriétés de la tension de grille, qui sont l'amplitude, le déphasage et la fréquence de la composante fondamentale de la tension, afin d'ajuster l'oscillateur interne du contrôleur de l'onduleur selon la dynamique oscillatoire imposée par le réseau.

Parmi les techniques proposées dans la littérature, il y a la boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop (PLL)) qui est une technique de synchronisation très efficace à mettre en œuvre dans les onduleurs de puissance raccordés à un réseau qui peut subir des perturbations transitoires [24].

La PLL permet d'asservir la phase et la fréquence instantanée de sortie sur celles d'entrée. Selon la Fig.II.18, la PLL se compose principalement des blocs suivants :



**Fig.II.19** : Structure de la PLL

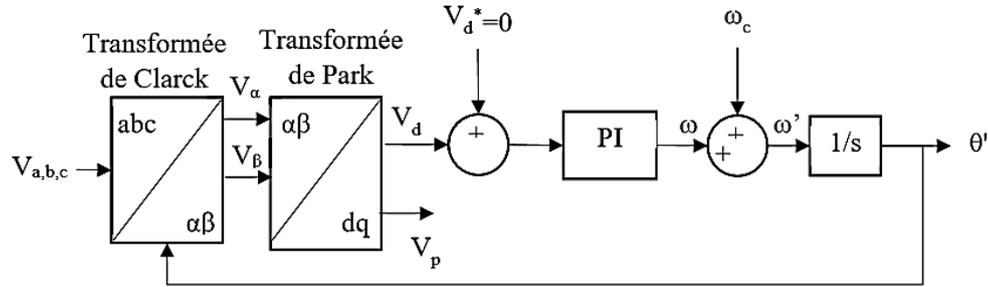
La relation entre la fréquence d'entrée  $F_i$  et la fréquence de sortie  $F_o$  de la PLL est donnée par:

$$F_o = F_i \frac{N}{M.P} \quad (\text{II.35})$$

N : Rang de division de la fréquence de sortie du VCO qui représente le pas de fréquence.

M : Rang de division de la fréquence d'entrée «  $F_i$  » pour avoir le pas ; « P » : Rang de division de la sortie du VCO pour avoir «  $F_o$  ».

Dans notre étude, nous nous intéressons à la PLL triphasée qui utilise une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La Fig.II.20 montre le fonctionnement de ce type de PLL qui asservit la phase.



**Fig.II.20** : Schéma de fonctionnement de la PLL.

Ainsi, on a le système d'eq. II.36 qui représente la tension triphasée dans le repère a b c. En utilisant la transformée de Clarck (TC) donnée par l'eq (II.37), on passe du système d'eq (II.36) à un système d'Eq (II.39) à deux phases ( $V_\alpha, V_\beta$ ). Ainsi on aura l'angle  $\theta$  qui permet desynchroniser le vecteur spatial de tension avec l'axe d ou q via la transformée de Park comme montrée dans la Fig. 3 [24].

$$\begin{cases} V_a = \hat{V} \cdot \cos(\omega t) \\ V_b = \hat{V} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = \hat{V} \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.36)$$

$$V_{\alpha\beta}(t) = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = TC(V_{abc}(t)) \quad (II.37)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

$$\begin{cases} \theta = \omega t - \frac{\pi}{2} \\ V_\alpha = -\frac{3}{2} \hat{V} \sin(\theta) \\ V_\beta = \frac{3}{2} \hat{V} \cos(\theta) \end{cases} \quad (II.39)$$

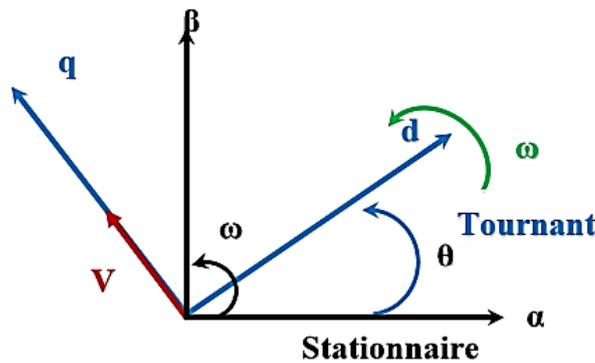
Selon l'eq. II.40, La composante d'axe d produite est ajustée à 0 en variant l'angle du repère de Park ( $\theta'$ ). En régime permanent, le vecteur spatial de tension est synchronisé avec

l'axe des q car  $\theta'$  calculée correspond à l'angle du réseau  $\theta$  [buck]. Ainsi on aura le système d'eq. (7) suivant :

$$\begin{bmatrix} V_d(t) \\ V_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha(t) \\ V_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$\begin{cases} V_d = -\frac{3}{2} \hat{V} \sin(\theta - \theta') \\ V_q = \frac{3}{2} \hat{V} \cos(\theta - \theta') \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

La PLL définit l'angle de phase  $\theta'$  qui correspond à la pulsation estimée  $\omega'$ . Cette pulsation est la somme de la sortie du régulateur PI et la fréquence d'action directe  $\omega_c$ . Selon la méthode de détection de passage de zéro utilisée dans ce cas, les gains de contrôleur sont conçus de sorte que le vecteur  $V_d$  suit la référence obtenue quand  $\omega'$  est verrouillée sur  $\omega$  et  $\theta' - \theta = 0$  [24].



**Fig.II.21** : Repère de référence.

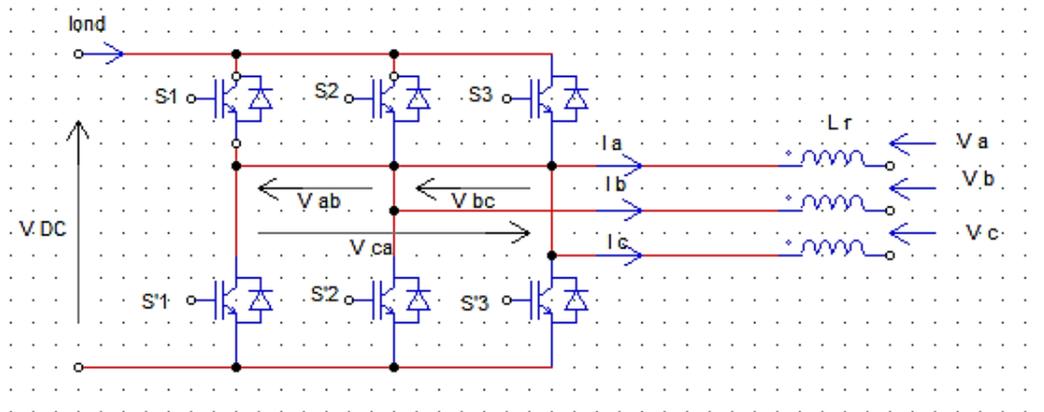
## II.4.Onduleurs

### II.4.1.Structure d'onduleur

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

Le rôle de l'onduleur triphasé est de faire transiter la puissance de la source PV vers le réseau. Il se compose en fait de trois bras de commutation, composés à leur tour de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor en antiparallèle [35]. En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension.

La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.



**Fig.II.22** :Schéma de l'onduleur triphasé

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F qui détermine ses états de conduction

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } S_1 \text{ passant et } S'_1 \text{ ouvert.} \\ 0 & \text{si } S'_1 \text{ passant et } S_1 \text{ ouvert.} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

$$F_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } S_2 \text{ passant et } S'_2 \text{ ouvert.} \\ 0 & \text{si } S'_2 \text{ passant et } S_2 \text{ ouvert.} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

$$F_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } S_3 \text{ passant et } S'_3 \text{ ouvert.} \\ 0 & \text{si } S'_3 \text{ passant et } S_3 \text{ ouvert.} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont liées aux fonctions de connexion F via les équations suivantes :

$$V_{ab} = V_{DC} (F_1 - F_2) \quad (\text{II.42})$$

$$V_{bc} = V_{DC} (F_2 - F_3) \quad (\text{II.43})$$

$$V_{ca} = V_{DC} (F_3 - F_1) \quad (\text{II.44})$$

Par voie conséquence les tensions simples  $V_a; V_b; V_c$  sont alors synthétisées ainsi [36] :

On a :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{DC} (F_1 - F_2) \\ V_{ca} = V_{DC} (F_3 - F_1) \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

$$\begin{cases} V_{ab} = V_a - V_b \\ V_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{II.47})$$

Alors :

$$V_{ab} - V_{ca} = V_{DC} (F_1 - F_2 - F_3) \quad (\text{II.48})$$

De l'équation (II.47) :

$$V_b = V_a - V_c \quad (\text{II.49})$$

Et on a aussi :

$$V_{ab} - V_{ca} = V_a - V_b - V_c + V_a \quad (\text{II.50})$$

II.49 dans II.50 :

$$V_{ab} - V_{ca} = 3V_a \quad (\text{II.51})$$

De II.48 et II.51 :

$$V_a = \frac{V_{DC}}{3} (2F_1 - F_2 - F_3) \quad (\text{II.52})$$

Même chose pour  $V_b; V_c$  :

$$V_b = \frac{V_{DC}}{3} (2F_2 - F_1 - F_3) \quad (\text{II.53})$$

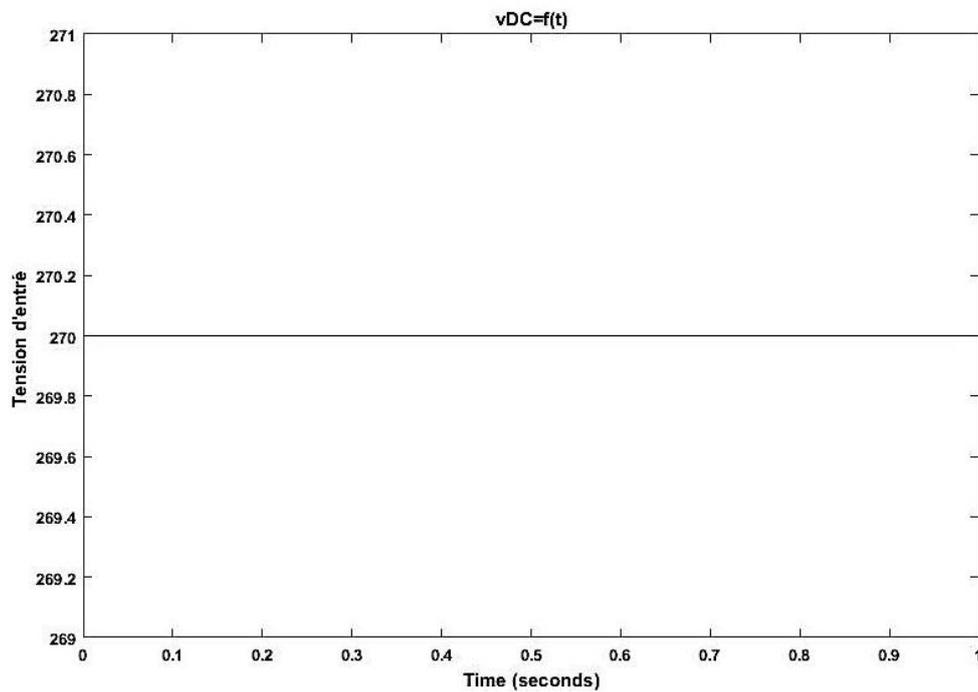
$$V_c = \frac{V_{DC}}{3} (2F_3 - F_1 - F_2) \quad (\text{II.54})$$

