



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière : *Electrotechnique*
Spécialité : *Réseaux Electrique*

Thème

Optimisation de la Puissance
Electrique dans les Systèmes
Photovoltaïques

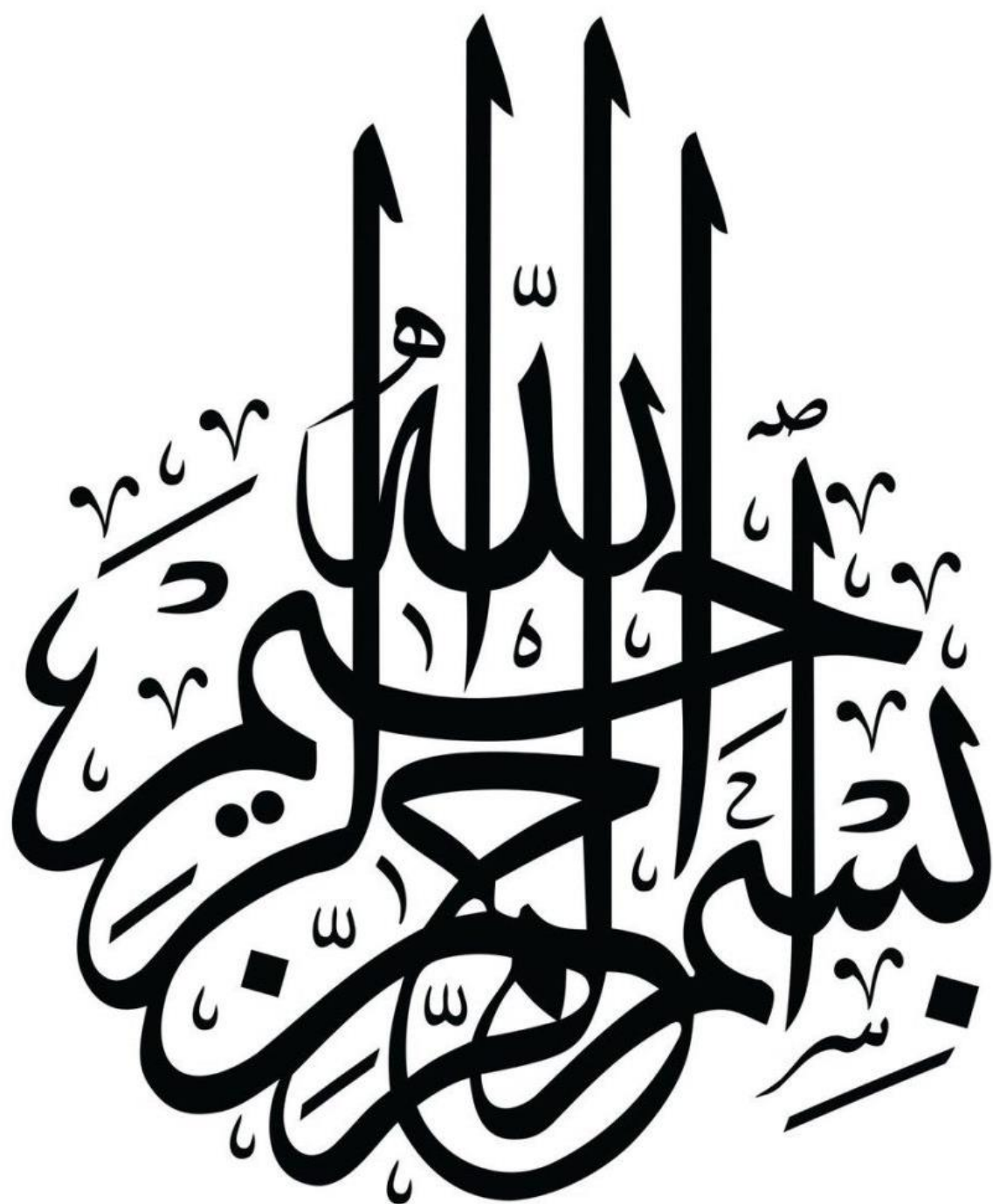
Soutenu le : Juin 2024

Prof . Mesbahi Nadhir
Dr . Lammouchi Zakaria
Dr . Chikha Said

President
Examineur
Encadreur

Réaliser par :
BESSEI Salah
CHAREF Abdallah
TLILI Ammar

Année universitaire 2023/2024



شكر و عرفان

الحمد لله الذي وفقنا وأعاننا في هذا العمل، فسبحانه
جل وعلا نعم المرشد ونعم المعين.

"من لم يشكر القليل لم يشكر الكثير ومن لم يشكر
الناس لم يشكر الله عز وجل".

إلى صاحب الأفكار النيرة أطيب التحيات وأجملها
تقديرا و عرفانا على كل ما قدمته لنا طوال هذه الفترة
من جهودك القيمة والتمينة التي وجهتنا فيها بعبارات
من ذهب لتكون لنا منارة تضيء طريق نجاحنا نتوجه
لك بالشكر والعرفان والفضل الكثير أستاذنا الفاضل
الدكتور **شيخة السعيد**.

ونحن في هذا المقام نتقدم بجزيل الشكر والتقدير
للجنة المناقشة ونثمن تصويباتهم وملاحظاتهم القيمة
لكي يجعلوا هذا البحث عملا متكاملا بإذن الله.

كما نتوجه بجزيل الشكر إلى كل أساتذتنا الكرام
طوال مشوارنا الدراسي والشكر موصول أيضا
لزملائنا وزميلاتنا في قسم الهندسة

الكهربائية وكل من مد يد العون من قريب أو بعيد
لإنجاز هذا العمل.



الاهداءات

نهدي هذا العمل المتواضع

إلى والدينا الأعزاء الذين اجتهدوا من أجل تعليمنا ولم يكفوا عن دعمنا

وتشجيعنا طوال سنوات دراستنا

وإلى إخواننا وأخواتنا الأعزاء

وإلى كافة عائلة " تليلى " شارف " بسي " دون استثناء

ولجميع أصدقائنا

و إلى زملائنا في قسم الهندسة الكهربائية

2023/2024

LISTE DES ABREVIATIONS

AC : Courant alternative.

DC : Courant continu.

DC/AC: Conversion continu/alternatif

CS : Convertisseur Statique.

D₁ : Diode de protection anti-retour.

D : Diode.

d : Rapport cyclique.

q : Charge de l'électron [$1,602 \cdot 10^{-19}$ C].

E : Niveau d'éclairement (ou d'irradiation) [W/m^2].

F_s : Fréquence de commutation de l'interrupteur du CS [Hz].

G : Conductance [Ω^{-1}].

GPV : générateur photovoltaïque.

I_{cell} : Courant fourni par la cellule [A].

I_{sc} : Le courant de court-circuit du générateur photovoltaïque [A].

I_{op} : Courant Optimal d'un générateur ou d'une cellule PV [A].

I_{pv} : Courant délivré par le générateur PV [A].

I_o : Le courant de saturation inverse.

I_{op} : Courant Optimal d'un générateur ou d'une cellule PV [A].

K : Constante de Boltzmann [$1,38 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹].

k : Constante positive.

n : Facteur de non-idéalité de la jonction PN.

Per & Obs: Perturbation et observation.

P_{in} : Puissance à l'entrée de l'étage de conversion [W].

P_{max} : Puissance Maximale du générateur PV [W].

MPPT: Maximum Power Point Trackin.

MPC :Le contrôle du modèle prédictif (Model Predictive Control).

Pout : Puissance à la sortie de l'étage de conversion [W] .

Ppv: Puissance délivrée par le générateur PV [W].

PV : photovoltaïque.

R_L: Charge résistive [Ω].

R_p:Résistance parallèle du générateur PV [Ω].

R_s: Résistance Série du générateur PV [Ω].

t : Le temps.

T : La période.

T ° : Température effective des cellules [Co].

T_{ref} : Température de référence est égale 25Co

V_{cell}: La tension de la cellule [V].

V_{in}: Tension d'entrée du convertisseur statique.

V_{pv}: La tension de la générateur PV [V].

V_{oc}: Tension de Circuit Ouvert [V].

V_{op}: Tension optimale d' un générateur ou d' une cellule PV [V].

V_{th}:La tension thermique

(V-I) : La caractéristique tension-courante du GPV.

(V-P) : La caractéristique tension-puissance du GPV.

K_I :est le coefficient de température du courant de court-circuit.

K : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

G : est l'ensoleillement KW/m².

G_{ref}: Irradiation de référence (1000 W/m²).

E_{g0} [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur.

A : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).

Ns : Nombre de cellules connectées en série.

$v_{s(a,b,c)}$: le vecteur des tensions de la source.

$v_{f(a,b,c)}$: le vecteur de tension de l'onduleur relativement au nœud N.

$v_{f(a,b,c)K}$: le vecteur des tensions de l'onduleur relativement au nœud K.

$i_{s(a,b,c)}$: le vecteur des courants de source d'alimentation.

$i_{c(a,b,c)}$: le vecteur des courants de la charge non linéaire.

$i_{f(a,b,c)}$: le vecteur des courants du filtre.

v_{dc} : la tension de la capacité de stockage.

v_{Nk} : la tension entre les nœuds N et K.

I_{ph} : Photocourant (A).

I : Le courant fourni par la cellule.

I_d : Le courant traversant la diode.

I_{Rs} : Courant de résistance de shunt.

e : charge d'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$).

S1, S2, S3, S4, S5, S6 : commutation des interrupteurs de puissance.

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tensions simples à la sortie de l'onduleur.

Liste des Figures

Figure I.1: Représentation schématique d'une cellule solaire	06
Figure I.2: Les différents types de cellules photovoltaïque.	08
Figure I.3 : Types des modules P V.	09
Figure I.4 : composants de base d'un système PV.	10
Figure II.1: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.	12
Figure II. 2 : Caractéristique $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	14
Figure II.3 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	15
Figure II.4: Caractéristique $I(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}C$)	15
Figure II.5: Caractéristique $P(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}C$).	16
Figure II.6: Caractéristique $I(V)$ pour température.	16
Figure II.7: Caractéristique $P(V)$ pour température.	17
Figure II.8: (a) Connexion en série des cellules, (b) caractéristique courant tension.	17
Figure II.9: (a) Connexion en parallèle de cellules, (b) Caractéristique courant tension.	18
Figure II.10 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	19
Figure II.11 : Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension	19
Figure II.12 : onduleur à 2 niveaux	20
Figure II.13: Présentation du vecteur de tension.	22
Figure III.1: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque par Une commande MPPT sur charge AC	27
Figure III.2: Principe de la commande MPPT	28
Figure III.3: Recherche de PPM par la Méthode (P&O)	29

Figure III.4: Algorithme Perturbation et Observation (P&O)	30
Figure III.5: Schéma de Principe de la commande prédictive	31
Figure III.6: Schéma du Montage du système photovoltaïque connecté au réseau	32
Figure III.7: Profile de variation d'éclairement (25°C)	32
Figure III.8: Courants injectés dans le réseau électrique	33
Figure III.9: courants injectés dans le réseau électrique (en phase)	33
Figure III.10 : Réponse de la tension de bus continue en fonction de temps et la variation d'éclairement	33
Figure III.11: Zoom sur la réponse de bus continue Vdc	34
Figure III.12 : Puissance de sortie du GPV	34
Figure III.13 : Courant de sortie de GPV	34
Figure III.14 : Profile de variation dans la température.	35
Figure III.15 : Courants injectés dans le réseau électrique	35
Figure III.16 : Zoom sur les courants injectés dans le réseau électrique	35
Figure III.17 : Réponse du bus continue	36
Figure III.18 : Puissance du GPV	36
Figure III.19 : Courant du GPV	36

Liste des Tableaux

Tableau I.1	: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques	08
Tableau I.2	: Rendement des différents types de cellules	08
Tableau 1.3	: Caractéristiques électriques typiques d'un GPV6-MSX60	09
Tableau II.1	: États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux	20
TableauII.2	: Etats de commutation	21
Tableau II.3	: peut être déduit	25
Tableau III.1	: Résumer de l'algorithme P&O	31

Sommaire

Liste des Abréviations	A
Liste des Figures	B
Liste des Tableaux	C
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I-1 Introduction	3
I-2 Définition d'énergie renouvelable	3
I-3 L'énergie solaire.....	3
I-3-1 L'énergie solaire thermique	4
I-3-2 L'énergie solaire photovoltaïque	4
I-4 Historique de cellules solaires	4
I-5 Rayonnement solaire	5
I-6 Durée d'insolation	5
I-7 La cellule photovoltaïque	6
I-7-1 Principe de fonctionnement.....	6
I-7-2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	7
I-7-2-1 Les cellules monocristallines	7
I-7-2-2 Les cellules poly cristallines	7
I-7-2-3 Les cellules amorphes	7
I-7-3 Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques	8
I-7-4 Rendement des différents types de cellules.....	8
I-8 Panneaux solaires de troisième génération	8

I-8-1 Caractéristiques électriques typiques d'un GPV6-MSX60	9
I-8-2 Avantages et inconvénients d'une installation PV	9
I-9 Composants de base d'un système PV	10
I-10 Conclusion	11

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

II-1 Introduction	12
II-2 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)	12
II-3 Performances du GPV	14
II-3-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension	14
II-3-2 Influence d'éclairement	15
II-3-3 Influence de la température	16
II-4 Regroupement des Cellules Photovoltaïques	17
II-4-1 Regroupement des Cellules Photovoltaïques en Série	17
II-4-2 Regroupement des cellules photovoltaïques en parallèle	18
II-4-3 Regroupement mixte (série et parallèle)	18
II-5 L'Onduleur	18
II-6 Modélisation d'onduleur de tension	19
II-7 Modélisation d'onduleur de tension réseau	22
II-8 Conclusion	26

Chapitre III : Fonctionnement d'une chaîne de conversion photovoltaïque**raccordé au réseau électrique**

III-1	Introduction.....	27
III-2	Principe de la recherche du point de puissance maximal	27
III-3	Techniques de poursuite du point de puissance maximale	28
III-3-1	Les premiers types de technique MPPT	28
III-3-2	Principe des techniques "Perturb and Observe" (P&O)	29
III-4	Algorithme Perturbation et Observation (P&O)	30
III-5	Commande prédictive à états finis (FS-MPC)	31
III-6	Simulation du system photovoltaïque avec onduleur commandé en MPPT	32
III-6-1	Schéma du montage.....	32
III-7	Résultat de simulation.....	33
III-8	Conclusion	38
	Conclusion générale	39

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité .

La chose connue sur l'énergie solaire c'est que rendement réel de la conversion d'un module photovoltaïque est faible. Il faut donc exploiter la plus grande puissance d'énergie fournie par le module solaire. Pour cela il y a plusieurs méthodes comme système de positionnement automatique de panneau solaire et système pour suivre le point de puissance maximal (MPPT). Et c'est cette dernière (MPPT) qui fait l'objet de ce mémoire[1]. Cette mémoire comporte trois chapitres :

- **Dans le premier chapitre**

Nous avons examiné un ensemble d'informations générales concernant les systèmes photovoltaïques, en décrivant succinctement les cellules photovoltaïques. Nous avons également détaillé l'effet photoélectrique, fondamental pour l'exploitation de l'énergie solaire, ainsi que le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques les plus couramment utilisées. En plus de leurs caractéristiques principales, nous avons également abordé les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'énergie solaire.

- **Dans le second chapitre**

Nous présentons la modélisation des éléments constituant une chaîne de conversion d'énergie solaire connectée au réseau électrique. Cette dernière est constituée d'un GPV, onduleur et le réseau électrique.

- **Dans le troisième chapitre**

Nous avons examiné la technique de contrôle MPPT de type P&O pour optimiser la puissance extraite des générateurs photovoltaïques (GPV), ainsi qu'une analyse de la technique de contrôle prédictif appliquée à l'onduleur deux niveau connecté au réseau électrique. Les résultats obtenus pour cette dernière ont été remarquables et encourageants.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

Un système électrique solaire, également connu sous le nom de système photovoltaïque (PV), est un système de production d'énergie qui convertit la lumière du soleil en électricité. Il se compose généralement de panneaux solaires, d'un onduleur, de câblage et de systèmes de montage. Les panneaux solaires sont constitués d'unités plus petites appelées cellules solaires, fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe une cellule solaire, elle libère les électrons du matériau, créant ainsi un flux d'électricité. L'onduleur convertit ensuite cette électricité à courant continu (CC) en électricité à courant alternatif (AC), qui peut être utilisée pour alimenter les maisons et les entreprises. Les systèmes électriques solaires peuvent être connectés au réseau, permettant de revendre l'excédent d'électricité aux sociétés de services publics, ou ils peuvent être utilisés dans des applications hors réseau, où ils constituent la seule source d'électricité. Il s'agit d'une source d'énergie propre et renouvelable qui peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance aux combustibles fossiles.

I.2. Définition d'énergie renouvelable :

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [01].

I.3. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés [02].

✓ **L'énergie solaire thermique :**

Qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

✓ **L'énergie solaire photovoltaïque :**

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [03].

I.4. Historique des cellules solaires:

Le terme "photovoltaïque" dérive du grec "phos, photos", signifiant lumière, et de "voltaïque", tiré du nom du physicien italien Alessandro Volta, célèbre pour ses travaux sur l'électricité. L'énergie solaire photovoltaïque a été découverte en 1839 par le physicien français Antoine César Becquerel, né à Chatillon-Coligny (Loiret) le 7 mars 1788 et décédé à Paris le 18 janvier 1878. L'effet photovoltaïque permet la conversion de l'énergie lumineuse en électricité, reposant sur la technologie des semi-conducteurs. Il implique l'utilisation des photons pour libérer les électrons, créant ainsi une différence de potentiel entre les bornes de la cellule, générant un courant électrique continu.

Contrairement à d'autres sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire est disponible partout sur terre. En moyenne, l'Europe reçoit quotidiennement 3 kWh par mètre carré, tandis que les déserts les plus ensoleillés peuvent atteindre jusqu'à 7 kWh. Ainsi, il n'y a pas de contrainte de disponibilité pour cette source d'énergie. Les premières applications remontent aux années 60 avec l'équipement des satellites spatiaux, puis dans les années 1970, l'électrification des zones isolées a été initiée. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire répond à une demande croissante en énergie renouvelable et est appelée à jouer un rôle significatif dans l'approvisionnement énergétique mondial, d'autant plus si des méthodes de production à moindre coût sont développées.

La puissance des installations est exprimée en Watt-crête (Wc), représentant la puissance fournie par un module photovoltaïque sous un ensoleillement normalisé de 1000 W par mètre carré et à une température de 25°C. Le rendement électrique, quant à lui, est le rapport entre la puissance lumineuse incidente et la puissance électrique fournie. Les modules actuels offrent des rendements électriques compris entre 5 et 15%. Actuellement, le matériau semi-conducteur le plus largement

utilisé est le silicium, principalement sous forme de plaquettes, offrant le meilleur rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité.

I.5. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K [04].

✚ Diamètre de soleil $D_s = 1.39 \times 10^9 \text{ m}$.

✚ Diamètre de la terre $D_t = 1.27 \times 10^7 \text{ m}$.

✚ Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$.

- Le rayonnement direct.
- Le rayonnement diffus.
- Le rayonnement solaire réfléchi.
- Le rayonnement global [05].

I.6. Durée d'insolation:

durée d'ensoleillement ou durée d'insolation est un indicateur climatique qui mesure le temps pendant lequel un endroit, un lieu, est éclairé par le soleil sur une période donnée. Ceci exprime en quelque sorte la nébulosité et ne doit pas être confondu avec l'ensoleillement qui exprime la quantité d'énergie reçue par le rayonnement solaire sur une surface donnée et sur une certaine période. La durée d'ensoleillement est généralement exprimée en heures par an ou alors en une moyenne d'heures par jour[06]. La mesure exprimée en heures/an indique le niveau d'ensoleillement d'un emplacement en comparaison avec les autres endroits de la terre alors que la dernière mesure exprimée en heures/jour permet la comparaison du niveau d'ensoleillement dans les différentes saisons au même endroit. Plus le nombre d'heures d'ensoleillement est élevé, plus il fera beau, et plus les nuages et les brouillards se feront rares[07].

I.7. La cellule photovoltaïque:

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple: silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type P (exemple: silicium dopé au bore) La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du bore ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés (Figure I.1) [01].

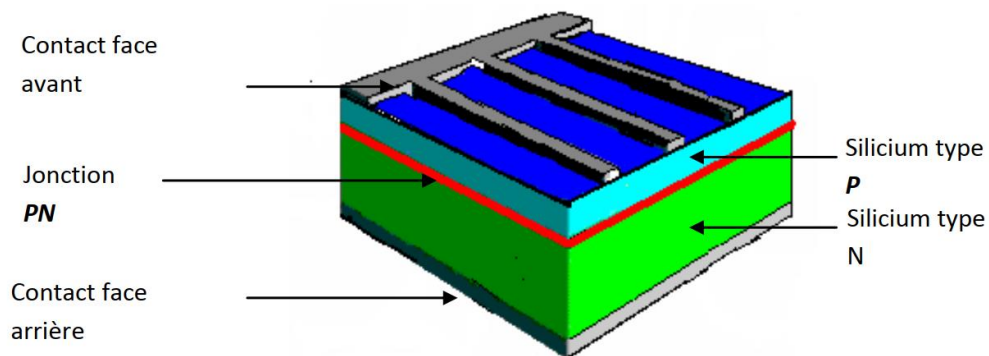


Figure I.1.Représentation schématique d'une cellule solaire [01].

✓ Principe de fonctionnement :

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable[04].

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph}=h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel .Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule [08].

✓ **Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propre cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 3 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules[09].

I.7..1. Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

I.7..2. Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important . Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire).

I.7..3. Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire) , mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé . Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres . L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [10].



(a) Cellule amorphe (b) Cellule monocristalline (c) Cellule poly-cristalline

Figure I.2. Les différents types de cellules photovoltaïque[09].

✓ **Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques:**

Tableau I.1. Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques [11]

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	35 ans
Avantages	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le mono-cristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse, prix moins élevé que les cristallins, Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux) , Prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

✓ **Rendement des différents types de cellules:**

Tableau I.2. Rendement des différents types de cellules.

Technologie de cellule	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe	13%	5-9%
Silicium poly-cristalline	19.8%	11-15%
Silicium mono cristalline	24.7%	13-17%

I.8. Panneaux solaires de troisième génération:

Les panneaux solaires de 3eme génération incluent une variété de technologies à couches minces, mais la plupart d'entre elles sont encore en phase de recherche ou de développement. Certains d'entre eux produisent de l'électricité en utilisant des matières organiques, d'autres utilisent des substances inorganiques (CdTe par exemple). Trois des conceptions les plus prometteuses : Bio-hybride, Cadmium Telluride, Module PV concentré[12].



Mono cristallin

poly cristallin

couche mince

Figure I.3. Types des modules PV[12] .

✓ Caractéristiques électriques typiques d'un GPV6-MSX60

Tableau I.3. Caractéristiques électriques typiques d'un GPV6-MSX60

Puissance maximale, $P_{\max}$	60W
Puissance minimal garantie	58W
Tension de $P_{\max}$, V_{mp}	17.1V
Tension de circuit-ouvert, V_{co}	21.1V
Courant optimal	3.5A
Courant de court-circuit, I_{sc}	3.8A
Coefficient de température en circuit-ouvert V_{oc} , Kv	$-(80 \pm 10)mv/C^0$
Coefficient de température en court-circuit I_{sc} , Ki	$(0.065 \pm 0.015)\%C^0$
Coefficient de température pour la puissance	$-(0.5 \pm 0.005)\%C^0$
Nombre de cellules	36

✓ Avantages et inconvénients d'une installation PV :

a. Avantages :

- ✓ D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [04] .

b. Inconvénients :

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Tributaire des conditions météorologiques.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [04].

I.9. Composants de base d'un système PV:

Un système PV comprend divers composants (voir la Figure I.4), y compris des cellules, des connexions électriques, un assemblage mécanique et un procédé de conversion d'énergie électrique.

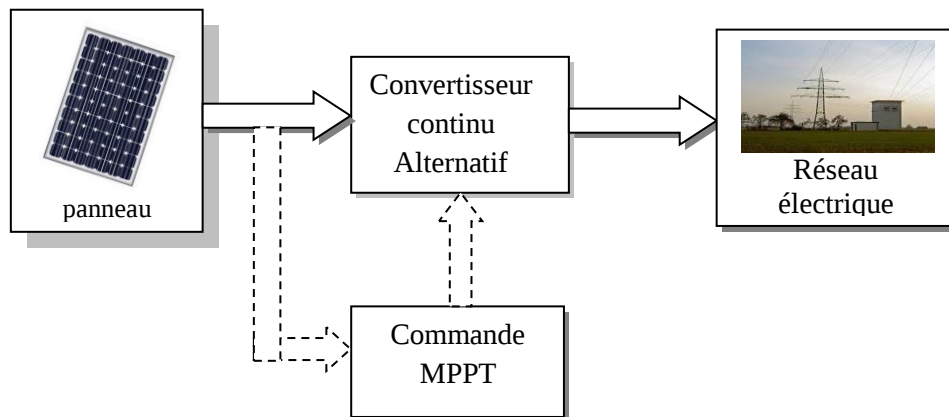


Figure I.4. Composants de base d'un système PV

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'histoire et le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, Nous avons également discuté de leurs avantages et inconvénients. Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

II.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous examinerons la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que du générateur photovoltaïque, qui est constitué de 36 cellules connectées en série et deux en parallèle, dans des conditions standard ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$). Nous analyserons l'impact de la température et de l'éclairement sur l'énergie générée par la cellule photovoltaïque, ainsi que l'effet de différentes configurations de regroupement de cellules (série, parallèle, série-parallèle) sur la production d'énergie. Dans le but de concevoir une interface de puissance plus efficace, le convertisseur Boost est sélectionné pour cette étude en raison de sa structure simple et de son rapport de transformation de tension le plus élevé par rapport aux autres topologies disponibles.

