

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département d'Electromécanique et Mécanique



N° Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Electromécanique**

Etude d'une centrale solaire photovoltaïque

Réalisé par :

- Idri Amin**
- Bouhafer Mahiaeddine**

Soutenu devant le jury :

Mr. Aoulmit Salim	MCB	Président
Mr. Tiar Mourad	MAB	Examineur
Mr. Mehimmedetsi Boudjema	MCB	Promoteur

Année universitaire : 2021/2022



Dédicace

J'ai toujours voulu offrir quelque chose à mes parents en guise de reconnaissance pour avoir faits de moi l'homme que je suis aujourd'hui, Et voilà, l'occasion est venue ; A mes parents qui m'ont donné la vie, symbole de fierté, de sagesse et de patience, A mes parents qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, A qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

Remerciements

*Tout d'abord nous remercions le bon dieu puissant pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude, et nous voudrions en premier lieu remercier nos parents. Nous remercions le docteur **Mehimmedetsi Boudjema**, notre promoteur pour ses conseils et suggestions avisés qui nous ont aidés à mener à bien ce travail et d'avoir apporté à ce mémoire ses remarques et conseils. Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de L'électromécanique pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour parfaire ce travail. Enfin, on remercie toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, on les Remercie tous.*

Nomenclature

GPV : générateur photovoltaïque.

PV : photovoltaïque.

PPM : Point de Puissance Maximale.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative current).

P&O : Perturb and Observe.

IncCond : Incrémentation de Conductance.

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

h : Constante de Planck [$j. S^{-1}$].

λ : Longueur d'onde [m].

v : Fréquence de l'onde lumineuse [Hz].

ppv: La puissance disponible en sortie du GPV .

Ipv : Le courant de sortie du GPV.

Vpv : La tension à la sortie du GPV.

Ns : Nombre de cellules en série.

Np : Nombre de cellules en parallèle.

Vco : la tension du circuit ouvert.

Icc : Le courant de court circuit.

Iop : Courant Optimal.

Vop : Tension Optimale.

Pmax : Puissance maximale (W).

Rch : Résistance de la charge [Ω].

V : Tension de cellule.

Vpv : Tension du générateur PV [V].

Ipv : Courant du générateur PV [A].

Iph : Photo courant.

Id : Courant de diode.

Is : Courant inverse de saturation de la diode.

m : Facteur d'idéalité de la diode, ($1 < n < 2$).

vt : Tension thermique.

k : la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en Kelvin.

q : la charge d'un électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ [C].

R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes.

R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.

I_{s1}, I_{s2} : Courant de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.

m_1, m_2 : Facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.

V_{Br} : Tension de rupture (-15V...- 50V).

a : Facteur de correction ($a = 0 \div 1$).

n : Indice de la rupture d'avalanche ($n=1 \div 10$).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A).

η : Rendement de la conversion.

FF : Facteur de forme.

P_i : est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2).

CS : Convertisseur statique.

C : Condensateur.

D : La diode.

I_{opt} : Courant optimal.

V_r : Tension de référence de la cellule PV ($T=25^\circ C$, $G=1000 W/m^2$).

MOSFET : metal-oxide-semiconductor field-effect transistor.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée).

C : La capacité d'un condensateur (F).

Q : rapport de la charge stockée (C).

I : Courant traverse l'inductance de l'hacheur (A).

V_l : La tension de l'inductance de l'hacheur (V).

V_s : Tension de sortie de l'hacheur.

V_i : Tension de l'entrée de l'hacheur.

α : Rapport cyclique.

MLI, PWM : Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Nomenclature

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :	18
I.2. Energie solaire :	18
I.2.1. Rayonnement solaire :	18
I.2.2. Spectre du rayonnement :	19
I.2.3. Potentiel solaire :	20
I.3. L'énergie solaire dans l'Algérie :	21
I.4. Solaire photovoltaïque :	21
I.5. Cellule photovoltaïque :	22
I.5.1. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques :	22
I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule.....	26
I.6. L'effet photovoltaïque.....	27
I.6.1. Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV :	27
I.7. Module photovoltaïque :	28
I.7.1. Constitution d'un module de photovoltaïque :	28
I.8. Modélisation des cellules photovoltaïques :	31
I.8.1. Modèle de base :	31
I.8.2. Modèle idéal :	31

I.8.3. Modèle avec pertes ohmiques (R_s model) :	32
I.8.4. Modèle à une diode :	33
I.8.5. Modèle à deux diodes :	34
I.9. Caractéristiques électriques photovoltaïques :	35
I.9.1. Le rendement (η) :	36
I.9.2. Facture de forme, FF :	36
I.10. Les critères de choix d'un panneau photovoltaïque :	37
I.10.1. Choix de l'orientation des modules :	37
I.10.2. Choix de l'inclinaison des modules :	37
I.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	38
I.11.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :	38
I.11.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	38
I.12. Conclusion :	39

Chapitre II : Poursuite du point maximal de puissance

II.1. Introduction :	44
II.2. Principe de fonctionnement :	44
II.3. Classification Des Commandes MPPT :	45
II.3.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :	45
II.3.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :	46
II.4. Les techniques de commandes d'MPPT :	46
II.5. Les commandes MPPT classique :	47
II.5.1. La méthode Perturbe & Observe (P&O) :	47
II.5.2. Conductance Incrémentale (IncCond) :	50
II.5.3. La méthode Hill cimbing :	53
II.6. Autres Méthodes :	56
II.7. Conclusion :	57

Chapitre III : Les convertisseurs DC/DC ; DC/AC

III.1. Introduction :	60
III.2. Convertisseur DC/DC :	60
III.3. Composition du convertisseur :	62
III.3.1. Le transistor MOSFET :	62
III.3.2. Le condensateur :	62
III.3.3. La diode Schottky :	63
III.4. Les types des convertisseurs de tension DC/DC « HACHEUR » :	64
III.4.1. Convertisseur élévateur « BOOST » :	64
III.4.2. Convertisseur abaisseur « BUCK » :	66
III.4.3. Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST » :	68
III.5. Caractéristiques de convertisseurs [17] :	69
III.5.1. La puissance nominale :	69
III.5.2. Le rendement :	69
III.5.3. La consommation à vide :	70
III.6. L'onduleur :	70
III.7. Onduleur PV :	71
III.8. Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau :	72
III.8.1. Topologie d'onduleur central (Centralized inverter) :	72
III.8.2. Topologie d'onduleur string (String inverter) :	73
III.8.3. Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter) :	74
III.8.4. Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter) :	75
III.10. Conclusion :	78

Chapitre IV : Résultats et simulations

IV.1. Introduction :	82
IV.2. L'outil Matlab/Simulink :	82
IV.3. Description du système global :	83

IV.4. Modélisation du champ photovoltaïque	84
IV.5. Technique de commande d'un onduleur :.....	84
IV.6. La commande MLI.....	85
IV.6.1. Le Contrôle PID	85
IV.6.2. La régulation en tension ou mode (P/V)	86
IV.6.3. La régulation en puissance ou mode (P/Q)	86
IV.6.4. La commande de l'onduleur dans l'axe dq	86
IV.7. Filtre LCL :.....	88
IV.8. Simulation du module solaire.....	88
IV.9. L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques de le module solaire:.....	90
IV.10. Simulations du convertisseur DC/DC :	92
IV.11. Simulation de l'onduleur :.....	93
IV.12. Simulation du système globale :.....	97
IV.13. Conclusion :.....	98
Conclusion générale :.....	101

Annexes

Résumé

التلخيص

Abstract

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les différents ensoleillements des régions Algériennes.....	20
Tableau I.2 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium.	25
Tableau II.1 : Caractéristiques majeures des commandes MPPT [6].....	57
Tableau III.1 : la complexité de quelque type de convertisseur [3].	61
Tableau III.2 : Comparaison entre les différentes topologies	77
Tableau IV.2 : Caractéristiques du module photovoltaïque.....	89

Liste des figures

Figure I.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	20
Figure I.2 : (a) : une cellule, (b) : un module, (c) : un panneau photovoltaïque.	22
Figure I.3 : Différentes cellules photovoltaïques.....	23
Figure I.4 : l'évolution des meilleurs rendements des cellules photovoltaïques en laboratoire...	24
Figure I.5 : Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV. .	24
Figure I.6 : fonctionnement d'une cellule photovoltaïques.	26
Figure I.7 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).	27
Figure I.8 : Encapsulation des cellules	28
Figure I.9 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.....	29
Figure I.10 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.	30
Figure I.11 : Schéma d'application de l'effet photovoltaïque.[27].....	31
Figure I.12 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire.[24].....	32
Figure I.13 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s [25].	33
Figure I.14 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode [26].....	33
Figure I.15 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes [26].	34
Figure I.16 : caractéristique courant-tension $I(v)$	36
Figure I.17 : caractéristique puissance-tension $P(v)$	36
Figure II.1 : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.	44
Figure II.2 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	45
Figure II.3 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	47
Figure II.4 : Algorithme type de la méthode P&O [8].	48
Figure II.5 : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.....	49
Figure II.6 : Positionnement du point de fonctionnement.	50
Figure II.7 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de conductance [10].	52
Figure II.8 : Fonctionnement d'une commande MPPT de type "IncCond"	53
Figure II.9 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	54
Figure II.10 : Algorithme type de la commande Hill Climbing [8].....	55
Figure II.11 : Schéma de principe de la commande Hill Climbing [9].	56
Figure III.1 : convertisseurs DC-DC.	60
Figure III.2 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N.....	62
Figure III.3 : Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.....	62

Figure III.4 : inductance simple L.	63
Figure III.5 : convertisseur DC-DC de type BOOST	64
Figure III.6 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est fermé.	65
Figure III.7 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est ouvert.....	65
Figure III.8 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost [13].	66
Figure III.9 : Schéma électrique d'un convertisseur buck.	66
Figure III.10 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type Buck l'interrupteur K est fermé.....	67
Figure III.11 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BUCK l'interrupteur K est ouvert.....	68
Figure III.12 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck [13].	68
Figure III.13 : schéma électrique d'un convertisseur buck-boost [14].	69
Figure III.14 : Symbole de l'onduleur	71
Figure III.15 : Système photovoltaïque connecté au réseau	71
Figure III.16 : Topologie d'onduleur Central	73
Figure III.17 : Topologie d'onduleur string.	74
Figure III.18 : Topologie d'onduleur mufti-string.	75
Figure III.19 : Topologie d 'onduleur modulaire.	76
Figure IV.1 : Bibliothèque SIMULINK.....	83
Figure IV.2 : Structure de contrôle pour le système solaire PV triphasé à deux étages connectés au réseau	84
Figure IV.3 : Schéma synoptique de la M.L.I.....	85
Figure IV.4 : schéma de principe du contrôleur PID	86
Figure IV.5 : Réalisation de la commande en double boucle dans un référentiel synchrone	87
Figure IV.6 : Caractéristiques (I-V) / (P-V) dans les conditions standards.	90
Figure IV.7 : Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.....	90
Figure IV.8: Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.....	91
Figure IV.9: Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante.....	91

Figure IV.10: Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante.....	92
Figure IV.11 : Schéma bloc d'un convertisseur survolteur (Boost).	92
Figure IV.12 : Tensions V_e et V_s du convertisseur DC/DC.....	93
Figure IV.13 : Schéma bloc d'un onduleur.....	94
Figure IV.14 : les trois tensions de la sortie de l'onduleur avant le filtrage.	94
Figure IV.15 : Les tensions après filtrage en fonction de temps.	95
Figure IV.16 : Les courants triphasés après filtrage.	95
Figure IV.17 : la puissance active.....	96
Figure IV.18 : la puissance réactive.....	96
Figure IV.19 : Rayonnement réel utiliser dans la simulation de la centrale solaire photovoltaïque intégré au réseau.....	96
Figure IV.20 : Schéma bloc de la simulation sous SIMULINK.	97

Introduction générale

Introduction générale

L'électricité est l'aspect d'énergie la plus facile à utiliser aujourd'hui. Mais avant d'être consommé, il doit être produit, généralement dans une unité de production de forte puissance, transporté, puis distribué à chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, le système est désormais fortement centralisé [1].

La production d'énergie est un défi très important dans les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées et en voie de développement ne cessent d'augmenter. Aujourd'hui, une grande partie de la production énergétique mondiale est assurée par des ressources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Un autre danger est l'épuisement excessif des stocks de ressources naturelles peut réduire les réserves de cette énergie pour les générations futures de manière anarchique. La consommation mondiale d'électricité observée au cours des dernières décennies est étroitement liée à l'évolution de l'industrie, des transports et des moyens de communication. Aujourd'hui, la majorité de la production d'électricité est produite à partir de ressources non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Ils se régénèrent très lentement à l'échelle humaine. Il en résultera un risque quasi non nul d'épuisement de ces ressources à court terme. D'autant plus que la demande continue de croître, dépassant désormais l'offre, entraînant par exemple des fluctuations brutales des prix mondiaux du pétrole [2].

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables : Énergie : hydraulique, géothermique, éolienne, biomasse et photovoltaïque.

Au cours des dernières années, le soutien politique national et international a été orienté vers les énergies renouvelables, et la plupart des universitaires sont désormais d'accord avec le Moyen-Orient et l'Afrique le Nord est idéalement positionné pour jouer un rôle de premier plan dans une future industrie solaire et éolienne rentable. En raison de sa situation géographique, l'Algérie possède l'un des plus grands gisements solaires au monde, presque tous les territoires nationaux ont plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, atteignant 3900 heures (hauts plateaux et désert du Sahara) [3]. Depuis l'Algérie dispose d'un gisement solaire très important. Le gouvernement prévoit de lancer plusieurs projets solaires photovoltaïques d'ici 2030, avec une capacité totale d'environ 800 MWc. D'autres projets d'une capacité annuelle de 200 MWc devraient être réalisés dans la période 2021-2030, nous avons actuellement 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. Parmi ces centrales photovoltaïques on distingue la centrale photovoltaïque de Zaouit Kounta wilaya d'Adrar Algérie [4].

Dans ce contexte plus large, nos recherches se concentrent sur l'industrie photovoltaïque (PV), qui apparaît comme l'une des plus prometteuses avec des taux de croissance mondiaux très élevés. L'énergie photovoltaïque se développe très rapidement. Il est durable, propre et exempt de pollution environnementale. Il a un caractère multidisciplinaire et implique des domaines tels que la mécanique, l'électronique de puissance et la théorie du contrôle. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Elle peut même être convertie en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques, ont la capacité de convertir les photons en électrons [5]. L'énergie sous forme de courant continu peut donc être utilisée directement. En raison des cellules photovoltaïques et de leurs propriétés électriques hautement non linéaires, l'efficacité des systèmes photovoltaïques peut être améliorée par des solutions utilisant des techniques de recherche de point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce mémoire, Nous avons étudié la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande (commande MPPT, un convertisseur statique DC/DC et un onduleur), assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif principal de ce travail est de contribuer à une étude et dimensionnement d'une centrale solaire et simulation des systèmes solaires photovoltaïques (PV) raccordés au réseau

Pour cela le mémoire est structuré en quatre (4) chapitres :

- ✚ Le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur les systèmes photovoltaïques, la constitution des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque, leurs principes de fonctionnement, la modélisation des différents composants comprenant le générateur photovoltaïque, ainsi les principales caractéristiques d'un GPV.
- ✚ Dans le second chapitre, nous présentons quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode "Perturbation- Observation" et "IncCond" et "Hill climbing"
- ✚ Le troisième chapitre, Nous avons abordés le système de conversion de puissance (les convertisseurs DC-DC et leurs techniques de commande), et l'onduleur et ces stratégies de commande.
- ✚ Dans le quatrième chapitre, Nous avons étudiés la modélisation et la simulation par MATLAB/SIMULINK d'une mini centrale solaire, convertisseur survolteur et commande MPPT « perturbation et observation » accordées aux réseaux électriques

Enfin, on termine par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes

photovoltaïques

I.1. Introduction :

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface de la terre, malgré une diminution importante à la traversée de l'atmosphère ; la quantité qui arrive au sol reste assez importante. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Nous pouvons utiliser cette énergie gratuite grâce à une technique appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité à travers des modules photovoltaïques constitués de cellules solaires.

Malgré le progrès technologique, l'inconvénient de cette énergie réside dans le faible rendement et le coût d'installation élevé par rapport aux autres formes d'énergies.

Dans le cadre de notre étude, nous avons porté une attention particulière aux centrales photovoltaïques. Nous représentons en détail les éléments relatifs à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

I.2. Energie solaire :

La distance de la Terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres, il faut donc environ 8 minutes et 20 secondes pour que les rayons du soleil nous parviennent. C'est une énergie produite à partir de la conversion du rayonnement solaire, c'est une énergie renouvelable. C'est également une source d'énergie intermittente. L'énergie solaire, peut être convertie en chaleur ou en électricité [6].

La conversion de l'énergie solaire peut se faire de deux manières principales :

- Conversion en électricité : énergie solaire photovoltaïque.
- Conversion en chaleur : énergie solaire thermique

Le solaire photovoltaïque se réfère à la conversion de l'énergie solaire en électricité une partie de la radiation solaire utilise des cellules photovoltaïques. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 45 ans [7].

I.2.1. Rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont certaines atteignent constamment la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température de surface du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique est dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et Proche infrarouge (plus de 0,75 et

jusqu'à environ 4 μm). L'énergie qu'il transporte rayonnement moyenné sur un an et sur l'ensemble de la calotte Atmosphérique, correspondant à un éclairage de 340 W.m^{-2} . Le bilan énergétique montre que sur cette quantité d'éclairage que le soleil apporte au système Terre plus atmosphère, environ 100 W.m^{-2} sont réfléchis dans l'espace ; seul le reste est absorbé, un tiers par l'atmosphère, et les deux tiers par l'atmosphère absorbée par La surface de la terre [8].

Le rayonnement solaire se conçoit en deux parties :

- **Rayonnement global :**

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus (rayonnement direct, diffus et albédo).

- **Rayonnement réfléchi :**

C'est la partie inutile des rayonnements solaires qu'il diffuse par les obstacles atmosphériques.

I.2.2. Spectre du rayonnement :

Le spectre solaire est la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ou la fréquence est représentée sur la figure ci-dessous l'énergie de chaque photon est liée à la fréquence ν ou à la longueur d'onde λ , elle est donnée par :

$$E = h.\nu = h.c/\lambda$$

h : est la constante de Planck.

C : Vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond à peu près à l'émission de l'objet noir à 5800°K . La courbe standard, compilée à partir des données collectées par les satellites appelés AM0. Sa distribution d'énergie est divisée en [9] :

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%

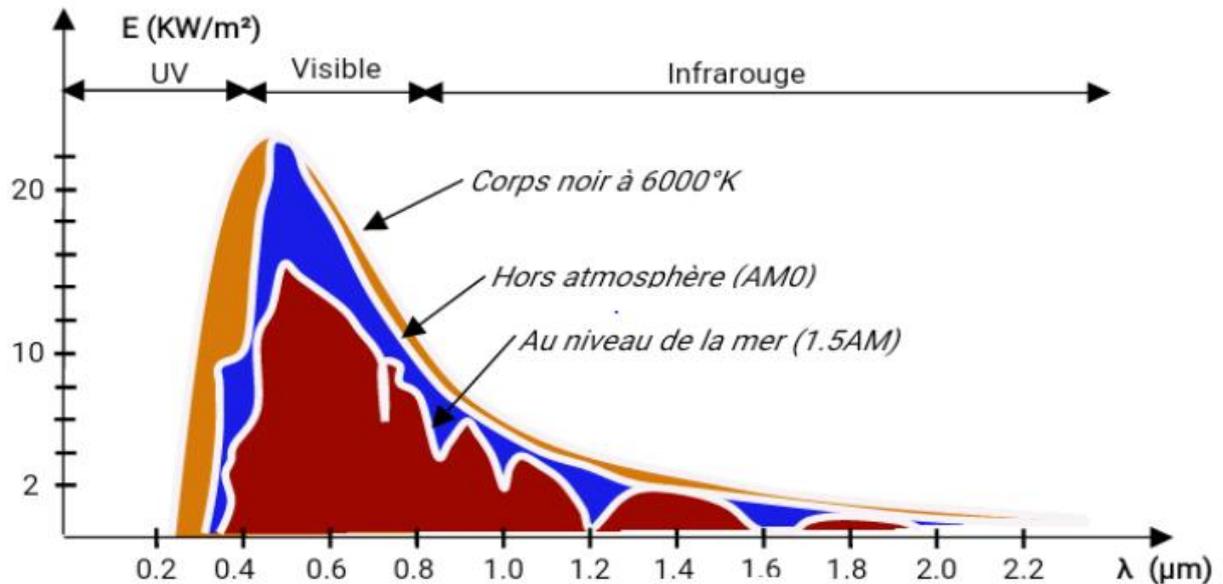


Figure I.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

I.2.3. Potentiel solaire :

L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. Le nombre d'heures d'ensoleillement pour presque tous les territoires nationaux plus de 2000 heures par an, jusqu'à 3900 heures (plateau et Sahara). L'énergie reçue par jour au niveau de $1m^2$ est environ 5 kWh dans la partie plus grande du pays, soit presque nord $1700 \text{ kWh}/m^2/\text{an}$, Sud $2263 \text{ kWh}/m^2/\text{an}$ [10].

Tableau I.1 : Les différents ensoleillements des régions Algériennes.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($\text{Kwh}/m^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

I.3. L'énergie solaire dans l'Algérie :

En Algérie, on entend depuis longtemps parler des bienfaits de l'énergie solaire, mais le développement de cette source d'énergie est encore très marginal car il n'y a pas assez de ressources financières pour aider cette industrie récente à monter en puissance comme la production de pétrole et gaz. Le premier projet a démarré il y a quelques temps. Il s'agit d'une centrale hybride photovoltaïque d'une capacité de 15 MW (dont 35% est fournie par des panneaux solaires), implantée sur la commune de HASSI R'MEL.

OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) en 2008, "A terme, d'ici 2025, je dirais que 15% de l'électricité proviendra de l'énergie solaire. Le développement de ces énergies nous permettra d'économiser les sources fossiles comme le gaz et le pétrole. À long terme, l'énergie solaire et éolienne peut être exportée si elle est compétitive d'autres pays". L'Algérie a donc finalement compris qu'elle pouvait s'enrichir de cette source d'énergie propre et inépuisable est le soleil [11].

L'Algérie a annoncé fin 2020, l'appel d'offres pour la construction d'une centrales photovoltaïques dans le cadre du programme algérien "Solar 1000 MW ». Le projet vise à installer des centrales solaires à plus ou moins grande échelle pour produire 15 000 mégawatts d'électricité d'ici 2035. Les centrales électriques seront réparties par lots à travers le pays, la plus petite étant de 50 mégawatts et la plus grande de 300 mégawatts. Onze lieux d'implantation ont été retenus dont Ghardaïa, Ouargla, Béchar. Algérie Renewables Energy attribuera ces prix aux candidats sélectionnés lors de l'appel d'offres [12].

I.4. Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. Cette transformation (effet photovoltaïque) n'a aucun effet machines, pas de bruit, pas de pollution, pas de carburant. L'effet photovoltaïque est Il a été découvert par le physicien français Antoine Becquerel en 1839. Le mot "photovoltaïque" vient du mot "photo" (du grec "phos", signifiant "lumière") et le mot "Volt" (Le physicien Alessandro Volta, qui a apporté une contribution très importante à l'étude de la physique Électricité) [13].

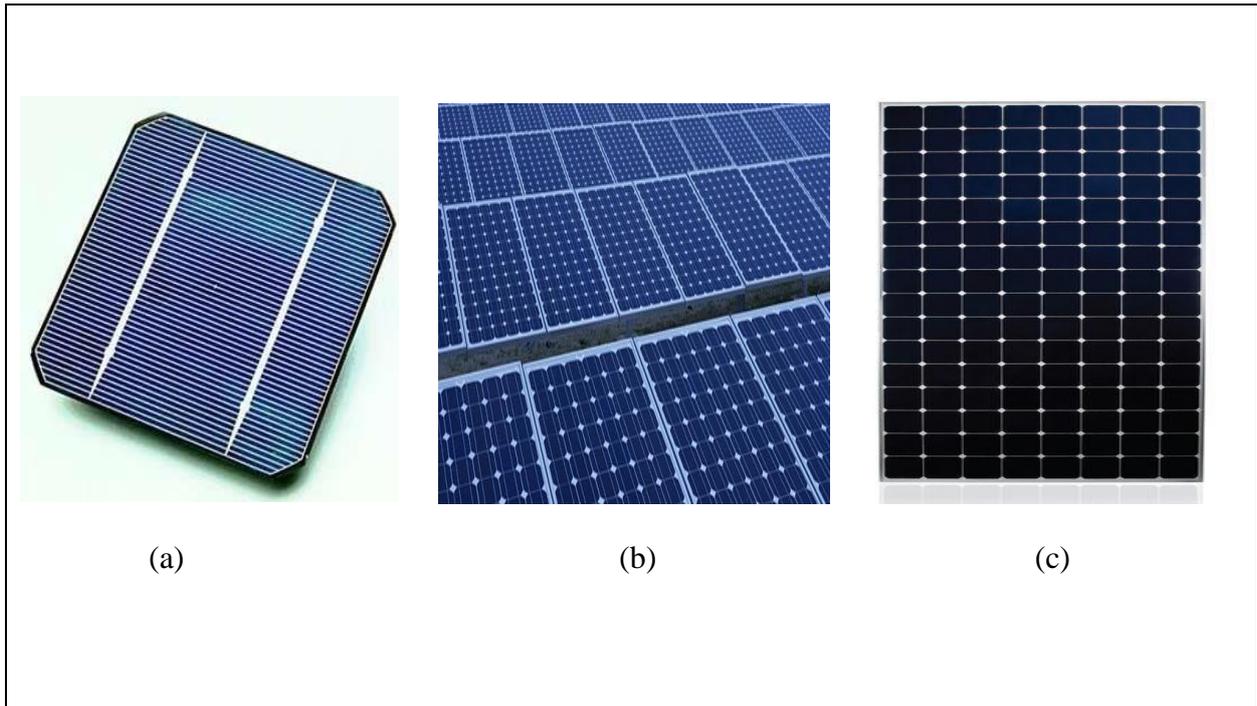


Figure I.2 : (a) : une cellule, (b) : un module, (c) : un panneau photovoltaïque.