En définitif, l'équation matricielle suivante permet de modéliser l'onduleur de tension à deux niveaux:

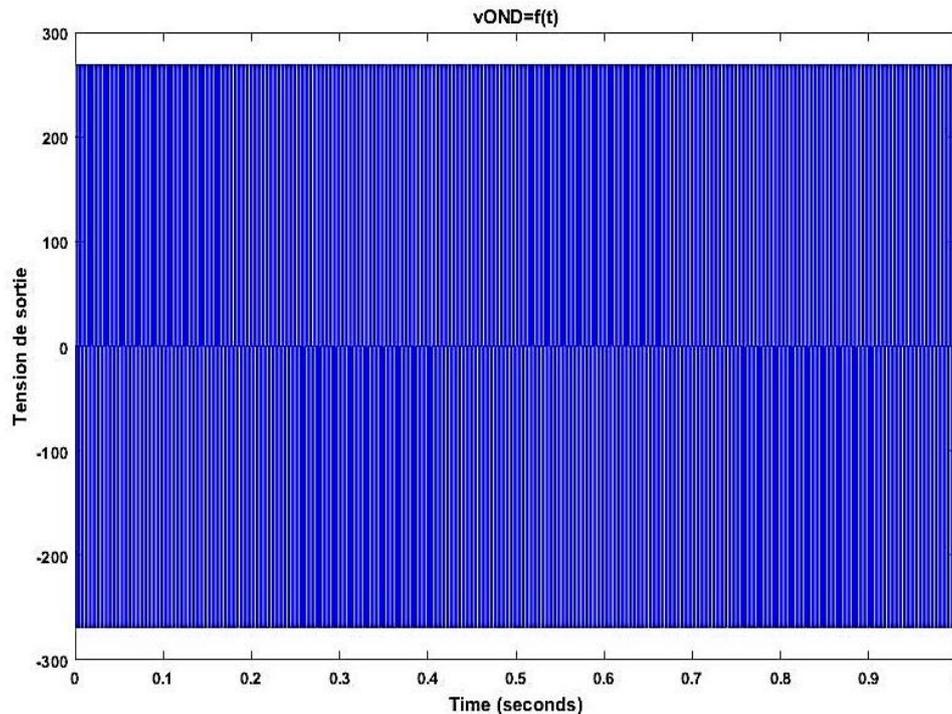
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

$$I_{ond} = F_1 I_a + F_2 I_b + F_3 I_c \quad (\text{II.56})$$

### Résultat de simulation



**Fig.II.23** Tension d'entrée de l'onduleur



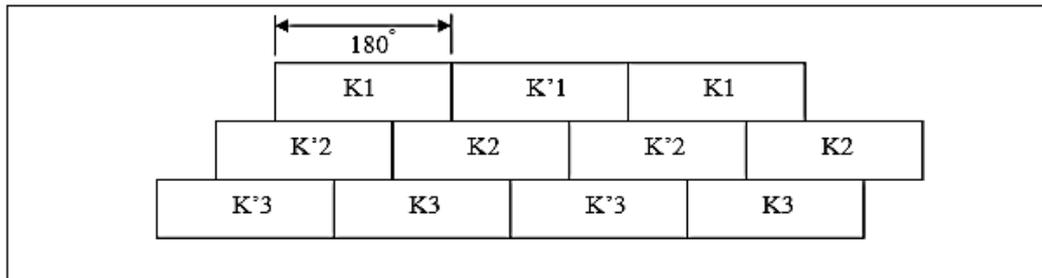
**Fig.II.24** : Tension de sortie de l'onduleur

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme la commande symétrique (adjacente) ou celle décalée (disjointe), la MLI.... Les différentes commandes ont pour but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie. Pour chaque commande, le principe de fonctionnement change.

### II.4.2.1. Commande plein d'onde (180°)

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°, Fig.II.25.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $\frac{3}{2}\pi$  et  $\frac{3}{4}\pi$  par rapport au premier bras [37].



**Fig.II.25 :** Commande 180°

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

#### **II.4.2.2. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant. La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau de la commande), en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau de puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées étant la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis. L'objectif de la MLI est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système, et par conséquent l'augmentation du rendement. Dans ce travail, parmi les techniques de modulation précitées, la technique MLI sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux Fig. II.26 [25].

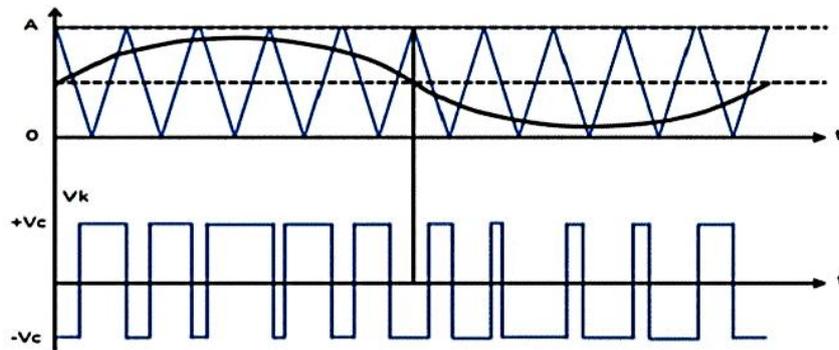


Fig.II.26 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire [25].

Le premier est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

Le second, qui est appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'amplitude  $V_{mod}$  :

$$V_{mod} = \frac{V_m}{V_p} \quad (II.57)$$

Où :

$V_p$  : est valeur de crête de la porteuse ;  $V_m$  est valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi, on peut agir sur l'indice de modulation  $m$  :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (II.58)$$

Où :

$f_p$  : Est la fréquence de la porteuse;  $f_m$  : est la fréquence de la modulante.

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) veut exactement :

$$V_{imax} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot V_{mod} \quad (II.59)$$

Où :

$V_{dc}$  : Est tension continue à l'entrée de l'onduleur.

### Résultat de simulation

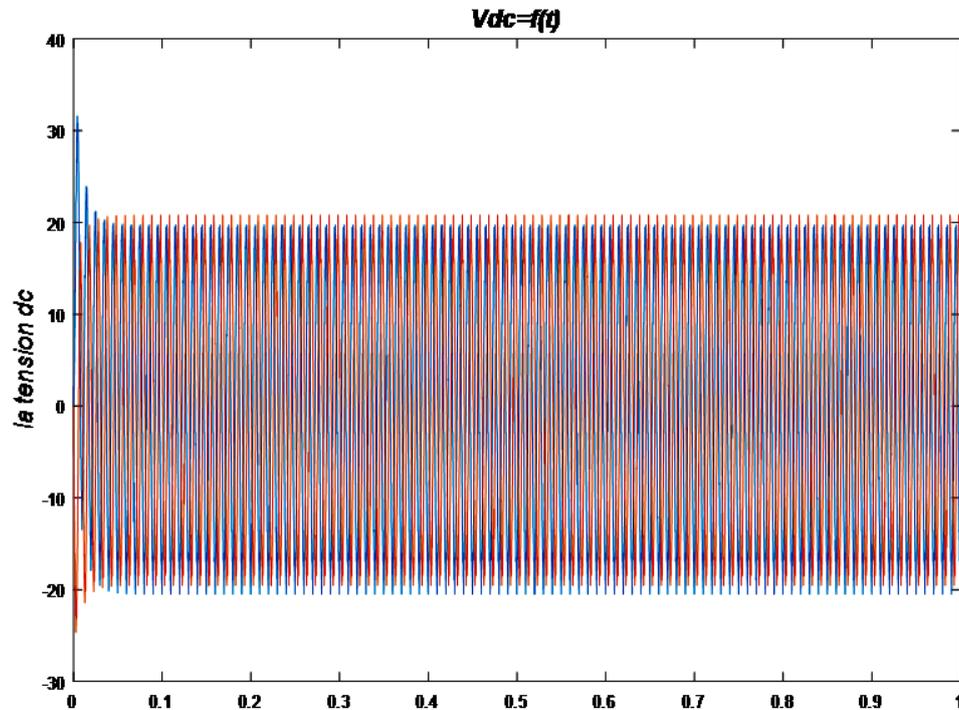


Fig.II.27 : Tension DC

### II.5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types des convertisseurs DC-DC utilisés dans le domaine de l'énergie PV. Nous avons montré théoriquement que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Ainsi les différentes techniques d'optimisation pour produire une puissance maximale et obtenir une efficacité maximale, On a donné aussi un aperçu théorique sur le fonctionnement d'un onduleur triphasé et leurs différentes techniques de commande.

### III.1.Introduction

Après avoir étudié et modéliser dans les chapitres précédents le générateur photovoltaïque et les convertisseurs DC/DC et DC/AC, on est emmené dans ce chapitre à la simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique de deux techniques différentes comme perturbe and observe (P&O) et inductance incrémentale (IC).

Nous présentons brièvement l'architecture de notre système photovoltaïque, Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur Boost et un Onduleur triphasé, une commande MPPT et une charge. Ainsi que les simulations ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

### III.2.Système photovoltaïque proposée

#### III.2.1 Description

La Fig III.1 illustre le schéma de la chaîne de conversion PV à étudier. Le système Photovoltaïque raccordée au réseau est composée essentiellement des éléments suivants:le générateur PV, le convertisseur DC/DC de type éleveur (Boost) qui a pour but de élever la tension. l'onduleur PV qui convertit l'énergie électrique continue en énergie alternative. Il est de type triphasé.

