

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
Département D'Electrotechnique

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Présenté par
BELKADI Nora
AKLI Karima

Mémoire dirigé par **M. BECHOUCHE Aii**

Thème

**Contrôle indirect d'un panneau solaire
isolé du réseau**

Mémoire soutenu publiquement le 16/09/2018 devant le jury composé de :

Mr. SEDDIKI Hamid
Professeur, UMMTO, Président

Mr. BECHOUCHE Aii
MCA, UMMTO, Encadreur

Mr. MIOUAT Azzouz
MAA, UMMTO, Examineur

Mr. RAHOUI Adel
MAB, ENSTP Alger, Examineur

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout Puissant de nous avoir donné la force et la patience de réaliser cette étude.

Nous remercions vivement Monsieur **Ali BECHOUCHE**, pour l'honneur qu'il nous fait en encadrement, et son entière disponibilité durant toutes les étapes de notre projet.

Nous exprimons nos remerciements à Monsieur **Hamid SEDDIKI** de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi à Messieurs **Azzouz MIOUAT** et **Adel RAHOUI**, membres du jury, pour leurs disponibilités et leurs gentillesse.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département d'électrotechnique pour leurs conseils.

Nous n'oublierons pas de remercier aussi nos pères, nos mères, frères et sœurs pour leurs soutiens.

Nora et Karima

Dédicaces

A la mémoire de mon cher oncle Vava Elhadj en témoignage de mon profond amour. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer notre reconnaissance pour tous les sacrifices que tu as fait pour garder l'union de notre famille jusqu'à ton dernier souffle. Puisse Dieu, Seigneur de l'univers, t'avoir en sa sainte miséricorde.

Je dédie ce modeste travail en signe de profonde et sincère reconnaissance à ceux qui m'ont donné la vie, symbole de sagesse, de patience et de fierté, mes Chers Parents : vous êtes ma source de courage, je ne saurais vous remercier pour vos encouragements et votre soutien inconditionnel dans tous mes choix d'évolution.

Mes remerciements les plus vifs et sincères vont à toute ma famille grand et petit, et notamment mes frères et sœurs, mais tout particulièrement mes adorables petits neveux : Riyadh, Wissal et Insaf pour la joie et le bonheur qu'ils nous apportent toujours

Je tiens également à remercier chaleureusement ma chère amie Samia pour sa disponibilité et sa bonne humeur inaltérable.

Je ne pourrais finir sans faire part de toute ma reconnaissance à ma binôme Karima, merci pour ton implication et ta ponctualité, et surtout pour nos discussions passionnées pour faire avancer ce travail qui nous a réunis.

Enfin, j'adresse un énorme merci à toutes celles et ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'accomplissement de ce travail.

Nora

« Le succès n'est pas final. L'échec n'est pas fatal. C'est le courage de continuer qui compte »
(Winston Churchill).

Dédicace

Je dédie mon travail à mes parents, ces parents dévoués et patients qu'Allah m'a donné, vous avez toujours sacrifiés afin que vous puissiez épanouir vos enfants, les mots sont insignifiants pour vous dire un grand merci pour tout.

Mes dédicaces vont à toute ma famille en commençant par mes chers frères et sœurs Nabila, Tahar, Hamou, Yamina, Wassila, Lynda et Fouad.

Je ne pourrais finir sans faire part de toute ma reconnaissance à ma binôme Nora, merci pour ta présence et ton soutien. Tu es devenue bien plus qu'une camarade de promo durant cette belle expérience et je suis heureuse aujourd'hui de notre amitié.

À tous mes oncles et tantes, mes cousins et cousines. A mes grands-parents,

En fin mon travail est encore dédié à tous ceux qui ont participé aussi moindre qu'il le soit dans sa réalisation.

Karima

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque | |
| I.1.Introduction | 3 |
| I.2.Energie solaire | 3 |
| I.2.1. Energie solaire photovoltaïque | 3 |
| I.2.2. Rayonnement solaire | 3 |
| I.2.3. Types de rayonnement | 4 |
| I.2.4. Spectre solaire | 4 |
| I.2.5. Durée d'insolation | 5 |
| I.3. Cellule photovoltaïque | 6 |
| I.3.1.Différents types de cellule | 6 |
| I.3.2. Avantages et inconvénients de chaque type | 8 |
| I.3.3. Matériaux semi-conducteurs | 9 |
| I.3.4. Paramètres de la cellule | 9 |
| I.3.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque | 12 |
| I.3.6. Effet photovoltaïque | 12 |
| I.4. Module photovoltaïque | 13 |
| I.4.1. Types de contrôle d'un panneau photovoltaïque | 17 |
| I.4.2. Classification des systèmes photovoltaïques | 19 |
| I.5. Avantages et inconvénients du photovoltaïque | 20 |
| I.6.Conclusion | 21 |
| Chapitre II : Modélisation d'un panneau photovoltaïque | |
| II.1. Introduction | 22 |
| II.2. Modèle à une diode | 22 |
| II.2.1. Cas d'une cellule idéale | 22 |
| II.2.2. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque | 24 |

| | |
|--|----|
| II.3.Choix du module photovoltaïque | 26 |
| II.4. Les résultats de la simulation..... | 27 |
| II.4.1. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV IFRI 260-60 | 28 |
| II.5. Influence de l'éclairement et de la température..... | 29 |
| II.6. Conclusion | 32 |

Chapitre III : Convertisseur DC/DC et la commande MPPT

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction | 33 |
| III.2. Convertisseurs DC-DC..... | 34 |
| III.2.1. Hacheur survolteur (Boost) | 34 |
| III.3.Modélisation d'un hacheur survolteur..... | 35 |
| III.4. Dimensionnement du régulateur PI..... | 36 |
| III.4.1. Linéarisation du modèle d'état du hacheur autour d'un point d'équilibre | 37 |
| III.5. Commande MPPT | 45 |
| III.5.1. Principe de fonctionnement de MPPT..... | 46 |
| III.5.2. Différents types de MPPT | 46 |
| III.6. Méthode Perturbe & Observe (P&O)..... | 47 |
| III.6.1. Simulation de l'Algorithme Perturbation et Observation (P&O)..... | 49 |
| III.6.2. Avantages et inconvénients de la P&O | 50 |
| III.7. Conclusion..... | 51 |

Chapitre IV : Résultats de simulations et validations expérimentales

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction | 52 |
| IV.2. Définition de la norme | 52 |
| IV.2.1.La norme prEN 50530..... | 52 |
| IV.3. Définition de la séquence d'essais prEN50530..... | 52 |
| IV.3.1. Méthode d'essais du prEN 50530 | 53 |
| IV.4. Simulation du système global | 54 |
| IV.5. Changement des conditions atmosphériques | 56 |

| | |
|---|----|
| IV.5.1.Changement de faible à moyen de l'éclairement à profil rapide (100W/m ² à 500 W/m ²)..... | 56 |
| IV.5.2. Changement de moyen à fort de l'éclairement à profil rapide (300W/m ² à 1000 W/m ²)..... | 57 |
| IV.5.3. Changement de faible à moyen de l'éclairement à profil lent (100W/m ² à 500 W/m ²)..... | 58 |
| IV.5.4.Changement de moyen à fort de l'éclairement à profil lent (300W/m ² à 1000 W/m ²) | 59 |
| IV.6. Variation de la température..... | 60 |
| IV.7. Effet du changement du pas d'incrémentation..... | 61 |
| IV.8. Réalisation du système complet avec la commande MPPT..... | 64 |
| IV.8. 1 Système photovoltaïque disponible au laboratoire..... | 65 |
| IV.9. Conclusion | 69 |
| Conclusion générale | 70 |
| Bibliographie | 72 |

Liste des symboles

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

E : Energie de chaque photon.

h: Constante de Planck. $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{J/s}$.

λ : Longueur d'onde (m).

I_{cc} : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A).

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

FF: Facteur de forme.

n : Facteur d'idéalité.

G : Eclairement (W/m^2).

P_{max}: Puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PI : Régulateur proportionnel intégral.

I_{ph} : Courant photonique (A).

N_s : Nombre de cellule en série dans le panneau.

R_{sh} : Résistances parallèle shunt (Ω).

R_s: Résistance série (Ω).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

T_c : Température de jonction ($^{\circ}\text{K}$).

I_s : Courant de saturation en Ampère.

K : Constante de Boltzmann, 1.38×10^{-23} J/K.

q : Charge de l'électron.

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

V_{pv} : Tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.

η : Rendement.

P : La zone p de la jonction PN.

n : La zone n de la jonction PN.

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Fig. I.1: Types de rayonnement solaire reçus au sol | 4 |
| Fig. I.2: Spectre de rayonnement solaire..... | 5 |
| Fig. I.3: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque | 6 |
| Fig. I.4: Cellule amorphe | 7 |
| Fig. I.5: Cellule monocristalline | 7 |
| Fig. I.6: Cellule poly-cristalline..... | 8 |
| Fig. I.7: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque | 11 |
| Fig. I.8: L'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques..... | 11 |
| Fig. I.9: Différent types de module photovoltaïque..... | 13 |
| Fig. I.10: Constitution d'un module photovoltaïque | 14 |
| Fig. I.11 : Regroupement de cellule en série | 14 |
| Fig. I.12: Caractéristique résulte d'un regroupement de cellules en série..... | 15 |
| Fig. I.13 : Regroupement de cellule en parallèle | 15 |
| Fig. I.14: Caractéristique résulte d'un regroupement de cellule en parallèle | 16 |
| Fig. I.15 : Regroupement de cellule série/parallèle | 17 |
| Fig. I.16: Regroupement série et parallèle..... | 17 |
| Fig. I.17 : Système photovoltaïque Contrôlé directement | 18 |
| Fig. I.18 : Système photovoltaïque contrôlé indirectement..... | 18 |
| Fig. I.19: Exemple d'un système photovoltaïque isolé | 20 |
| Fig. I.20: Système photovoltaïque raccordé au réseau | 20 |

Chapitre II : Modélisation d'un panneau photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Fig. II.1: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle..... | 23 |
| Fig. II.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque..... | 24 |
| Fig. II.3 : Schéma Simulink du panneau IFRI 260-60 | 27 |
| Fig. II.4 : Caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque IFRI 260-60 | 28 |
| Fig. II.5 : Caractéristique P(V) d'un panneau photovoltaïque IFRI 260-60 | 28 |
| Fig. II.6 : Influence de la température sur la caractéristique I(V)..... | 29 |
| Fig. II.7 : Influence de la température sur la caractéristique P(V) | 30 |

| | |
|---|----|
| Fig. II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ | 30 |
| Fig. II.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ | 31 |

Chapitre III : Convertisseur DC/DC et la commande MPPT

| | |
|--|----|
| Fig.III.1 : Circuit électrique du convertisseur boost | 34 |
| Fig.III.2 : Schéma de la commande avec le régulateur PI..... | 37 |
| Fig.III.3 : diagramme de Bode de la fonction du transfert du système $G(P)$ | 42 |
| Fig.III.4 : diagramme de Bode pour la fonction de transfert $-G(P)$ | 43 |
| Fig.III.5 : Diagramme de Bode du la fonction du transfert de $-H(P)$ | 44 |
| Fig. III.6 : Diagramme de Bode de $C(P) G(P)$ | 45 |
| Fig.III.7 : Chaîne élémentaire d'une conversion photovoltaïque..... | 46 |
| Fig.III.8 : Organigramme de la méthode P&O | 48 |
| Fig. III.9 : Différents points de fonctionnement d'un algorithme P&O..... | 49 |
| Fig. III.10 : Modèle simulink de la P&O | 50 |

Chapitre IV : Résultats de simulations et validations expérimentales

| | |
|---|----|
| Fig. IV.1: Signal du changement d'irradiation | 53 |
| Fig. IV.2: Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque global | 54 |
| Fig. IV.3 : Résultats de simulation de la puissance, la tension, le courant généré par le générateur photovoltaïque et rapport cyclique α pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ | 55 |
| Fig. IV.4 : Résultats Simulink de tension, courant, puissance et rapport cyclique alpha généré par le générateur PV après l'application d'un profil d'irradiation bas et rapide (Figure (IV.1)(a)) | 56 |
| Fig. IV.5: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et le rapport cyclique alpha obtenu par la méthode P&O pour une augmentation rapide de l'ensoleillement (figure (IV.1) (b)) | 57 |
| Fig. IV.6: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique alpha obtenus par la méthode P&O pour une augmentation lente de l'ensoleillement (figure (IV.1) (c)) | 58 |
| Fig. IV.7: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique alpha obtenus par la méthode P&O pour une augmentation lente de l'ensoleillement (figure (IV.1) (d)) | 59 |
| Fig.IV.8: Variation de la température..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Fig. IV.9: Forme d'onde de la tension et le courant et la puissance et du rapport cyclique α obtenus par la méthode P&O pour une variation de température..... | 61 |
| Fig. IV.10: Forme d'onde du courant I_{pv} pour différentes valeurs du pas d'incrémentations..... | 62 |
| Fig. IV.11: Forme d'onde de la tension V_{pv} pour différentes valeurs du pas d'incrémentations..... | 62 |
| Fig. IV.12: Forme d'onde de la puissance P_{pv} pour différentes valeurs du pas d'incrémentations..... | 63 |
| Fig. IV.13: Forme d'onde du rapport cyclique α pour différentes valeurs du pas d'incrémentations..... | 63 |
| Fig. IV.14: Banc d'essai disponible au laboratoire L2CSP..... | 65 |
| Fig. IV.15: Profils de changements d'irradiations dans le cas réel on utilise le gradateur..... | 66 |
| Fig. VI.16: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.14) (a)..... | 67 |
| Fig. VI.17: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.15) (b)..... | 67 |
| Fig. VI.18: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.14) (c)..... | 68 |
| Fig. VI.19: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.14) (d)..... | 68 |

Introduction générale

Introduction générale

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV (GPV) et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximum (PPM) à l'aide d'un contrôleur maximum power point tracking (MPPT), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température) [34].

Généralement, les systèmes de conversion d'énergie renouvelable souffrent d'un manque d'optimisation qui en font des systèmes chers et présentant encore des déficiences importantes en rendement et en fiabilité [32].

La MPPT reste une bonne approche dans la résolution des problèmes de la conversion de l'énergie solaire, elle consiste à faire fonctionner les systèmes PV dans leurs zones de puissance maximale [34].

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système PV, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous.

Nous aborderons dans le premier chapitre des généralités sur la technologie PV. En commençant par des notions sur le rayonnement solaire, puis nous introduirons le principe de l'effet photovoltaïque dans les panneaux solaires où nous décrirons dans ce dernier ses différents types de contrôle, ses classifications, ses avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la définition et le principe de fonctionnement de la cellule PV, ses différents types disponibles, sa modélisation mathématique ainsi celle de notre module PV IFRI 260-60. Nous le finirons par le traitement de l'influence de la température et l'éclairement sur ses caractéristiques (I-V et P-V).

Au troisième chapitre nous aborderons la description du convertisseur (DC/DC) de type Boost, le principe de fonctionnement et les différents types de la recherche du MPPT où nous nous intéresserons à la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

Comme notre commande est indirecte, nous dimensionnerons le régulateur proportionnel intégral (PI). Alors nous suivrons une succession d'étapes qui nous permettra de trouver le point de puissance maximale qui sont :

- linéariser le modèle du hacheur Boost autour d'un point d'équilibre,
- déterminer la fonction de transfert de notre système,
- calculer les paramètres du régulateur proportionnel et intégral (T_i et K_{pi}),
- utiliser l'algorithme P&O qui permet la poursuite du point de puissance maximale même lors des variations de la température et de l'éclairement.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons des résultats des simulations qui sont effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink d'un système photovoltaïque global, ainsi que l'implémentation expérimentale du système complet est effectuée et adaptée par une commande MPPT (P&O).

En fin, nous terminerons par une conclusion générale où nous discuterons les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

Chapitre I :

Généralités sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction

Le monde actuellement absorbe une grande quantité d'énergie dont la majorité est obtenue par les sources fossiles (pétrole, gaz, nucléaire...)

Mais les réserves de ces sources sont limitées en plus de leur effet néfaste sur l'environnement. Le monde donc a besoin d'autres sources d'énergie : les énergies renouvelables, elles sont donc la solution. Parmi ces sources renouvelables, on peut citer l'énergie solaire, c'est pourquoi l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [7].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie nous effectuons dans ce chapitre une étude théorique sur le rayonnement solaire et un bref rappel sur l'élément clé qui est la cellule photovoltaïque et ses performances. On introduira aussi le principe de l'effet photovoltaïque dans les panneaux solaires où on décrira dans ce dernier ses différents types de contrôle, ses classifications, ses avantages et inconvénients.

I.2. Energie solaire

L'énergie solaire est la source énergétique la plus abondante sur terre, c'est une énergie renouvelable. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide des cellules PV, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage [1].

I.2.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme une source de lumière. Cette énergie peut être captée et transformée en électricité grâce à des panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Cette transformation est appelée (effet photovoltaïque). Elle a été découverte en 1839 par Antoine-César Becquerel. Elle consiste à produire un courant lorsque la surface des panneaux est exposée à la lumière [5].

I.2.2. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2et 4.10^{-6} m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbe. Le rayonnement solaire peut être décomposé en quatre types différents : rayonnement directe, diffus, l'albédo et global.

I.2.3. Types de rayonnement [2]

♦ **Rayonnement direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

♦ **Rayonnement diffus** : c'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions) dans l'atmosphère.

♦ **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo** : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

♦ **Rayonnement global** : est la somme de ces diverses contributions.

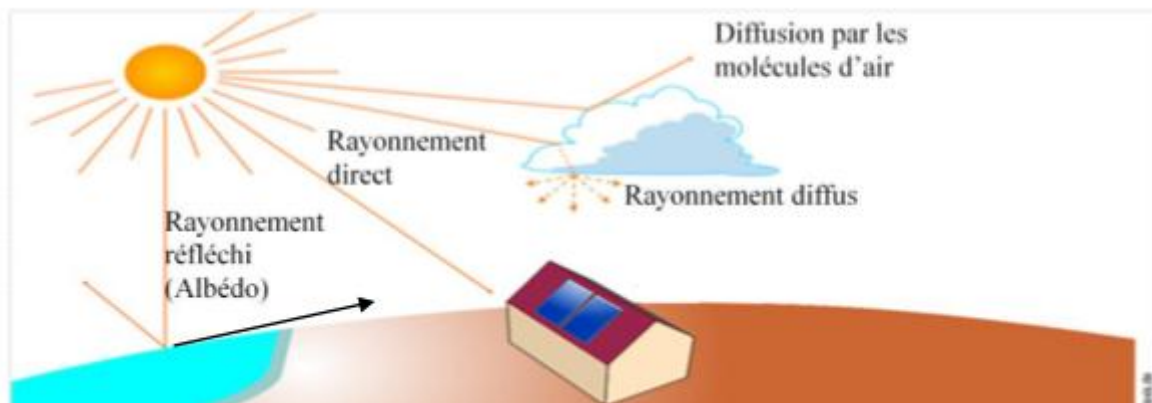


Fig. I.1: Types de rayonnement solaire reçus au sol [3].

I.2.4. Spectre solaire

Le spectre du soleil c'est la décomposition en longueurs d'onde ou (couleurs). La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leurs gammes de longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde, elle est donnée par la formule suivante :

$$E = hv = \frac{hC}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où :

h : La constante de Planck. $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J/s.

C : La vitesse de propagation. $C = 3 \cdot 10^8$ m/s.

λ : longueur d'onde (μm).

La figure suivante (I.2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en :

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4%.

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%.

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6

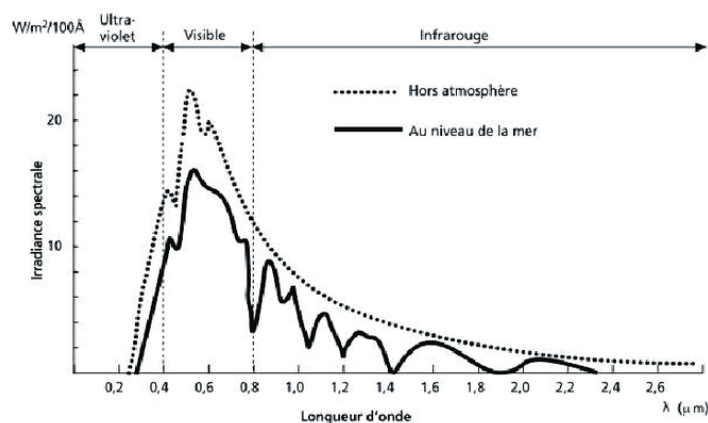


Fig. I.2: Spectre de rayonnement solaire [4].

I.2.5. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, si celui-ci est bien visible on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

I.3. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques capables de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, elle constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0.5 à 0.6 V [10].

Remarque :

- L'élément le plus important d'un système photovoltaïque est la cellule car c'est l'élément de base qui collecte la lumière du soleil et les modules qui rassemblent un grand nombre de cellules.
- Les cellules peuvent être groupées pour former des modules. Les modules peuvent être regroupés pour former des champs photovoltaïques. Le terme module est habituellement utilisé pour décrire un système photovoltaïque (avec plusieurs cellules connectées en série et / ou parallèle) [5].

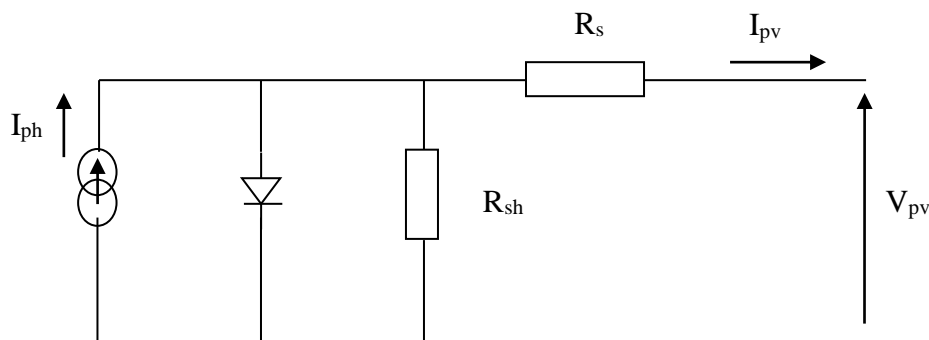


Fig. I.3: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [6].

I.3.1. Différents types de cellules

On distingue actuellement 3 principaux types de panneaux (modules) photovoltaïques, qui sont différenciés par le type de cellules qui les composent. Toutes les cellules sont produites à base de silicium, mais les méthodes de fabrication différentes, leurs donnent des caractéristiques très différentes, notamment en termes de productivité.

