

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDEDAHMANEMIRA DE BEJAÏA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



mémoire fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Option : énergies renouvelables

Thème :

**Contribution à la modélisation et la simulation
d'un système photovoltaïque connecté au réseau**

Réalisé par :

- ❖ BRAHIMI Djaafar
- ❖ BOUREBABA Warda

Encadré par :

- ❖ Mr. BERBOUCHA Ali

Promotion 2021/2022

Remerciement

Nous tenons à la fin de ce travail à remercier ALLAH de nous avoir guidé vers le droit chemin, de nous avoir aidé tout au long de nos années d'étude.

Un grand merci à notre encadreur de Mémoire : Mr BERBOUCHA Ali qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier le président du jury, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicace 1

Avant tout je dédie ce travail à mes ennemis, votre haine a été une motivation supplémentaire et je remercie dieu de vous avoir gardé pour être témoins de ma réussite

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs Saliha, Saïda, Nacerra et Fahima pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères Belkacem, Rabah, Lounis pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

A ma binôme Warda Merci pour ton soutien sans limite, pour ta présence et ton amitié sincère.

Djaâfar

Dédicace 2

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail
toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

A mes chères sœurs : Nadia Khadîdja et Kahina

A mes chers frères : Athman Samir, Omar et sa femme Hafida

A ma petite nièce Alice

A mon KHISSOUSS

A tous mes amis

A mon binôme DJO Merci pour ton soutien sans limite, pour ta présence et ton amitié sincère.

Warda

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE-----	1
I GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES -----	2
I.1 Introduction-----	2
I.2 L'énergie solaire-----	2
I.3 Rayonnement solaire-----	4
I.4 Différents types de rayonnement-----	4
I.5 Le photovoltaïque-----	5
I.5.1 La cellule photovoltaïque-----	5
I.5.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque-----	6
I.5.3 Les différentes technologies de cellules photovoltaïque-----	8
I.6 Les différents types de systèmes photovoltaïques-----	9
I.6.1 Systèmes PV autonomes-----	9
I.6.2 Systèmes PV hybrides-----	10
I.6.3 Systèmes PV connectés au réseau-----	11
I.7 Les avantages et les inconvénients-----	11
I.7.1 Les avantages :-----	11
I.7.2 Inconvénients :-----	12
I.8 Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque-----	13
I.9 Protection des modules photovoltaïques-----	13
I.10 Conclusion-----	13
II MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE-----	14
II.1 Introduction-----	14
II.2 Description du système à étudier-----	14
II.3 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque-----	15

II.3.1	Modèle idéal	15
II.3.2	Modèle à une diode	16
II.3.3	Modèle à une diode sans résistance shunt	17
II.3.4	Modèle à deux diodes	17
II.3.5	Modèle à deux diodes sans résistance shunt	18
II.4	Caractéristique courant-tension, puissance-tension d'un module	19
II.4.1	Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque	20
II.4.2	Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque	21
II.5	Modélisation du convertisseur statique DC/DC (hacheur)	22
II.6	Modélisation du bus continu	24
II.7	Modélisation du convertisseur statique DC/AC (Onduleur)	24
II.7.1	Les onduleurs :	24
II.7.2	Structure des onduleurs	25
II.7.3	Classification des onduleurs	25
II.7.4	Principe de fonctionnement	26
II.7.4 1	Commande plein onde	26
II.7.4 2	Commande MLI	26
II.8	Régulateur PI	26
II.9	Modélisation du filtre associé au convertisseur	27
II.10	Modélisation du réseau électrique	28
II.11	Maximum Power Point tracking (MPPT)	28
II.10.4	Principe de fonctionnement	29
II.10.5	Classification des MPPT	30
II.10.6	Les algorithmes MPPT	32
II.12	Conclusion	36

III	SIMULATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU-----	37
III.1	Introduction _-----	37
III.2	La commande du point de puissance maximale (MPPT) -----	38
III.3	La commande coté réseau -----	42
III.4	Simulation du système global -----	42
III.5	Conclusion -----	46
	CONCLUSION GENERALE -----	47

Liste des figures :

Figure I.1: Carte des irradiations solaires de l'Algérie -----	3
Figure I.2: Structure basique d'une cellule solaire -----	6
Figure I.3: Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque -----	7
Figure I.4: Principe de fonctionnement d'une cellule PV -----	7
Figure I.5: Cellule amorphe -----	8
Figure I.6: Cellule en silicium monocristallin -----	9
Figure I.7: Cellule en Silicium polycristallin -----	9
Figure I.8: Système photovoltaïque autonome -----	10
Figure I.9: Système photovoltaïque autonome hybride -----	11
Figure I.10: Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire -----	12
Figure II.1: Système globale à étudier -----	15
Figure II.2 : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque -----	16
Figure II.3: Schéma équivalent d'une cellule solaire -----	17
Figure II.4: Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt -----	18
Figure II.5: Schéma équivalent à deux diodes. -----	18
Figure II. 6: Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt -----	19
Figure II.7 Caractéristique courant-tension. -----	20
Figure II.8: Caractéristique puissance-tension -----	21
Figure II.9: Influence de l'éclairement sur P_{pv} ($V_{(pv)}$) -----	21
Figure II.10: Influence de l'éclairement sur I_{pv} (V_{pv}) -----	22
Figure II.11: Influence de la température sur I_{pv} (V_{pv}) -----	22
Figure II.12: Influence de la température sur P_{pv} ($V_{(pv)}$) -----	23
Figure II.13: Schéma de principe d'un convertisseur Boost -----	24
Figure II.14: Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert -----	24
Figure II.15: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé -----	25
Figure II.16: Structure d'un onduleur triphasé -----	26
Figure II.17: Filtre RL associé au convertisseur -----	28

Figure II.18: . Schéma du réseau relié au filtre RL-----	28
Figure II.19: . Schéma du réseau relié au filtre RL-----	29
Figure II.20: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque-----	30
Figure II.21: Algorithme d'incrémentatıon de la conductance-----	33
Figure II.22: Algorithme Perturbation & Observation (P&O)-----	34
Figure II.23: Schéma explicatif de MPPT -----	35
Figure III.1: Schéma global de l'installation photovoltaïque connectée au réseau -----	37
Figure III.2: Variation de l'ensoleillement en fonction du temps -----	38
Figure III.3 Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps-----	39
Figure III.4: Variation de l'ensoleillement en fonction du temps -----	39
Figure III.5: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps-----	39
Figure III.6: Variation de la température en fonction du temps -----	40
Figure III7. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps-----	40
Figure III. 8. Variation de la température en fonction du temps-----	41
Figure III. 9. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps -----	41
Figure III. 10. Variation de l'ensoleillemen-----	42
Figure III. 11. Variation de la température -- -----	43
Figure III. 12. Courant produit par l'installation photovoltaïque -----	43
Figure III.13. Puissance produite par l'installation photovoltaïque -----	44
Figure III.14. Puissance active injectée au réseau -----	44
Figure III.15. Puissance réactive injectée au réseau-----	44
Figure III.16. Tensions et courants injectées au réseau -----	45
Figure III.17. Zoom sur les Tensions et courants injectées au réseau -----	45
Figure III.18. Analyse harmonique des courants injectés au réseau -----	45

Liste des tableaux :

Tableau II.1. *Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé*-----23

Tableau II.2. *Récapitulatif des méthodes utilisées*-----36

Liste des notations et symbole

- I_{ph} : photo- courant.
- I_d : Courant traversant la diode.
- n : Facteur de qualité.
- q : Charge d'électron.
- E : L'éclairement.
- K : La constante de Boltzmann.
- K_1 : Coefficient de la température du courant de court-circuit.
- V_T : Tension thermique.
- I_S : Courant de saturation.
- I_{RS} : Courant de saturation réversible.
- V : Tension aux bornes de la diode.
- T : Température absolue (en kelvin).
- T_{ref} : Température de référence de la cellule.
- E_g : Energie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule.
- R_S : La résistance séries.
- R_p : La résistance parallèle.
- N_S : Nombre de module en série.
- N_P : Nombre de module en parallèle.
- V_{pv} : tension à la sortie du générateur PV
- I_{pv} : Courant à la sortie du générateur PV
- P_{pv} : Puissance à la sortie du générateur PV
- V_m : L'amplitude de la porteuse
- F_{abc} : Fonctions de commutation des interrupteurs.
- V_{dc} : Tension continue appliquée à l'onduleur.
- $V_{ab,bc,ca}$: Tensions composées.
- m : L'indice de modulation.
- $V_{ref,bref,cref}$: Tensions de référence.
- $V_{a,b,c}$: Tensions de phase du réseau.
- $I_{a,b,c}$: Courants de phase du réseau.

Abréviations :

- MPPT: Poursuit du point de puissance maximale, (Maximum Power Point Tracker)
- PV: Photovoltaïque.
- GPV: Générateur Photovoltaïque.
- PPM: Point de Puissance Maximale.
- MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion.
- P&O: Perturbation et Observation

Introduction générale

Nous avons assisté ces dernières décennies au phénomène de réchauffement climatique qui a engendré de sérieux dangers sur la terre. Ce phénomène a trainé la planète dans l'instabilité climatique accompagnée par des catastrophes naturelles (la température élevée, les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les inondations, les ouragans...etc.). Cette perturbation du climat ou « l'effet de serre » est dû à la quantité importante du CO₂ émis dans l'atmosphère. Ajoutant au problème des gaz nocifs émis, les spécialistes se soucient aussi des réserves des énergies fossiles (gaz et pétrole) qui tendent vers l'épuisement.

Le monde actuel cherche à trouver des solutions pour réduire la quantité de CO₂ dans l'air par l'utilisation de plusieurs méthodes innovantes. Les énergies renouvelables le plus utilisées sont les énergies solaires, éoliennes et hydrauliques. L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen du capteur relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité par effet photovoltaïque [1], dans notre travail nous allons nous baser sur la production d'électricité par effet photovoltaïque. Dans cette thématique, s'intègre notre projet, qui s'intitule « Contribution à la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau ». Dans notre cas on va s'intéresser à système photovoltaïque relié au réseau (injection directe au réseau) afin de fournir en permanence en énergie électrique du moins pendant la journée (vu que le système étudié ne comporte pas de batteries de stockage)

Dans le 1er chapitre nous présentons les généralités sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différentes technologies de cellules photovoltaïques.

Dans le 2em Chapitre nous présentons la modélisation des éléments d'un système photovoltaïque, on décrit le système à étudier et le modèle électrique d'un générateur photovoltaïques, l'influence de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque.

Dans le 3em Chapitre nous présentons la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau, la commande du point de puissance maximale (MPPT), la commande coté réseau, la simulation du système global.

Puis on termine par une conclusion générale.

I Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1].

Dans ce chapitre, nous commencerons par la description de l'énergie solaire puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi que leur principe de fonctionnement, Puis nous présenterons les différents types de cellules photovoltaïques, enfin les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque.

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre.

L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde.

La Terre reçoit 174 pétawatts (10^{15} watts, ou PW) de rayonnement solaire entrant dans la haute atmosphère (irradiation solaire), soit environ 340 W/m² à sa surface. Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est principalement réparti entre le spectre visible et les infrarouges proches, ainsi qu'une petite partie située dans les ultraviolets proches¹⁶. La majorité de la population mondiale vit dans des zones où le niveau d'irradiation solaire moyen (nuit comprise) est compris entre 150 et 300 W/m², ce qui représente 3,5 à 7,0 kWh/m² par jour [3]. L'Algérie dispose d'environ 3650 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires. [2], Figure (I.1).

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres, on peut ainsi produire avec de la vapeur et la convertir en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires.

Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures et le charbon [2].

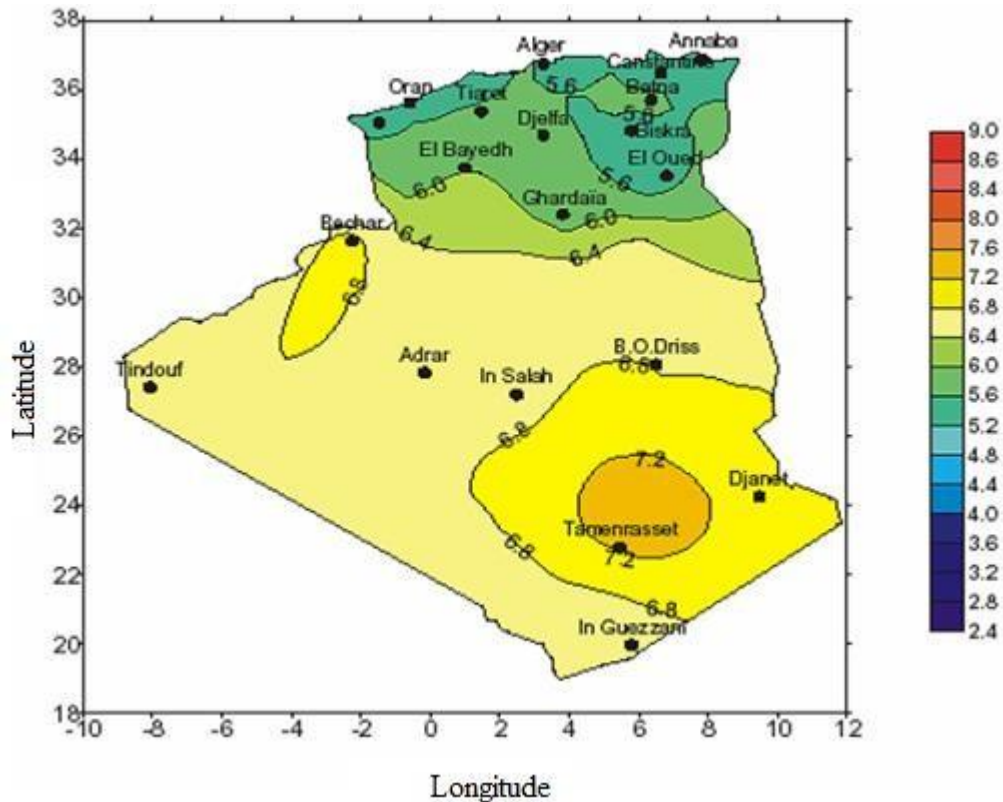


Figure 1-1. Carte des irradiations solaires de l'Algérie [3]

I.3 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km , la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante $1,74. 10^{17} \text{ W}$, [3], c'est pour ça que l'énergie solaire se présente comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$ l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit : [3]

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47% dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

I.4 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composants:

▪ Rayonnement direct

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

▪ Rayonnement diffus

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

▪ Rayonnement réfléchi

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

▪ Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du soleil un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi

I.5 Le photovoltaïque

Le physicien Français **Edmond BECQUEREL** décrit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et **EINSTEIN** en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50, **BECQUEREL** découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. [4]

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par **Heinrich HERTZ** dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre. [4]

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratoires qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage **CZOCHEWSKI**. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. [4]

I.5.1 La cellule photovoltaïque

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

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le Silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