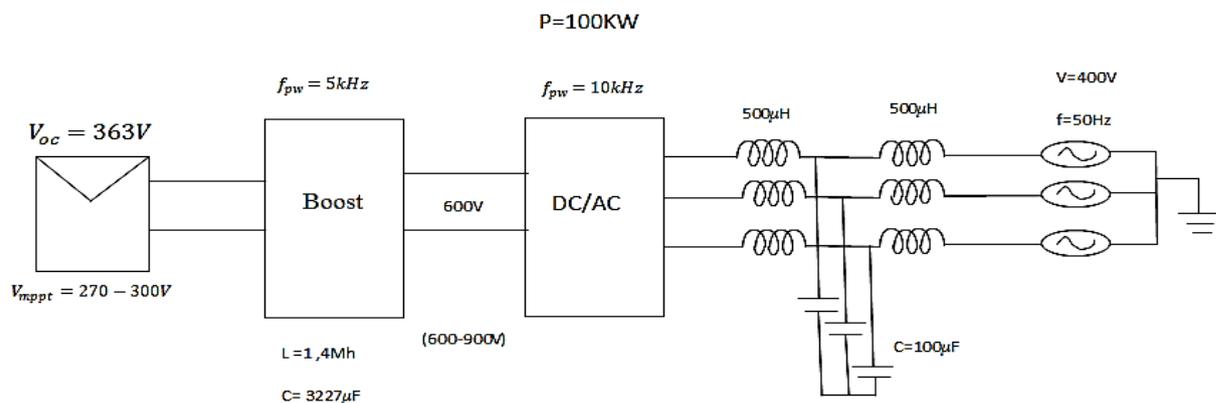


Fig.III.1 :Schéma descriptif de La chaîne de conversion PV

#### III.2.2 Description de commande

La conversion de l'énergie électrique soumise par le générateur photovoltaïque vers un réseau électrique basse tension 220v/380v stable nécessite une commande de l'énergie. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles de commande, comme la commande de puissance



### III.3. Simulation du générateur PV

#### III.3.1. Simulation du GPV base sur l'algorithme P&O à éclairement variable et température constante avec MLI-ST

##### III.3.1.1. Schéma de simulation

La Fig III.3 représente la chaîne de conversion complète avec le system d'électronique de puissance avec un algorithme d'extraction de maximum de puissance P&O avec variations de l'éclairement G.

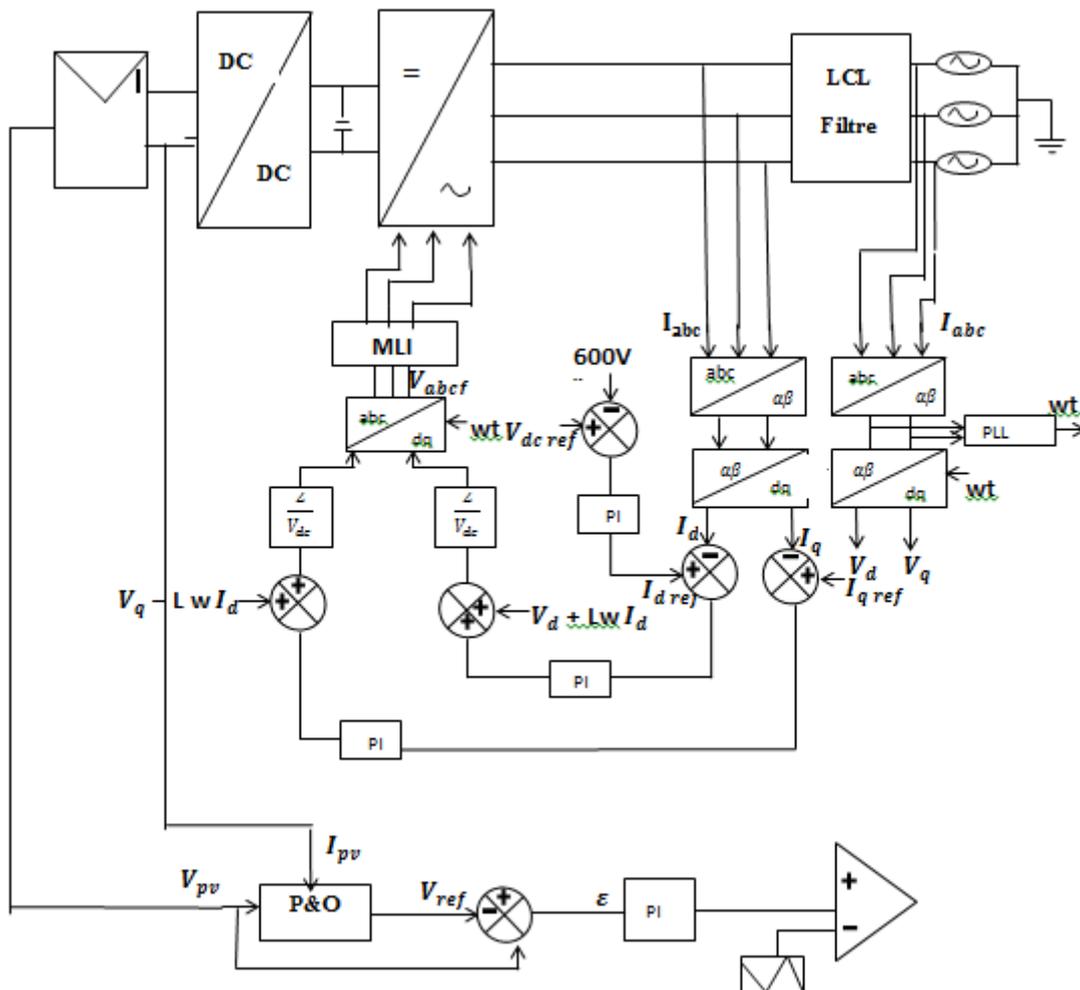


Fig.III.3 : Schéma de simulation du GPV base sur l'algorithme P&O à éclairement variable et a température constante avec MLI-ST

III.3.1.2. Résultat de simulation ( $V_{abc}, I_{abc}, I_{abcf}, V_{dc}, I_{irrad}, P, Q$ )

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT

«Perturbation and observation » représentent par les figures suivantes le courant d'irradiation, et le courant de sortie de l'onduleur avant et après le filtre. Ainsi que la tension de réseau, la tension de la capacité en fin la puissance active et réactive

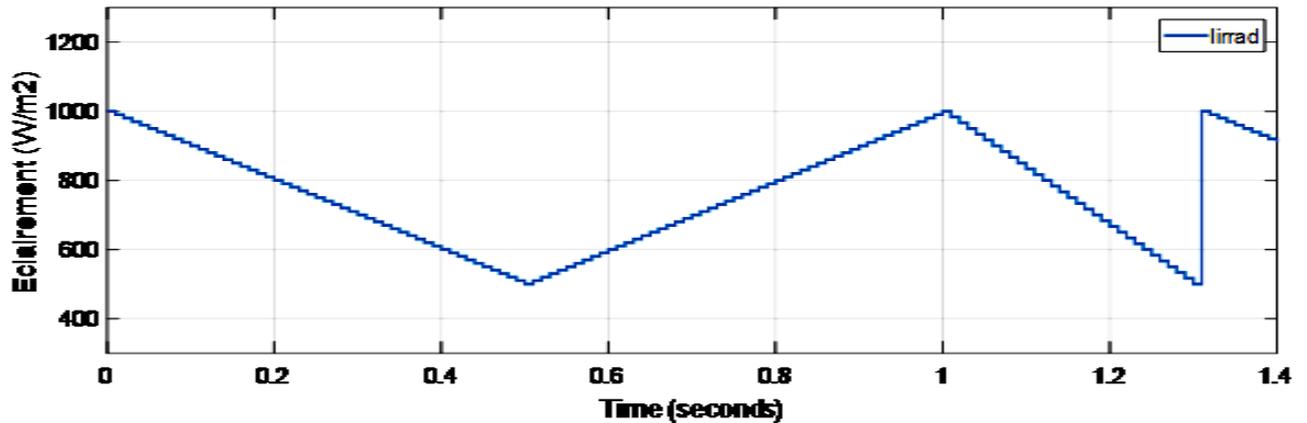


Fig.III.4 : Variations de l'éclairement

La Fig III.4 représente les variations de l'énergie d'entre qui est l'éclairement (G) ce qui donne que l'énergie atmosphérique n'est pas stable et variable dans a l'échelle de temps. La variation il est entre  $1000 \text{ W/m}^2$  et  $500 \text{ W/m}^2$  .Il est prête comme un exemple de simulation

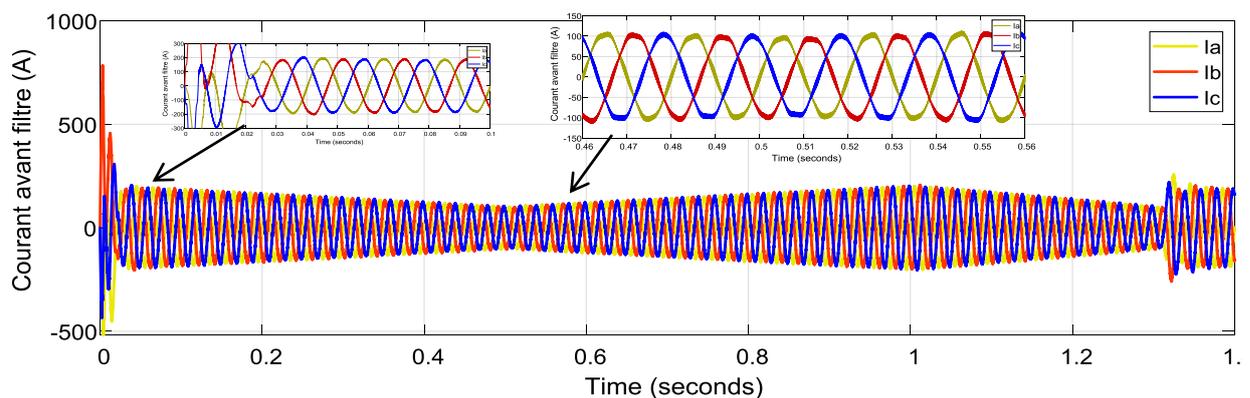
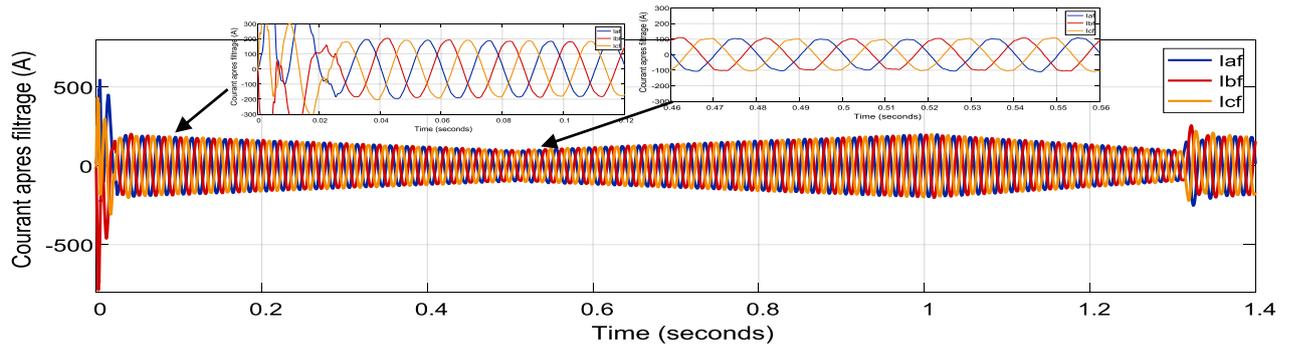
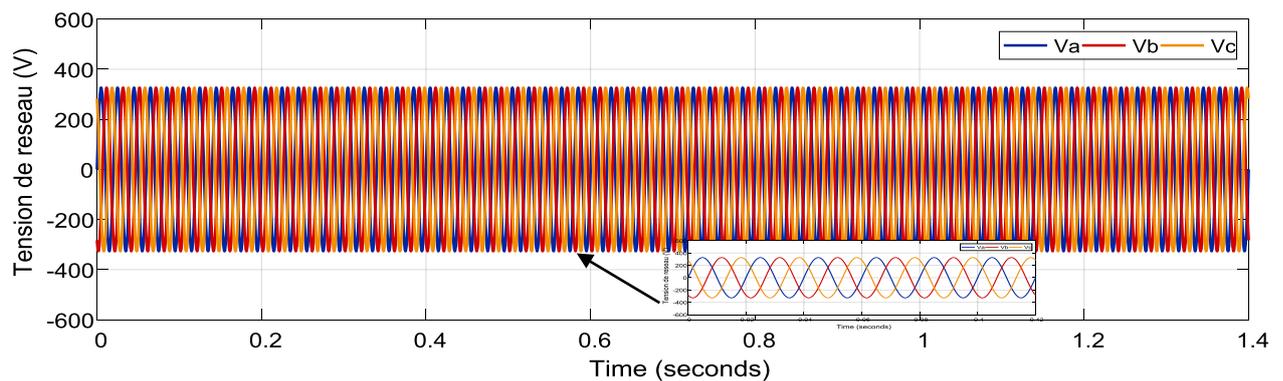