- **Cellules amorphes**

Les cellules amorphes sont produites à partir d'un "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

La cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites «solaires», car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples. Le problème c'est que son rendement est 2 à 3 fois plus faible que les cellules monocristallines.

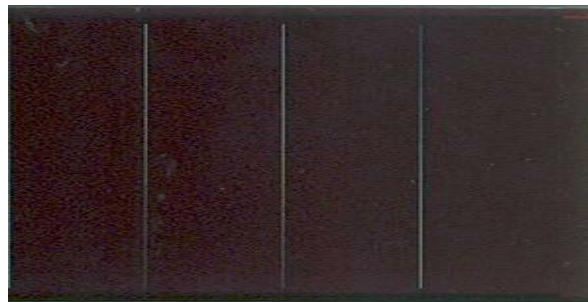


Fig. I.4: Cellule amorphe [7].

- **Cellules monocristallines**

Les cellules monocristallines sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très "pures". Elles offrent le meilleur rendement (entre 13 et 17%), mais sont aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

Ces cellules sont les plus performantes, elles permettent donc de constituer des panneaux qui sont très performants : ceux qui produisent le plus d'énergie avec le moins de surface.



Fig. I.5: Cellule monocristalline [7].

- **Cellules polycristallines**

Sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets.

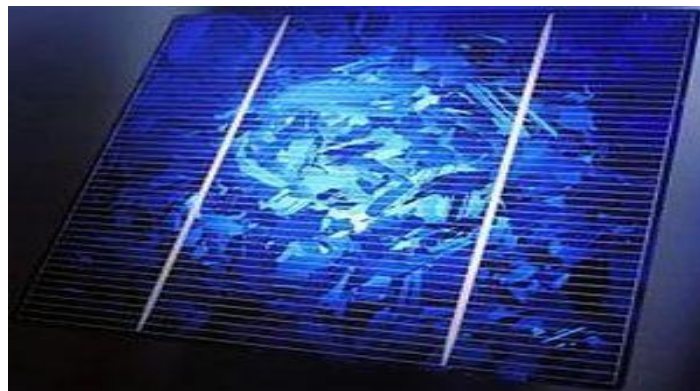


Fig. I.6: Cellule poly-cristalline [7].

I.3.2. Avantages et inconvénients de chaque type

Le tableau suivant montre la différence entre les différents types des cellules :

| Type de cellule | Avantages | Inconvénients |
|--------------------------|---|---|
| Cellule amorphe | -Fonctionnement avec un éclairage faible -Un peu moins chère | -Rendement faible en plein soleil -Diminution des performances avec le temps |
| Cellule monocristalline | -Bon rendement -Nombre de fabricants élevé | -Cout élevé -Rendement plus faible sous un faible éclairage |
| Cellule poly-cristalline | -Très bon rendement -Moins cher que le monocristallin | -Rendement faible sous faible éclairage |

I.3.3. Matériaux semi-conducteurs

Un matériau semi-conducteur est un matériau qui a une conductivité électrique intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs [18].

I.3.4. Paramètres de la cellule [15 ,16]

La cellule photovoltaïque est caractérisée par un certain nombre de paramètres qu'on peut déterminer à partir de la caractéristique $I(V)$, ces paramètres sont le rendement, la tension à circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} , le facteur de forme ff .

➤ **Tension de circuit ouvert (V_{co})**

C'est la tension maximale aux bornes de la cellule à courant nul

- Elle est aux fonctions des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux.
- Pour une cellule donnée, elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, au moins pour des éclairagements supérieurs à 100 W / m^2 (ce qui correspond au rayonnement solaire sur terre d'une journée très couverte).
- On obtient cette tension en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule

➤ **Courant de court-circuit(I_{cc})**

Il correspond au courant maximum circulant dans la cellule à tension nulle

- Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclaircement $G \text{ (W / m}^2\text{)}$, à la température ambiante, à la vitesse de circulation de l'air ambiant.
- Il varie également en fonction de la surface de la cellule.
- On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule

➤ **Facteur de forme ff**

Le facteur de forme d'une cellule est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension du circuit ouvert par le courant de court-circuit. Il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.2)$$

Avec :

P_{\max} (W) : Puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV.

V_{co} (V) : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : Intensité de court – circuit mesurée à la borne de la cellule PV.

➤ **Rendement de la cellule η**

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est un paramètre essentiel. Il est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_{\max}) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G \times S} \quad (I.3)$$

Avec :

G : éclairement (W/m^2) ;

S : surface de la cellule (m^2) ;

P_{\max} : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1\,000\,W/m^2$, à la température de $25^\circ\,C$ sous un spectre AM 1,5.

Le tableau suivant présente les différents types des cellules avec leur rendement :

| Technologie de cellules | Rendement en laboratoire | Rendement production |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Silicium amorphe (a-Si) | 13% | 5-9% |
| Silicium poly-cristallin (p-Si) | 19,8% | 11 à 15% |
| Silicium monocristallin (m-Si) | 24,7% | 13 à 17% |

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [9]:

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.

- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

➤ **Facteurs de positionnement qui influent sur le rendement**

✓ **Angle d'incidence**

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux. Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90° . Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface du panneau solaire exposé aux rayons lumineux diminue et donc en partant de la puissance du panneau solaire, le rendement diminue aussi

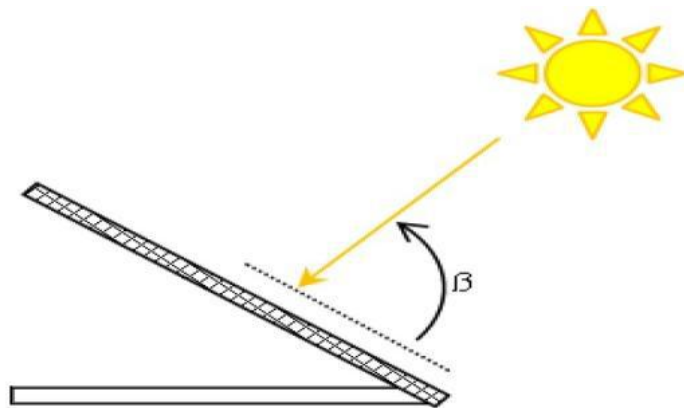


Fig. I.7: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque [12]

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) sur le module photovoltaïque. Alors que pour un angle de 45° , le rendement n'est que de 70% [12].

✓ **Angle d'inclinaison**

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale.

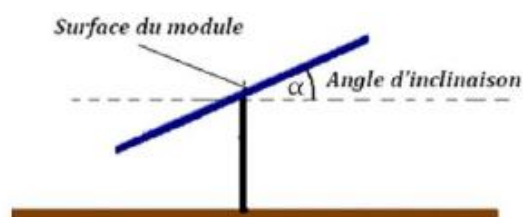


Fig. I.8: L'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques [12].

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un module photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduite en été et plus important en hiver.

I.3.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. A cause de ces propriétés électriques, le dopage est réalisé, nous permet de réaliser la jonction P-N [5].

Une cellule photovoltaïque (PV), aussi appelée photopile, est la juxtaposition de deux semi-conducteurs, l'une dopé P et l'autre dopé N. À la jonction des deux couches se forme un champ électrique. Sous un ensoleillement, les photons ou grains de lumière, venant avec une énergie suffisante entrent en collision avec les atomes. Ils parviennent à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires d'électrons-trous. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule est créée. Les grilles métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule PV collectent les électrons et les trous qui vont donc fournir à un circuit extérieur le courant électrique produit [14].

Remarque :

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

I.3.6. Effet photovoltaïque

Le mot photovoltaïque est la combinaison de deux mots : (photo), mot d'origine grec qui signifie lumière et (voltaïque), mot dérivé du physicien italien Alessandro volta qui vient de (volt) et qui représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Becquerel. Un panneau

solaire fonctionne par l'effet photovoltaïque c'est-à-dire par la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellule solaire généralement à base de silicium pour obtenir une puissance suffisante, les cellules, qu'on appelle aussi photopile ou cellule solaire, sont reliées entre elles et constituent le module solaire [1 ,2].

I.4. Module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques ou les panneaux photovoltaïques sont capables de créer un courant électrique grâce à l'énergie qu'ils reçoivent du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques appelées photons. C'est l'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par Becquerel [5].

Autrement dit le « module » photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière [2].



Fig. I.9: Différent types de module photovoltaïque [7].

La face avant du module doit être en verre et a les caractéristiques suivantes :

- Bonne transparence.
- Etanchéité à l'humidité. La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (polyéthylène) [7]

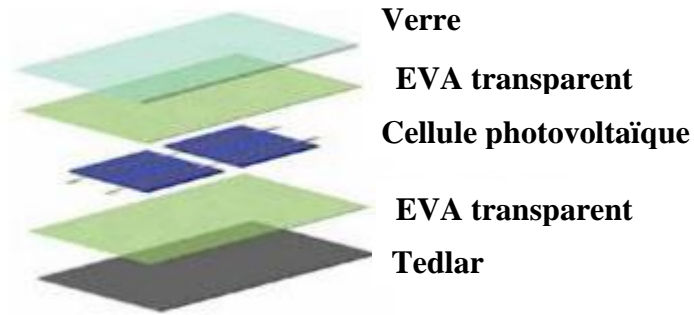


Fig. I.10: Constitution d'un module photovoltaïque [10].

- **Regroupement en série** [7]

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur. Les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du regroupement en série dans les conditions standard (1000 W/m^2 , 25°C) est obtenue par addition des tensions à courant donné.

$$V_{\text{coNs}} = N_s \cdot V_{\text{co}} \tag{I.4}$$

$$I_{\text{cc}} = I_{\text{ccNs}} \tag{I.5}$$

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

V_{coNs} : la tension de circuit ouvert de N_s cellules en série.

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

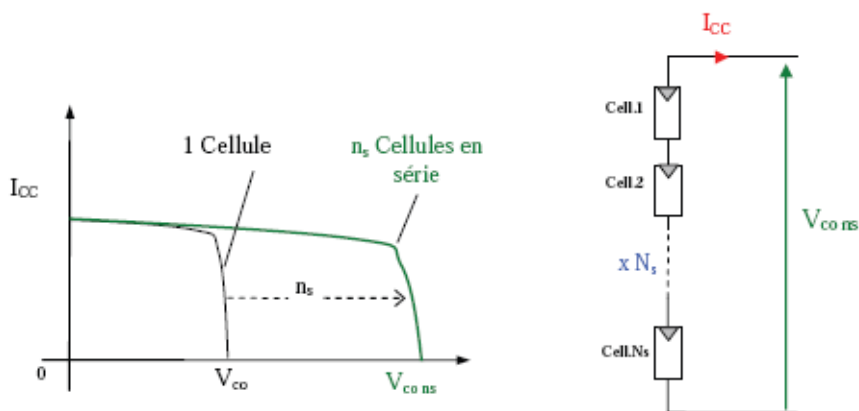


Fig. I.11 : Regroupement de cellule en série [7].

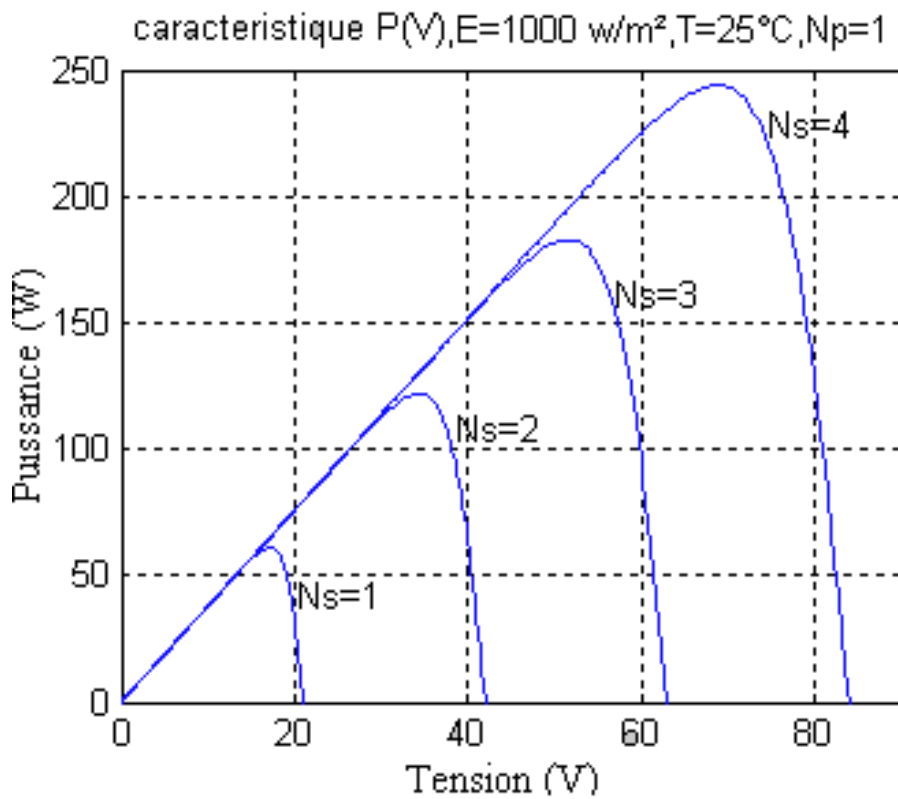


Fig. I.12: Caractéristique résulte d'un groupement de cellules en série [8].

✓ Regroupement de cellule en parallèle [7]

Un regroupement de cellules en parallèle, permet d'accroître le courant de sortie du générateur, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition du courant à tension donnée.

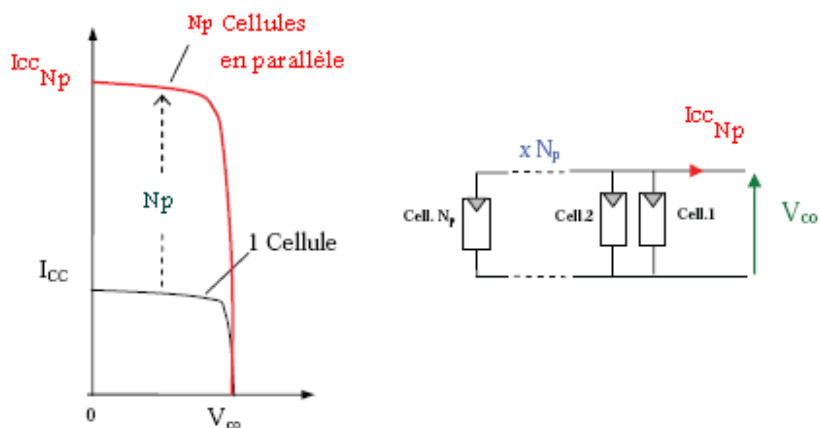


Fig. I.13 : Regroupement de cellule en parallèle.

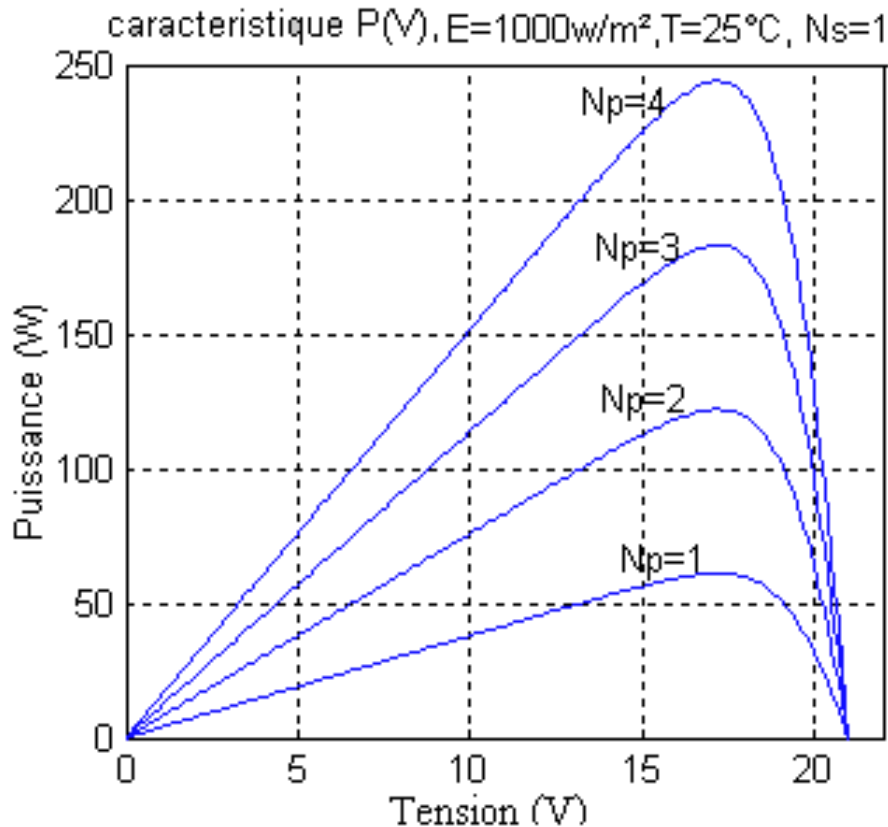


Fig. I.14: Caractéristique résulte d'un regroupement de cellule en parallèle [7].

✓ Regroupement des cellules série/parallèle

La caractéristique (V_{pv} - I_{pv}) d'un générateur solaire peut être considérée Comme le fruit d'une association d'un réseau de cellule en série/parallèle. La caractéristique globale peut, en outre, varier en fonction de l'éclairement, la température, le vieillissement [7].

Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène du point chaud. Pour remédier à ce phénomène, on équipe donc les panneaux photovoltaïques de diode by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives [8].

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle, car une cellule ne suffit pas pour alimenter une charge DC de la taille d'une station de pompage. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion du générateur photovoltaïque (GPV) [10].

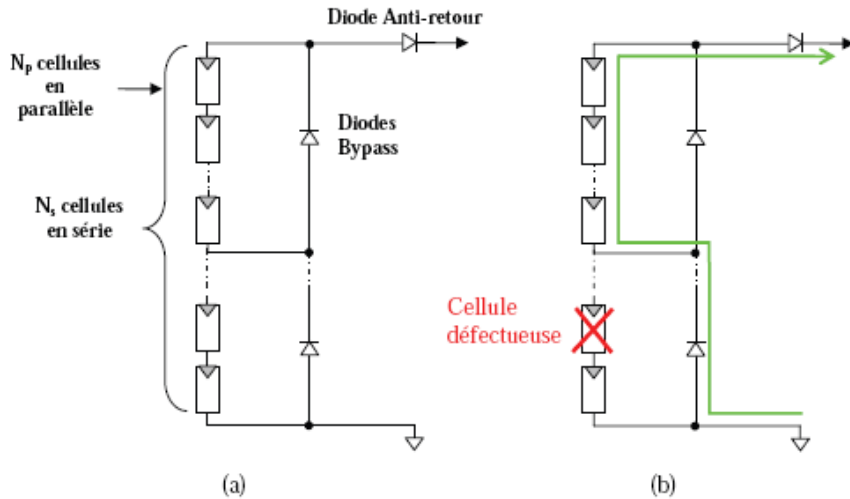


Fig. I.15 : Regroupement de cellule série/parallèle [7].

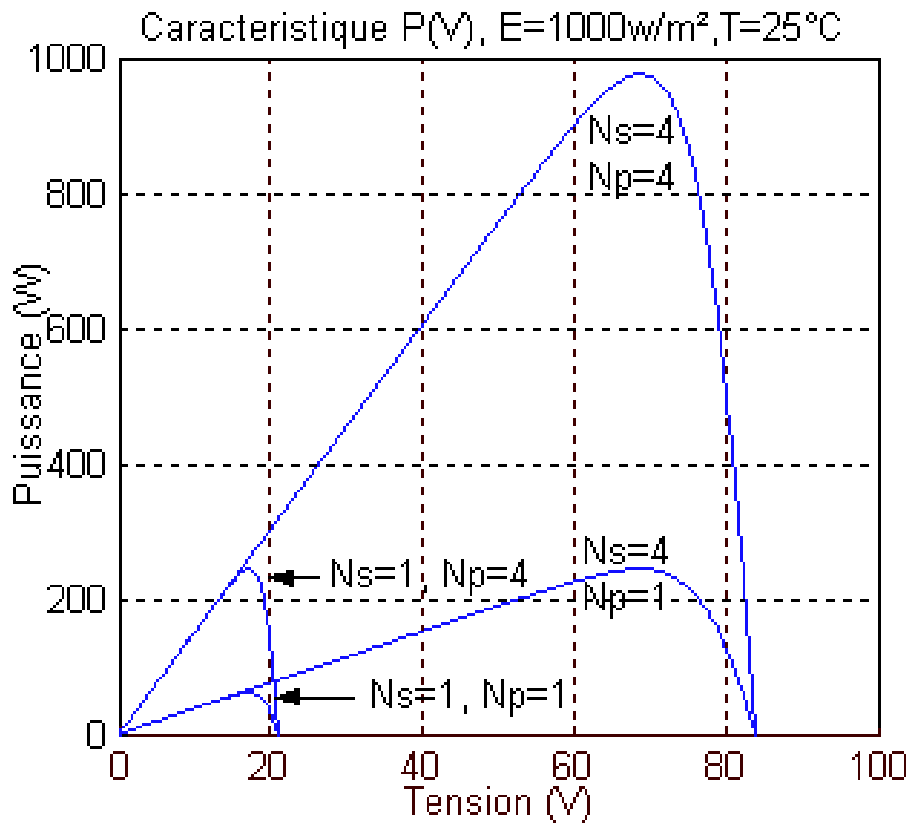


Fig. I.16: Regroupement série et parallèle [8].

I.4.1. Types de contrôle d'un panneau photovoltaïque

Il existe deux types de contrôle d'un panneau solaire :

❖ Contrôle direct

Le contrôle direct consiste à contrôler la tension ou le courant à la sortie du panneau PV en utilisant un algorithme MPPT dont on fait varier la tension en variant le rapport cyclique alpha (α), pour faire fonctionner le système autour du point du puissance maximale et d'un convertisseur DC/DC pour élever la tension.