I.5. Cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques (PV) fonctionnent selon un phénomène physique appelé « effet photovoltaïque », qui génère une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension résultante peut alors varier entre (0,3V) et (0,7V), selon les matériaux utilisés et leur disposition, ainsi que la température et le vieillissement de la cellule. Si une cellule (sous éclairage) n'est pas connectée à un circuit extérieur elle présente une tension nommée tension de circuit ouvert (V_{CO}) fortement dépendante de la température. D'autre part, le courant maximal PV est atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit noté (I_{CC}) dépendant fortement du niveau d'éclairage [14].

I.5.1. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques :

Il existe des différentes technologies constituant les cellules photovoltaïques illustrées par la **figure I.3.**

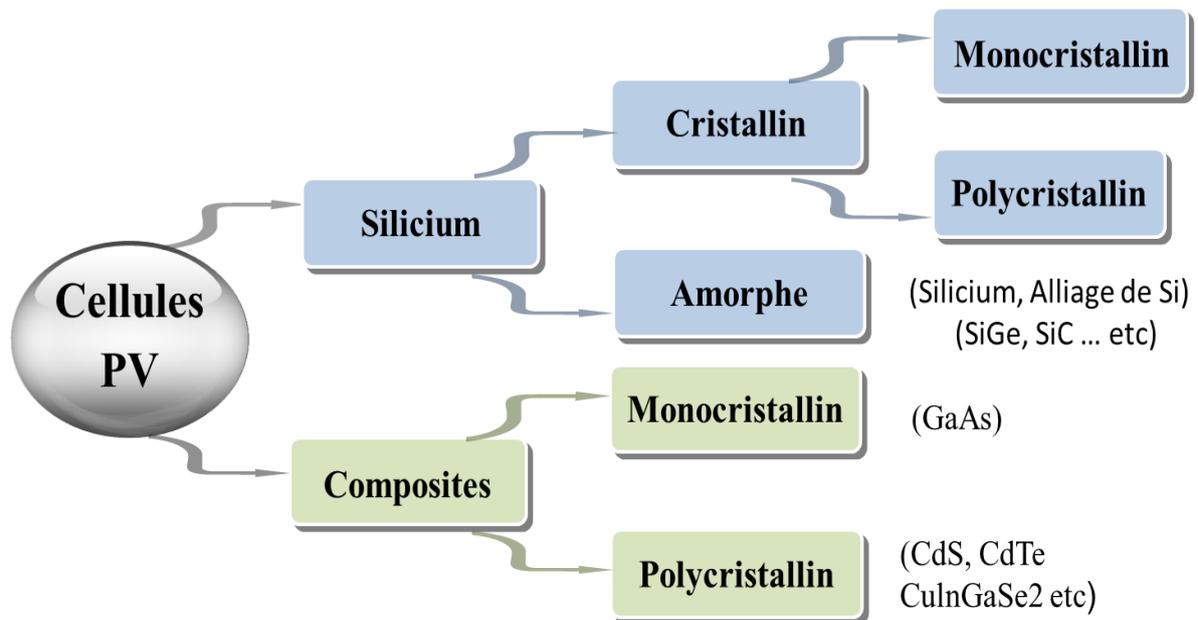


Figure I.3 : Différentes cellules photovoltaïques.

Depuis le début du siècle l'énergie solaire photovoltaïque (PV) enregistre l'un des taux de croissance les plus élevés dans le monde. La Capacités d'installations mondiales sont passées de 6 083 MW en 2006 à 219 297 MW en 2015. Cette croissance est en partie attribuable aux avancées technologiques dans la production de cellules photovoltaïques dans ses différents segments. Le rendement moyen sur les dix dernières années. Les modules PV à base de silicium vendus sur le marché sont passés de 12 % à 17 %, les modules PV à base de CdTe (tellure de cadmium) ont augmenté de 9% à 16% [15].

Une carte traditionnelle publiée par le NREL (Laboratoire National des Energies Renouvelables) sur le bilan annuel de production de cellules photovoltaïques du laboratoire montre. Le rendement des cellules photovoltaïque de toutes les industries photovoltaïques depuis de nombreuses années préservera une bonne dynamique de croissance dans les prochaines années (**Figure I.4**) [16].

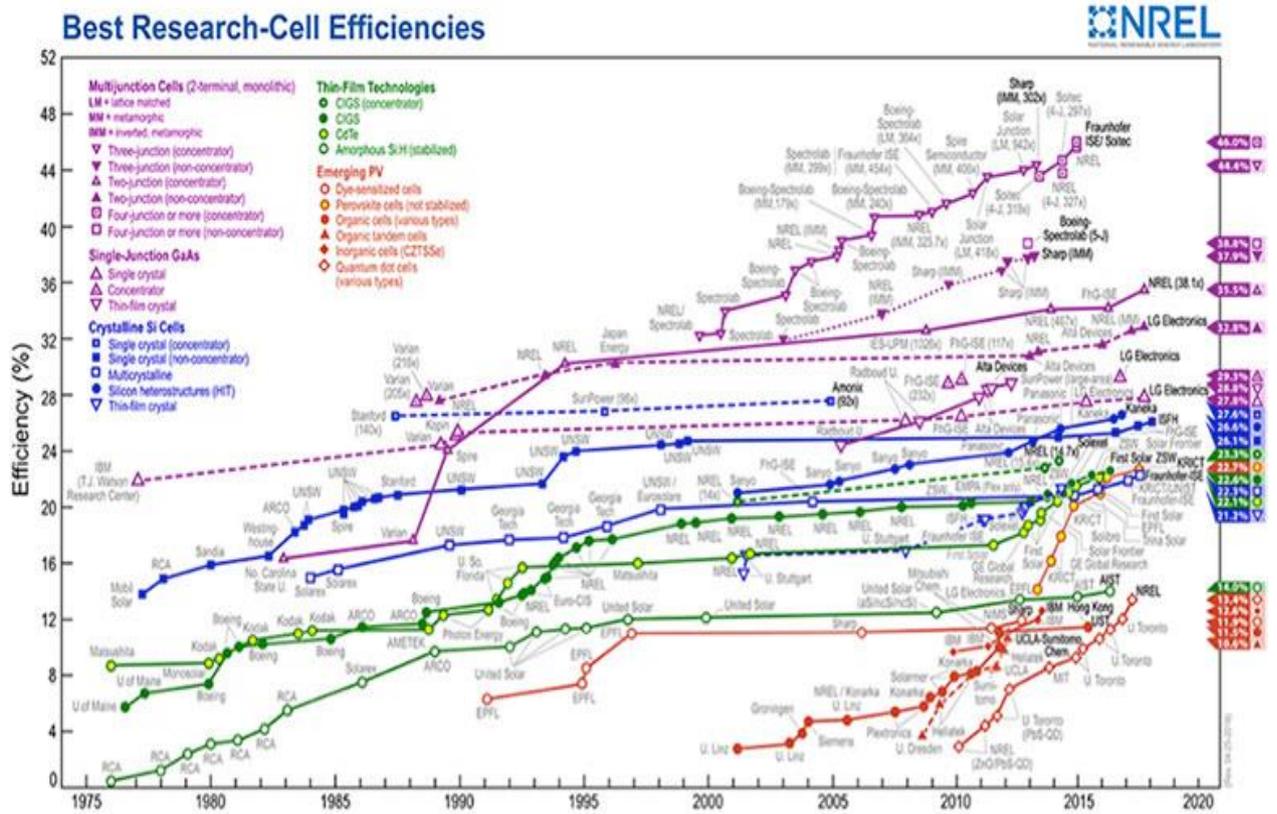


Figure I.4 : l'évolution des meilleurs rendements des cellules photovoltaïques en laboratoire.

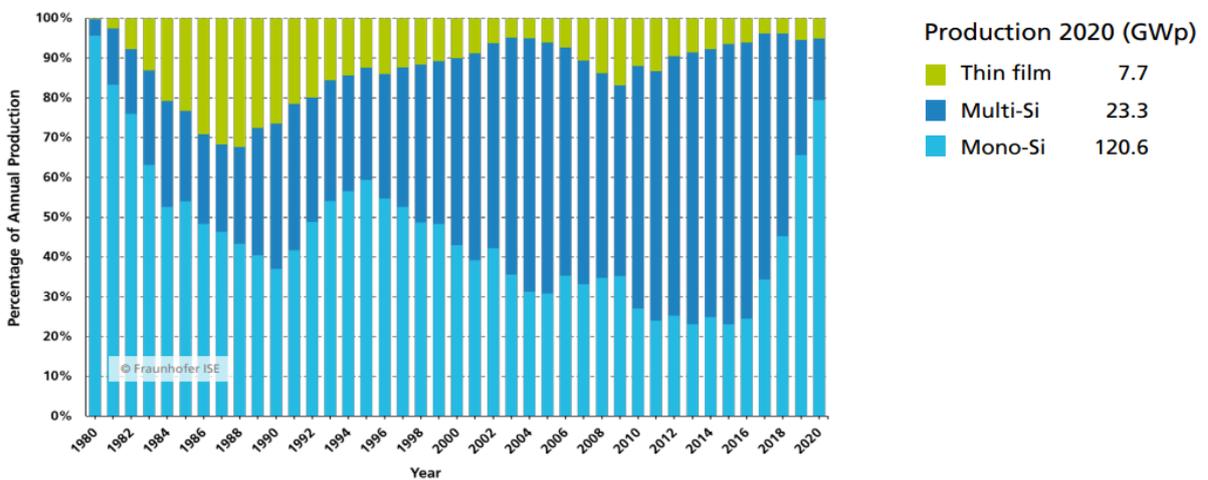
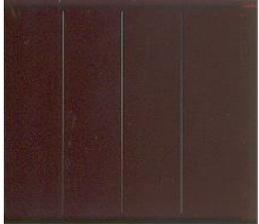


Figure I.5 : Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV.

Le silicium est le semi-conducteur le plus couramment utilisé dans la fabrication des cellules, il existe trois types de cellules photovoltaïques au silicium : Monocristallin, polycristallin ou amorphe. Les cellules monocristallines et polycristallines sont les plus courantes, mais leur fragilité exige qu'elles soient protégées par des plaques de verre, ce qui accroît encore le poids du panneau solaire. La substance est du silicium, très Abondant, mais la masse nécessaire à la fabrication des cellules doit être de pureté très élevée et son coût joue un rôle important dans le

coût global. La pénurie actuelle de silicium de haute qualité exerce une pression sur les fabricants et les prix du marché et des cellules montent [17] (**Tableau I.2.**) [18].

Tableau I.2 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium.

Types	Silicium monocristallin 	Silicium polycristallin 	Silicium amorphe 
Rendement	De 17 à 20%	De 16 à 18%	De 6 à 7%
Les avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement en soleil direct - Durée de vie importante (environ 30 ans) 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin) - Durée de vie importante (environ 30 ans) - Moins cher que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnent avec un éclairage faible - Bon marché par rapport aux autres types de cellules - Moins sensible aux températures élevées - Souple
Les inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé. - Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...) 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement global plus faible. - Rendement moindre sous éclairage direct. - Durée de vie courte (environ 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps

I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques repose sur les propriétés des semi-conducteurs, qui déclenchent le flux d'électrons lorsqu'ils sont frappés par des photons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s, et Einstein les appelait « particules de lumière » dans les années 1920. Lorsqu'ils frappent des éléments semi-conducteurs comme le silicium, ils arrachent des électrons à leurs atomes. Ces électrons se déplacent de façon désordonnée, à la recherche d'autres "trous" pour se repositionner.

Mais pour avoir du courant, ces électrons doivent tous se déplacer dans le même sens. Pour les aider, il faut combiner deux types de silicium. La face tournée vers le soleil est "dopée" avec des atomes de phosphore, qui ont plus d'électrons que le silicium, et l'autre face avec des atomes de bore, qui ont moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : la face avec le plus d'électrons devient l'électrode négative (N), et la face avec le moins d'électrons devient l'électrode positive (P). Un champ électrique est créé entre les deux.

Lorsque les photons excitent des électrons, ces électrons vont migrer vers la région N en raison du champ électrique, tandis que les "trous" vont se déplacer vers la région P. Ils retournent vers le circuit externe sous forme d'énergie électrique par des contacts électriques déposés sur les surfaces des deux régions avant de générer du courant continu. La couche anti-reflet empêche la perte de photons en excès en étant réfléchi par la surface [19].

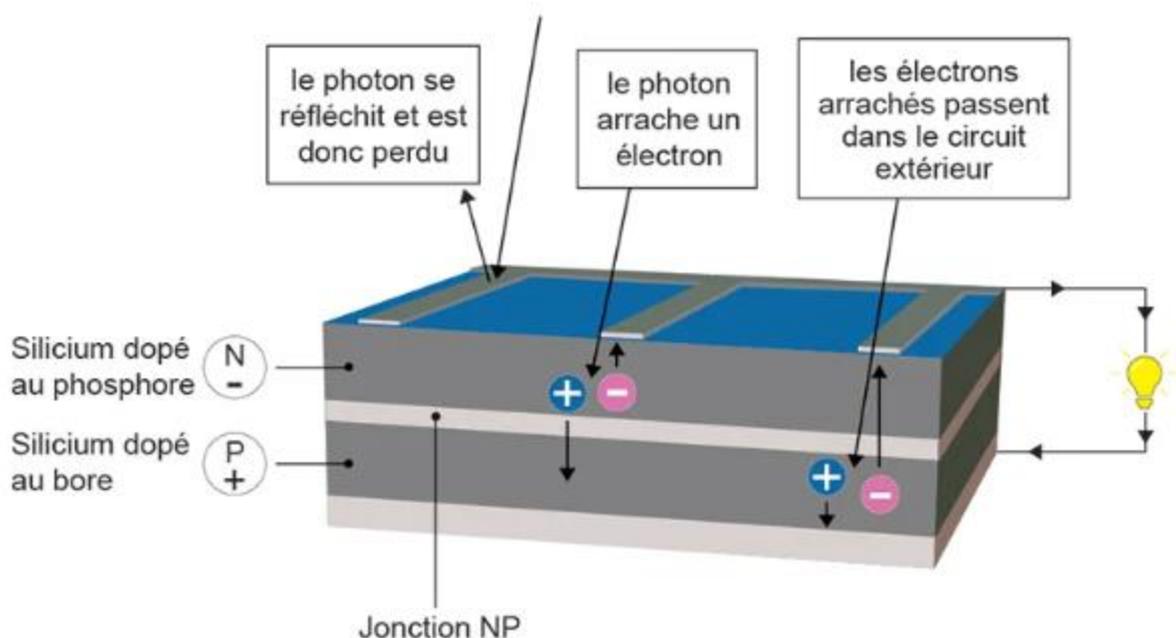


Figure I.6 : fonctionnement d'une cellule photovoltaïques.

I.6. L'effet photovoltaïque

I.6.1. Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV :

En polarisant électriquement la jonction PN et en la soumettant à la lumière solaire, on obtient des propriétés similaires à celles présentées sur la figure I-7. En l'absence d'éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Par conséquent, sous la polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant peut évoluer. En polarisation inverse, seul le courant de saturation circule. Cette dernière varie peu avec la tension appliquée. Ces courants, continus ou inverses, Comme pour les jonctions classiques, il est sensible à la température de jonction.

Si cette jonction PN est exposée au rayonnement solaire, en fonction du flux lumineux, des paires électron-trou supplémentaires se créent dans le matériau. Ce phénomène, également appelé effet photovoltaïque, ne se produit que lorsque l'énergie du photon est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g [20].

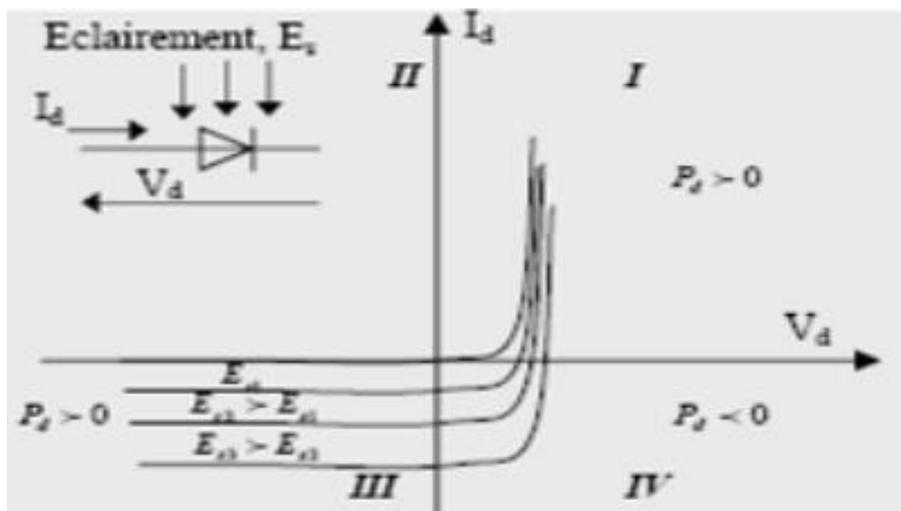


Figure I.7 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).

I.7. Module photovoltaïque :

I.7.1. Constitution d'un module de photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments **Figure I.8**

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellule photovoltaïque.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules [21].

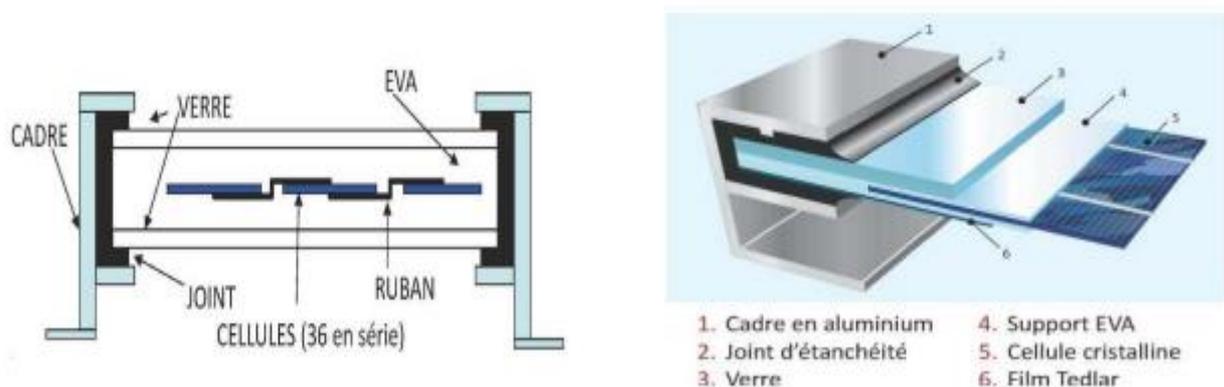


Figure I.8 : Encapsulation des cellules

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

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

Avec :

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV,

i_{pv} : Le courant de sortie du GPV,

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV,

N_s : Nombre de cellules en série,

N_p : Nombre de cellules en parallèle.

I.7.1.1. Mise en série :

Une association de N_s en série augmente la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules passent alors le même courant et les caractéristiques résultant du groupement en série sont obtenues en additionnant la tension de base chaque cellule, **Figure I.9**. L'équation (I-2) résume une caractéristique électrique association en série de N_s cellules [22].

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \tag{I.2}$$

Avec :

V_{co} : la tension du circuit ouvert.

Ce système d'association est généralement le plus utilisé par les modules PV commercial. Au fur et à mesure que la surface cellulaire devient de plus en plus fait important, le courant produit par une seule cellule augmente avec la technologie a évolué alors que sa tension est encore très faible. Par conséquent, la combinaison en série peut augmenter la tension des composants.

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons} = 0.6V * 36 = 21.6$ Volt) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de la cellule de 12V.

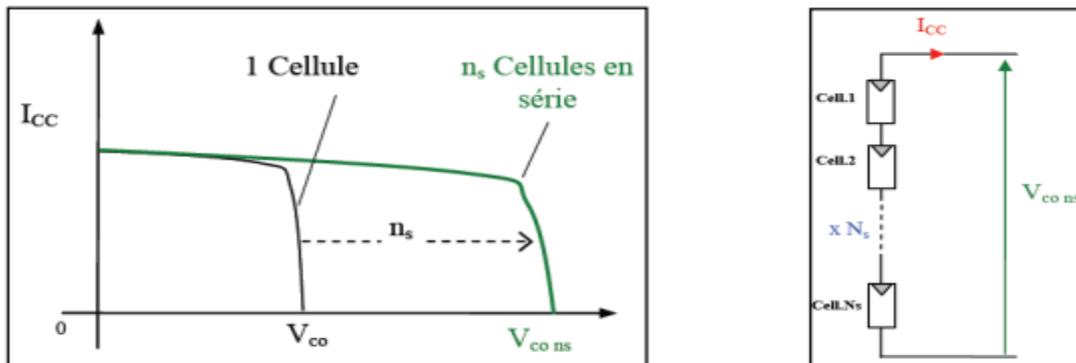


Figure I.9 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

I.7.1.2. Mise en parallèle :

En revanche, l'association parallèle de N_p cellules est possible et peut augmenter le courant de sortie résultant du générateur. Dans le même ensemble de cellules lorsqu'elles sont connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et aux mêmes caractéristiques. Les résultats de regroupement sont obtenus en ajoutant du courant, **Figure I.10** . Formule (I-3) Cela résume à son tour les propriétés électriques de l'association parallèle de N_p cellules [23].

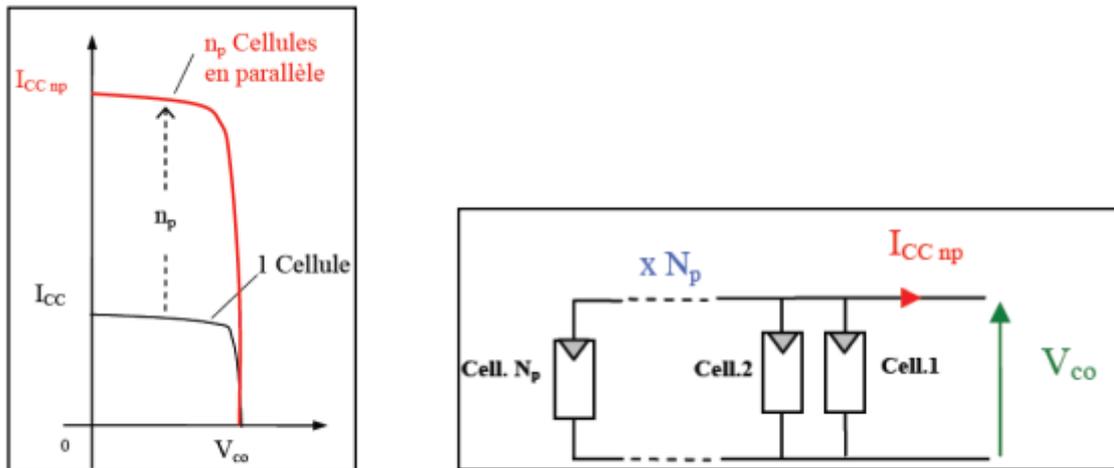


Figure I.10 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.3)$$

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

Si nous voulons avoir un générateur PV avec un courant de sortie plus élevé, nous pouvons l'assurer avec des cellules photovoltaïques avec une plus grande surface et une plus grande efficacité, ou combinez en parallèle plusieurs modules photovoltaïques aux caractéristiques similaires. Convient également aux générateurs photovoltaïques d'être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur photovoltaïque sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance le maximum noté P_{max} . Cette puissance est la valeur maximale de la caractéristique $P(V)$ générateur, et correspond au produit de la tension optimale et du courant optimal (V_{op} , I_{op}).

I.8. Modélisation des cellules photovoltaïques :

La modélisation des cellules photovoltaïques implique nécessairement des choix du circuit équivalent. Afin de développer un circuit équivalent de cellule photovoltaïque précis, il est nécessaire de connaître la configuration physique des éléments de la cellule et les propriétés électriques de chaque élément, plus ou moins en détail. Sur la base de cette idée, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement fortement non linéaire, qui découle du comportement des jonctions semi-conductrices qui sous-tendent sa réalisation. Ces modèles diffèrent par le nombre de procédures mathématiques et de paramètres impliqués dans le calcul des tensions et courants des modules photovoltaïques [24].

I.8.1. Modèle de base :

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, ainsi lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant I traversant une charge R_{ch} , et une tension V aux bornes de cette charge

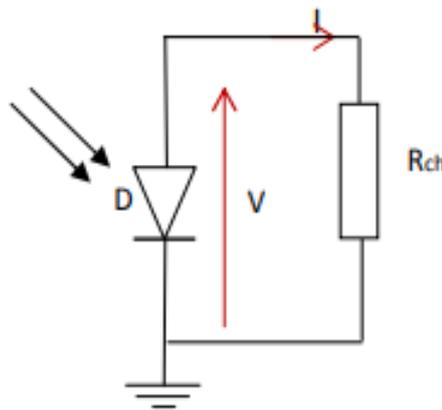


Figure I.11 : Schéma d'application de l'effet photovoltaïque.[27]

I.8.2. Modèle idéal :

C'est le modèle le plus simple pour représenter une cellule solaire car il ne considère que le phénomène de diffusion (**Figure I.12**). Le circuit équivalent simplifié de la cellule solaire est-il se compose d'une diode et d'une source de courant en parallèle. La source actuelle un photo courant I_{ph} est généré, qui est proportionnel à l'éclairement solaire E . L'équation I-V courant-tension pour le circuit équivalent simplifié est régie par la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : entrée et sortie d'un point est égal à zéro) :

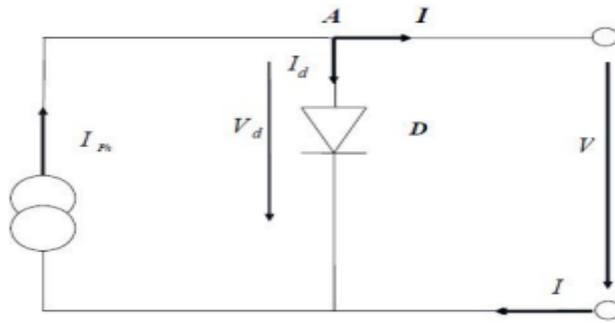


Figure I.12 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire.[24]

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

Avec :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v}{m \cdot v_{th}}} - 1 \right) \text{ et } : v_{th} = \frac{k \cdot T}{q} \quad (\text{I-2})$$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v}{m \cdot v_{th}}} - 1 \right) \quad (\text{I-3})$$

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I_s : Courant inverse de saturation de la diode.

m : Facteur d'idéalité de la diode, $m = 1 \dots 5$.

v_{th} : Tension thermique.

k : la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en Kelvin.

q : la charge d'un électron = $1,6 \cdot 10^{-19} C$

I.8.3. Modèle avec pertes ohmiques (Rs model) :

Le deuxième modèle prend en compte la résistivité du matériau et la liaison au niveau de contact, qui représente mieux le comportement électrique de la cellule que le modèle idéal. Ces pertes sont représentées par la résistance série R_s dans le circuit équivalent illustré ce qui suit :

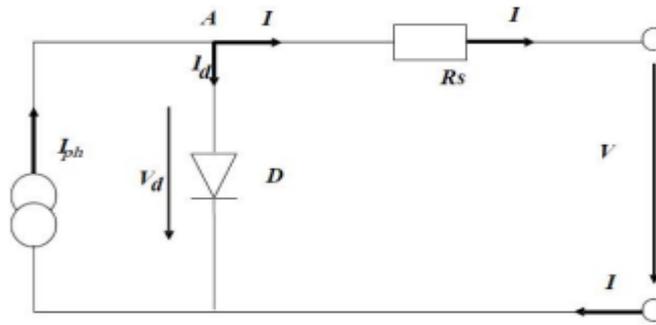


Figure I.13 : Circuit équivalent d’une cellule solaire, modèle avec R_s [25].

