

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électronique.

Spécialité : Instrumentation.

Thème

Étude comparative des approches de recherche du point optimum de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque

Préparé par :

Aissaoui Anis

Hamitouche Akli

Dirigé par :

Mme K. Ouali

Examiné par :

Mr M.Sadji

Mr F.Yahyaoui

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre Créateur qui nous a incité à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons toute notre gratitude en premier lieu.

Nous tenons à remercier notre promotrice, Madame Kahina OUALI qui nous a chaleureusement accueilli, et a accepté de diriger ce mémoire, et qui était toujours disponible, avec ses encouragements et les conseils judicieux de très grande utilité.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur M. Sadji et Monsieur

F. Yahyaoui d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail

En second lieu, Nous tenons à remercier chaleureusement nos chers parents, frères, et sœurs pour leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement et à tous ceux qui de près ou de loin auraient contribué au bon déroulement de ce mémoire.

Nous souhaitons à présent adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes avec qui nous avons eu la chance de travailler ou que nous avons eu l'honneur de côtoyer avant et pendant la rédaction de ce mémoire

Sommaire

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.....	3
I.2 Le rayonnement solaire.....	3
1.3 Conversion d'énergie	3
I.4 Le semi-conducteur.....	3
I.5 Dopage d'un semi-conducteur.....	4
I.6 Cellule photovoltaïque.....	4
I.6.1 Description et principe de fonctionnement.....	4
1.6.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	5
1.6.3 Rendement de conversion de la cellule.....	6
1.6.4 Technologie de fabrication des cellules solaires.....	7
1.6.4.1 Le silicium cristallin.....	7
1.6.4.2 Les couches minces.....	8
1.6.4.3 Cellules organiques et plastiques.....	8
1.6.5 De la cellule au champ photovoltaïque.....	9
I.6.6 Influence de La température et d'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	10
I.7 Protections des modules photovoltaïques.....	11
1.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	12
1.9 Conclusion.....	13
II.1 Introduction.....	14
II.2 Modélisation du système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation.....	14
II.2.1 Modélisation du GPV photovoltaïque.....	14
II.2.2 Les convertisseurs DC-DC.....	16
II.2.2.1 Le hacheur Buck.....	16
II.2.2.2 Le convertisseur boost-Buck.....	17
II.2.2.3 Le hacheur Boost.....	18
II.2.3 Modèle mathématique équivalent du hacheur Boost.....	18
II.3 Commande MPPT.....	19
II.3.1 Stratégies de suivi du point de puissance maximale.....	19
II.3.2 Méthode de poursuite du point de puissance maximale.....	19
II.3.2.1 Méthode de perturbation et observation (P&O).....	19
II.3.2.2 Principe des commandes "Hill Climbing".....	21
II.3.2.3 Algorithmes d'accroissement de la conductibilité (INC : incrémentation de l'inductance).....	22
II.3.2.4 Commande avec correcteur PI.....	24

II.3.2.5 Autres méthode de contrôle MPPT.....	26
II.4 Conclusion	26
III.1 Introduction	27
III.2 Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque	27
III.2.1 Simulation d'un convertisseur BOOST.....	27
III.2.2 Simulation du panneau PV	28
III.2.2.1 Caractéristique du panneau PV	28
III.2.2.2 Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique puissance/tension du panneau photovoltaïque	29
III.2.3 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT	30
III.2.3.1 Simulation de la commande P&O	30
III.2.3.2 Simulation de la méthode incrémentation de l'inductance.....	35
III.2.3.3 Comparaison entre les deux méthodes de poursuite P&O et INC.....	38
III.3 Interprétation des résultats.....	39
III.4 Conclusion.....	40
Conclusion générale	41

Chapitre I

Figure I. 1 : structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. 5

Figure I. 2 : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... 5

Figure I. 3: Cellule monocristalline..... 7

Figure I. 4 : Cellule multi cristallin..... 8

Figure I. 5 : Deux exemples de modules utilisant le sia (silicium amorphe)..... 8

Figure I. 6 : Cellule photovoltaïque organique..... 9

Figure I. 7 : Caractéristiques de groupement de cellules photovoltaïque..... 9

Figure I. 8 : De la cellule au champ photovoltaïque..... 10

Figure I. 9 : Caractéristiques I (V) et P(V) d'un module..... 10

Figure I. 10 : Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m²..... 11

Figure I. 11 : Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour..... 12

Chapitre II

Figure II. 1 : Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation 14

Figure II. 2 : Circuit équivalent d'une cellule solaire..... 15

Figure II. 3 : Système PV conçu autour d'un hacheur Buck (abaisseur)..... 17

Figure II. 4 : schéma électrique d'un convertisseur Boost-Buck..... 17

Figure II. 5 : Schéma électrique d'un convertisseur DC-DC (Boost)..... 18

Figure II. 6 : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode Perturbation-Observation..... 20

Figure II. 7 : Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement..... 20

Figure II. 8 : Organigramme de la méthode P&O..... 21

Figure II. 9 : Algorithme de la méthode HC 22

Figure II. 10 : Caractéristique du point de puissance maximale MPP..... 23

Figure II. 11 : Algorithme de la méthode incrémentation de conductance 24

Figure II. 12 : Courbe courant-tension..... 25

Figure II. 13 : Courbe puissance-tension..... 25

Chapitre III

Figure III. 1 : Schéma du convertisseur BOOST sous Matlab/Simulink..... 27

Figure III. 2 : Tension d'entrée et de sortie du convertisseur Boost..... 28

Figure III. 3 : Caractéristique puissance- tension à 1000W/m² pour plusieurs températures..... 29

Figure III. 4 : Caractéristique puissance- tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C) 29

Figure III. 5 : Schéma de simulation du système (GPV-BOOST-charge) adapté par la technique MPPT (P&O). 30

Figure III. 6 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque en fonction du temps 31

Figure III. 7 : La puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps 31

Figure III. 8 : Variation de l'éclairement en fonction du temps..... 32

Figure III. 9 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque. 32

Figure III. 10 : La puissance du panneau photovoltaïque.33

Figure III. 11 : Variation de température en fonction du temps.....33

Figure III. 12 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.34

Figure III. 13 : La puissance du panneau photovoltaïque.34

Figure III. 14 : Schéma de la méthode INC.....35

Figure III. 15 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque en fonction du temps35

Figure III. 16 : La puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps36

Figure III. 17 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.36

Figure III. 18 : La puissance du panneau photovoltaïque.37

Figure III. 19 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.37

Figure III. 20 : La puissance du panneau photovoltaïque.38

Figure III. 21 : Comparaison de la puissance PV entre P&O et INC sous des conditions atmosphériques fixes.
..... 38

Figure III. 22 : Comparaison de la puissance PV entre P&O et INC sous un éclairage variable.....39

Figure III. 23 : Comparaison de la puissance PV entre P&O et INC sous une température variable.39

Tableau III. 1 : Paramètres de panneaux PV Array..... 28

GPV : Générateur photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

MPP : Le point de puissance maximal.

MPPT: Maximum power point tracking.

Pmax : Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque

Vpv : La tension aux bornes du GPV.

Ipv: Le courant que peut délivrer un GPV.

Ppv: La puissance d'un GPV.

Vcel: La tension aux bornes de la cellule PV.

Icel: Le courant de la cellule PV.

Vopt et Iopt: Tension et Courants optimaux correspondant à PMAX.

η : Le rendement d'un module PV.

DC: Courant continu.

AC: Courant alternative.

Introduction générale

L'énergie est à la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles fossiles sont limitées. Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire, alors que cette dernière n'est pas à la portée de tous les états et surtout des pays en voie de développement et présente des risques d'accidents graves.

En effet, la croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la détérioration de l'environnement causée par ses types d'énergies, a incité au développement de nouvelles sources d'énergies, renouvelables, assurant ainsi une durabilité et une protection de l'environnement qui est devenue un point très important. Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque.

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque semble être une nécessité pour l'avenir. En effet, le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [1]

L'élément de base de système photovoltaïque est le panneau solaire qui est constitué de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du soleil en électricité de type continu. Les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique, fortement non linéaire qui semble clairement dans les courbes courant-tension et puissance-tension. [2]

La puissance électrique produite par les modules photovoltaïques (PV) dépend de l'intensité de l'ensoleillement, de la température et surtout de leurs tensions de sorties. Si le transfert de puissance entre la source d'énergie (PV) et la charge n'est pas optimal, le rendement global du système PV sera grandement affecté.

Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes MPPT.

Objectif, de notre travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place d'une commande MPPT permettant de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

La présentation de ce travail se fait en trois chapitres ; qui se résument dans ce qui suit :

Au premier chapitre nous donnerons des rappels sur l'énergie solaire, en commençant par le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, ensuite une description d'une cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement puis nous allons étudier la caractéristique électrique des cellules solaires et nous citeront quelques avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser un générateur PV puis nous présenterons les différents types des convertisseurs statiques et leur principe du fonctionnement ensuite nous modélisons aussi le convertisseur hacheur survolteur et on termine le chapitre par les techniques MPPT usuelles, qui permettent d'extraire le maximum d'énergie des modules PV.

Dans le dernier chapitre, des résultats de simulations seront présentés, effectuées avec le logiciel Matlab®/Simulink, avec deux méthodes d'optimisation : Perturbe & Observe, « P&O » et Incrément de la conductance, 'INC' appliquer dans un système PV, et on termine par une conclusion générale et perspectives.

I.1 Introduction

L'énergie produite par le soleil à la suite de réactions de fusions nucléaires, est la source de la plupart des énergies disponibles sur terre. L'homme, à travers l'histoire, a toujours cherché à utiliser cette énergie, en agriculture, dans les diverses applications de séchage, de chauffage...

Le solaire photovoltaïque qui se caractérise par une absence de pollution, par sa disponibilité fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. En effet l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions aux divers problèmes qui se posent actuellement concernant les changements climatiques, et les crises énergétiques. [1]

I.2 Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein. Ils ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium ; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. [3]

I.3 Conversion d'énergie

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [4].

I.4 Le semi-conducteur

Le semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devient libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre le niveau énergétique supérieur (bande de conduction). C'est l'énergie du gap, E_g , en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque

matériau semi-conducteur.

I.5 Dopage d'un semi-conducteur

La technique de dopage d'un semi-conducteur consiste à lui ajouter des impuretés, c'est-à-dire des éléments ayant un nombre différent d'électrons de valence (ou périphériques). L'ajout de phosphore (cinq électrons de valence) au silicium (quatre électrons de valence) se traduit par un excès d'électrons dans le réseau, cette association forme alors un semi-conducteur de type N (conduction assurée par des charges négatives) ; l'ajout d'aluminium (trois électrons de valence) au silicium se traduit par un défaut d'électrons formant des trous dans le réseau, il s'agit alors d'un semi-conducteur de type P (conduction assurée par des charges positives). [5]

I.6 Cellule photovoltaïque

I.6.1 Description et principe de fonctionnement

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

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

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.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (I.1).

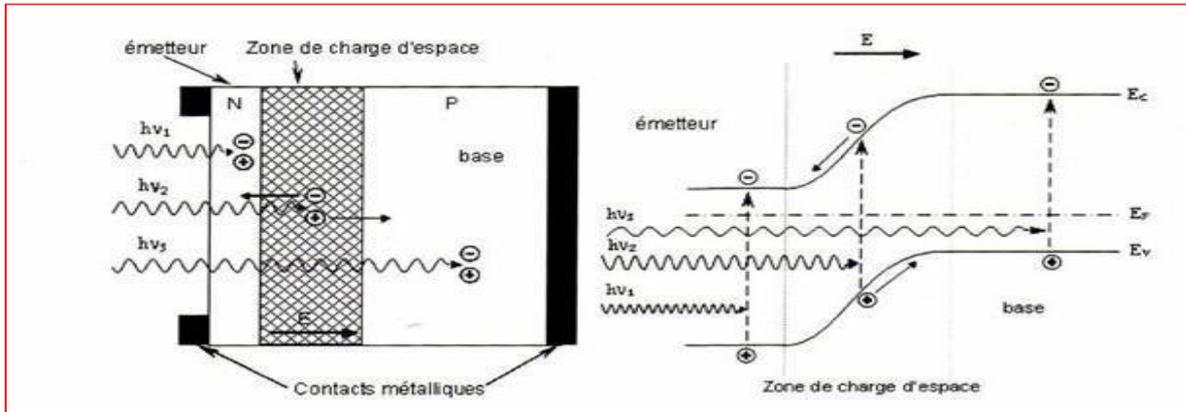


Figure I.1 : structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. [6]

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 un photo courant de diffusion,
- ✓ Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo courant de génération [6].

1.6.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule peut être représenté par la courbe $I=f(V)$, qui indique l'évolution du courant généré par la cellule photovoltaïque en fonction de la tension à ces bornes depuis le court-circuit, jusqu'au circuit ouvert.

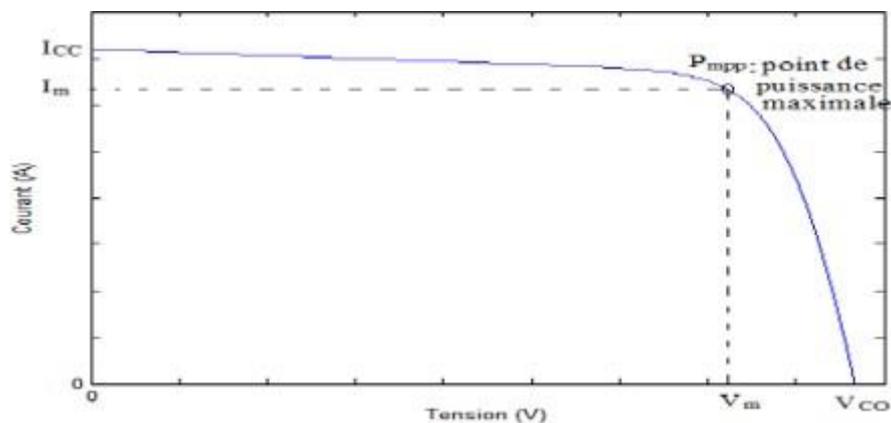


Figure I.2 : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [1]

D'après la caractéristique courant-tension, il est possible de déduire les paramètres électriques de la cellule PV :

- **Tension en circuit ouvert V_{co}** : Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à sa borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement). C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Correspondant au courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle.
- **I_{pm}** : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.
- **V_{pm}** : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.
- Entre ces deux valeurs, il existe un optimum donnant la plus grande puissance (P_{mpp} que peut fournir la cellule, qui est associé à une tension maximale U_m et à une intensité maximale I_m).
- **Facteur de forme FF** : A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme (FF) qui est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{cc}, V_{co}) ; d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad I.1$$

Le facteur de forme compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_m sera égale à I_{cc}, V_{co}). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85 [7].