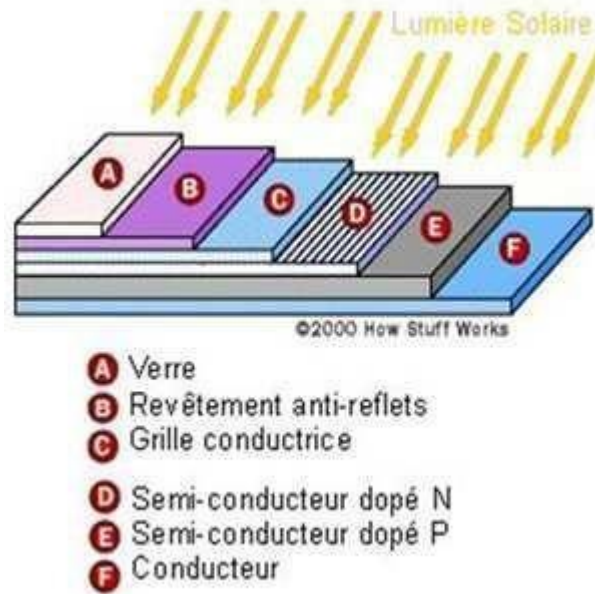


Figure I-2. Structure basique d'une cellule solaire [2]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre $0.3V$ et $0.7V$ en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. [2]

I.5.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

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

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

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

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction *PN*. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I-3

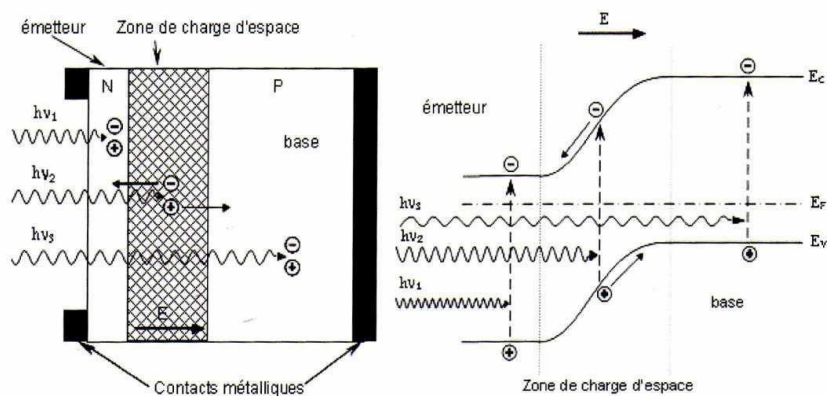


Figure I-3. Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. [5]

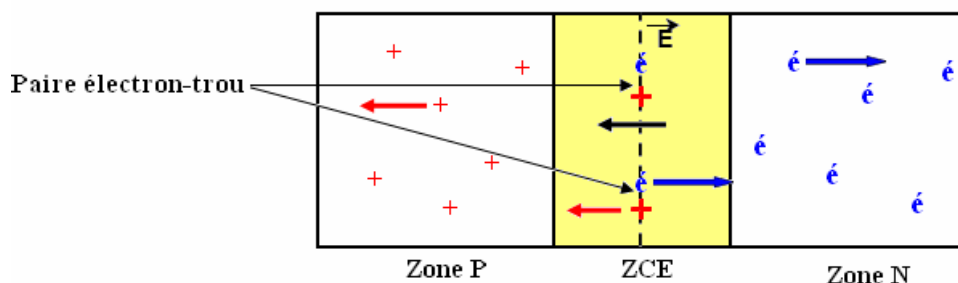


Figure I-4. Principe de fonctionnement d'une cellule PV [5]

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

- Dans la zone *N* ou *P*, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone *P* (pour les trous) ou dans la zone *N* (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région *N*, les trous vers la région *P*. On aura une photo courant de génération.

I.5.3 Les différentes technologies de cellules photovoltaïque

Il existe différents types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque-soit le type, le rendement reste assez faible: entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent [6]. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

- **Cellule en Silicium amorphe** : Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires [6].

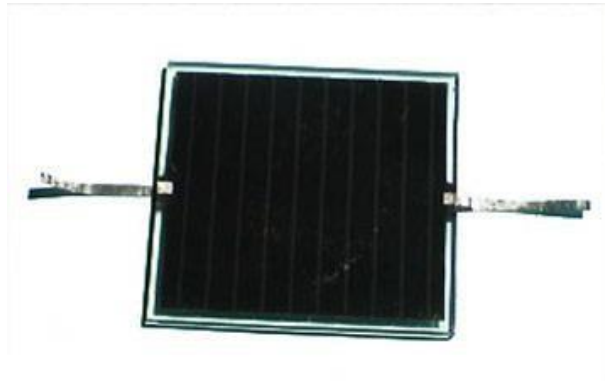


Figure I-5. Cellule amorphe [7]

Elles ont un faible rendement (5 à 9 %) et leurs performances diminuent sensiblement avec le temps, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

- **Cellule en Silicium monocristallin** : La cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée, lors du refroidissement du silicium fondu on s'arrange pour qu'il se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en générale d'un bleu uniforme [6]. Ces cellules ont un bon rendement (20% environ) mais sont chères et possèdent un fonctionnement très médiocre sous un faible éclaircissement

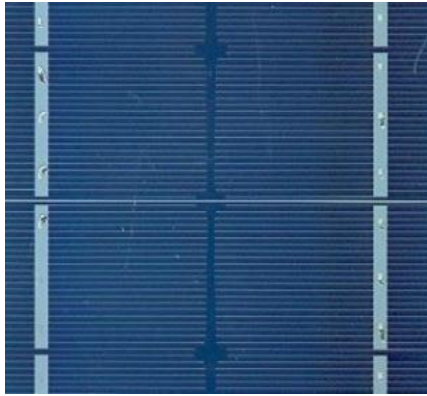


Figure I-6. *Cellule en silicium monocristallin*

- **Cellule en Silicium polycristallin :** Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [6], elles ont un bon rendement (13% environ), sont moins cher que le monocristallin.

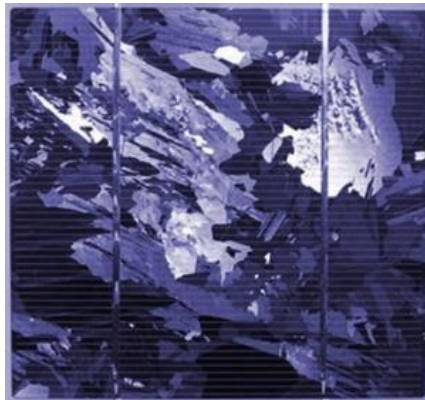


Figure I-7. *Cellule en Silicium polycristallin*

I.6 Les différents types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes *PV* peuvent être classés en trois types: autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type choisi dépendra des besoins énergétiques et de l'emplacement.

I.6.1 Systèmes PV autonomes

Sont des systèmes complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

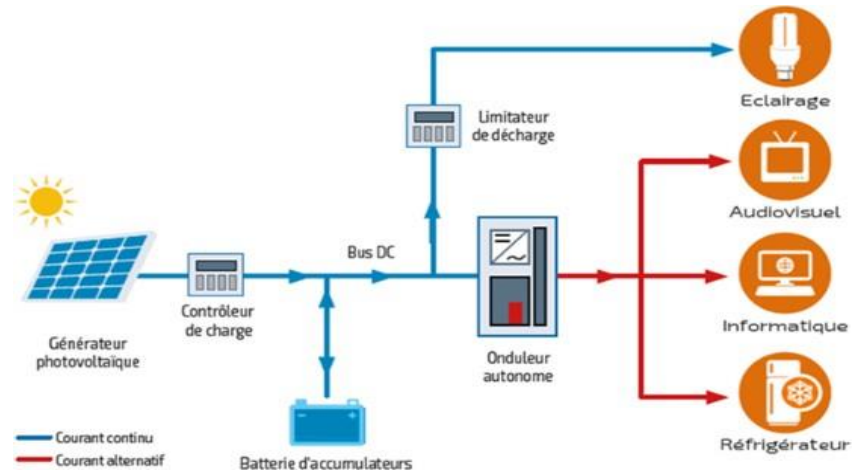


Figure 1-8. *Système photovoltaïque autonome [7]*

I.6.2 Systèmes PV hybrides

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

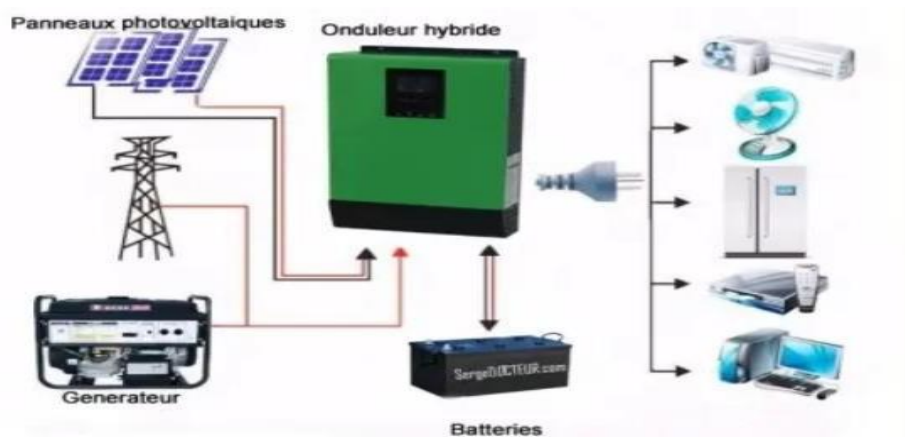


Figure 1-9. *Système photovoltaïque autonome hybride [8]*

I.6.3 Systèmes PV connectés au réseau

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

Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

- **Injection de la totalité de la production** : L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.
- **Injection du surplus de la production** : L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

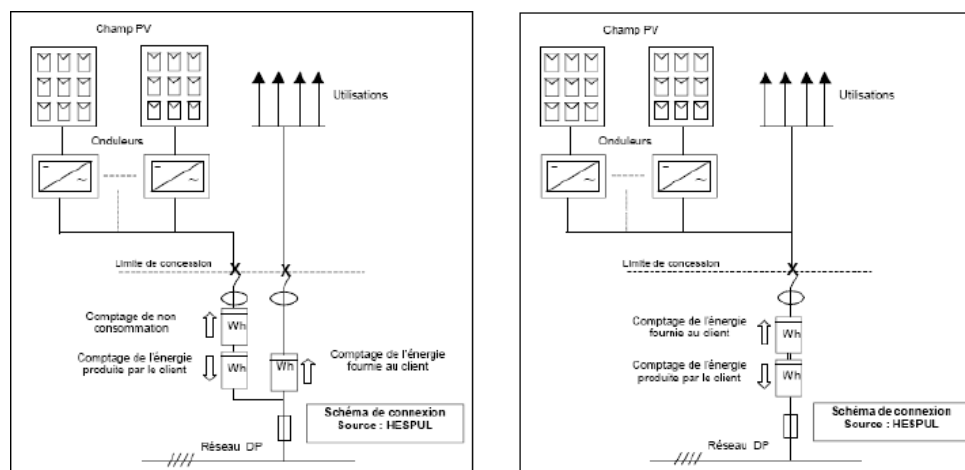


Figure 1-10. Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire

I.7 Les avantages et les inconvénients

I.7.1 Les avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages:

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel [9].

I.7.2 Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable. Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication [9].

I.8 Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

- Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale toute entière.
- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie... etc.
- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales Hydro-électrique ou utilisation des vagues) ou

une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.

I.9 Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques [9] :

➤ La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les *GPV*. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

➤ Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante.

Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

I.10 Conclusion

Ce chapitre est une introduction à notre travail, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques, où on a défini l'énergie et le rayonnement solaire ainsi que les différents types de rayonnement, ensuite on a expliqué brièvement le phénomène photovoltaïque et la composition d'une cellule PV ainsi que son principe de fonctionnement et les différentes technologies de cellules photovoltaïques, on a fini par donner les différents types de systèmes photovoltaïques et les avantages et les inconvénients de la technologie photovoltaïque .

II Modélisation des éléments du système photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons, dans une première partie, le modèle électrique d'un générateur photovoltaïque, Nous développerons les caractéristiques des cellules PV afin de visualiser l'influence de l'ensoleillement et la température sur ces caractéristiques.

Dans la seconde partie nous présenterons, les convertisseurs dédiés aux installations PV connectées en réseau Comme le hacheur d'dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (d'dévolteur-survolteur) ainsi que les convertisseurs DC-AC, on expliquera brièvement le rôle du bus continu/

Enfin, dans la dernière partie, Les systèmes photovoltaïques GPV peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP), nous verrons le principe de fonctionnement du MPPT

II.2 Description du système à étudier

Notre système est composé, comme le montre la Figure II.1 :

- **Les panneaux photovoltaïques** : permettent la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique
- **Le convertisseur DC/DC** : fournit une tension continue réglable à partir d'une tension continue d'alimentation.
- **Le convertisseur DC/AC** : fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.

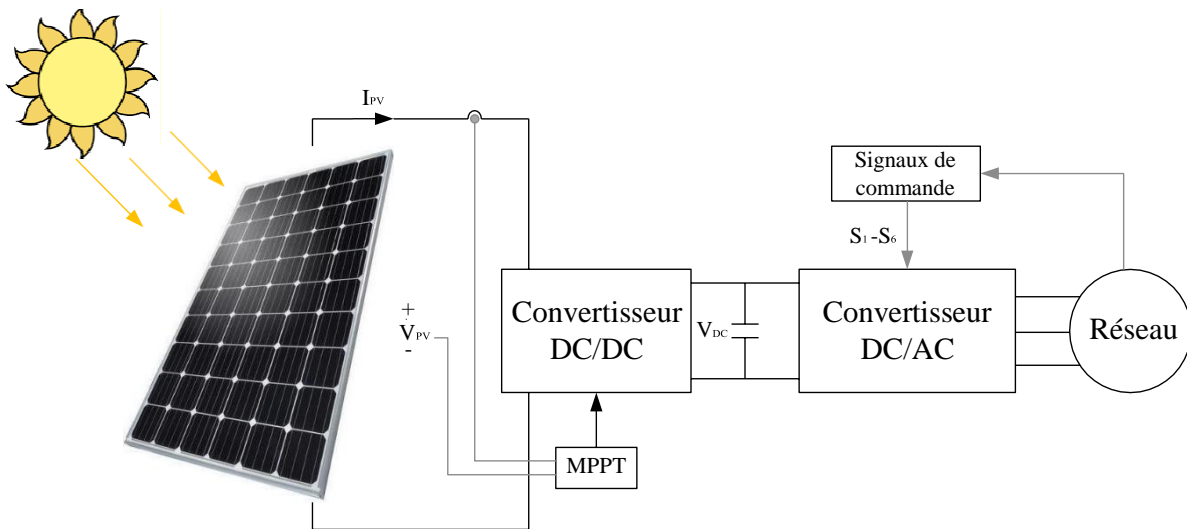


Figure II-1. Système globale à étudier

II.3 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

II.3.1 Modèle idéal

Un panneau photovoltaïque peut être décrit de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement incident, en parallèle avec une diode (Figure II.2) qui correspond à la jonction [19].