Après analyse du circuit, l’équation courant tension est donnée comme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.v_t}} - 1 \right) \tag{I-4}$$

Avec :

R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes.

I.8.4. Modèle à une diode :

C’est le modèle sur lequel les fabricants s’appuient pour fournir les caractéristiques techniques des cellules solaires (data sheets). Il est également considéré comme satisfaisant et même comme une référence pour les fabricants pour classer les modules solaires. Il prend en compte non seulement la perte de tension représentée par la résistance série R_s , mais également la fuite de courant représentée par la résistance parallèle R_p (voir figure 14).

La résistance parallèle R_p est en générale très élevée, et lorsqu’elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairnement.

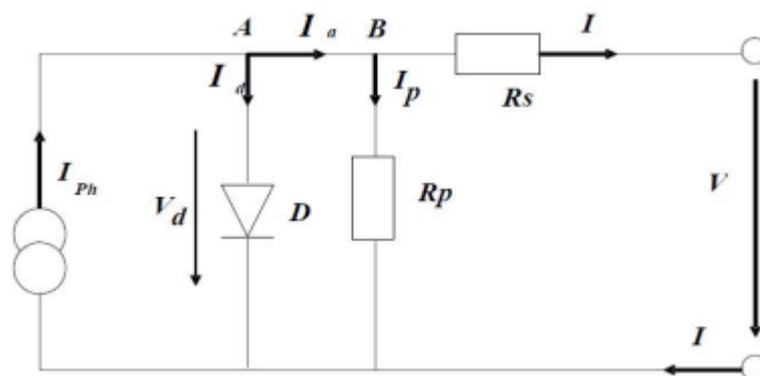


Figure I.14 : Circuit équivalent d’une cellule solaire, modèle à une diode [26].

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{I-5}$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.v_t}} - 1 \right) \tag{I-6}$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V+I.R_s}{R_p} \tag{I-7}$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.v_t}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \tag{I-8}$$

Avec :

R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.

L'équation (I.8) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton_Raphson) doit être appliquée.

I.8.5. Modèle à deux diodes :

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est représenté sur la (Figure I.15). Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel des cellules solaires car il prend en compte le mécanisme utilisé pour transporter la charge dans la cellule.

Le modèle à deux diodes (équation I.13) se compose de deux exponentiels, dont le premier vaut les phénomènes de diffusion sont considérés, tandis que le deuxième exponentiel correspond aux phénomènes de recombinaison dans les régions de déplétion profonde.

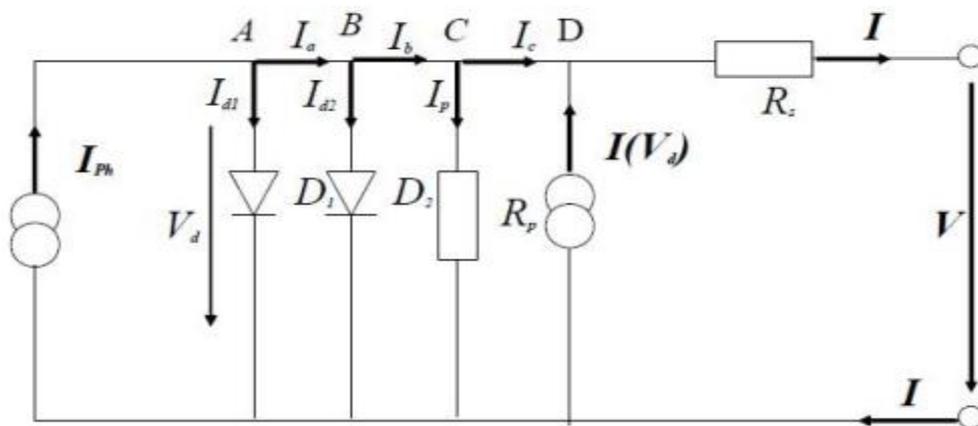


Figure I.15 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes [26].

Les équations caractéristiques du système sont données ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p + I(V_d) \quad (I-9)$$

$$I_{d1} = I_{s1} \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m_1.v_t}} - 1 \right) \quad (I-10)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m_2.v_t}} - 1 \right) \quad (I-11)$$

$$I(V_d) = -a. (v + I. R_s) \left(1 - \frac{(v+I.R_s)}{v_{Br}} \right)^{-n} \quad (I-12)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{v}{m_1.v_t}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{v}{m_2.v_t}} - 1 \right) - \frac{(v+I.R_s)}{R_p} - a. (v + I. R_s) \left(1 - \frac{(v+I.R_s)}{v_{Br}} \right)^{-n} \quad (I-13)$$

Avec :

I_{s1}, I_{s2} : Courant de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.

m_1, m_2 : Facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.

v_{Br} : Tension de rupture (-15V...- 50V).

a : Facteur de correction ($a = 0 \div 1$).

n : Indice de la rupture d'avalanche ($n=1 \div 10$).

I.9. Caractéristiques électriques photovoltaïques :

La différence de potentiel aux bornes de la jonction PN exposée à la lumière, elle peut également être mesurée entre les bornes d'une cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule photovoltaïque est d'environ 0,3 à 0,7V. Il peut être mesuré directement à ses bornes à vide (circuit ouvert). Cette tension est appelée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Lorsque les bornes de la cellule sont en court-circuit, il est possible de mesurer le courant de court-circuit (I_{cc}) qui est consommé par une cellule photovoltaïque. Ces valeurs peuvent varier considérablement en fonction du matériau utilisé, de la température et de l'ensoleillement [27].

Les figures suivantes illustrent respectivement les caractéristiques de courant-tension et de puissance dans les condition standard ($G=1000 W/m^2$; $T=25^\circ C$) :

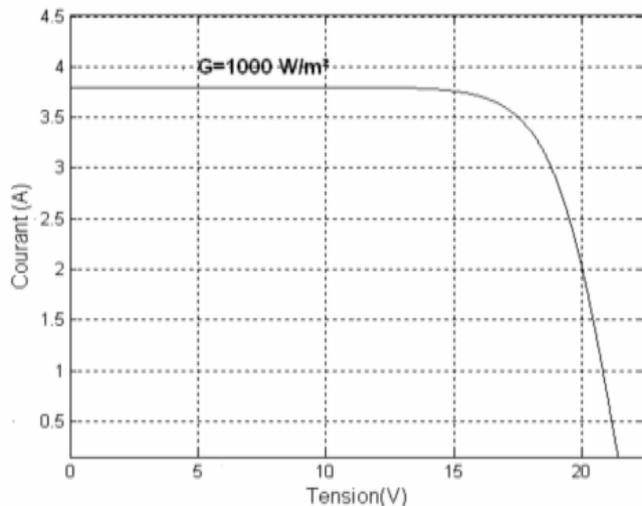


Figure I.16 : caractéristique courant-tension

$I(v)$

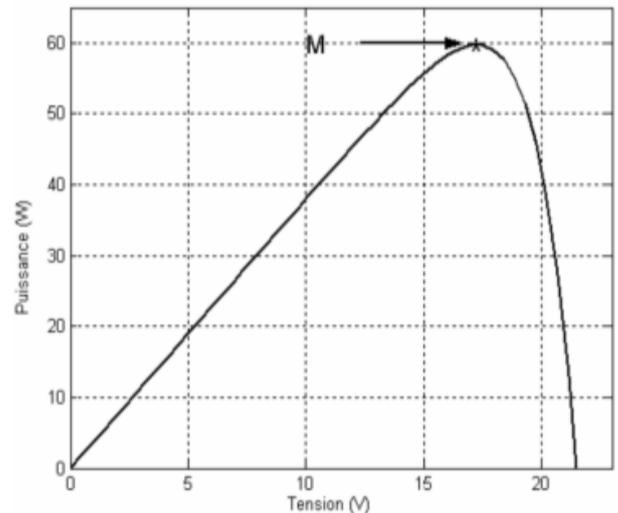


Figure I.17 : caractéristique puissance-tension $P(v)$

$P(v)$

I.9.1. Le rendement (η) :

Le rendement η d'une cellule PV représente le rendement de conversion de puissance. Elle est définie comme le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} . Le rendement de conversion photovoltaïque η s'exprime par le rapport :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

Où P_i : est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2). Le rendement, souvent exprimé en pourcent, est un paramètre clef de productivité des cellules.

Avec : $P_m = I_m \cdot V_m$ est la puissance maximale.

Ce rendement peut être améliorée en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre important. En effet, il n'est possible d'évaluer les performances d'une cellule que si l'on connaît sa valeur. [28]

I.9.2. Facture de forme, FF :

Un paramètre important est souvent utilisé dans la caractéristique $I(V)$ pour déterminer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou facteur de remplissage (FF). Ce coefficient exprime le rapport entre la puissance maximale que peut fournir la cellule, exprimée en P_{max} , et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur est grande, plus la puissance disponible est importante. Il fera donc l'objet de compromis

techniques pour atteindre au maximum les caractéristiques recherchées. Il est défini par la relation suivante : [29]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

I.10. Les critères de choix d'un panneau photovoltaïque :

Sur les installations photovoltaïques, les panneaux solaires représentent près de la moitié de l'investissement. La sélection des modules est donc une étape clé dans le développement d'un projet, et le prix d'achat n'est pas le seul critère à considérer. En fait, le choix doit se baser sur un équilibre des coûts avec trois paramètres principaux : capacité de production au mètre carré, robustesse, et rapport de positionnement : (orientation et inclinaison). [30]

I.10.1. Choix de l'orientation des modules :

L'orientation des modules devrait idéalement être au sud. Cependant, les deux paramètres suivants doivent être considérés lors du choix d'une orientation :

- les masques environnants.
- l'orientation du site.

Dans le cas où le site présente des masques importants (végétation, bâtiments, etc.) à l'est du site, il peut être préférable de localiser le champ photovoltaïque plus à l'ouest plutôt qu'au sud. La production sera alors plus importante l'après-midi sans pour autant défavoriser le matin (qui n'est pas ensoleillé du fait des masques) [31].

I.10.2. Choix de l'inclinaison des modules :

L'objectif est de produire le plus d'énergie au cours de l'année. Le rendement est maximal lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires aux modules. L'incidence du rayonnement des modules photovoltaïques varie considérablement entre l'été et l'hiver. D'autre part, les heures d'ensoleillement varient également considérablement entre l'été et l'hiver à tel point que chaque mois d'hiver représente moins de 5 % de la production totale. Par conséquent, il est nécessaire de savoir quel est l'angle d'inclinaison qui produit le plus d'énergie pendant un an. Cela dépend de la latitude du lieu et aussi de la direction du lieu [31].

- Le choix des panneaux photovoltaïques n'est pas seulement un choix esthétique et personnel avec une préférence pour une marque donnée, mais c'est surtout un choix raisonné par rapport à la configuration de son logement et à son budget.

I.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**I.11.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages

- ❖ La production de cette énergie renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- ❖ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ❖ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille.
- ❖ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ❖ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- ❖ Les installations photovoltaïques nécessitent beaucoup d'espace et ont un cycle de vie limité et un rendement décroissant avec le temps
- ❖ La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [32].

I.11.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- ❖ L'énergie solaire dépend par définition du rayonnement solaire qui est plus important dans certaines zones géographiques que d'autres. Il ne peut donc pour le moment répondre aux besoins complets des logements situés dans des zones à faible ensoleillement pour lesquelles la production solaire sera trop intermittente.
- ❖ Les coûts d'installation restent élevés pour les particuliers
- ❖ Il n'est pas possible de stocker l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque
- ❖ Dans les installations photovoltaïques, l'onduleur a une durée de vie de 10 ans en moyenne. Après cette période, il doit forcément être remplacé ou réparé, impliquant des coûts supplémentaires.

Malgré ces inconvénients, le marché du photovoltaïque continue de trouver des applications et de se développer. Par ailleurs, la technologie photovoltaïque est en voie de maturation, et ses inconvénients pourraient s'atténuer, notamment en termes de coûts de fabrication [32].

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude sur l'énergie solaire photovoltaïque, où nous avons brièvement discuté les caractéristiques essentielles d'une cellule photovoltaïque, Et nous avons également mentionné les caractéristiques des modules photovoltaïques. Enfin, nous avons modélisé le générateur photovoltaïque (GPV).

Références bibliographiques

- [1] : Mr . Yassine LASMI, «Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. », Thèse de magister, Université Sétif 2013
- [2] Said Amar, Dimensionnement d'un système photovoltaïque: Le cas d'un usage domestique, 18 octobre 2018
- [3] : Amine Boudghene Stambouli. “An overview of different energy sources in Algeria Amine (UNIVERSITE de science technologie Oran)”. In : February (2002).
- [4] : <https://www.espacemanager.com/lalgerie-possede-lun-des-gisements-solaires-les-plus-eleves-au-monde.html>
- [5] : BELKAID ABDELHAKIM, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1, 2015
- [6] : <https://www.climamaison.com/lexique/energie-solaire.htm>
- [7] : B. Flèche - D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque.doc » , juin 2007.
- [8] : José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [9] : Mihi Sana « comparaison par simulation numérique entre les caractéristiques électriques d'une cellule solaire en Si et une autre en Si intégrée sur un substrat en GaAs», Thèse de Magister, université de Biskra, 2012.
- [10] : N. Gouar - A. Mahmoudi, « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de Master II, Université de Oum El Bouaghi, 2017
- [11] : MEBREK Naima, « Optimisation d'une installation de pompage hybride en vue de l'irrigation », Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2021
- [12] : https://www.francetvinfo.fr/monde/afrique/algerie/solar-1000-mw-le-nouveau-projet-d-electricite-solaire-de-l-algerie_4896631.html

- [13]: Bouanani Boualem, « Étude Technologique et Electrique Des Cellules Solaires en Couches Minces à Hétérojonctions ZnO/CdS/CIGS Utilisant le logiciel Atlas de Silvaco », thèse de Magister, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbés, 2015.
- [14] : MESSAOUDENE Hichem, « Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques », thèse de Magister , UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA, 2014
- [15] : https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber40_4_5.pdf
- [16] : <https://www.nrel.gov/>
- [17] : H. Merakchi - B. Goumeidane, « Optimisation d'un système solaire de pompage d'eau », Thèse de Master II, Université de Oum El-Bouaghi, 2010
- [18] : <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaïque3/types-de-cellules/>
<https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- [19] : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche#:~:text=Le%20principe%20de%20fonctionnement,et%20de%20neutrons...%20>
- [20] : Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [21] : F. Guessoumi, Saadi A « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic », Mémoire ingénieur, université de Biskra, 2010.
- [22] : Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [23] : Helali Kamelia, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [24] : M. SLAMA Fateh, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, ». Mémoire de magister, " UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-, 2011.
- [25] : A.Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [26] : A. Mokhtar - H. Melloul, « Etude d'un système de pompage photovoltaïque », Thèse de Master II, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017

[27] : MEZIANI Zahra, « *MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2012

[28] : Guessoumi, Saadi A « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic », Mémoire ingénieur, université de Biskra, 2010.

[29] :S. Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Mèmoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2011

[30] : <https://www.valeurenergie.com/photovoltaique-quels-criteres-de-choix-pour-les-panneaux-solaires/>

[31] : <https://terresolaire.com/Blog/batiment-solaire/inclinaison-panneau-solaire-orientation/>

[32] : <https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-production-denergie/energie-solaire/>
<https://www.calculeo.fr/eco-travaux/les-travaux-d-economies-d-energie/energie-solaire-avantages-inconvenients>

Chapitre II :
Poursuite du point maximal
de puissance

II.1. Introduction :

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, pour un générateur photovoltaïque (GPV), la production d'énergie varie considérablement en fonction de la lumière, de la température et des propriétés de charge. Le changement climatique ou les modifications du comportement de la charge entraînent une dégradation des performances du GPV. En raison de cette dégradation, et pour que le GPV fournisse sa puissance maximale disponible, il est nécessaire d'adapter en permanence la charge au générateur PV. Cette adaptation peut être réalisée en insérant un convertisseur (hacheur) contrôlé par le mécanisme de suivi du point de puissance maximale. Ce type de contrôle est souvent désigné dans la littérature par « recherche du point de puissance maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de rechercher le point de puissance maximum (PPM) tout en assurant une parfaite adéquation entre le générateur et sa charge pour délivrer un maximum de puissance.

II.2. Principe de fonctionnement :

Maximum Power Point Tracker (MPPT) permet aux modules PV de fonctionner à leur point de puissance maximum. Le principe de la commande (MPPT) est de trouver le point de puissance maximale (PPM) pour délivrer la puissance maximale tout en s'assurant que le générateur est parfaitement adapté à sa charge. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance tirée du panneau solaire. Le point de puissance maximale (MPP) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. Chaque tension ou puissance mesurée est réutilisée dans le cycle pour déterminer si le module solaire est à son point de puissance maximum.

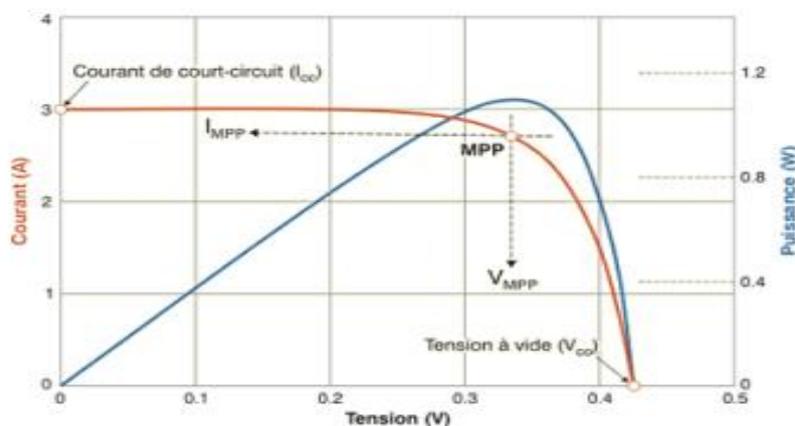


Figure II.1 : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.

L'association d'un convertisseur statique DC / DC, comme le montre la (**Figure II.2**), utilise des commandes externes pour modifier le point de fonctionnement du panneau afin de maximiser le transfert permanent d'énergie. La complexité de l'algorithme de recherche MPPT dépend du type d'implémentation choisi et des performances recherchées. En fin de compte, cependant, tous les algorithmes efficaces doivent fonctionner en fonction de la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [1].

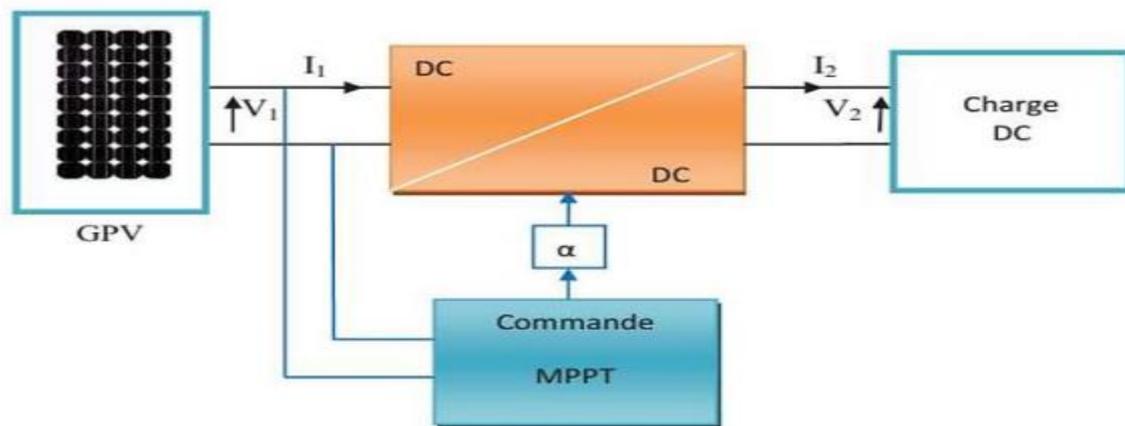


Figure II.2 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

II.3. Classification Des Commandes MPPT :

Nous pouvons catégoriser les commandes MPPT en fonction du type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou hybride. Cependant, plus intéressant est Catégorisez-les selon le type de recherche qu'ils effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [2].

II.3.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :

II.3.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du Convertisseur :

Ce type de commande MPPT effectue une recherche du MPP en fonction de l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Le contrôle nécessite alors de mesurer le courant et la tension à l'entrée du convertisseur. D'autres types de contrôle MPPT sont basés sur la régulation du courant du GPV, en supposant que ce dernier est une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de se rapprocher le plus possible du courant optimal I_{opt} . Ce contrôle demande un seul capteur est plus simple et moins coûteux à mettre en œuvre [2].

II.3.1.2. Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du Convertisseur :

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur des paramètres de sortie CS. En pratique, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou juste l'un des deux. La commande MPPT basée sur la maximisation du courant de sortie est principalement utilisée lorsque la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant des paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est dérivée du rendement du convertisseur. Plus la transformation est bonne, plus cette approximation est efficace. D'autre part, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis [2].

II.3.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :**II.3.2.1. MPPT indirect :**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur [2].

II.3.2.2. MPPT direct :

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode « Perturb & Observe », l'incrément de conductance... [2].

II.4. Les techniques de commandes d'MPPT :

Pour extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes approches, certains concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres nécessitent des dispositifs logiques très complexes, tels que des microprocesseurs associés à des circuits de puissance, des convertisseurs à découpage...etc., Depuis 1968, des discussions ont eu lieu sur les commandes permettant d'assurer un fonctionnement de type MPPT. Régulièrement, la date de publication de première loi de commande s'applique aux énergies renouvelables de type photovoltaïque. Les techniques de maximisation de puissance suivantes sont souvent citées dans la littérature : [3].

- La méthode de Perturbation et observation (P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance (IncCond).
- La commande de Hill Climbing.

II.5. Les commandes MPPT classique :

II.5.1. La méthode Perturbe & Observe (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation (P&O) est l'une des plus largement utilisées et naturellement pensées pour la recherche du point de puissance maximale MPPT, car elle est simple et ne nécessite que la mesure de la tension et du courant du panneau PV : V_{pv} et I_{pv} , respectivement. Il peut déduire le point de puissance maximum même pendant les changements d'éclairage et de température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne en introduisant une petite perturbation dans la mesure de tension en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur statique, puis en observant la direction du changement de puissance de sortie PV. La **Figure II.3** représente le changement de puissance en fonction de la tension du panneau PV. On voit que si après la perturbation de tension, la puissance PV augmente, La direction des perturbations reste inchangée. Sinon, il est inversé pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La trajectoire de la variation de ces points est représentée par la **Figure II.3** [4].

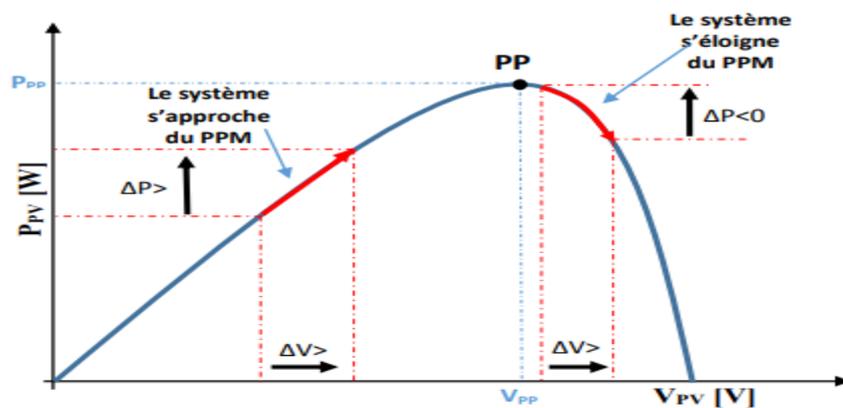


Figure II.3 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces différentes analyses de l'effet de la variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est aisé de trouver le point de fonctionnement associé au PPM et de faire converger ce dernier vers la puissance maximale avec une séquence de commandes adaptée. Deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus adaptée à la mise en œuvre de la méthode P&O, même s'il est possible de simuler [5].