1.6.3 Rendement de conversion de la cellule

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est l'éclairement-irradiante (en W/m^2). Le rendement énergétique s'écrit [6] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc} \cdot S} \quad I.2$$

P_{inc} : Puissance incident.

S : Surface de la cellule photovoltaïque.

1.6.4 Technologie de fabrication des cellules solaires

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. Il existe trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

1.6.4.1 Le silicium cristallin

Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin. [8]

1.6.4.1.1 Le silicium monocristallin

Le silicium mono cristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles.

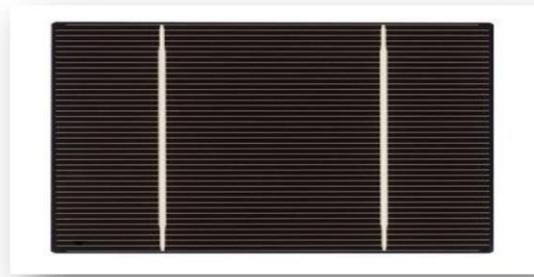


Figure I.3 : Cellule monocristalline.

1.6.4.1.2 Le silicium multi cristallin (Polycristallin)

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

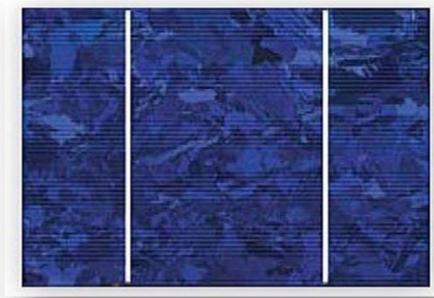
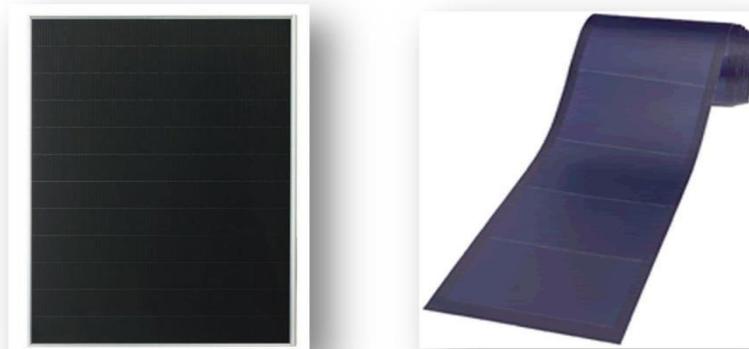


Figure 1.4 : Cellule multi cristallin.

1.6.4.2 Les couches minces

Les technologies couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.



(a)

(b)

Figure 1.5 : Deux exemples de modules utilisant le sia (silicium amorphe) [8].

Module rigide sharp (115wc, 1,42 m²)

Module souple unisolar (68wc, 1,12 m²)

La technologie à couche mince dont la plus mûre est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellurede Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS).

1.6.4.3 Cellules organiques et plastiques

L'application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention

en 1986. La cellule composée d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus. Le principal frein à ces technologies est la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie.

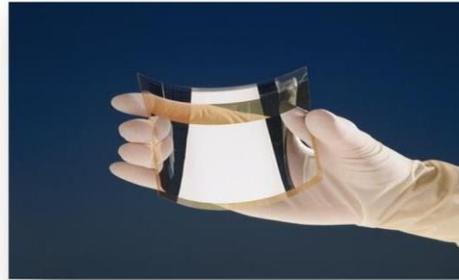


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque organique.

1.6.5 De la cellule au champ photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de n_s cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle de n_p cellules accroît le courant en conservant la tension (figure I.7). Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant I_{pv} sous une tension V_{pv} ,

$$I_{PV} = n_p \cdot I'_{PV}$$

Avec : $\begin{cases} V_{PV} = n_s \cdot V'_{PV} \end{cases}$

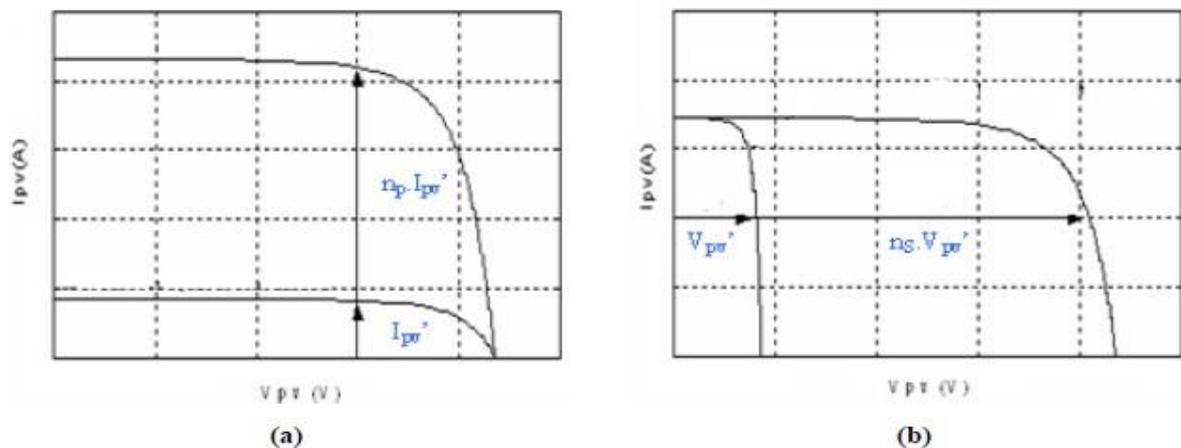


Figure I. 7 : Caractéristiques de groupement de cellules photovoltaïque. [9]

(a): Groupement parallèle, (b) : Groupement série.

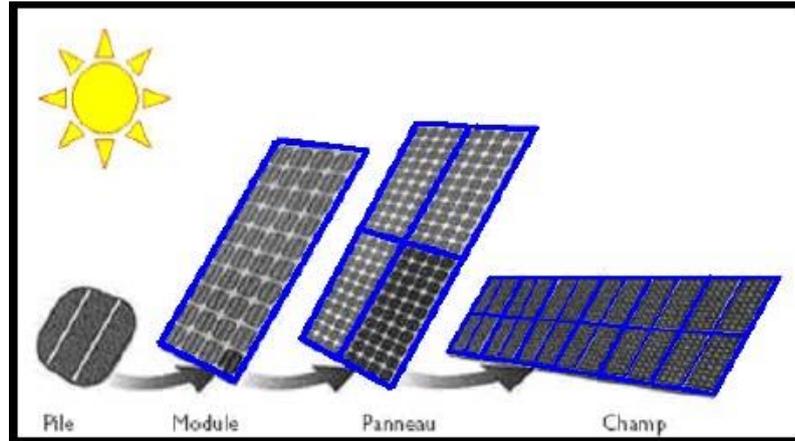


Figure I. 8 : De la cellule au champ photovoltaïque.

- Le panneau photovoltaïque se compose de cellules photovoltaïques interconnectées en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique.
- Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands.

I.6.6 Influence de La température et d'enseillement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

➤ L'influence de l'éclairement

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et un ensoleillement variable. [10]

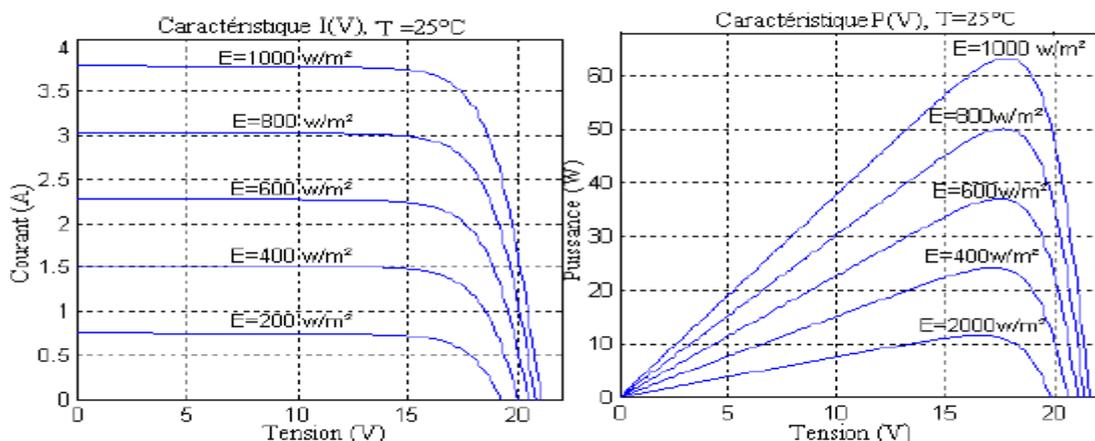


Figure I. 9 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module pour différentes irradiances solaires à 25°C .

La variation de l'ensoleillement influe sur le courant de court-circuit qui diminue, quand l'ensoleillement diminue, par contre la tension à circuit ouvert est peu sensible à cette variation, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

➤ **L'influence de la température**

La figure (I. 10) représente la caractéristique I-V et P-V d'un module (PV) solaire en fonction de la température, sous un éclairement constant. [10]

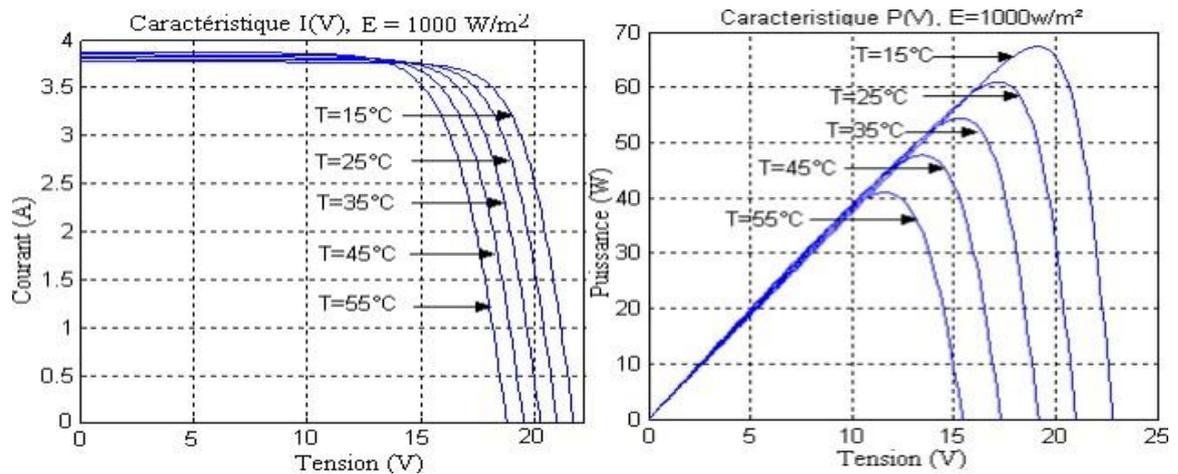


Figure I. 10 : Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m^2 .

La figure (I.10) montre que la tension en circuit ouvert du module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température, par contre, le courant de court-circuit varie très peu avec la température, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

I.7 Protections des modules photovoltaïques

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles : [11]

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

La Figure I.11 montre la schématique classiquement adoptée pour la protection du GPV élémentaire [12].

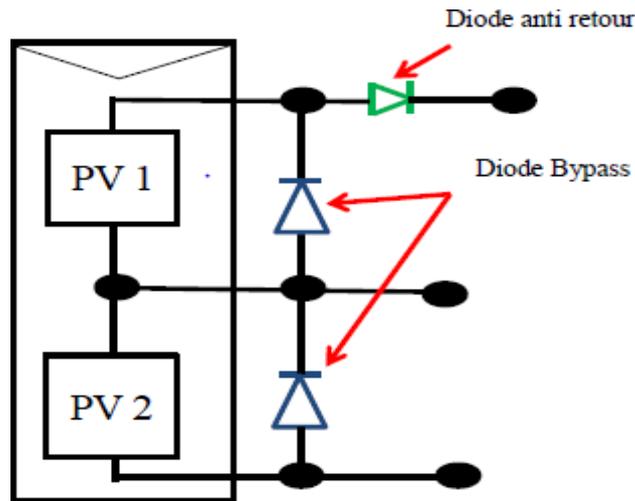


Figure I.11 : Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

1.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque : [13]

- Energie solaire gratuite.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.

Les principaux inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini le rayonnement solaire et présenté les bases indispensables à la compréhension de la conversion photovoltaïque. Ensuite nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leur caractéristique principale (courant –tension) puis nous avons abordé les différentes technologies existantes des cellules et enfin nous avons cité quelques avantages et inconvénients de l'énergie solaire.

II.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques non linéaires et qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température. Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique. Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du PPM.

Dans ce chapitre, nous effectuerons une modélisation du système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation puis nous présenterons quelques techniques MPPT existantes.

II.2 Modélisation du système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation

Le système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation est constitué de quatre blocs. Le premier bloc représente le panneau photovoltaïque, le second bloc est un convertisseur statique DC/DC, le troisième bloc représente la charge et le dernier bloc c'est le système de commande.

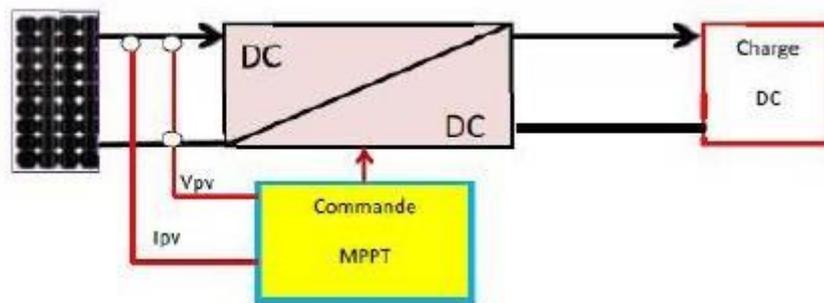


Figure II.1 : Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation. [14]

Nous allons présenter la modélisation de chaque partie de ce système.