II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) :

Une cellule solaire constitue l'élément fondamental d'un panneau solaire. Un module photovoltaïque est créé en interconnectant plusieurs cellules solaires en série et en parallèle. Lorsqu'on examine une cellule solaire individuelle, elle peut être représentée par l'utilisation d'une source de courant, d'une diode et de deux résistances. Ce schéma est connu sous le nom de modèle de cellule solaire à une seule diode. Bien qu'il existe deux modèles de diodes, seul le modèle à une seule diode est pris en compte dans cette étude[13].

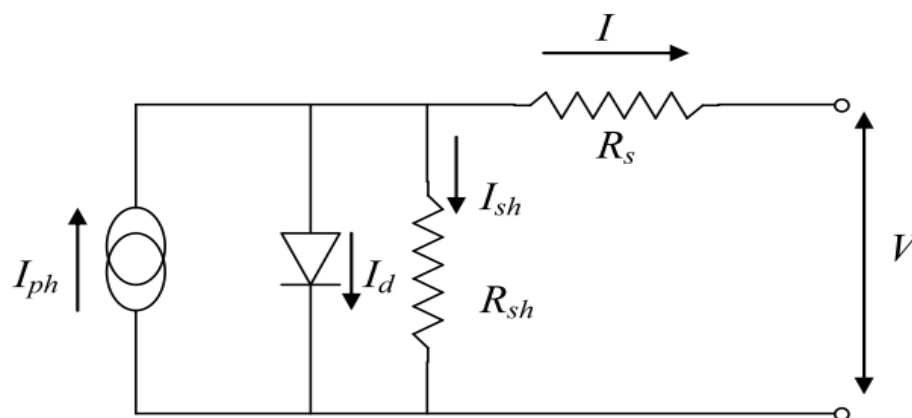


Figure II.1. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$.

- **La résistance en série** : elle symbolise la résistance interne inhérente à la cellule, influencée principalement par la résistance du semi-conducteur employé, la résistance de contact des grilles collectrices et la résistivité de ces grilles[14].
- **La résistance en dérivation** : elle résulte d'un courant de fuite au niveau de la jonction, son ampleur est conditionnée par la méthode utilisée pour la réalisation de cette jonction[15].

La cellule PV est généralement représentée par le modèle à une seule diode. La diode unique Le circuit équivalent d'une cellule solaire est illustré à la figure II.1. L'équation des caractéristiques I(V) de la cellule solaire est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ e^{\left[\frac{q(V+I.R_s)}{nKN_sT} \right]} - 1 \right\} - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad \text{II.1}$$

- **Le photo-courant** :

Le courant engendré par la lumière est principalement tributaire de l'exposition solaire et de la température opérationnelle de la cellule, laquelle est caractérisée par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_I(T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad \text{II.2}$$

I_{sc} [A] : est le courant de court-circuit à 25°C et 1KW/m².

K_I [A/K] : est le coefficient de température du courant de court-circuit.

T_{ref} [K] : est la température de référence.

G [W/m²] : est l'ensoleillement KW/m².

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

- **Le courant de saturation I_0** :

Le courant de diode des cellules solaires, également connu sous le nom de courant de saturation, connaît des variations en fonction de la température de la cellule, définie comme :

$$I_0 = I_{RS} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[\frac{qE_{g0}}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad \text{II.3}$$

Avec:

E_{g0} [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur.

- **Le courant de saturation inverse de la diode**

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{qV_{oc}}{KAT}\right)} - 1} \quad \text{II.4}$$

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

q [°C] : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °c).

Ns : Nombre de cellules connectées en série.

A : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).

K [J/K] : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

II.3. Performances du GPV :

II.3.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension :

Les Figures II.3. et Figure II.4. représentent la caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle sous conditions standards.

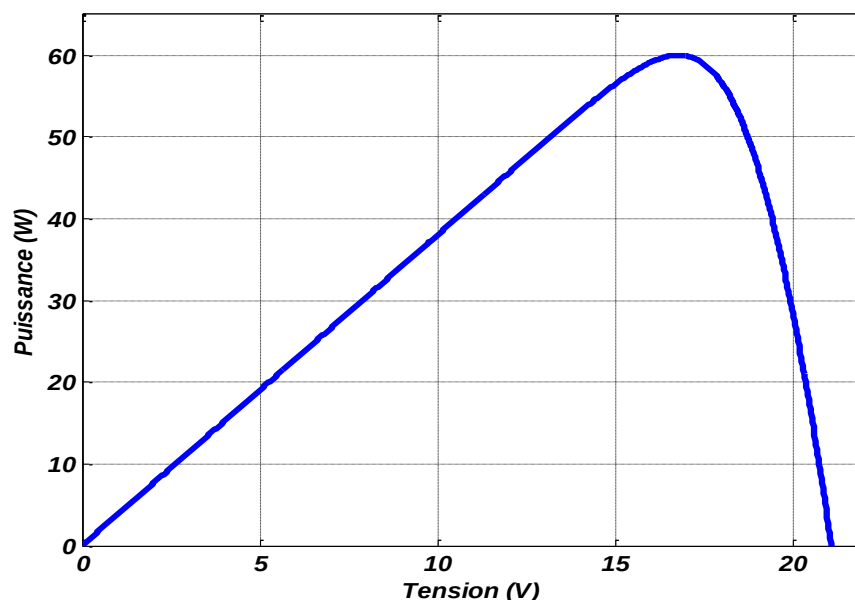


Figure II.2. Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque.

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par :

$$P_{max} = V_{op} \times I_{op} \quad \text{II.5}$$

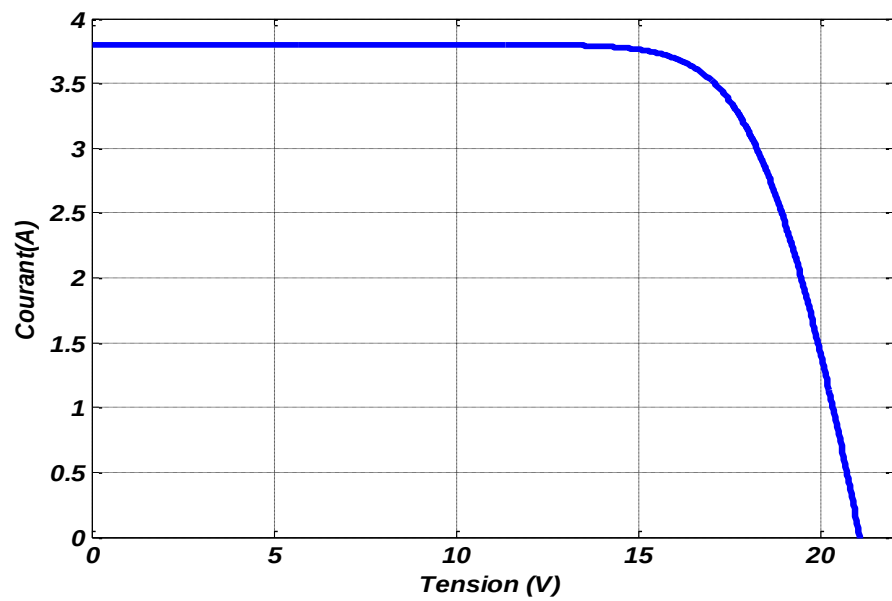


Figure II.3.Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

II.3.2. Influenced'éclairement:

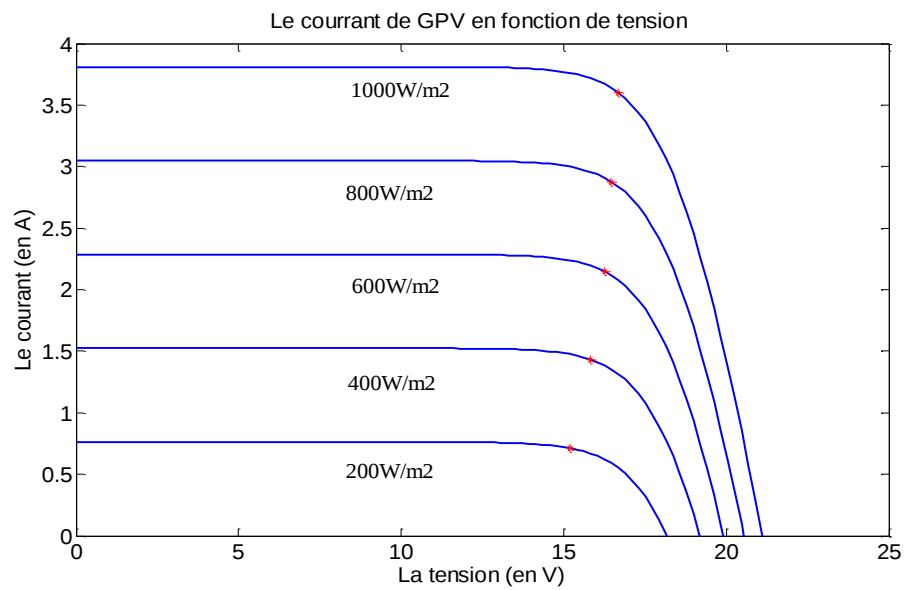


Figure II.4.Caractéristique $I(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$)

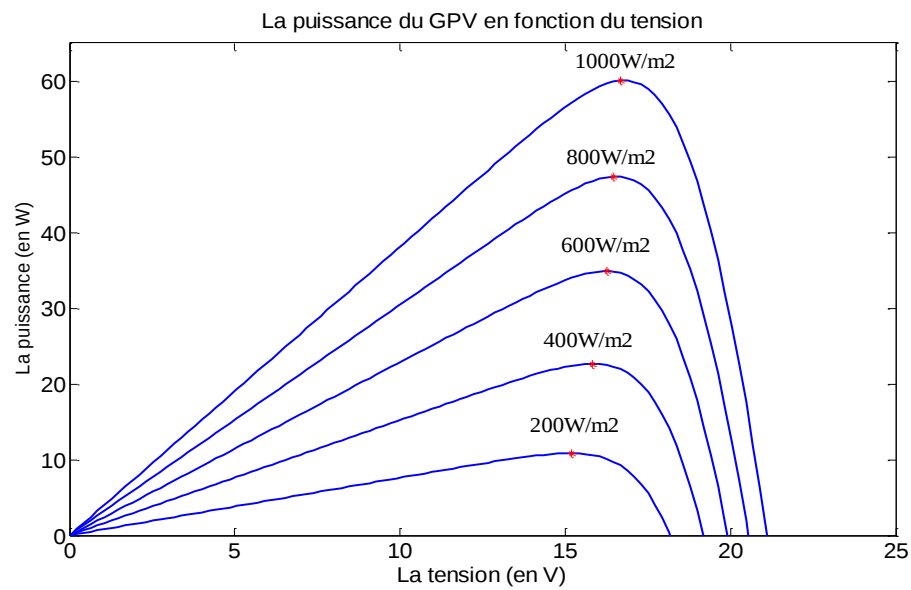


Figure II.5.Caractéristique $P(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$)

II.3.3. Influence de la température:

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule[13].

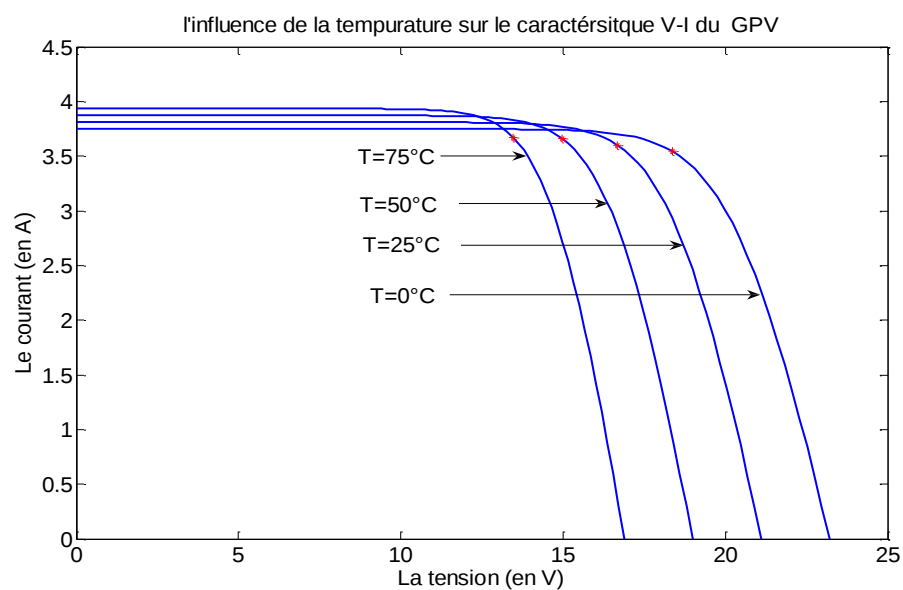


Figure II.6.Caractéristique $I(V)$ pour température.