La **Figure II.4** représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

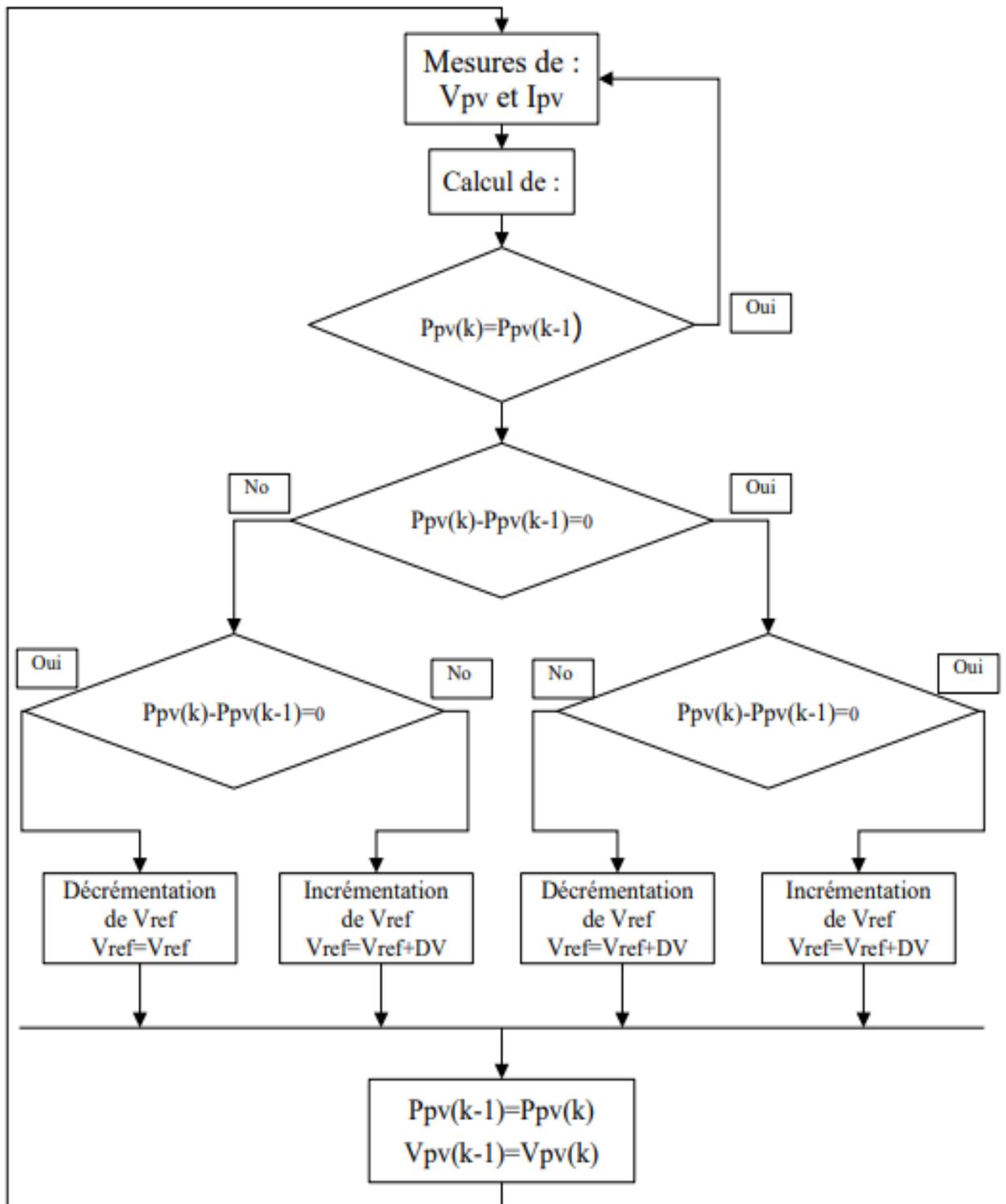


Figure II.4 : Algorithme type de la méthode P&O [8].

La méthode P&O est largement utilisée en raison de sa facilité de mise en œuvre, mais elle pose quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle produit en régime permanent, car le processus de recherche de PPM doit être répété périodiquement, forçant le système dans le PPM, une fois il atteint [6]. Ce dernier. Ces oscillations dépendent de la taille du pas de perturbation [7]:

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode **P&O** lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. **Figure II.5** Commencant par un point de fonctionnement **A**, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point **B**, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. En revanche, si par exemple on augmente l'éclairement et que l'on déplace la courbe de puissance de **E1** à **E2**, le point de fonctionnement passera de **A** à **D** en un cycle du MPPT. Cela représente une augmentation de puissance, l'algorithme précédent réagissait comme si l'augmentation était causée par un effet de perturbation précédent, puis il continuait dans la même direction (qui est une mauvaise direction), ce qui l'éloignerait du vrai point de maximum Puissance. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la lumière du soleil se stabilise et revienne au véritable point de puissance maximale. Cela peut entraîner des réponses retardées aux changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [6].

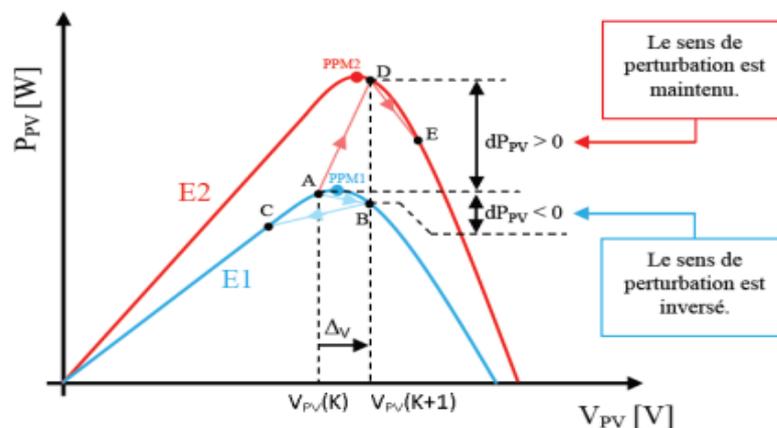


Figure II.5 : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.

II.5.2. Conductance Incrémentale (IncCond) :

Pour rechercher le PPM, cette autre technique est basée sur la connaissance des changements de conductance GPV et l'effet de la localisation du point de fonctionnement par rapport au PPM. Par conséquent, la conductance d'un module PV est définie par le rapport du courant et de la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

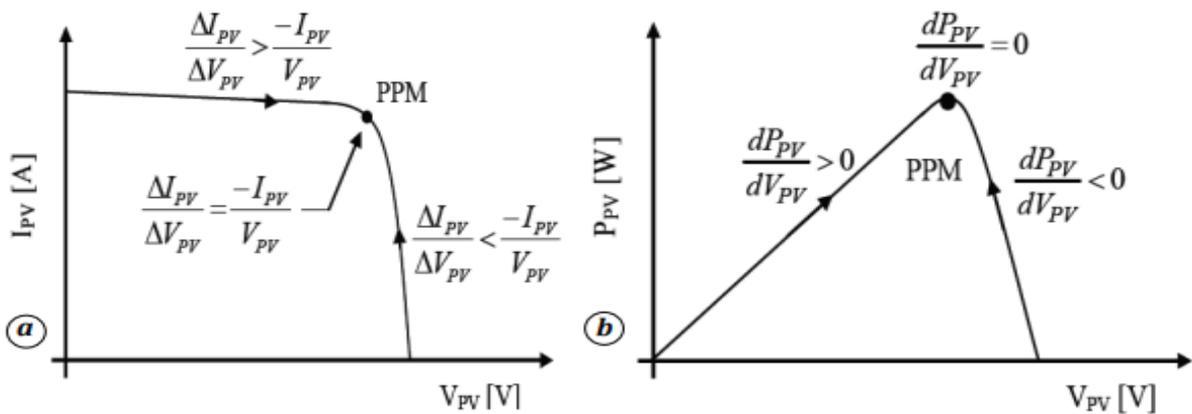
$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{II-1}$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{II-2}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (PPV) par rapport à la tension (VPV) donne la localisation du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que nous sommes sur le PPM, si elle est positive, le point de fonctionnement est à gauche du maximum, et lorsqu'elle est négative, nous sommes à droite. La **Figure II.6** permet d'écrire les conditions suivantes [8] :

- ❖ Si $dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- ❖ Si $dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM, (II-3)
- ❖ Si $dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement à droite du PPM,



a) le signe de dP_{pv} / dV_{pv} sur la caractéristique de puissance

b) le signe de la valeur de $\Delta I_{pv} / \Delta V_{pv}$ sur la caractéristique de courant

Figure II.6 : Positionnement du point de fonctionnement.

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (II-4) et la dérivée de la puissance (dP_{pv}/dV_{pv}) peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} * V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \cong I_{pv} + I_{pv} * \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (\text{II-4})$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (II-5) sur la dérivée de puissance :

- ❖ Si $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- ❖ Si $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est sur le PPM,
- ❖ Si $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement à droite du PPM,

Comme le montre l'algorithme de la **Figure II.7**, la puissance maximale peut alors être suivie en comparant la valeur de conductance (I_{pv}/V_{pv}) à la valeur delta de conductance ($\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$) à chaque instant. (V_r) est la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est en PPM, la tension (V_r) correspond à la tension optimale (V_{opt}). Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut y rester jusqu'à ce qu'un changement de (ΔI_{pv}) soit détecté. Cela indique que les conditions climatiques ont changé, de sorte que de nouveaux PPM doivent être trouvés. Pour ce faire, l'algorithme augmente ou diminue la valeur de (V_r) jusqu'à atteindre PPM [8].

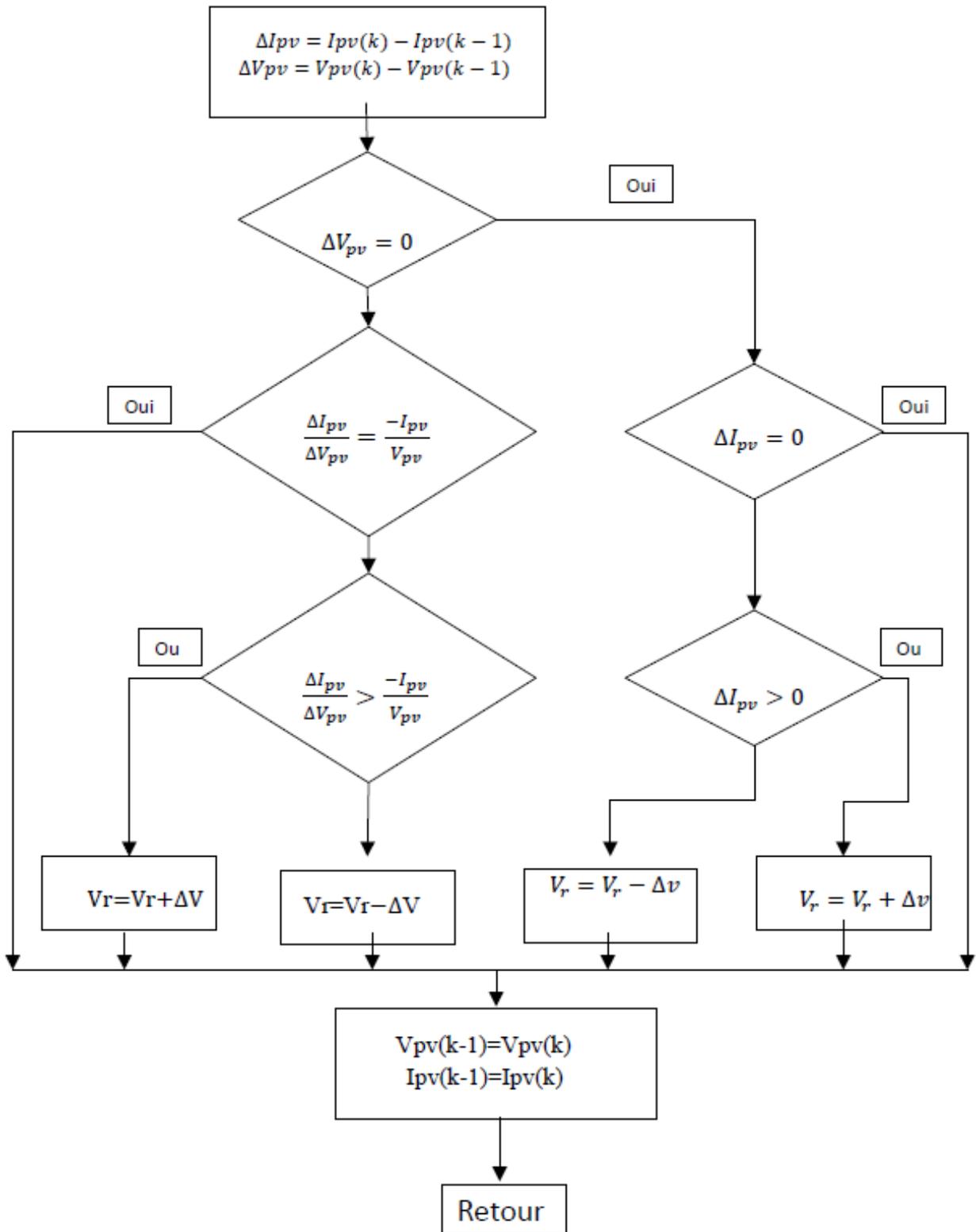


Figure II.7 : Algorithme d’une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de conductance [10].

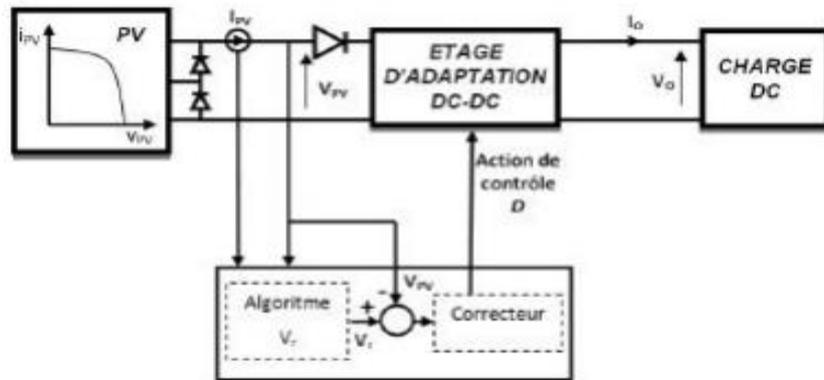


Figure II.8 : Fonctionnement d'une commande MPPT de type "IncCond"

Illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV [9].

En théorie, en utilisant une méthode de contrôle de type IncCond, il est possible de trouver un PPM et de s'arrêter en arrêtant la perturbation. Dans ce cas, (ΔV_{pv}) est nul, et c'est le contrôle de l'apparition de (ΔI_{pv}) qui réactive le couple (V_r) pour atteindre le nouveau PPM. Cela se produit lors des changements d'ensoleillement, par exemple. C'est une propriété intéressante en soi par rapport aux deux premiers types de MPPT, car en régime permanent, avec PPM. De plus, cette approche ne présente aucun risque de déviation du PPM.

En pratique, le système présente une oscillation comme la commande P&O autour du PPM, à cause du bruit aux niveaux des acquisitions des paramètres d'entrée (I_{pv} et V_{pv}) et de la difficulté au système de bien analyser si la relation $\frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = 0$ est bien remplie ou non.

Donc, en réalité, cette condition n'est jamais obtenue, le système la recherche sans cesse. Les algorithmes prennent plus de temps à s'exécuter que les commandes P&O car ces dernières sont plus complexes. En conséquence, l'intervalle de temps entre deux échantillons de tension et de courant augmente, entraînant des retards dans la détection du changement climatique [10].

II.5.3. La méthode Hill climbing :

Une technique de commande dite Hill Climbing consiste à faire "monter" le point de fonctionnement selon les caractéristiques du générateur, présentant une valeur maximale. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la

valeur du rapport cyclique appliqué au "convertisseur statique" CS. Mathématiquement, PPM est atteint lorsque dP_{pv}/dD est forcé à zéro par la commande, comme indiqué dans la **Figure II.9**

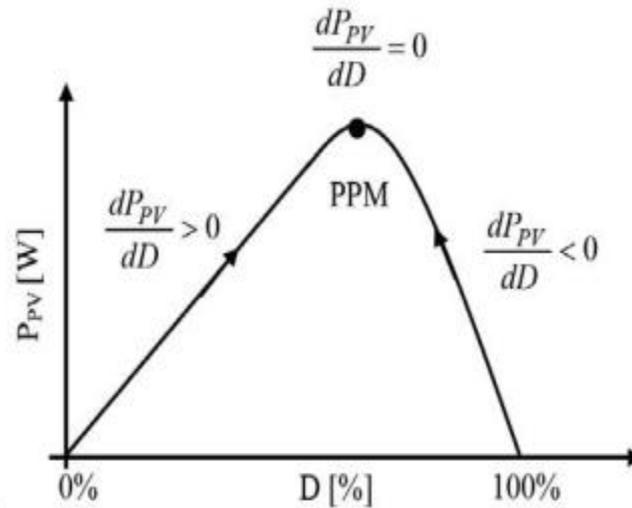


Figure II.9 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique

L'algorithme de cette méthode est représenté sur la **Figure II.10**. La variable Slope correspond à une variable qui prend la valeur "1" ou "-1" selon le sens que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance de sortie du panneau. (D) et ($P_{pv}(k)$) représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, et (a) représente la variable incrémentielle du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance (P_{pv}) à la valeur ($P_{pv}(k-1)$) précédemment déterminé, en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur slope change ou reste le même. Cela a pour effet d'augmenter ou de diminuer la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système tourne autour de cette dernière valeur ajoutée, indéfiniment les compromis fait entre rapidité et précision, comme l'approche précédente, et les pertes liées à ces oscillations [10].

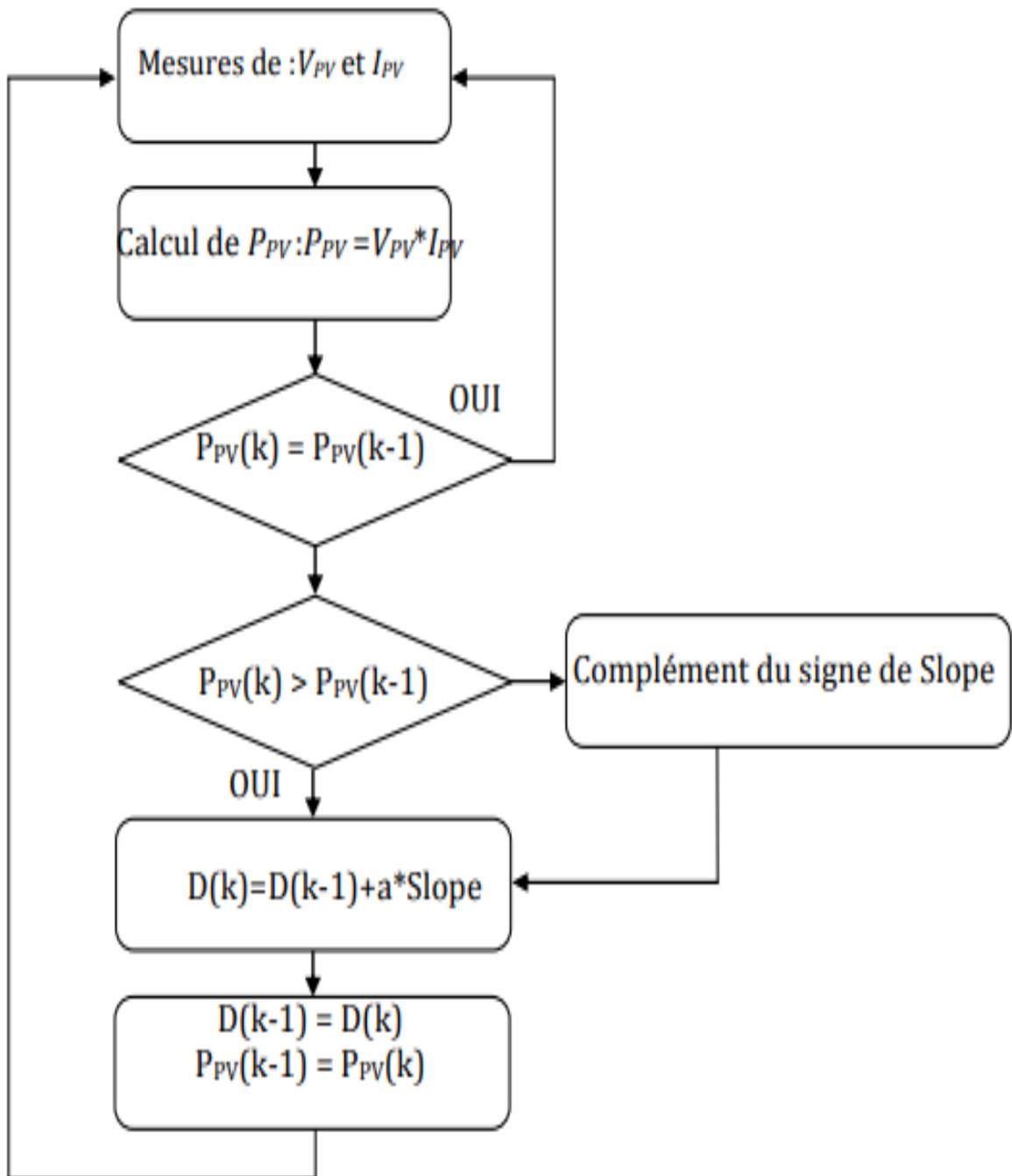


Figure II.10 : Algorithme type de la commande Hill Climbing [8].

Un schéma fonctionnel est présenté à la **Figure II.11**. Cette dernière technique a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre. En revanche, elle souffre des mêmes inconvénients que la méthode P&O, à savoir des oscillations autour du PPM en régime permanent et la perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changements rapides des conditions climatiques [10].

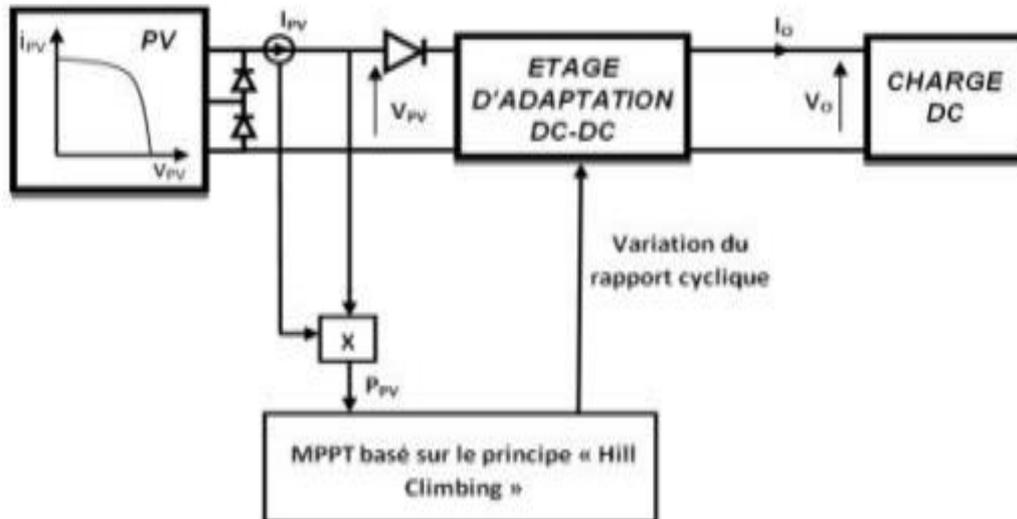


Figure II.11 : Schéma de principe de la commande Hill Climbing [9].

II.6. Autres Méthodes :

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [11-12] :

- Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension, VCO.
- Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant, Icc
- Algorithme à base de la logique floue
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

Le **tableau II-1** résume les caractères majeurs des différentes techniques MPPT dont nous avons rappelé les principes ci-dessus.

Tableau II.1 : Caractéristiques majeures des commandes MPPT [6].

Méthode MPPT	Connaissance des paramètres du GPV	Nécessité d'une mise à jour périodique	Mode d'implantation	Complexité d'implantation	Vitesse de recouvrement du PPM	Type et nombre de capteur	Rendement (%)
P&O	Non	Non	Analogique ou numérique	Basse	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	81-96
Inc-cond	Non	Non	Numérique	Moyenne	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	90-98
Hill Climbing	Oui	Oui	Analogique ou numérique	Basse	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	95-99
Fonction de VCO	Oui	Oui	Analogique ou numérique	Moyenne	Moyenne	1 capteur tension.	96
Fraction Icc	Oui	Oui	Analogique ou numérique	Moyenne	Moyenne	1 capteur courant.	94
Logique floue	Oui	Oui	Numérique	Haute	Rapide	Variable	99
Balayage du courant	Oui	Oui	Numérique	Haute	Lentement	1 capteur courant. 1 capteur tension.	Variable

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillés les différentes méthodes MPPT les plus couramment rencontrées dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT indique que ce domaine de recherche est en constante évolution, À cette fin, nous avons présentés les principes des techniques les plus populaires et couramment utilisées dans la recherche ou l'industrie. Un tableau comparatif des différentes méthodes selon plusieurs critères peut guider le lecteur pour trouver ou évaluer le MPP. Il aide les concepteurs à choisir les commandes MPPT en fonction de leurs besoins (coût, complexité, précision, vitesse de convergence, etc.). Au-delà des principes, cependant, le concepteur ou l'utilisateur doit être conscient que même les contrôles basés sur les mêmes principes peuvent varier considérablement en qualité de commande existent.

Référence bibliographique

[1] : Mohamed Aymen SAHNOUN, « Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV) », Thèse de doctorat, Institut de sciences et technologies, PARIS, 2015.

[2] : M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006.

[3] : M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[4] : ZAGHBA Layachi, « Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.

[5] : Akihiro Oi, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of california polytechnic state university, 2005.

[6] : Amarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE CONSTANTINE 1, 2014.

[7] : M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, ». Mémoire de magister, " UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-, 2011.

[8] : Salim ABOUDA, « CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES : APPLICATION AUX SYSTEMES DE POMPAGE », Thèse de Doctorat en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.

[9] : https://nanopdf.com/download/chapitre-iii23-09_pdf

[10] : BOUTABBA Tarek, « Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2018.

[11] : Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim, “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.

[12] : Trishan Efram And Patrick “comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.

Chapitre III :
Les convertisseurs DC/DC ;
DC/AC

III.1. Introduction :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue DC/DC), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif DC/AC).

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, des définitions et notions de bases sur les convertisseurs, ainsi que les modèles mathématiques nécessaires à l'étude de leur comportement lors de la simulation du système PV global.

III.2. Convertisseur DC/DC :

Un convertisseur DC-DC ou hacheur est un appareil électronique de puissance placé entre le générateur et le récepteur, tous deux à courant continu, il permet d'ajuster la tension appliquée au récepteur ou le courant qui y circule avec un haut rendement, avec une grande souplesse[1].

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans un monde idéal, aucun de ces appareils ne consommerait de puissance active, c'est pourquoi nous avons de bons rendements. Le commutateur est constitué d'un dispositif semi-conducteur, généralement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul, donc la dissipation de puissance est nulle. Si l'appareil est en saturation, la chute de tension à ses bornes est quasi nulle, donc la perte de puissance sera très faible [2].