II.2.1 Modélisation du GPV photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

La figure (II.2) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

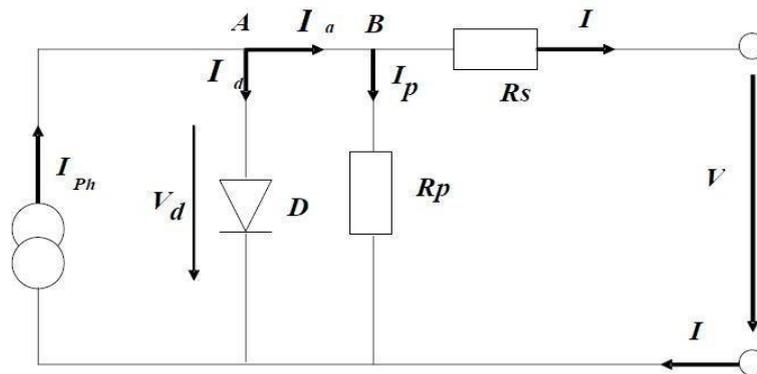


Figure II.2 : Circuit équivalent d'une cellule solaire.

La cellule solaire est composée d'un générateur de courant qui modélise le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. [15]

- La résistance série (R_s) : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_p) : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

L'étude physique d'une cellule nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad \text{II.1}$$

Avec

I : Le courant fourni par la cellule (A).

I_{ph} : Photo courant dépendant de l'éclairement.

I_d : Le courant de diode.

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{m.V_t}\right) - 1 \right) \quad \text{II.2}$$

Le courant dérivé par la résistance parallèle :

$$I_p = \frac{v_d}{R_p} = \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad \text{II.3}$$

I_s : Courant inverse de saturation de la diode.

m : Facteur d'idéalité de la diode.

V_t : Tension thermique.

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{m.V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad \text{II.4}$$

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédant, la puissance de sortie de la cellule PV est relativement faible. Pour produire la tension et la puissance nécessaire, les cellules PV sont connectées en série et parallèle. Elles sont regroupées en modules. Les modules sont combinés en panneaux. De cette façon, toute caractéristique désirée (I-V) ou (P-V) pourrait être générée. Par conséquent, l'équation caractéristique d'un générateur PV (composé de N_p en parallèle et N_s en série de cellules solaires) peut être décrite comme suit : [16]

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(\exp\left(\frac{V+I.\left(\frac{N_s}{N_p}\right).R_s}{N_s m.V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V+I.\left(\frac{N_s}{N_p}\right).R_s}{\frac{N_s R_p}{N_p}} \quad \text{II.5}$$

II.2.2 Les convertisseurs DC-DC

Le hacheur est un convertisseur statique utilisé comme un adaptateur de source-charge par la variation du rapport cyclique α lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV, ainsi il assure la poursuite du point de puissance maximale selon des techniques différentes de la commande MPPT [17].

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC, ils sont différents dans leurs conceptions et dans leurs fonctions, on trouve trois types :

- ✓ Hacheur série (Buck).
- ✓ Hacheur parallèle (Boost).
- ✓ Hacheur série-parallèle (Buck-Boost).

II.2.2.1 Le hacheur Buck

La tension de sortie d'un convertisseur de type Buck est toujours inférieure à celle de l'entrée.

Un système photovoltaïque adapté par un hacheur de type Buck alimentant une charge résistive RL est représenté sur la figure suivante (II.3) :

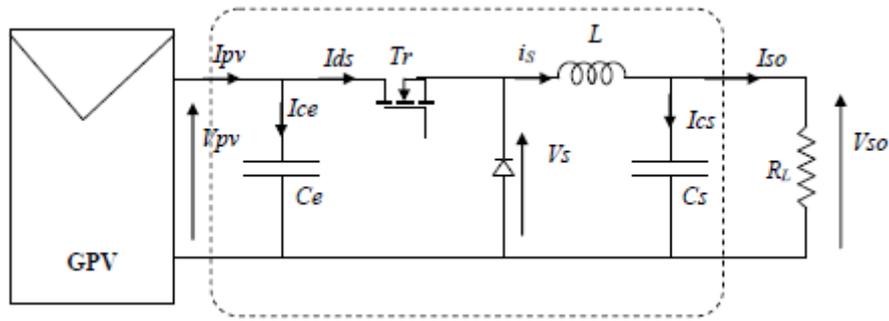


Figure II.3 : Système PV conçu autour d'un hacheur Buck (abaisseur).

Dans le cas idéal le fonctionnement du hacheur Buck peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor Tr

Dans la première phase Tr est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_{pv} - V_{so}$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative aucun courant ne la traverse.

Dans la deuxième phase Tr est bloqué et la diode conduit afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut $-V_{so}$. [18]

II.2.2.2 Le convertisseur boost-Buck

Un convertisseur Buck-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue de plus faible en une plus grande. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de bornes reliées au zéro, compliquant ainsi sa commande.

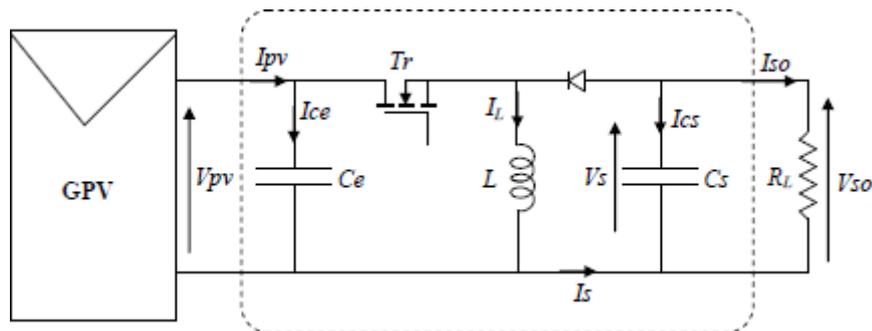


Figure II.4 : schéma électrique d'un convertisseur Boost-Buck.

Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$V_{so} = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{pv} \quad \text{II.6}$$

II.2.2.3 Le hacheur Boost

Ce type de convertisseur est utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [19].

La figure ci-dessous (II.5) représente un convertisseur DC-DC élévateur (Boost).

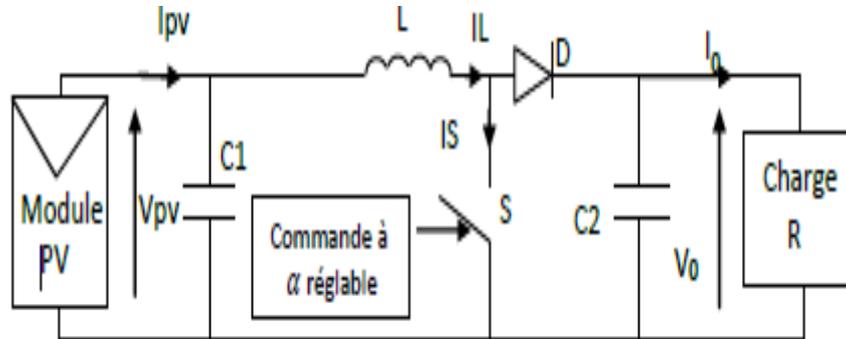


Figure II.5 : Schéma électrique d'un convertisseur DC-DC (Boost).

Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [20].

II.2.3 Modèle mathématique équivalent du hacheur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents (Figure II.5) des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle αT s :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \tag{II.7}$$

$$I_{C2} = \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \tag{II.8}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - R_L I_L \tag{II.9}$$

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \tag{II.10}$$

$$I_{C2} = \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \tag{II.11}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_0 - R_L I_L \tag{II.12}$$

II.3 Commande MPPT

II.3.1 Stratégies de suivi du point de puissance maximale

Le principe de base d'une commande MPPT (maximum power point tracking) est d'effectuer une recherche permanente du point de puissance maximale (PPM), et d'assurer, à tout instant, une parfaite adaptation entre le générateur PV et sa charge fonctionnelle. [14]

Le rôle d'interface de puissance étant assuré par un convertisseur statique DC/DC qui est placé entre le générateur PV et la charge.

Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM.

II.3.2 Méthode de poursuite du point de puissance maximale

Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum. On va présenter quelques techniques de recherche du point de puissance maximale :

- ✓ Algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- ✓ Algorithmes Accroissement de la Conductibilité (INC : Incremental Conductance).
- ✓ Commande avec correcteur PI.
- ✓ Algorithme Hill Climbing.

II.3.2.1 Méthode de perturbation et observation (P&O)

Il est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémental ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération.

- Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

- Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

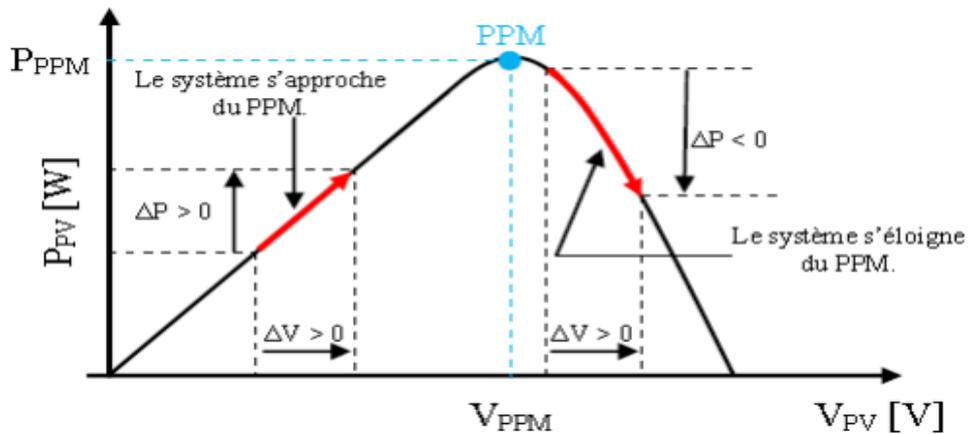


Figure II.6 : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode Perturbation-Observation. [9]

Sur la figure II.7 on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce si nous emmène à $\Delta P > 0$ avec $[\Delta P = P(k) - P(k - 1)]$ et le MPPT continu à perturber les tensions dans la même direction c à d vers le point B2.

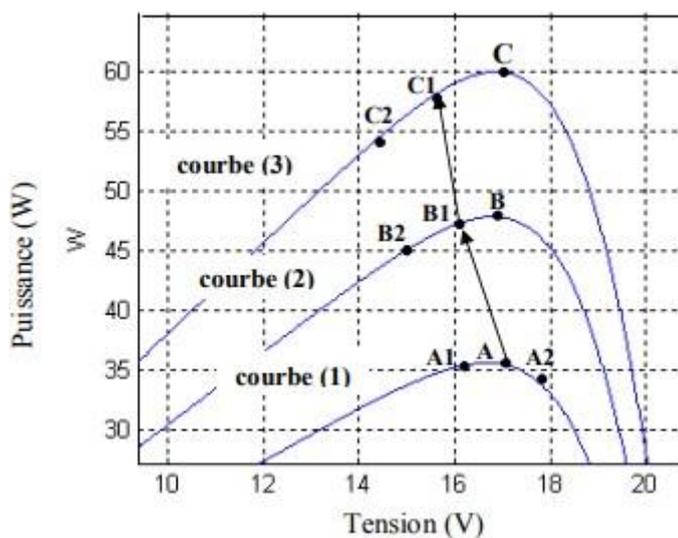


Figure II. 7 : Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.

Si l'éclairement augmente toujours, le point de fonctionnement se déplace vers le point C1 de la courbe (3) au lieu du point B2 sur la courbe (2) alors le MPPT à toujours $\Delta P > 0$ et il déplace le point de fonctionnement vers le point C2.

A partir des points $A \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$ l'algorithme P&O continu à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminue. La Figure II.8 représente l'organigramme de la méthode de P&O

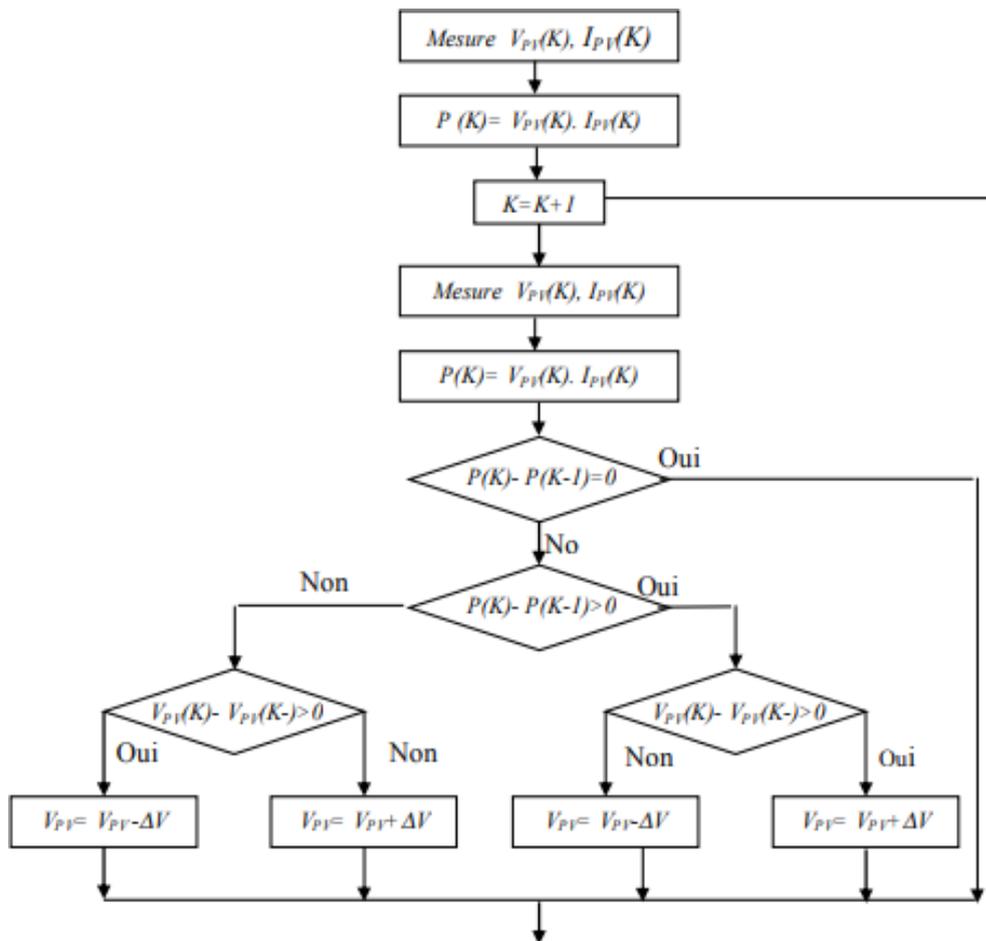


Figure II. 8 : Organigramme de la méthode P&O.