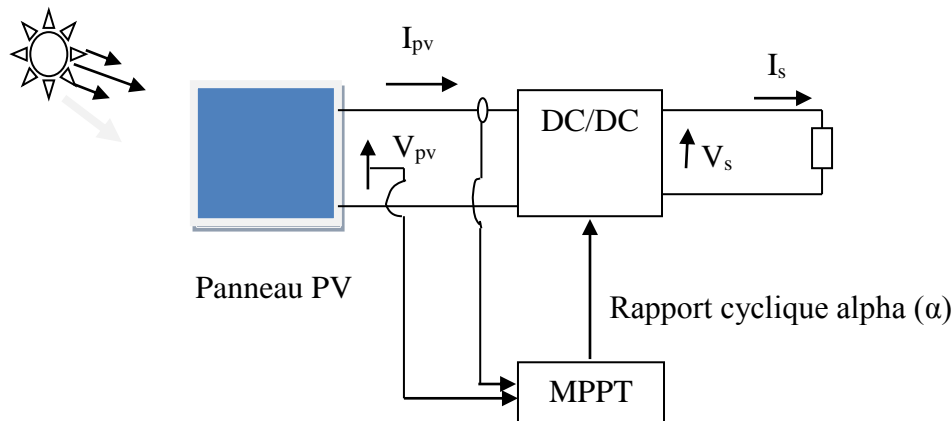


Fig. I.17 : Système photovoltaïque contrôlé directement.

❖ Contrôle indirect

Le contrôle indirect consiste à contrôler la tension ou le courant à la sortie du panneau PV à l'aide d'un algorithme MPPT et d'un régulateur proportionnel intégral (PI) dont on variant la tension pour obtenu le point de puissance maximale et d'un convertisseur DC/DC pour élever la tension pour qu'elle puisse alimenter la charge.

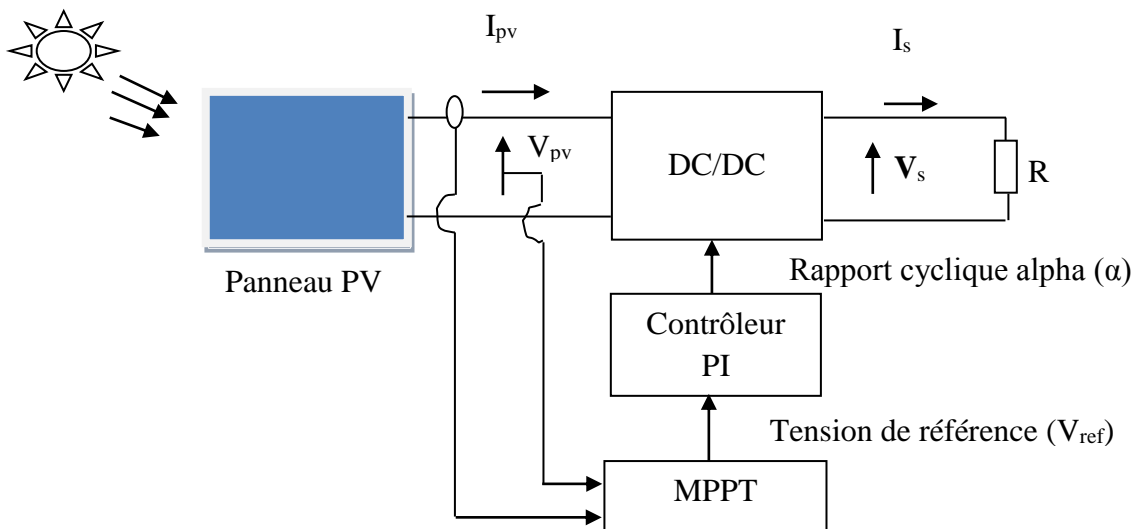


Fig. I.18 : Système photovoltaïque contrôlé indirectement.

I.4.2. Classification des systèmes photovoltaïques

L'électricité photovoltaïque (énergie photovoltaïque) ainsi produite peut-être injectée dans le réseau électrique général pour être utilisée ailleurs, ou stockée dans des batteries pour servir à des moments où il n'y a plus de soleil.

a) Système isolé ou autonome

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique [4].

a.1. Système de stockage

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques dépend énormément des conditions météo-logiques. En générale, les composants utilisés pour le stockage dans les systèmes photovoltaïques autonomes sont les batteries [2].

Il existe plusieurs types de batteries de stockage :

- Les accumulateurs au plomb (très utilisés)
- Les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).

a.1.1. Rôle de la batterie

La batterie sert à stocker l'énergie électrique produite par le ou les panneaux solaires. Cette énergie est stockée sous forme chimique.

La nuit, c'est la batterie qui fournit l'énergie. Le stockage est dimensionné pour une durée de plusieurs jours consécutifs sans soleil, permettant d'avoir une large plage de secours, prenant ainsi en compte les phénomènes de durée de vie et de perte de capacité liée au cyclage (charge et décharge) [11].

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.



Fig. I.19: Exemple d'un système photovoltaïque isolé. [12]

b) Système raccordé au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

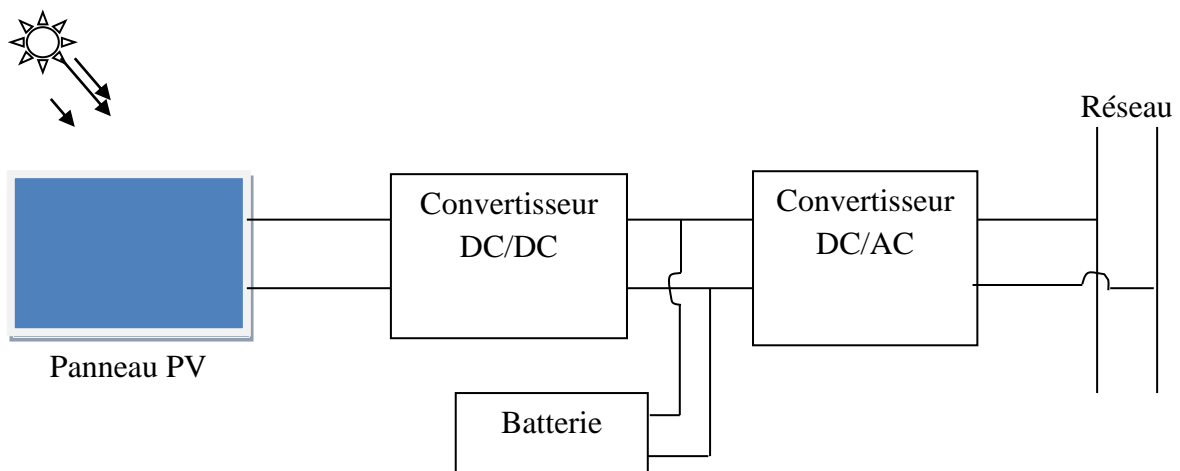


Fig. I.20: Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.5. Avantages et inconvénients du photovoltaïque

❖ Avantages du photovoltaïque

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.

- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

❖ **Inconvénients du photovoltaïque**

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 %
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an [10].

I.6. Conclusion

Pour ce premier chapitre on a pu comprendre que les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque.

Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

Dans le chapitre prochain, on présentera les différents composants du panneau solaire IFRI 260/60 et on les modélisera.

Chapitre II :

Modélisation d'un panneau photovoltaïque

II.1. Introduction

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteur dans la plupart des cas le silicium [22].

Actuellement l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité sans pollution, et pour cela des recherches ont été effectuées pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV donc il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément et pour cette raison plusieurs modèles électrique ont été proposés pour présenter la cellule photovoltaïque ; la cellule PV fondamentalement est représentée par deux modèles différents : modèle à une diode (exponentiel simple) et modèle à deux diodes (double exponentiels).

Dans ce chapitre on s'intéressera au modèle avec une seule diode où on traitera le modèle d'une cellule idéal dans un circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque que nous utiliserons pour la modélisation de notre module photovoltaïque IFRI 260-60, ensuite nous aborderons ses caractéristiques électriques (I-V et P-V).

Ensuite on traitera l'influence de la température et l'éclairement sur les caractéristiques (I-V et P-V), à la fin, on terminera par une brève conclusion.

II.2. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle à une diode établie par Shocky pour une seule cellule PV [21]. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant/tension une exponentielle de moins.

II.2.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [20]

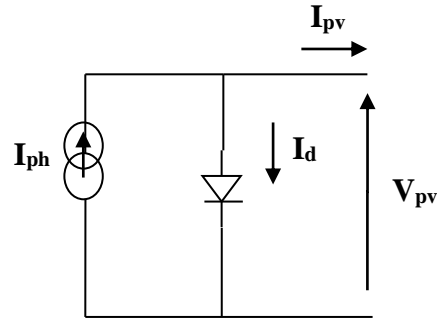


Fig. II.1: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (Modèle idéal).

Les équations qui caractérisent ce modèle sont :

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

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

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

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V_d}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

I_s : courant de saturation en Ampère.

V_d : tension à la borne de la diode.

V_t : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_t = \frac{K T_c}{q} \quad (\text{II.3})$$

T_c : est la température absolue

q : la charge d'un électron, -1.602×10^{-19} C.

K : la constante de Boltzmann, 1.38×10^{-23} J/K.

Le courant débit équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv}}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions réelles il existe d'autres modèles qui rendent compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

I.2.2. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (Fig. II.2) qui se compose d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [18].

❖ Remarque :

- R_s : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts

(Semi-conducteur, électrodes).

- R_{sh} : Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'au non idéalité de la jonction.

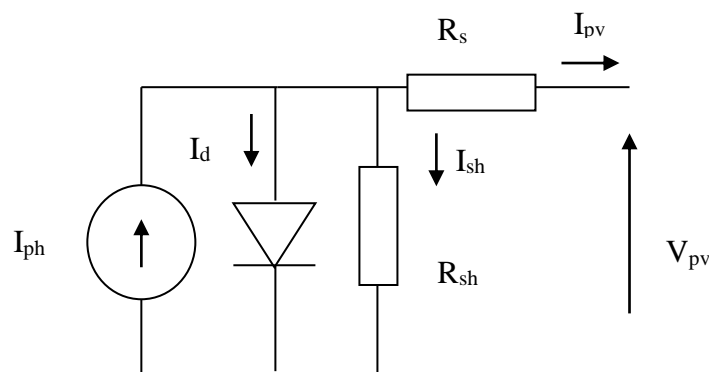


Fig. II.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque (Modèle pratique).

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.5)$$

Le courant photonique est :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i(T - 298)) \frac{G}{1000} \quad (II.6)$$

Le courant dans la diode est :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (II.7)$$

$$I_s = \frac{I_{cc} + K_i \Delta T}{\exp \left(\frac{(V_{co} + K_v \Delta T) q}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1} \quad (II.8)$$

Avec

K_i : coefficient de la correction du courant = 0.0058A/K.

K_v : coefficient de la correction de la tension = -0.33V/K.

$$\Delta T = T - T_n \quad (II.9)$$

Avec : $T_n = 25^\circ\text{C}$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (II.11)$$

Une cellule photovoltaïque seule ne peut pas fournir suffisamment de puissance afin d'alimenter une charge ou un réseau électrique. Il convient donc d'associer ces cellules entre elles dans le but de fournir plus de puissance. Une association en série augmentera la tension de sortie du panneau solaire tandis qu'une association en parallèles augmentera le courant fourni à la charge. Il est alors nécessaire d'introduire le paramètre N_s qui représente le nombre de cellule en série l'expression de I_{pv} devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot T \cdot N_s} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (II.12)$$

II.3. Choix du module photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons choisis le module photovoltaïque de type **IFRI 260-60**.

Il est constitué d'une mise en série de 60 cellules photovoltaïques. Ainsi nous donnons les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque mesurées dans les conditions standard (éclairage de 1000 W/m^2 , Température de la cellule : 25°C) utilisées dans cette étude.

Tableau 1. Caractéristiques électriques du module **IFRI 260-60** choisi pour la modélisation :

| Grandeurs | Valeurs |
|--|---------|
| Nombre de cellule en série (N_s) | 60 |
| Puissance maximale (P_{max}) | 260 W |
| Courant de court-circuit (I_{cc}) | 8.65 A |
| Tension du circuit ouvert (V_{co}) | 38.1 V |
| Courant au point de MPP (I_{mp}) | 8.1 A |
| Tension au point de MPP (V_{mp}) | 32.05 V |

Pour résoudre les équations précédentes on utilise Matlab-simulink :

Le schéma simulink suivant représente le bloc simulink d'un modèle IFRI 260-60 :

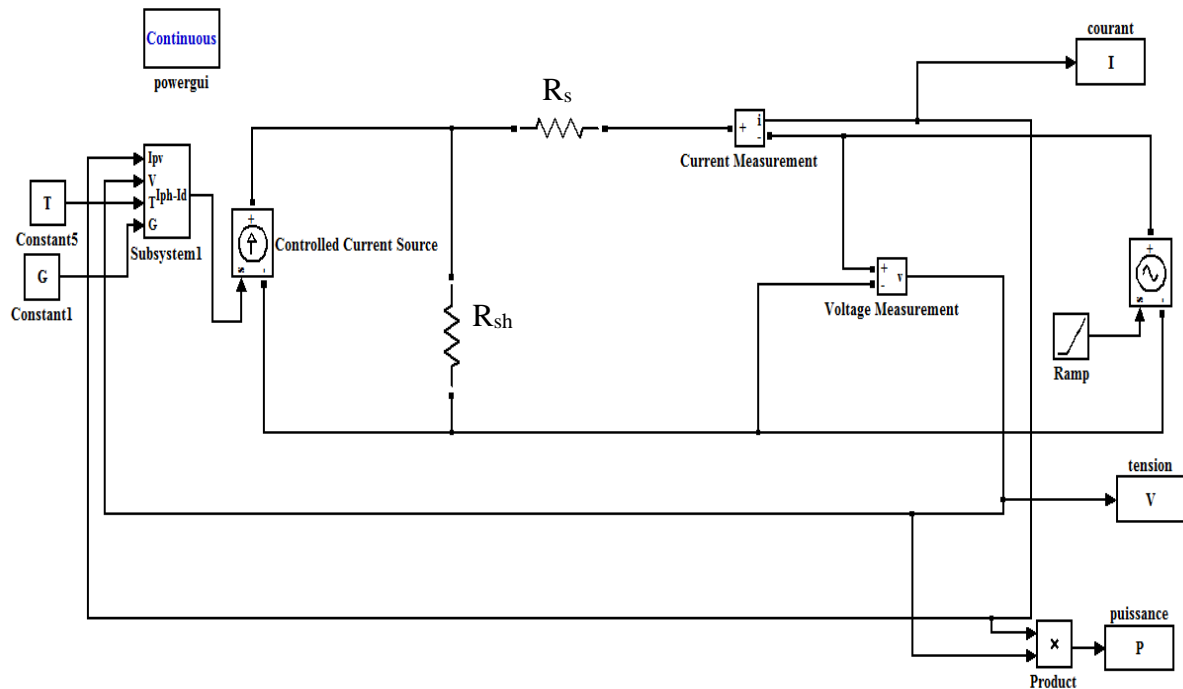


Fig. II.3 : Schéma Simulink du panneau IFRI 260-60.

❖ Les paramètres de simulation de la cellule sont donnés dans le tableau suivant :

| Grandeurs | Valeurs |
|---|-----------------|
| Résistance série R_s | 0.131 Ω |
| Résistance parallèle R_p | 199.59 Ω |
| n | 1.04 |
| Coefficient de correction du courant K_i | 0.0058 A/K |
| Coefficient de correction de la tension K_v | -0.33 V/K |

II.4. Les résultats de la simulation

Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats de la simulation du panneau IFRI 260-60 présenté avec un schéma simulink dans la figure II.3, après avoir donné les

caractéristiques du module PV, nous allons présenter les courbes qui donnent l'influence de la température et de l'éclairement sur ses caractéristiques.

II.4.1. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV IFRI 260-60

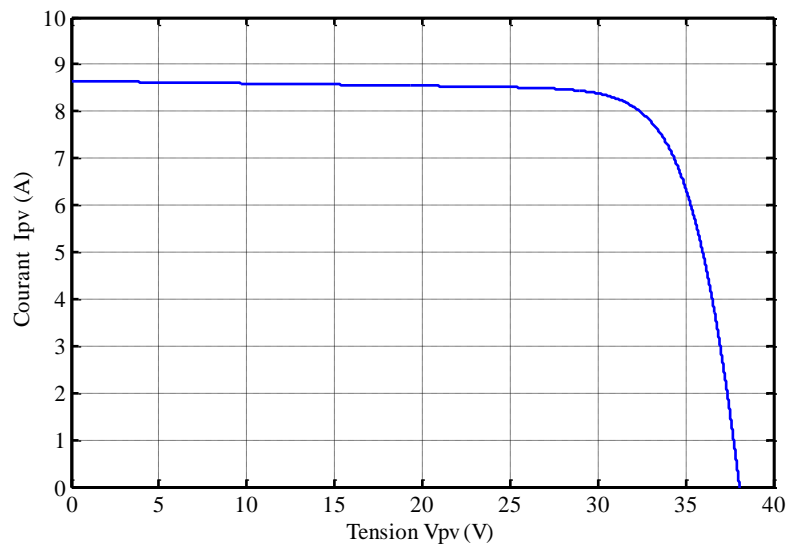


Fig. II.4 : Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque IFRI 260-60.

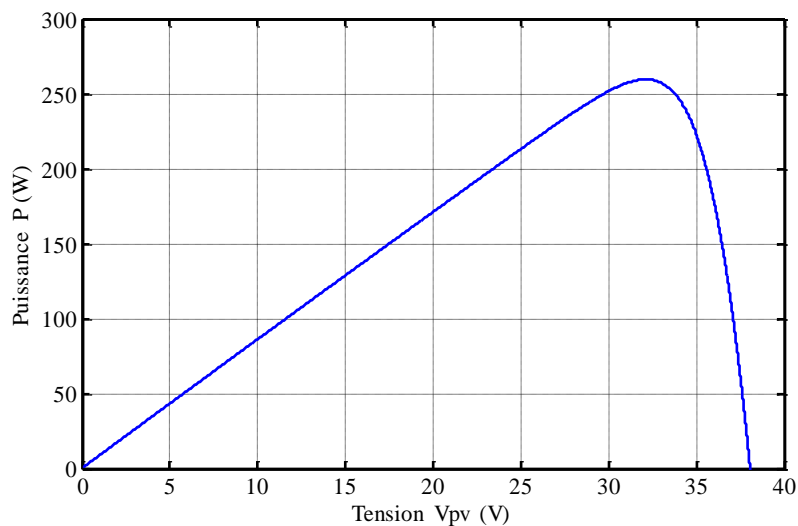


Fig. II.5 : Caractéristique P(V) d'un module photovoltaïque IFRI 260-60.

➤ La figure II.4 présente la variation du courant du module en fonction de la tension à une température et un éclairement standard (25°C et $1000\text{W}/\text{M}^2$). On note que le courant reste constant à la valeur du court-circuit qui est $I_{cc}=8.65\text{A}$, puis il diminue jusqu'à son annulation où la valeur de la tension égale à la tension de circuit ouvert d'un module PV IFRI 260-60, $V_{co}=38.1\text{V}$.

➤ La figure II.5 présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température et éclairement standard (25°C et 1000 W/M^2), on note que la puissance augmente jusqu'à sa valeur maximale $P_{\text{max}}=260\text{W}$ puis elle diminue jusqu'à son annulation.

II.5. Influence de l'éclairement et de la température

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentés par les figures II.6, 7, 8 et 9. Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents éclairements et différentes températures.

a) Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température [23].

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($G=1000\text{W/m}^2$) et en faisant varier la température de 15°C à 60°C avec un pas de 5°C , les caractéristiques $I_{\text{pv}}=f(V_{\text{pv}})$ et $P=f(V_{\text{pv}})$ sont données par les figures (II.6 et II.7).

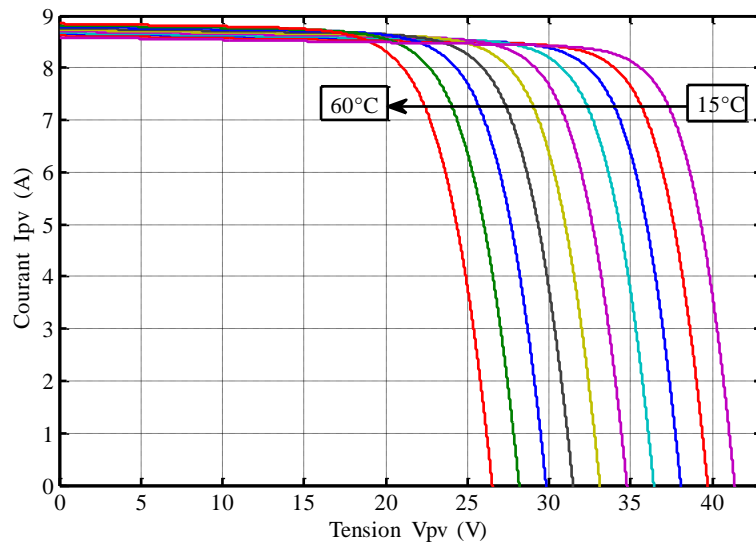


Fig. II.6 : Influence de la température sur la caractéristique I(V).

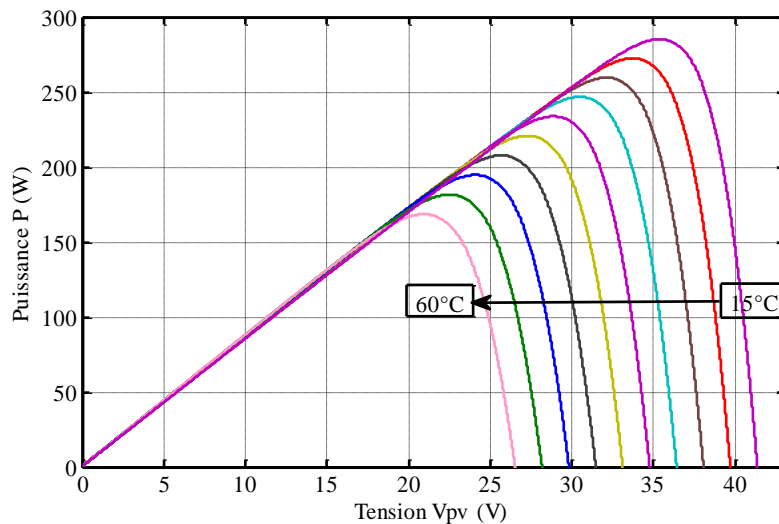


Fig. II.7 : Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$.