La **Figure III.1** montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

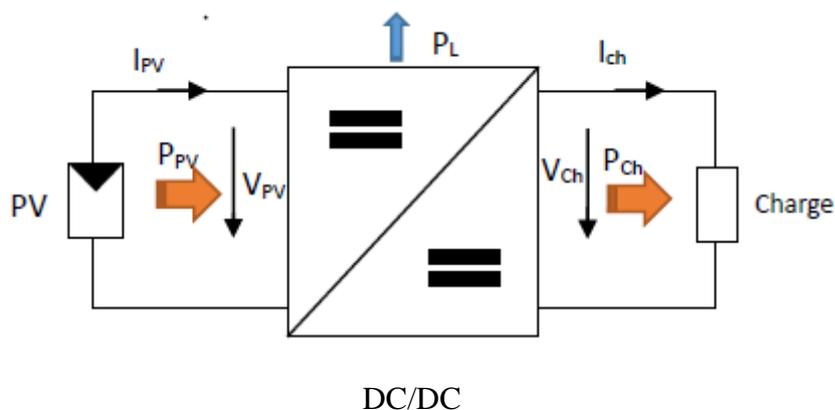


Figure III.1 : convertisseurs DC-DC.

Les hacheurs peuvent être directs ou indirects :

- **Un hacheur direct** relie le générateur et le récepteur, l'un comme source de tension et l'autre comme source de courant. Ils n'ont que des interrupteurs qui vous permettent de faire fonctionner la connexion entre le générateur et le récepteur.
- **Un hacheur indirect** relie un générateur et un récepteur du même type. Ils ont des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie qui reçoit l'énergie d'un générateur puis la transmet à un récepteur en fonction de la connexion de l'interrupteur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trios types des convertisseurs utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques :

- ❖ Élévateur de tension « BOOST » ou notamment appelé hacheur survolteur.
- ❖ Abaisseur de tension « BUCK » ou hacheur dévolteur.
- ❖ Abaisseur/Élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

Ces convertisseurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ces types de convertisseurs ne sont constitués que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) [3].

Dans le littérature on trouve plusieurs convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de quelque type de convertisseur :

Tableau III.1 : la complexité de quelque type de convertisseur [3].

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

III.3. Composition du convertisseur :

III.3.1. Le transistor MOSFET :

Le MOSFET de faible puissance (Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor). La **Figure III.2** donne la notation usuelle. La connexion partant de la borne reliée au substrat (buck) B se termine par une flèche indiquant le sens de passage des deux jonctions substrat-source et substrat-drain.

Habituellement, le substrat et la source sont connectés. La **Figure III.2** montre les symboles utilisés.

Dans un semi-conducteur dopé de type P (**Figure III.3**), deux régions de type N ont été diffusées sur lesquelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. La couche d'oxyde recouvre la région P entre la source et le drain, le contact de grille (gate) G est soudé sur cette couche. C'est un semi-conducteur à oxyde métallique continu et on lui donne le préfixe MOS pour caractériser ce type de transistor [4].

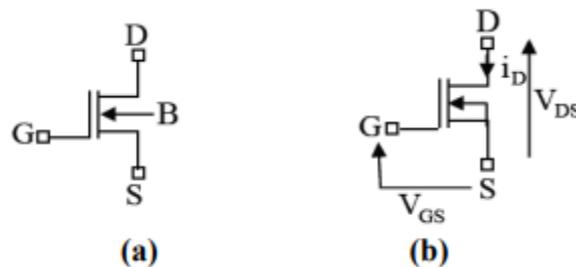


Figure III.2 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N.

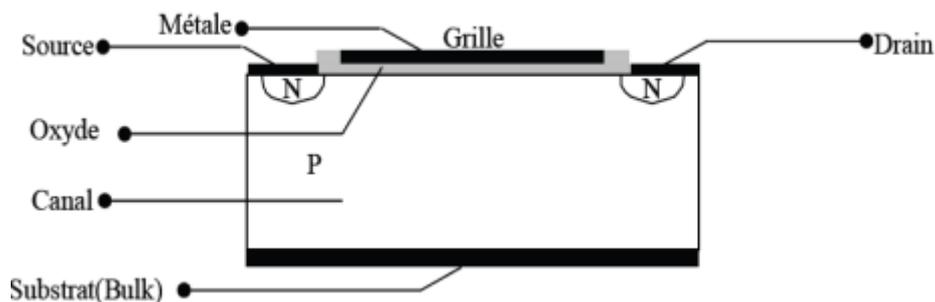


Figure III.3 : Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.

III.3.2. Le condensateur :

Les condensateurs que nous rencontrons dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils sont utilisés comme énergie lors des changements de commande ou de charge,

et ils sont également utilisés comme condensateurs de commutation ou de filtrage associés au fonctionnement à haute fréquence. Ce sont des condensateurs chimiques dits à faible résistance série qui ont des valeurs de capacité élevées tout en ayant une excellente tenue en fréquence. Les condensateurs sont caractérisés par des grandeurs physiques qui définissent leur domaine d'application. La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge stockée Q sur la tension V appliquée entre ses armatures [5].

$$C(F) = Q(C)/V(V)$$

III.3.3.L' inductance

Le rôle d'une inductance est de stocker magnétiquement l'énergie électrique, puis de la restituer. Bien sûr, des bobines d'air peuvent être produites. Cependant, l'utilisation d'un circuit magnétique comme indiqué ci-dessous permet :

- Taille réduite, avec la même valeur d'inductance.
- Confine le flux magnétique dans un espace confiné, limitant ainsi les rayonnements parasites.

Les inductances sont principalement utilisées dans les applications de filtrage, de conversion d'énergie (alimentations à découpage, etc.) et de commutation magnétique (inductances saturables). Schéma de circuit équivalent d'une simple inductance L et le suivant [6] :

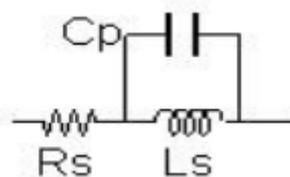


Figure III.4 : inductance simple L.

III.3.3. La diode Schottky :

La diode Schottky présente deux avantages par rapport aux diodes classiques :

- Caractéristique électrique : tension de blocage de 600 V.
- Tension de seuil plus faible ($V_s = 0,3V$).
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts (t_r de 0,15 à 0.35 μ s)

Les diodes Schottky sont utilisées en basse tension dans les circuits nécessitant une grande vitesse de commutation, par exemple dans les montages hacheurs à haute fréquence que l'on rencontre dans les alimentations à découpage [7].

III.4. Les types des convertisseurs de tension DC/DC « HACHEUR » :

III.4.1. Convertisseur élévateur « BOOST »

BOOST, également connu sous le nom d'hacheur parallèle, est un convertisseur direct DC-DC survolteur (élévateur), comme le montre la figure (**Figure III.5**). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie de valeur supérieure. La source d'entrée est de type courant continu (inductance et source de tension en série), la charge de sortie est de type tension courant continu (condensateur et charge résistive en parallèle) [8].

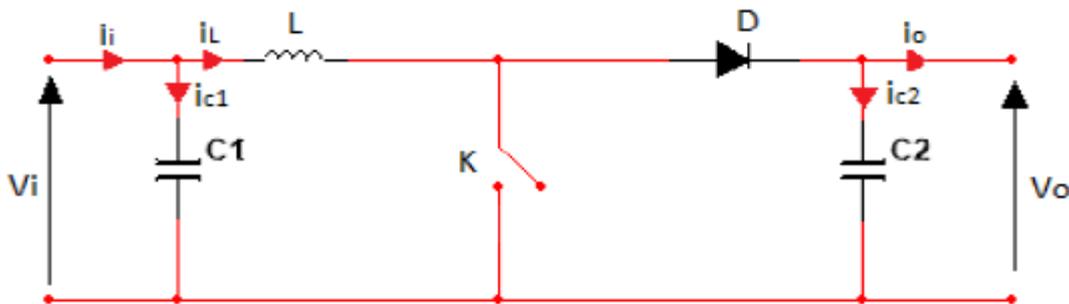


Figure III.5 : convertisseur DC-DC de type BOOST

Principe de fonctionnement :

L'étude se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K pendant un période de commutation T :

D'abord on définit la valeur α appelé le rapport cyclique, Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur K conduit. α est compris entre 0 (K ne conduit jamais) et 1 (K conduit tout le temps).

Mode continu de 0 à αT : (Une phase d'accumulation d'énergie) :

Si l'interrupteur K est fermé le schéma équivalent de convertisseur devient comme représente la figure (**Figure III.6**), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique [9].

La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation :

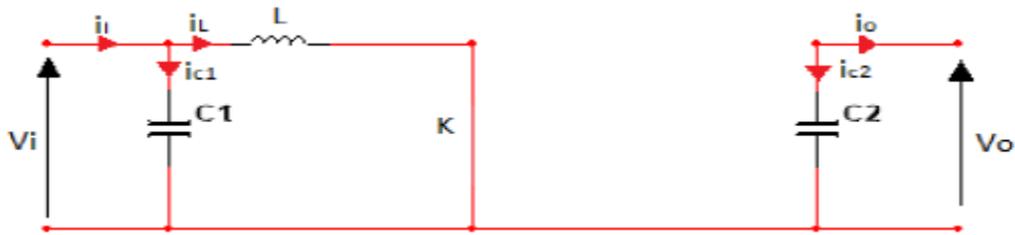


Figure III.6 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est fermé.

Le convertisseur, dans ce cas, peut modéliser par les équations suivantes [10] :

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{V_i}{L}$$

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{1}{C_2} i_o$$

- **Mode discontinu de αT à T :** (phase de roue libre) :

Lorsque l'interrupteur K est ouvert, **Figure III.7**, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur).Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge [11].



Figure III.7 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est ouvert

Le convertisseur, dans ce cas, peut modéliser par les équations suivantes :

$$\frac{di_l}{dt_i} = \frac{V_i - V_o}{L}$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{i_L}{C_2} - \frac{1}{C_2} i_0$$

La tension et le courant de sortie de convertisseur BOOST est donnée par :

$$V_0 = \frac{1}{1 - \alpha} V_i$$

$$i_0 = (1 - \alpha) i_0$$

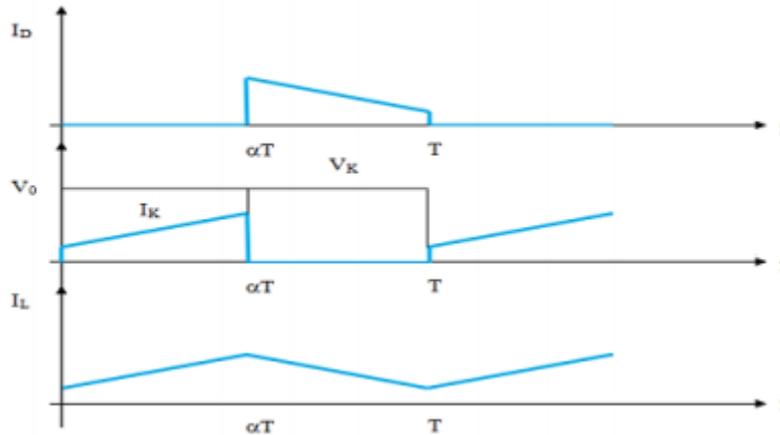


Figure III.8 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost [13].

III.4.2. Convertisseur abaisseur « BUCK » :

C'est un convertisseur DC-DC direct. Les convertisseurs buck peuvent souvent être trouvés dans la littérature en tant que hacheur dévolteur ou hacheurs en série. La source d'entrée est un type de tension continue et la charge de sortie continue est un type de source de courant. Convertir une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure [12].

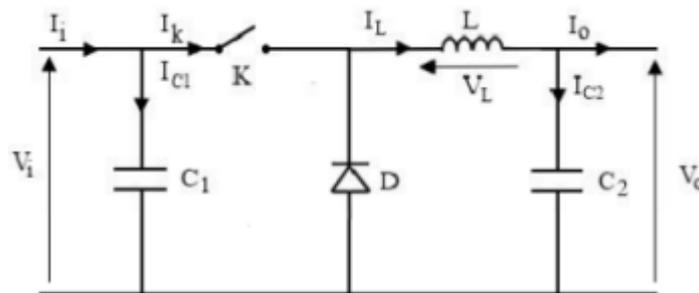


Figure III.9 : Schéma électrique d'un convertisseur buck.

Principe de fonctionnement :

Comme pour le hacheur boost nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie.

- **Mode continu de 0 à αT :**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance [13].

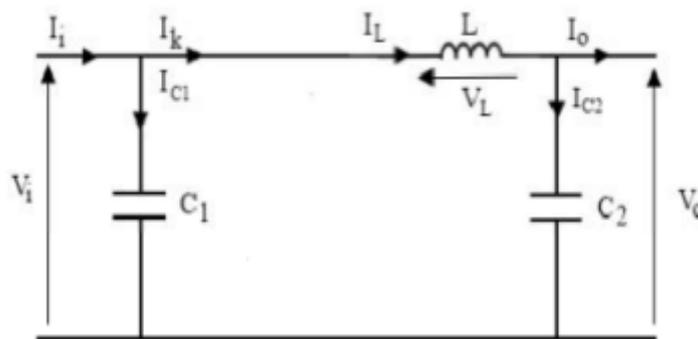


Figure III.10 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type Buck l'interrupteur K est fermé.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_i(t) - I_o(t)$$

$$V_L(t) = C_2 \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)$$

- **Mode discontinu de αT à T :**

Pendant le temps $T \in [\alpha T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [13].

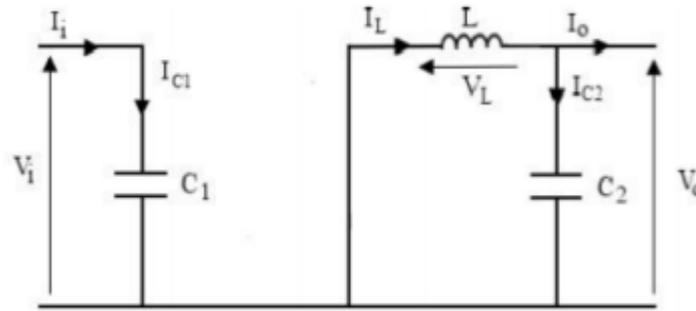


Figure III.11 : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BUCK l'interrupteur K est ouvert

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t)$$

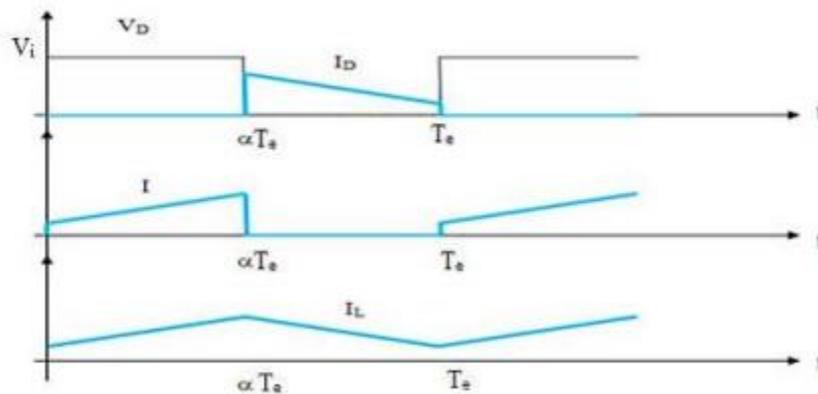


Figure III.12 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck [13].

III.4.3. Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST » :

Un convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure (Buck) ou supérieure (Boost) avec une polarité opposée [14]. Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée. Un inconvénient de ce convertisseur est que ses interrupteurs n'ont pas de borne reliée au zéro, ce qui complique sa commande [15] . Son schéma de base est illustré sur la **Figure III.13**.

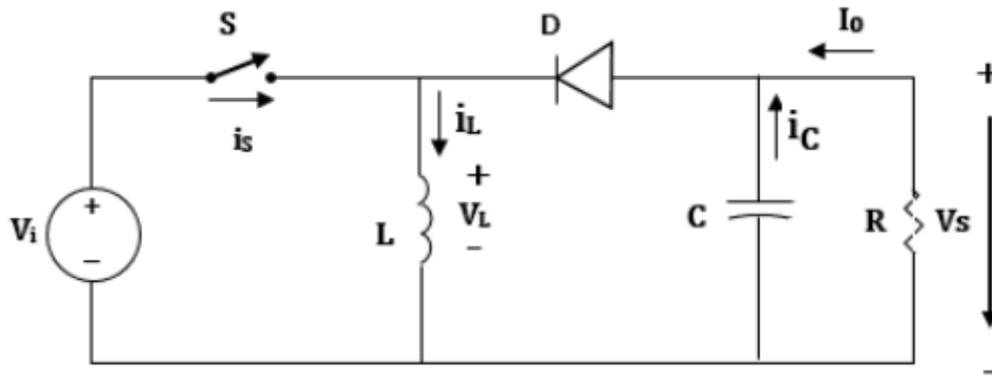


Figure III.13 : schéma électrique d'un convertisseur buck-boost [14].

Principe de fonctionnement :

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donné comme suit [16] :

$$V_s = \frac{D}{1-D} \times V_i$$

III.5. Caractéristiques de convertisseurs [17] :

III.5.1. La puissance nominale :

C'est la puissance en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. En théorie, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les équipements fonctionnent simultanément et le choix de la puissance nominale résultera du maximum de la courbe de consommation moyenne.

III.5.2. Le rendement :

C'est un critère très important car il influence sur la taille du champ photovoltaïque et de la cellule. Celle-ci varie en fonction du facteur de charge (rapport de la puissance de sortie à la puissance nominale), et ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est également donné entre l'énergie dissipée par la charge et l'énergie fournie par la source DC.

III.5.3. La consommation à vide :

Une consommation élevée à vide réduit l'énergie stockée dans la batterie (en conditions nocturnes). Il est donc important de limiter les pertes à un faible pourcentage (1 à 5 %) de la puissance nominale. Pureté de tension sinusoïdale pure (220v – 50Hz). Plus ou moins de pureté de la tension de sortie peut être obtenue grâce à :

- Les systèmes régulés qui ont tendance à maintenir la tension et la fréquence à des valeurs nominales quelle que soit la tension d'entrée.
 - Filtrage de sortie de l'onduleur, tend à lisser la forme d'onde de tension, réduisant ainsi le taux d'harmoniques.
- ❖ Les convertisseurs d'électronique de puissance sont constitués d'un assemblage de dispositifs (composants électroniques) connectés entre eux. Le principe de la conversion de puissance est basé sur la commutation. La commande du convertisseur utilise généralement des techniques de commutation pour commander les interrupteurs de puissance. Différents types de transformations peuvent être obtenus [18] :
- Conversion continue-continue (Hacheur);
 - Conversion alternative-continue (Redresseur);
 - Conversion continue-alternative (Onduleur);
 - Conversion alternative-alternative (Gradateur).

Comme nous l'avons défini,

III.6. L'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion de l'énergie électrique du courant continu (DC) en courant alternatif (AC). En fait, cette conversion d'énergie est réalisée au moyen de dispositifs de contrôle (semi-conducteurs). Il obtient une tension alternative à fréquence et valeur efficaces réglables aux bornes du récepteur, en utilisant la séquence de commandes appropriée [19].

On distingue deux types d'onduleur : onduleur de tension et onduleurs de courant en fonction de la source continue. Les onduleurs de tension qui sont les plus répandus dans les systèmes industriels et dans toutes les gammes de puissance (de 1kW à plusieurs MW) [20].

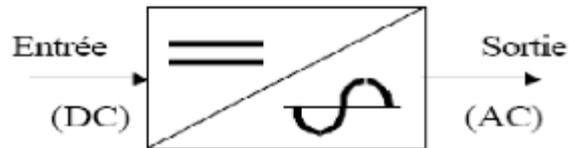


Figure III.14 : Symbole de l'onduleur

-Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [20] :

• **Onduleur Monophasé :**

Ce type d'onduleur fournit une tension alternative monophasée à sa sortie et est généralement utilisé pour l'alimentation de secours. On distingue différentes structures d'onduleur monophasé : onduleur en demi-point, onduleur avec transformateur à point milieu et onduleur on pont complet.

• **Onduleur Triphasé :**

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour les applications de grande puissance. La structure de ce convertisseur est constituée de trois onduleurs monophasés demi-pont (ou pont) connectés en parallèle, fournissant trois tensions de sortie déphasées de 120°

III.7. Onduleur PV :

Un onduleur, appelé convertisseur DC/AC, est le dispositif électronique central d'un système photovoltaïque connecté au réseau qui convertit la puissance continue produite par les modules Photovoltaïque en courant alternatif pouvant être transmis au réseau. Il se compose d'une commande MPPT qui suit le point de fonctionnement optimal du module, un Ponts et transformateurs capables de convertir le courant continu en courant alternatif. L'onduleur peut appliquer une fréquence prédéfinie de 50 Hz ou 60 Hz.

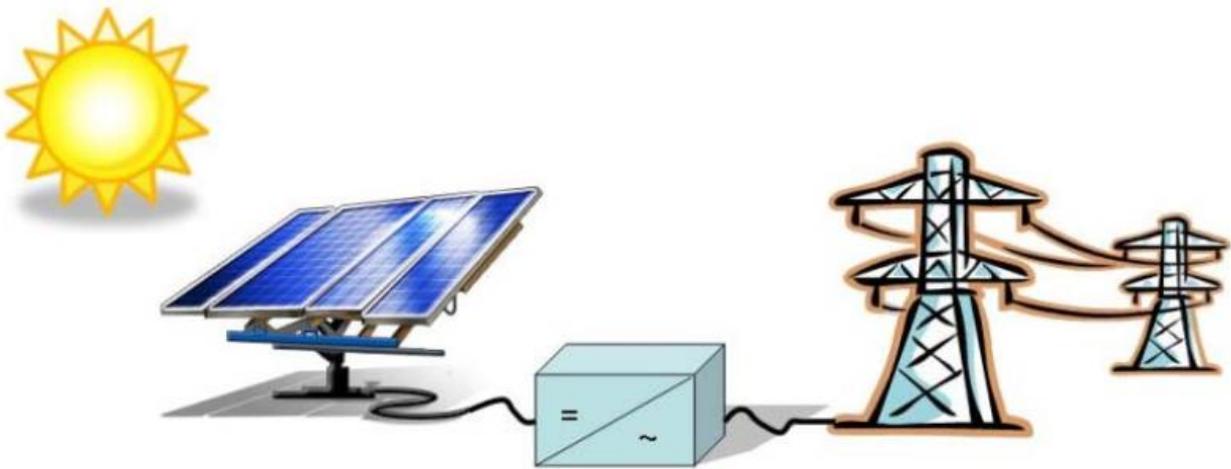


Figure III.15 : Système photovoltaïque connecté au réseau

La fonction principale d'un onduleur photovoltaïque est de fournir un signal de sortie CA à partir d'une source d'alimentation CC. Il existe deux types d'onduleurs sur le marché :

- **Les onduleurs de source-courant (Current-Source Inverter (CSI))** pour les applications industrielles moyenne tension où des formes d'onde de tension de haute qualité sont requises.
- **Les onduleurs de source-tension (Voltage-Source Inverter (VSI))**, le plus populaire pour ses performances

III.8. Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ont les différentes topologies selon la connexion du générateur PV avec le réseau électrique. En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs topologies ont été conçues comme suivent :

III.8.1. Topologie d'onduleur central (Centralized inverter) :

Cette architecture, également appelée topologie d'onduleur centralisé, est la plus ancienne et la plus classique. Il se compose d'un seul onduleur qui assure l'interface entre le réseau et le champ photovoltaïque. Le champ photovoltaïque est formé d'un certain nombre de modules PV disposés en série et en parallèle pour répondre aux exigences de tension d'entrée de l'onduleur central (**Figure III.16**).

L'avantage de cette architecture est qu'elle est simple à mettre en œuvre et à piloter, ne nécessitant qu'un seul onduleur à raccorder au champ photovoltaïque. De plus, le coût d'investissement de l'onduleur central est faible et la maintenance est simple. La simplicité d'assemblage peut également améliorer l'efficacité de la conversion de tension.

Ceci se fait au prix d'une réduction d'énergie due à la différence entre les caractéristiques du panneau photovoltaïque et le phénomène d'ombrage partiel.

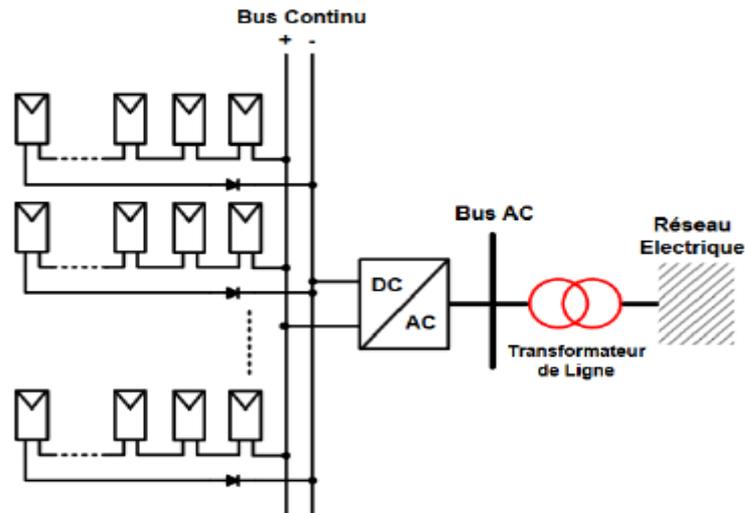


Figure III.16 : Topologie d'onduleur Central

III.8.2. Topologie d'onduleur string (String inverter) :

Dans ce cas de figure, le champ photovoltaïque est scindé en plusieurs chaînes de modules PV connectés en série ou en série-parallèle. Un onduleur est dimensionné pour être placé au bout de chaque chaîne.

Les onduleurs sont alors connectés en parallèle au réseau. Cette architecture, illustrée à la **Figure III.17**, présente l'avantage d'avoir un onduleur par rangée et donc un étage MPPT par rangée. Par conséquent, la collecte de l'énergie photovoltaïque est nettement améliorée par rapport à la topologie centralisée. De plus, la continuité de service est assurée, la panne d'un convertisseur n'entraînant pas l'arrêt complet de l'équipement. Des diodes anti-retours sont également nécessaires. Enfin, cette architecture est évolutive car chaque ligne constitue un sous-ensemble indépendant. Si la puissance de l'unité augmente, remplacez simplement la connexion AC. En fonction de la taille de la chaîne PV, un hacheur élévateur sera ajouté par rangée. Des transformateurs haute fréquence seront également utilisés pour répondre aux normes de raccordement au réseau.