II.3.2.2 Principe des commandes “Hill Climbing”

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. 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 DC/DC. [21]

La figure II.9 présente l'algorithme d'exécution de cette technique.

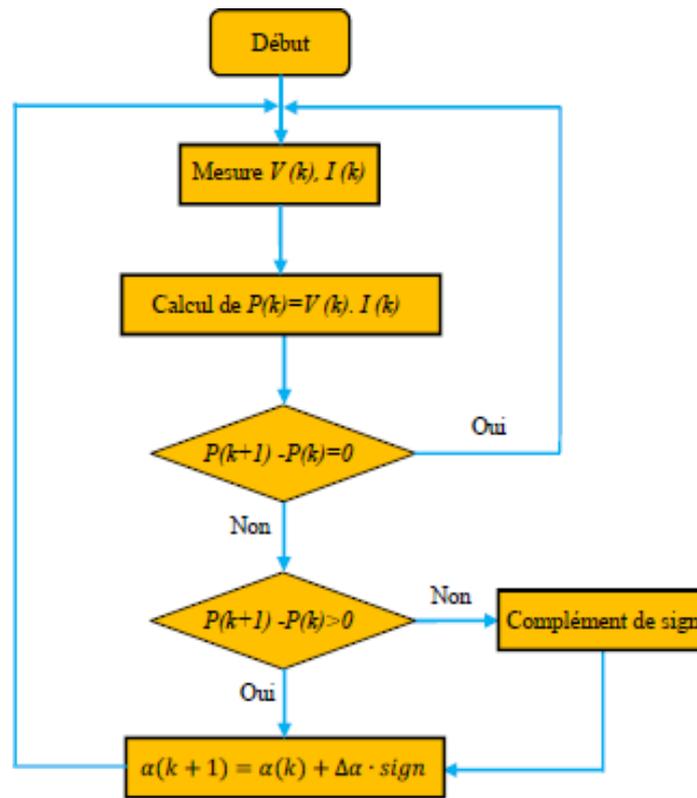


Figure II.9 : Algorithme de la méthode HC. [2]

II.3.2.3 Algorithmes d'accroissement de la conductibilité (INC : incrémentation de l'inductance)

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

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{II.13}$$

Au MPP ces deux membres doivent être égaux, si le point de fonctionnement n'est pas sur le MPP alors une inégalité apparaisse sur l'équation $\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \simeq kc = 1$ qui indique que la tension de fonctionnement est au-dessus ou au-dessous de la tension optimale comme le montre la figure ci-dessous :

Ceci nous conduit aux équations suivantes : [22], [23].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ À gauche du MPP} \quad \text{II.14}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(PV)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ A droite du MPP} \quad \text{II.15}$$

On emploie les équations (II.14), (II.15) pour déterminer la direction pour laquelle une perturbation est produite pour déplacer le point de fonctionnement au MPP, cette perturbation se répète jusqu'on arrive au fonctionnement MPP, et le MPPT continu à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement sera détecté. Si le changement de la tension n'est pas nul les équations peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changés afin d'atteindre le MPP.

- Si $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ le point de fonctionnement est à gauche de MPP, donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.

- Si $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ le point de fonctionnement est à droite de MPP, donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.

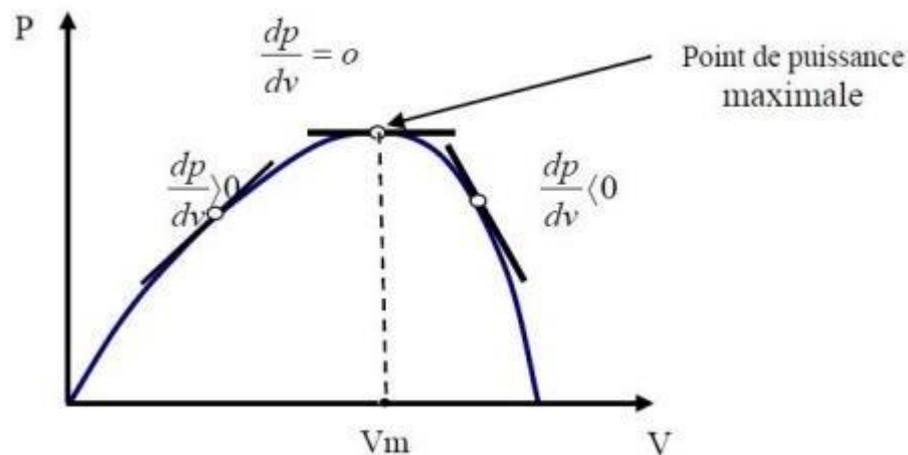


Figure II. 10 : Caractéristique du point de puissance maximale MPP. [24]

-Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I = 0$ on a les conditions atmosphériques qui n'ont pas changées et le MPPT fonctionne toujours au MPP.

- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I > 0$ c'est l'ensoleillement qui a augmenté ceci exige à l'INC-MPPT d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP.

- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I < 0$ c'est l'ensoleillement qui à diminuer ceci exige à l'INC-MPPT diminuer la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP.

L'algorithme IC est représenté sur la Figure (II.11)

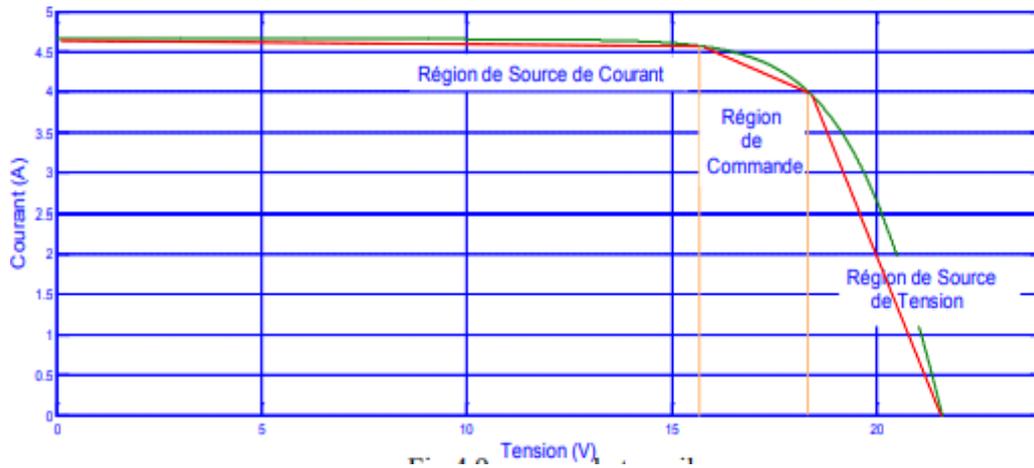


Figure II. 12 Courbe courant-tension

L'algorithme MPPT PI besoin d'une méthode pour séparer la région de commande, la région de source de courant, et la région de source de tension, de telle sorte que l'action de la commande donnée peut être ajustée, cette méthode est donnée par Equation suivante

$$C = P^n \left| \frac{dP}{dV} \right| \tag{II.16}$$

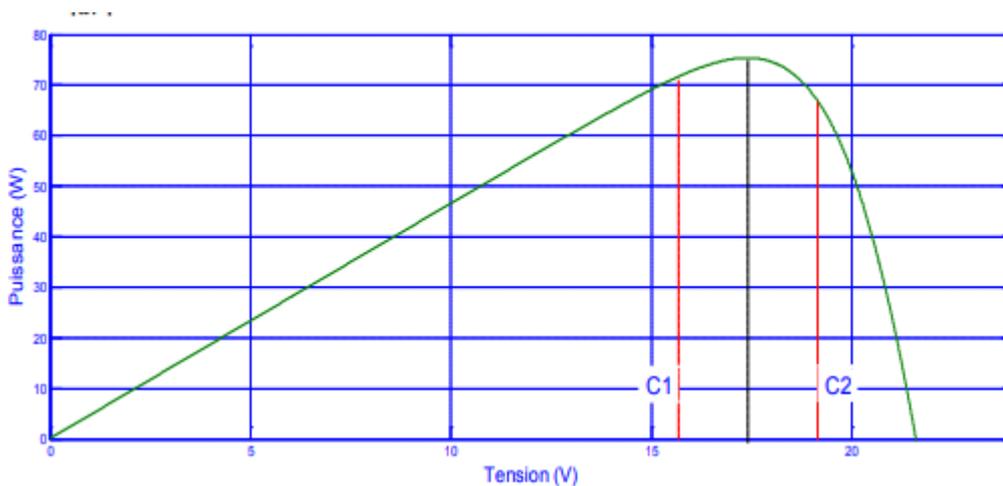


Figure II. 13 Courbe puissance-tension

La ligne C sur la Figure II.13 est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$C = P^n \left| \frac{dP}{dV} \right| \tag{II.17}$$

La ligne C sur la partie gauche est défini comme C1 et de la ligne C sur la partie droite est définie comme C2, alors les trois régions peuvent être définies comme suit :

$$\begin{aligned}
 & 1 - \frac{\Delta C1}{\Delta V} > 0 ; \text{région de source courant} \\
 & \frac{I}{I} - \frac{\Delta C1}{V} \leq 0 ; \text{région de commande} \\
 & \left(-\frac{\Delta C2}{\Delta V} \geq 0 ; \text{région de commande} \right. \\
 & \left. -\frac{\Delta C2 \Delta V}{\Delta V} < 0 ; \text{région de source de tension} \right. \\
 & \left. \frac{I}{\Delta V} \right)
 \end{aligned}$$

Lorsque la valeur de dP / dV se rapproche de zéro, Le changement de l'amplitude de V_{ref} par le MPPT doit être plus en plus petit, et lorsque la valeur de dP / dV est nul, Le changement de l'amplitude de V_{ref} par le MPPT doit être zéro. L'équation suivante définit la fonction de transfert du régulateur PI à utiliser [25].

$$G_c(s) = K_c + \frac{kc}{c_i.s} \quad \text{II.18}$$

Erreur d'entrée de régulateur PI est dérivée dans les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \text{erreur} &= -0 + \frac{dP}{dV} \\
 \text{erreur} &= \frac{dV.I + dI.V}{dV} \\
 \text{erreur} &= I + \frac{dI.V}{dV}
 \end{aligned}$$

II.3.2.5 Autres méthode de contrôle MPPT

Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du MPP [9]. Ces derniers sont indépendants du modèle du processus, ils se caractérisent par leur aptitude à appréhender les problèmes de non linéarité et ils présentent des performances robustes par rapport aux variations des conditions atmosphériques et de la charge. On retrouve aussi les méthodes à base d'algorithme génétique et de réseau de Neurone.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une modélisation d'un générateur photovoltaïque, puis nous avons présenté en premier lieu les différents types de convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes PV et leur principe de fonctionnement, ensuite une modélisation d'un hacheur Boost était faite.

Enfin nous avons présenté quelques techniques MPPT qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale.

III.1 Introduction

Etant donné que le générateur PV est une source d'énergie non linéaire qui dépend de plusieurs facteurs (l'éclairement solaire et de la température), les systèmes PV sont censés utiliser le maximum de puissance du générateur PV.

L'objectif de ce dernier chapitre est de faire une simulation sous MATLAB/SIMULINK d'une chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT. Pour le choix de l'algorithme de commande de poursuite de point de puissance maximale, il s'agit d'une étude comparative entre la méthode de perturbation et observation (P&O) et l'algorithme d'incrémental de la conductance.

III.2 Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

III.2.1 Simulation d'un convertisseur BOOST

La figure (III.1) représente le schéma block d'un convertisseur Boost sous MATLAB/SIMULINK, reliée à une charge résistive ($R=60\text{ohm}$) avec une tension d'entrée : $V_e = 10\text{V}$.

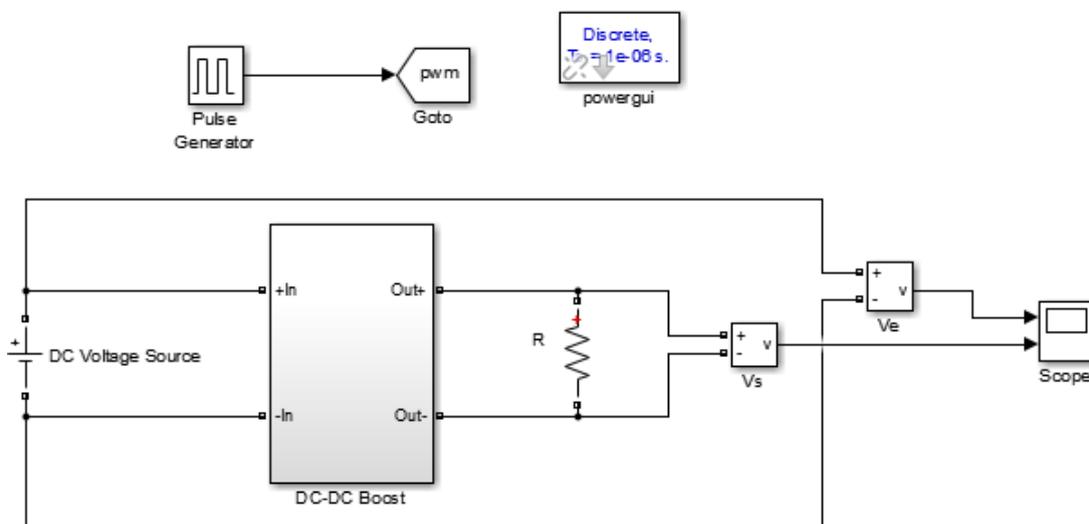


Figure III. 1 : Schéma du convertisseur BOOST sous Matlab/Simulink.