Fig.III.5 : Courant desortie de l'onduleur avant filtre



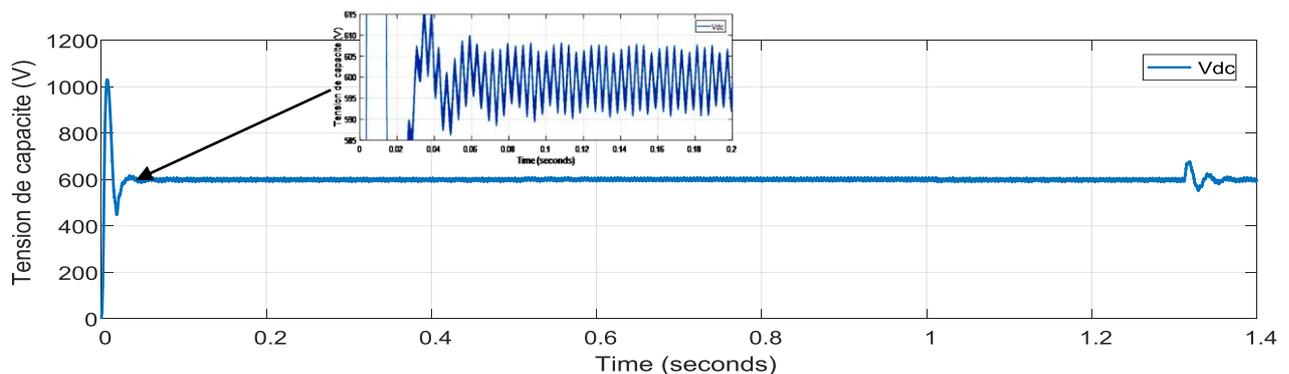
**Fig.III.6** : Courant de sortie de l'onduleur après filtre

La Fig III.5 et Fig III.6 représente les variations de courants électrique avec les variations de l'éclairement ce qui donne qui sont proportionnelle a  $T = [0-0.4]$  elle soumit un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et a  $T=0.5$  l'amplitude de courant il est diminué avec la diminution de l'éclairement et revient doucement a leur référence



**Fig.III.7** : Tension de réseau

La Fig III.7 représente la tension de système qui est toujours stable avec une amplitude de 310v. On conclure le système n'est pas soumis une variation de température la tension reste toujours stable.



**Fig.III.8** : Tension de sortie du hacheur

La Fig III.8 représente la tension de capacité de sortie de le hacheur élévateur (Boost) avec une tension stable de 600v assure par l'algorithme d'extraction de puissance (P&O) et le rapport d'amplification alpha qui est variable avec les variations des paramètres d'entrée (G, T). On conclure que les variations de l'éclairement atmosphérique exploite par le générateur ne déféctueux pas la tension de sortie de le hacheur.

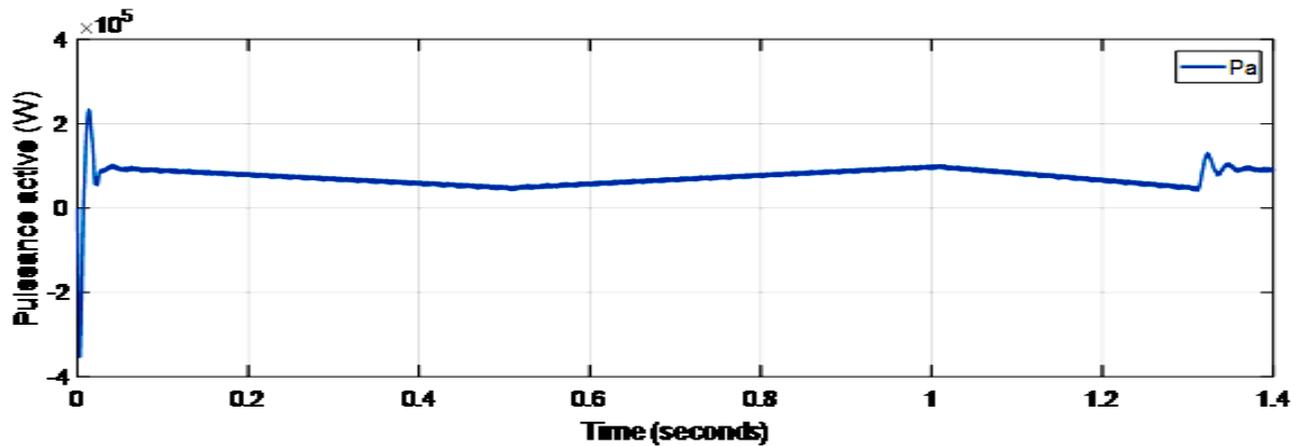


Fig.III.9 : Puissance active

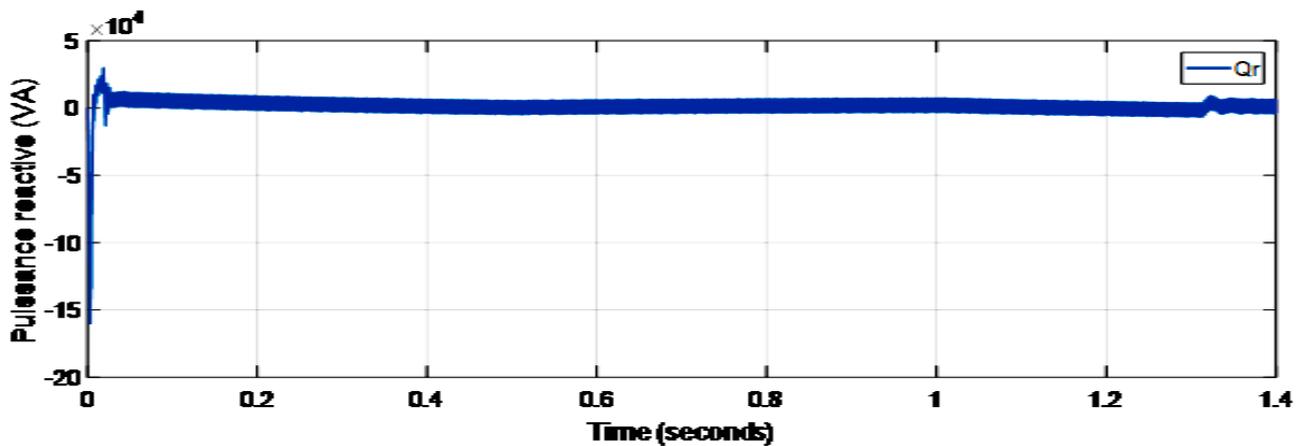


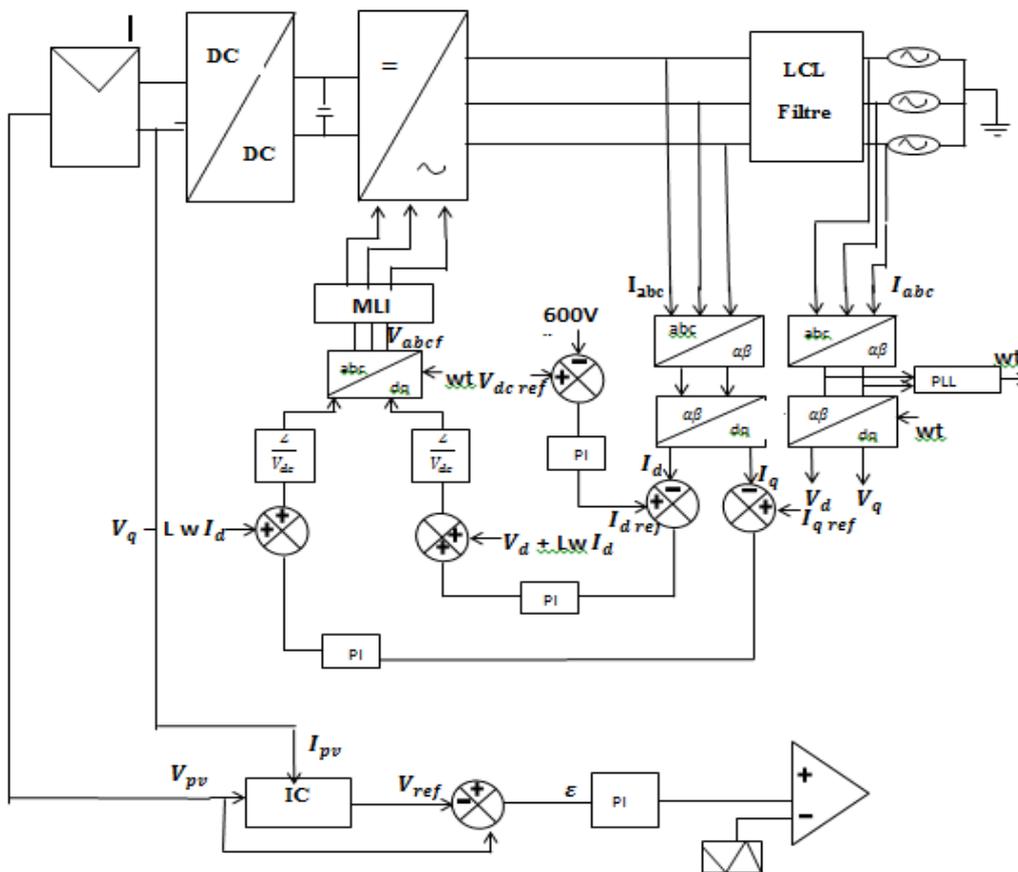
Fig.III.10 : Puissance réactive

La Fig III.9 et Fig III.10 représentent les variations de la puissance active et réactive de générateur. On remarque que la puissance active elle soumit des variations avec le temps vient de variant de l'éclairement. La puissance réactive il est auteur de zéro ce qui donne une bonne control de l'énergie réactive car elle affecte le réseau électrique.