On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale (figures II.6 et 7).

b) Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. En faisant varier l'éclairement entre 100 W/m^2 et 1000 W/m^2 avec un pas de 100, les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P=f(V_{pv})$ sont données par les figures (Fig. II .8 et Fig. II.9)

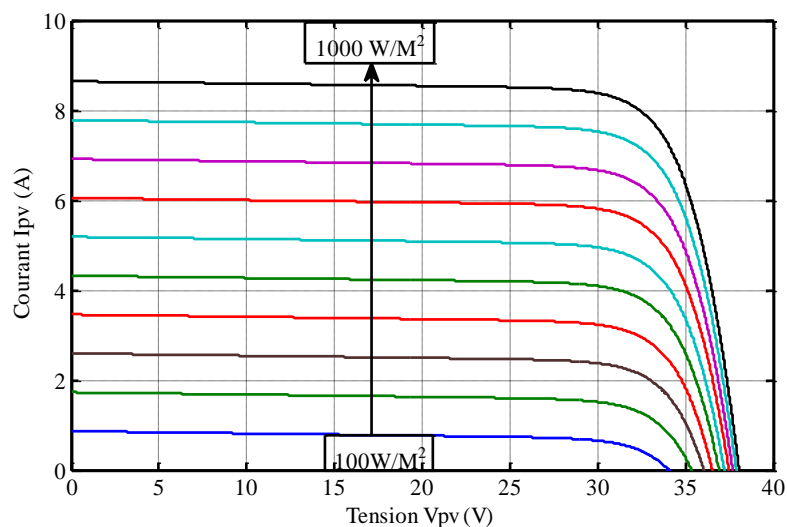


Fig. II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$.

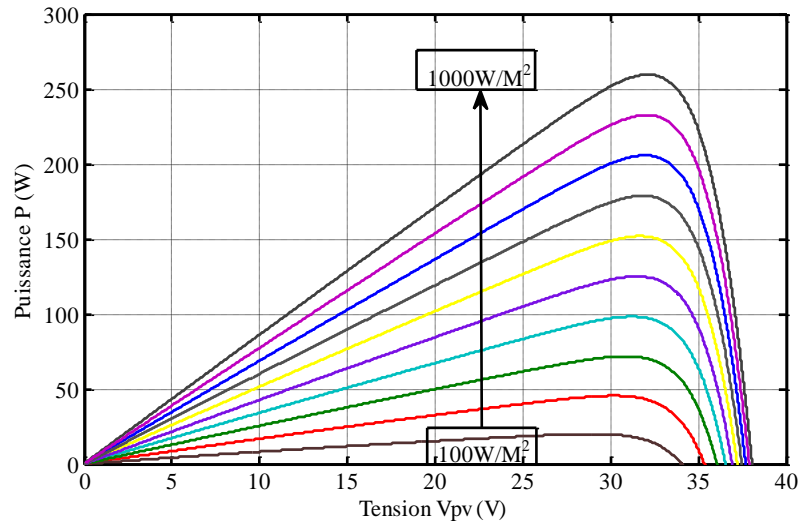


Fig. II.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

Contrairement au cas précédent, lorsque nous avons maintenu une température constante (25°C) à différents éclairements. On remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement [3].

❖ **Remarque :**

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . [27]

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. En revanche, il est à noter qu'étant donné les faibles rendements de conversion de l'énergie des photons en électricité la température interne du générateur PV augmente considérablement sous l'action du rayonnement solaire. Cette température de fonctionnement se stabilise naturellement à l'aide principalement de la convection naturelle autour des faces supérieures et inférieures du module [24]. Si le module ne peut pas être correctement refroidi, dû par exemple à la présence d'isolant en face arrière, la stabilisation thermique se rapproche des 60°C , mais dégrade considérablement le rendement de la photo conversion [24,25].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les deux modèles électriques caractérisant la cellule PV avec une seule diode. Nous avons aussi présenté la modélisation d'une cellule PV d'un panneau photovoltaïque, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Convertisseur DC/DC et la commande MPPT

III.1. Introduction

Les caractéristique I-V et P-V du module photovoltaïque montre que la puissance maximale dépend de l'éclairement et de la température. En plus le module ne peut fournir une puissance maximale que pour un point de fonctionnement qui correspond à une certaine tension et courant où la position de ce point de fonctionnement dépend de l'ensoleillement et de la température.

Dans cette partie nous allons étudier le convertisseur DC/DC de type Boost en suite on étudiera les différentes techniques à suivre pour la recherche du point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque où on utilisera la commande MPPT.

L'objectif principal de notre travail est de trouver et appliquer un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV).

Ce chapitre aborde aussi contrôle indirecte de la tension à la sortie du l'algorithme MPPT (V_{ref}), alors on injectera un régulateur de type proportionnel intégral (PI) où on définira ses paramètres après avoir linéariser le modèle d'état du hacheur, ainsi, à partir du système des données simulées sur l'environnement MATLAB, on pourra déduire la fonction de transfert du système, et à l'aide du diagramme de Bode on trouvera les paramètres du régulateur PI.

III.2. Convertisseurs DC-DC

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu par le rapport cyclique avec une très grande souplesse et un rendement élevé [1].

Le hacheur se compose d'un condensateur, d'une inductance et d'un interrupteur commandable. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [1].

Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [29].

Il existe trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités.

III.2.1. Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur élévateur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (III.1). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [30].

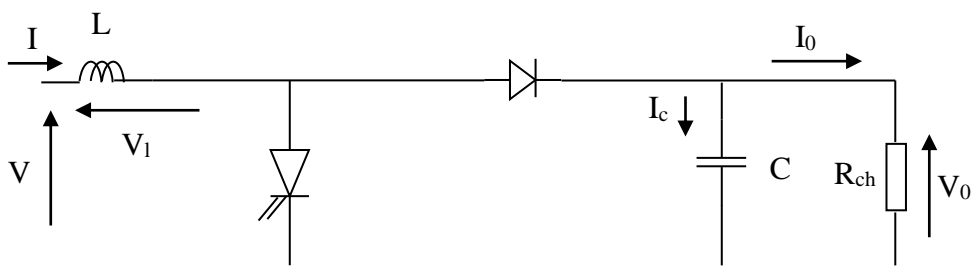


Fig.III.1 : Circuit électrique du convertisseur boost.

Paramètres du hacheur Boost :

| Paramètres | Valeurs |
|-----------------|----------|
| L | 0.01 H |
| C | 0.0033 F |
| R _{ch} | 220 Ω |

III.3. Modélisation d'un hacheur survolteur

Après l'application de la loi de Kirchhoff sur le circuit équivalent du hacheur survolteur dans les deux périodes de fonctionnement (lorsque la diode passante ou bloquée) on trouve les équations suivantes :

Lorsque la diode bloquée αT

$$\begin{cases} I_c = C \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \\ V_L = L \frac{dI}{dt} = V \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Lorsque la diode passante $(1 - \alpha)T$

$$\begin{cases} I_c = C \frac{dV_0}{dt} = I - I_0 \\ V_L = L \frac{dI}{dt} = V - V_0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T, on utilise généralement l'expression suivante [28] :

$$\left\langle \frac{dX}{dt} \right\rangle_T = \frac{dX}{dt}_{\alpha T} \alpha T + \frac{dX}{dt}_{(1-\alpha)T} (1 - \alpha) T \quad (\text{III.3})$$

Où $\left\langle \frac{dX}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de X sur la période T.

En appliquant la relation (III.3) sur les deux systèmes (III.1) et (III.2) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$C \frac{dV_0}{dt} T = -I_0 \alpha T + (I - I_0)(1 - \alpha) T \quad (\text{III.4})$$

$$L \frac{dI}{dt} T = V \alpha T + (V - V_0)(1 - \alpha) T \quad (\text{III.5})$$

Après l'arrangement on obtient :

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} = V + (1 - \alpha) V_0 \\ C \frac{dV_0}{dt} = (1 - \alpha) I - I_0 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (\text{III.7})$$

Donc :

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} - \frac{V_0}{L} (1 - \alpha) \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{(1 - \alpha) I}{C} - \frac{V_0}{RC} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

III.4. Dimensionnement du régulateur PI

On utilise un correcteur proportionnel intégral PI pour régler la tension en agissant sur le rapport cyclique alpha pour qu'elle soit optimale dont la fonction de transfert de ce régulateur est défini comme suit :

$$C(p) = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (\text{III.9})$$

Où :

K_{pi} : est le gain de l'action proportionnel.

T_i : est la constante de temps de l'action intégrale.

Remarque : Le correcteur de type PI :

- Améliore la précision ;
- Mais
- Diminue la stabilité et ralentit le système [31].

La poursuite du point de puissance maximale nécessite une correction afin que la tension délivrée par le panneau soit optimale. Alors on suivra une succession d'étapes qui nous permettra de trouver ce point :

- Linéariser le modèle du hacheur Boost autour d'un point d'équilibre
- Déterminer la fonction de transfert de notre système
- Calculer les paramètres du régulateur proportionnel et intégral (T_i et K_{pi})
- Utiliser l'algorithme P&O qui permet la poursuite du point de puissance maximale même lors des variations de la température et de l'éclairement.

Diagramme fonctionnel

La figure III.2 traduit la représentation graphique souvent employée pour illustrer les systèmes dynamiques. Une telle représentation est appelée schéma-bloc ou diagramme fonctionnel du système dont la fonction de transfère correspondante est $G(p)$ [32].

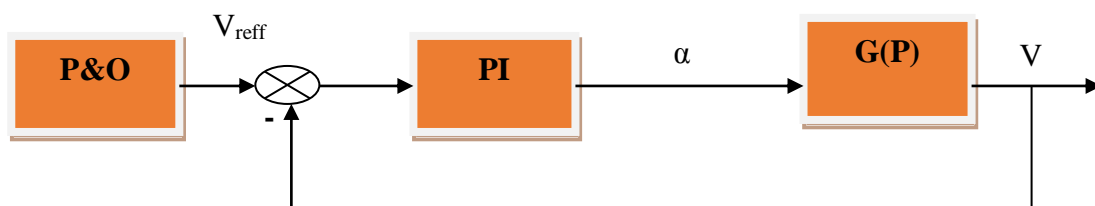


Fig.III.2 : Schéma de la commande avec le régulateur PI.

III.4.1. Linéarisation du modèle d'état du hacheur autour d'un point d'équilibre

Pour linéariser le modèle d'état de notre hacheur autour d'un point d'équilibre, il faut d'abord étudier le point d'équilibre du modèle d'état de hacheur.

On a les équations du hacheur survolteur :

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} - \frac{V_0}{L}(1-\alpha) \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{(1-\alpha)I}{C} - \frac{V_0}{RC} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

En régime permanent :

$$\begin{cases} 0 = \frac{\bar{V}}{L} - \frac{\bar{V}_0}{L}(1-\bar{\alpha}) \\ 0 = \frac{(1-\bar{\alpha})\bar{I}}{C} - \frac{\bar{V}_0}{RC} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Dont :

\bar{V} : La tension d'entrée du hacheur à l'équilibre.

\bar{I} : Le courant d'entrée du hacheur à l'équilibre.

$\bar{\alpha}$: Le rapport cyclique à l'équilibre.

\bar{V}_0 : La tension à la sortie du hacheur à l'équilibre.

Après le développement d'équation en régime permanent on obtient les résultats suivants :

$$\bar{V}_0 = \frac{\bar{V}}{(1-\bar{\alpha})} \quad (\text{III.12})$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{R(1-\bar{\alpha})} \quad (\text{III.13})$$

En remplaçant (III.11) dans (III.12) on obtient le point d'équilibre du modèle du hacheur :

$$\begin{cases} \bar{V}_0 = \frac{\bar{V}}{(1-\bar{\alpha})} \\ \bar{I} = \frac{\bar{V}}{R(1-\bar{\alpha})^2} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Pour linéariser le modèle d'état du hacheur autour du point d'équilibre obtenu on utilise alors un développement limité de Taylor à l'ordre 1 :

$$\frac{d\Delta x}{dt} = \dot{\Delta x} = \frac{\partial f}{\partial V_0} \Delta V_0 + \frac{\partial f}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \Delta \alpha \quad (\text{III.15})$$

Après un calcul immédiat le système linéarisé s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{\Delta I} = -\frac{1}{L}(1-\bar{\alpha})\Delta V_0 + \frac{\bar{V}_0}{L}\Delta \alpha \\ \dot{\Delta V}_0 = \frac{(1-\bar{\alpha})}{C}\Delta I - \frac{\bar{I}}{C}\Delta \alpha - \frac{1}{RC}\Delta V_0 \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Pour calculer la fonction de transfert du système précédent $G(p)$, il faut d'abord calculer les fonctions de transferts $\Delta I(p)/\Delta \alpha(p)$ et $\Delta I(p)/\Delta V(p)$ du système photovoltaïque.

- **Calcul de $\Delta I(p)/\Delta \alpha(p)$**

Pour obtenir la fonction de transfert $\Delta I(p)/\Delta \alpha(p)$ il faut passer par la transformé de Laplace de (III.15) Ce qui nous donne :

$$p\Delta I = -\frac{1}{L}(1-\bar{\alpha})\Delta V_0 + \frac{\bar{V}_0}{L}\Delta \alpha \quad (\text{III.17})$$

$$p\Delta V_0 = \frac{(1-\bar{\alpha})}{C}\Delta I - \frac{\bar{I}}{C}\Delta \alpha - \frac{1}{RC}\Delta V_0 \quad (\text{III.18})$$

Après calcul on obtient :

$$\Delta V_0 = \frac{R(1-\bar{\alpha})}{RCp+1}\Delta I - \frac{R\bar{I}}{RCp+1}\Delta \alpha \quad (\text{III.19})$$

En remplaçant (III.18) dans (III.16) on aura :

$$\frac{\Delta I(p)}{\Delta \alpha(p)} = \frac{2\bar{V}}{R(1-\bar{\alpha})^3} \frac{\left(1 + \frac{RC}{2}p\right)}{\frac{LC}{(1-\bar{\alpha})^2}p^2 + \frac{L}{R(1-\bar{\alpha})^2}p + 1} \quad (\text{III.20})$$

- Calcul de $\Delta I(p)/\Delta V(p)$

Le calcul de la fonction de transfert $\Delta I(p)/\Delta V(p)$ nécessite l'utilisation l'équation du courant I_{pv} qui caractérise le module photovoltaïque suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{a \cdot K \cdot T \cdot N_s} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III.21})$$

En utilisant alors le développement limité de Taylor l'ordre 1 :

$$\Delta I = \frac{\partial f}{\partial V_{pv}} \Delta V_{pv} \quad (\text{III.22})$$

On obtient :

$$\Delta I = - \left[\frac{I_0 \cdot q}{a \cdot K \cdot T \cdot N_s} \exp \left(\frac{q \cdot \bar{V}}{a \cdot K \cdot T \cdot N_s} \right) + \frac{1}{R_{sh}} \right] \Delta V \quad (\text{III.23})$$

Remarque :

Lorsque $\bar{V} \gg R_s \cdot I$ ($R_s = 0.131 \Omega$) on peut négliger le terme $R_s \cdot I$

Après l'application de la transformé de la place on obtient :

$$\frac{\Delta I(p)}{\Delta V(p)} = - \left[\frac{I_0 q}{a \cdot K \cdot T \cdot N_s} \exp \left(\frac{q \bar{V}}{a \cdot K \cdot T \cdot N_s} \right) + \frac{1}{R_{sh}} \right] \quad (\text{III.24})$$

En remplaçant (III.23) dans (III.19) on obtient la fonction de transfert $G(P)$ sous forme :

$$\frac{\Delta V(p)}{\Delta \alpha(p)} = G(p) = \frac{b_0 + b_1 p}{1 + a_1 p + a_2 p^2} \quad (\text{III.25})$$

Dont :

$$b_0 = - \left[\frac{q I_s}{N_s \cdot a \cdot K \cdot T} \exp \left(\frac{q \bar{V}}{N_s \cdot a \cdot K \cdot T} \right) + \frac{1}{R_{sh}} \right]^{-1} \frac{2 \bar{V}}{R (1 - \bar{\alpha})^3} \quad (\text{III.26})$$

$$b_1 = - \left[\frac{qI_s}{Ns.a.K.T} \exp\left(\frac{q\bar{V}}{Ns.a.K.T}\right) + \frac{1}{Rsh} \right]^{-1} \frac{\bar{V}C}{(1-\bar{\alpha})^3} \quad (\text{III.27})$$

$$a_1 = \frac{L}{R(1-\bar{\alpha})^2} \quad (\text{III.28})$$

$$a_2 = \frac{LC}{(1-\bar{\alpha})^2} \quad (\text{III.29})$$

On a obtenu les valeurs à l'équilibre à l'aide de Matlab-simulink pour les valeurs de la température $T = 25^\circ\text{C}$ et d'éclairement $G = 500\text{W/m}^2$:

$$\bar{V} = 31.6\text{V} ; \bar{I} = 3.96\text{A} ; \bar{\alpha} = 0.8 ; I_s = 4.082 \times 10^{-10}$$

En utilisant les valeurs numérique calculées, on a obtenu la fonction de transfert suivante :

$$G(p) = \frac{-134.7p - 371.2}{0.0825p^2 + 0.1136p + 1} \quad (\text{III.30})$$

On remarque que $G(p)$ est instable (elle a un zéro négatif) il faut multiplier par (-1) pour enlever l'instabilité de $G(p)$ donc elle devient stable.

Remarque : quand on multiplie la fonction de transfert $G(p)$ par (-1) donc on soustrait 180° à la phase

III.4.2. Calcul des paramètres du régulateur PI (K_{pi} et T_i)

Dans cette partie on utilise le diagramme de Bode pour dimensionner le régulateur PI.

III.4.2.1. Diagramme de Bode

Le diagramme de Bode permet de représenter sous forme graphique le gain en dB ($G = 20 \log |H(j\omega)|$) et la phase ($\varphi = \text{Arg}(H(j\omega))$) d'une fonction de transfert, en fonction de ω . Son nom vient de l'inventeur de ce diagramme, Hendrik Wade Bode ; Il permet de voir le comportement d'un filtre ou d'un système asservi linéaire.

- **Tracé du diagramme de Bode pour $G(p)$**

Premièrement on trace le diagramme de Bode de $G(p)$

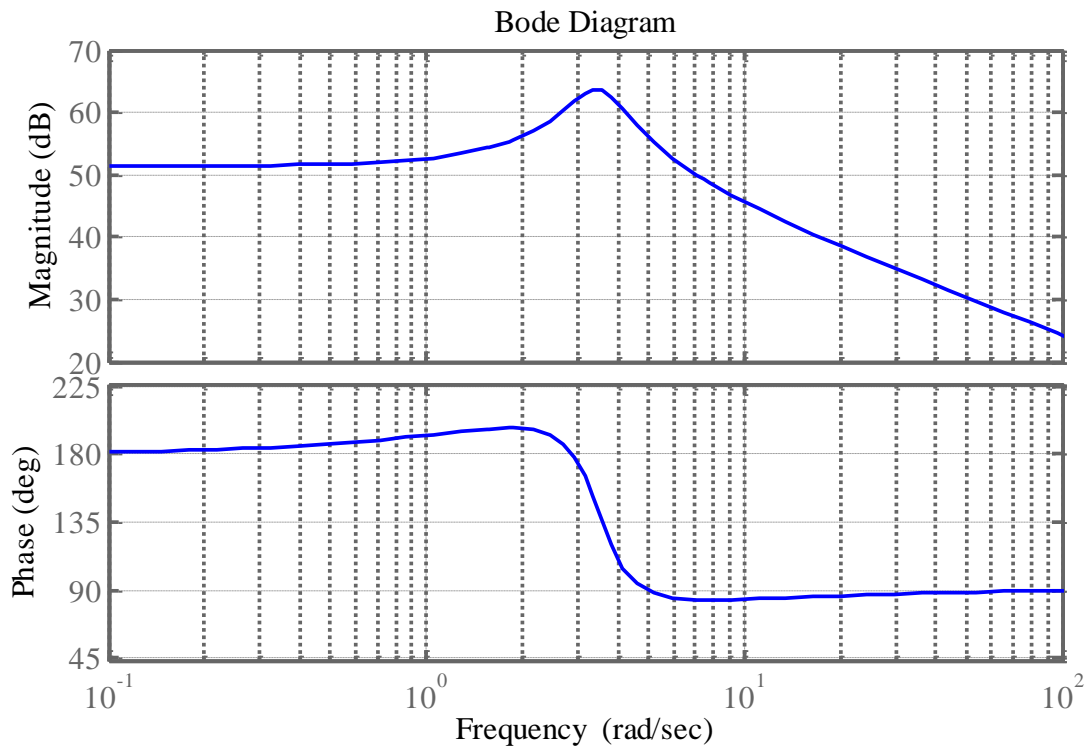


Fig.III.3 : Diagramme de Bode de la fonction du transfert du système $G(p)$.

On remarque que la marge de phase est positive donc $G(p)$ instable. Donc il faut multiplier $G(p)$ par (-1) en suite on trace diagramme de Bode pour $-G(p)$.

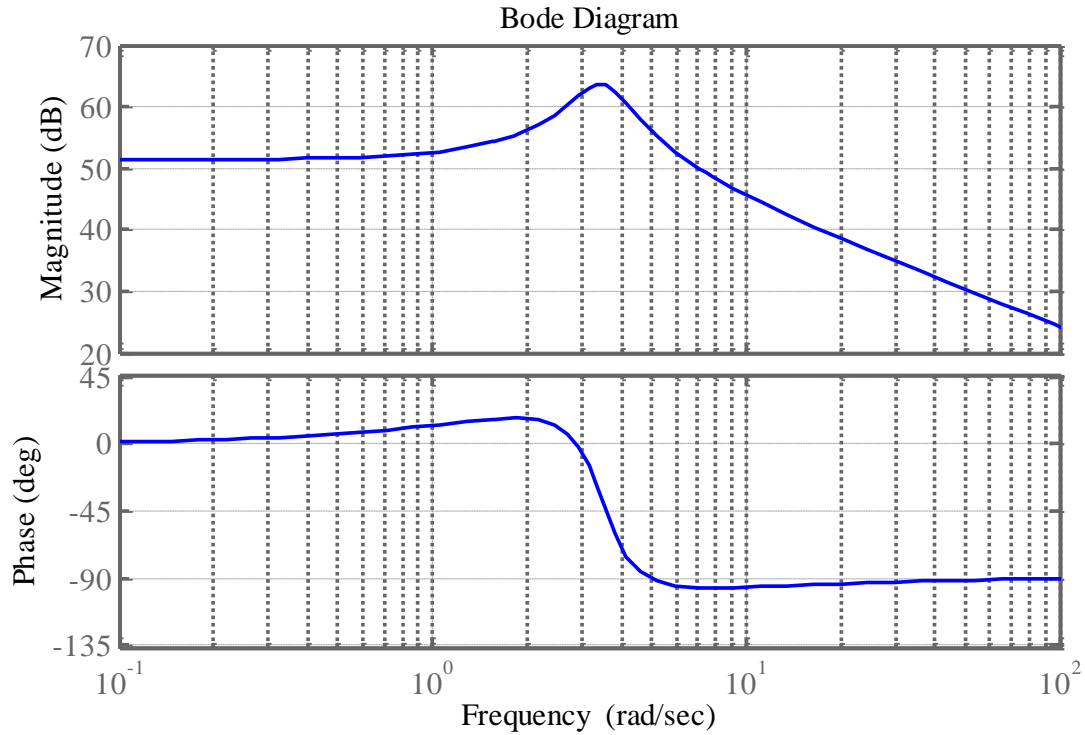


Fig. III.4 : Diagramme de Bode pour la fonction de transfert $-G(p)$.