Les résultats de simulation du convertisseur pour une fréquence $f=10\text{e-}3\text{Hz}$, sont illustrés sous la figure ci-dessous :

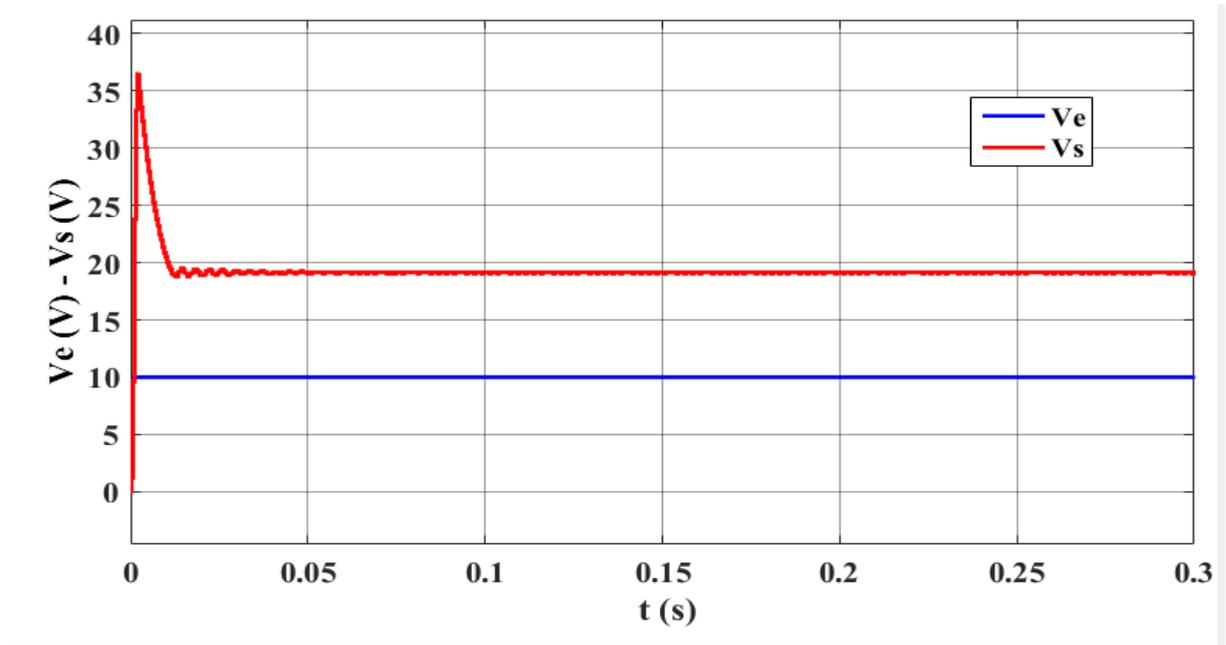


Figure III. 2 : Tension d’entrée et de sortie du convertisseur Boost.

Pour une tension d’entrée $V_e= 10V$, la tension de sortie presque égale à $20V$, avec les chutes de tension au niveau de Boost tel que $V_s \approx 18,72 V$.

III.2.2 Simulation du panneau PV

III.2.2.1 Caractéristique du panneau PV

Les paramètres du panneau PV choisi pour la simulation sont donnés dans le tableau III.1 suivant :

Parameters		Advanced	Display I-V and P-V characteristics of ...	
Array data			array @ 25 deg.C & specified irradiances	
Parallel strings	1		Irradiances (W/m2) [1000 500 100]	
Series-connected modules per string	1		Plot	
Module data			Model parameters	
Module:	Risen Energy SYP-85S		Light-generated current I_L (A)	
<input type="checkbox"/> Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected			5.185	
Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)	85.008	48	Diode saturation current I_0 (A)
Open circuit voltage V_{oc} (V)	Short-circuit current I_{sc} (A)	21.9	5.14	2.053e-09
Voltage at maximum power point V_{mp} (V)	Current at maximum power point I_{mp} (A)	17.6	4.83	Diode ideality factor
Temperature coefficient of V_{oc} (%/deg.C)	Temperature coefficient of I_{sc} (%/deg.C)	-0.44	0.04	0.82073
				Shunt resistance R_{sh} (ohms)
				337.1303
				Series resistance R_s (ohms)
				0.29521

Tableau III.1 : Paramètres de panneaux PV Array.

III.2.2.2 Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique puissance/tension du panneau photovoltaïque

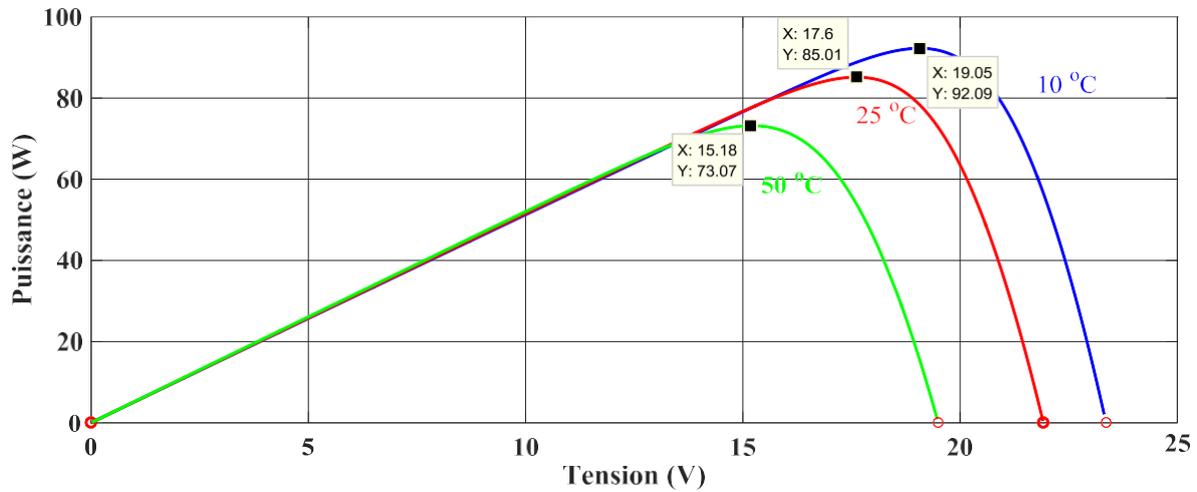


Figure III.3 : Caractéristique puissance- tension à 1000W/m² pour plusieurs températures.

D'après la figure III.3, nous constatons que la tension du circuit ouvert diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie du panneau.

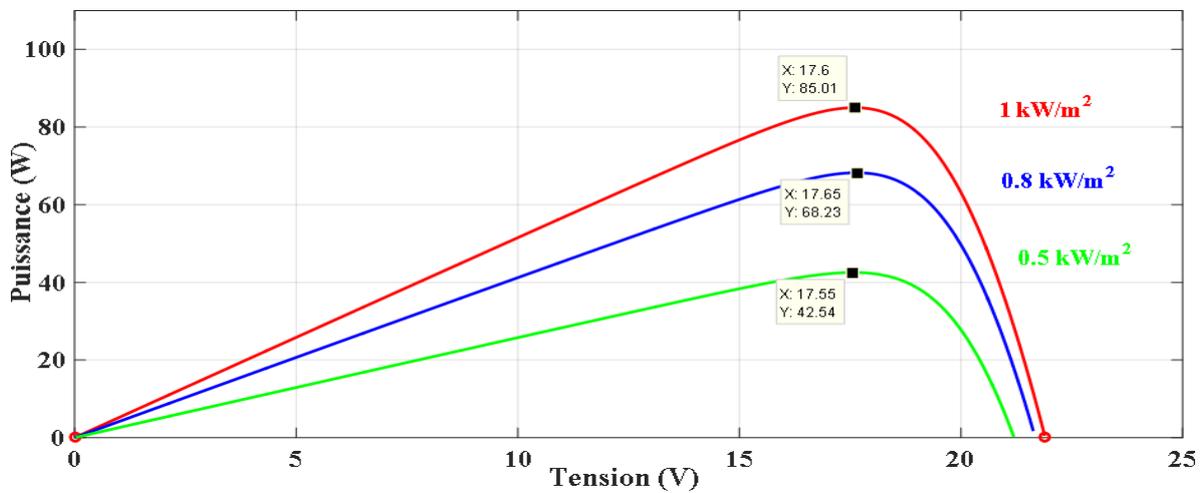


Figure III. 4 : Caractéristique puissance- tension pour différentes valeurs d'éclairement à température constante (25°C).

D'après la figure (III. 4), nous constatons que la tension à circuit ouvert est peu sensible à la variation de l'ensoleillement, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale.

III.2.3 Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT

III.2.3.1 Simulation de la commande P&O

Nous allons simuler le système photovoltaïque global avec convertisseur d'adaptation (Boost), commandé par un MPPT de type perturbe & and observe (P&O) :

La figure suivante présente le schéma bloc de la méthode P&O sous MATLAB/Simulink :

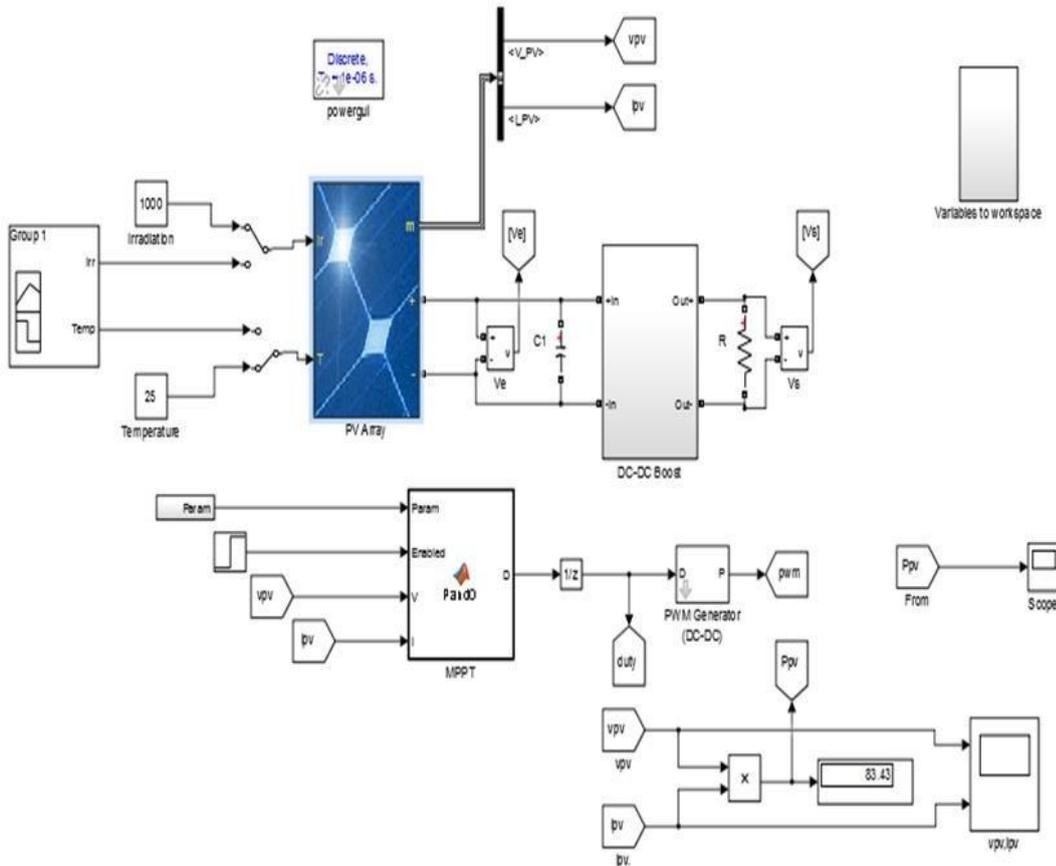


Figure III. 5 : Schéma de simulation du système (GPV-BOOST-charge) adapté par la technique MPPT (P&O).

III.2.3.1.1 Résultats de simulation sous les conditions météorologiques constante

Les résultats de la simulation obtenus par la méthode P&O d'un pas de 0.05 sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairciment $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$) sont illustrés par les figures ci-dessous :