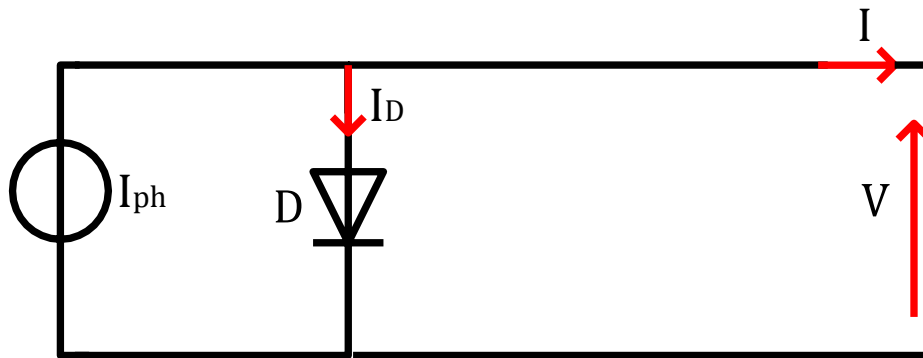


Figure II-2. Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

D'après la loi des nœuds, on obtient :

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

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I - V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{q \cdot v}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode.

Q : Charge de l'électron qui est égale à $1,60217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

K : Constante de Boltzmann qui est égale à $1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

T : Température de la jonction PN (K).

A : Constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale.

II.3.2 Modèle à une diode

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt).

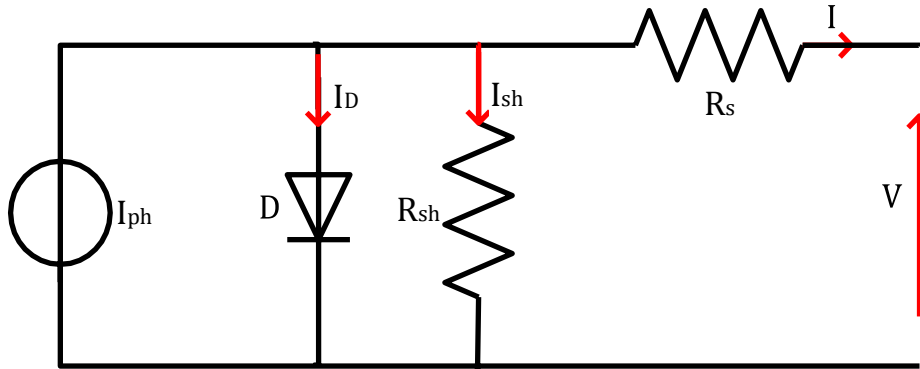


Figure II-3. Schéma équivalent d'une cellule solaire

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I-V$ de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle représente principalement la résistance du semi-conducteur utilisé.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \times \left[e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.4})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \cdot (v + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \left[\frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right] \quad (\text{II.5})$$

II.3.3 Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, il est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une Diode. La Figure II.4 illustre le circuit électrique équivalent du modèle à une diode.

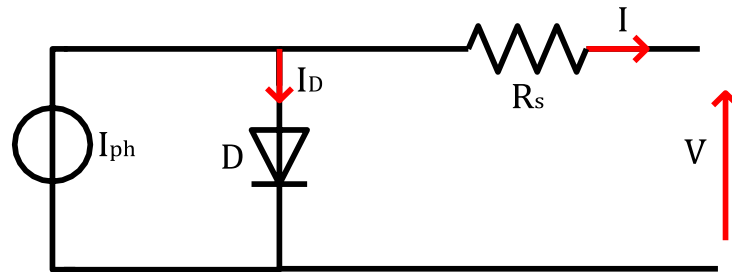


Figure II-4. Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.6})$$

$$I_D = I_0 \times \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{A * K * T}} - 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

II.3.4 Modèle à deux diodes

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique illustré par la Figure II.5, il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

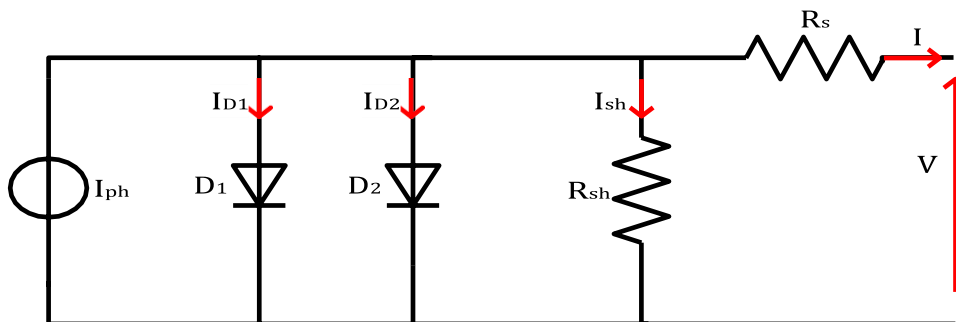


Figure II-5. Schéma équivalent à deux diodes

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{II.8})$$

$$I_{D1} = I_1 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.9})$$

$$I_{D2} = I_2 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.10})$$

Avec : I_1 et I_2 courant de saturation des diodes.

Au final on obtient :

$$I = I_{PH} - I_1 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - I_2 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - \frac{(V+R_s*I)}{R_{sh}} \quad (\text{II.11})$$

II.3.5 Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique illustré par la Figure II.6, il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la Polarisation de la cellule et une résistance série.

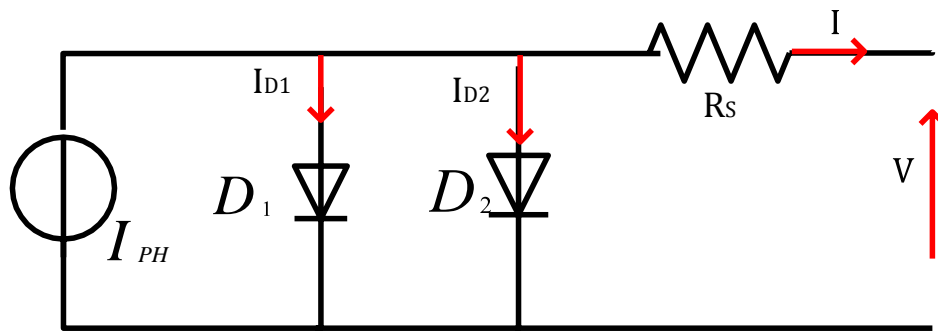


Figure II-6. Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad (\text{II.12})$$

$$I = I_{ph} - I_1 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - I_2 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.13})$$

II.4 Caractéristique courant-tension, puissance-tension d'un module

Les Figures II.7 et II.8 représentent respectivement les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau II.1, dans des conditions standard d'ensoleillement et de température.

L'ensoleillement standard adopté pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques a une intensité de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

Puissance nominale max	110 W
Tension du circuit ouvert	43.5 V
Courant de court-circuit	3.45 A
Tension à puissance maximale	35 V
Courant à puissance maximale	3.25 A
Coefficient de température de la tension de circuit ouvert	-152 mV/°C
Coefficient de température du courant de court-circuit	1.4 mA/°C

Tableau II.1. Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé [10]

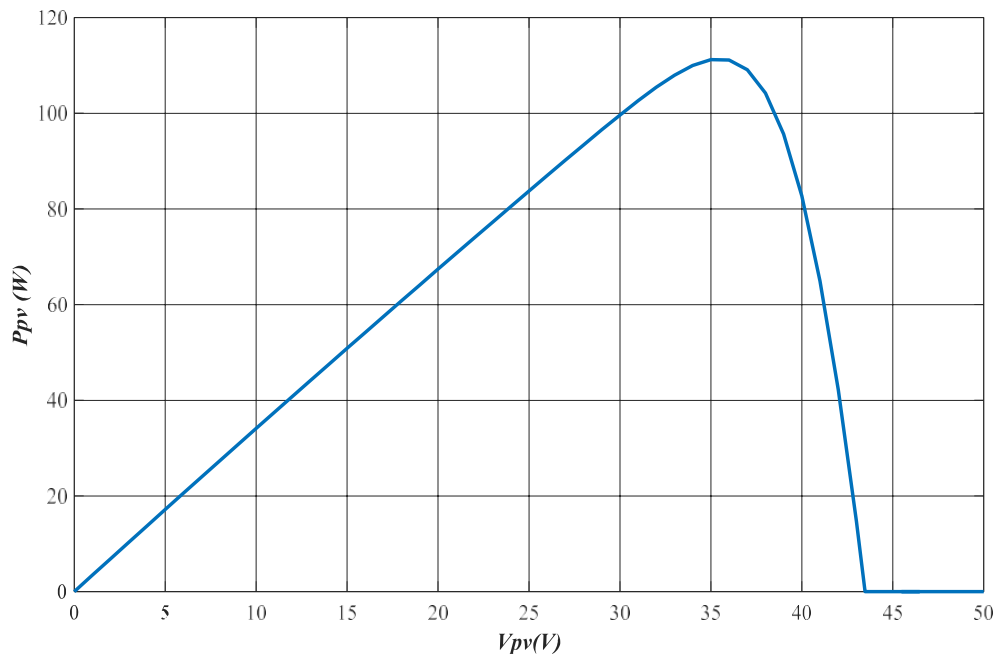


Figure II-7. Caractéristique puissance-tension

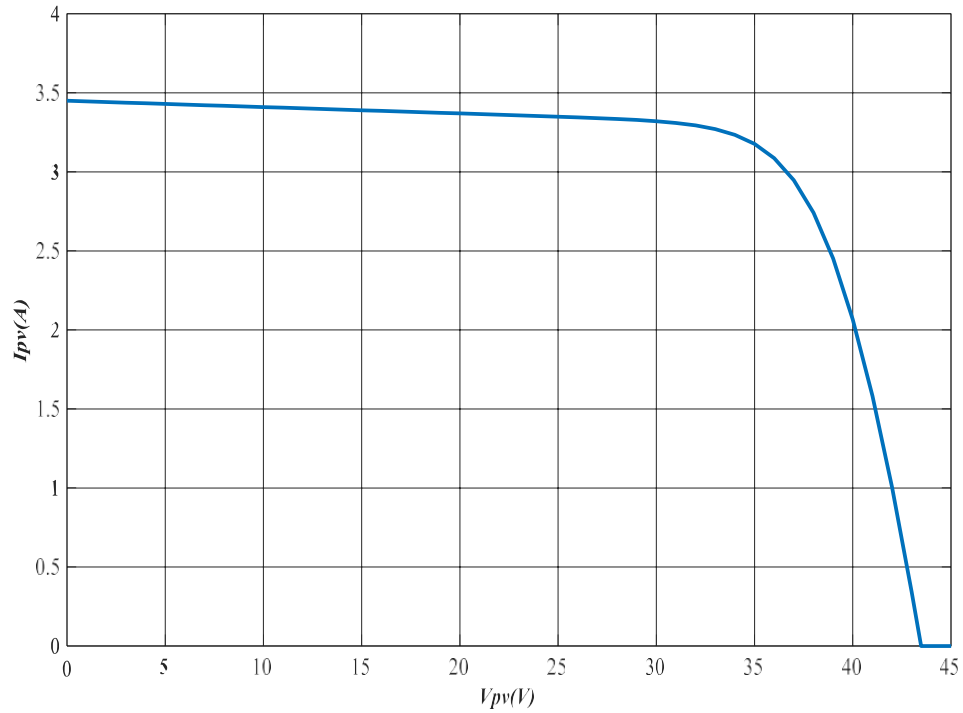


Figure II-8. Caractéristique courant-tension

II.4.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

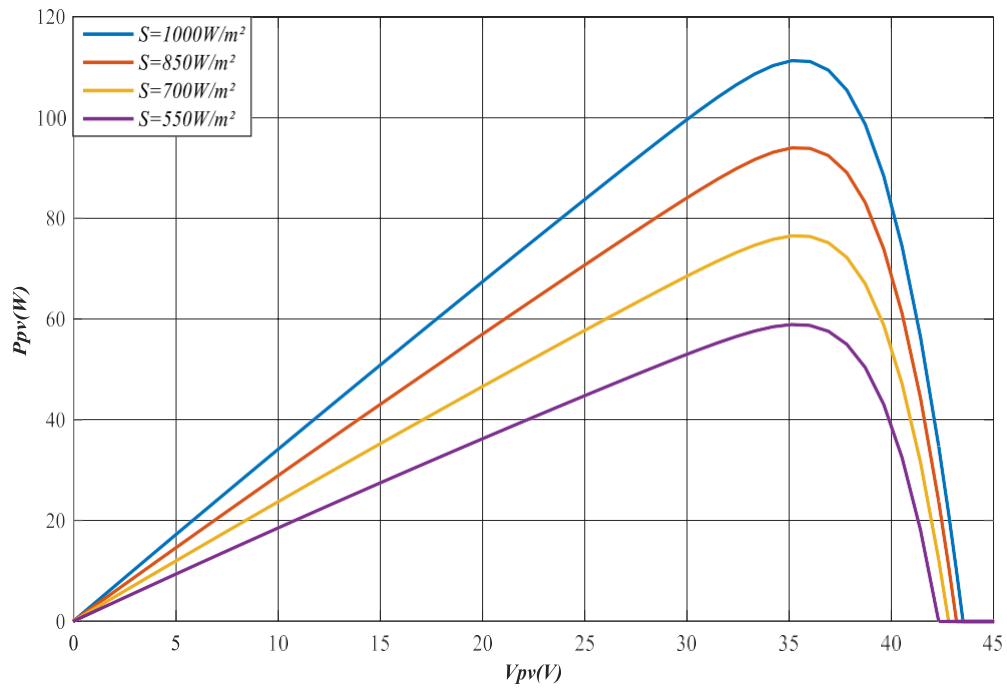


Figure II-9. Influence de l'éclairement sur $P_{pv}(V_{pv})$

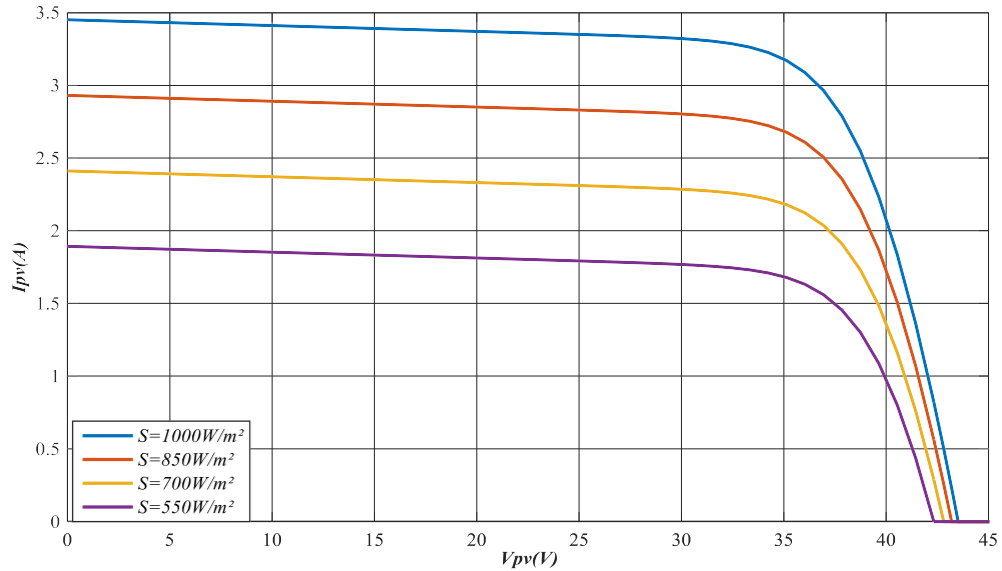


Figure II-10. Influence de l'éclairement sur $I_{pv}(V_{pv})$

Les caractéristiques des Figures II.9 et II.10 montrent la variation de la puissance ainsi que le courant du module photovoltaïque en fonction de la tension pour différents niveaux d'ensoleillement. On peut voir aussi sur le graph, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'ensoleillement varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'ensoleillement. De même, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu.