### III.3.2. Simulation GPV base sur IC à éclairement variable et température constante avec MLI-ST-Hystérésis

#### III.3.2.1. Schéma de simulation

La Fig III.11 représente la chaîne de conversion complète avec le système d'électronique de puissance avec un algorithme d'extraction de maximum de puissance IC avec variations de l'éclairement  $G$ . [1000-500] W/m<sup>2</sup>



**Fig.III.11** :Schéma de simulation GPV base sur IC à éclairement variable et température constante avec MLI-ST-Hystérésis

III.3.2.2. Résultat de simulation ( $V_{abc}, I_{abc}, I_{abcg}, V_{dc}, I_{irrad}, P, Q$ )

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation » représentent par les figures suivantes le courant d'irradiation, et le courant de sortie de l'onduleur avant et après le filtre. Ainsi que la tension de réseau, la tension de la capacité en fin la puissance active et réactive

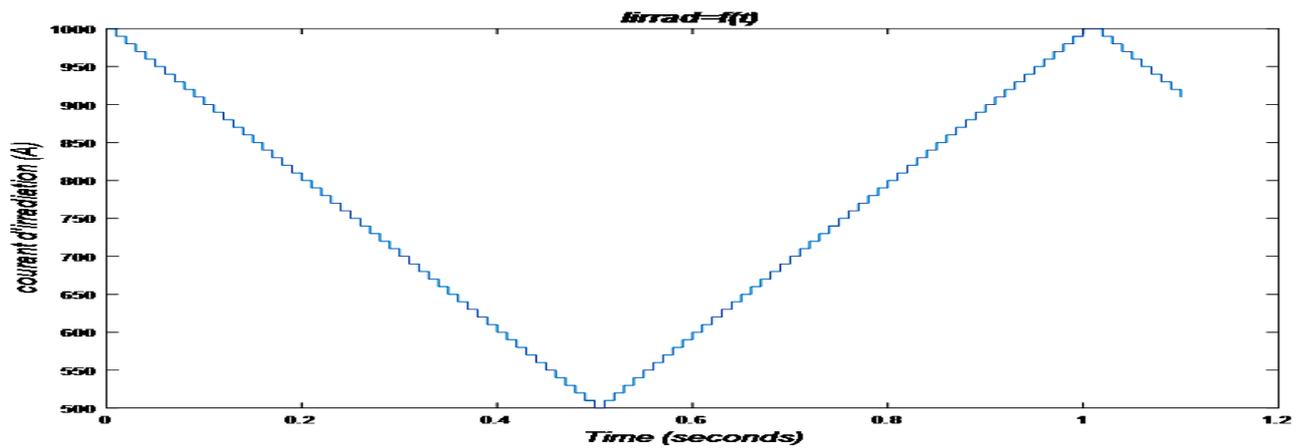


Fig.III.12 : Courant d'irradiation

La Fig III.12 représente les variations de l'énergie d'entre qui est l'éclairement (G) ce qui donne que l'énergie atmosphérique n'est pas stable et variable dans a l'échelle de temps. La variation il est entre 1000 et 500  $W/m^2$  .Il est prête comme un exemple de simulation

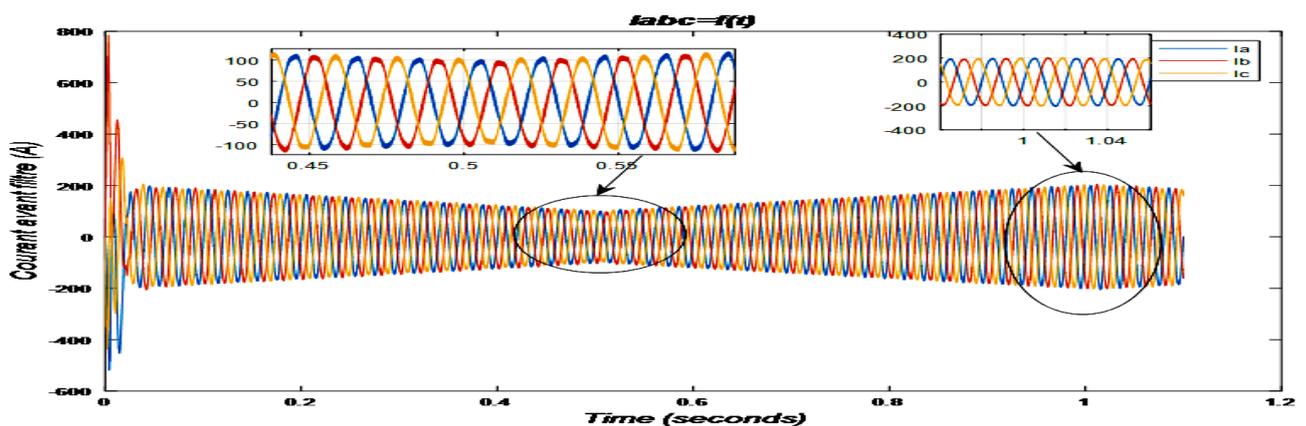


Fig.III.13 : Courant de sortie de l'onduleur avant le filtrage

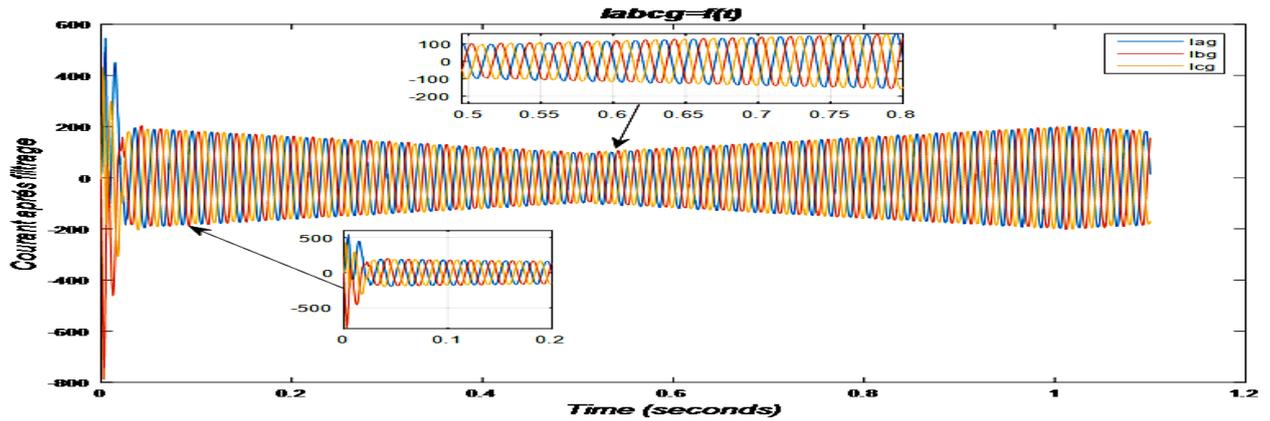


Fig.III.14 : Courant de sortie de l'onduleur après le filtrage

La Fig III.13 et Fig III.14 représente les variations de courants électrique avec les variations de l'éclairement ce qui donne qui sont proportionnelle a  $T = [0-0.4]$  elle soumit un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et a  $T=0.5$  l'amplitude de courant il est diminué avec la diminution de l'éclairement et revient doucement a leur référence

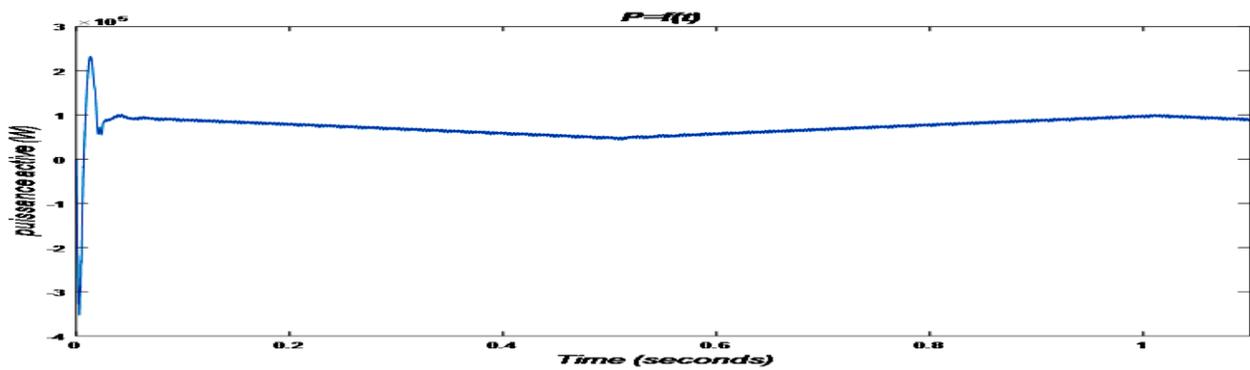


Fig.III.15 : Puissance Active

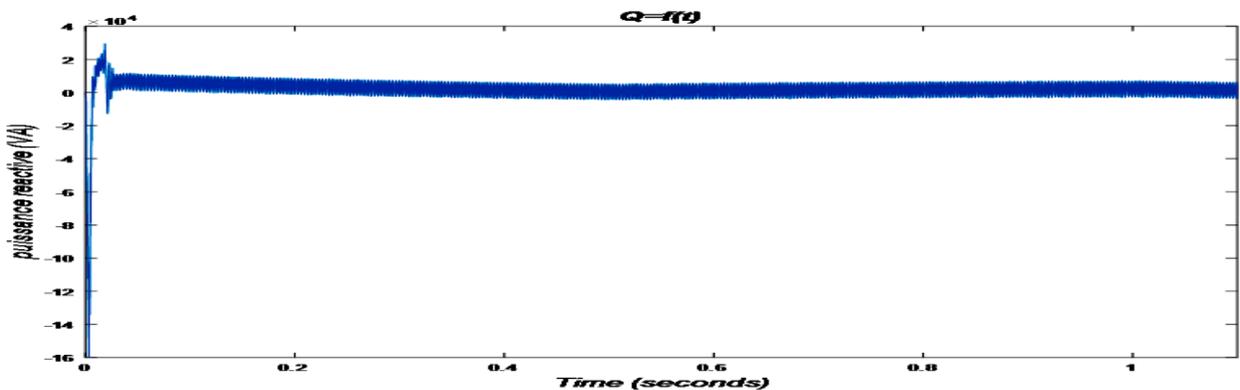


Fig.III.16 :Puissance Réactive

La Fig III.15 et Fig III.16 représentent les variations de la puissance active et réactive de générateur. On remarque que la puissance active elle soumit des variations avec le temps vient de variant de l'éclairement. La puissance réactive il est auteur de zéro ce qui donne une bonne control de l'énergie réactive car elle affecte le réseau électrique.