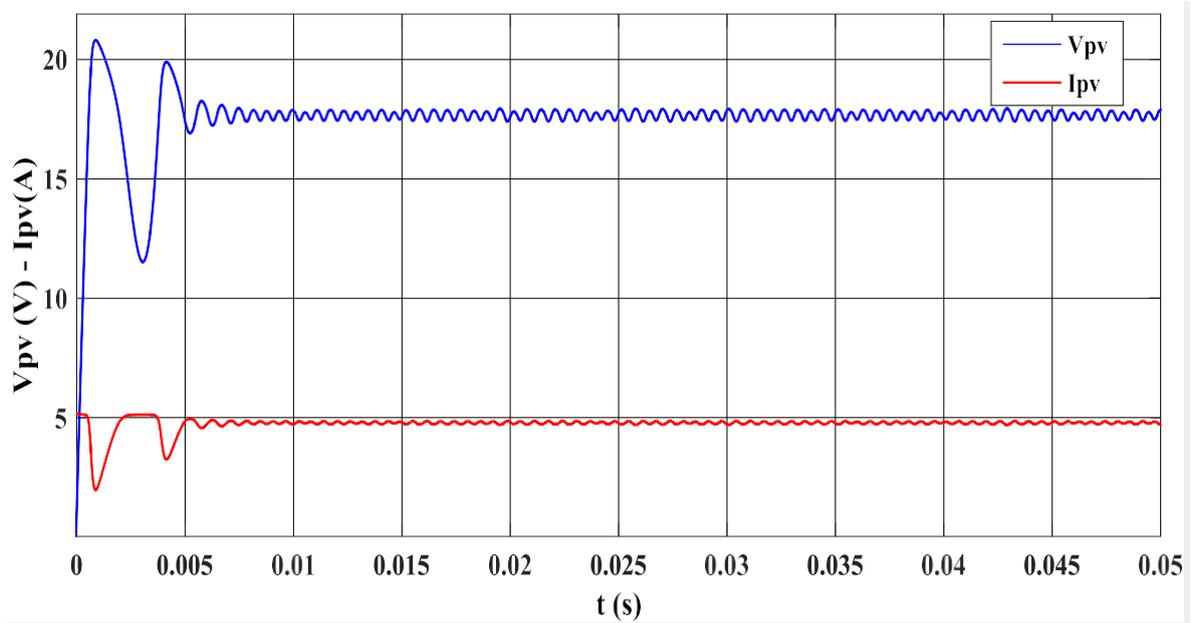


Figure III.6 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

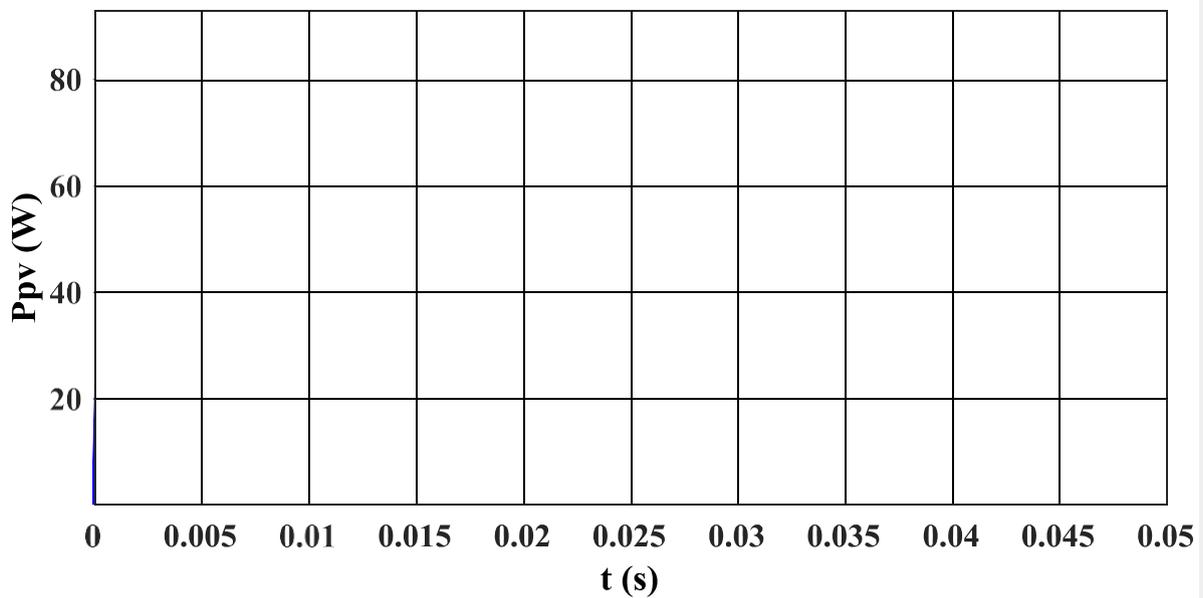


Figure III. 7 : La puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

III.2.3.1.2 Résultats de simulation sous des conditions atmosphériques variables

III.2.3.1.2.1 La température constante et éclairement variable

Afin d’analyser le comportement du système face à des changements brusque de l’éclairage représenté sur la figure III.8, nous avons refait les simulations précédentes.

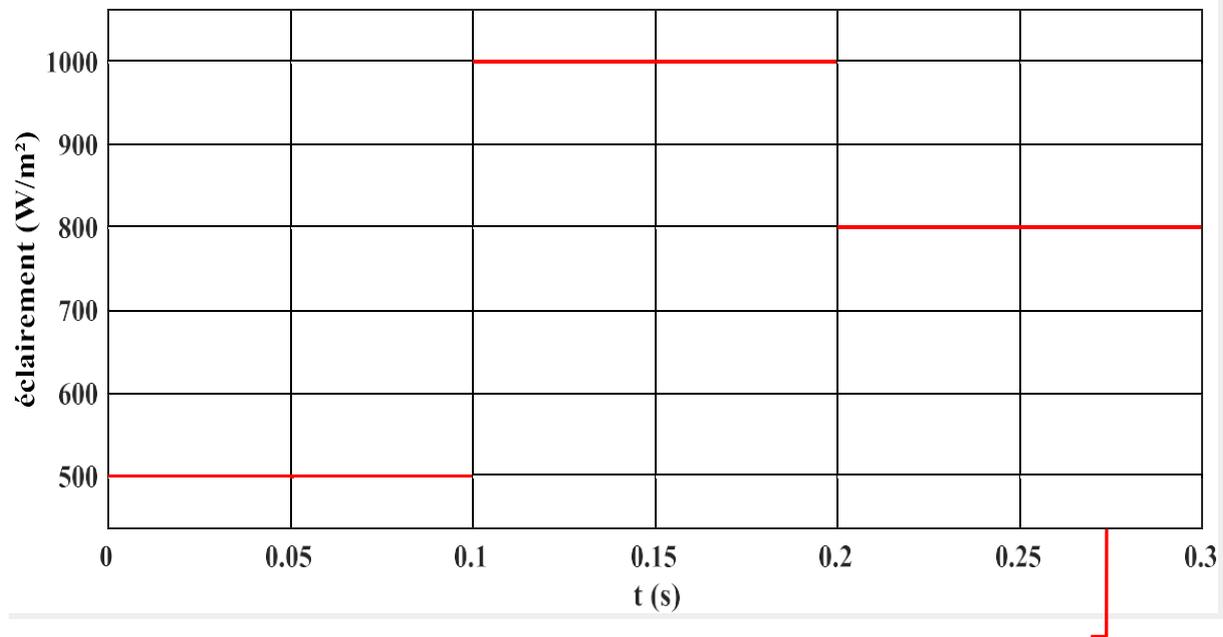


Figure III. 3 : Variation de l’éclairage en fonction du temps.

Les résultats de simulation obtenus pour un pas de 0.05 sont illustrés par les figures ci-dessous :

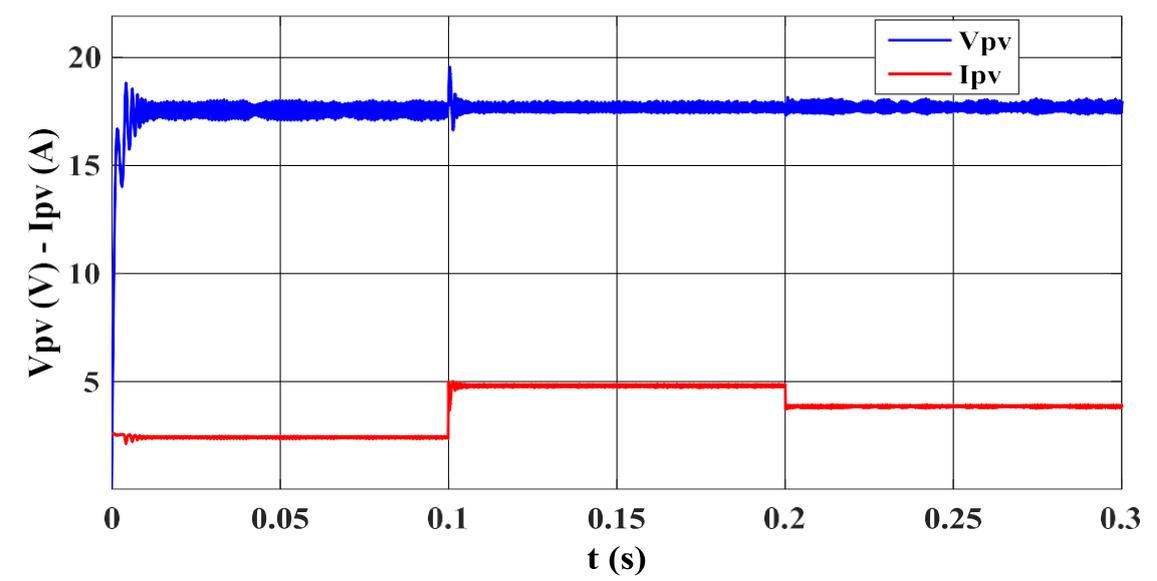


Figure III. 4 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.

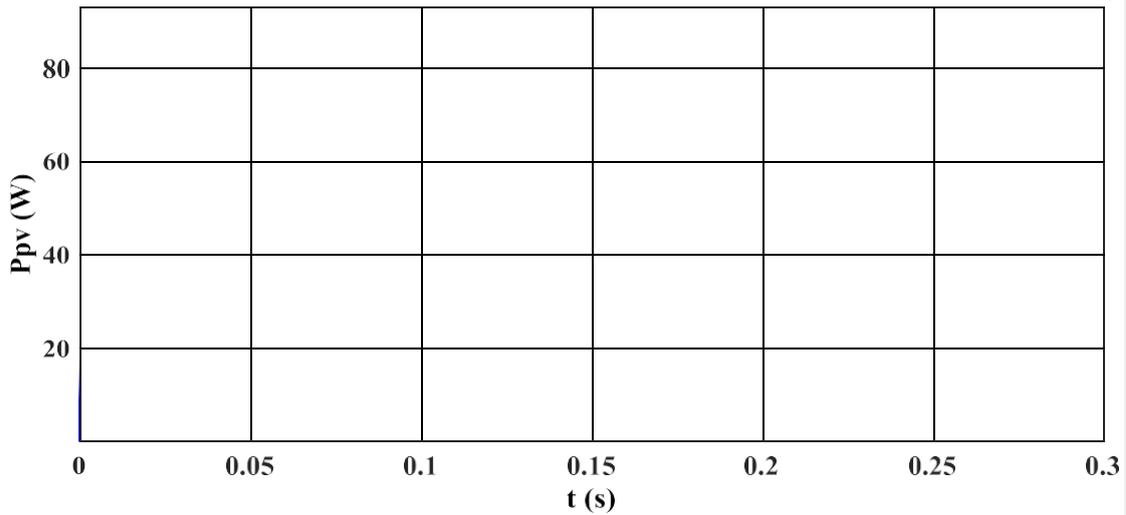


Figure III.5 : La puissance du panneau photovoltaïque.

On observe une relation proportionnelle entre les changements de la puissance et les changements de rayonnement, la même remarque est faite pour le courant.

III.2.3.1.2.2 L'éclairement constant et température variable

Afin d'analyser le comportement du système face à des changements de température représenté sur la figure III.11, nous avons refait les simulations précédentes.

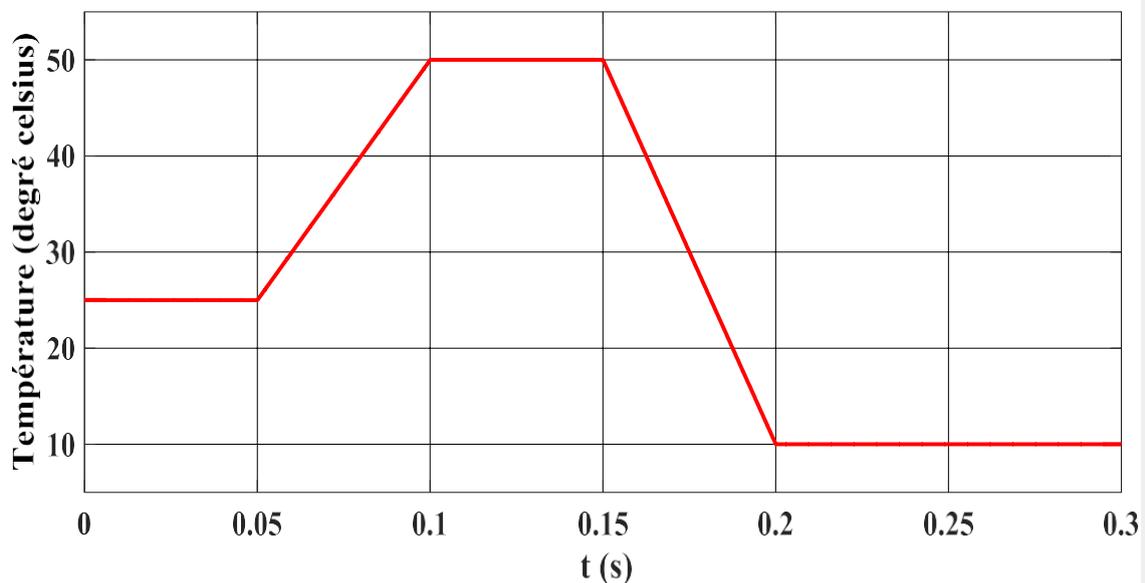


Figure III.11 : Variation de température en fonction du temps.

Les résultats de simulation obtenus pour un pas de 0.05 sont illustrés par les figures ci-dessous :

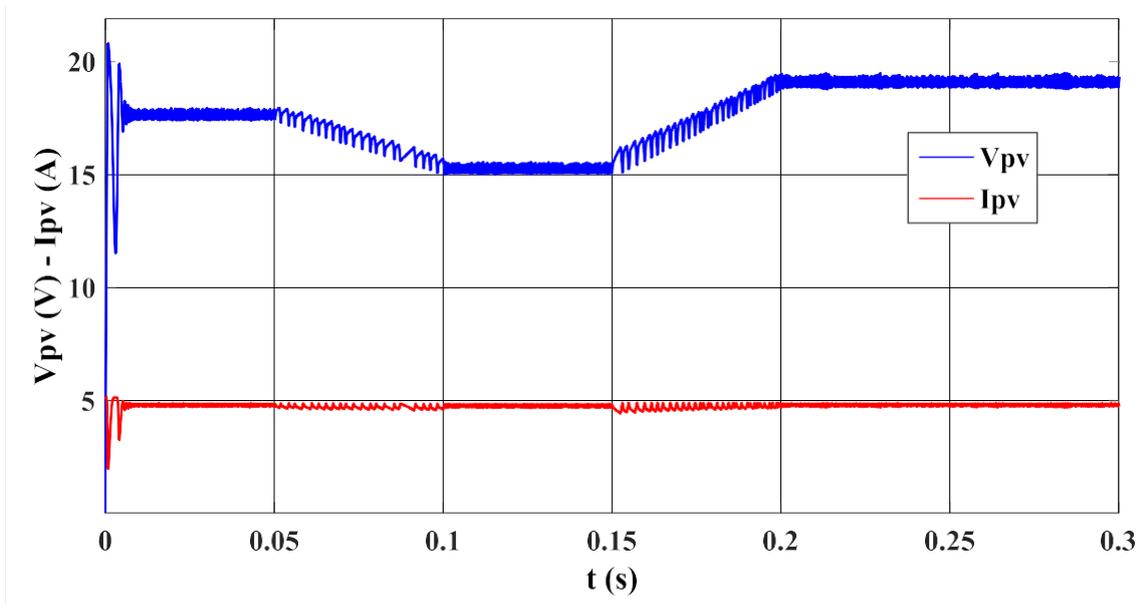


Figure III. 12 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.