II.4.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

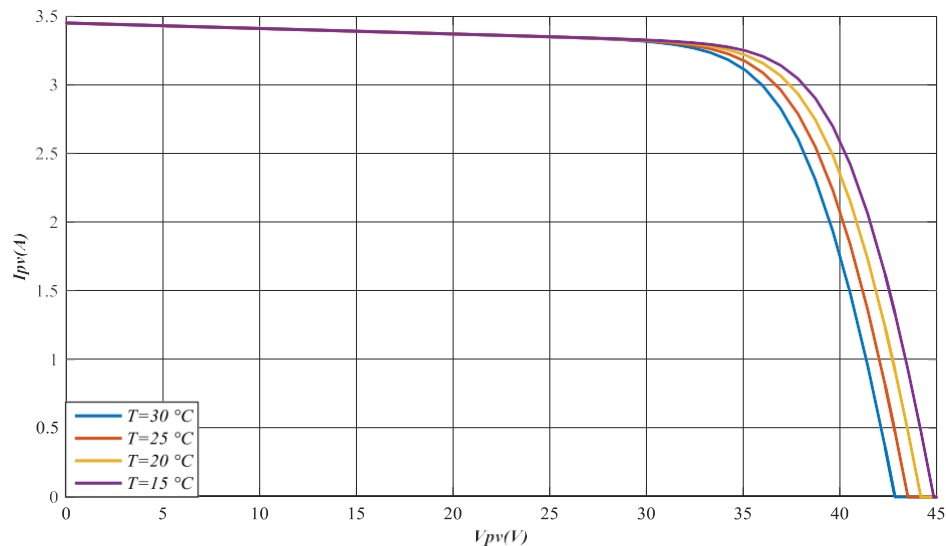


Figure II-11. Influence de la température sur $I_{pv}(V_{pv})$

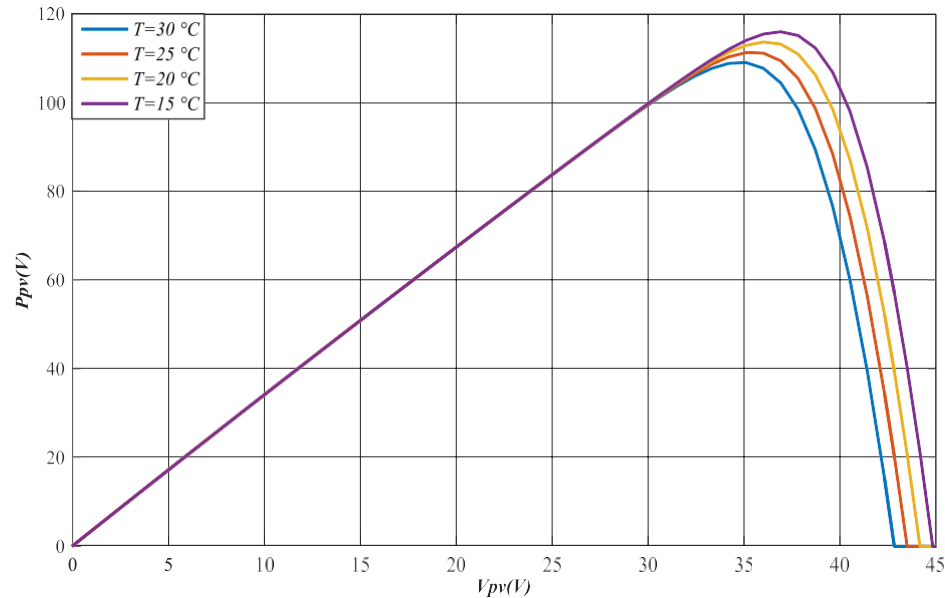


Figure II-12. Influence de la température sur $P_{pv}(V_{pv})$

Suivant les Figures II.11 et II.12, on constate que lorsque la température croît à un ensoleillement constant la tension de circuit ouvert V_{oc} décroît.

II.5 Modélisation du convertisseur statique DC/DC (hacheur)

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement des convertisseurs soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance. Pour cette raison la conversion de puissance doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les commutateurs.

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de puissance à convertir ou à commander, les *MOSFETs* (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) sont habituellement utilisés pour les puissances relativement basses (quelques *kW*) et les *IGBTs* (Insulated Gate Bipolar Transistor) à des puissances plus élevées, les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [11].

Trois topologies de base de circuit de conversion (*DC/DC*) sont décrites dans la littérature ; nous allons présenter le principe d'un seul type de convertisseur *DC/DC* (*Boost*), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (inductances et condensateurs) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [12].

Chapitre II Modélisation des éléments du système photovoltaïque

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élevateur de tension. La Figure II.13 représente le circuit électrique du convertisseur Boost. Au premier temps (dT), l'interrupteur K est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, l'interrupteur K s'ouvre et l'inductance s'opposant à la diminution de courant I_L , génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode [13].

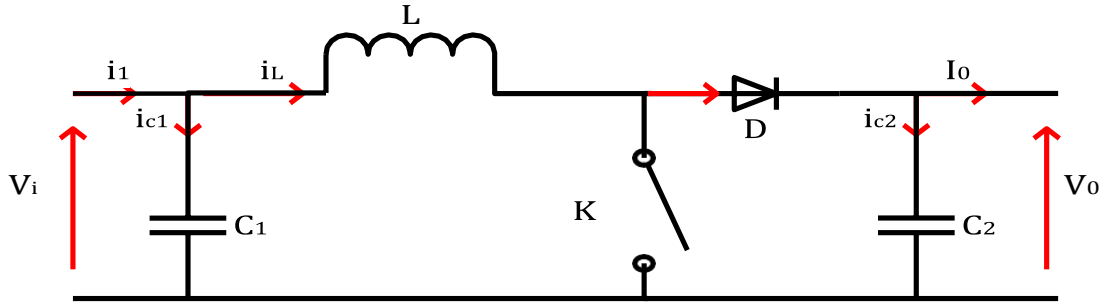


Figure II-13. Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne les équations suivantes [13] :

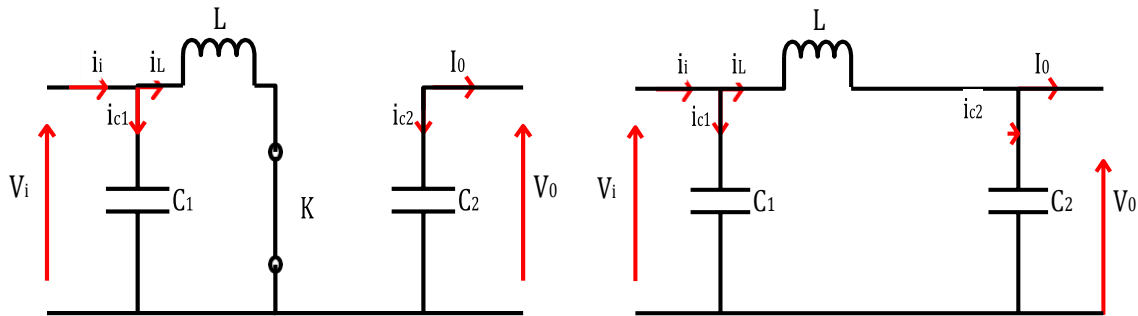


Figure II-14. Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

➤ Pour la première période dTs :

$$\begin{aligned}
 & \bullet \quad i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 & \bullet \quad i_{c2}(t)c_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\
 & \bullet \quad v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -v_i(t)
 \end{aligned} \tag{II-14}$$

➤ Pour la deuxième période $(1-d) Ts$

$$\begin{aligned}
 & \bullet \quad i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 & \bullet \quad i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\
 & \bullet \quad v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_0(t)
 \end{aligned} \tag{II-15}$$

II.6 Modélisation du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif [14].

II.7 Modélisation du convertisseur statique DC/AC (Onduleur)

II.7.1 Les onduleurs :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant la transformation de l'énergie type continue (tensions et courants) en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement de la technique de commande utilisée. C'est la fonction inverse d'un redresseur.

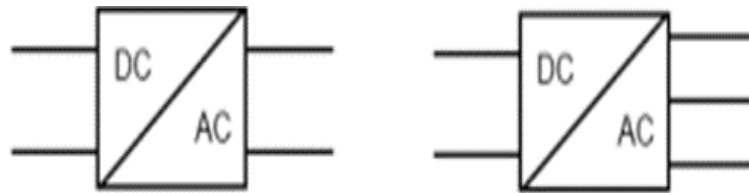


Figure.II-15: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

S_i est l'état de l'interrupteur K_i tel que : $S_i=1$ si K_i fermé, $S_i=0$ si K_i ouvert.

Les tensions simples s'expriment en fonction des fonctions logiques, elles sont données par:

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{V_{DC}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_b &= \frac{V_{DC}}{3} (2S_b - S_a - S_c) \\ V_c &= \frac{V_{DC}}{3} (2S_c - S_a - S_b) \end{aligned} \quad (\text{II-17})$$

Tel que : S_a, S_b et S_c : Les fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

V_{dc} : Tension du bus continu.

II.7.2 Structure des onduleurs

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [15].

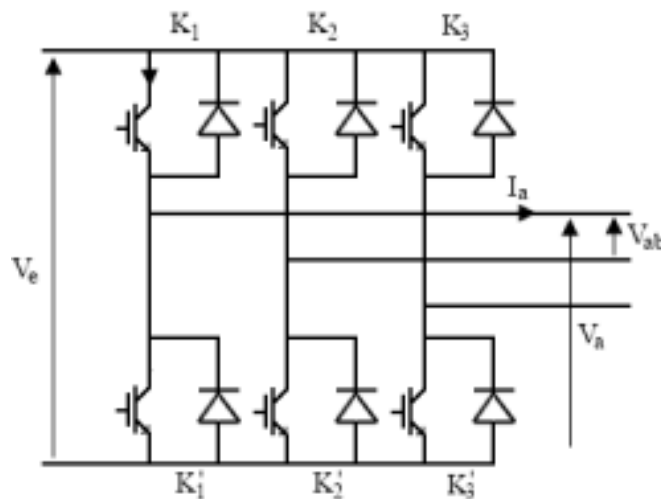


Figure.II-16: Structure d'un onduleur triphasé

II.7.3 Classification des onduleurs

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation :

- ❖ Les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée [16].
- ❖ Les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre [16]. Selon la nature de la source continue :
- ❖ Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal [15].
- ❖ Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [15].

II.7.4 Principe de fonctionnement

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

II.7.4.1 Commande plein onde

Deux thyristors d'un même bras sont commandés à 180° de décalage. Les thyristors de deux bras voisins sont commandés à 120° de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont E, 0 ou $-E$ volts, la durée d'un niveau non nul étant de 120° par alternance. [17]

II.7.4.2 Commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant [18].

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse [18].

II.8 Régulateur PI

L'intérêt de la correction de type intégrale est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. Or, pour que la sortie d'un intégrateur soit constante, il est nécessaire que son entrée soit nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est reliée à l'erreur de régulation, l'effet du terme intégral sera bien d'annuler cette erreur. Notons que l'erreur est annulée même en présence d'une perturbation. Annuler l'erreur en régime permanent est une chose, mais le faire rapidement en est une autre. Il convient donc d'être capable de régler le correcteur de manière adéquate.

Deux types de corrections PI sont possibles :

- en utilisant le signal $e(t) = r(t) - y(t)$ d'erreur et en calculant la commande avec $U(s) = K(s)E(s)$ où $K(s) = K(p) + \frac{K_i}{s}$

Les fonctions de transfert en boucle fermée s'écrivent alors :

$$H_{yr}(s) = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad (\text{II-18})$$

$$H_{yp}(s) = \frac{G(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad (\text{II-19})$$

$$H_{ur}(s) = \frac{K(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad (\text{II-20})$$

$$H_{up}(s) = -\frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad (\text{II-21})$$

$$H_{er}(s) = \frac{1}{1 + K(s)G(s)} \quad (\text{II-22})$$

$$H_{ep}(s) = -\frac{G(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad (\text{II-23})$$

On peut également choisir une loi de commande de la forme :

$$U(s) = -K_p Y(s) + \frac{K_i}{s} (R(s) - Y(s)) \quad (\text{II-24})$$

II.9 Modélisation du filtre associé au convertisseur

La figure II.15 montre le filtre (RL) associé au convertisseur et sa modélisation est comme suite :

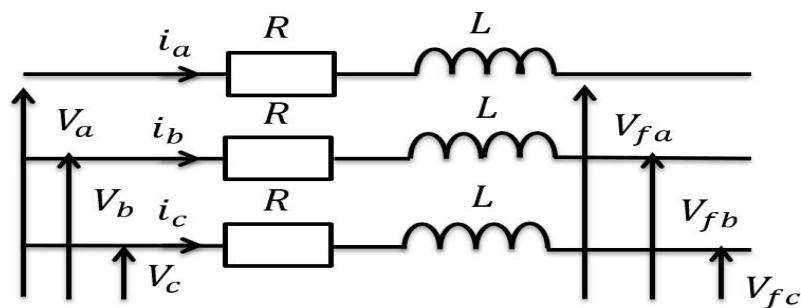


Figure II-17. Filtre RL associé au convertisseur

$$\begin{cases} V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{fa} \\ V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_{fb} \\ V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_{fc} \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

V_{fa} , V_{fb} et V_{fc} : Les tensions à la sortie du filtre RL

II.10 Modélisation du réseau électrique

La figure II.16 montre le schéma d'un réseau électrique et sa modélisation est comme suit :

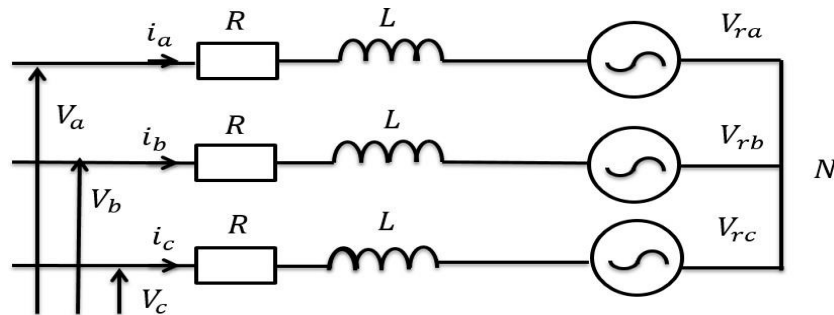


Figure II-18. Schéma du réseau relié au filtre RL

On peut généralement considérer que (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}) est un système de tensions triphasé équilibré direct.

$$\begin{cases} V_{ra} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{rb} = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{rc} = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

II.11 Maximum Power Point tracking (MPPT)

Pour la meilleure exploitation de diverses ressources des énergies renouvelables, il est important d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques. Le suivi de point de puissance maximale (*MPPT*) a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (*MPP*).