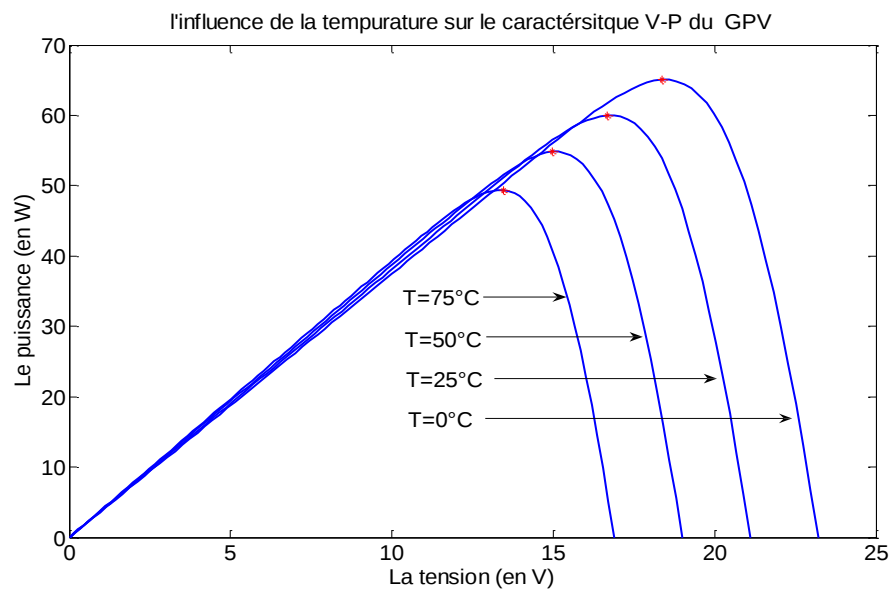


Figure II.7.Caractéristique P(V) pour température

II.4. Regroupement des Cellules Photovoltaïques :

II.4.1. Regroupement des Cellules Photovoltaïques en Série :

La figure II.8. montre la connexion série de trois cellules individuelles comme exemple. Le courant de générateur PV est équivalent au courant d'une cellule unique, mais la tension de sortie a augmenté, étant une addition des tensions de toutes les cellules dans la chaîne dans cet exemple $V_{GPV}=3 \times V_{cell}$ [16].

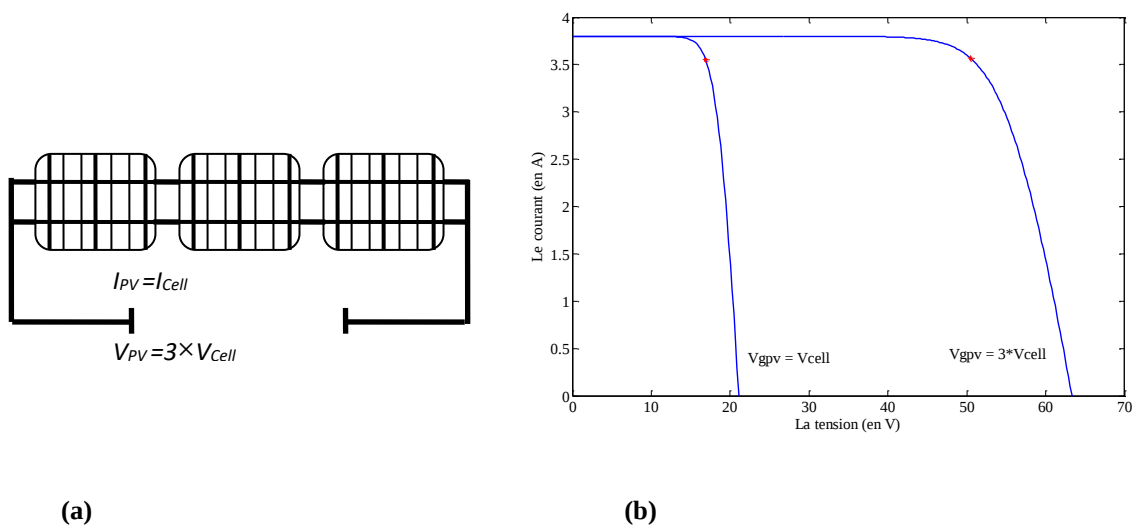


Figure II.8.(a)Connexion en série des cellules, (b) caractéristique courant tension[16]

II.4.2. Regroupement des cellules photovoltaïques en parallèle:

La figure II.9. montre la connexion en parallèle de trois cellules individuelles comme un exemple. Dans ce cas, le courant du groupe de cellules est équivalent à l'ajout du courant de chaque cellule (dans ce cas $3I_{cell}$), mais la tension reste équivalente à celle de la cellule unique[16].

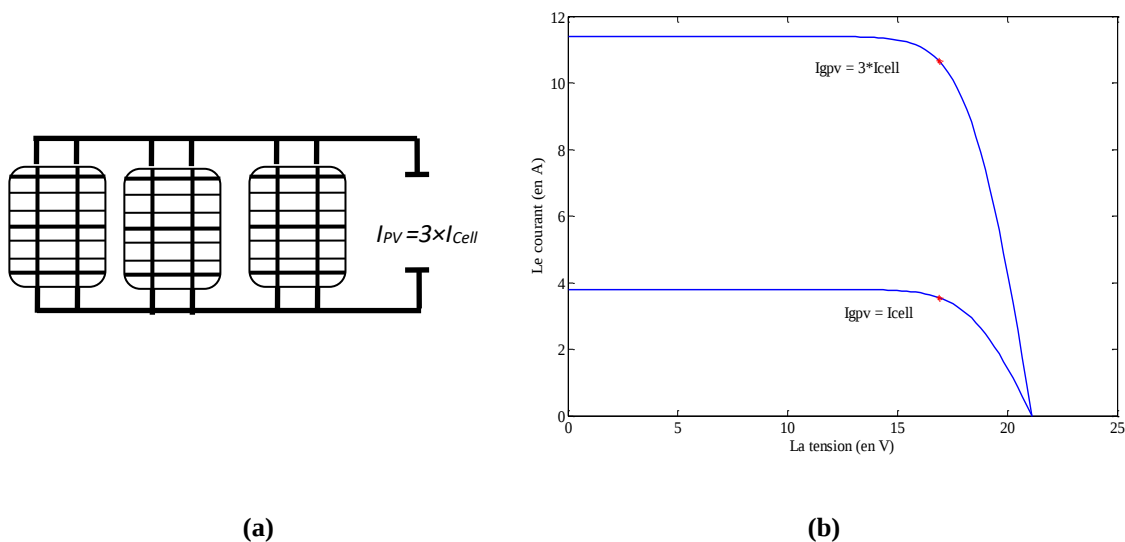


Figure II.9.(a)Connexion en parallèle de cellules, (b)Caractéristique courant tension.[16]

II.4.3. Regroupement mixte (série et parallèle) :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

II.5.L'Onduleur:

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [17].

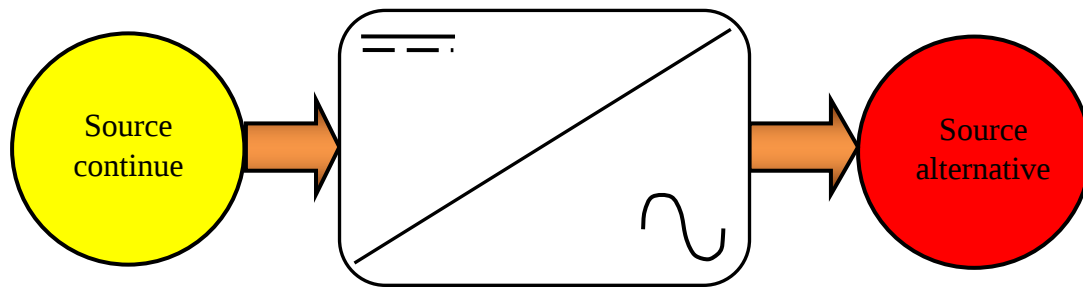


Figure II.10. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

II.6. Modélisation d'onduleur de tension :

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure II.11. Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandé, le bras d'onduleur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension.

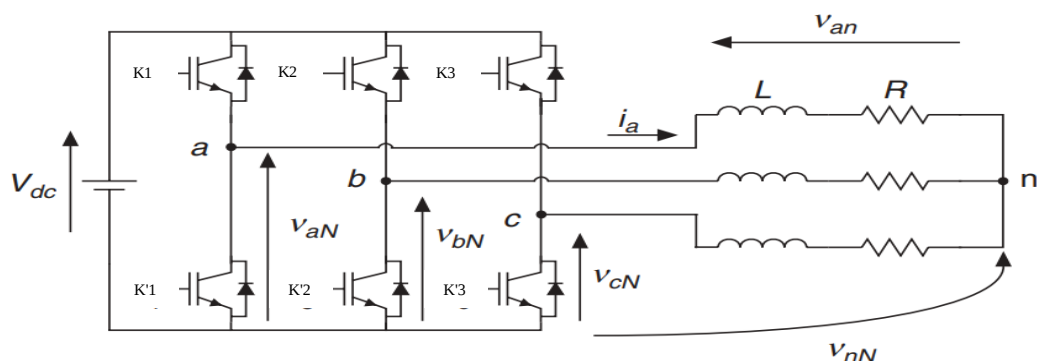


Figure II.11 Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension

Pour un convertisseur à 2-niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux-niveaux de tensions:

✓ Séquences 1 : Génération du niveau maximum :

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est passant et K'1 est bloqué comme le montre la figure II.12.(a). La tension de sortie V_{oa} est :

$V_{oa} = +U_{c1}$. La tension inverse appliquée à l'interrupteur K'1 vaut : $V_{K'1} = -U_{c2}$.

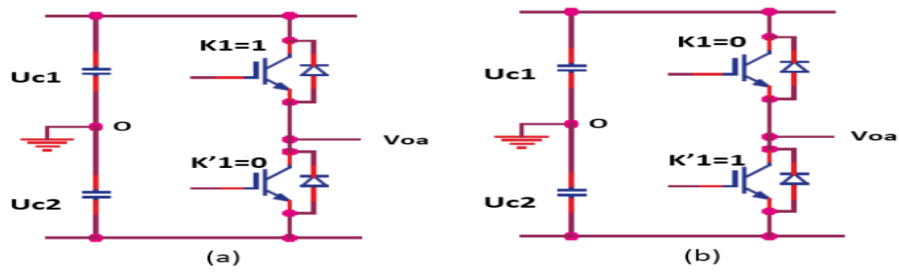


Figure II.12.onduleur à 2 niveaux

✓ Séquences 2 : Génération du niveau minimum:

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloqué et K'1 est passant comme le montre la figure II.12.(b). La tension de sortie V_{oa} est :

$V_{oa} = -U_{c2}$. La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1 vaut : $V_{K1} = +U_{c1}$. Les 2 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau II.1

Tableau II.1. États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux

K1	K'1	V_a
1	0	$+U_{c1}$
0	1	$-U_{c2}$

l'état de commutation des interrupteurs de puissance $S_x (x = 1 \dots 6)$.

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{1on} \text{ et } S_{4off} \\ 0 & \text{si } S_{1on} \text{ et } S_{4on} \end{cases} \quad \text{II.6}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{2on} \text{ et } S_{5off} \\ 0 & \text{si } S_{2on} \text{ et } S_{5on} \end{cases} \quad \text{II.7}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{1on} \text{ et } S_{6off} \\ 0 & \text{si } S_{1on} \text{ et } S_{6on} \end{cases} \quad \text{II.8}$$

Ces signaux de commutation définissent la valeur des tensions de sortie et V_{dc} est la tension de la source.

$$\begin{cases} V_{an} = S_a * V_{dc} \\ V_{bn} = S_b * V_{dc} \\ V_{cn} = S_c * V_{dc} \end{cases} \quad \text{II.9}$$

Considérant le vecteur unitaire a qui représente le déphasage de 120° entre les phases, le vecteur tension de sortie peut être défini comme :

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\sqrt{3}/2 \quad \text{II.10}$$

$$V = \frac{2}{3}(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad \text{II.11}$$

Où V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions phase-neutre (N) de l'onduleur.