D'après la figure précédente Fig.III.4 la marge de phase a diminué de 180° et elle est négative donc la fonction de transfert est stable.

On a imposé une fréquence de coupure égale à $W_C=32$ rad/sec et pour assurer que le correcteur ne vient pas détruire la marge de phase, on impose une constante de temps d'intégration T_i égal à $10/W_C$.

Par conséquent on obtient :

$$T_i=10/32=0.3125 \text{ s}$$

Il reste donc à déterminer le gain K_{pi} du régulateur PI, et pour le faire il faut calculer la fonction de transfert $H(p)$

$$H(p) = C(p) \times G(p) \quad (\text{III.31})$$

Si on tient pas compte de gain K_{pi} , alors :

$$H(p) = \frac{T_i p + 1}{T_i p} \times \frac{b_0 + b_1 p}{1 + a_1 p + a_2 p^2} \quad (\text{III.32})$$

Donc :

$$H(p) = \frac{T_i b_1 p^2 + (T_i b_0 + b_1) p + b_0}{T_i a_2 p^3 + T_i a_1 p^2 + T_i p} \quad (\text{III.33})$$

Après avoir fait rentrer toutes les données dans Matlab-Simulink on a obtenu la fonction de H(p) suivante :

$$H(p) = \frac{-42.11p^2 - 250.7p - 371,2}{0.02578p^3 + 0.03551p^2 + 0,3125p} \quad (\text{III.34})$$

- **Tracé du diagramme de Bode pour (-H(p))**

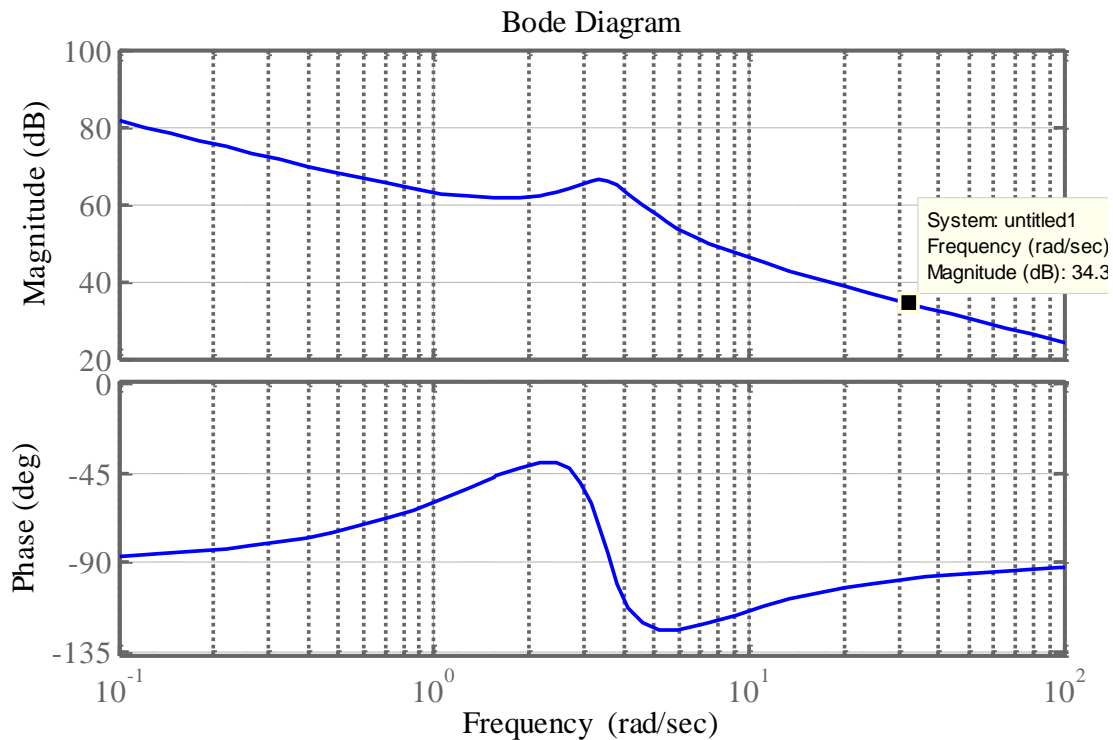


Fig.III.5 : Diagramme de Bode de la fonction de transfert de -H(p).

A partir de la figure III.5 on a fait la lecture du gain en décibel qui correspond à la fréquence de coupure de 32 rad/sec on obtient 34.3 dB.

On remarque que le gain 34.3 dB dépasse 0 dB, il faut donc descendre toute la courbe de (-H(p)) de - 34.3 dB c'est le rôle de K_{pi} , donc :

$$K' = 0.0247 \tag{III.35}$$

$$K_{pi} = -K' = -0.0247 \tag{III.36}$$

Donc la fonction de transfert du régulateur proportionnel intégrale obtenu est donnée par l'équation suivante :

$$C(p) = -0.0247 \left(\frac{1 + 0.313p}{0.313p} \right) \tag{III.37}$$

Finalement :

$$C(p) \times G(p) = \frac{1.04 p^2 + 6.193 p + 9.168}{0,02578 p^3 + 0.03551 p^2 + 0,3125 p} \tag{III.38}$$

Finalement on trace le diagramme de Bode de la boucle ouverte corrigée C(p) G(p) :

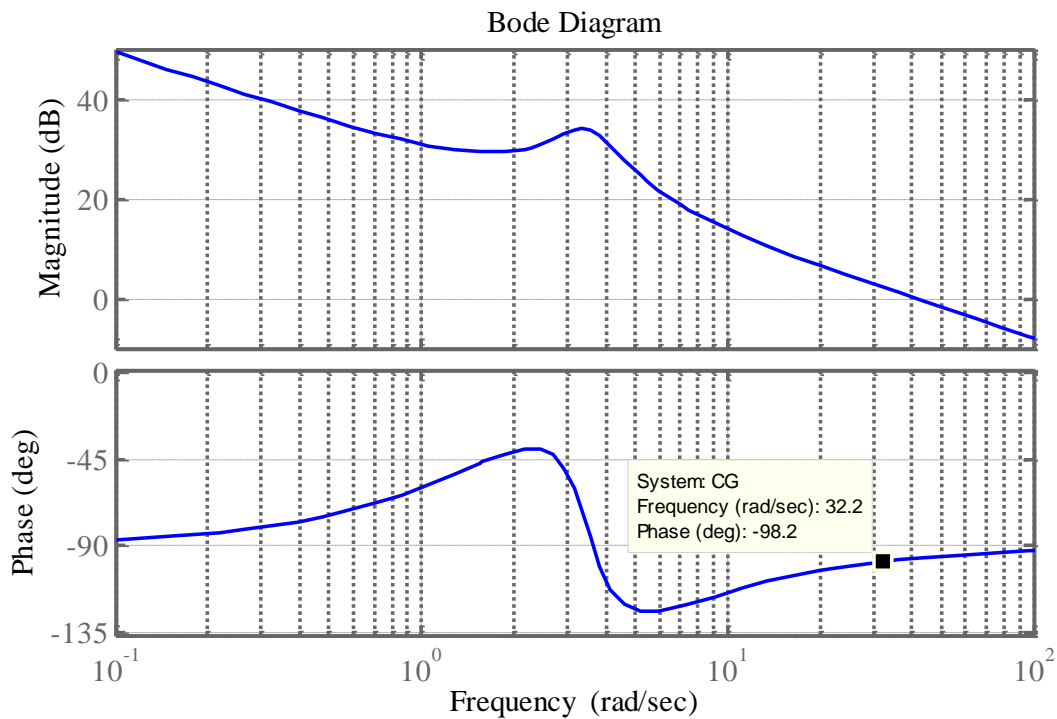


Fig. III.6 : Diagramme de Bode de C(p) G(p).

Le diagramme de Bode complet de la boucle fermée corrigée est représenté sur la figure III.6.

On obtient $M_{\phi} = 98^{\circ}$ en $W_c = 32$ rd/s ; ce qui satisfait les conditions imposées.

III.5. Commande MPPT

Une commande MPPT est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Elle permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi quel que soient les conditions météorologiques (température irradiation) et quel que soit la tension de la charge (charge résistive ou batterie), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

III.5.1. Principe de fonctionnement de MPPT

Une stratégie MPPT, en anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur PV non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [3].

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT qui lui permet de rechercher le point de fonctionnement maximum que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation 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 [7].

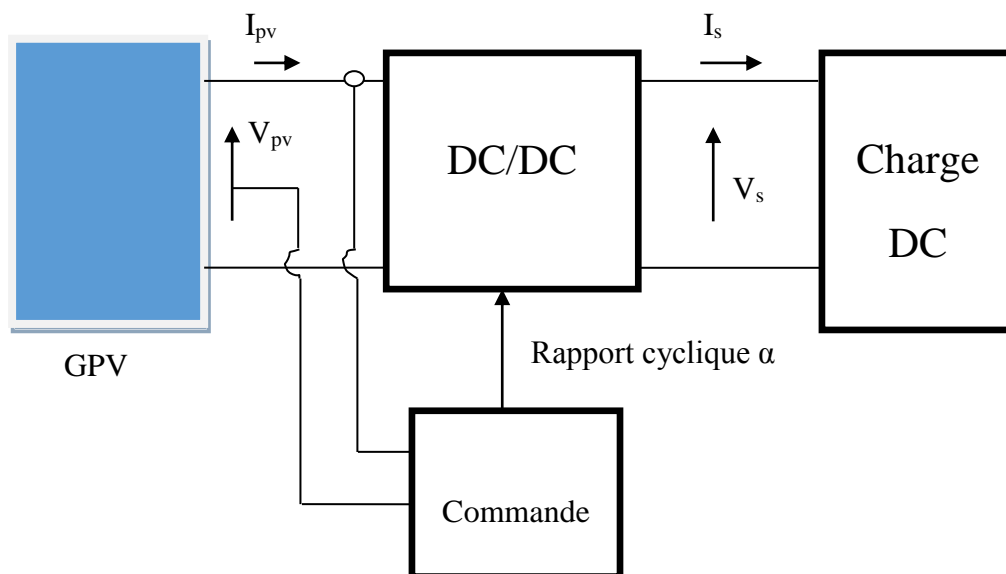


Fig.III.7 : Chaîne élémentaire d'une conversion photovoltaïque

III.5.2. Différents types de MPPT

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont [5] :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

III.6. Méthode Perturb & Observe (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation (P&O) est une approche largement répondeuse dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température [5].

Comme son nom l'indique, Le principe de cette commande est de générer des perturbations en diminuant ou en augmentant la tension V_{pv} et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur PV [6, 7].

A chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent.

Si la puissance obtenu est positive ; et la différence $V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)$ est aussi positive la puissance est ajusté par l'incrément de $+\Delta V$, ce cas présenté par le point 2 dans la courbe (III.9) si la différence $V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)$ est négative, la puissance est ajusté par décrémentation de $-\Delta V$ ce cas présenté par le point 4 dans la courbe (III.9).

Si la puissance obtenu est négative ; et la différence $V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)$ est aussi négative la puissance est ajusté par l'incrément de $+\Delta V$ ce cas est présenté par le point 1 dans la courbe (III.9) si $V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)$ est positive la puissance est ajusté par décrémentation de $-\Delta V$ ce cas est présenté par le point 3 dans la courbe (III.9).

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale $V_{pv,mppt}$ Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de

l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement [6].

L'algorithme de cette commande est présenté dans la figure (III.8).

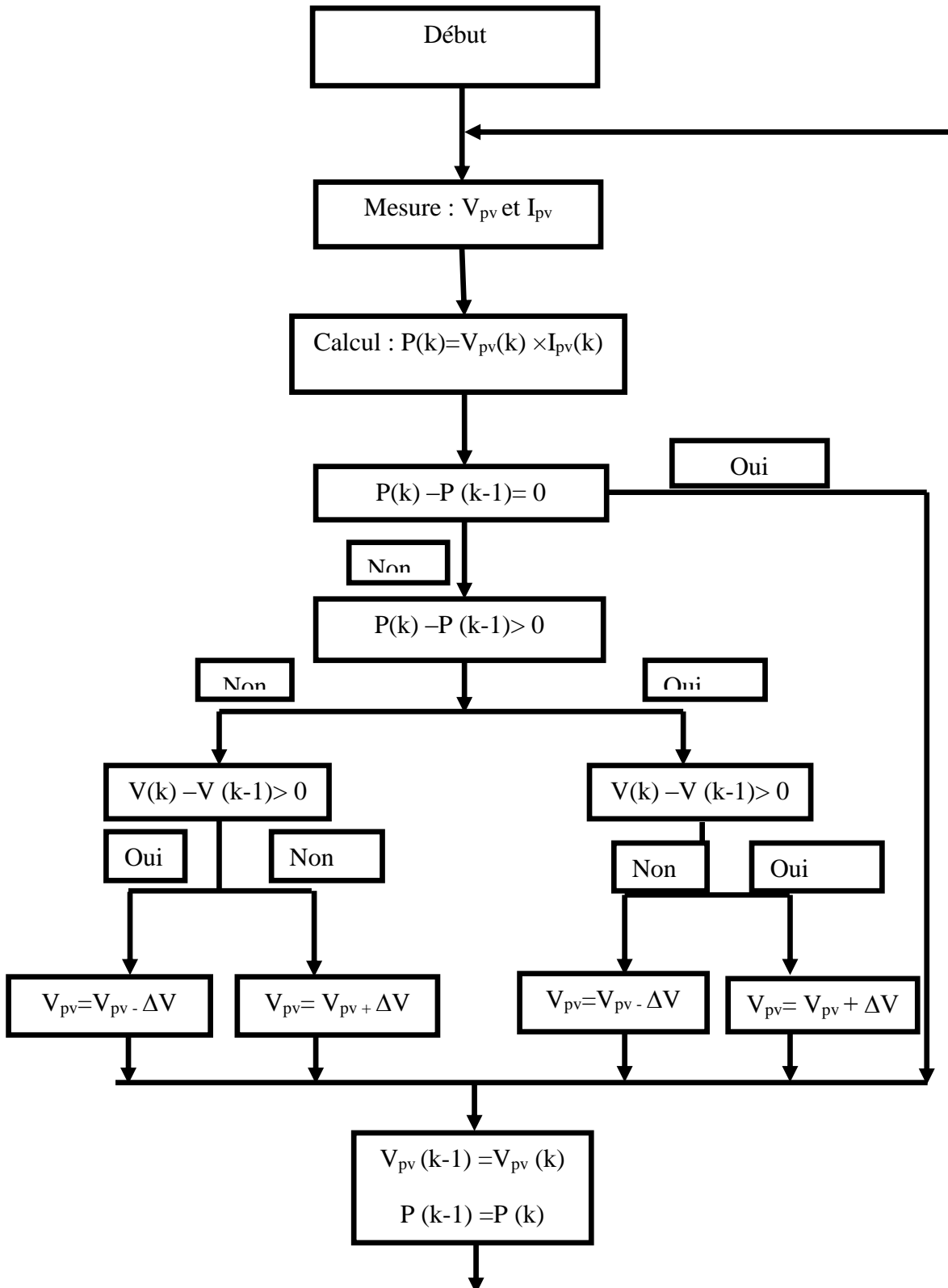


Fig.III.8 : Organigramme de la méthode P&O.

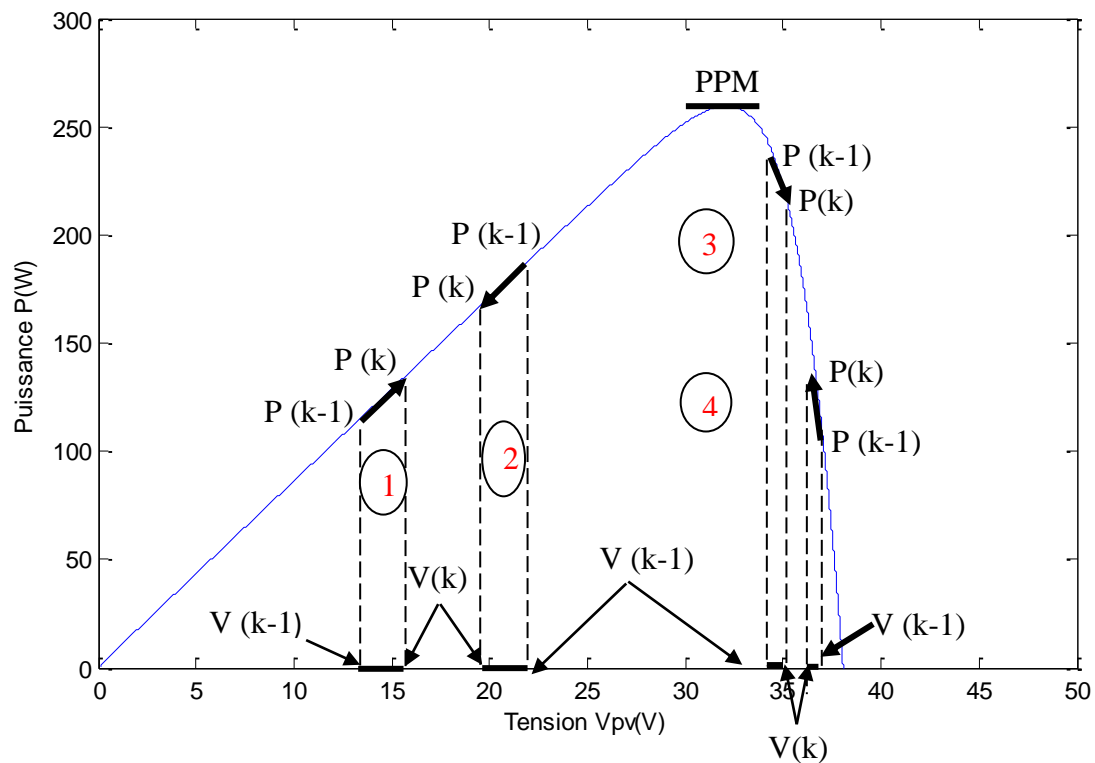


Fig. III.9 : Différents points de fonctionnement d'un algorithme P&O.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.

III.6.1. Simulation de l'Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O (Fig.III.10), en basant sur l'organigramme illustré sur la (Fig.III.8).

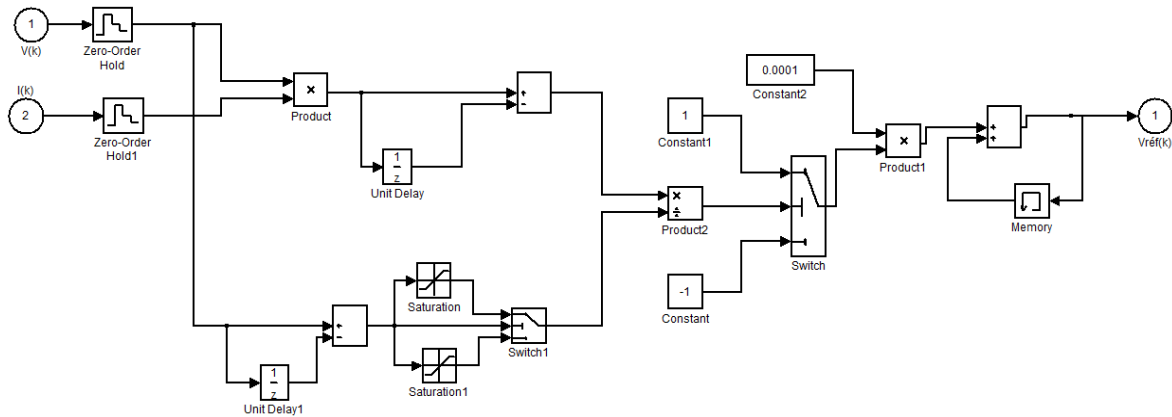


Fig. III.10 : Modèle simulink de la P&O.

L'inconvénient de la technique de P&O est celui en cas de changement rapide des conditions atmosphériques, telles qu'un nuage mobile, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans la direction fautive.

- **Remarque :**

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau.

L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance [8].

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « *Oui* » de condition $\Delta P(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O [8].

III.6.2. Avantages et inconvénients de la P&O

- **Avantages**

- Structure de régulation simple ;
- Nombre des paramètres mesurés réduit.

➤ **Inconvénients**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [8].

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation du hacheur élévateur Boost et la détermination des paramètres du régulateur PI à l'aide du diagramme de Bode sont présentées.

On a expliqué aussi la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

On a étudié la méthode P&O qui utilise directement la tension et le courant de panneau pour rechercher le point de puissance maximale.

Finalement les résultats de simulation pour l'algorithme P&O du système global sont construits sous Matlab-Simulink ; ainsi sont réalisés et validés expérimentalement dans le chapitre prochain.

Chapitre IV :

**Résultats de simulations et validations
expérimentales**

IV.1. Introduction

Après avoir optimisé et dimensionner les paramètres du système photovoltaïque, une implémentation pratique du système complet est réalisé à l'aide d'un banc expérimental disponible au sein du laboratoire L2CSP de l'UMMTO.

Dans ce chapitre, on présentera des résultats de simulations et des validations expérimentales d'un système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT numérique P&O.

Ce chapitre contient aussi un aperçu sur la norme prEN 50530, la norme européenne pour la mesure de l'efficacité globale des générateurs PV. On traitera l'approche et la méthodologie introduite dans la norme pour une évaluation combinée de la conversion ainsi que l'efficacité du suivi du point de puissance maximale.

Le contrôle indirect de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2. Définition de la norme

Une norme désigne un ensemble de spécifications décrivant un objet, ou une manière d'opérer. Il en résulte un principe servant de règle et de référence technique [33].