II.10.4 Principe de fonctionnement

Le suiveur de point de puissance maximum (*MPPT*) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (*MPPT*) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (*PPM*) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau. Le point de puissance maximale (*MPP*) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale.

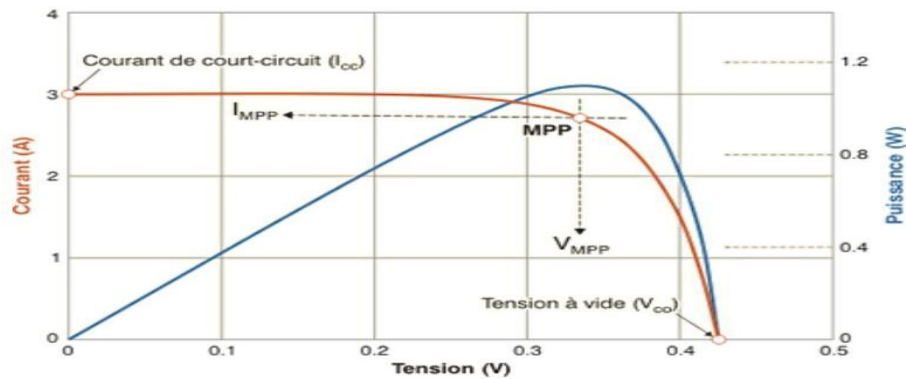


Figure II-19. Courbe caractéristique de puissance d'un GPV [19]

L'association d'un convertisseur statique *DC / DC*, modifie le point de fonctionnement du panneau à l'aide d'une commande externe afin de maximiser l'énergie transférée de manière permanente. L'algorithme de recherche *MPPT* peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implémentation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé

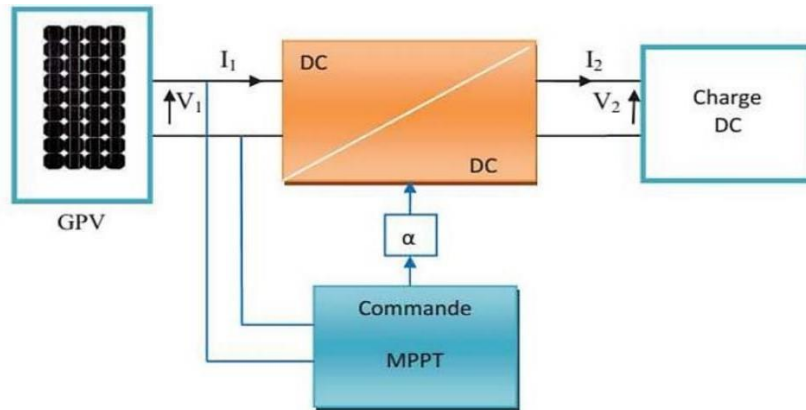


Figure II-20. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [20]

II.10.5 Classification des MPPT

Il est possible de classifier d'une manière générale les commandes *MPPT* selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande *MPPT* [21].

- Classification des commandes *MPPT* selon le type de recherche

- **Méthodes indirectes**

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau *PV* sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes *PV* sont la méthode de tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que la méthode *MPPT* basée sur l'intelligence artificielle (*IA*). Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis, devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [21].

- **Méthode directe**

Les valeurs instantanées de la tension ou du courant de sortie *PV* sont généralement utilisées pour générer les signaux de commande 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 panneaux *PV*. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du

Chapitre II Modélisation des éléments du système photovoltaïque

fonctionnement du *PV*. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

➤ Classification des commandes *MPPT* selon les paramètres d'entrée

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur :**

Ce type de commandes *MPPT* exécute une recherche du *MPP* selon l'évolution de la puissance fournie par le *GPV*. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur. D'autres types de commandes *MPPT* sont basées sur la régulation du courant du *GPV*, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du convertisseur. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du convertisseur ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes *MPPT* basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial. On peut voir dans le Tableau II.2 les méthodes les plus utilisées [22] :

Méthode MPPT	type	complexité	Analogique/numérique	Vitesse de convergence	Paramètres détectés	Efficacité
Tension de circuit ouvert	Indirect	Faible	Mixte	Moyenne	Tension	Faible (=86%)
Courant de court-circuit	Indirect	Moyenne	Mixte	Moyenne	Courant	Faible (=89%)
(P&O)	Direct	Moyenne	Numérique	Rapide	Tension & courant	Haute (=96%)
ESC	Direct	Moyenne	Numérique	Rapide	Tension & courant	Haute (=97%)
IncCond	Direct	Moyenne	Mixte	dépond	Tension & courant	Haute

Tableau II.2. Récapitulatif des méthodes utilisées

II.10.6 Les algorithmes MPPT

➤ **Méthode de conductance incrémentale (IncCond)**

La méthode de la conductance incrémentielle (IncCond) utilise la pente des caractéristiques de puissance du générateur *PV* pour suivre le *MPP*. Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle sur le point *MPP*, positive pour les valeurs de puissance de sortie inférieure à *MPP* et négative pour les valeurs de puissance supérieure à *MPP*. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dv} = 1 + V \frac{dI}{dv} \quad (\text{II-27})$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = 1 \quad (\text{II-28})$$

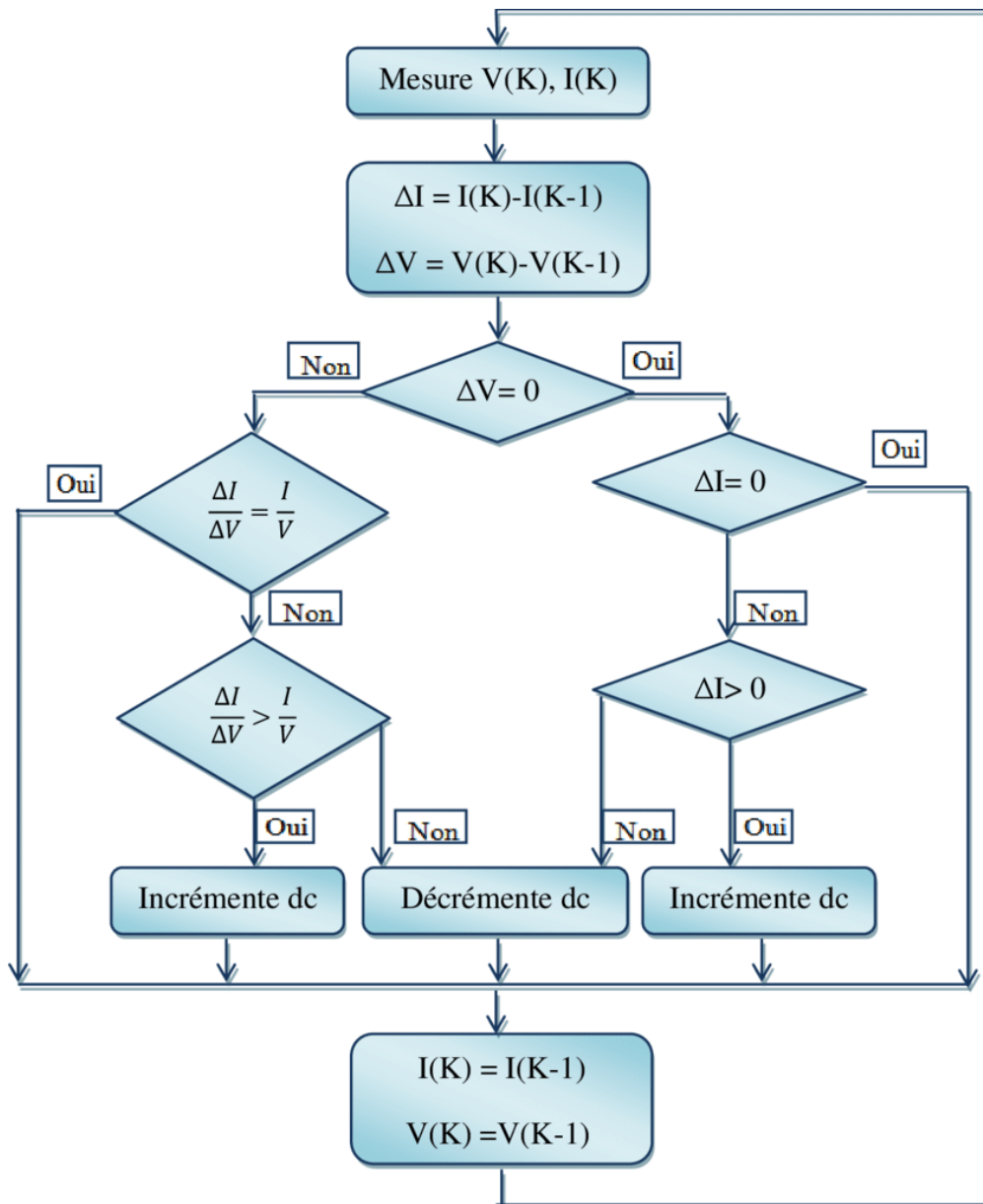


Figure II-21. Algorithme d'incrément de la conductance [23]

➤ Algorithme Perturbation & Observation (P&O)

Cet algorithme a été considéré par un certain nombre de chercheurs. L'algorithme *P&O* peut être mise en œuvre en appliquant des perturbations à la tension de référence ou au signal de courant de référence du panneau solaire. L'algorithme *P&O* est basé sur le calcul de la puissance de sortie *PV* et de la variation de puissance en échantillonnant à la fois le courant et la tension du *PV*. Le tracker fonctionne en incrémentant ou décrémentant périodiquement la tension du générateur solaire. Si une perturbation donnée entraîne une augmentation (diminution) de la puissance de

Chapitre II Modélisation des éléments du système photovoltaïque

sortie du PV, la perturbation ultérieure est générée dans la même direction (opposée). Le rapport cyclique du hacheur est varié et le processus est répété jusqu'à ce que le point de puissance maximum soit atteint.

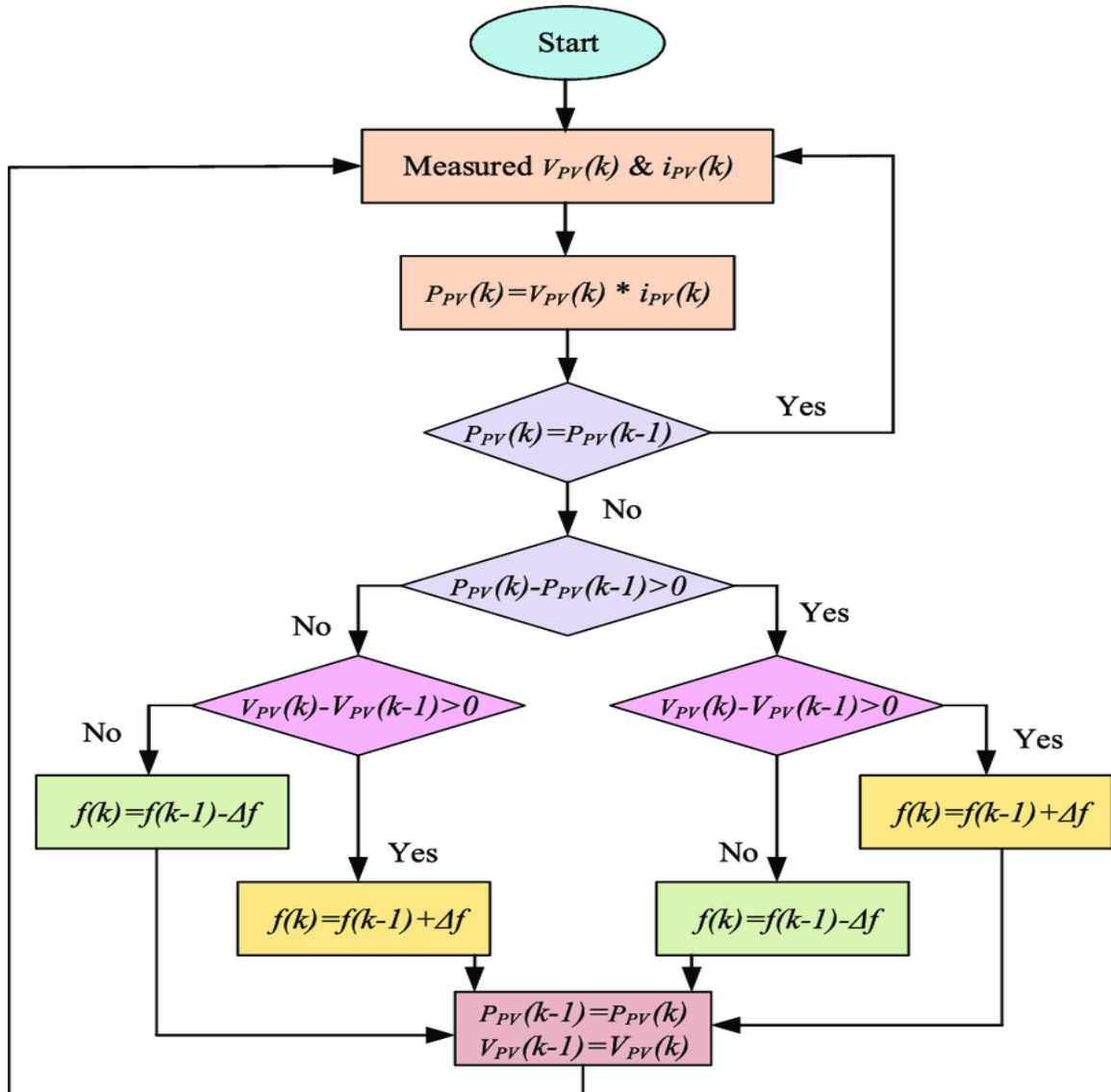


Figure II-22. Algorithme Perturbation & Observation (P&O), [24]

Chapitre II Modélisation des éléments du système photovoltaïque

La tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du *MPPT*. Dès que le *MPP* sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{MP} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple C_p .

Si C_p 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 légèrement changeantes.

Si C_p 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. La valeur C_p idéale dépend du système.