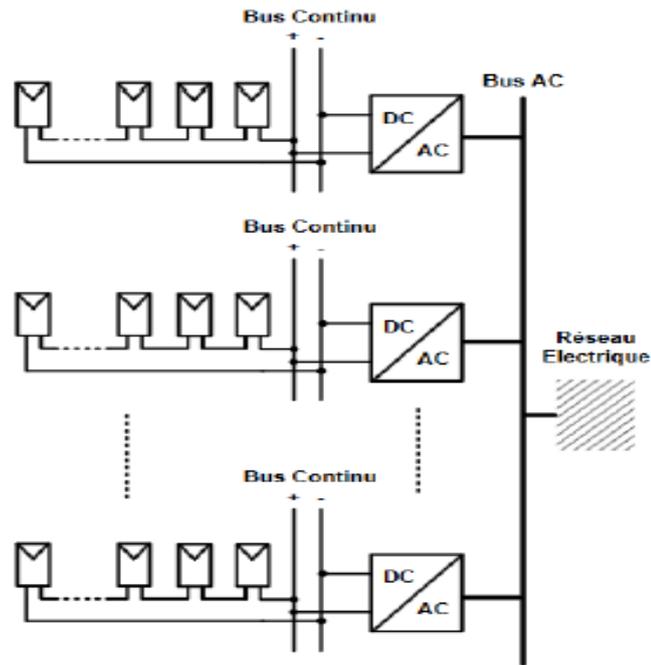


Figure III.17 : Topologie d'onduleur string.

L'inconvénient majeur de ce type d'architecture est l'augmentation du coût de l'installation, et de la complexité de la mise en œuvre de lois de commande. En effet, les convertisseurs DC/AC, connectés en parallèle au réseau électrique, nécessitent une coordination rigoureuse et découplée, ceci afin d'éviter les échanges de puissances entre différents étages, d'une part, et de proscrire un fonctionnement en îlotage, d'autre part.

III.8.3. Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter) :

Cette architecture combine les avantages d'une architecture centralisée et celle en chaînes(multi-string). Les topologies multi-chaînes utilisent un convertisseur DC/DC à la fin de chaque string PV. Connectez ensuite l'ensemble à l'onduleur central. Par conséquent, l'hacheur développe un suivi indépendant du point de puissance maximale pour chaque chaîne PV (**Figure III.18**).

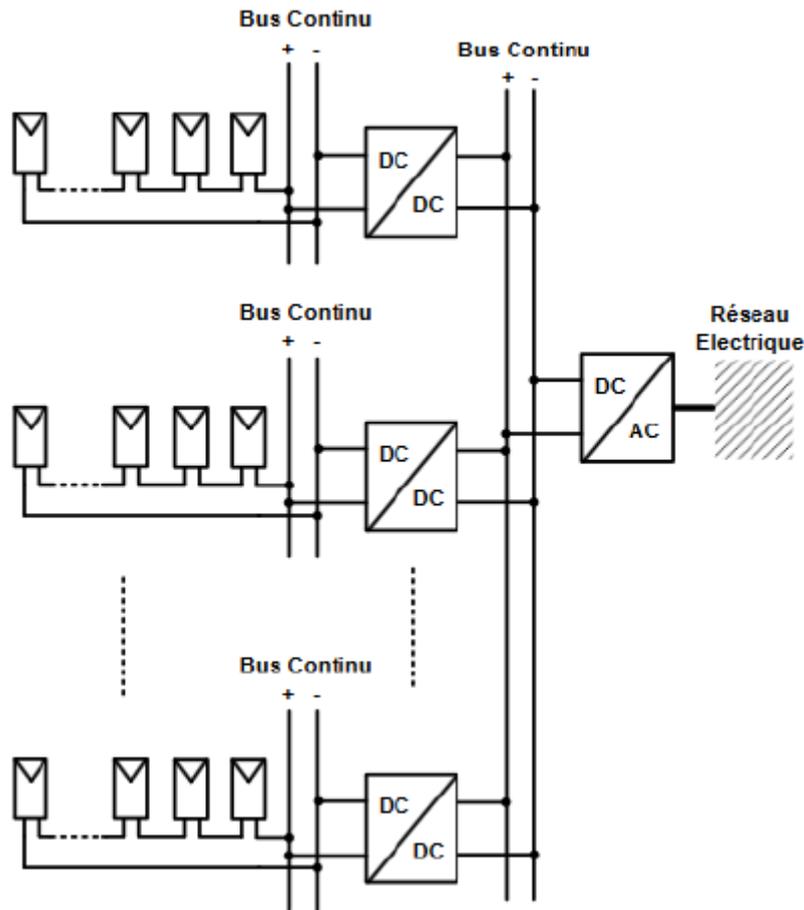


Figure III.18 : Topologie d'onduleur multi-string.

De plus, l'utilisation d'un seul onduleur comme interface avec le réseau réduit le nombre d'interactions entre le réseau et les installations PV. Par conséquent, il est pratique d'installer les services système participants. Le système a également gagné en modularité, car différents types de chaînes PV peuvent y être connectés. Le système peut également être étendu pour répondre aux besoins de la charge. En plus d'être moins sensible aux effets d'ombrage du fait de la présence d'un MPPT par rangée, cette topologie a l'avantage de réduire les coûts d'installation par rapport aux architectures chaînées. Cet objectif est atteint par l'emploi d'un seul onduleur, donc moins de composants. On diminue aussi les pertes dues aux longs câbles de courant continu propre à la topologie centralisée.

III.8.4. Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter) :

Selon ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les grandes installations, tous les onduleurs sont connectés en parallèle du côté AC, comme illustré à la **Figure III.19**. Les onduleurs modulaires sont installés dans à proximité du module.

Comparé à l'onduleur string, l'efficacité est plus élevée car chaque module implémente MPPT. Dans cette configuration, les pertes dues aux incohérences entre les modules PV sont éliminées et les onduleurs des modules PV peuvent être optimisés, permettant des MPPT individuels pour chaque module PV. Et il a également l'avantage de réduire les problèmes liés aux ombres et aux différences d'exposition des chaînes et les problèmes liés à l'utilisation de différents modules.

Cependant, cette topologie n'est adaptée qu'aux applications de faible puissance (jusqu'à 500W) et est relativement coûteuse.

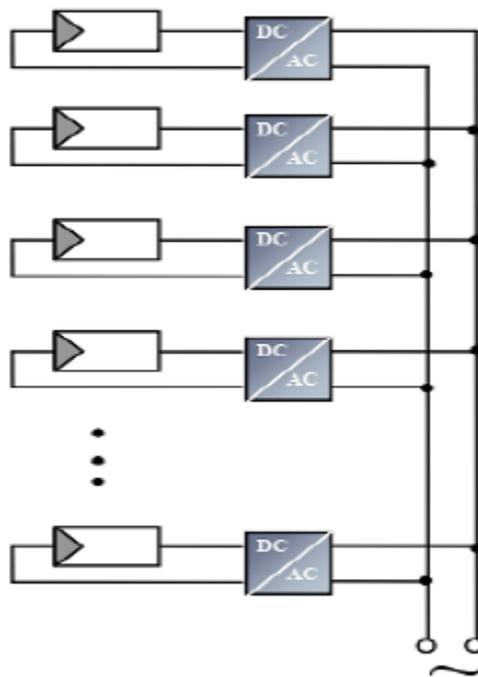


Figure III.19 : Topologie d'onduleur modulaire.

Le **Tableau III-2** suivant récapitule les avantages et inconvénients de chaque technologie :

Tableau III.2 : Comparaison entre les différentes topologies

Topologie	Avantages	Inconvénients	Puissance
Central	<ul style="list-style-type: none"> - Facile à surveiller - Facile à maintenir - Faible coût en raison de l'onduleur central 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes CC dans câbles de haute tension - Pertes de puissance dues à la centralisation MPPT et le décalage dans les modules PV - Faible fiabilité - Configuration pas flexible 	Jusqu'à plusieurs mégawatts
String	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel - Les pertes dans les diodes de string sont éliminées - Bonne fiabilité - Configuration flexible 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût plus élevé par rapport au central - utilisé pour les faibles puissances 	3-5 kW / string
Multi-String	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des pertes qui en résultent de l'ombrage partiel - Les pertes dans les diodes de string sont éliminées - MPPT et le contrôle de courant sont séparés - L'amplification de tension peut être réalisée par les hacheurs CC-CC 	<ul style="list-style-type: none"> - Tous les strings sont connectés à un seul onduleur donc la fiabilité du système diminue - Pertes supplémentaires à l'intérieur de l'hacheur CC-CC - Le coût est plus élevé par rapport au central 	5KW
Modulaire	<ul style="list-style-type: none"> - Aucune perte due à l'ombrage partiel - Aucune perte de décalage entre les modules - Facile à détecter le défaut des modules - Configuration flexible et extensible 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Remplacement de l'onduleur en cas de défaut pas facile - Durée de vie des composants électroniques réduite à cause des thermiques additionnelles 	Jusqu'à 500W

III.10. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types des convertisseurs DC/DC et DC/AC reliant les générateurs PV avec les charges. Les premiers convertisseurs que nous avons étudiés sont les différents types des hacheurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques et leurs caractéristiques électriques, aussi la commande MPPT qui pilote le convertisseur pour fournir la puissance maximale du GPV. Les convertisseurs DC/AC sont aussi abordés et les différents types des onduleurs utilisés dans les systèmes PV et la stratégie de commande pour le raccordement aux réseaux électriques sont discutées.

La modélisation et la simulation du système photovoltaïque représentant une mini centrale (générateur GPV, hacheur, onduleur). Serons entamés dans le quatrième chapitre.

Références bibliographiques

- [1]: A.AZIZI, Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride, Thèse Doctorat, université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2019.
- [2]: Sahli Abdeslem « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », mémoire de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIFUFAS, 2021.
- [3]: F.Slama, « modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister d'électrotechnique, sétif 2012.
- [4] :YAHYAOUI Rabeb « Identification de défauts dans les convertisseurs statiques DC/DC à composants SiC destinés aux applications pile à combustible », Thèse de doctorat, UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE PREPAREE à à IFSTTAR et FEMTO/ST, 2018
- [5] : https://www.chireux.fr/mp/cours/electronique/Chap4_5.pdf
- [6]: <https://studylibfr.com/doc/2423535/alimentaiton-a-decoupage-flyback>
- [7] :<http://for-ge.blogspot.com/2015/07/diode-schottky.html>
- [8] : Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005.
- [9] : http://www.electrosup.com/convertisseur_boost.php
- [10] : http://ipco-co.com/CEEE_Journal/CIER'13-CEEE/ID_003.pdf
- [11] : Y.NETTARI, Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC , Mémoire de Magister, universite ferhat abbas SETIF1, 2014 .
- [12] : http://www.electrosup.com/convertisseur_buck.php
- [13] : Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008.
- [14] : ATTOU Amine, « Commande de la machine asynchrone dédiée a l'énergie photovoltaïque », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL- ABBES, 2017
- [15] : ZEMOURI AZEDDINE, « ETUDE EXPERIMENTALE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUSTE », Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2014

[16] : DEBILI Narimene, ‘’ Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque’’,thèse de magister , UNIVERSITE CONSTANTINE 1 , 2015

[17] : BOUTABBA Tarek, « Contribution à la modélisation et à la commande d’un système de génération hybride Solaire-Eolien », Thèse de doctorat, Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2018

[18] : LABRIQUE F, SÉGUIER G, BAUSIERE R. Les convertisseurs de l’électronique de puissance La conversion continue-alternatif. 4th ed. Lavoisier Tec & Doc;1989

[19] : BOUKAROURA Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d’un Onduleur Triphasé par l’Approche BondGraph », Mémoire de Maigster, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, 2009.

[20] : TAYEBI AZZEDDINE, « Réalisation d’un Onduleur de Tension Commandé par Microcontrôleur pour un Système Photovoltaïque », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2021

Chapitre IV :

Résultats et simulations

IV.1. Introduction :

La simulation est un outil puissant pour évaluer les performances théoriques d'un système. En fait, ce dernier peut être testé dans des conditions facile à contrôler ainsi que ses performances. Le processus de simulation relie les deux parties principales de la conception du système, à savoir l'étude théorique.[1]

Dans ce chapitre nous présentons les schémas de simulation des différents étages du système composé d'un générateur photovoltaïque, d'un hacheur DC-DC, d'un onduleur et une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'un réseau. Les résultats obtenus par simulation sont interprétés et commentés. Tous les travaux sont réalisés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

IV.2. L'outil Matlab/Simulink :

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

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

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.[2]

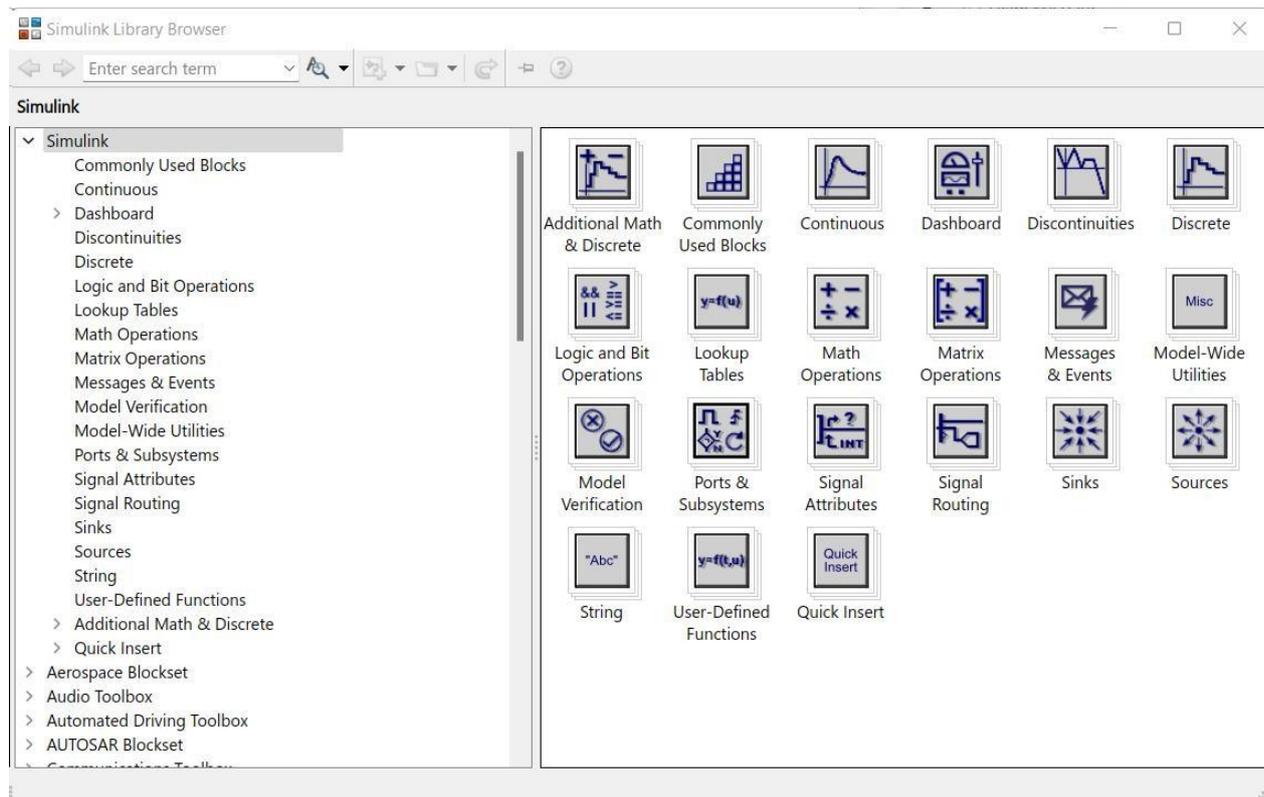


Figure IV.1 : Bibliothèque SIMULINK

IV.3. Description du système global :

La centrale solaire se compose d'un générateur photovoltaïque qui peut produire 0.1 MW à un rayonnement solaire de 1000 W/m² et une température de cellule de 25 °C. Les caractéristiques du générateur photovoltaïque sont illustrées à la **figure IV.2**. La tension est contrôlée par un dispositif de suivi du point de puissance maximale (système MPPT). Le MPPT utilise la technique Perturb and Observe pour faire varier la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin d'extraire le maximum de puissance possible.

L'entrée de l'onduleur doit être constante et elle est contrôlée par l'utilisation d'un circuit de contrôle PI. Un filtre LCL a été introduit pour assurer une injection de courant propre dans le réseau. Le modèle proposé de l'ensemble des composants et du système de contrôle sont tous simulés dans le logiciel Matlab/Simulink.

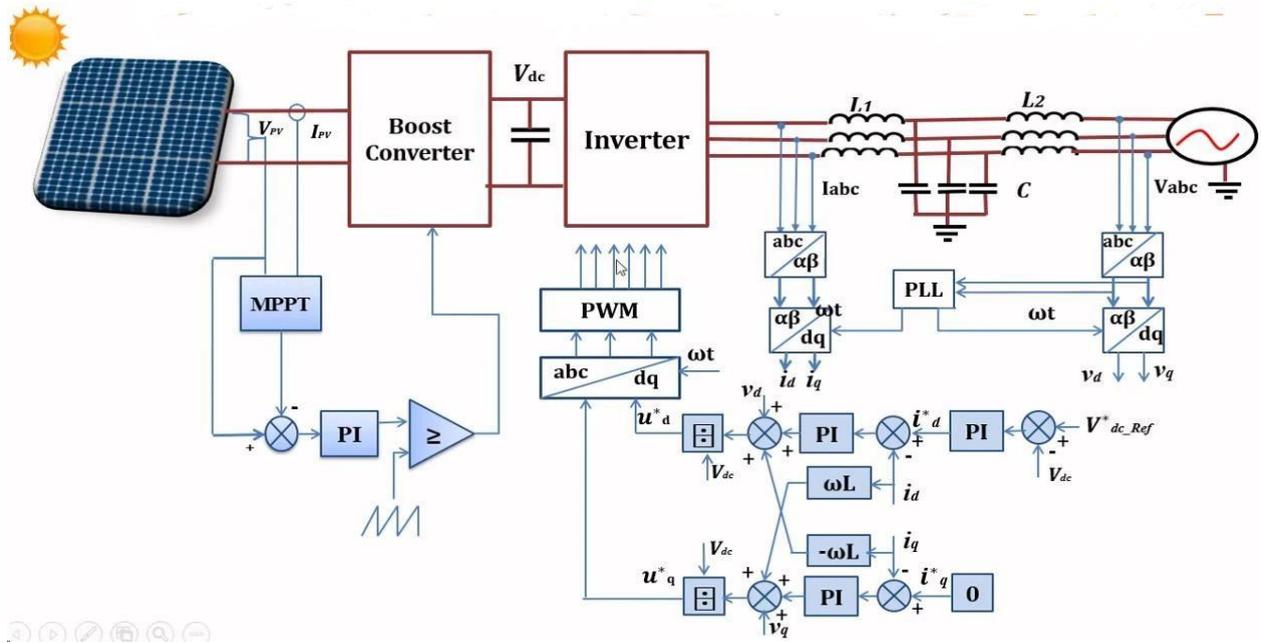


Figure IV.2 : Structure de contrôle pour le système solaire PV triphasé à deux étages connectés au réseau

IV.4. Modélisation du champ photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72) pour atteindre la tension de sortie désirée . L'interconnexion de modules entre eux en série permet d'augmenter la tension générée pour un même courant et leur interconnexion en parallèle permet d'augmenter le courant délivré pour une même tension, mais pour obtenir une puissance plus grande, les modules sont connectés en série et en parallèle, ceci définit la notion de champ photovoltaïque.[3]

Le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p$$

$$I = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right) - I_0 \left[e^{\frac{v+I.R_s}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{v+I.R_s}{R_p}$$

IV.5. Technique de commande d'un onduleur :

Cette commande a pour but de générer les commandes d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur afin que la tension produite par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

IV.6. La commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion PWM (en anglo-saxon Pulse Width Modulation PWM) est une technique de contrôle des convertisseurs statiques utilisés comme interface entre une charge (moteur, etc.) et son alimentation (onduleur triphasé, etc.)

La MLI consiste à ajuster une fréquence de commutation supérieure à la fréquence de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie avec une série d'impulsions d'onde carrée de largeur appropriée. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de commande du hacheur, où la durée des impulsions n'est plus régulière, mais choisie de manière à éliminer autant que possible les harmoniques d'ordre inférieur difficile à filtrer. Le principe de base du PWM est de couper une onde rectangulaire complète. Par conséquent, la tension de sortie de l'onduleur est formée d'une série d'impulsions d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. Ces dernières années, diverses techniques PWM ont été développées. Dans ce chapitre, nous nous basons sur deux variantes de cette stratégie de contrôle (MLI Sinus-Triangle et MLI vectorielle).[4]

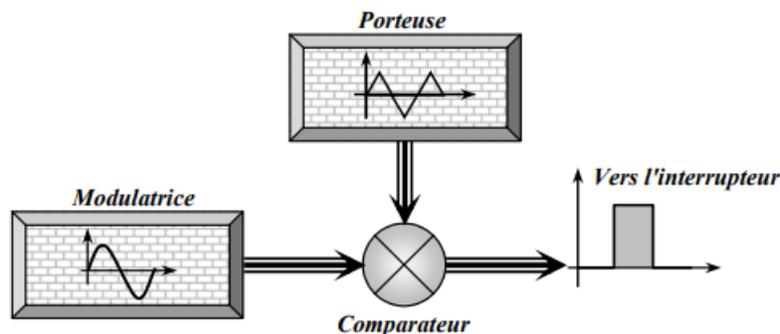


Figure IV.3 : Schéma synoptique de la M.L.I

IV.6.1. Le Contrôle PID

Le contrôle PID est une méthode de contrôle couramment utilisée dans les industries. C'est un système capable d'atteindre et de maintenir un point de consigne grâce aux mesures qu'il effectue. Le PID est le contrôleur le plus utilisé dans l'industrie. L'idée de cette unité de contrôle est de modifier intentionnellement la valeur d'erreur entre le point de consigne et la valeur mesurée.[5]

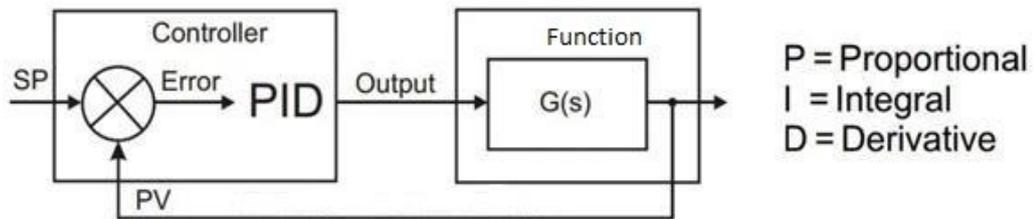


Figure IV.4 : schéma de principe du contrôleur PID

IV.6.2. La régulation en tension ou mode (P/V)

Dans ce mode de contrôle, la commande de l'onduleur permet de fixer au nœud de connexion commun (PCC) la tension et la puissance active de consigne. L'injection ou l'absorption de la puissance réactive conduit à un contrôle optimal de la tension au point d'insertion du générateur. La puissance active et la tension sont fixées via les courants produits au moyen d'un contrôle adapté de la tension primaire de la source et de l'onduleur. Alors, la tension et la puissance active au point de raccordement de générateurs d'énergie sont contrôlées tout en respectant les limites du système.[6]

IV.6.3. La régulation en puissance ou mode (P/Q)

Dans ce mode de contrôle, la commande de l'onduleur permet de fixer au nœud de connexion du producteur d'énergie les puissances active et réactive de consigne. Comme dans le cas du mode de régulation (P/V), la commande de l'onduleur est générée par une boucle de régulation en courant. Les puissances active et réactive sont fixées via les courants produits au moyen d'un contrôle adapté de la source primaire et l'onduleur de la tension. Alors, les puissances active et réactive au point d'insertion de générateurs d'énergie sont contrôlées tout en respectant les limites du système.[7]

IV.6.4. La commande de l'onduleur dans l'axe dq

La tension du réseau et l'angle de phase sont synchronisés à l'aide de la transformée de Park via une boucle à verrouillage de phase (PLL) sur une référence synchrone en quadrature directe (dq). La régulation dans le domaine dq est facile et donne une bonne réponse dynamique. L'angle de référence est obtenu en intégrant la fréquence d'angle de référence. L'angle de phase θ obtenu à partir de la PLL sera utilisé pour la conversion abc en dq de la tension de réseau $V_{g,abc}$ et du courant de réseau $I_{g,abc}$ pour produire respectivement la tension et le courant dans le référentiel d'axe dq [8]. Les équations de Park des tensions et des courants est présentés par (1) et (2)

$$\begin{pmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \\ V_0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \\ I_0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ga} \\ I_{gb} \\ I_{gc} \end{pmatrix} \quad (2)$$

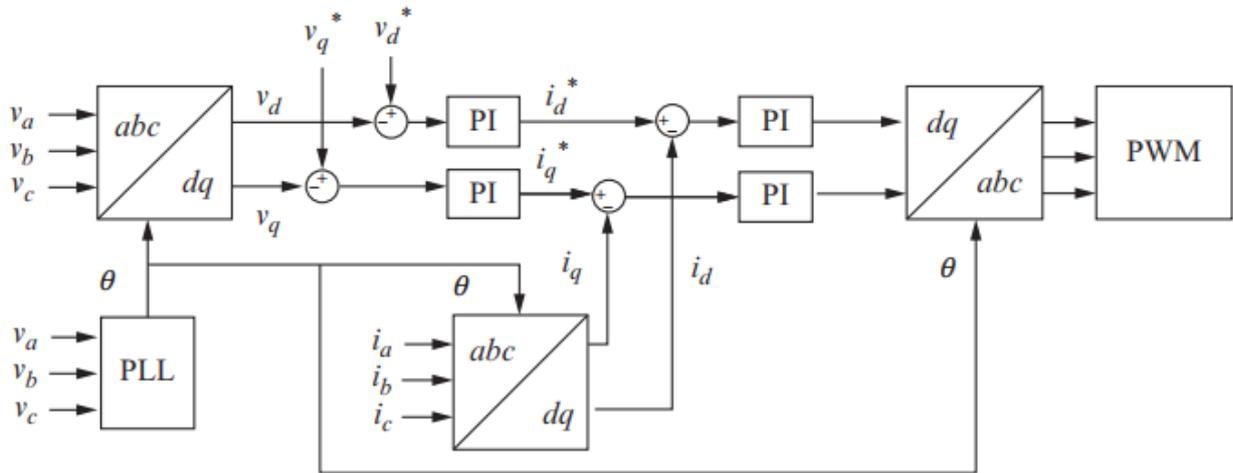


Figure IV.5 : Réalisation de la commande en double boucle dans un référentiel synchrone

Où V_{od} , V_{oq} et I_{od} , I_{oq} sont la tension et le courant dans le référentiel de l'axe dq, respectivement, et $(V_{ga}, V_{gb}$ et $V_{gc})$ et $(I_{ga}, I_{gb}$ et $I_{gc})$ est respectivement la tension et le courant triphasés du réseau. La conversion abc en dq est essentielle dans le fonctionnement de l'onduleur car le contrôleur interne du variateur de l'onduleur fonctionne en mode dq dans un système asymétrique à courant continu, qui est effectué par le contrôleur PI. Le contrôleur PI dans la commande de boucle interne générera une tension active de référence V'_d et une tension réactive de référence V'_q qui seront utilisées pour la transformation dq en abc afin de générer V_{abc} . Un terme d'anticipation doit être utilisé pour découpler les axes de courant actif et réactif dans la commande de boucle interne [9]. La valeur de V_{abc} est ensuite envoyée au signal PWM pour générer des impulsions de réseau de commande pour l'onduleur.