En considérant toutes les combinaisons possibles des signaux de déclenchement S_a , S_b et S_c , huit états de commutation et par conséquent huit vecteurs de tension sont obtenus, comme indiqué dans le tableau II.2. dans la figure II.13. notez que $V_0 = V_7$, résultant en un ensemble fini de seulement sept vecteurs de tension différents dans le plan complexe.

Tableau II.2. Etats de commutation.

S_a	S_b	S_c	V
0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$-\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	0

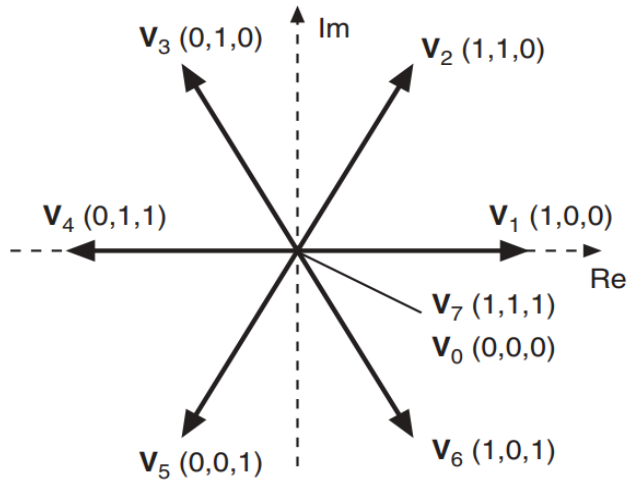


Figure II.13.1 Présentation du vecteur de tension.

II.7. Modélisation d'onduleur de tensionréseau :

La capacité C_{dc} est l'élément principal de stockage de l'énergie et l'inductance L_f est utilisée pour le couplage des deux sources de tension et le filtrage du courant généré par l'onduleur. Dans ce modèle, on considère que tous les éléments sont linéaires et invariants dans le temps. De même, les interrupteurs et les sources de tensions sont considérés comme idéaux [17].

Définitions des vecteurs :

$v_{s(a,b,c)} = [v_{sa} v_{sb} v_{sc}]^T$: le vecteur des tensions de la source.

$v_{f(a,b,c)} = [v_{fa} v_{fb} v_{fc}]^T$: le vecteur de tension de l'onduleur relativement au nœud N

$v_{f(a,b,c)K} = [v_{faK} v_{fbK} v_{fcK}]^T$: le vecteur des tensions de l'onduleur relativement au nœud K.

$i_{s(a,b,c)} = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T$: le vecteur des courants de source d'alimentation.

$i_{c(a,b,c)} = [i_{ca} i_{cb} i_{cc}]^T$: le vecteur des courants de la charge non linéaire.

$i_{f(a,b,c)} = [i_{fa} i_{fb} i_{fc}]^T$: le vecteur des courants du filtre.

v_{dc} : la tension de la capacité de stockage.

v_{Nk} : la tension entre les nœuds N et K.

En appliquant la loi des mailles, les expressions du vecteur $v_{f(a,b,c)}$ sont définies par :

$$v_{fa} = v_{sa} - L_f \frac{di_{fa}}{dt} - Ri_{fa} = S_a V_{dc} - v_{NK} \quad \text{II.12}$$

$$v_{fb} = v_{sb} - L_f \frac{di_{fb}}{dt} - Ri_{fb} = S_b V_{dc} - v_{NK} \quad \text{II.13}$$

$$v_{fc} = v_{sc} - L_f \frac{di_{fc}}{dt} - Ri_{fc} = S_c V_{dc} - v_{NK} \quad \text{II.14}$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad \text{II.15}$$

Où Représente la résistance interne de l'inductance de couplage L_f .
En faisant la somme des trois premières équations de II.16. sachant les conditions sur le système de II.15.

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad \text{II.16}$$

$$v_{NK} = \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \cdot V_{dc} \quad \text{II.17}$$

En introduisant II.17., les équations II.16.précédentes peuvent être mises sous forme de système d'état comme suit:

$$\frac{di_{fa}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fa} - \frac{V_{dc}}{L_f} \left(S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) + \frac{1}{L_f} v_{sa} \quad \text{II.18}$$

$$\frac{di_{fb}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fb} - \frac{V_{dc}}{L_f} \left(S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) + \frac{1}{L_f} v_{sb} \quad \text{II.19}$$

$$\frac{di_{fc}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fc} - \frac{V_{dc}}{L_f} \left(S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) + \frac{1}{L_f} v_{sc} \quad \text{II.20}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} [S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc}] \quad \text{II.21}$$

Du système d'équations II.16.il est possible de définir de nouvelles fonctions de commande (u_a, u_b, u_c) tel que :

$$u_a = \left(S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \quad \text{II.22}$$

$$u_b = \left(S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \quad \text{II.23}$$

$$u_c = \left(S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \quad \text{II.24}$$

Il est important de souligner que les fonctions logiques précédentes S_j représentent les tensions v_{fjk} normalisées relativement à la tension du bus continu V_{dc} , tandis que les nouvelles fonctions de commande représentent les tensions normalisées v_{fj} qui sont référées au nœud N. En examinant l'équation précédente II.17. il est possible d'exprimer les fonctions logiques et les fonctions de commandes sous une forme plus compacte :

$$u_{abc} = u_{Ts} S_{abc} \quad \text{II.25}$$

Avec :

$$S_{abc} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.26}$$

$$u_{Ts} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

En considérant les huit combinaisons possibles des trois interrupteurs,

Tableau II.3. peut être déduit.

S_a	S_b	S_c	$(S_a+S_b+S_c)/3$	V_a	V_b	V_c
0	0	0	0 V_{dc}	0 V_{dc}	0 V_{dc}	0 V_{dc}
1	0	0	1/3 V_{dc}	2/3 V_{dc}	-1/3 V_{dc}	-1/3 V_{dc}
1	1	0	2/3 V_{dc}	1/3 V_{dc}	1/3 V_{dc}	-2/3 V_{dc}
0	1	0	1/3 V_{dc}	-1/3 V_{dc}	2/3 V_{dc}	-1/3 V_{dc}
0	1	1	2/3 V_{dc}	-2/3 V_{dc}	1/3 V_{dc}	1/3 V_{dc}
0	0	1	1/3 V_{dc}	-1/3 V_{dc}	-1/3 V_{dc}	2/3 V_{dc}
1	0	1	2/3 V_{dc}	1/3 V_{dc}	-2/3 V_{dc}	1/3 V_{dc}
1	1	1	1 V_{dc}	0 V_{dc}	0 V_{dc}	0 V_{dc}

$$x_{\alpha\beta} = \alpha\beta_{Tabc} \ x_{abc} \quad \text{II.28}$$

$$x_{abc} = abc_{T\alpha\beta} \ x_{\alpha\beta} \quad \text{II.29}$$

Avec :

$$\alpha\beta_{Tabc} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{II.30}$$

$$abc_{T\alpha\beta} = \frac{2}{3k} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{II.31}$$

$$\frac{di_{f\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{f\alpha} - \frac{V_{dc}}{L_f} u_{\alpha} + \frac{1}{L_f} v_{s\alpha} \quad \text{II.32}$$

$$\frac{di_{f\beta}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{f\beta} - \frac{V_{dc}}{L_f} u_{\beta} + \frac{1}{L_f} v_{s\beta} \quad \text{II.33}$$

$$i_{f\alpha}^p(k+1) = \left(1 - T_s \frac{R}{L_f}\right) i_{f\alpha}(K) + \frac{T_s}{L_f} (V_{s\alpha} - u_{\alpha}(K)) \quad \text{II.34}$$

$$i_{f\beta}^p(k+1) = \left(1 - T_s \frac{R}{L_f}\right) i_{f\beta}(K) + \frac{T_s}{L_f} (V_{s\beta} - u_{\beta}(K)) \quad \text{II.35}$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} \quad \text{II.36}$$

II.8. Fonction du coût pour le contrôle de l'onduleur :

L'objectif du schéma de contrôle de puissance est de minimiser l'erreur entre les puissance mesurés et les valeurs de référence. Cette exigence peut être formulée sous la forme d'une fonction de coût. La fonction de coût est exprimée en coordonnées orthogonales et mesure l'erreur entre les valeurs de référence et les puissance prédits:

$$g = |P_{\alpha}^* (k+1) - P_{\alpha}^p (k+1)| + |Q_{\beta}^* (k+1) - Q_{\beta}^p (k+1)| \quad \text{II.37}$$

où $P_{\alpha}^p(k+1)$ et $Q_{\beta}^p(k+1)$ sont les parties réelle et imaginaire du vecteur puissance de charge prédit $P^p(k+1)$ pour un vecteur de tension donné. Cette prédiction est obtenue grâce au modèle de charge. Les puissances de référence $P_{\alpha}^*(k+1)$ $Q_{\beta}^*(k+1)$ représentent les parties réelle et imaginaire du vecteur puissance de référence $P^*(K+1)$. Pour simplifier, nous supposons que ce puissance de référence ne change pas significativement durant un intervalle d'échantillonnage, et nous considérerons donc que $P^*(K+1) = P^*(K)$. Cette hypothèse peut introduire un retard d'un échantillon dans le suivi de la référence, ce qui n'est pas problématique si une fréquence d'échantillonnage élevée est utilisée.

II.9. Conclusion :

Ce chapitre présente une analyse détaillée et une modélisation explicite des divers éléments constituant la chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau électrique. Ces éléments comprennent le générateur photovoltaïque et les convertisseurs associés.

Chapitre III

Fonctionnement d'une chaîne de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique

III.1. Introduction :

Les stratégies de gestion de l'énergie photovoltaïque et du système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration du rendement du générateur photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du générateur PV dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la variation du point de puissance maximal[18].

III.2. Principe de la recherche du point de puissance maximal:

Les modules photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire Des lois de commandes spécifiques existent pour amener ses dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles sont les raisons de ce changement. Pour le cas des sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature «RECHERCHEDU POINT DE PUISSANCE MAXIMUM» ou bien «MAXIMUM POWER POINT TRACKING» (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance[13].

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnementquelles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charge qui peuvent survenir à tout moment.

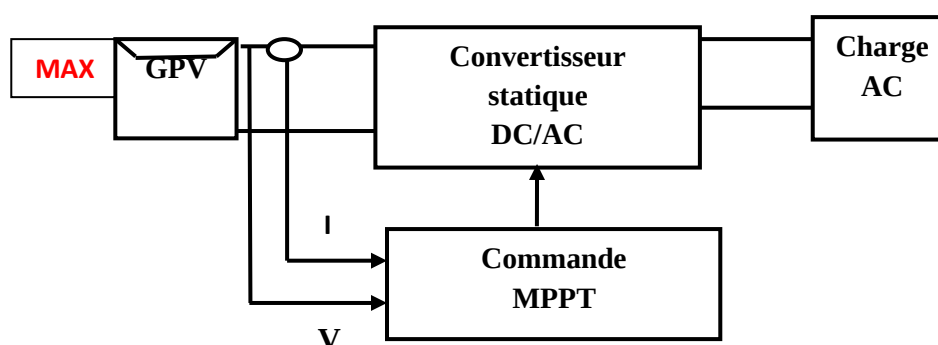


Figure III.1. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque par Une commande MPPT sur charge AC

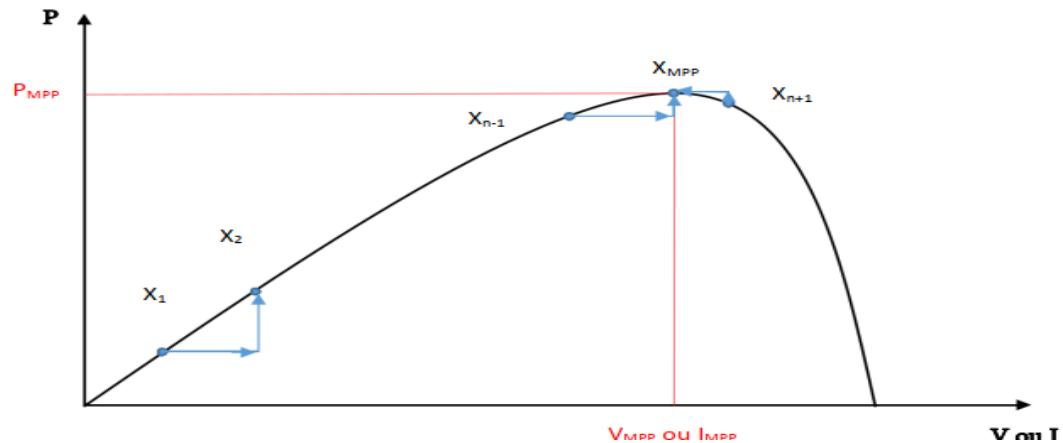


Figure III.2. Principe de la commande MPPT

III.3. Techniques de poursuite du point de puissance maximale:

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement en MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes d'optimisation sont plus ou moins performantes basées sur les propriétés du générateur photovoltaïque[19].