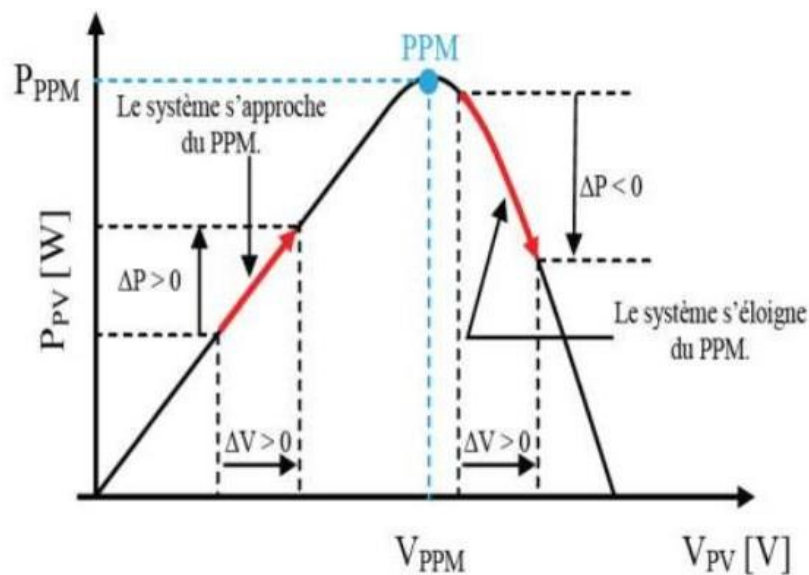


Figure II-23. Schéma explicatif de MPPT

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu divers modèles électriques d'une cellule photovoltaïque et nous avons choisi le modèle à une diode sans résistance shunt, qui est le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, ensuite nous avons développé les caractéristiques des cellules PV afin de visualiser l'influence de l'ensoleillement et la température sur ces caractéristiques, on a pu voir que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'ensoleillement, et que la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu, on constate aussi que lorsque la température croît à un ensoleillement constant la tension de circuit ouvert V_{oc} décroît

Dans la seconde partie nous avons présenté, les convertisseurs dédiés aux installations PV connectées en réseau, comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (d'dévolteur-survolteur) et nous choisirons le hacheur Boost dans la suite de notre recherche ; ainsi que les convertisseurs DC-AC (onduleur), nous avons ouvert une petite parenthèse pour expliquer le rôle du bus continu qui consiste à lisser la tension.

Enfin, nous avons procédé au suivi de point de puissance maximale (MPPT) qui a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Ces derniers peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP)

III Commande et simulation du système global

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera les résultats de simulation d'un système photovoltaïque Connecté au réseau électrique. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur (hacheur) survolteur « Boost », une commande MPPT « perturbation et observation », un bus continu et un onduleur triphasé à deux niveaux avec la commande MLI vectorielle. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

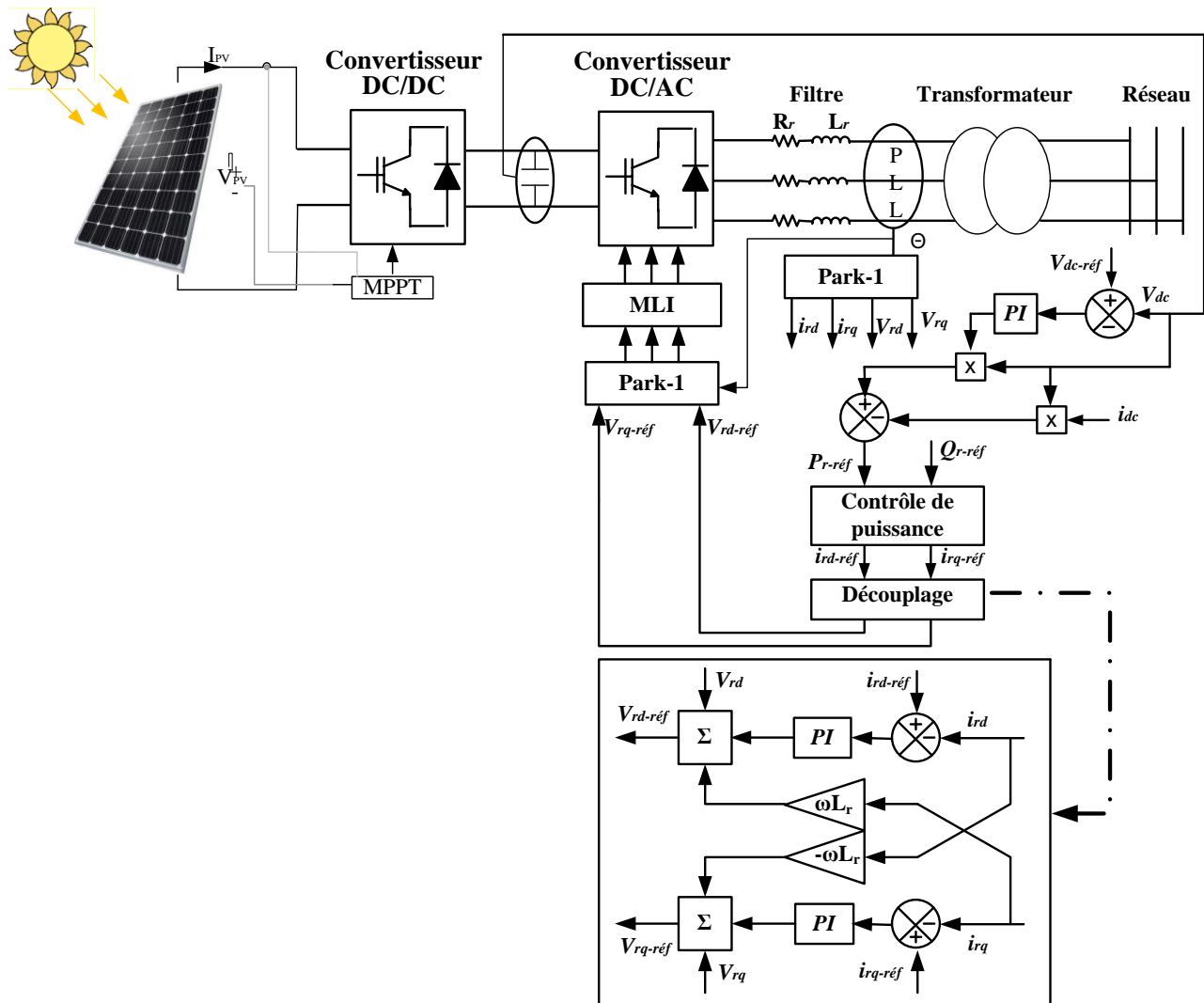


Figure.III-1. Schéma global de l'installation photovoltaïque connectée au réseau

III.2 La commande du point de puissance maximale (MPPT)

La production de l'énergie solaire photovoltaïque est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque (PV) ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance. On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point à maximum de puissance appelé « Maximum power point tracking » (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence. Dans le chapitre précédent on a présenté quelques techniques de poursuite de point de puissance maximale, et celle retenue pour ce travail est la méthode Perturbation & Observation (P&O).

- **Test de la méthode Perturbation & Observation (P&O)**

Pour faire une étude de la robustesse de la technique proposée vis-à-vis des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

Nous soumettons le système contrôlé à différentes conditions environnementales :

- ✓ D'abord, on maintient une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et on varie l'éclairement solaire suivant une variation rapide ou bien lente :
- ✓ Ensuite, on maintient l'éclairement solaire à une valeur fixe (1000 W/m^2) et on varie la valeur de la température suivant une variation rapide ou bien lente.

❖ **Premier test : $T=25^{\circ}\text{C}$, ensoleillement variable**

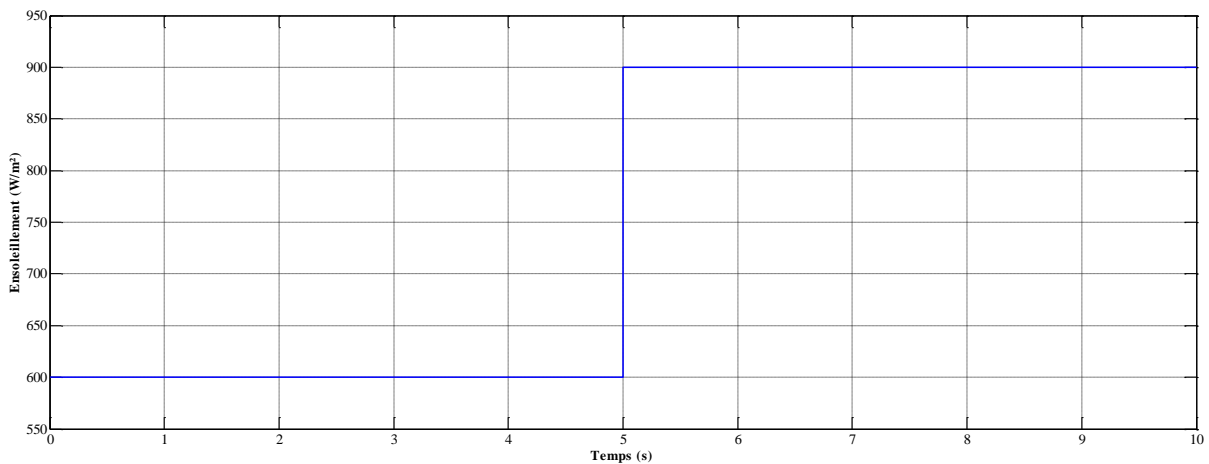


Figure III.4. Variation de l'ensoleillement en fonction du temps

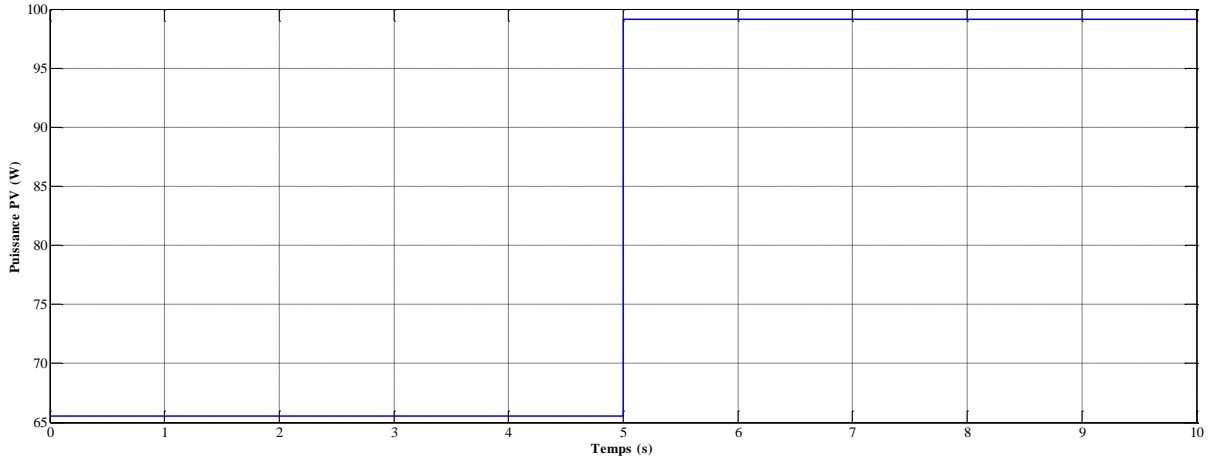


Figure III.3. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

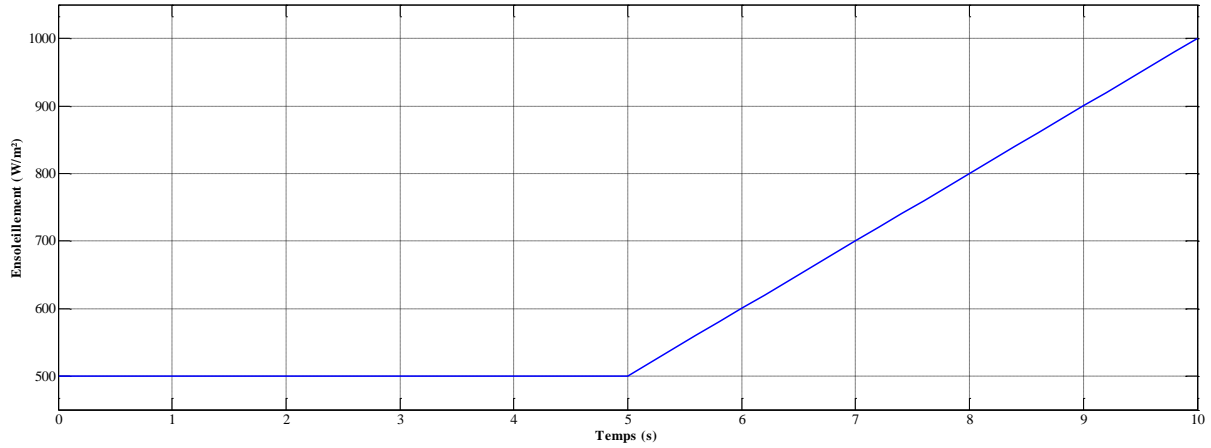


Figure III.4. Variation de l'ensoleillement en fonction du temps (variation lente)

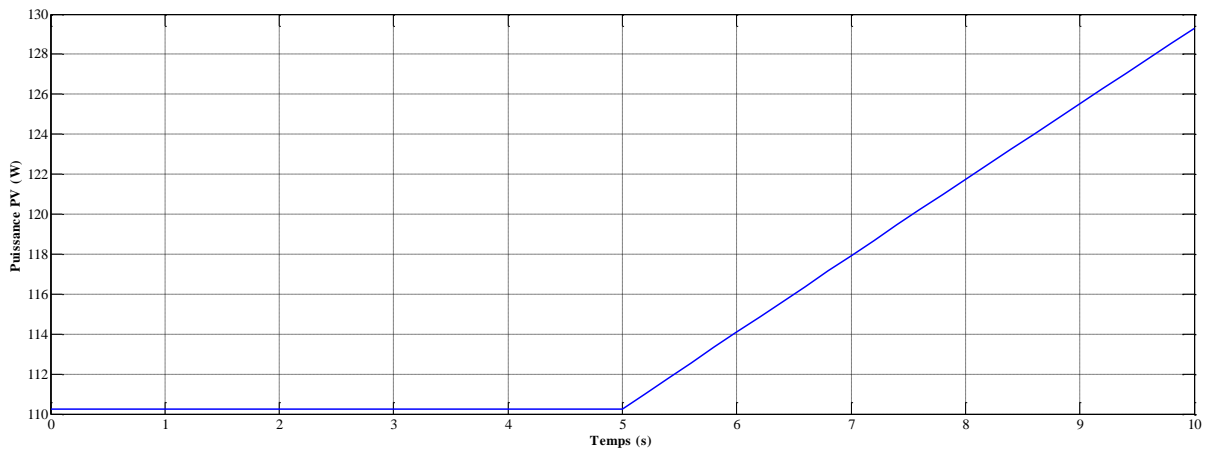


Figure III.5. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

Observation : d'après ce test le contrôleur MPPT suit la consigne variation de l'ensoleillement, l'augmentation de l'irradiation implique une augmentation de la puissance photovoltaïque