Après application de la transformée de Park, les puissances active et réactive peuvent être calculées à l'aide des équations. (3) et (4), [10] [11]

$$P = \frac{3}{2}(V_{od} * I_{od} + V_{oq} * I_{oq}) \quad (3)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_{od} * I_{oq} - V_{oq} * I_{od}) \quad (4)$$

où V_{od} , V_{oq} et I_{od} , I_{oq} sont représentés respectivement par la tension et le courant dans le référentiel de l'axe dq côté réseau. Le contrôle du courant dans la boucle de contrôle interne du schéma de contrôleur de l'onduleur suit avec précision le signal de courant et supprime les transitoires de courant de court-circuit. À partir du contrôle de la boucle de courant interne de l'onduleur, les tensions actives et réactives de sortie (V'_d et V'_q) de l'onduleur de réseau à la fréquence du réseau dans le référentiel synchrone dq peuvent être calculées à l'aide d'équations (5) et (6)

$$V'_d = I'_d - I_{od} \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \right) - w * L_f * i_{oq} + V_{od} \quad (5)$$

$$V'_q = I'_q - I_{od} \left(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) - w * L_f * i_{od} + V_{oq} \quad (6)$$

La description utilise une commande avec une valeur de puissance contrôlée pour commuter l'onduleur VSI. Ceci, à son tour, sera injecté dans le système d'alimentation pour produire une excellente qualité d'alimentation. [8]

IV.7. Filtre LCL :

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale. Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (L ou LCL).

La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part de réduire la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler.

Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée, cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre (LCL) est l'autre alternative de raccordement.

IV.8. Simulation du module solaire

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi le module photovoltaïque du type. Solartech Energy SEC-215 W-M6-G est composé de 60 cellules solaires Polycristalline en silicium connectées en série pour produire une puissance maximale de 215 W pour un module, Le générateur choisi est composé de 10 modules connectés en série et 47 modules connectés en

parallèle, Les caractéristiques électriques de module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant.

Tableau IV.1 : Caractéristiques du module photovoltaïque.

Courant de court-circuit I_{cc}	7.79 A
Tension en circuit ouvert I_{co}	36.48 v
Courant au point MPPT	7.28 A
Tension au point MPPT	29.52 v
Puissance maximale	214.9056 W
Nombre de cellules en série	60
Coefficient de température de I_{sc}	0.05534 %/ C°
Coefficient de température de V_{oc}	-0.35335%/ C°
Résistance série	0.34735 Ω
Résistance parallèle	263.2877 Ω
Température nominale	25 C°
Irradiation nominale	1000 W/m ²

Résultats de simulation de le module solaire :

- ❖ **Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec irradiation 1000W/m² et température constante de 25 °C**

Les résultats de la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV dans les conditions standards d'éclairement et de températures (G=1000W/m² et T=25°C) sont représentées par la **figure IV.6**.

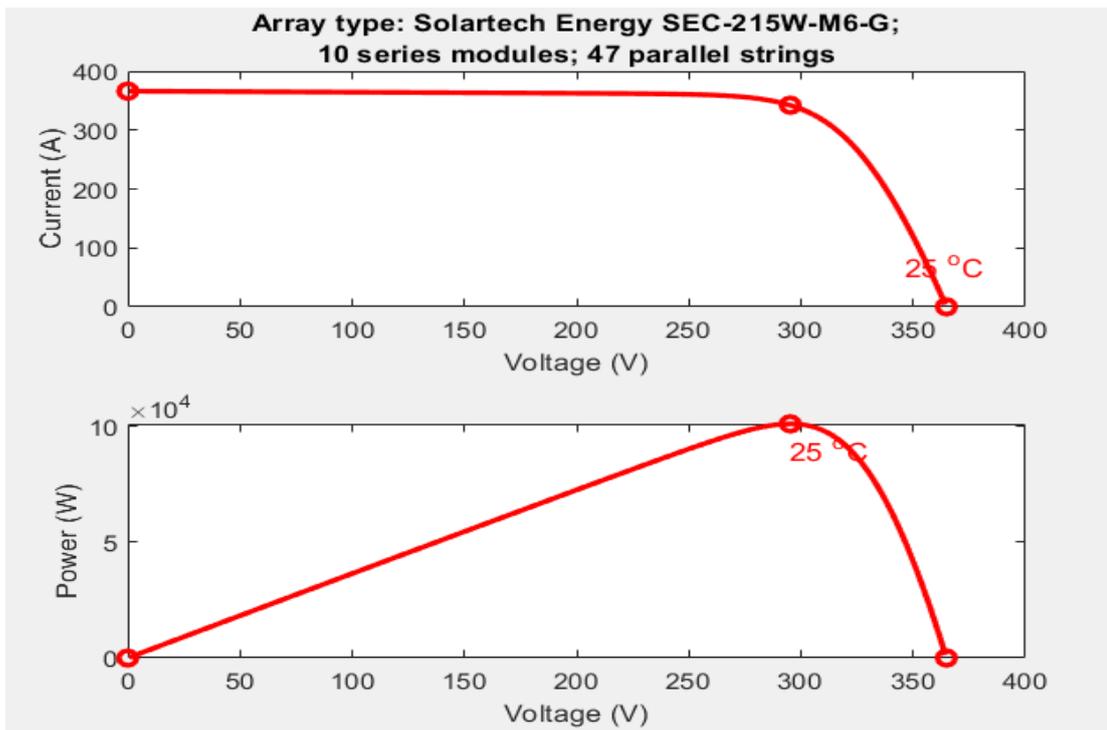


Figure IV.6 : Caractéristiques (I-V) / (P-V) dans les conditions standards.

IV.9. L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques de le module solaire:

Les courbes de la figure IV.7 et IV.8 représentent les caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque obtenues par simulation en faisant varier l'intensité de l'irradiation, la température de fonctionnement étant gardée constante ($T=25^{\circ}\text{C}$)

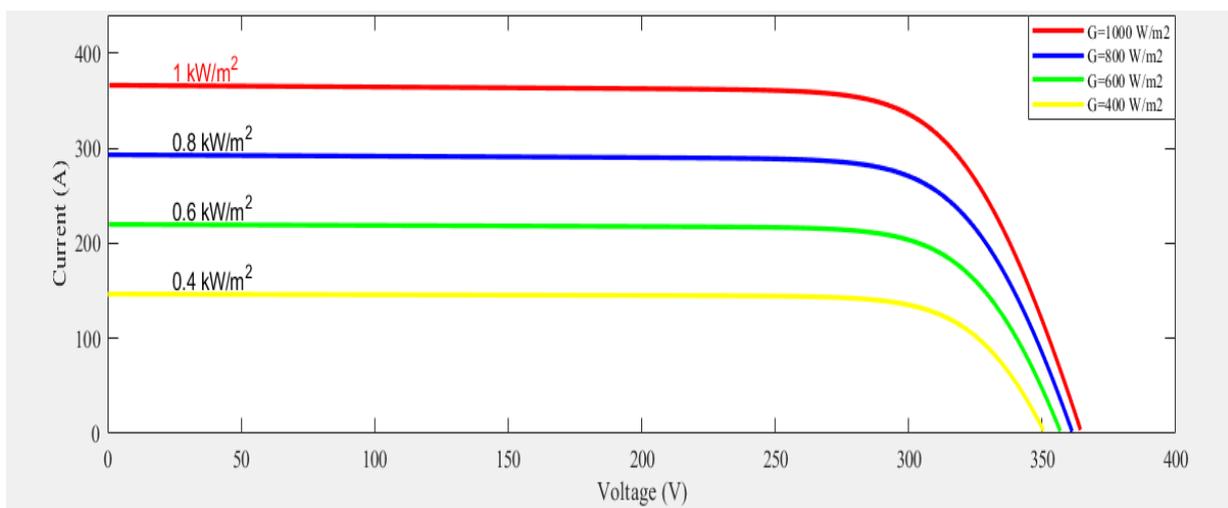


Figure IV.7 : Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.

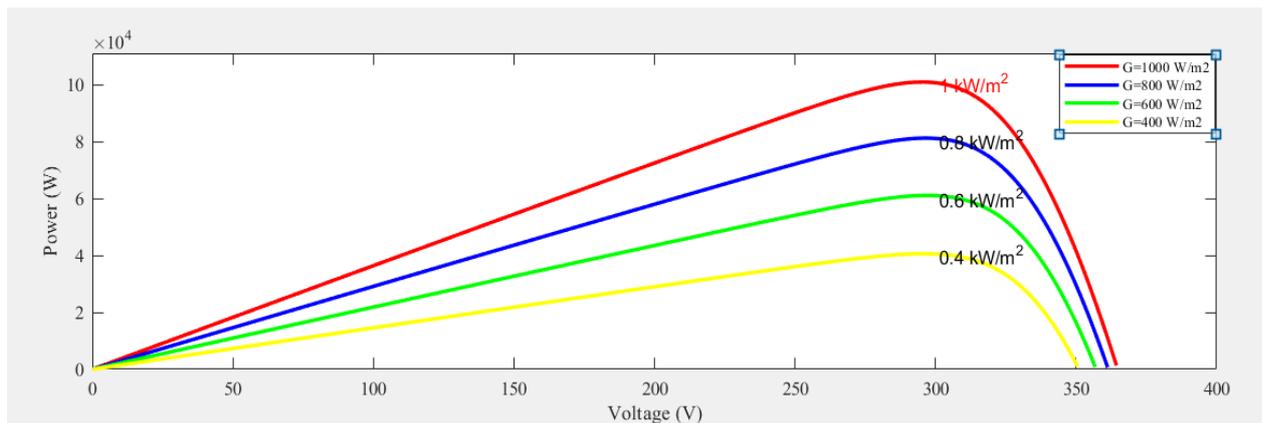


Figure IV.8: Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.

On remarque d'après la figure IV.7 que le courant de court-circuit augmente nettement avec l'irradiation, par contre la tension en circuit ouvert n'augmente que très faiblement et par conséquent on peut supposer qu'elle reste constante. Comme le courant I augmente avec l'irradiation on en déduit que la puissance $P=V \cdot I$ augmente aussi avec l'irradiation (fig. IV.8).

Pour tirer le maximum de puissance des cellules solaires travaillant sous température constante, il faut exposer ces dernières à un rayonnement solaire maximal. Cette opération peut se faire par orientation correcte du panneau PV vers le soleil en utilisant un système mécanique asservi comme suiveur du soleil.

L'influence de la température de fonctionnement :

Les courbes de la **figure IV.9 et IV.10** représentent les caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque obtenues par simulation en faisant varier la température de fonctionnement, l'irradiation étant gardée constante ($G=1000 \text{ W/m}^2$).

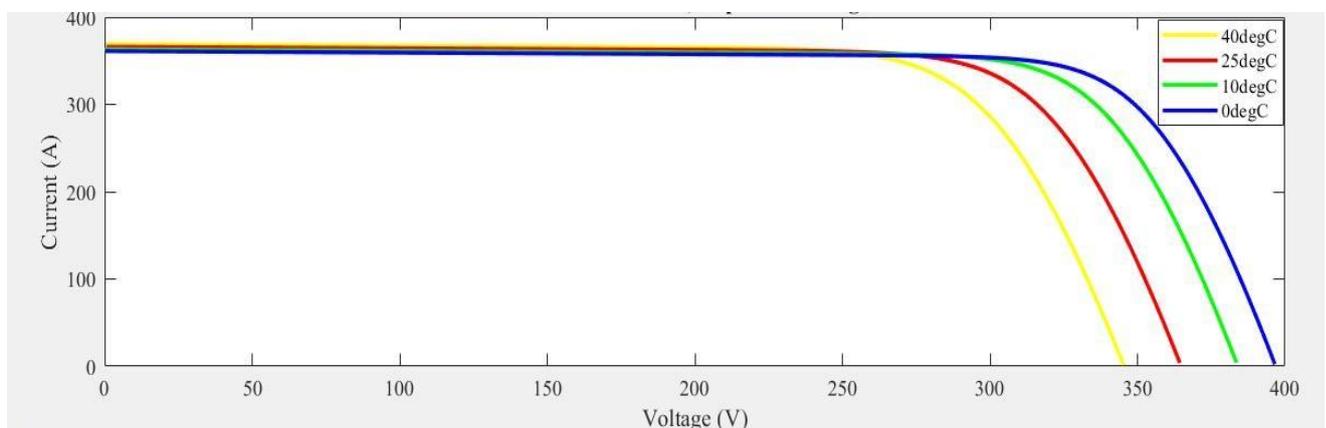


Figure IV.9: Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante.

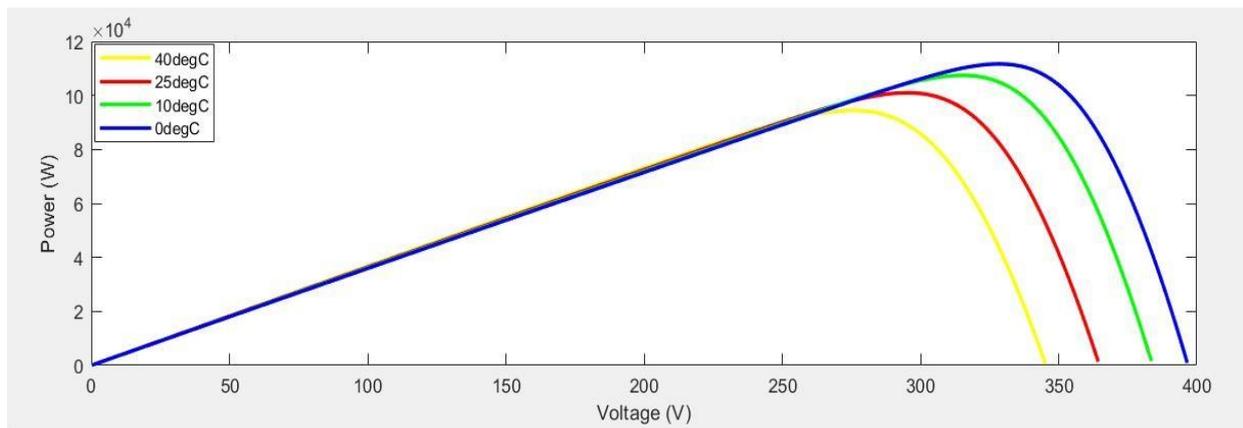


Figure IV.10: Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante

Les caractéristiques I-V obtenues (fig. IV.9) montrent que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire augmente lorsque la température de fonctionnement diminue par contre le courant de court-circuit reste pratiquement constant et par conséquent la puissance maximale du générateur PV augmente avec la diminution de la température (fig. IV.10).

Pour tirer le maximum de puissance des cellules solaires travaillant sous irradiation constante par exemple dans un endroit où le ciel est très dégagé pendant une longue période de l'année comme dans les wilayas du sud (Adrar, Béchar, Tamanrasset, ...), il faut exposer ces cellules à la plus basse température de fonctionnement possible.

IV.10. Simulations du convertisseur DC/DC :

Comme étage d'adaptation entre le GPV et l'onduleur nous avons simulé un convertisseur de type Boost travaillé élévateur.

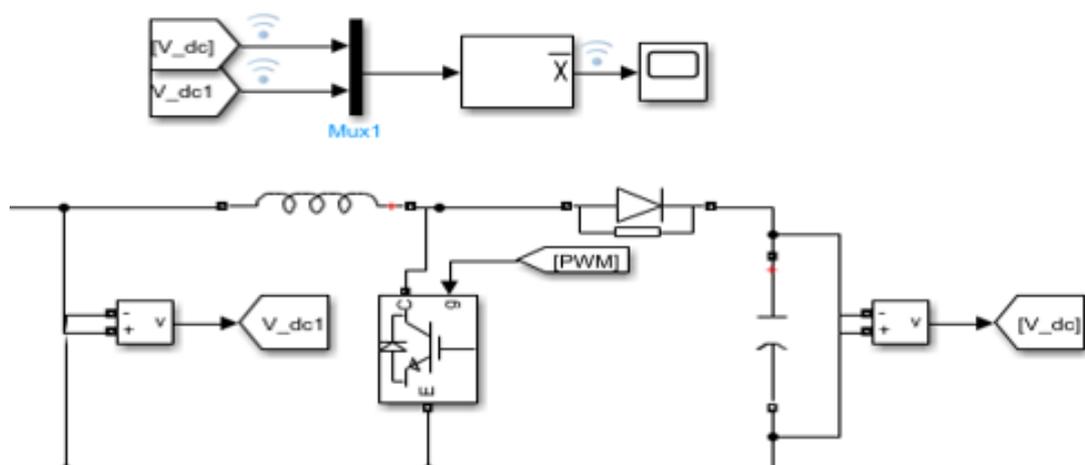


Figure IV.11 : Schéma bloc d'un convertisseur survolteur (Boost).

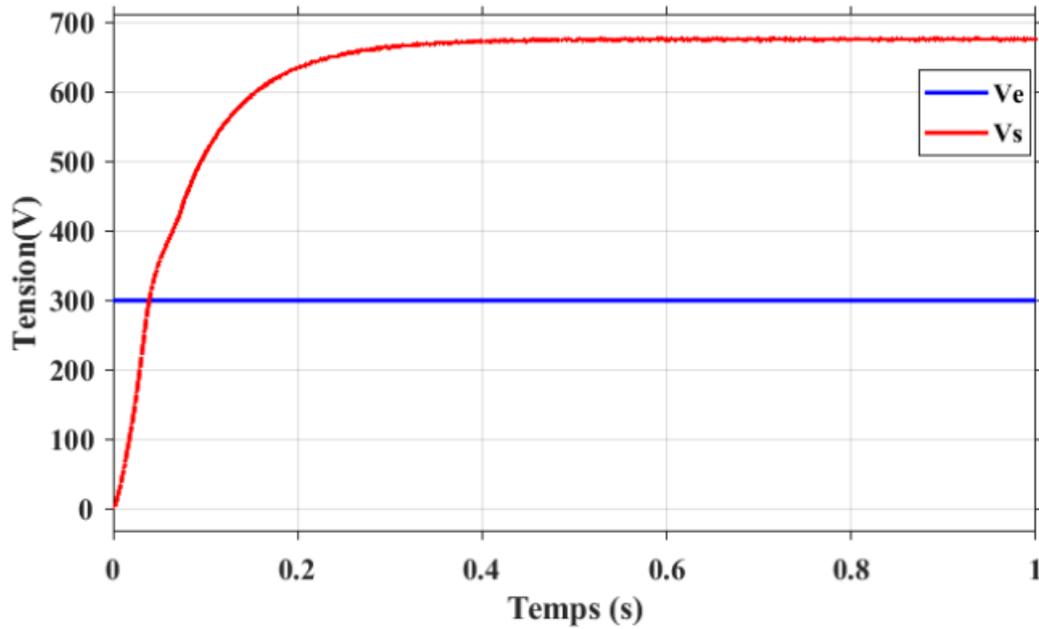
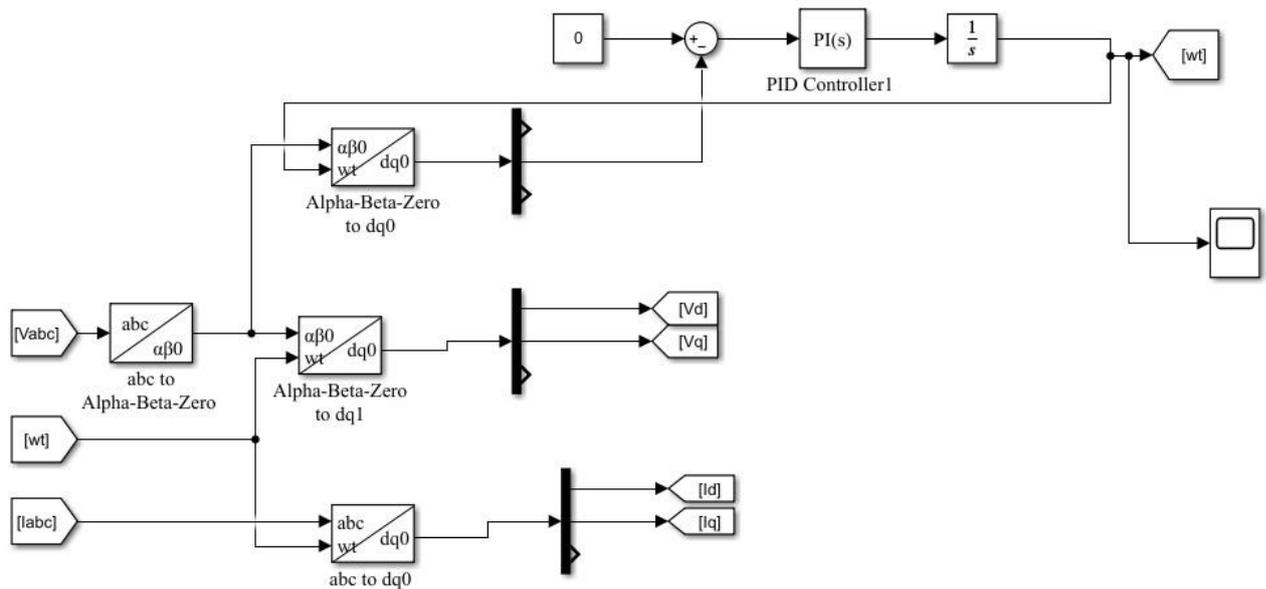


Figure IV.12 : Tensions V_e et V_s du convertisseur DC/DC

D’après la fig. IV.12, on remarque que la tension de sortie V_s a augmenté par rapport à la tension d’entrée V_e , sachant que la tension de référence du régulateur est fixée à $V_{ref} = 600V$. La tension V_s passe par un régime transitoire d’environ 0.20s, ne présente pas de pic de dépassement et se stabilise à une valeur finale de 600. Le temps de réponse du système est d’environ $T_r=0.20s$.

IV.11. Simulation de l’onduleur :



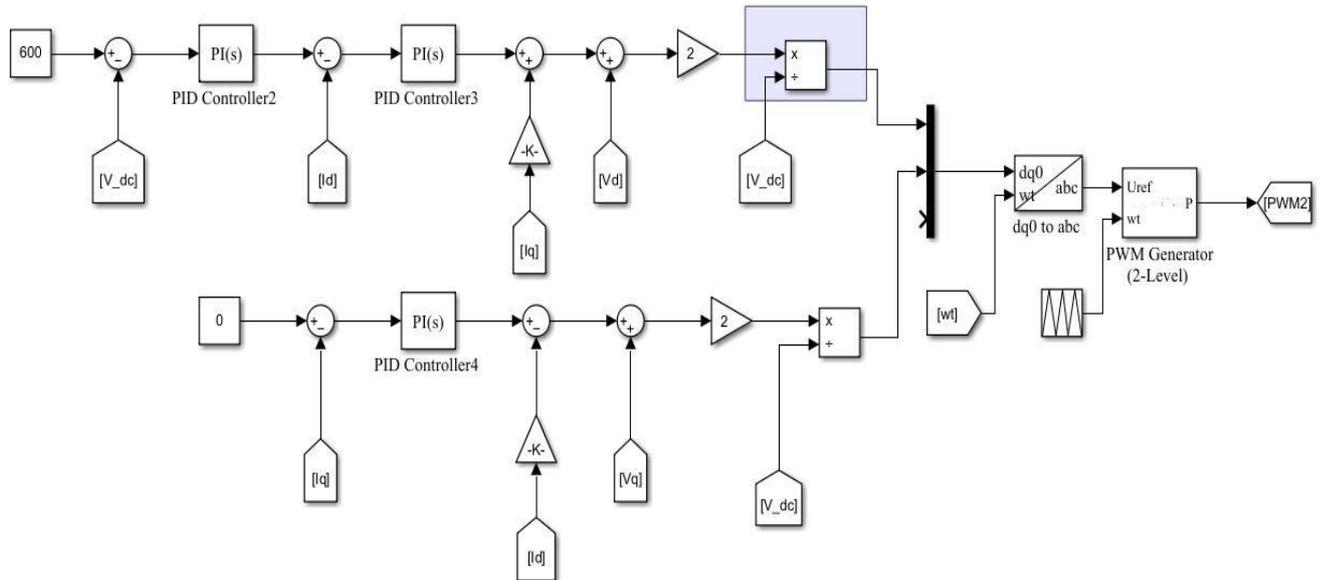


Figure IV.13 : Schéma bloc d'un onduleur.