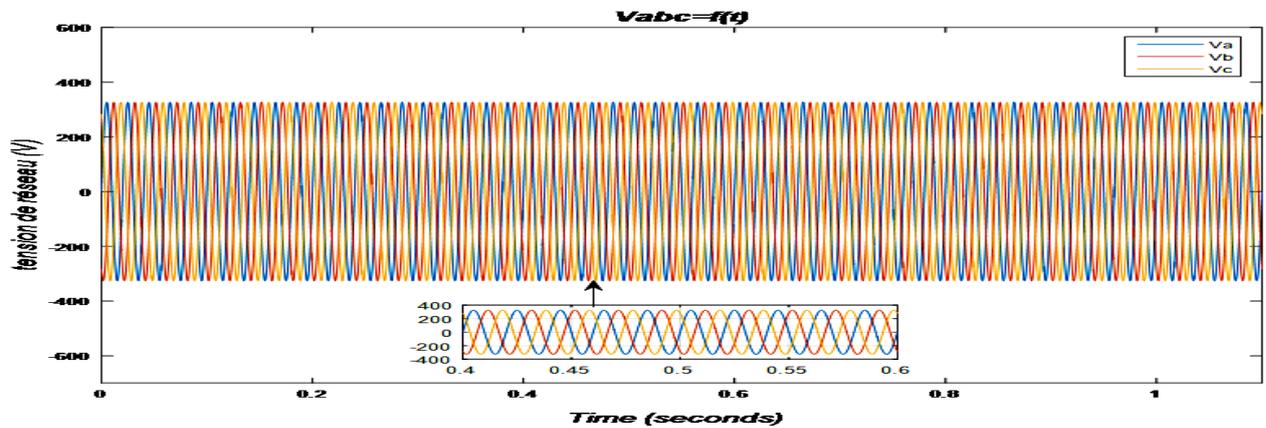


Fig.III.17 : Tension de réseau

La Fig III.17 représente la tension de system qui est toujours stable avec une amplitude de 310v. On conclure le system n'est pas soumis une variation de température la tension reste toujours stable.

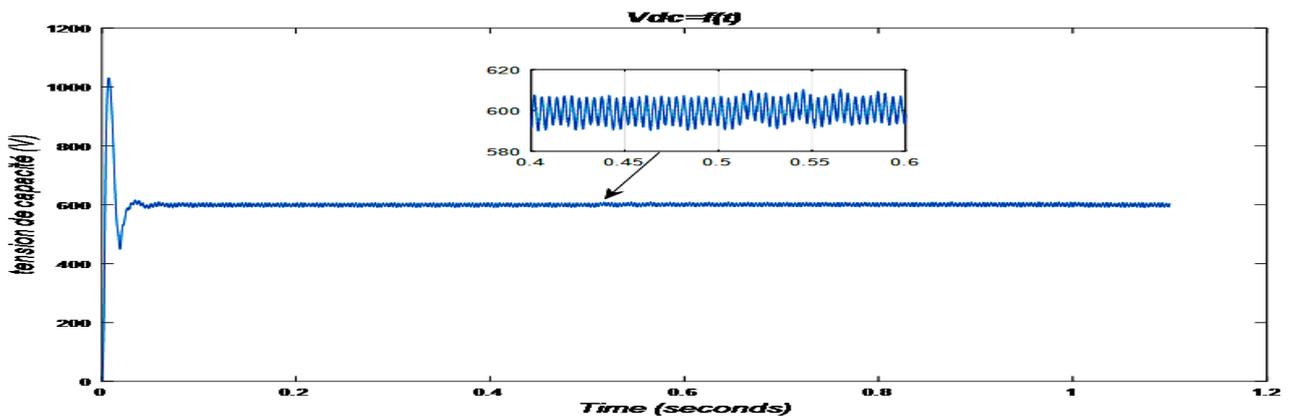


Fig.III.18 : Tension de capacité

La Fig III.18 représente la tension de capacité de sortie de le hacheur élévateur (Boost) avec une tension stable de 600v assure par l'algorithme d'extraction de puissance (P&O) et le rapport d'amplification alpha qui est variable avec les variations des paramètres d'entrée (G, T). On conclure que les variations de l'éclairement atmosphérique exploité par le générateur ne effectue pas la tension de sortie de le hacheur.

III.3.3. Résultats de comparaison

III.3.3.1. Algorithme P&O avec IC avant et après filtrage

Les figures III.19, III.20, III.21, III.22, représentent respectivement P&O 500 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> avant filtrage, IC 500 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> avant filtrage, P&O 500 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> après filtrage, IC 500 W/m<sup>2</sup> et 1000W/m<sup>2</sup> après filtrage.

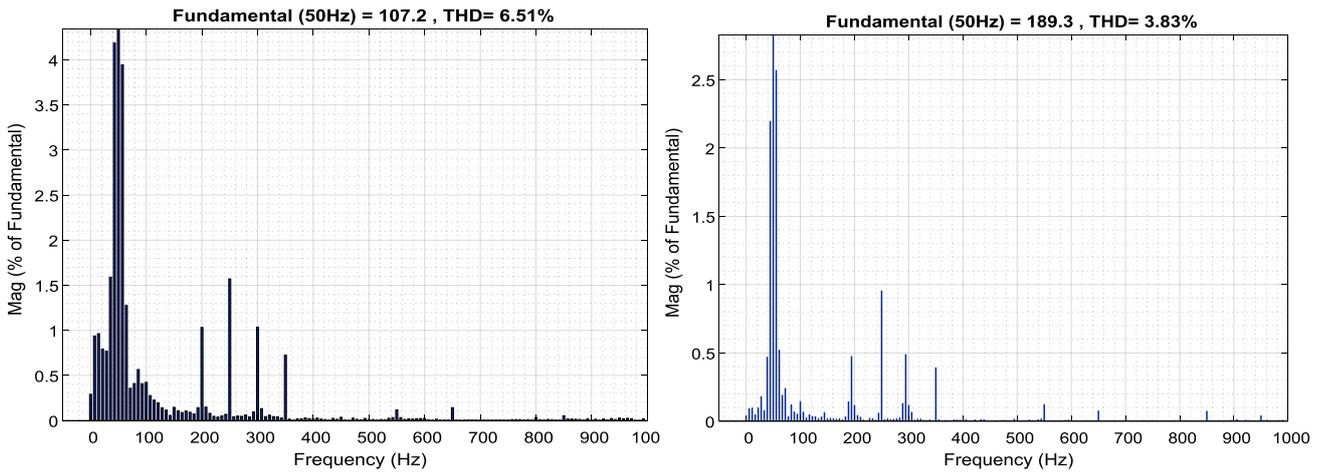


Fig.III.19 : P&O 500 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> avant filtrage

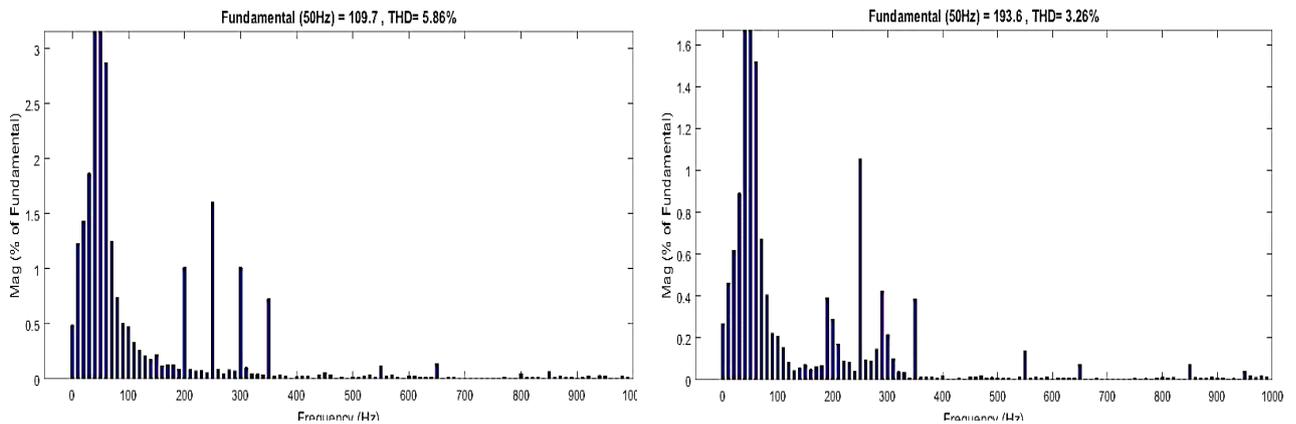


Fig III.20 IC 500 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> avant filtrage

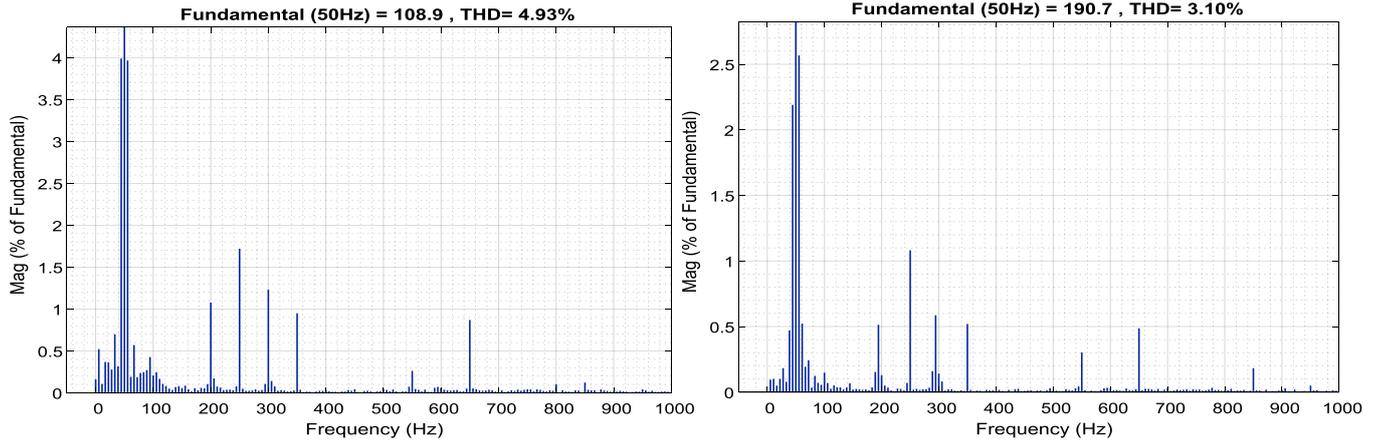


Fig.III.21 : P&O 500 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> après filtrage