❖ **Deuxième test :** Ensoleillement = 1000W/m^2 , $T=\text{variable}$

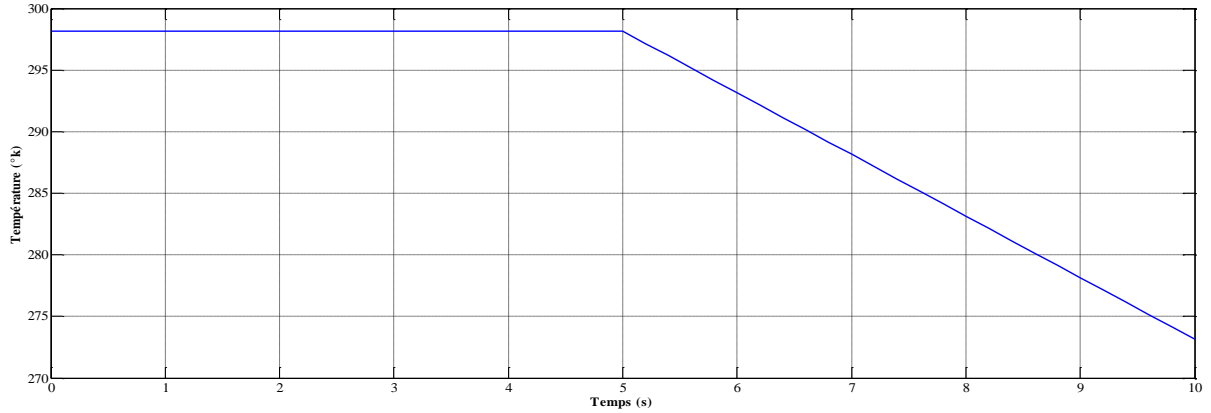


Figure III.6. Variation de la température en fonction du temps (variation lente)

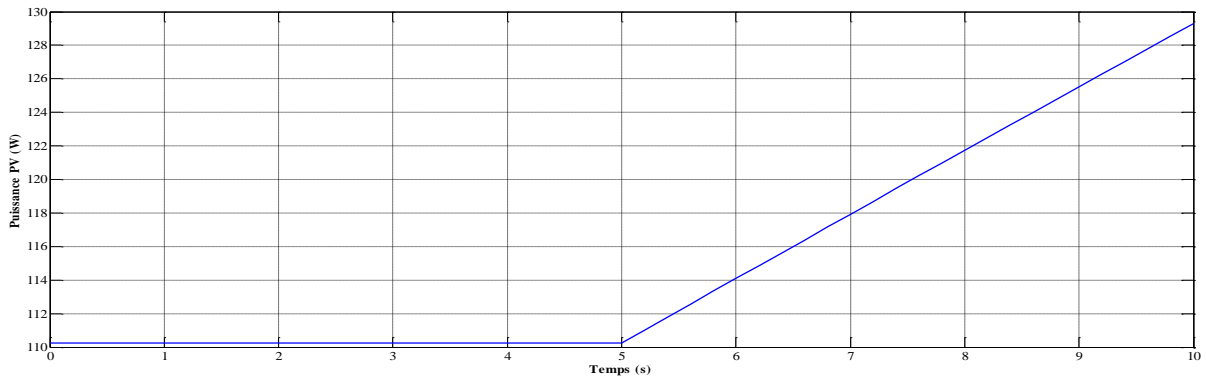


Figure III.7. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

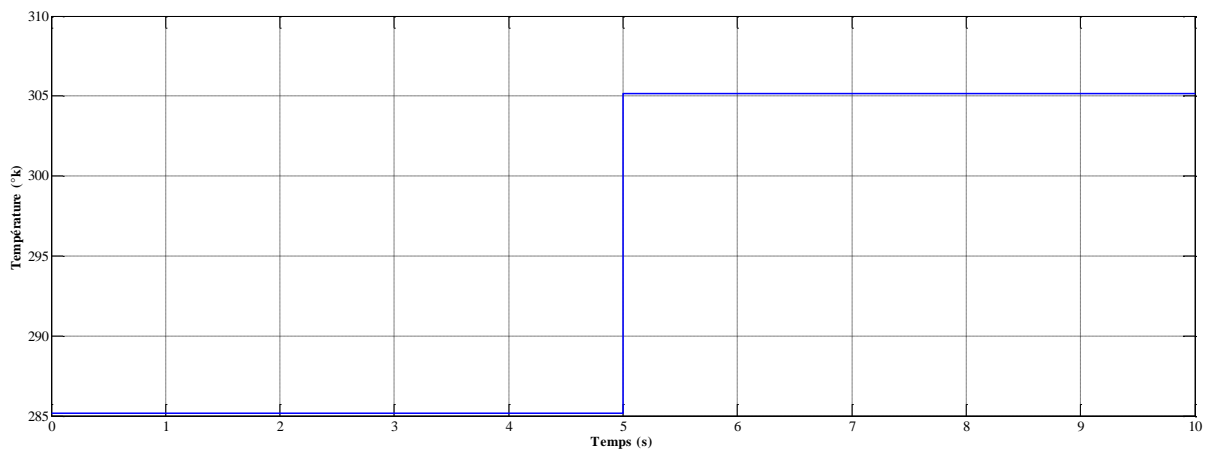


Figure III.8. Variation de la température en fonction du temps (variation brusque)

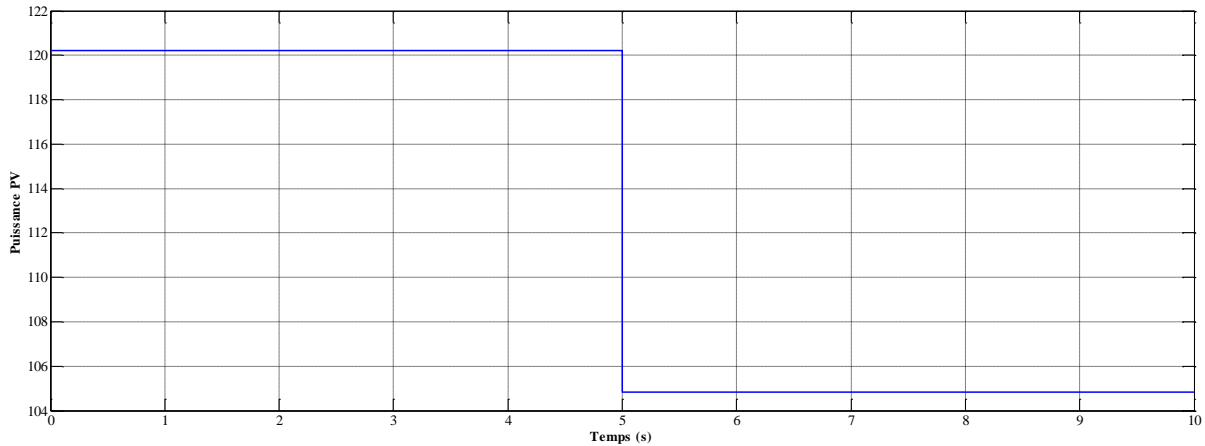


Figure III.9. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

Observation : la diminution de la température implique l'augmentation de la puissance photovoltaïque

Résultats : Les résultats obtenus lors de ces tests indiquent que le contrôleur MPPT suit la consigne (variation de l'ensoleillement) et il donne des résultats satisfaisants. Il présente aussi une très bonne poursuite, donc le point de puissance maximal se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température. L'augmentation de la température implique toujours une diminution de la puissance.

III.3 La commande coté réseau

Les courants traversant les filtres, sont réglés à une valeur de référence déterminée pour maintenir la tension du bus continu constante, et régler le transit de puissance.

Les puissances active et réactive transmises au réseau (P_r , Q_r) sont données en fonction des courants et des tensions du réseau (V_{rd} , i_{rd} , V_{rq} et i_{rq}) par:

$$\begin{aligned} P_r &= V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq} \\ Q_r &= V_{rq}i_{rd} - V_{rd}i_{rq} \end{aligned} \quad (III.1)$$

En inversant on obtient

$$\begin{aligned} i_{rd-ref} &= \frac{P_{r-ref}V_{rd} + Q_{r-ref}V_{rq}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \\ i_{rq-ref} &= \frac{P_{r-ref}V_{rq} - Q_{r-ref}V_{rd}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \end{aligned} \quad (III.2)$$

III.4 Simulation du système global

Pour la simulation de notre système photovoltaïque global on prend le cas d'une journée aléatoire de l'année dont les variations de l'éclairement et de température sont données par la figure III.10 et III.11 respectivement.

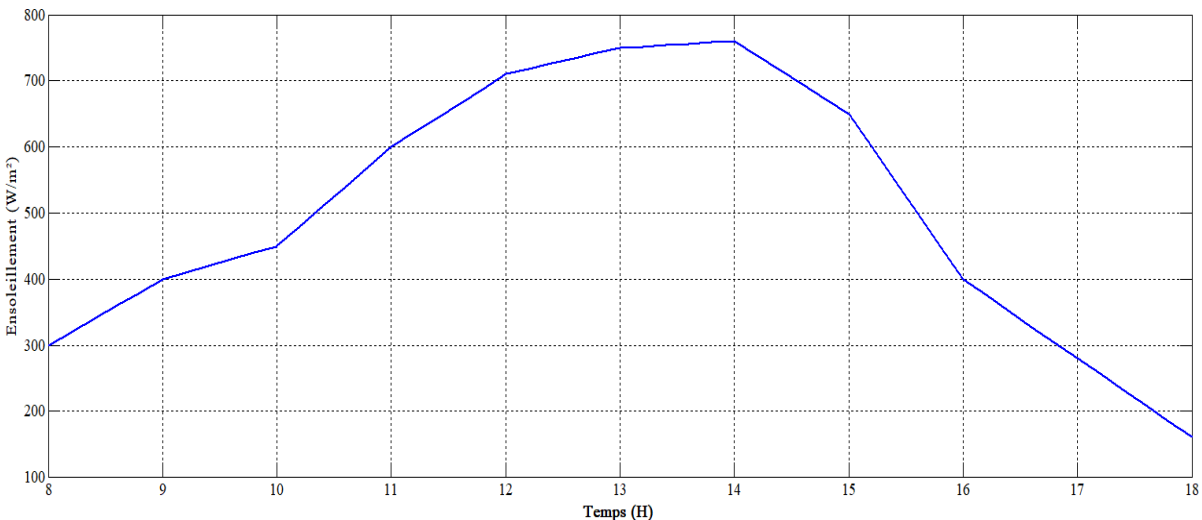


Figure III.10. Variation de l'ensoleillement

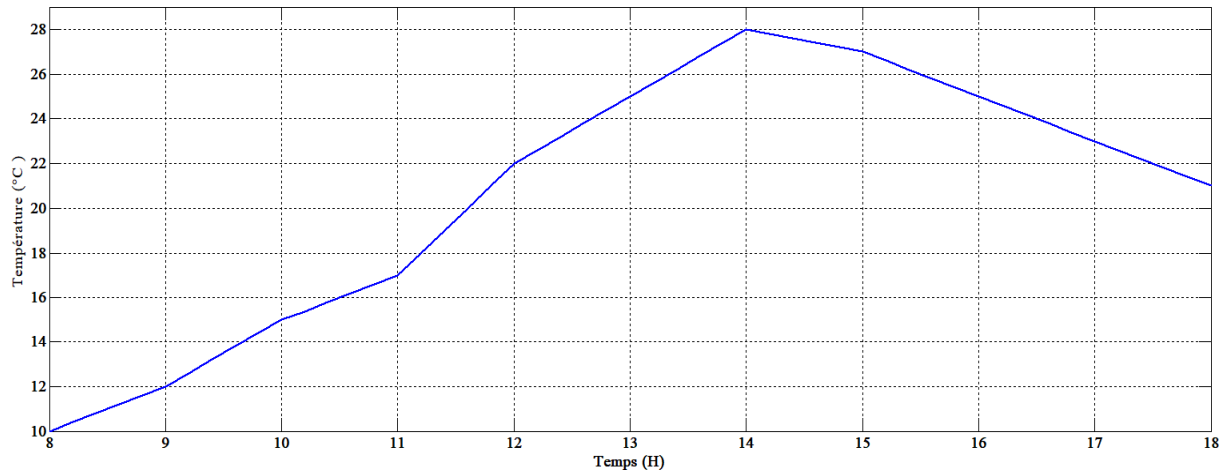


Figure III.11. Variation de la température

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus par simulation avec le logiciel MATLAB/SIMULINK sur le système global qui est composé de 30 panneaux photovoltaïques de type 110 W (3 branches en parallèles comportant chacune 10 panneaux en série), ce qui correspond à une puissance maximale de 3300Wc. Un convertisseur d'adaptation commandé avec l'algorithme MPPT pour l'extraction du maximum de puissance est utilisé, suivi d'un onduleur de tension contrôlé en puissance. L'onduleur est relié au réseau à travers un filtre RL, la tension de bus continue est fixé à 550V et la puissance réactive est fixée à 0VAr.