III.3.1. Les premiers types de technique MPPT:

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure III.2 et peut être implanté entièrement en numérique [20].

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_n à partir des mesures de IPV et VPV, et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement[10].

III.3.2. Principe des techniques "Perturb and Observe" (P&O):

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure III.3, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv} V_{pv}$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure 3.4 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après .

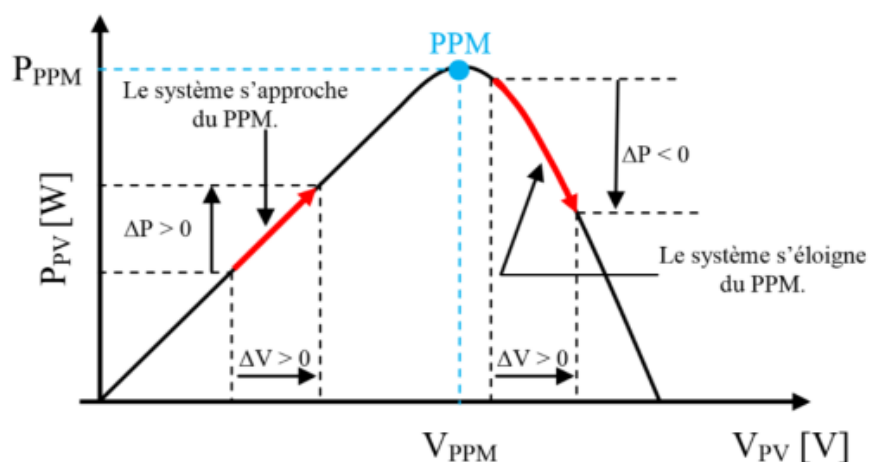


Figure III.3. Recherche de PPM par la Méthode (P&O)

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique.

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique[20].

III.4. Algorithme Perturbation et Observation (P&O):

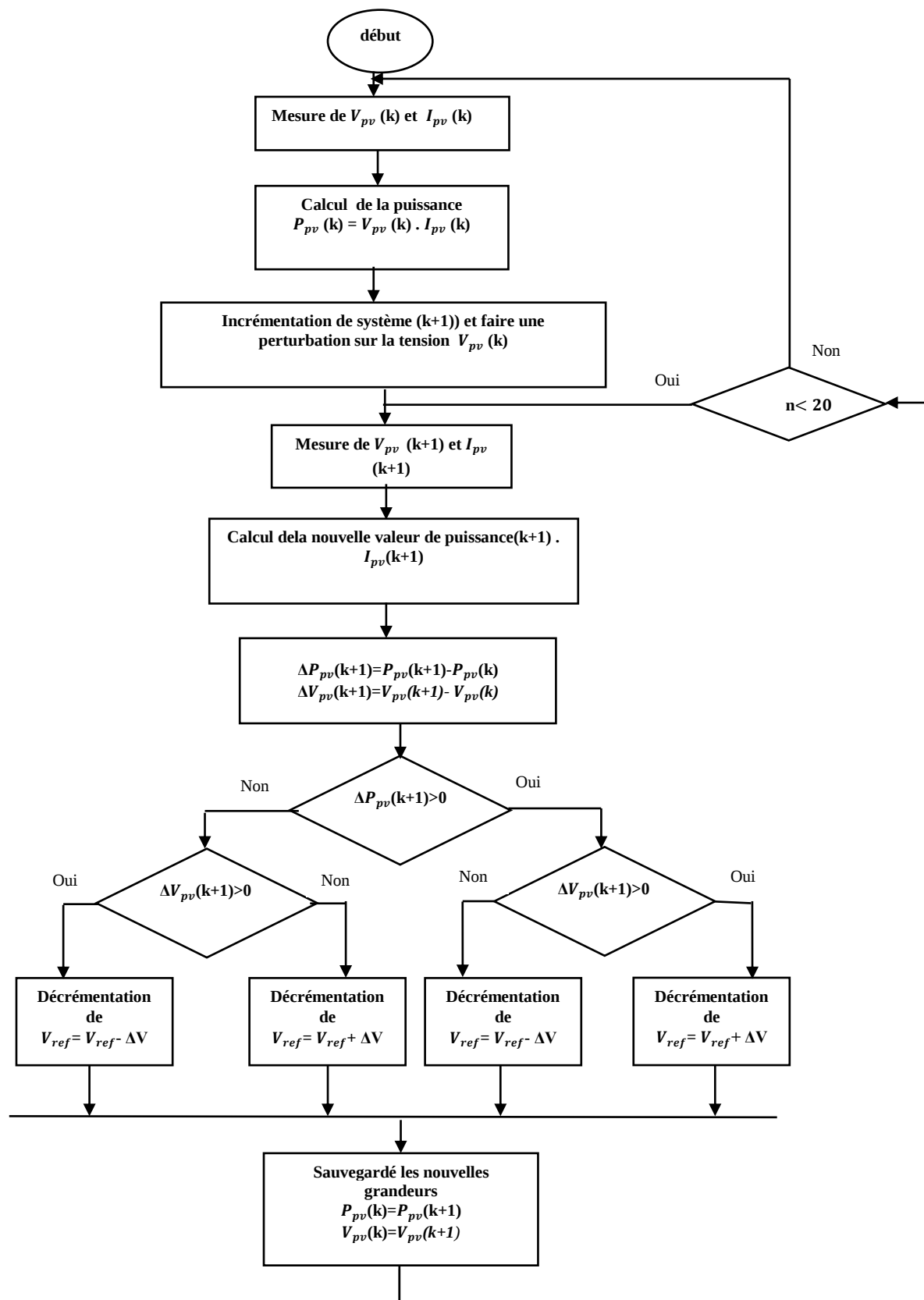


Figure III.4. Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

Tableau III.1. Résumer de l'algorithme P&O.

Perturbation de la tension	Changement dans la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Negative	Negative
Négatif	Positive	Negative
Négatif	Negative	Positive

III.5. Commande prédictive à états finis (FS-MPC) :

La stratégie de la commande prédictive est très similaire à la stratégie utilisée pour la conduite automobile. Le conducteur connaît la trajectoire de référence désirée (le tracé de la route) sur un horizon de commande fini (celui du son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions.

Cette conception consiste à prendre en compte, à l'instant présent, le comportement futur, en utilisant explicitement un modèle numérique du système afin de prédire la sortie dans le futur sur un horizon fini. Cependant, il n'existe pas une stratégie unique mais plutôt tout un ensemble de méthodes de commande prédictive, assez similaires, bâties autour de principes communs, mais présentant néanmoins quelques différences dans l'interprétation des concepts clés.

Une des richesses de ces méthodes provient du fait que, pour une consigne connue ou pré calculée (au moins sur un certain horizon), il est ainsi possible d'exploiter pleinement les informations de trajectoires prédéfinies situées dans le futur, puisque le but de la stratégie prédictive est de faire coïncider la sortie du processus avec cette consigne dans le futur, sur un horizon fini, en accord avec le diagramme temporel de la Figure III.5. c'est pourquoi cette méthode apparaît tout indiquée dans les problèmes de poursuite et plus spécialement de suivi de trajectoire. C'est le cas de nombreux servomécanismes et notamment de la commande d'axes en machine-outil ou en robotique, domaines où les trajectoires à suivre sont parfaitement connues [13].

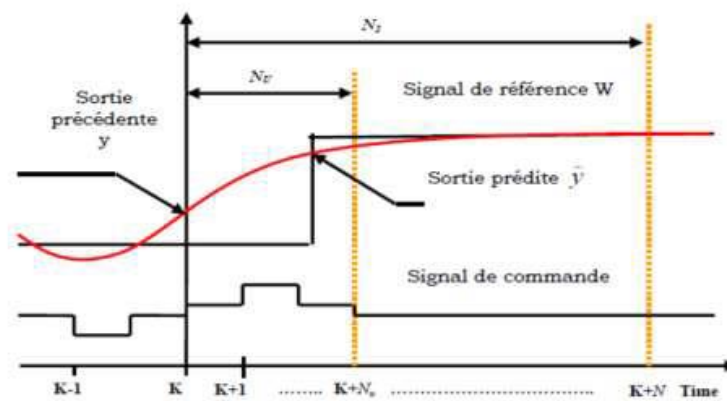


Figure III.5. Schéma de Principe de la commande prédictive

III.6. Simulation du system photovoltaïque avec onduleur commandé en MPPT :

III.6.1. Schéma du montage:

L'installation suivante est constituée d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur alternatif visant à convertir l'énergie continue produite en énergie alternative et à la connecter directement au réseau électrique.

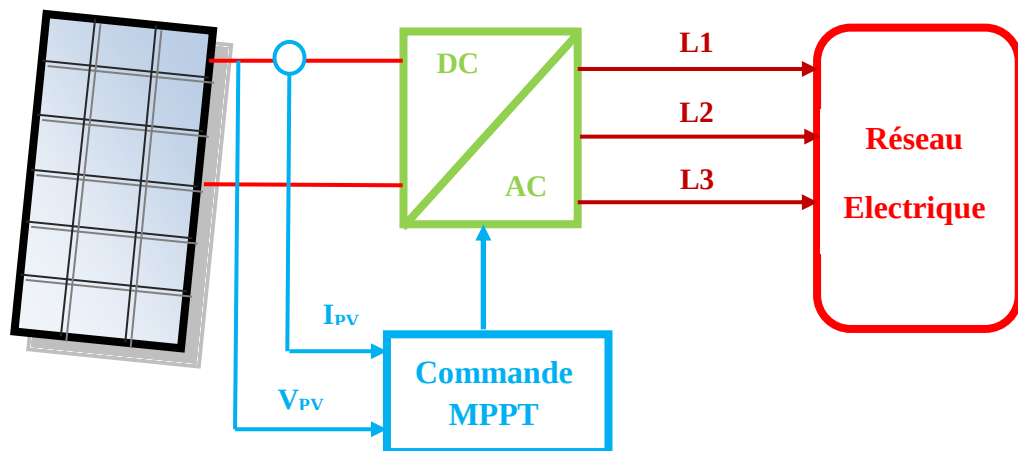


Figure III.6. Schéma du Montage du système photovoltaïque connecté au réseau

III.7. Résultat de simulation

Les résultats de la simulation à l'aide de Matlab/Simulink pour la topologie modifiée avec FS-MPC sont fournis pour montrer l'efficacité et les performances du contrôle.