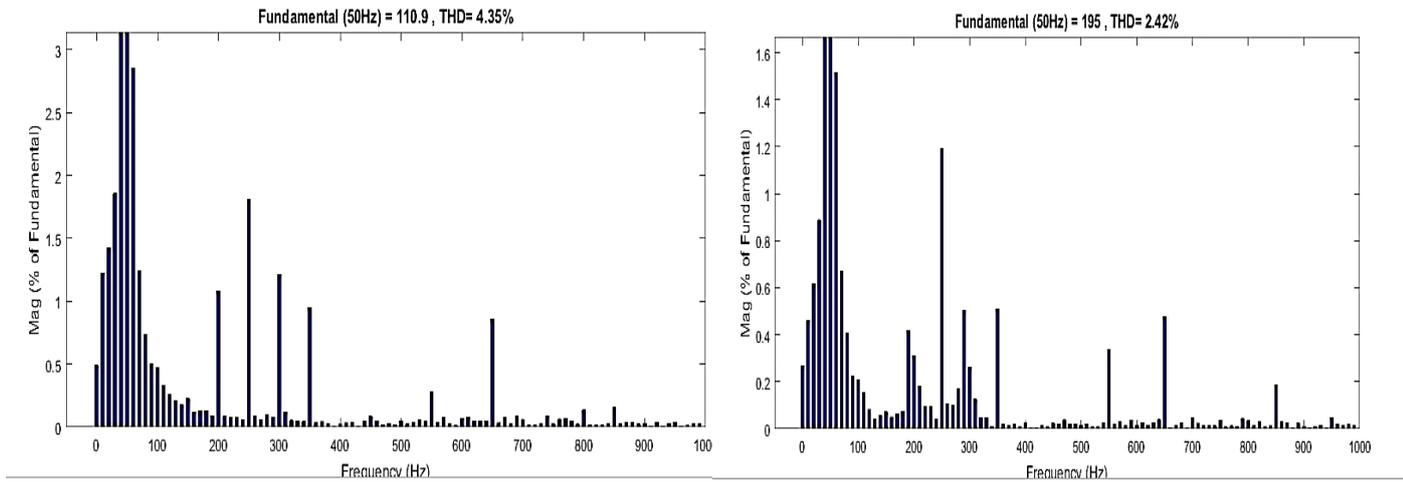


Fig.III.22 : IC 500 W/m<sup>2</sup> et 1000W/m<sup>2</sup> après filtrage

**III.3.3.2. Algorithme P&O avec IC avant filtrage (THD)**

<b>THD</b>	<b>500W/m<sup>2</sup></b>	<b>1000W/m<sup>2</sup></b>
<b>P&amp;O</b>	6.51%	3.83%
<b>IC</b>	5.86%	3.26%

**Tableau.III.1** :THD avant filtrage sur l'algorithme P&O avec IC**III.3.3.3. Algorithme P&O avec IC après filtrage (THD)**

<b>THD</b>	<b>500W/m<sup>2</sup></b>	<b>1000W/m<sup>2</sup></b>
<b>P&amp;O</b>	4.93%	3.10%
<b>IC</b>	4.35%	2.42%

**Tableau.III.2** :THD après filtrage sur l'algorithme P&O avec IC**Commentaire**

Le tableau III.1 et Tableau III.2 représentent Les deux techniques utilisées (P&O et IC) avec les variations de l'éclairement avant le filtrage et après le filtrage de l'énergie produite par le GPV. Nous observons que la variation de l'éclairement a  $G=500 \text{ W/m}^2$  génère des harmoniques dans le système de conversion photovoltaïque pour les deux techniques mais la

technique Inductance Incrémentale (IC) présente un pourcentage faible (que ce soit a 500 ou 1000 W/m<sup>2</sup>) par rapport la technique P&O. la technique de control de l'onduleur a aussi un impact important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie

On distingue que le filtre aun rôle très importantes dans l'élimination des harmoniques avec les deux techniques utilisée. Nous distinguons également que la technique IC a un impact important dans le filtrage de l'énergie.

#### **III.4.Conclusion**

Dans ce chapitre, j'ai fait la simulation du système PV sous le logiciel MATLAB des deux différents algorithmes de la commande MPPT la technique P&O (Perturbation et observation) et IC (Conductance Incrémentale) pour un éclairement (G) variable et Température (T) constante avec MLI-ST-Hystérésis et S-T .

Dans la première partie on a présenté les résultats des deux techniques, ou l'on conclut que :

L'énergie atmosphérique n'est pas stable et cela affecte donc sur le courant, la puissance active.

La tension de réseau est toujours stable parce que la température est constante; et pour la tension de capacité n'est pas affecté par l'éclairement. Aussi la puissance réactive est nulle.

La deuxième partie on a fait une comparaison de l'algorithme P&O avec IC avant et après filtrage et nous avons vu que le filtre elle est un rôle très importantes dans l'élimination des harmoniques ; et la technique IC est meilleure que la technique P&O pour améliorer l'énergie.

## **Conclusion générale**

L'étude présentée dans cette mémoire concerne les systèmes photovoltaïques (PV) raccordé au réseau électrique. Le générateur solaire PV tient compte de la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique. Pour l'analyse et la conception de commande d'un système solaire PV, un modèle précis de la cellule solaire PV est essentielle car la cellule PV est le bloc de construction de base d'un système PV.

Dans le cadre de ce travail, un modèle électrique à une diode a été utilisé pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque. Pour cela nous avons présenté son modèle mathématique suivi d'une simulation numérique. Nous avons étudié en particulier l'identification des points de puissance maximum (MPP) avec la variation des conditions météorologiques (température et ensoleillement), et nous nous intéresserons d'intégré l'énergie électrique dans le réseau électrique.

Nous avons présenté les convertisseurs DC-DC de type Buck, Boost et Buck-Boost. Pour notre système nous avons choisi le convertisseur survolteur il peut travailler en élévateur de tension, et abaisseur de courant, commandé en ouverture et en fermeture, son rapport cyclique  $\alpha$  variant entre 0 et 1. Afin d'améliorer la performance du système PV, diverses méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) conventionnelles et intelligentes ont été utilisées. Cette mémoire présente une étude sur les techniques MPPT les plus utilisées dans les systèmes PV, à savoir : la méthode de perturbation et d'observation (P&O), la méthode de la conductance incrémentale (IC), la méthode MPPT contre réaction de tension, la méthode MPPT contre réaction du courant, la méthode MPPT contre réaction de puissance.

Une technique de synchronisation très efficace la PLL, il permet d'asservir la phase et la fréquence instantanée de sortie sur celles d'entrée. Pour obtenir un courant alternatif on a utilisé un onduleur de tension à trois phases. Pour cela, nous avons présenté son modèle de connaissance et de commande. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système, pour la commande de cet onduleur nous avons choisi la stratégie de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Cette dernière permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance.

Dans le cadre de ces travaux, des simulations numériques (en utilisant Simulink/Matlab) ont été réalisées sur les systèmes PV deux différents algorithmes de la commande MPPT la technique P&O (Perturbation et observation) et IC (Conductance Incrémentale) pour un éclairement (G) variable et Température (T) constante avec MLI-ST-Hystérésis et S-T.

Les résultats obtenus ont montré en général, que l'énergie atmosphérique affecte sur le courant, et le filtre a un rôle très importantes dans l'élimination des harmoniques avec les deux techniques utilisée. Nous distinguons que la technique IC elle a un impact important aussi dans le filtrage de l'énergie.

**Annexe 1 :**

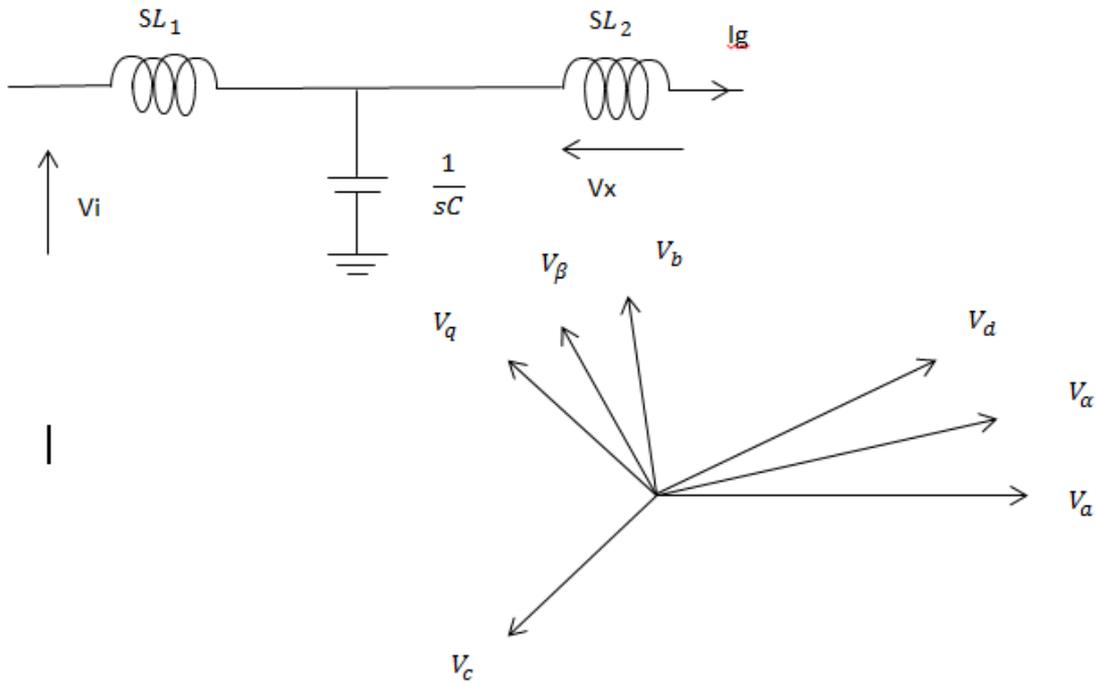
les paramètres de module (monocristallin 60cellules) sont donnés (par le fabricant condor) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

Type de module	Unité	CEM250M-60
Puissance nominale	Wc	250
Tension en circuit ouvert (Vco)	V	37.80
Courant de court Circuit Isc	A	8.83
Tension mpp Vmpp	V	30,00
Courant mpp Impp	A	8.33
Tension maximale du système VDC	V	
Charge maximale De fusibles (A)	A	

Facteur de température (cellule):		
Température nominale de fonctionnement	NOCT	45±2°C
Coefficient de température de puissance	%/°C	-0.41
Coefficient de température de courant	%/°C	+0.06
Coefficient de température de voltage	%/°C	-0.32

## Annexe 2 :

Filtrage :



$$V_i = V_x + sL_1 I_g$$

$$V_x = sL_2 I_g$$

$$I_g = V_x / (1/sC)$$

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{4L_2 C S^3 + (L_1 + L_2) S}$$

$$\text{On a: } L = L_1 + L_2 \quad \text{et } L_p = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad W_{ref} = \frac{1}{\sqrt{L_p C}}$$

Donc :

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{SL(1 + CL_p S^2)}$$

Avec :

$$1) \quad F_{sw} = 10 \text{ kHz}$$

$$2) f_{res} = \frac{F_{sw}}{10} = \frac{10 \cdot 10^3}{10} = 1000 \text{ Hz}$$

3) La valeur de C capacité :