Résultats de la simulation de l'onduleur :

La figure suivante montre les trois tensions de la sortie de l'onduleur avant l'ajout du filtre LCL:

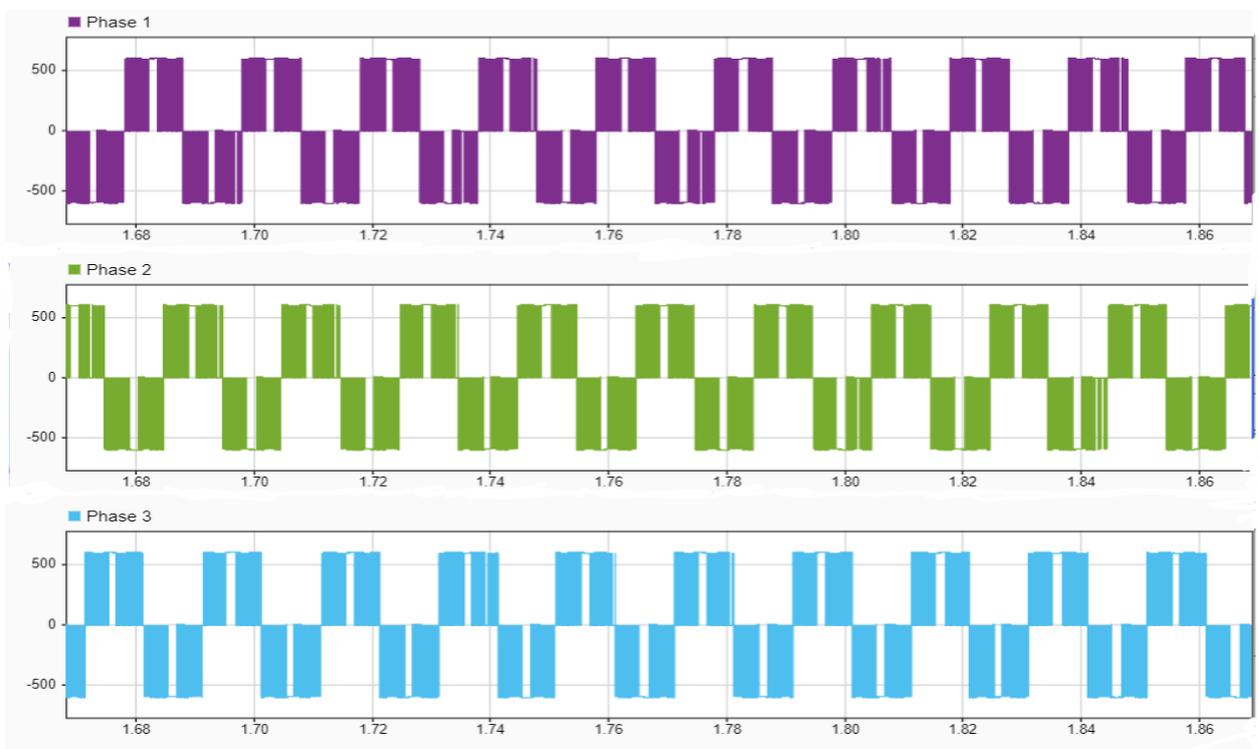


Figure IV.14 : les trois tensions de la sortie de l'onduleur avant le filtrage.

D'autre part, la figure IV.15 montre les trois tensions $V(abc)$ après l'insertion du filtre LCL à la sortie de l'onduleur

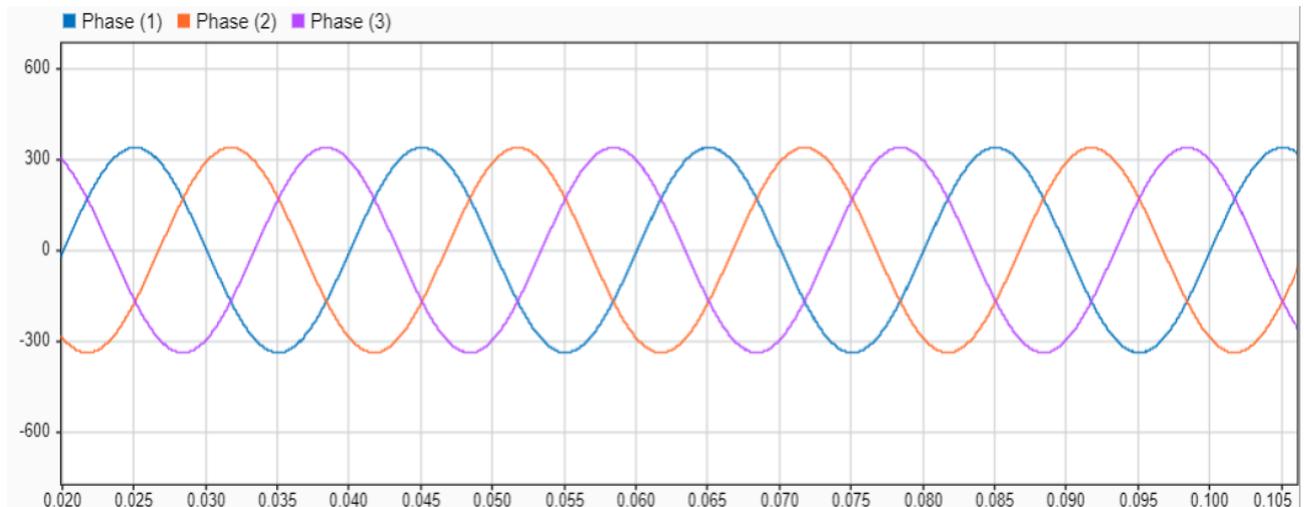


Figure IV.15 : Les tensions après filtrage en fonction de temps.

La figure montre les courants de la sortie de l'onduleur après l'insertion du filtre LCL.

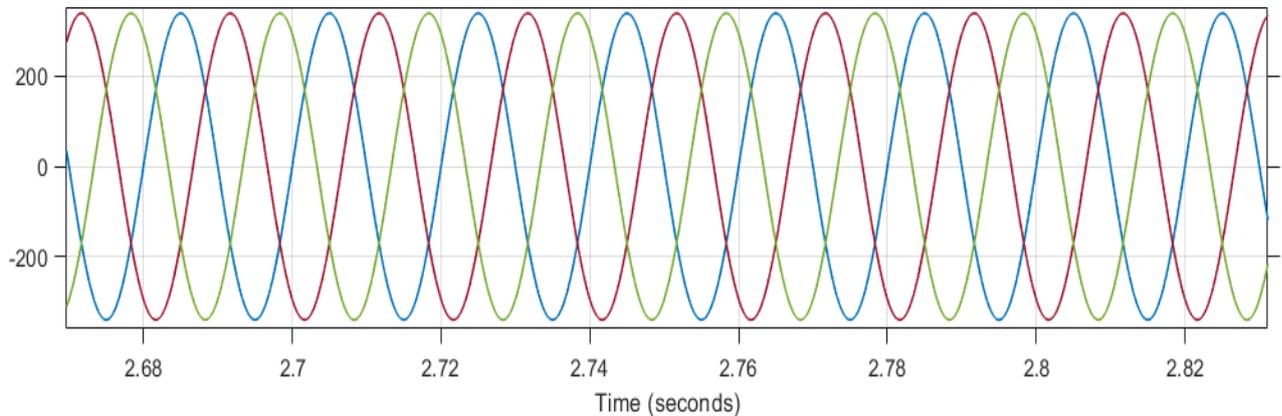


Figure IV.16 : Les courants triphasés après filtrage.

La figure IV.16 montrée que les variations de tensions qui se rapprochent de la forme sinusoidale après filtrage. Le filtrage n'étant pas très efficace, il a permis d'éliminer quelques harmoniques supérieures et de lisser les courbes.

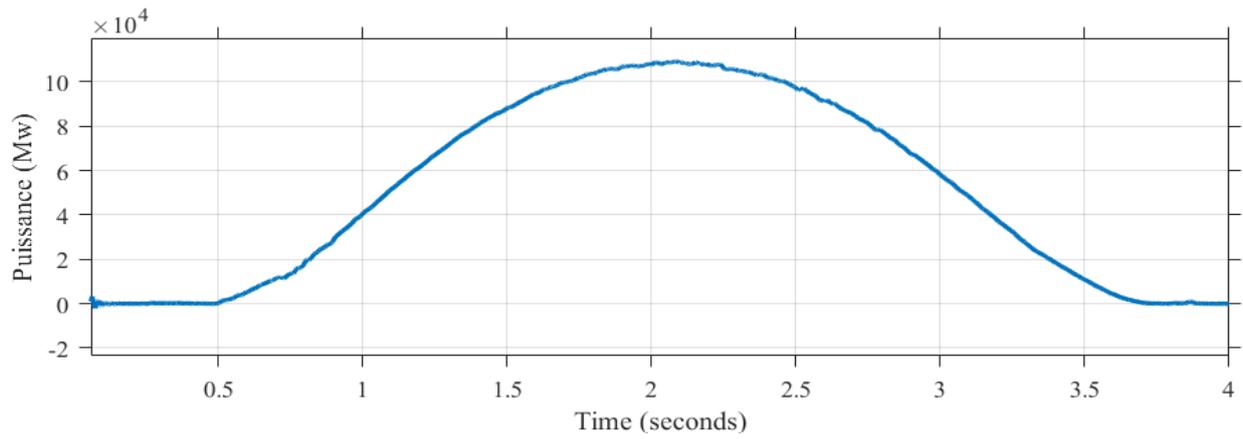


Figure IV.17 : la puissance active.

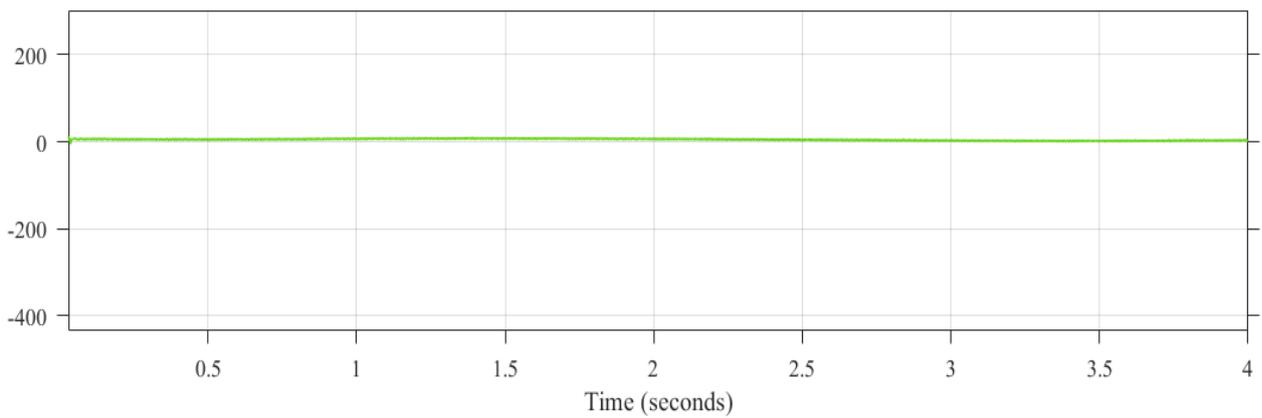


Figure IV.18 : la puissance réactive.

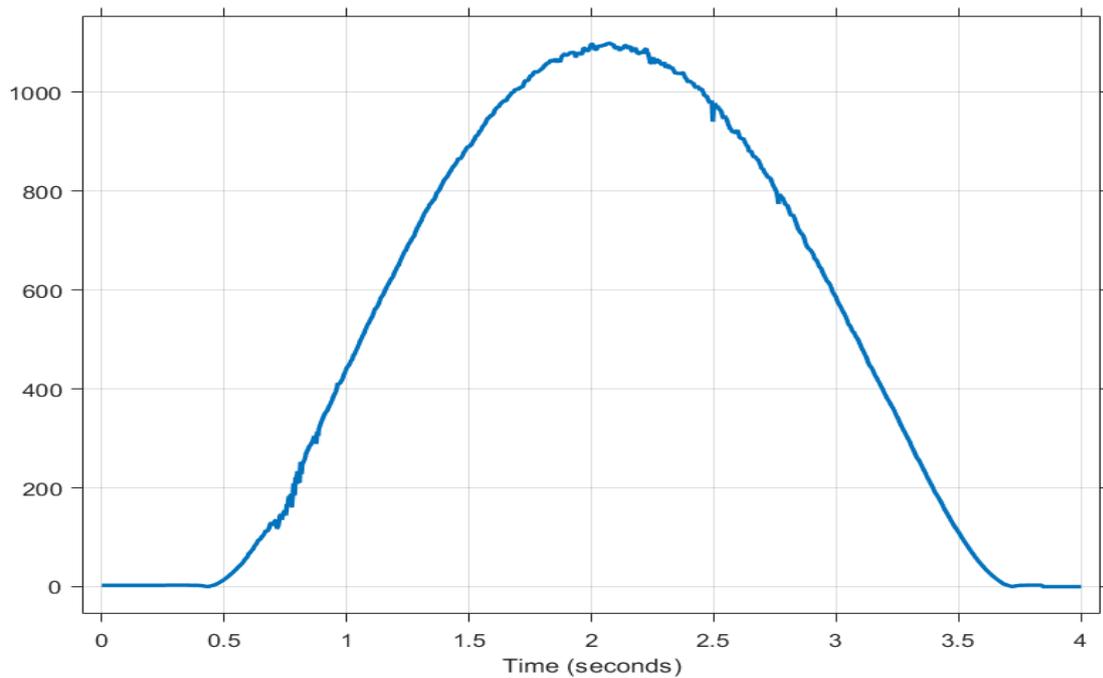


Figure IV.19 : Rayonnement réel utiliser dans la simulation de la centrale solaire photovoltaïque intégré au réseau

IV.12. Simulation du système globale :

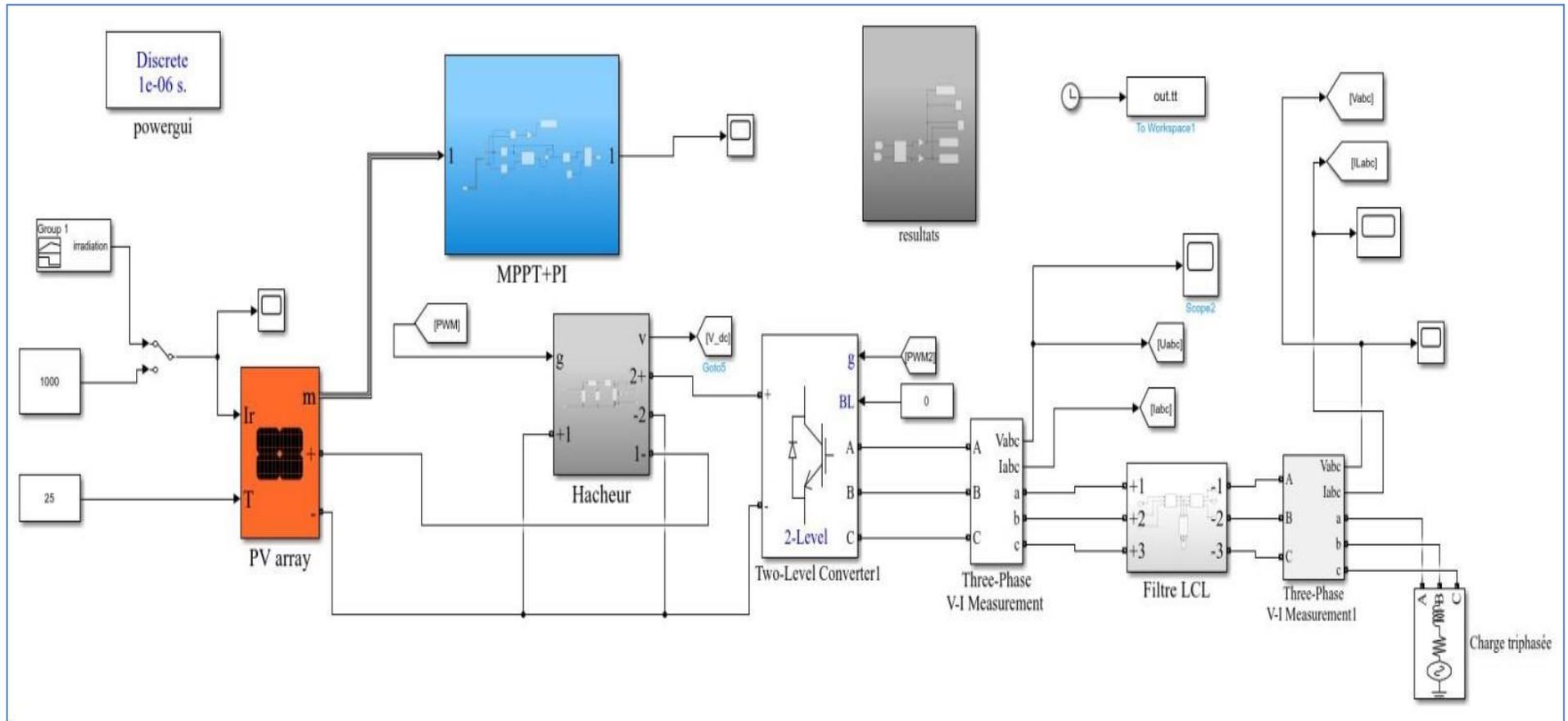


Figure IV.20 : Schéma bloc de la simulation sous SIMULINK.

IV.13. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté la simulation des différents étages qui composent le système photovoltaïque et tester les performances de chaque étage et de vérifier leur conformité avec les résultats théoriques. Les remarques qu'on a abouties après les résultats de simulation obtenus sont:

- ✚ L'effet de la variation de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement du système
- ✚ La robustesse et la fiabilité du convertisseur boost et la commande MPPT. Aussi, la simplicité de la méthode P&O. Ainsi, la commande MLI sinus-triangle utilisée pour l'onduleur.
- ✚ L'augmentation de la température infule négativement sur le rendement du GPV. Car, l'augmentation de la température engendre la diminution de la tension et du rendement énergétique du GPV.

Références bibliographiques

[1] : <https://www.emse.fr/~grimaud/Simulation/CoursRapide/CoursRapide.htm>

[2] : A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.

[3] : ZAGHBA Layachi, « Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.

[4] : TAYEBI AZZEDDINE, « Réalisation d'un Onduleur de Tension Commandé par Microcontrôleur pour un Système Photovoltaïque », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2021

[6] : https://stringfixer.com/fr/PID_loop

[7]: abdellah bouakra, "impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique", mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université du québec en abitibi-témiscamingue, 2016

[8] : jumani T. A., Mustafa M. W., and Rasid M., "Optimal Power Flow Controller for Grid-Connected Microgrids using Grasshopper Optimization Algorithm," pp. 1–22, 2019.

[9] : Farrokhhabadi M., Konig S., Canizares C. A., Bhattacharya K., and Leibfried T., "Battery Energy Storage System Models for Microgrid Stability Analysis and Dynamic Simulation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 2, pp. 2301–2312, 2018.

[10] : Atiq J. and Soori P. K., "Modelling of a grid connected solar PV system using MATLAB/simulink," Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol., vol. 17, no. 41, pp. 45.1–45.7, 2017.

[11] : Wu H. and Tao X., "Three phase photovoltaic grid-connected generation technology with MPPT function technology with MPPT function and voltage control," Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst., pp. 1295–1300, 2009.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique. Cette étude a amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production d'énergie électrique et d'un meilleur respect de l'environnement.

Dans un premier temps, nous avons exposés un rappel sur le générateur PV et les différents types des systèmes.

En première partie nous avons étudié le GPV connecté à la charge et la modélisation des éléments constituant du système PV.

Nous avons étudié, dans une deuxième partie, la commande MPPT de type P&O, la technique de poursuite du point de puissance maximale.

Nous avons étudié, ensuite dans le troisième chapitre les convertisseurs DC/DC et leurs techniques de commande et l'onduleur et ces stratégies de commande

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

Dans ce travail nous avons fait la modélisation et la simulation d'une mini centrale électrique photovoltaïque adapté par une commande électronique (commande MPPT, un convertisseur statique DC/DC et un onduleur), Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2 , température 25°C .

✚ Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

✚ Nous avons proposé une stratégie de commande avec l'algorithme P&O entre panneau photovoltaïque et le convertisseur DC-DC, cette loi de commande garde son efficacité sous différentes contraintes et assure la stabilité du système et la maximisation de puissance, la stratégie de commande a été appliquée sur les topologies des convertisseurs : Boost elle a montré de meilleures performances au niveau du temps de réponse et dépassement.

✚ L'onduleur est la pièce maîtresse d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau. Il transforme le courant continu issu des panneaux solaires (12 ou 48 V) en courant alternatif utilisable par le réseau (220 V). Il optimise également la puissance des modules et assure l'interface avec l'utilisateur.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet nous ont permis d'être plus conscients sur l'importance stratégique des énergies renouvelables pour notre pays. Les efforts de recherche doivent être accélérés de la part de tous les acteurs de l'énergie (politiques, universités, centres de recherches, SONELGAZ...) dans le but de promouvoir l'énergie solaire dont l'Algérie qui présente l'un des plus grands gisements au monde ; le futur de notre pays en dépend fortement.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Algorithme pour trouver le point de puissance maximale dans la cellule PV

```
function Vref = mppt1 (V,I)
Vrefmax = 363;
Vrefmini = 0;
Vrefinit = 300;
deltaVref = 1;
persistent vold pold Vrefro1d;
datatype = 'double';
if isempty(vold)
    vold = 0;
    pold = 0;
    Vrefro1d = Vrefinit;
end
P = V*I;
dV = V - vold;
dP = P - pold;
if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            Vref = Vrefro1d + deltaVref;
        else
            Vref = Vrefro1d - deltaVref;
        end
    else
        if dV < 0
            Vref = Vrefro1d - deltaVref;
        else
            Vref = Vrefro1d + deltaVref;
        end
    end
else Vref = Vrefro1d;
end

if Vref >= Vrefmax | Vref <= Vrefmini
    Vref = Vrefro1d;
end
Vrefro1d = Vref;
vold = V;
pold = P;
```

Annexe 2 : Blok Paramètre

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.
Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters	Advanced
Array data	
Parallel strings	47
Series-connected modules per string	10
Module data	
Module:	Solartech Energy SEC-215W-M6-G
Maximum Power (W)	214.9056
Cells per module (Ncell)	60
Open circuit voltage Voc (V)	36.48
Short-circuit current Isc (A)	7.79
Voltage at maximum power point Vmp (V)	29.52
Current at maximum power point Imp (A)	7.28
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.35335
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.05534
Model parameters	
Light-generated current IL (A)	7.8003
Diode saturation current I0 (A)	2.0703e-10
Diode ideality factor	0.97248
Shunt resistance Rsh (ohms)	263.2877
Series resistance Rs (ohms)	0.34735

Display I-V and P-V characteristics of ...
array @ 1000 W/m2 & specified temperatures
T_cell (deg. C) [45 25]
Plot

Annexe 3 :

Le Régulateur PI :

Un correcteur PI possède une intégration, ce qui permet de régler le problème de l'erreur statique. En contrepartie il ralentit le système, on veillera donc à respecter une marge de phase suffisante mais pas trop grande non plus (plus la marge de phase est grande, plus la réponse est lente et les risques de saturation augmentent).

« P », Proportionnel :

Dans le cas d'un contrôle proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système

$$\text{Consigne } (t) = K_p \varepsilon (t)$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne } (p) = K_p \varepsilon (p)$$

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur sur le système afin que celui-ci réagisse plus rapidement aux changements de consignes. Plus la valeur de K_p est grande, plus la réponse ne l'est aussi.

En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un K_p démesuré le système peut même diverger

« I », Intégré :

Au contrôle proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI (proportionnelle et intégrée).

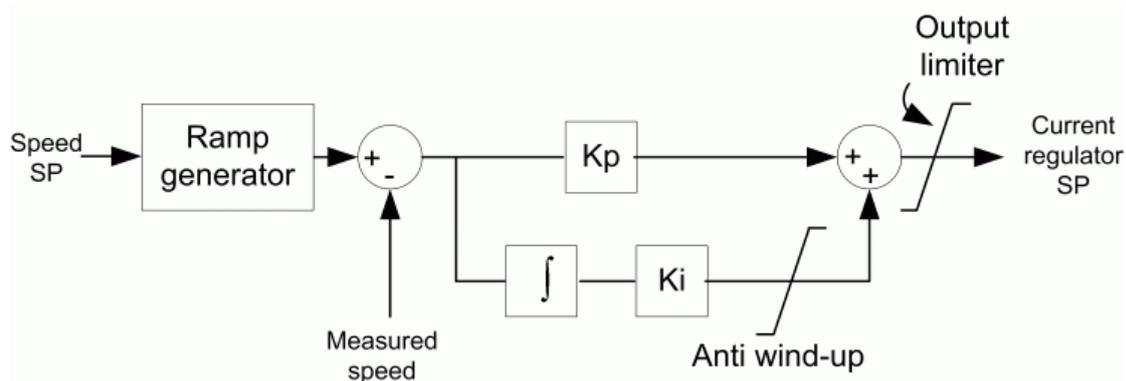
L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

Ce qui en La place donne :

$$\text{Consigne}(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \frac{\varepsilon(p)}{p}$$

Lors d'un simple contrôle proportionnel, il subsiste une erreur statique. Lorsque le système s'approche de sa consigne, l'erreur n'est plus assez grande pour faire avancer le moteur. Le terme intégral permet ainsi de compenser l'erreur statique et fournit, par conséquent, un système plus stable en régime permanent. Plus δ^a est élevé, plus l'erreur statique est corrigée.



Résumé

Ce travail présente une étude sur les systèmes photovoltaïques raccordée au réseau. Dans ce mémoire, Divers composants d'une centrale photovoltaïque sont étudiés. La modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande (commande MPPT, un convertisseur statique DC/DC et un onduleur), assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif principal de ce travail est de contribuer à une étude et dimensionnement d'une centrale solaire et simulation des systèmes solaires photovoltaïques (PV) raccordés au réseau

التلخيص

يقدم هذا العمل دراسة حول الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة.

في هذه الأطروحة ، تمت دراسة المكونات المختلفة لمحطة الطاقة الكهروضوئية.

النمذجة ومحاكاة التشغيل الكهربائي لنظام كهروضوئي مُكَيَّف بواسطة عنصر تحكم (تحكم MPPT ، محول / DC ثابت وعاكس) ، مما يضمن استمرار الطاقة القصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو المساهمة في دراسة وتحديد حجم محطة للطاقة الشمسية ومحاكاة أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) المتصلة بالشبكة.

Abstract

This work presents a study on photovoltaic systems connected to the grid.

In this thesis, various components of a photovoltaic power plant are studied.

Modeling and simulation of the electrical operation of a photovoltaic system adapted by a control (MPPT control, a static DC/DC converter and an inverter), ensuring the continuation of the maximum power supplied by the photovoltaic generator. The main objective of this work is to contribute to a study and sizing of a solar power plant and simulation of photovoltaic (PV) solar systems connected to the grid.