IV.2.1. La norme prEN 50530

La présente norme européenne fournit une procédure de mesure de l'efficacité de la conversion optimale d'énergie (MPPT) des générateurs, qui sont utilisés dans des systèmes photovoltaïques isolés ou raccordés au réseau. L'efficacité de la MPPT en régime transitoire ou en régime permanent est prise en considération. L'efficacité globale du générateur PV est calculée en fonction de l'efficacité de la MPPT en régime permanent et de l'efficacité de la conversion. L'efficacité de la MPPT en régime transitoire est indiquée séparément.

IV.3. Définition de la séquence d'essais prEN 50530

Pour une compréhension commune des paramètres et des interprétations correctes des mesures, des définitions claires sont nécessaires. En conséquence la nouvelle norme [32] introduit un ensemble complet de définitions requises pour la caractérisation de l'ensemble performances du générateur PV.

IV.3.1. Méthode d'essais du prEN 50530

Cette méthode consiste des tests d'états sous condition dynamiques changeantes dont la durée est définie dans la norme EN 50530. Dans cette section la procédure d'essai est les conditions, sous lequel les tests doivent être effectués sont définis aussi.

- **Conditions pour un test en régime permanent**

La mesure de l'efficacité globale, y compris la précision de la MPPT et l'efficacité de la conversion sous conditions d'état constantes sont effectuées à 3 tensions différentes pour ne pas dépasser la tension d'entrée DC maximale du générateur PV, il est important de limiter la tension maximale à être testé.

- **Conditions pour un test en régime transitoire**

L'efficacité dynamique du MPPT dont l'irradiation variable, la condition d'utilisation est caractérisée par l'utilisation d'une rampe d'irradiation avec différents niveaux. Deux essais avec deux niveaux d'irradiations de 100w/m^2 à 500 w/m^2 faible à moyen irradiation (en bas) ainsi que de 300 w/m^2 à 1000 w/m^2 moyenne à irradiation élevée (haut), l'irradiation est maintenue constante pendant un certain temps puis elle monte avec un intervalle du temps différent soit 2s (rapide) soit 10s (lent).

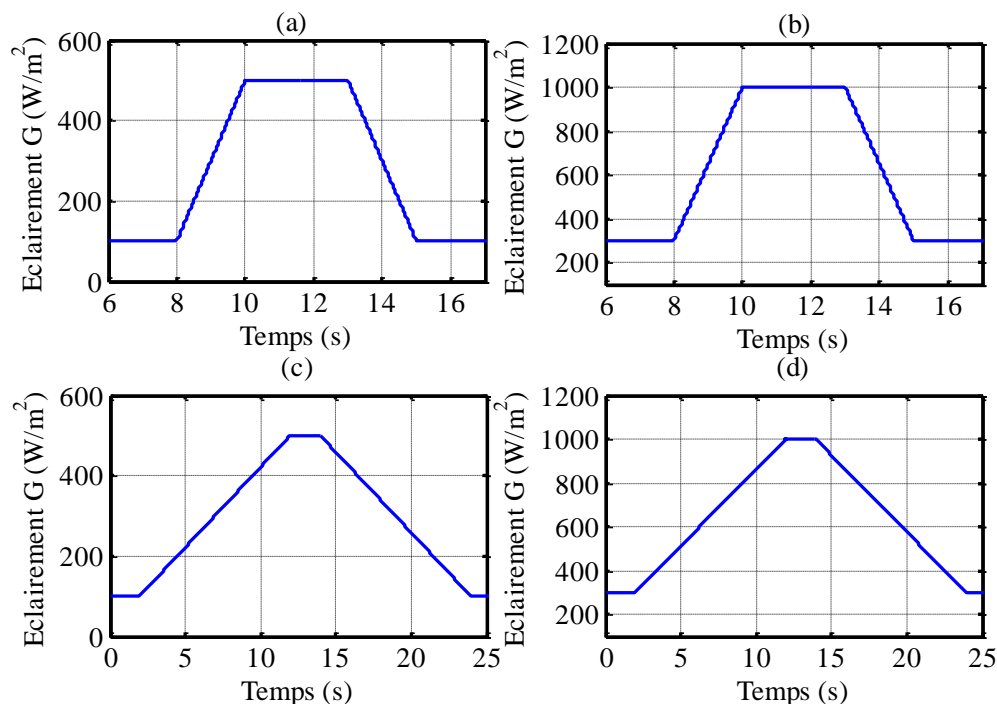


Fig. IV.1: Profils de changements d'irradiation selon la norme prEN 50530.

La figure IV.1 représente la séquence d'essai pour la caractérisation de l'efficacité de la MPPT sous conditions changeantes d'irradiation, dont les courbes (a) et (c) représentent l'essai en bas rapide (2s) et lent (10s) respectivement, et les courbes (b) et (d) représentent l'essai en haut rapide et lent respectivement.

Dans ce qui suit on changera l'irradiation par l'introduction de ces signaux dans notre système PV global et on gardera la température fixe (25°C).

IV.4. Simulation du système global

Le système global se compose d'un générateur PV, un convertisseur DC/DC, un régulateur PI, une commande MPPT et une charge résistive qui sont bien étudiés dans les chapitres précédents en détails.

La figure VI.2 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » :

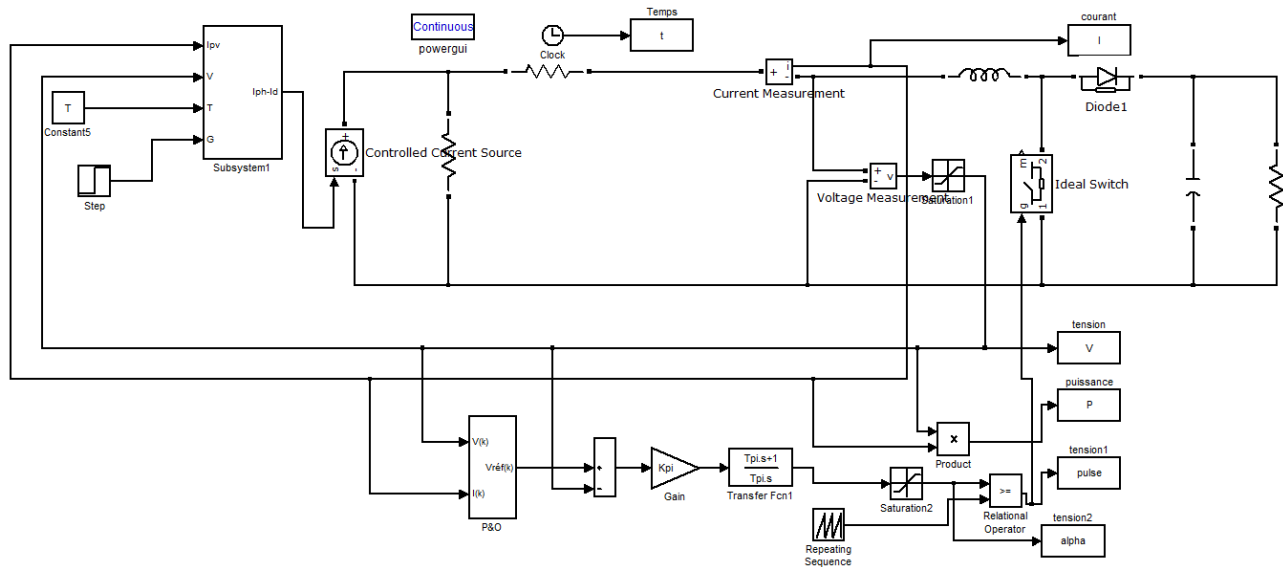


Fig. IV.2: Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque global.

➤ Résultats de simulation

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés par les figures (IV.3). Ces courbes illustrent la variation de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique délivrés par le générateur

en fonction de temps pour les conditions climatique (l'éclairement et température) standard (1000 W/m^2 et 25°C).

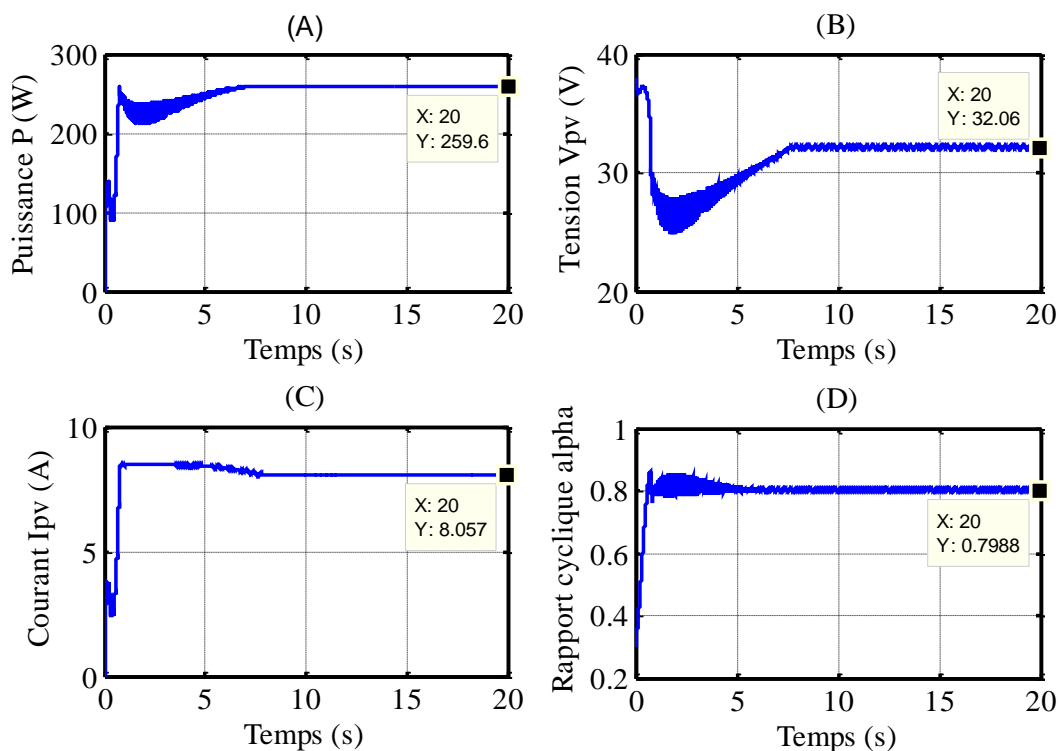


Fig. IV.3 : Résultats de simulation de la puissance, la tension, le courant généré par le générateur photovoltaïque et rapport cyclique α pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

➤ Interprétation :

On remarque d'abord que les courbes dans la figure (IV.3) ont deux régimes : régime transitoire et régime permanent.

Le régime transitoire indique la rapidité du contrôleur ; sa durée est en fonction de la largeur du pas d'incrémentacion (dans notre cas $\Delta V=0.0001$) cette dernière lorsqu'elle est importante permet une convergence rapide du contrôleur vers MPP.

En régime permanent ; la figure IV.3 (A) montre que la valeur de la puissance oscille aux environs de la valeur près de 260W, cette valeur représente exactement le PPM du panneau solaire, ou la valeur optimale pour des conditions standard, cela veut dire que l'algorithme a convergé vers le point de puissance maximale.

On remarque aussi sur la figure IV.3 (B, C et D) des oscillations autour des valeurs optimales, cela est dû à l'impossibilité d'avoir la variation de la puissance nulle lorsque la valeur de la puissance maximale est atteinte. La tension oscille entre 32,04 V et 32,06V or que

sa valeur optimale est de 32,05V, le courant oscille entre 8,095A et 8,099A or que sa valeur optimale est de 8,1A et le rapport cyclique entre 0,7 et 0,79.

IV.5. Changement des conditions atmosphériques

On change les paramètres tels que la température et l'éclairement, et on visualise la réaction de notre système global.

IV.5.1. Changement de faible à moyen éclairement avec un profil rapide (100W/m² à 500 W/m²)

En appliquant le signal d'irradiation G (figure VI.1(a)) et en maintenant la température constante à 25°C, on a obtenu les résultats suivants :

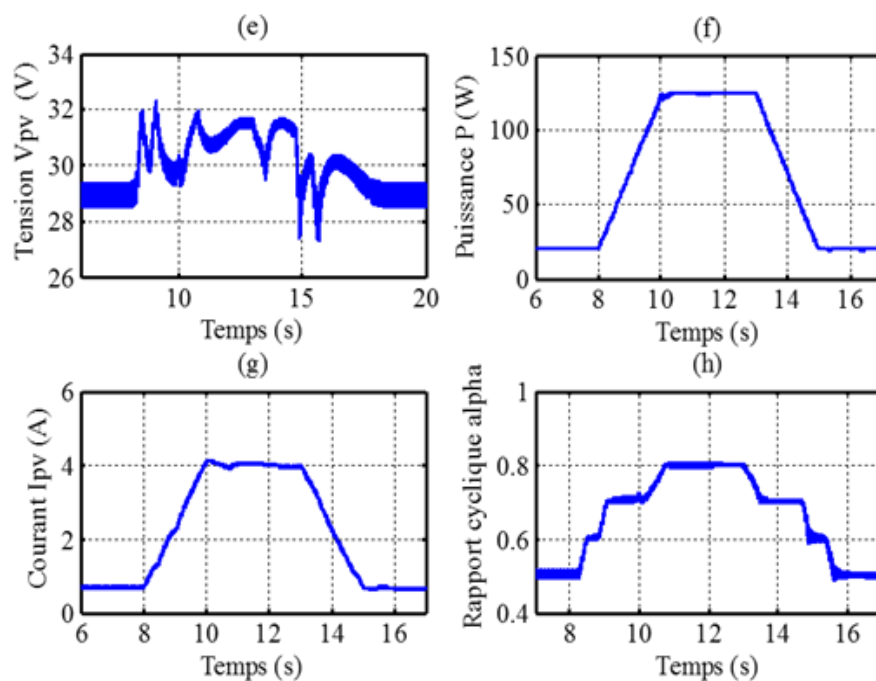


Fig. IV.4 : Résultats Simulink de tension, courant, puissance générée par le générateur PV et rapport cyclique alpha, après l'application d'un profil d'irradiation bas et rapide (Figure (IV.1)(a)).

➤ Interprétation :

Lorsque l'éclairement augmente de 100W/m² à 500 W/m², on voit que la puissance suit ce changement point par point sans un retard ou une chute de puissance et on remarque aussi que le courant a augmenté de la même forme de 0.7A à 4.117 A ce qui est normal car il dépend directement de l'ensoleillement comme on l'a vu dans le deuxième chapitre. On remarque que la tension à l'entrée du hacheur est presque constante parce que la tension

produite aux bornes du panneau est insensible aux variations de l'éclairement. On observe aussi la variation du rapport cyclique α entre 0.51 et 0.80.

IV.5.2. Changement de moyen à fort éclairement avec un profil rapide (300W/m^2 à 1000W/m^2)

Dans ce cas, on varie l'ensoleillement dans 5 périodes avec une température égale à 25°C . La figure IV.1 (b) représente le signal de variation de l'éclairement.

La figure IV.5 représente les résultats de la simulation après l'application de ce signal à notre système

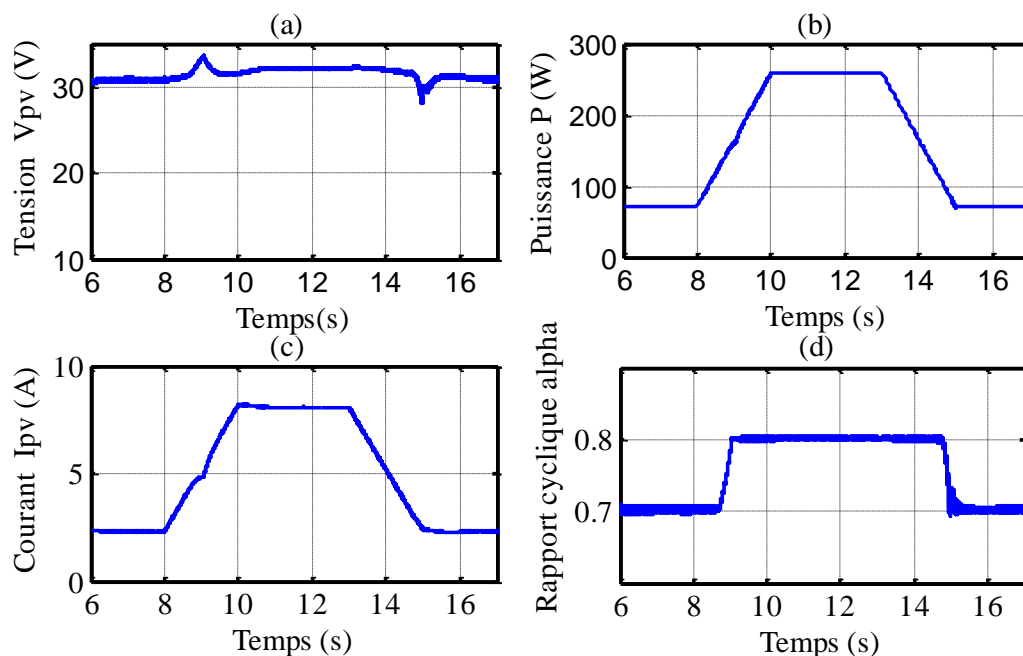


Fig. IV.5: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et le rapport cyclique alpha obtenu par la méthode P&O pour une augmentation rapide de l'ensoleillement (figure (IV.1) (b)).

➤ Interprétation :

Lors de l'augmentation de l'éclairement de 300W/m^2 à 1000W/m^2 on remarque que la puissance suit la forme de l'irradiation lumineuse sauf que la puissance a augmenté plus par rapport au cas précédent et elle a atteint la puissance max rapidement sans chute de puissance,

Nous voyons aussi la variation du courant et de la tension du PPM en fonction du profil de l'éclairement (figure IV.1(b)), où le courant du PPM suit le profil de l'éclairement et

atteint la valeur de 8,1A or que la tension du PPM varie très légèrement et a la valeur de 32,05V. par contre le rapport cyclique α croit de 0,71 à 0,8.

IV.5.3. Changement de faible à moyen éclairement avec profil lent (100W/m^2 à 500W/m^2)

Dans ce cas, on varie l'ensoleillement dans 5 périodes avec une température égale à 25°C . La figure IV.1 (c) représente le signal de variation de l'éclairage.

La figure IV.6 représente les résultats de la simulation après l'application de ce signal à notre système.

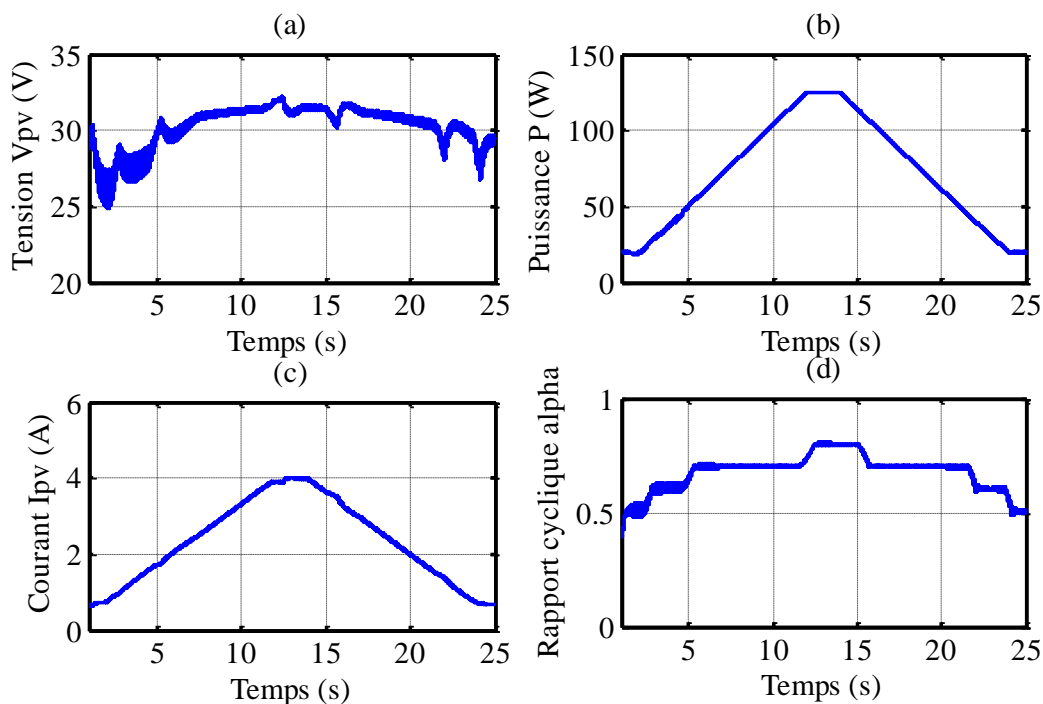


Fig. IV.6: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique alpha obtenus par la méthode P&O pour une augmentation lente de l'ensoleillement (figure (IV.1) (c)).

➤ Interprétation

La figure IV.6 (b et c) montrent que la puissance et le courant suivent la forme du signal de l'éclairage sans chute de puissance ou de courant ; autrement dit, lorsque l'éclairage est constant la puissance et le courant se stabilisent et lorsque l'éclairage

augmente, ils augmentent aussi car ces derniers dépendent de l'éclairement. Pour la tension, on ne remarque pas un grand changement car l'éclairement n'influe pas sur la tension et pour le rapport cyclique α croit de 0.5 à 0.8.