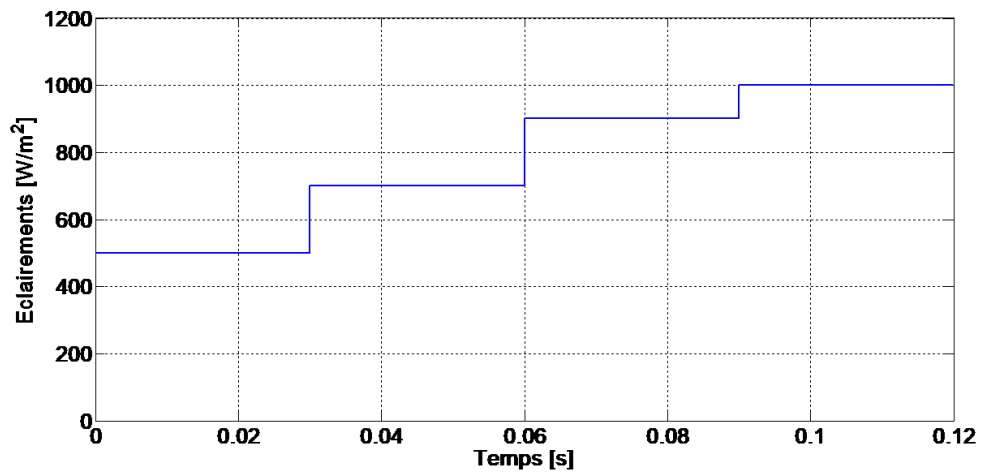


Figure III.7. Profile de variation d'éclairement (25°C)

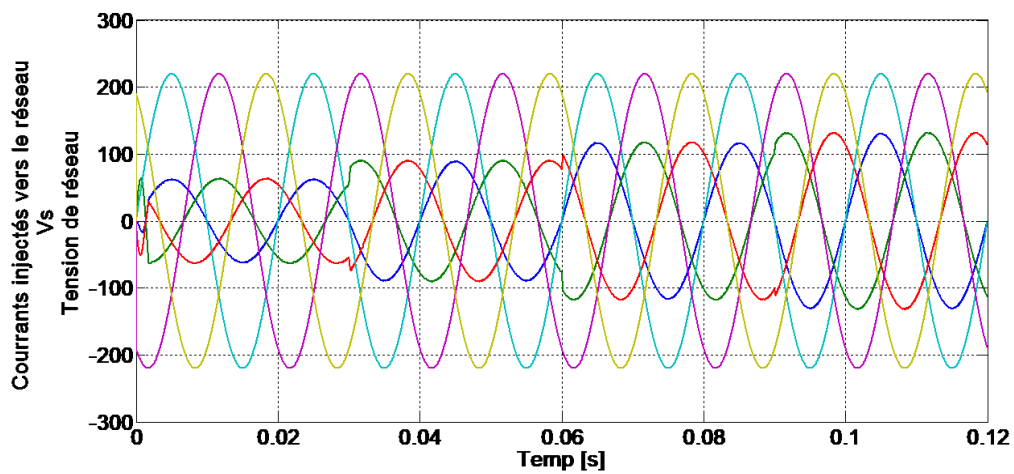


Figure III.8. Courants injectés dans le réseau électrique

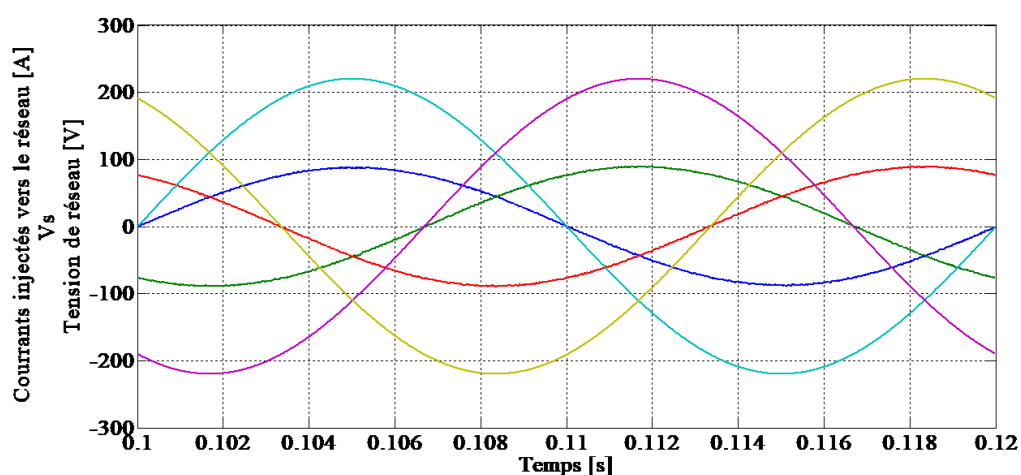


Figure III.9. courants injectés dans le réseau électrique (en phase)

En observant cette courbe, nous constatons que les courants intégrés dans le réseau sont synchronisés avec la tension et présentent des variations similaires lors des changements liés à l'éclairement.

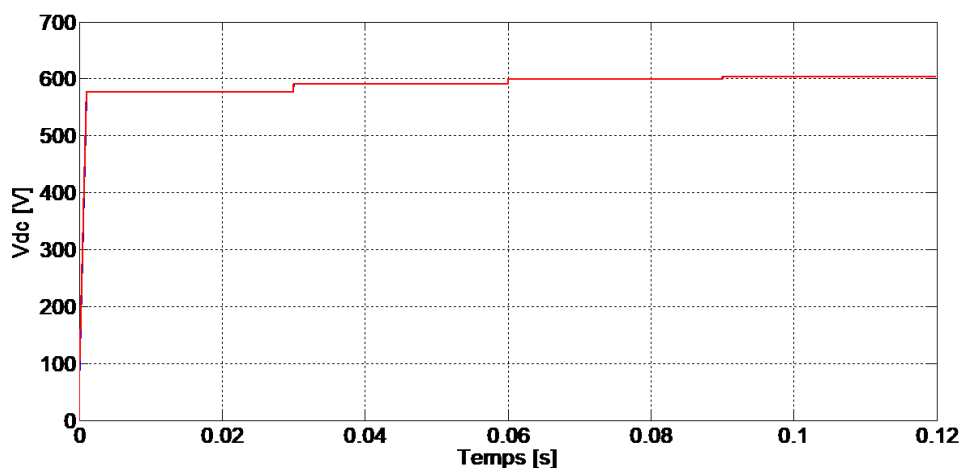
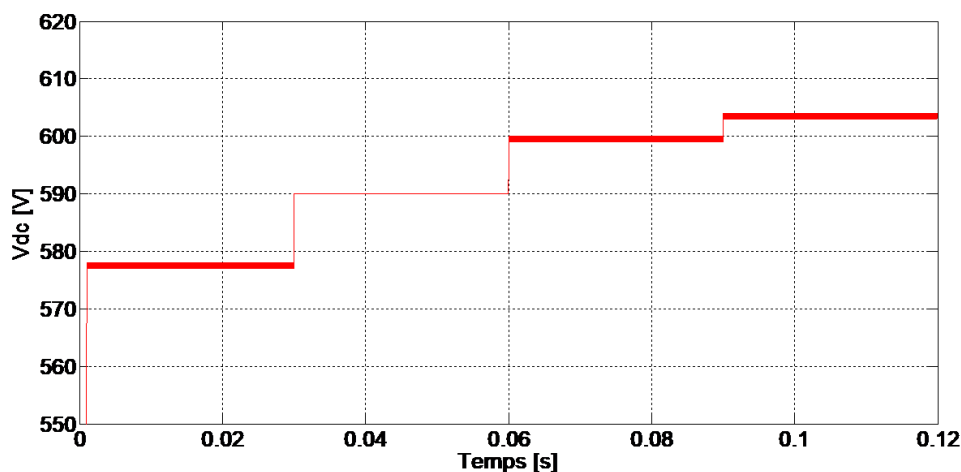


Figure III.10. Réponse de la tension de bus continue en fonction de temps et la variation d'éclairement

Figure III.11. Zoom sur la réponse de bus continue V_{dc}

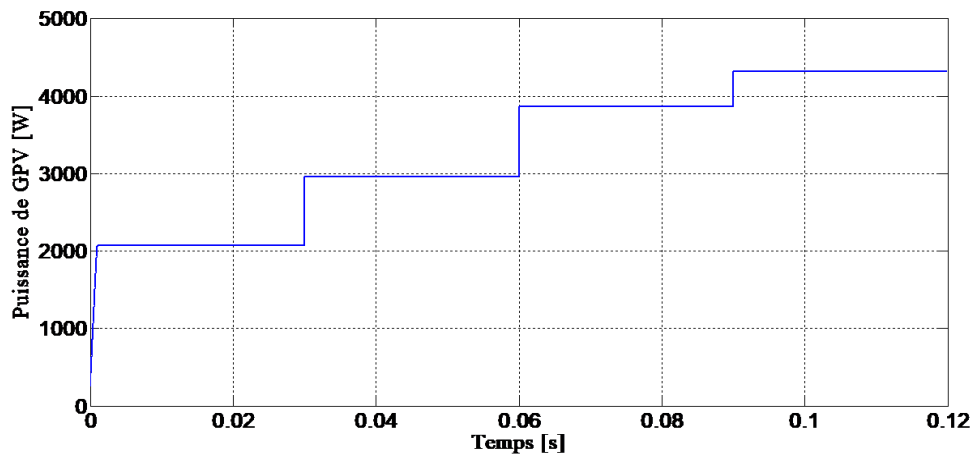


Figure III.12. Puissance de sortie du GPV

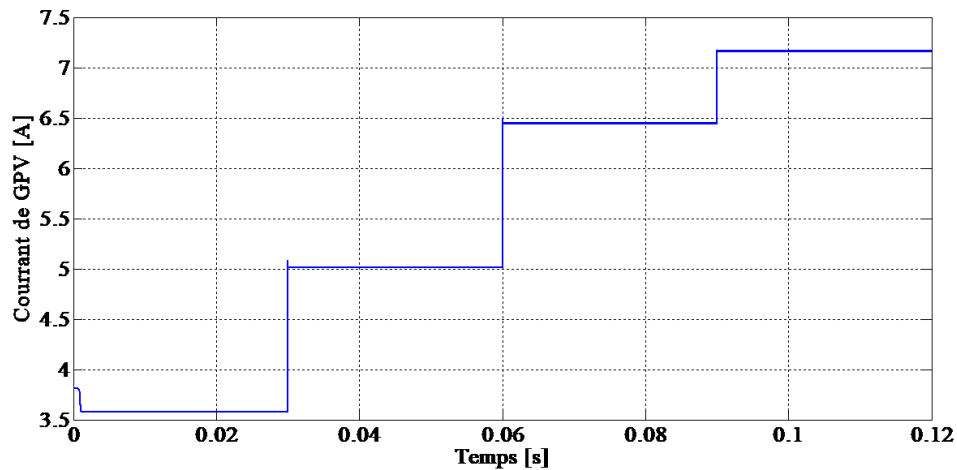


Figure III.13. Courant de sortie de GPV

La réponse du système à un changement rapide d'irradiance (passant de 500W/m^2 à 700W/m^2 , puis à 900W/m^2 , et enfin à 1000W/m^2) est illustrée dans la figure III.7 à une température de 25°C . On observe que le courant injecté dans le réseau électrique varie en fonction de l'irradiance, suivant une dynamique similaire, et qu'il est synchronisé avec la tension du réseau.

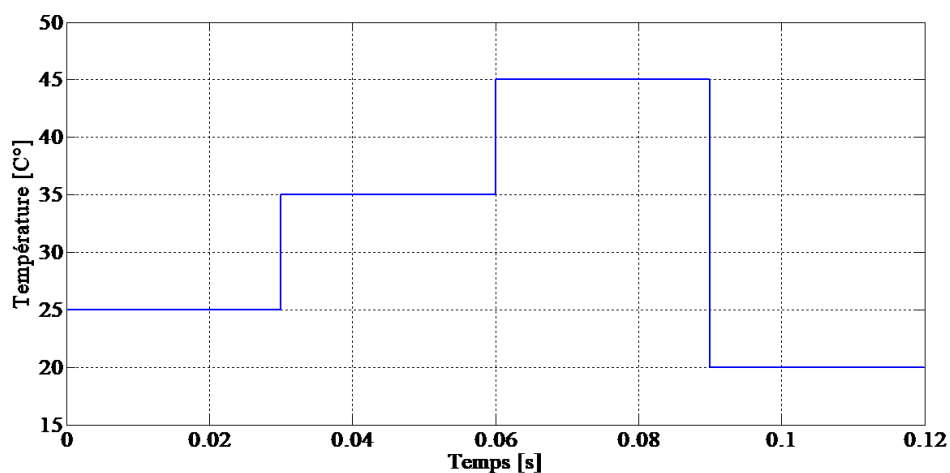


Figure III.14. Profile de variation dans la température.