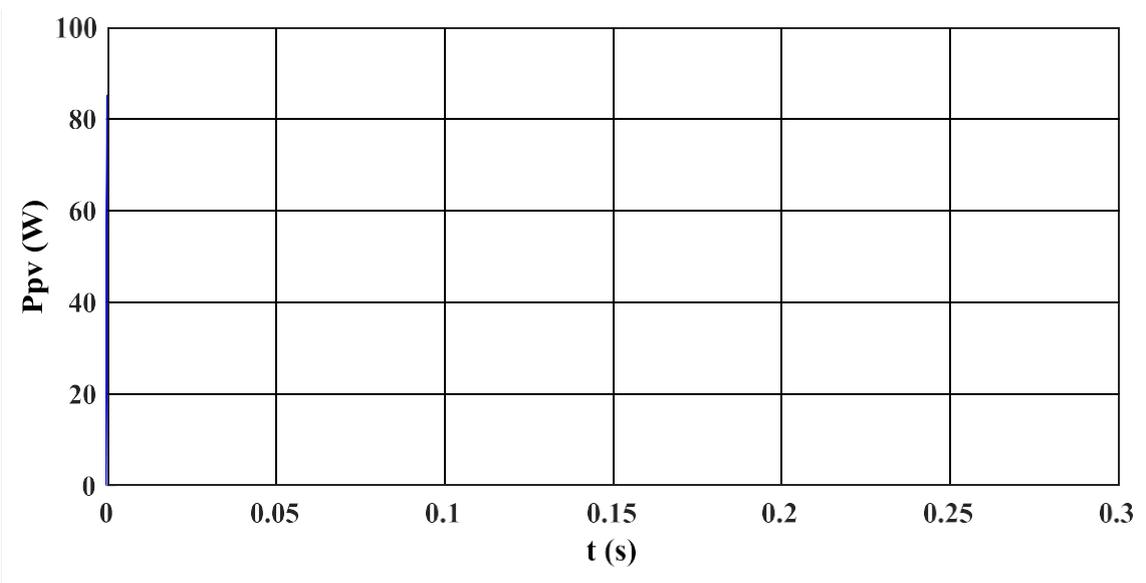


Figure III. 13 : La puissance du panneau photovoltaïque.

On remarque que la puissance du panneau PV diminue avec l'augmentation de la température et vice versa.

III.2.3.2 Simulation de la méthode incrémentation de l'inductance

La figure suivants présent le schéma bloc du système photovoltaïque global avec convertisseur d'adaptation (Boost), commandé par un MPPT de type incrémentation de l'inductance sous MATLAB/Simulink :

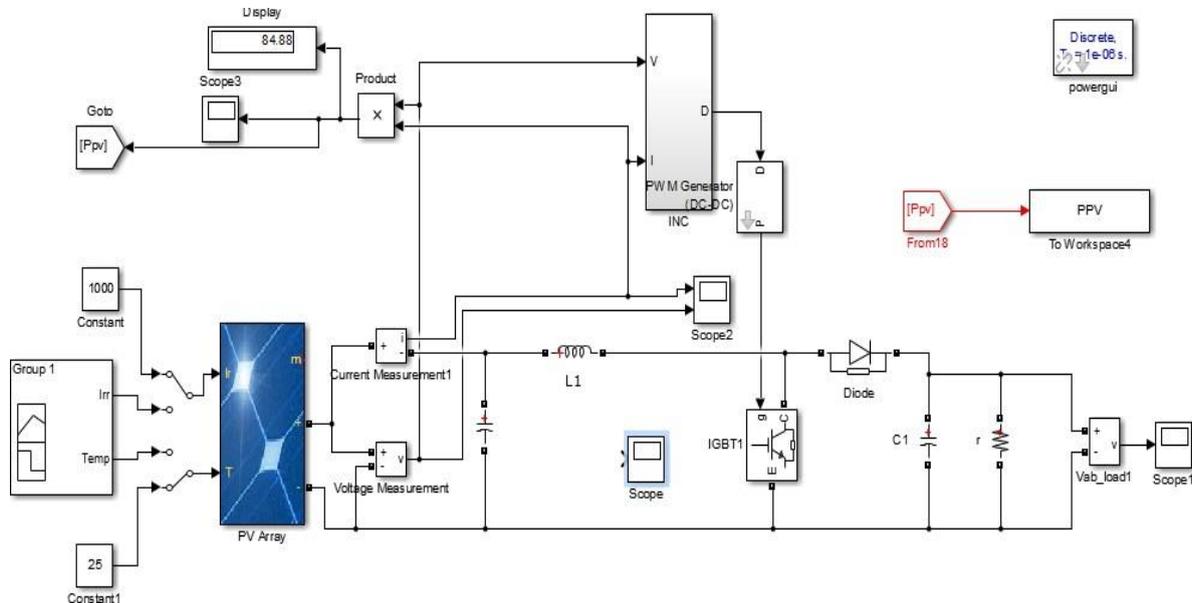


Figure III. 14 : Schéma de la méthode INC.

III.2.3.2.1 Résultats de simulation sous les conditions météorologiques constante

Les résultats de simulation obtenus par la méthode INC sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$) sont illustrés par les figures ci-dessous :

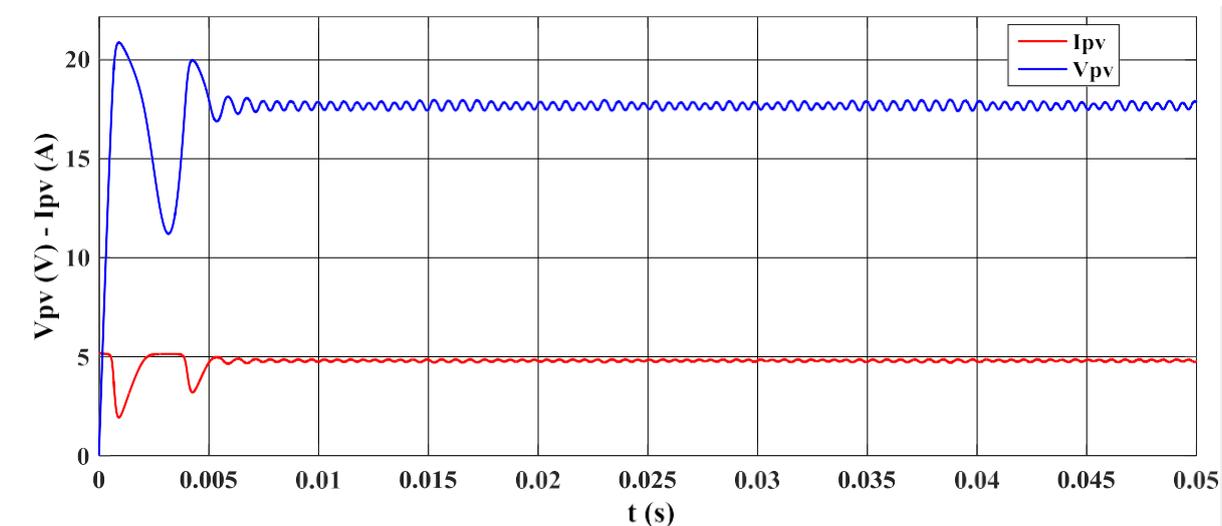


Figure III.15 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

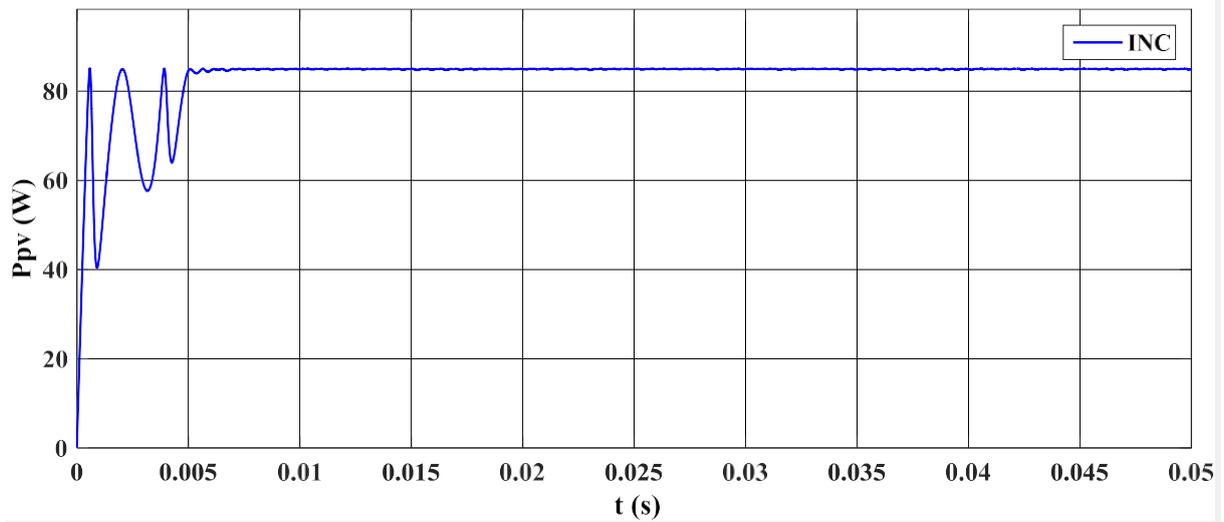


Figure III.16 : La puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

III.2.3.2.2 Résultats de simulation sous des conditions atmosphériques variables

III.2.3.2.2.1 La température constante et éclairement variable

Afin d’analyser le comportement du système face à des changements brusque de l’éclairage représenté sur la figure (III.17), nous avons refait les simulations précédentes.

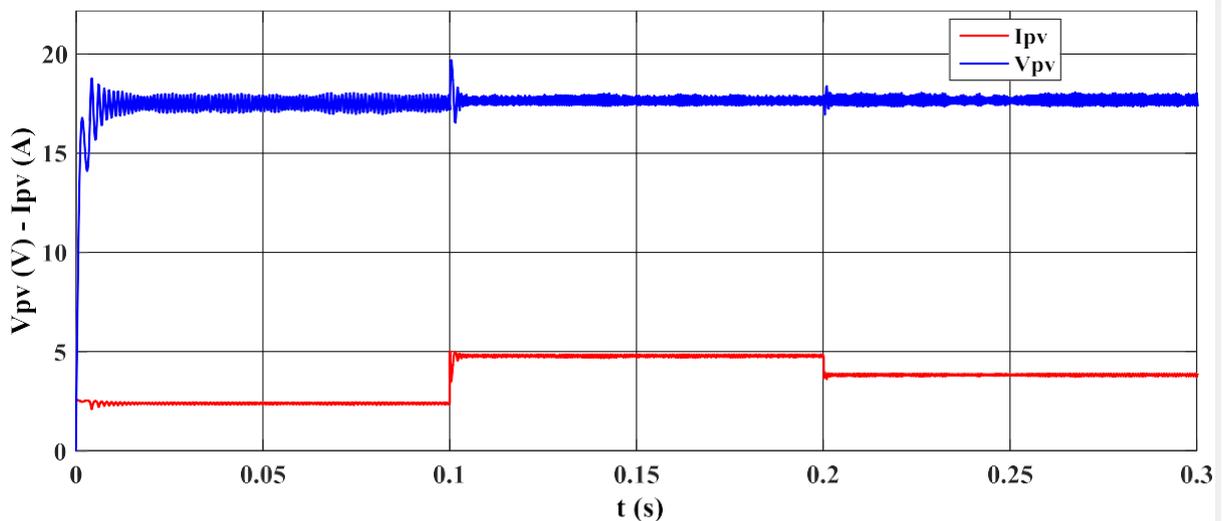


Figure III.17 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.

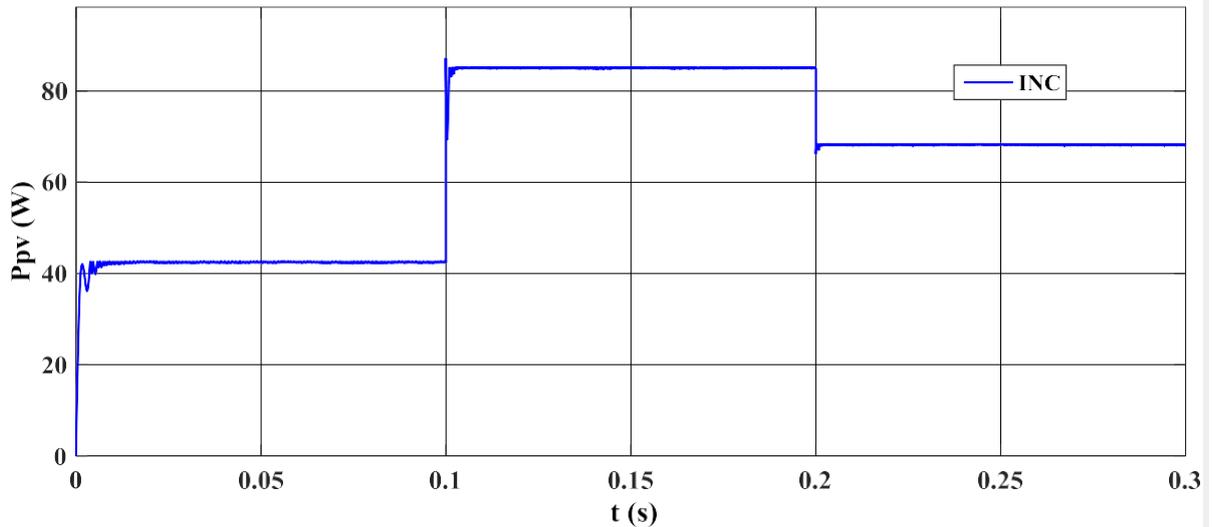


Figure III.18 : La puissance du panneau photovoltaïque.

On remarque que la puissance du panneau PV varie en fonction de l'éclairement et cela du à la variation du courant en fonction de l'éclairement.

III.2.3.2.2 L'éclairement constant et température variable

Afin d'analyser le comportement du système face à des changements de température représenté sur la figure III.19, nous avons refait les simulations précédentes.