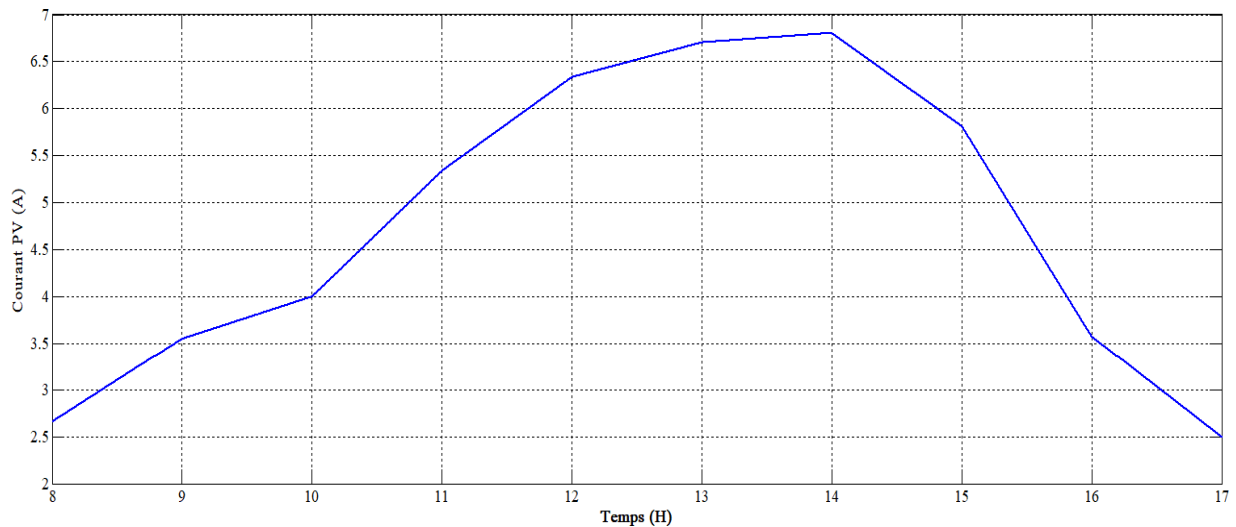


Figure III.12. Courant produit par l'installation photovoltaïque

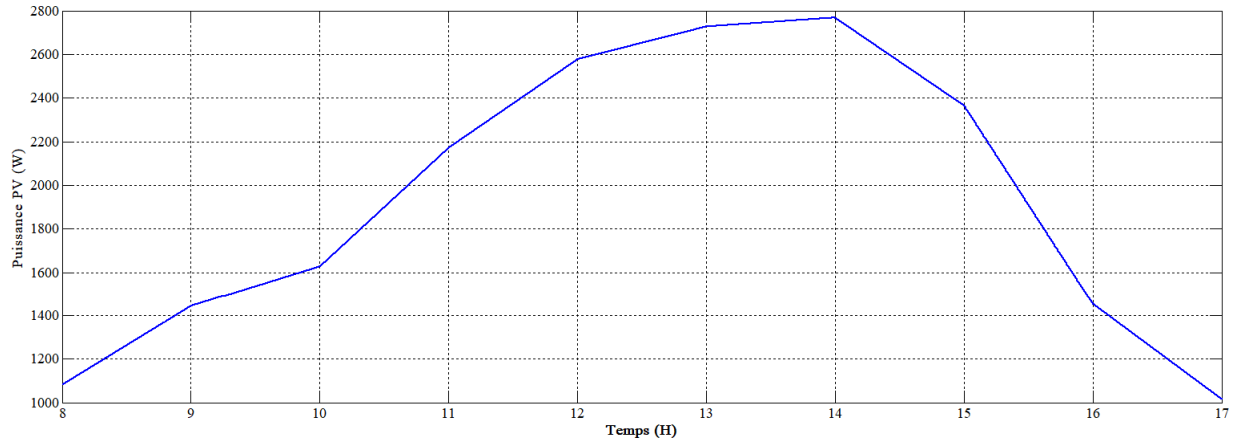


Figure III.13. Puissance produite par l'installation photovoltaïque

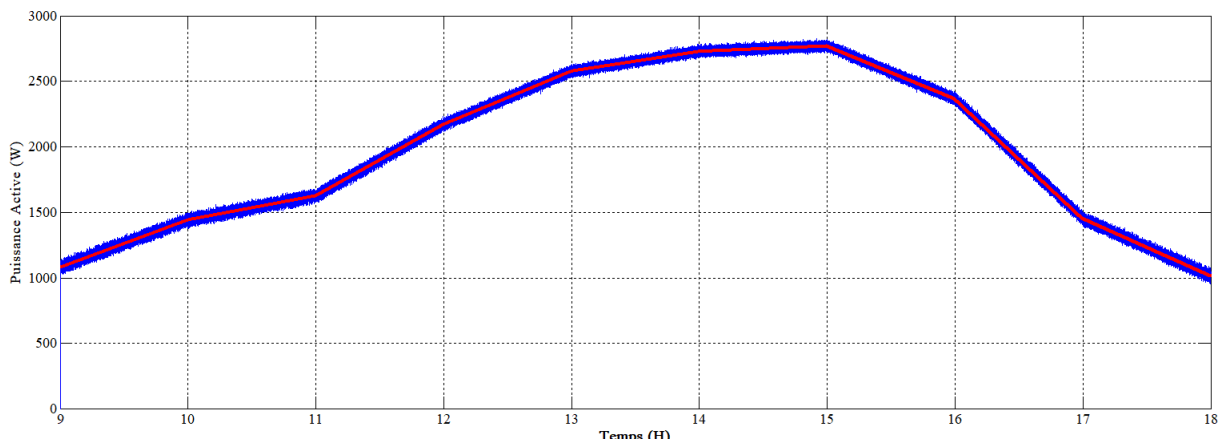


Figure III.14. Puissance active injectée au réseau

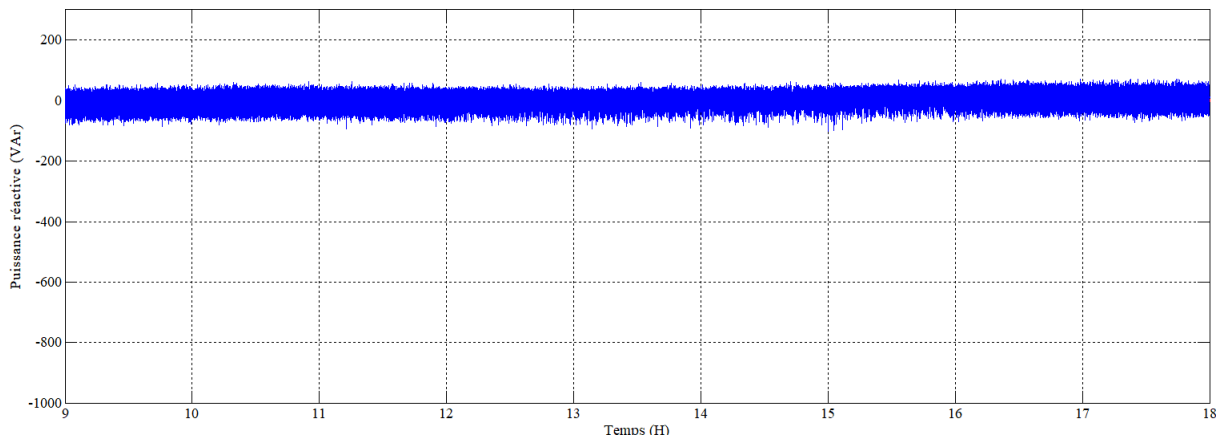


Figure III.15. Puissance réactive injectée au réseau

Observation : la puissance active et réactive injectées au réseau suivent parfaitement leur références.

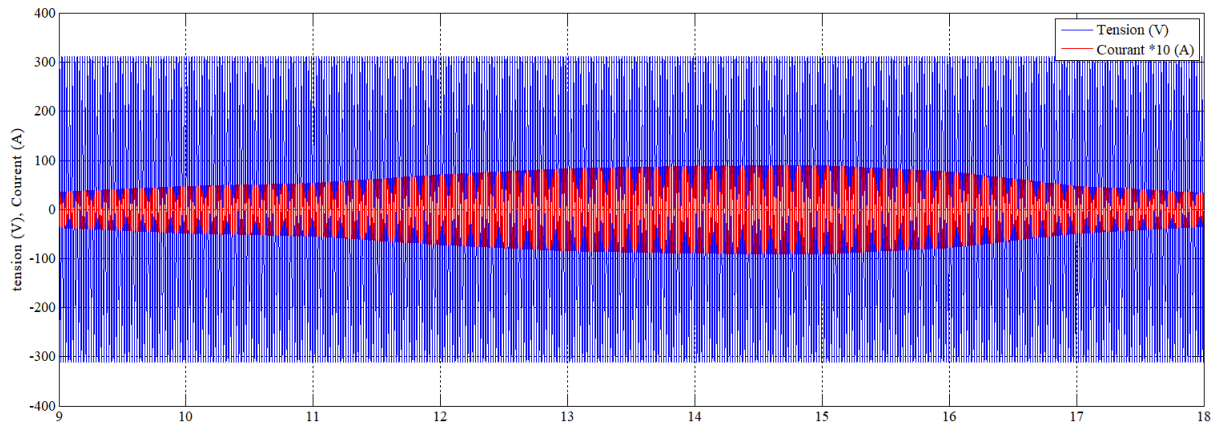


Figure III.16. Tensions et courants injectées au réseau

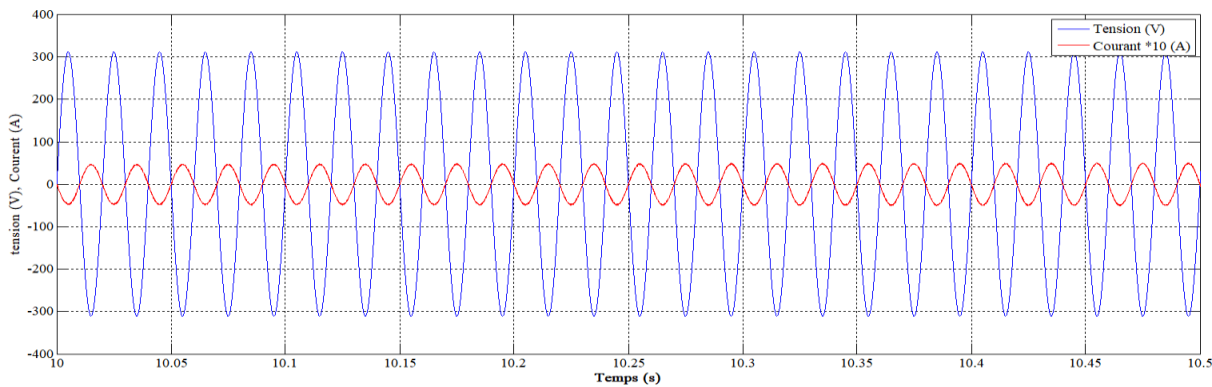


Figure III.17. Zoom sur les Tensions et courants injectés au réseau

Observation : les allures du courant et la tension sont sinusoïdales et déphasées de -180° car le système fournit la puissance au réseau.

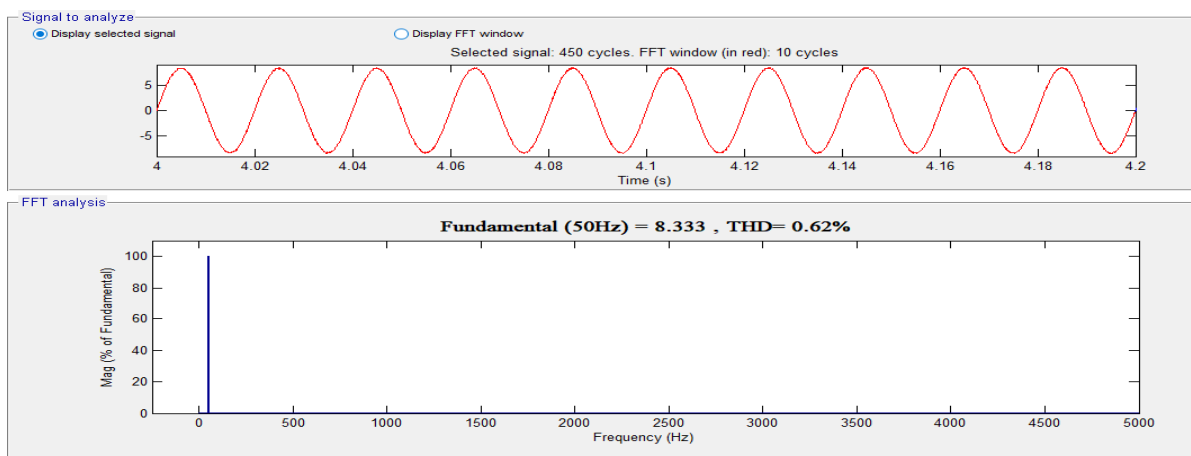


Figure III.18. Analyse harmonique des courants injectés au réseau

Observation : le courant est de très bonne qualité vu que le THD=0.62 donc il est proche de la sinusoïde parfaite

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés une description des différentes étapes de simulation d'un GPV raccordé au réseau. Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque, la puissance réactive est fixée à zéro. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles, la commande MPPT présente une bonne poursuite du point de puissance maximal, donc le point de puissance maximal se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température pour Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Les allures du courant et la tension sont sinusoïdales et déphasées de -180° car le système fournit la puissance au réseau et, la valeur du THD=0.62 donc le courant obtenu est de bonne qualité.

Conclusion générale :

Dans ce travail, l'association simple étage entre un générateur solaire PV et un filtre actif est validée et permet d'apporter simultanément des fonctionnalités ou des services au réseau de distribution à chaque point d'injection sans ajout de matériel spécifique.

Les résultats confirment la faisabilité du système et valide les différentes fonctionnalités affectées à l'onduleur de tension à savoir la compensation de la pollution harmonique, de la puissance réactive et le transfert du flux énergétique de la partie solaire PV vers le réseau électrique.

Pour tous les régimes envisagés, les résultats pratiques sont en parfaite adéquation avec les simulations. Le point délicat qu'il reste à optimiser concerne le comportement dynamique et en particulier le changement de régime du réseau de distribution avec la rotation de phase du courant réseau.

D'autres stratégies de pilotage sont en cours d'évaluation notamment avec des commandes directes en puissance (DPC) ou en tension à fréquence fixe toujours avec une MPPT globale, et suivant les différents régimes liés au niveau des flux des puissances. L'objectif étant d'obtenir une qualité de l'énergie électrique optimale côté réseau.

Les critères de comparaison s'appuient sur les taux d'harmoniques en courant et en tension, l'équilibre des grandeurs, la stabilité et la robustesse. De plus, l'architecture à double étage, incluant un convertisseur intermédiaire DC/DC, est aussi investiguée.

Dans cette topologie, les algorithmes de commande sont scindés en deux, la MPPT est affectée au convertisseur DC/DC et les fonctionnalités gestion des flux des puissance

Références bibliographiques

- [1] Alain Bilbao Learreta « Réalisation de commandes MPPT Numérique » Rapport de stage fin d'études Université Rovira Virgili 2006.
- [2] HANANOU Fatiha, ROUBAH Aicha « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » mémoire master l'université Ouargla 2014.
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_radiatif_de_la_Terre
- [4] M.Orgeret, « Les piles solaires, le composant et ces applications » Préface de F.Allest (livre)
- [5] Salim MAKHLOUFI, « Optimisation des installations photovoltaïque » Thèse de Doctorat en science l'université Hadj Lakhdar Batna, 2013.
- [6] Helali kamelia. « Modélisation d'une cellule photovoltaïque Etude comparative ». Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [7] Djarallah, Mohamed, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique », Université de Batna, Thèse de Doctorat en Science, 2008.
- [8] Conseil régional de Guyane “ Smartgrids “ lun 5 déc 2016
<https://lenergeek.com/2016/12/05/la-guyane-lance-un-projet-innovant-de-smart-grid-100-renouvelable/>
- [9] K. Kheloufi, Modélisation mathématique et circuit électronique équivalent de cellules solaire à colorant organique, Master, Univ, UMMTO, 2018.
- [10] Farah ATTIA, Asma BELOUI, Sofia BELAID, « Amélioration de la qualité d'énergie d'un système photovoltaïque connecté au réseau » mémoire de magister. Université Bejaïa
- [11] A. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque »
Mémoire de Magister, université de Tizi Ouzou. 2011
- [12] A. Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [13] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT » ;
Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.

- [14] LALOUNI. S ; « Etude, commande et simulation d'une chaîne Hybride (photovoltaïque-éolienne) De production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université de Bejaïa, 2009.
- [15] Philippe Barrade, « électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaires », press polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006.
- [16] Wildi Théodore, Sybille Gilbert, " électrotechnique", de boeck, 4e édition, 2005
- [17] A.Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des ingénieurs-Tome 3 ", 10ème édition, 1980
- [18] Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006
- [19] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [20] Toumi djaafar . "Comparaison de P&O et du contrôleur de logique floue dans MPPT pour applications photovoltaïques (PV) à l'aide de MATLAB Simulink" mémoire de magister
- [21] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005
- [22] K.Sobaihi " étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance maximale (MPPT) a contre réaction " Mémoire de Magister Ecole National, polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [23] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: applications aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
- [24] Saima Siouane, Slavisa Jovanovic, Philippe Poure « Service Continuity of PV Synchronous Buck/Buck-Boost Converter with Energy Storage>>