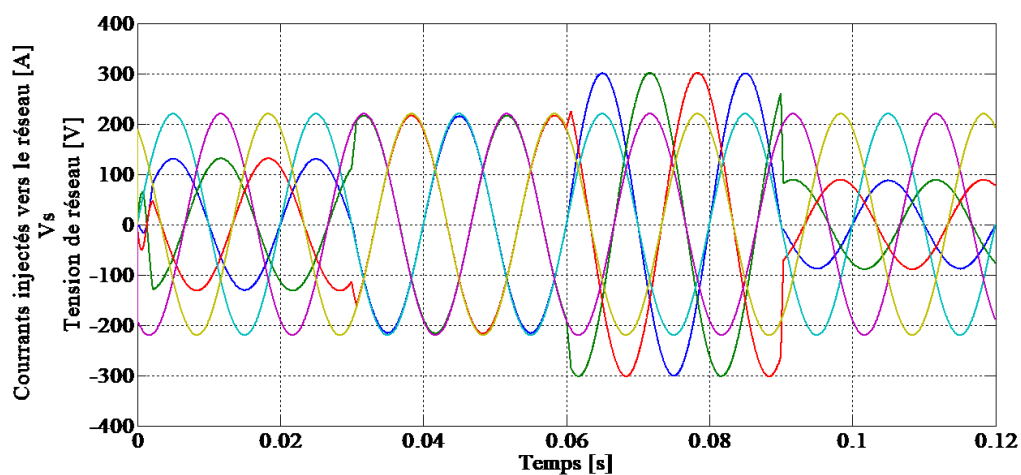


Figure III.15. Courants injectés dans le réseau électrique

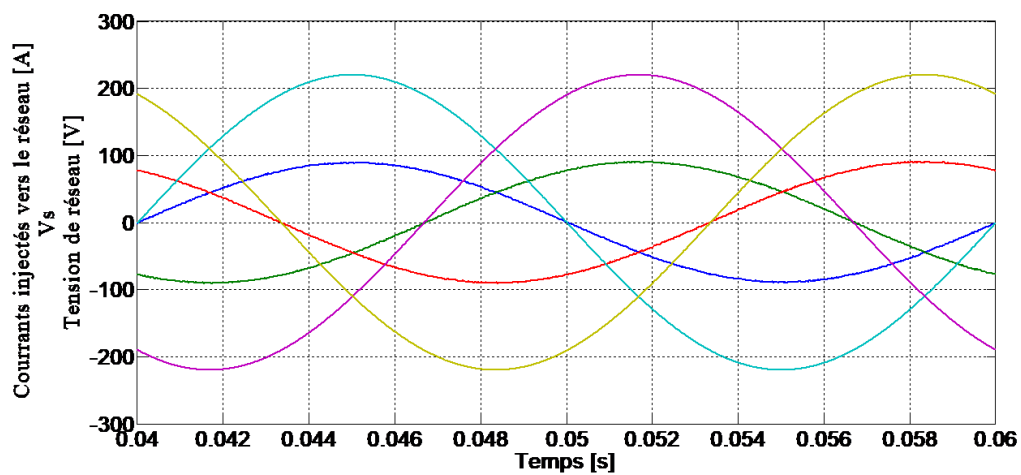


Figure III.16. Zoom sur les courants injectés dans le réseau électrique

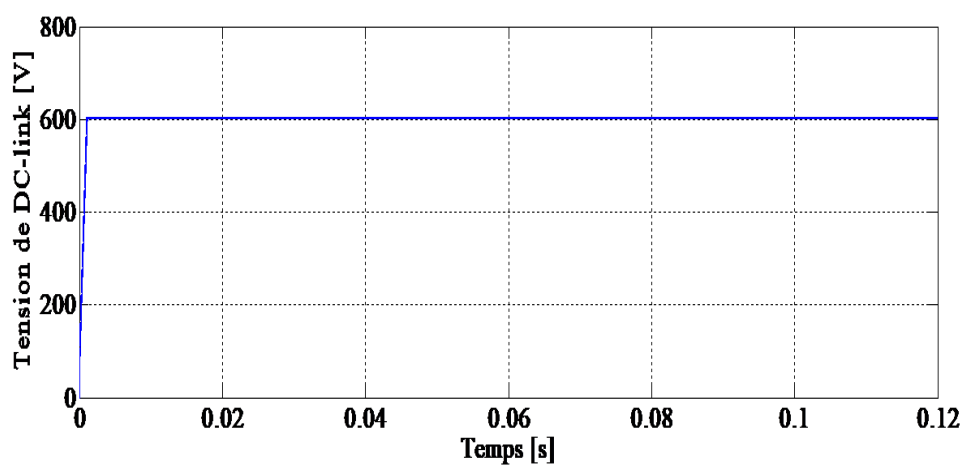


Figure III.17. Réponse du bus continue

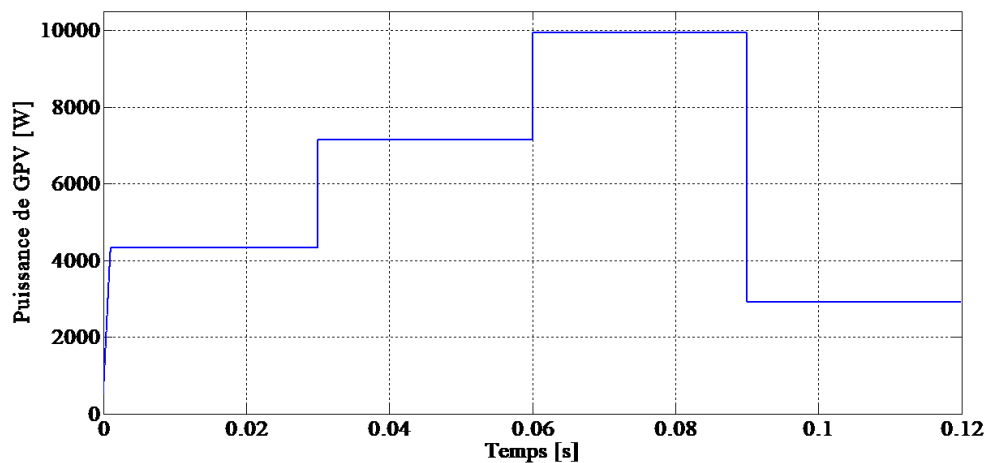


Figure III.18. Puissance du GPV

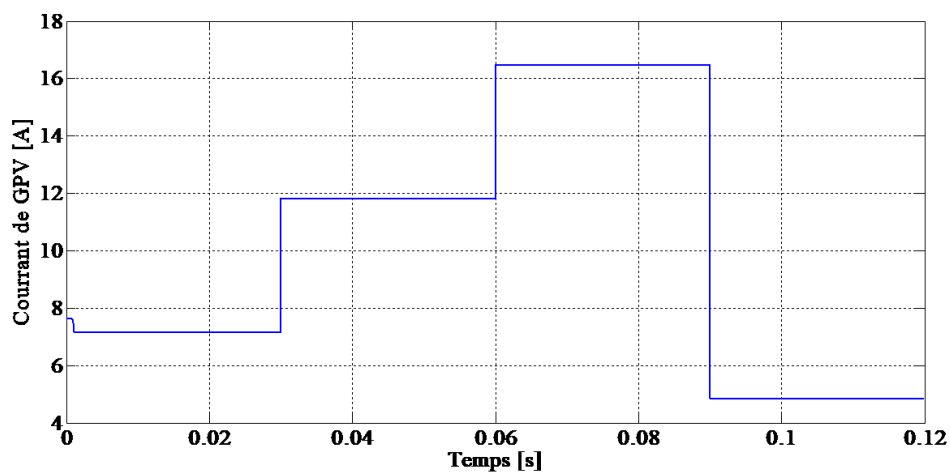


Figure III.19. Courant du GPV

Dans ce projet de recherche, nous menons des simulations à l'aide de Matlab afin d'analyser la réactivité du système face à une variable spécifique. Lorsqu'un changement rapide de température survient (passant de 25°C à 35°C, puis à 45°C, et enfin à 20°C) à un éclairement $E=1000\text{w/m}^2$, nous observons la réponse instantanée du système à chaque variation. Nous constatons que le courant varie directement en fonction de la température, tandis que la tension varie de manière inversement proportionnelle. Cette variation entraîne des fluctuations dans la puissance du système.

III.8. Conclusion :

Une application intéressante dans le domaine de l'énergie solaire est l'intégration de l'énergie générée par un générateur photovoltaïque. Dans un réseau triphasé, il représente un exemple d'actualité et l'un des domaines de recherche les plus importants de ces derniers temps. Dans ce système, nous avons choisi la technologie de contrôle "Perturbeand Observe (P&O)" pour capturer la puissance maximale du GPV et Contrôle FS-MPC dans le but de pomper de manière optimale la puissance maximale dans le réseau électrique.

Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque est considérée comme l'une des alternatives les plus prometteuses parmi les énergies renouvelables. Cependant, son développement est freiné par le coût d'installation élevé des panneaux solaires, dont la technologie reste coûteuse, et par le rendement relativement faible des cellules semi-conductrices. Cette thèse se concentre sur l'amélioration de la production d'énergie photovoltaïque et sur sa transmission au réseau électrique avec un minimum de pertes, grâce à des algorithmes de contrôle développés et proposés, basés sur la méthode (P&O).

Tout d'abord, nous avons présenté les généralités des systèmes photovoltaïques et expliqué le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Nous avons ensuite décrit la structure des panneaux photovoltaïques, les différents types de systèmes, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Par la suite, nous avons détaillé la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque, du générateur et de l'onduleur NPC à deux niveaux, et étudié l'effet de la température et de l'éclairage sur l'énergie produite par la cellule, ainsi que l'impact de la connexion des cellules (en série, en parallèle et en série/parallèle) sur la puissance générée.

Un aspect passionnant de la recherche sur l'énergie solaire est l'intégration des générateurs photovoltaïques dans un réseau à trois étapes, ce qui constitue un sujet d'actualité majeur. Dans ce système, nous avons opté pour la technique de contrôle "Perturb and Observe" (P&O).

En conclusion, nous pouvons dire que les méthodes de contrôle utilisées dans notre expérience ont été réussies et ont fourni une bonne efficacité en termes de qualité et de suivi du point de puissance maximale, qui a été intégré dans le réseau électrique.

المخلص

هدفنا من هذا المشروع هو تشغيل نظام توليد الطاقة الكهروضوئية المدمجة في شبكة كهربائية. الهدف الرئيسي هو دراسة الحد الأقصى لطاقة المنتجة من GPV مع ضمان جودة طاقة جيدة. يتم تحقيق ذلك باستخدام عاكس ثلاثي الطور مع وحدة تحكم MPPT (بدون محول DC-DC) لتتبع أقصى نقطة لطاقة للنظام الكهروضوئي في ظل ظروف مختلفة مثل الإضاءة ودرجة الحرارة. يتم تنفيذ هذا التحكم من خلال التحكم المباشر في التدفق التنبؤي. تم عرض النتائج من عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها باستخدام برنامج Matlab.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، MPPT، P&O، NPC، التحكم التنبؤي، النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة.

Résumé

Ce projet explore le fonctionnement d'un système de génération photovoltaïque intégré au réseau électrique. L'objectif principal est d'analyser la puissance de sortie maximale du GPV tout en assurant une qualité de puissance satisfaisante. Cela est réalisé en utilisant un onduleur triphasé avec un contrôleur MPPT (sans convertisseur DC-DC) pour suivre le point de puissance maximale du système PV dans des conditions variables telles que l'éclairage et la température. Ce contrôle est effectué via le contrôle prédictif direct des écoulement de puissance. Les résultats sont présentés à partir de simulations réalisées avec le logiciel **Matlab**.

Mots-clés : photovoltaïque, MPPT, P&O, NPC, contrôle prédictif, système photovoltaïque connecté au réseau.

❖ REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] **Hanine Mounir** et **Kebir Allel**, « Etude et simulation d'un étage MPPT pour un générateur photovoltaïque à base d'un kit Arduino », Master en électrotechnique UNIVERSITE d'ADRAR, 2017.
- [02] **Loucif Fatiha** «Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant» Master Académique Université 8Mai 1945 – Guelma 2021
- [03] **M.N. Mchaliikh** et **Ch. Hmada'** «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [04] **Hananou fatiha Rouabah aicha** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque» Master Académique Université Kasdi Merbah Ouargla 2014
- [05] **M.Blhadj** «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome» Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [06] **Kamel mokhtari Youcef larabi** «Etude et simulation d'un système photovoltaïque.» Master Académique Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou 2018
- [07] **M. P. Stéphane** « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat de l'université de Toulouse 20 Janvier 2009
- [08] **I.Bendjamaa** «Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque» Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [09] **Dr. O. guenounou** et **Dr. H. lehouche** «Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque» Master Automatique Université A. mira Bejaia 2019

- [10] **Hua, C., Lin, J., & Shen, C.** Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 45(1), 99-107. (1998).
- [11] **Aziz toulait et Rachid aili** «Modélisation et simulation sous matalab/simulink d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT» Mémoire de Master Académique Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou 2014
- [12] **S. Pétiou.** «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». PhD thesis, université de Toulouse, 2009.
- [13] **Kir aimen et Mehellou abdelhai et Lamer mohammed salah et Kadi djeber** «Commande prédictive des convertisseurs AC/CC» Mémoire de Master Académique Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued 2021/2022
- [14] **Cédric Cabal,** «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque», Thèse de doctorat soutenue 2008.
- [15] **A. F. Boehinger,** «Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply», IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968.
- [16] **Said Chikha** «Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques» Mémoire de Magister Université Larbi Ben M'hidi Oum El bouaghi 2012.
- [17] **Zaiem Kamar** «Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit» Mémoire de Master Académique Université Badji Mokhtar- Annaba 2019.
- [18] **K .rahrah,** « Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », thèse doctorat, université de Bejaia 2016.
- [19] **DJENNADI Rafik et BOUKHENTACHE Nac** «Modélisation et simulation d'une commande MPPT d'un système photovoltaïque» Université Abderrahmane Mira de Bejaia Mémoire de Master Académique 2020/2021.
- [20] **Mr. CHERKI Mohamed Souheil et Mr. LABRAOUI Mohamed** « Etude et comparaison des algorithmes MPPT dans les systèmes photovoltaïques » Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Master en Automatique 2013