Q=5% de puissance totale (100kw)

$$Q = \frac{V^2}{2\pi f C} = 5\%$$

$$C = \frac{0.05}{V^2 \cdot 2\pi f}$$

Avec :

$$V = 100 \text{ kVA} \quad V_{pp} = 230 \text{ V (monophasé)} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

$$C = \frac{0.05 \left( \frac{100 \cdot 10^3}{3} \right)}{(230)^2 \cdot 2\pi f} = 100.28 \mu\text{F}$$

4) La valeur de L :

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{SL(1 + CL_p S^2)} W_{ref} = \frac{1}{\sqrt{L_p C}}$$

$$\frac{I_g}{V_i} = \frac{1}{SL \left( 1 + \frac{S^2}{W_{res}^2} \right)} \quad s = j \cdot \omega_{sw}$$

$$\frac{I_g(s\omega)}{V_i(s\omega)} = \frac{1}{j \cdot \omega_{sw} L \left( 1 + \frac{(j \omega_{sw})^2}{W_{res}^2} \right)}$$

$$\left| \frac{I_g(s\omega)}{V_i(s\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\omega_{sw} L \left( 1 - \frac{(\omega_{sw})^2}{W_{res}^2} \right)} \right|$$

$$L = \left| \frac{1}{\omega_{sw} \cdot \frac{I_g(s\omega)}{V_i(s\omega)} \left( 1 - \frac{(\omega_{sw})^2}{W_{res}^2} \right)} \right|$$

$$P = 100 \text{ KVA} \quad V = 230 \text{ V} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

$$I_g = P/V = \frac{100 \cdot 10^3}{230} = 144.92 \text{ A}$$

$$f_{sw} = 10 \text{ kHz} \quad f_{res} = 1000 \text{ Hz}$$

$$I_g(s\omega) = 3\% \text{ de } I_g = 0.03 \cdot 144.92 = 0.434 \text{ A}$$

$$V_i(s\omega) = 0.9 \text{ times } V_g \rightarrow V_i(s\omega) = 0.9 \cdot 230 = 207 \text{ V}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi 1000) * (\frac{0.434}{207}) (1 - \frac{(2\pi 10000)^2}{2\pi 1000^2})} = 76.68 \mu\text{H}$$

$$L_1 = L_2 = 38.34 \mu\text{H} \quad \text{la valeur minimum}$$

$$V_L = 20\% \quad V_{\text{grid}}$$

$$L_{\text{max}} = \frac{0.2 V_{\text{grid}}}{2\pi 50 I_g} = \frac{0.2 * 230}{2\pi f * 144.92} = 1 \text{mH}$$

$$L_1 - L_2 = 500 \mu\text{H} \quad \text{la valeur maximum}$$

**Annexe 3:**

Calcule les paramètres de l'hacheurBoost :

On a:

$$V_s=25V \quad ; f_p = 20000 \text{ Hz}; V_o=48V$$

$$P=240w \quad ; \mu = 0.9$$

$\Delta i$  (input current) ;  $\Delta v$ (output voltage)

**1.D(le rapport cyclique) :**

$$D=1-\frac{(V_s-\mu)}{V_o}=1-\frac{(25*0.9)}{48}=0.53=53.125\%$$

$$\Delta i = I_{ripple} * I_o * \frac{V_o}{V_s}$$

$$I_s = \frac{P}{V_o} = \frac{240}{48} = 5A \quad \text{et} \quad 20\% < I_{ripple} < 40\%$$

$$\text{Donc : } di = 0.4 * 5 * \frac{48}{25} = 3.84$$

**2. L (inductance (henry))**

$$L = \frac{V_o}{4.f_p.\Delta i} = \frac{48}{4*20000*3.84} = 1.56*10^{-4} \text{ henry.}$$

**3. C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> (capacité (farad)):**

$$\Delta V(\%) = 1$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o * \Delta V(\%)}{100} = \frac{48 * 1}{100} = 0.48$$

$$\Delta V_s = \frac{V_s \cdot \Delta V(\%)}{100} = \frac{25 \cdot 1}{100} = 0.25$$

$$I_o = (1 - D) \cdot I_s$$

$$I_s = \frac{I_o}{(1-D)} = \frac{5}{(1-0.53)} = 10.63 \text{ A}$$

$$C_1 = \frac{I_s}{2 \cdot \Delta V_s \cdot f_p} = \frac{10.63}{2 \cdot 0.25 \cdot 20000} = 1.063 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{I_s}{4 \cdot \Delta V_o \cdot f_p} = \frac{10.63}{4 \cdot 0.48 \cdot 20000} = 0.06378 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

#### 4.R(Résistance ( $\Omega$ )):

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{48}{5} = 9.6 \ \Omega$$

**Annexe 4 :**

Onduleur 3 phases :

- 1) MLI-ST    2)MLI-SVM vectoriel    3)MLI-180°    4)MLI-hysteresis

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \text{MLI hysteresis}$$

Transformation direct:

$$X_{abc} \rightarrow X_{\alpha\beta} \rightarrow X_{\alpha\beta} = T_{23}X_{abc}$$

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{Mr. Concordia}$$

$$X_{abc} \rightarrow X_{\alpha\beta} \rightarrow X_{\alpha\beta} = C_{23}X_{abc}$$

$$C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \text{M}^n. \text{Clarke}$$

Transformation inverse :  $\alpha\beta \rightarrow abc$ 

Concordia

$$X_{abc} = T_{32}X_{\alpha\beta}T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Clarke

$$X_{abc} \rightarrow C_{32} X_{\alpha\beta} C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

**Annexe 5 :**

PLL 3 phases

Transformation :

$$Abc \rightarrow dq \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 1 \\ \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\varphi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varphi - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix}$$

Park direct

$$dq \rightarrow abc \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ -\sin(\varphi) & -\sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Park inverse

$$\text{Source : } V_1 = 220\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad \omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$$

$$V_2 = 220\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_3 = 220\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$\text{Park } abc \rightarrow dq \mathbf{K}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Clarkeabc  $\rightarrow$   $\alpha\beta$

$$\mathbf{K}_P = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### Référence :

- [1] Hasni.T, Malek.R, Zouioueche.N, nouvelle étude «L'Algérie 100% énergie renouvelables : Recommandation pour une stratégie nationale de transition énergétique », 2021.
- [2] Benalouache .N, « L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles », thèse de doctorat, université de Sfax, 2017.
- [3] Louazene.M, «Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïque utilisé pour l'irrigation dans les zones sahariennes-Application zone de Ouargla », thèse de doctorat, université El hadj Lakhdar Batna, 2015.
- [4] Belkaid.A, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », thèse de doctorat, université Ferhat Abbas-Sétif 1, 2015.
- [5]Labouret. A, Braun. J-P, Cumunel. P, Faraggi. B « Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque », 5<sup>ème</sup> édition, 2010.
- [6] Taleb, M, «Performance of a maximum power point tracker (MPPT) photovoltaic generator ( $G_p$ ) », Electric power components and systems, Vol.35, pp-367-375, 2007.
- [7] A.P.Bhatnagar, B.R.K.Nema, «Conventional and global maximum power point tracking techniques in photovoltaic applications A review», J.Renew.Sustainable Energy 5, 032701, pp.1-23, 2013.
- [8] O.Seddik, « Etude et optimisation fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master, université de Ouargla, 2012.
- [9] J. Royer T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy«Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [10] A.Talha, H. Boumaaraf and O. Bouhali« Evaluation of maximum power point tracking methods for photovoltaic systems». Archive of control Sciences. Vol. 2, pp 151-165, 2011.

- [11] A.Aziz, K.Kassmi, F.Olivié, A. Martinez, «Synthèse bibliographique sur les chaines photovoltaïque.1-générateur photovoltaïque (PV)», Rapport LAAS N°04348 ,27p, 2004.
- [12] Noble Duncan, ET Robert K. Swartman. The Canadian Renewable Energy Guide, Burns town, General Store publishing House, 1995.
- [13] A. Aziz, Ka. Kassmi, K. Kassmi, F. Olivié, R. Maimouni, G. Sarrabayrouse, A. Martinez,«Modélisation des panneaux solaires dans l'environnement OrCAD», MAJECSTIC'04.CDR0M, Art 14-2-7. Calais-France, 2004.
- [14] M. Angel Cid Pastor « conception et réalisation de modules photovoltaïquesélectroniques », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [15] Soualmia.A,«Intégration de la production décentralisé dans un système de pompage photovoltaïque », thèse de doctorat, université constantine1, 2014.
- [16] Poulain G. Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement, thèse de doctorat, institut national des Sciences appliquées de Lyon, 2014.
- [17]Maoucha. A,« Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique », mémoire de master,université de Batna-Algérie, 2011.
- [18] B. Mamri, M. Zaidi « contribution de système photovoltaïque avec pompage », mémoire de master, université de Constantine, 2006.
- [19] L. Cattin, J.C. Bernède, Y. Lare, S. Dabos-Seignon, N. Stephant, M. Morsli, P.P.Zamora, F.R. Diaz, M.A. del Valle. PhysicaStatusSolidi A, 210, 802, (2013).
- [20] EL Jouad. Z, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organique », thèse de doctorat, université Bretagne loir, 2016.
- [21] Ouabdelkader. K, Mersel.H, « Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau », mémoire de master, université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.

- [22] Vanya. I, « Méthode d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension à la pollution harmonique », thèse de doctorat, université technique de Sofia.
- [23] Chaoui. A, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », thèse de doctorat, université de Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [24] Aouchiche. N, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », thèse de doctorat, université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2020.
- [25] Azizi. A, « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride », thèse de doctorat, université Badjimokhtar-annaba, 2019.
- [26] Drir.N, « modélisation et optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par des techniques intelligentes », thèse de doctorat, université Houari Boumediene-Alger, 2014.
- [27] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.
- [28].A. Mabrouk, « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », mémoire de master, école Nationale Polytechnique El Harrach, ALGER, 2008.
- [29]. B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, « Etat de l'art des aérogénérateurs », L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect-ecrin, 2002.
- [30].F. Bouchtouchecherfa « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT », mémoire de master, école National Polytechnique Elharach, 2004.
- [31]. Dezso Sera, Remus Teodorescu, Tamas Kerekes, « Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface », Institut de

technology of energy, university of Aalborg, Pontoppidanstraede 101 DK- 9220, Aalborg, Denmark.

[32] A. Chermitti, O. Boukli-Hacene and S. Mouhadjer, «Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink», journal international des applications informatiques, Vol. 53, N°14, 2012.

[33] TOULAIT. A, Aili. R, « Modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2014.

[34] BOUZIDI. A, « Diagnostic et contrôle des systèmes de conditionnement de l'énergie photovoltaïque cas d'un système connecté au réseau électrique », mémoire de master, université Hadj Lakhdar Batna, 2016.

[35] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », thèse de doctorat, école nationale supérieure d'Arts et Métiers, 2004.

[36] P. Vas, Electrical machines and drives: a space-vector theory approach vol. 25, Oxford University Press, 1992.

[37] BOUKAROURA. A, « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond graph », mémoire de master, université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.