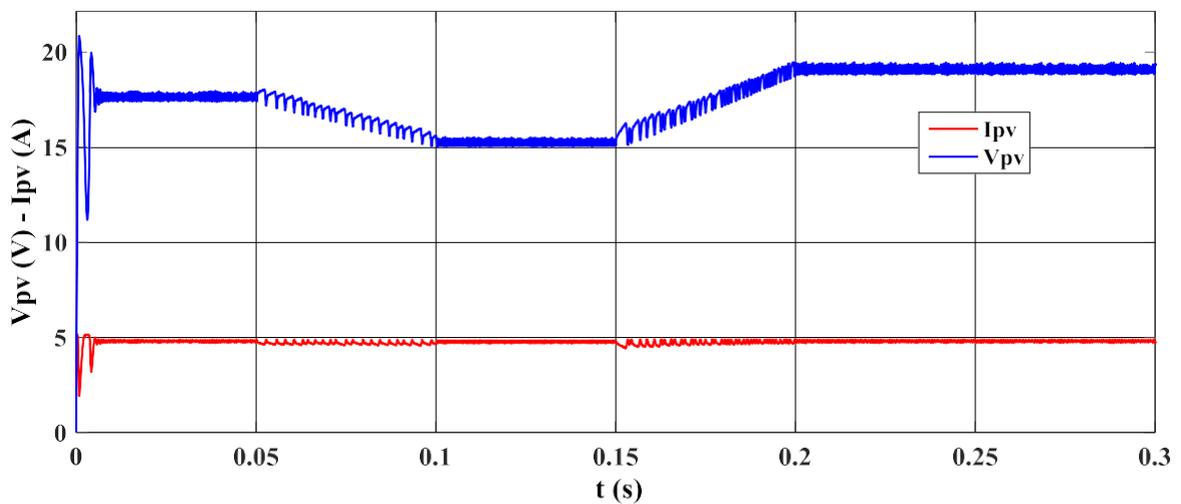


Figure III.19 : La tension et le courant du panneau photovoltaïque.

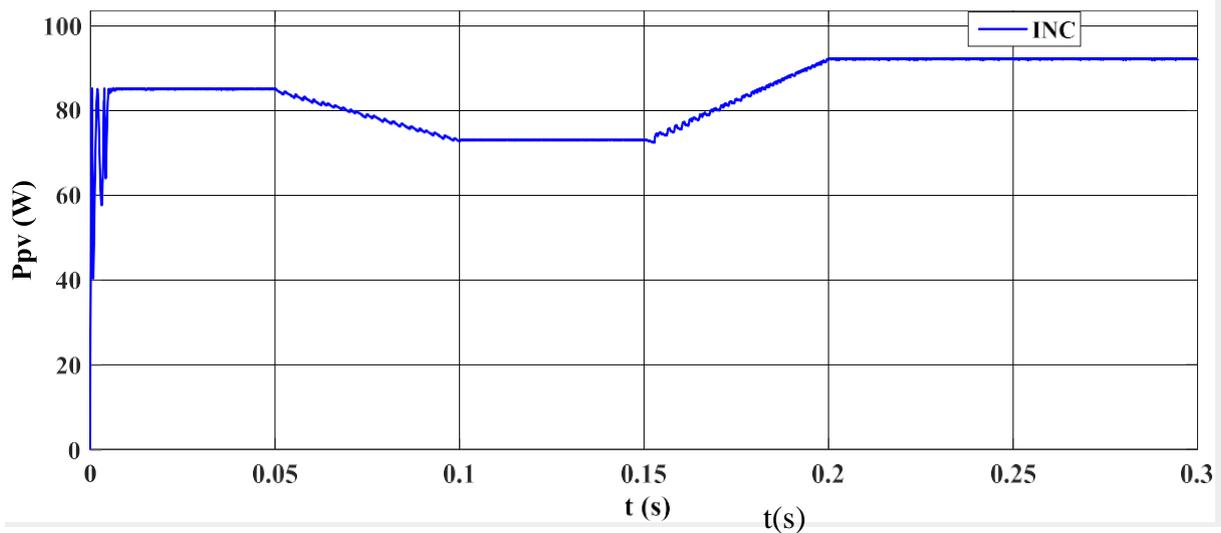


Figure III.20 : La puissance du panneau photovoltaïque.

On remarque que la puissance du panneau PV diminue avec l'augmentation de la température et vice versa. Mais avec courtes oscillations au changement de la température.

III.2.3.3 Comparaison entre les deux méthodes de poursuite P&O et INC

La comparaison des résultats de simulation avec du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « Incrémentation de l'inductance » et « perturbation & observation » sont représentés par les figure suivante pour un pas de perturbation 0.02 sous des conditions atmosphériques fixes puis variables.

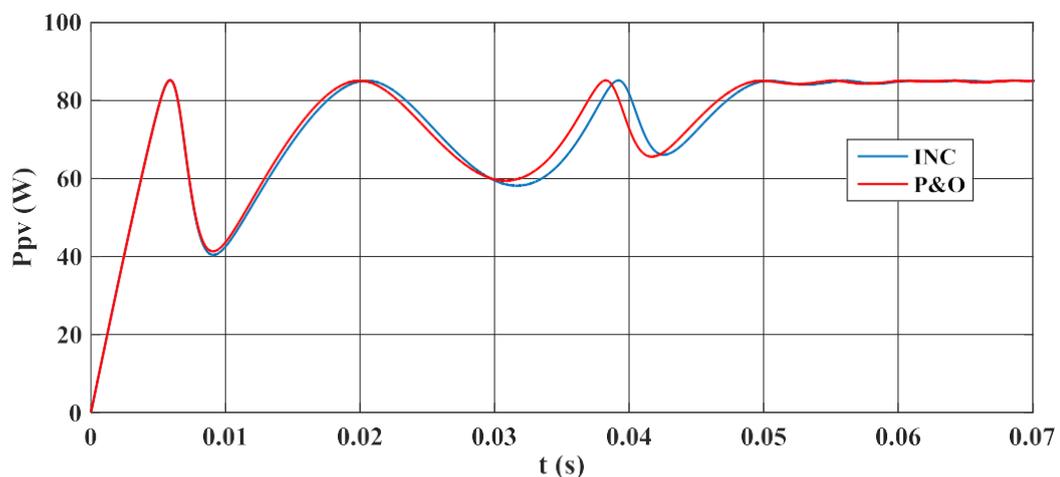


Figure III. 21 : Comparaison de la puissance PV entre P&O et INC sous des conditions atmosphériques fixes.

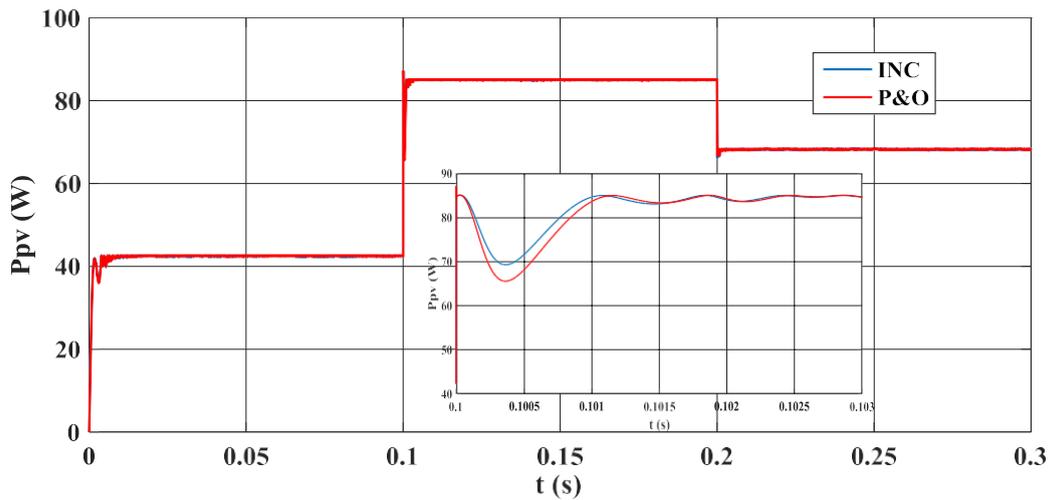


Figure III.22 : Comparaison de la puissance PV entre P&O et INC sous un éclairement variable.

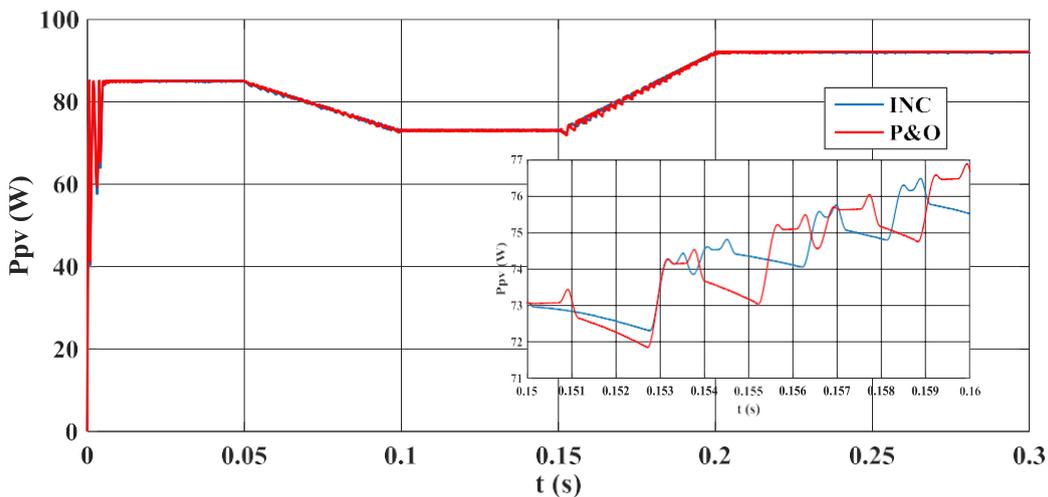


Figure III. 23 : Comparaison de la puissance PV entre P&O et INC sous une température variable.

III.3 Interprétation des résultats

D’après ces figures nous constatons que l’algorithme incrémentation de la conductance se caractérise par une réponse rapide lors d’un changement brusque d’éclairément.

Le temps de suivit de la méthode incrémentation et conductance est plus lent qu’avec l’algorithme perturbation et observation et cela dû à l’algorithme complexe de la méthode INC.

Nous constatons aussi que la technique INC présente des oscillations autour de PPM avec une amplitude plus grande que celle de la Méthode PO.

III.4 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation sous Matlab/Simulink. Nous avons commencé par la simulation d'un convertisseur élévateur (Boost) ensuite le système photovoltaïque global adapté commandé par un MPPT de type perturbation & observation (P&O) puis incrémentation de la conductance (INC). Enfin nous avons fait une étude comparative entre les deux méthodes.

Nous pouvons conclure que les deux techniques « P&O » et « INC » converge vers optimum global.

Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque est considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes pour la production d'électricité. Cependant, la production d'énergie photovoltaïque dépend essentiellement des conditions environnementales. L'optimisation de cette production revient à concevoir un système PV performant capable de faire face aux changements atmosphériques.

L'objectif de notre travail est l'amélioration des performances du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commandé par la technique MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Nous avons entamé ce travail par une présentation de quelques généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que la constitution du générateur photovoltaïque. Nous avons passé à la modélisation d'un système PV avec convertisseur d'adaptation après avoir cité les différents types de convertisseur DC/DC et leurs principes de fonctionnements. Ensuite nous avons présenté les différentes méthodes MPPT classique rencontrées dans la littérature.

En dernier, nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simulink afin de simuler deux techniques de commande MPPT appliquée au système PV associant un panneau PV, un hacheur Boost et une charge résistive, à savoir la commande Incrémentation de la Conductance 'Inc-Cond' et la méthode perturbation et observation, sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement 1000W/m^2 et une température de 25°C) et lors des changements de l'éclairement et de température. Enfin en se basant sur les résultats obtenus à partir des simulations effectuées nous constatons que les deux techniques « P&O » et « INC » converge vers optimum local, cependant la technique INC présente des oscillations autour de PPM avec une amplitude plus grande que celle de la Méthode PO, car il est difficile de remplir la condition $dp/dv=0$.

Nous pouvons conclure que la conception d'un étage d'adaptation muni d'un algorithme MPPT permet de relier aisément un GPV à sa charge et d'optimiser la conversion énergétique ce qui conduit à une amélioration du rendement des installations PV.

Comme perspectives nous recommandons :

- La réalisation pratique de techniques de maximisation de puissances MPPT ;
- L'utilisation d'autres techniques intelligentes de maximisation de puissances MPPT (techniques intelligentes).

- [1] F.Trahi, « prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de tizi-ouzou par les réseaux de neurones artificiels », mémoire de magister, UMMTO, 2011.
- [2] A. Belkaid, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », mémoire doctorat, Université FERHAT ABBAS - SETIF 1, Algérie octobre 2015.
- [3] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D,P.E .U.S Merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [4] H.MESSAOUDENE « Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques », mémoire de magister, Université de BATNA, 2014.
- [5] K.OUALI, « Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque », mémoire d'Ingénieur , Université de Bejaia ,2007.
- [6] Nichapour OleKsiy « simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités » Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [7] Y.Medjelled, « Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection » Mémoire de Magister, 2012.
- [8] S .Vighetti « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [9] S.Lalouni, Maître de Conférences Classe B « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Département de Génie Electrique, Université A. Mira de Bejaia.
- [10] M.BOUSSAID, « Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques », Thèse doctorat, Université Abou-bakr Belkaïd –Tlemcen, 2012.
- [11] M. Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [12] K. BENZAOUI, A.DELALDJA, « Etude comparative des commandes MPPT pour une chaîne de conversion photovoltaïque », Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2019.
- [13] N. Houcine, « Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique », Thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016.

- [14] M.KADEM ET R.SEDIK, « modélisation et simulation de la commande mppt d'un système photovoltaïque à base de réseaux de neurones artificiels », Mémoire de Fin d'études, 2018, UMMTO.
- [15] <http://fr.wikipedia.org/>
- [16] B.BENDIB ; « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », Thèse doctorat, Université de Sétif1, 2017.
- [17] F.Tazerart Et R.Abdelli, "Gestion D'un Système Photovoltaïque Avec Stockage", Mémoire De Master, Université Abdelrahmane Mira, Bejaïa, 2015/2016.
- [18] K.Zaouche, « Etude et développement de différentes méthodes MPPT pour un système photovoltaïque », mémoire de magister, U.S.T.H.B, 2009.
- [19] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations à découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [20] M.Obeidi, « commande des hacheurs mppt par logique floue », mémoire de magister, ecole nationale polytechnique 2006
- [21] Cedric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Université de Toulouse, 2008.
- [22] C. Hua, J. Lin, C. Shen « Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking », IEEE Transactions on Industrial Electronics, 45(1): 99-107, 1998.
- [23] H.Othmani,H.chaouali « Optimisation de la technique P&O par la logique floue ». Université de Tunis El Manar.
- [24] Abbassen Lyes «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque». Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI
- [25] S. W. Sung, J. Lee and I.-B. Lee: Process Identification and PID Control. Wiley-IEEE Press, Singapore (2009).