IV.5.4. Changement de moyen à fort éclairement avec un profil lent (300W/m^2 à 1000W/m^2)

Dans ce cas, on suppose une variation de l'éclairement selon la figure IV.1 (d) avec une température égale à 25°C

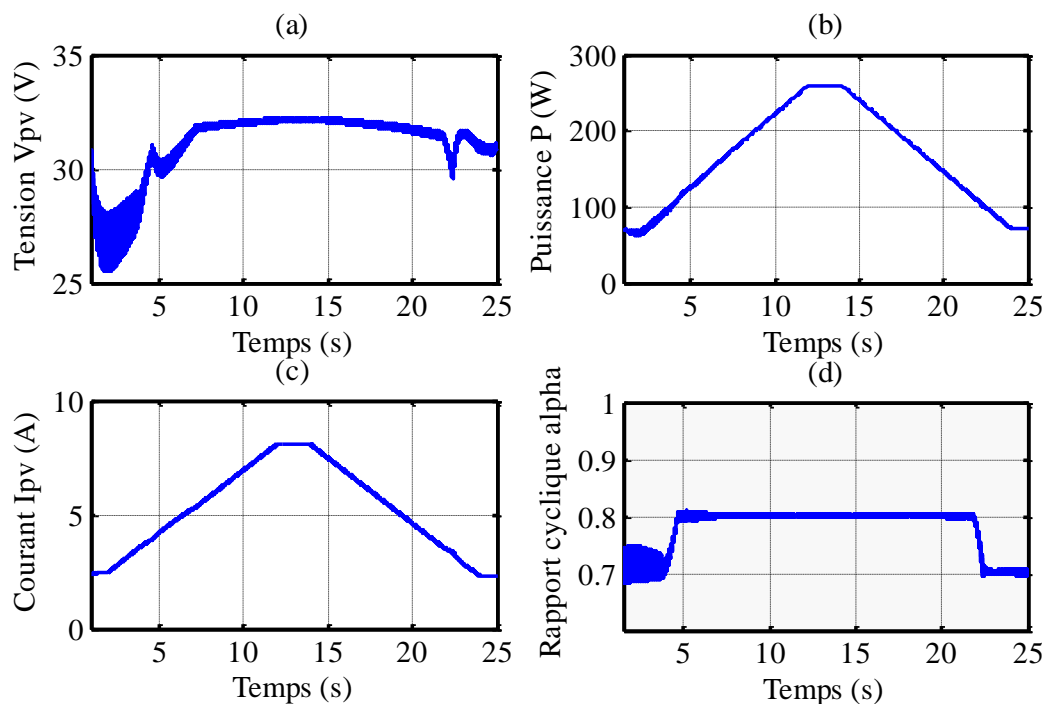


Fig. IV.7: Forme d'onde de la tension, le courant, la puissance et du rapport cyclique alpha obtenus par la méthode P&O pour une augmentation lente de l'ensoleillement (figure (IV.1) (d)).

➤ Interprétation

Lorsque l'éclairement change, on remarque que la puissance et le courant changent aussi où ils suivent le signal (IV.1) (d), sauf que, lorsque l'éclairement augment de 300W/m^2 à 1000W/m^2 la puissance atteint le PPM lentement, le courant atteint la valeur du courant au point de puissance maximale ($I_{mp}=8,1\text{A}$), la tension converge vers sa valeur optimale ($V_{mp}=32,02\text{V}$) et pour le rapport cyclique α croit de 0.71 à 0.8.

IV.6. Variation de la température

On applique à notre générateur un signal de température dont son profile est illustré dans la figure (IV.8) suivante avec un éclairement de 1000 W/m^2 .

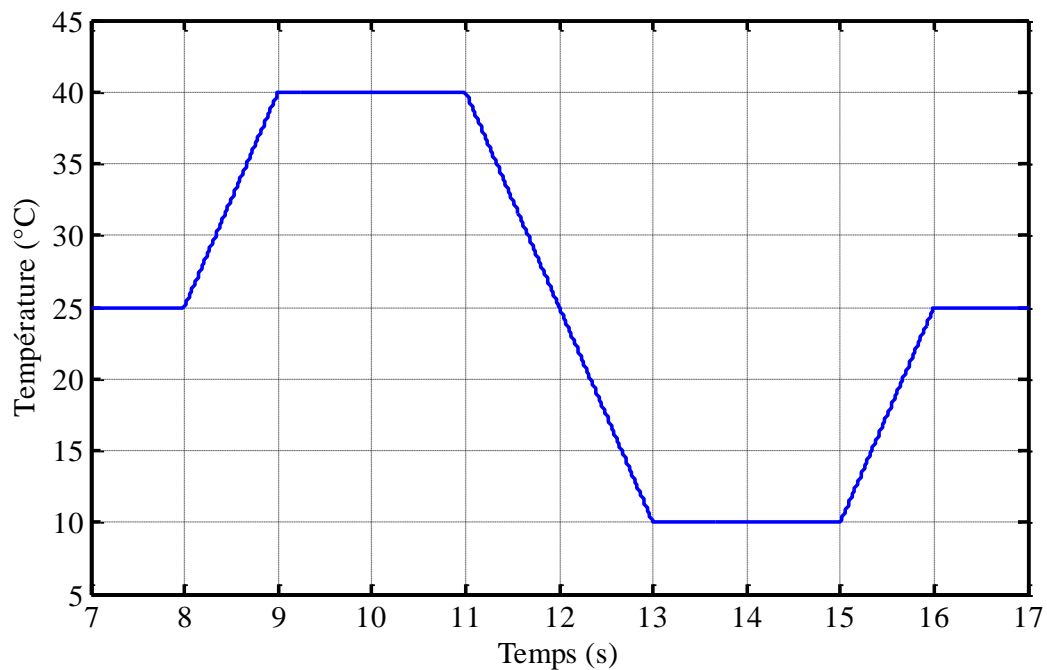


Fig. IV.8: Variation de la température.

➤ Les résultats de simulation

La figure IV.9 représente l'évolution du point de fonctionnement du GPV lors d'une augmentation et diminution rapide de la température (l'application de signal de température dans la figure IV.8), à un éclairement constant $G=1000\text{W/m}^2$.

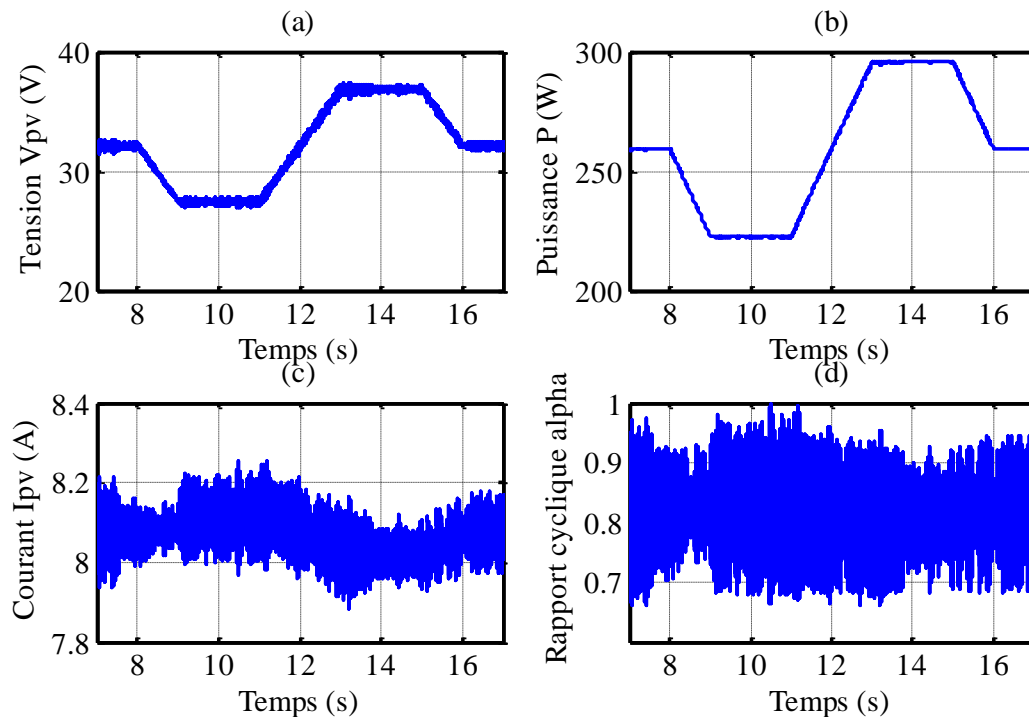


Fig. IV.9: Forme d'onde de la tension et le courant et la puissance et du rapport cyclique alpha obtenus par la méthode P&O pour une variation de température.

➤ Interprétation

La figure IV.9, montre que l'augmentation de la température implique une diminution de la puissance maximale avec diminution de tension ainsi que le rapport cyclique, ce qui provoque un déplacement du point de puissance maximale. Une fois la température se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité.

On constate que l'algorithme P&O suit le mouvement du point de puissance maximale imposé par le changement de la température avec des grandes oscillations autour de ce point. La puissance générée par le générateur photovoltaïque est inversement proportionnelle à la température.

IV.7. Effet du changement du pas d'incrément

Dans cette partie, nous étudions l'effet du changement du pas d'incrément sur l'évolution de la puissance, le courant, la tension et de rapport cyclique α du générateur PV ; pour cela on le varie en donnant les valeurs (0.01 ; 0.001 ; 0.0001 ; 0.00001) respectivement.

Les figures IV.10, 11, 12 et 13 représentent les résultats Simulink après le changement du pas d'incrément

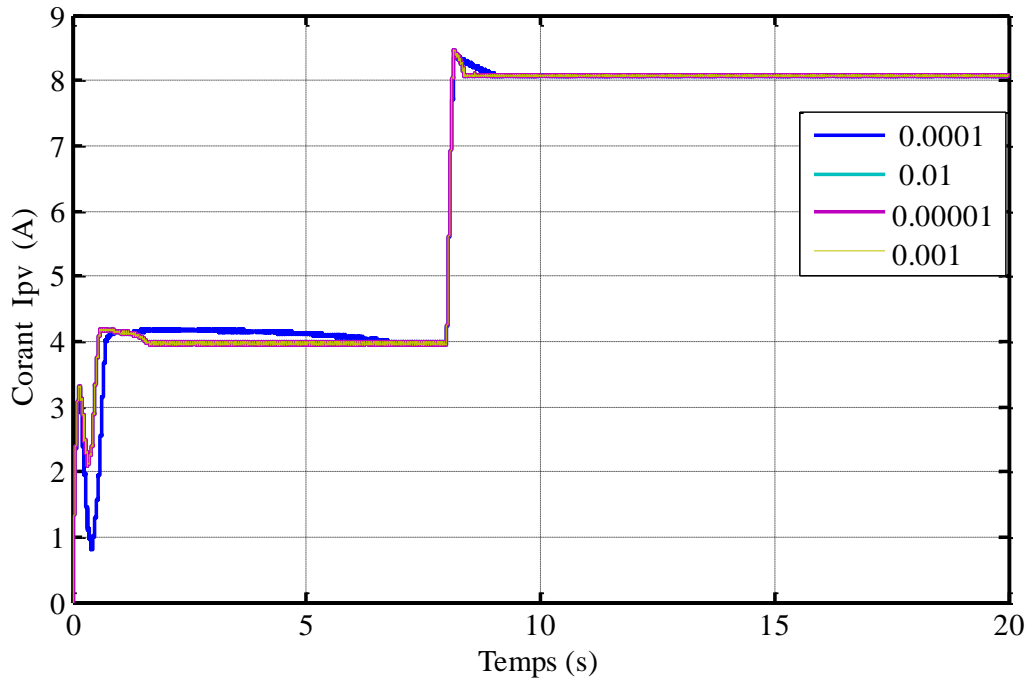


Fig. IV.10: Forme d'onde du courant I_{pv} pour différentes valeurs du pas d'incrément.

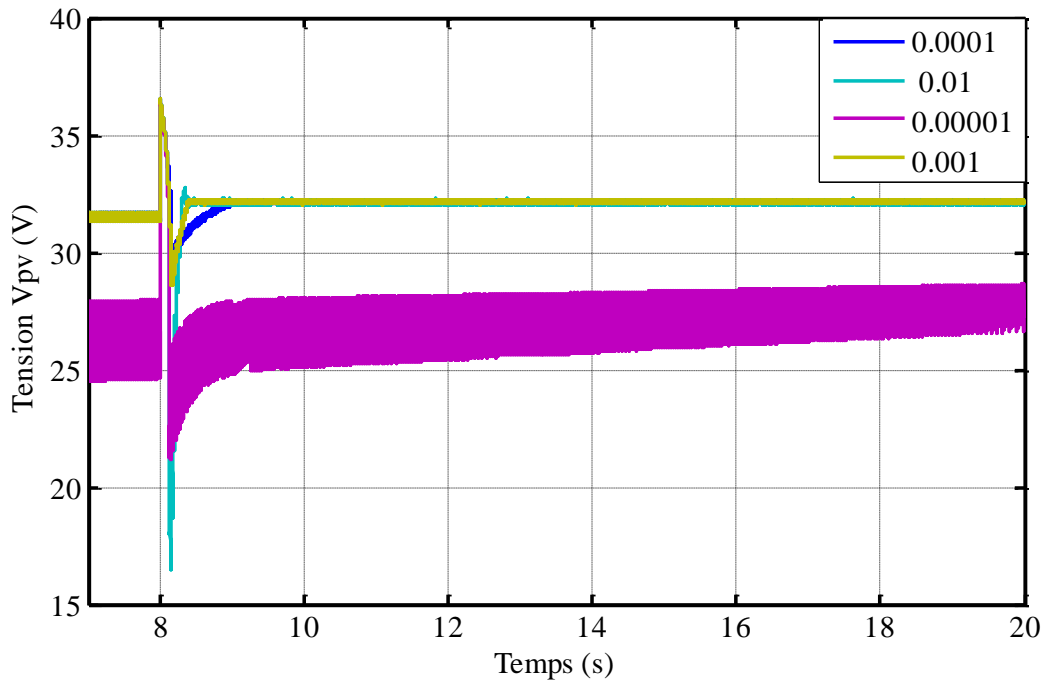


Fig. IV.11: Forme d'onde de la tension V_{pv} pour différentes valeurs du pas d'incrément.

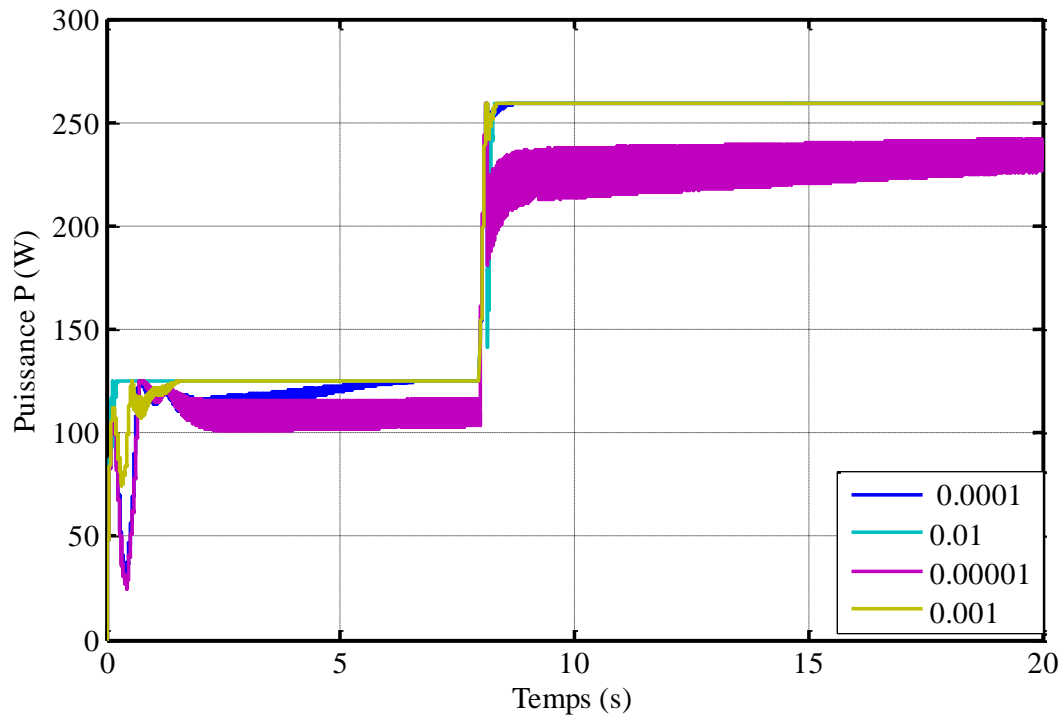


Fig. IV.12: Forme d'onde de la puissance P_{pv} pour différentes valeurs du pas d'incrémentation.

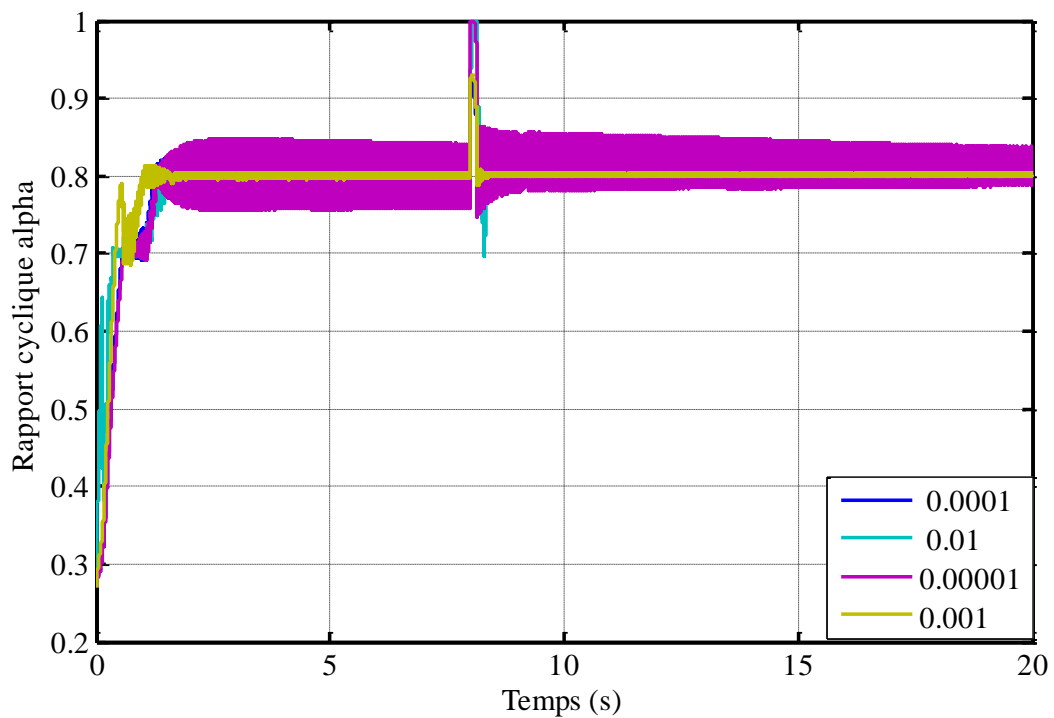


Fig. IV.13: Forme d'onde du rapport cyclique α pour différentes valeurs du pas d'incrémentation.

➤ Discussion :

L'amplitude de l'oscillation de la commande dépend directement de la constante d'incrémentacion accordée au contrôleur. Cette dernière, lorsqu'elle est importante permet une convergence rapide du contrôleur vers le PPM adéquat avec une précision près, ce qui donne naissance à des oscillations de la commande autour d'une certaine valeur qui génère à son tour des oscillations au niveau de la puissance, par ailleurs, un pas d'incrémentacion très faible augmentera le temps de réponse du système. Un compromis doit être adopté entre rapidité et perte de puissance.

IV.8. Implémentation pratique du système complet avec la commande MPPT

Nous résumons les principaux composants du système global comme suite :

- Le panneau photovoltaïque : représente la source d'alimentation du système global dont sa puissance atteint 260W sous une tension presque 32,05V.
- Hacheur parallèle : sert à élever la tension du panneau selon le rapport cyclique de la commande.
- La commande : son but est de créer les impulsions de commande de l'interrupteur du convertisseur statique, avec sa commande implémentée avec une carte dSPACE 1104.
- La carte dSPACE DS1104 : fonctionne avec le logiciel de simulation MATLAB.

Un capteur de courant : est placé en série avec le panneau pour permettre de donner une tension image du courant dans le panneau.

Un capteur de tension : est placé en parallèle avec le panneau pour capter la tension à la sortie du générateur PV.

- Gradateur (ou variateur) : permet de moduler l'intensité de l'éclairage émise par des lampes qui remplacent le soleil au laboratoire. En recommandant au gradateur des valeurs analogiques (de 0 à 5), elles seront transformées en valeurs numériques (de 0W/m² à 500 W/m²) respectivement.
- Charge résistive de valeur 110 Ω.

IV.8.1 Système photovoltaïque disponible au laboratoire

La figure IV.14 représente une photo du banc d'essai d'un système PV disponible au laboratoire L2CSP réalisé par l'équipe Energies Renouvelables au sein du département d'électrotechnique de l'université UMMTO

Durant la partie réalisation, le panneau était éclairé avec des lampes et des projecteurs afin de fournir une puissance optimale de l'ordre de 130 W.

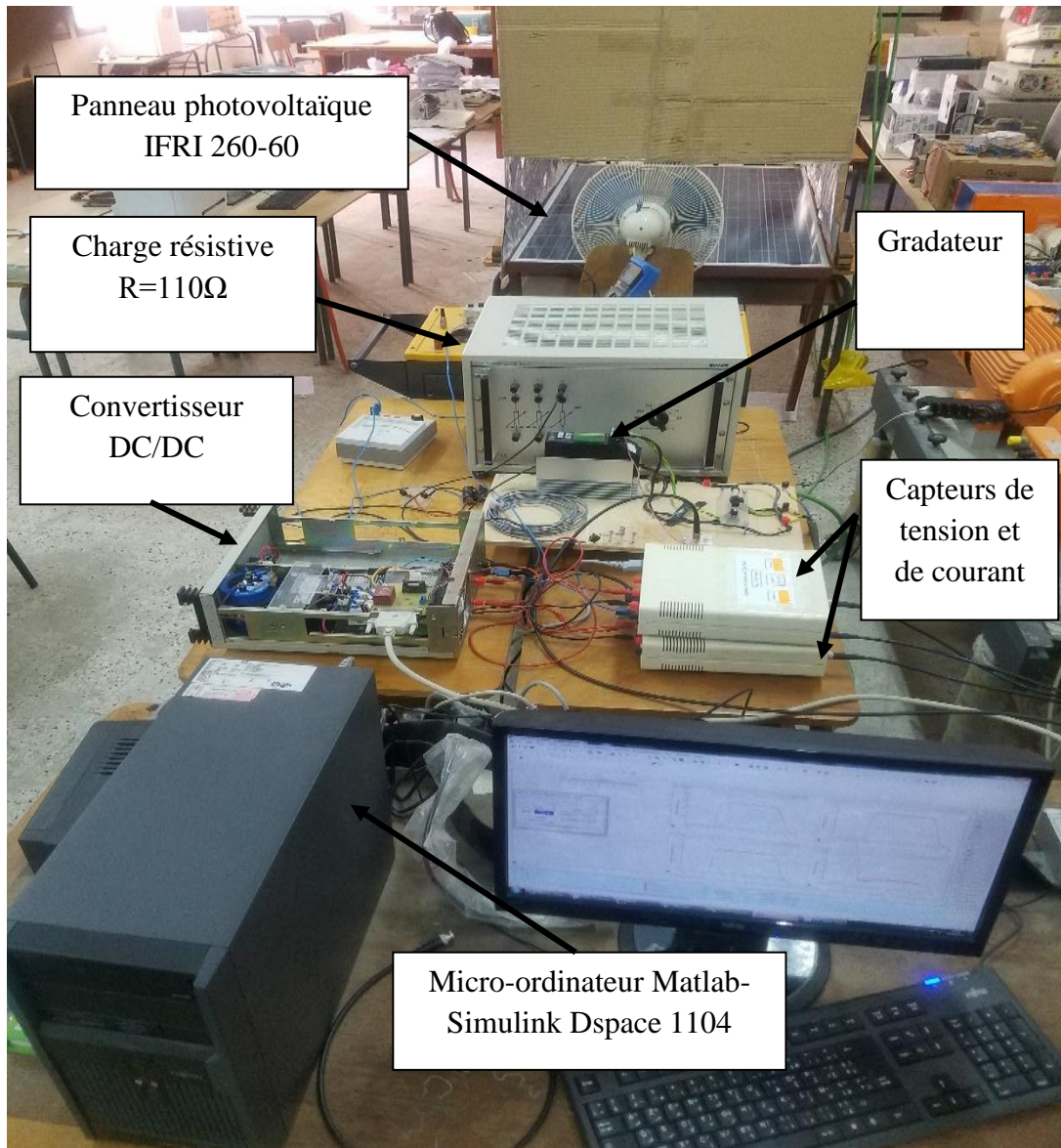


Fig.IV.14: Banc d'essai disponible au laboratoire L2CSP.

On effectue un changement croissant et décroissant du niveau de rayonnement. Ce changement est représenté sur la figure IV.15. La température ambiante reste constante et est égale à 25°C.

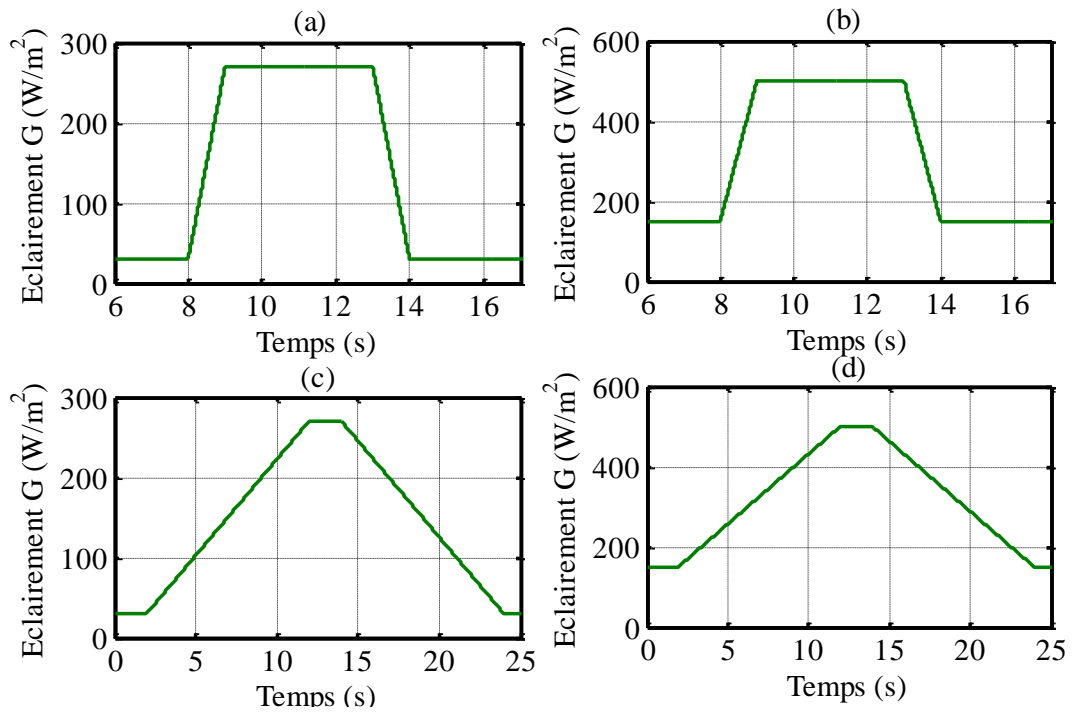


Fig. IV.15: Profils de changements d'irradiations dans le cas réel on utilise le gradateur.

➤ Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux, de l'algorithme précédemment étudié, obtenu par la carte dSPACE en appliquant à chaque fois un profil d'éclairement sont représentés par les figures IV.16, 17, 18 et 19 pour un pas de perturbation de 0.001. Ces figures montrent les valeurs de sortie de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique α .

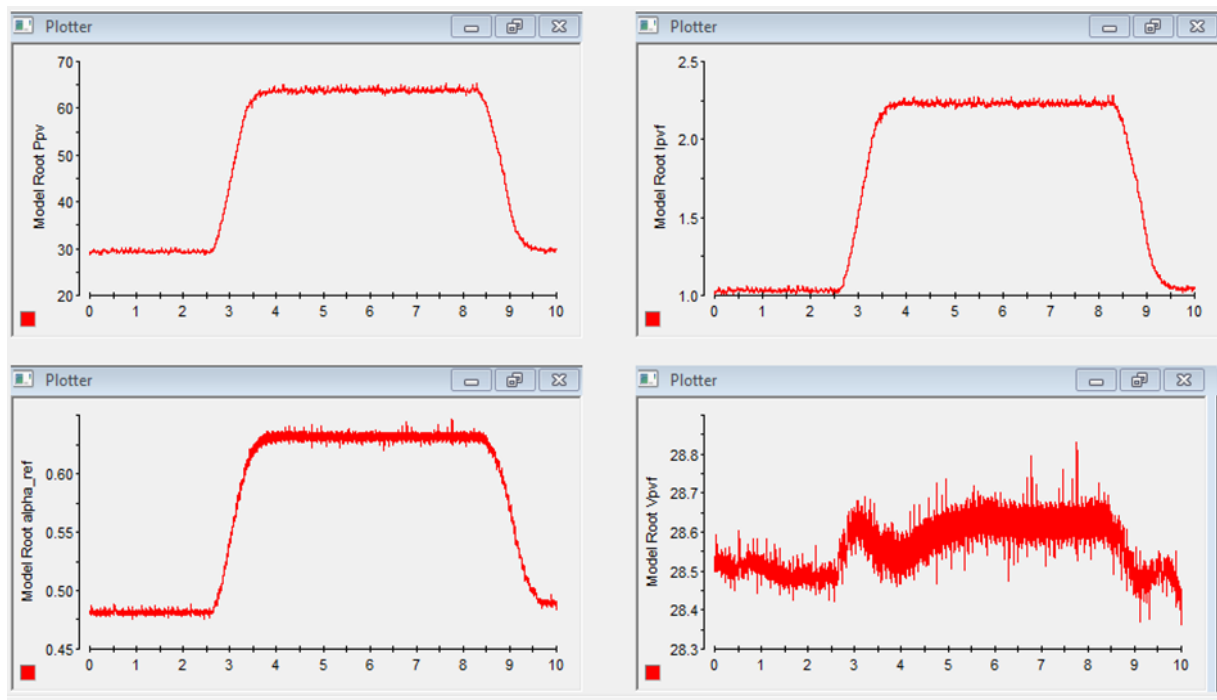


Fig. VI.16: Forme d’onde de la puissance, le courant, la tension et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.14) (a).

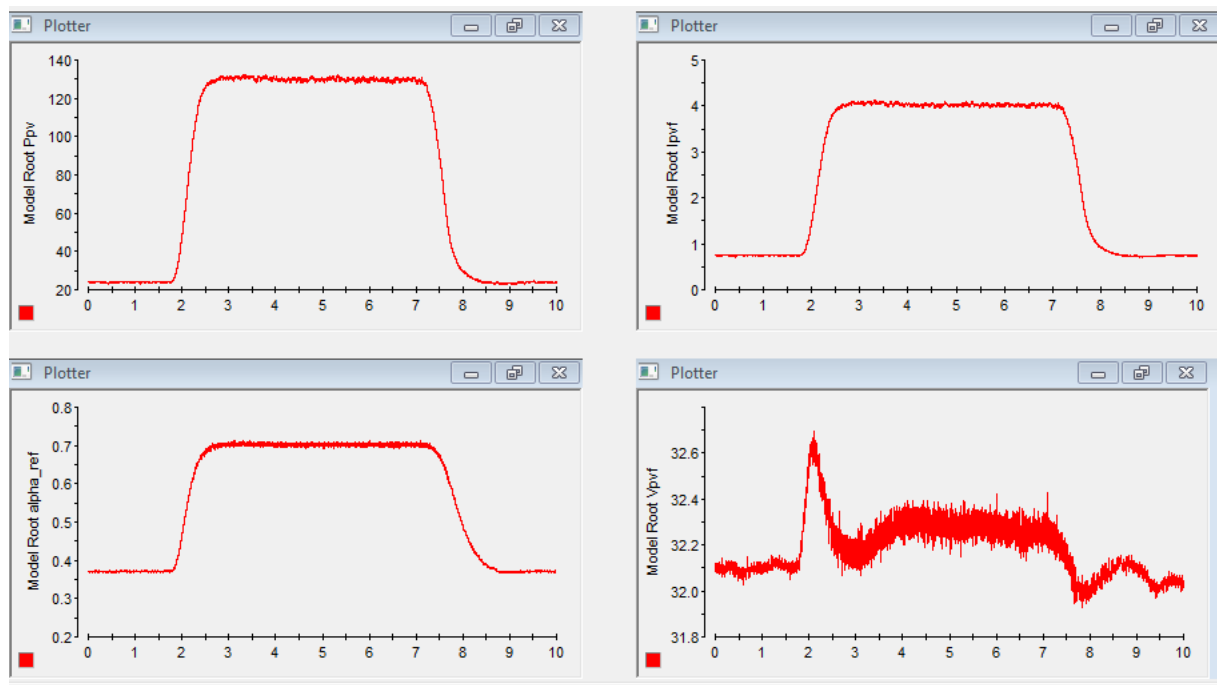


Fig. VI.17: Forme d’onde de la puissance, le courant, la tension et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.15) (b).

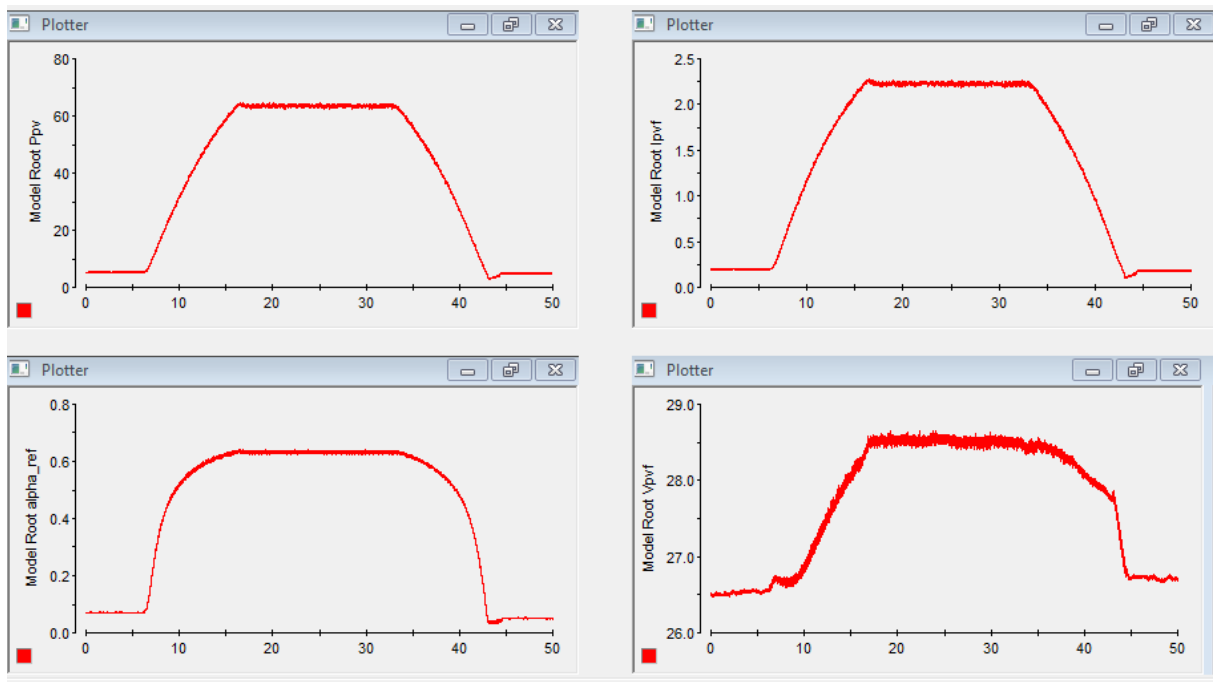


Fig. VI.18: Forme d’onde de la puissance, le courant, la tension et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.14) (c).

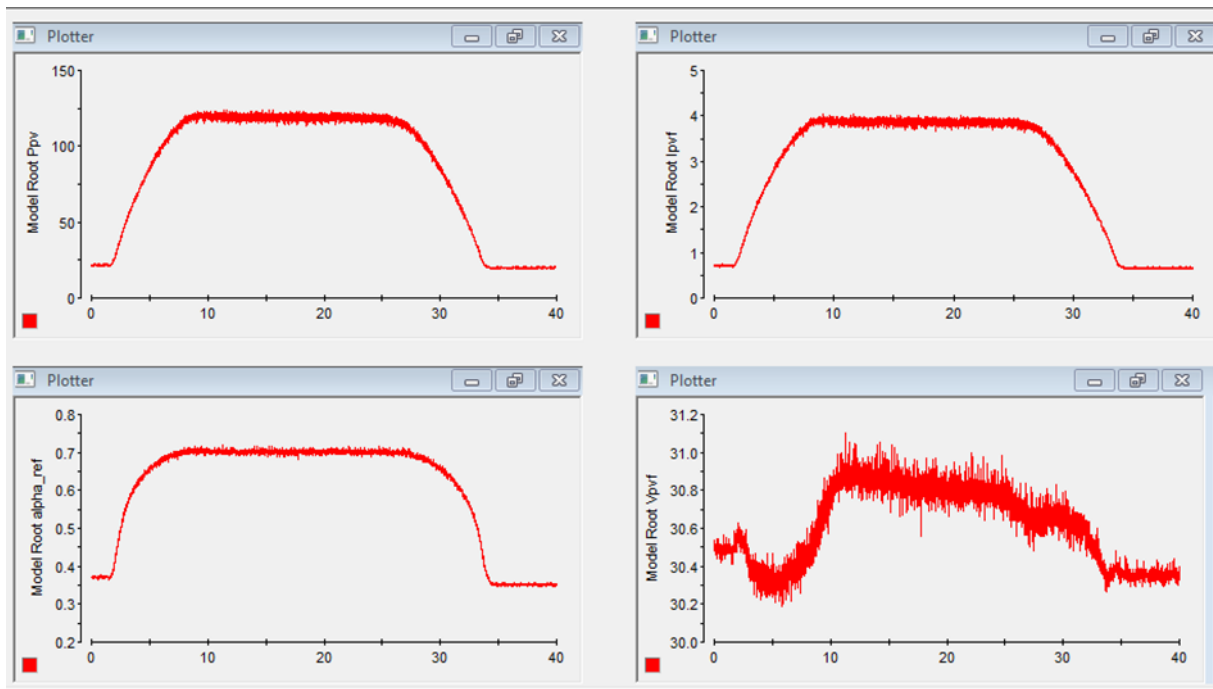


Fig. VI.19: Forme d’onde de la puissance, le courant, la tension et du rapport cyclique α obtenus par le système global en appliquant le profil (IV.14) (d).

➤ **Discussion :**

En réalisant le système complet pratiquement, on remarque que :

- Le courant a la même forme que la tension parce que la charge est une résistance.
- Pour l'éclairement de 500W/m, la valeur de la puissance du GPV est 130 W et pour une diminution d'éclairement, il y a une diminution de puissance électrique.
- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement.
- Les résultats trouvés pratiquement ressemblent aux résultats trouvés théoriquement donc l'algorithme précédemment utilisé suit le PPM du panneau.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la partie expérimentale d'un système photovoltaïque permettant à partir d'un site de panneaux solaires, d'alimenter une charge.

Les figures de simulation précédentes montrent que le système photovoltaïque converge vers les valeurs optimales. L'évolution de la puissance, de la tension et de courant aux bornes du panneau PV suit l'évolution de la température et de l'éclairement.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En générale, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (nuages).

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons présenté une étude sur le contrôle indirecte du Panneau photovoltaïque, sans raccordement au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink). L'étude d'ensemble de l'énergie solaire a été effectuée, avec l'utilisation comme interface d'un convertisseur élévateur (Boost) muni d'une commande à régulateur PI, dont la méthode de MPPT mise en œuvre est P&O.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur PV et leurs performances.

Dans le deuxième chapitre, le modèle d'une cellule à une diode dans le cas idéal, et le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque au Silicium étaient décrit. La modélisation mathématique de la cellule basée sur le modèle électrique équivalente, puis celle du module PV IFRI 260-60 ont été ensuite définis. L'effet des changements climatiques a aussi été relevé à travers des graphiques représentatifs. Le logiciel Matlab a été utilisé pour simuler le comportement du module photovoltaïque.

On a étudié, dans le troisième chapitre, le convertisseur DC-DC Boost, utilisés dans le système PV. Ensuite, on a trouvé les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur, et comme ces relations sont non linéaire ; on est passé par la méthode de linéarisation du modèle d'état du hacheur autour de point d'équilibre. Par la suite, on a trouvé les paramètres du régulateur PI (K_{pi} et T_{pi}) à l'aide du diagramme de Bode.

On a représenté aussi la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande, utilise directement la tension et le courant du panneau PV pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale La boîte outil SimPowerSystems sous Simulink a permis aisément de constituer le modèle de simulation de convertisseur boost et la commande P&O.

Finalement on a étudié la simulation de système global qui consiste un panneau PV, un convertisseur DC/DC Boost, un régulateur PI et une commande MPPT de type P&O.

Afin de traiter l'efficacité de la commande P&O qui est de suivre le PPM lors des changements climatiques, on a fait un ensemble de tests selon la norme prEN 50530 ; qui est la prochaine norme européenne pour la mesure de l'efficacité globale des GPV.

Des variations de la température et de l'éclairement, puis des changements dans pas d'incrémentations ont été faites pour étudier leur influence sur la puissance, la tension, le courant et le rapport cyclique α .

En suite une implémentation pratique du système complet contrôlé par une commande MPPT numérique P&O est effectuée à l'aide d'un banc expérimental disponible au niveau du laboratoire L2CSP de l'UMMTO pour vérifier les résultats expérimentalement. Une variation de l'éclairement a été faite pour étudier leur influence sur la puissance, la tension, le courant et le rapport cyclique α .

Concernant la robustesse de la commande, les réponses obtenues en présence des variations au niveau des paramètres du système (pas d'incrémentations) et des perturbations externes (changement de l'éclairement et de la température), montrent de bonnes performances, et l'efficacité de l'algorithme MPPT (P&O).

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

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations PV.

Comme perspective nous proposons :

- Dans cette étude, les pertes dans les différents composants de l'interface de puissance n'ont pas été prises en compte. Une étude plus rigoureuse peut être faite pour montrer l'influence de ces pertes sur le rendement du système.
- Les bruits de mesure et les perturbations doivent aussi être pris en compte et un filtre peut être réalisé.
- Une fonction de poursuite de la trajectoire du soleil peut être intégrée au système de commande.
- L'amélioration de l'algorithme Perturbation et Observation peut intégrer une autre approche comme la logique floue.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Site : <https://www.climamaison.com/lexique/energie-solaire.htm>
- [2] A. Labouret, M. Viloz : Energie solaire photovoltaïque. Dunod. 3^{ème} édition. 2006.
- [3] S. ABADA : Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic. Mémoire Maître de Sciences, Université Laval, 2011.
- [4] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy : Le Pompage Photovoltaïque. Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [5] K. Hellali : Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative. Mémoire de Magister, UMMTO, 2012
- [6] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm : Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. Article, Université de Nouakchott, Mauritanie, 2008.
- [7] Y. Akli, D. Rahali : Modélisation d'une cellule photovoltaïque. Mémoire de magister, UMMTO, 2013/2014.
- [8] L. Abbassen : Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de Magistère, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2011.
- [9] F. Slama : Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de magister .université Ferhat Abbas Sétif. 2011
- [10] N. Debili. « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ». Mémoire de magister, Université de Constantine I, Année 2014/2015.
- [11] P. HOUÉE : Une installation photovoltaïque en site isolé. Article, 2011.
- [12] M. Adouane : Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride. Revue des Energies Renouvelables, pages : 87 – 92 87, 2014.
- [13] F. Abdo : Croissance de couche mince de silicium par épitaxie en phase liquide. Thèse de Doctorat. N° d'ordre -ISAL-0015. Université de Lyon France. 2007.

- [14] O.Akihiro: Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System. Mémoire de magister. Faculty of California Polytechnic State University. 2005
- [15] L. Than-Xun : Réseau et interpénétrés carbazole/pérylène à hétérojonction. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2008.
- [16] M. Urien : Cellule photovoltaïque organique à base copolymères à blocs de type rigide-flexible. Thèse de doctorat, Université Bordeaux, 2008.
- [17] Site : www.prepa-cpe.fr/documments/Les_cellules_photovoltaiques.pdf
- [18] F. Boumedienne : Systèmes hybrides photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Mémoire de magister, 2012-2013.
- [19] M. Z. F.Z. Zerhouni. « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique ». Revue des Energies Renouvelables.2008.
- [20] A. Saadi : Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [21] B. Equer : Energie solaire photovoltaïque» (volume 1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque). 1ère édition, ELLIPSE. Paris. 1993.
- [22] A. Boden : Analyse optimisée du système de pompage photovoltaïque. Mémoire de magistère, Université de Constantine. Année 2008.
- [23] J.H. Eckstein: Detailed modelling of photovoltaic system components. University of Wisconsin, 1990.
- [24] E. Radziemska, E. Klugmann: Thermally affected parameters of the current voltage characteristics of silicon photocell. Energy Conversion & Management, 2002.
- [25] E. Radziemska. E. Klugmann: Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review, Progress in Energy and Combustion Science, 2003.
- [26] N. Abouchabana : Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT. Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [27] M. Lopez : Contribution à l'optimisation d'un système de conversion. Ecole Doctorale Université Paris-sud 11 .Thèse doctorat, 2010.

- [28] C. Bernard, C. Sebrao- Olivera, B. Laval, C. Vaudouer : Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue. 2009.
- [29] S. le Ballois : Automatique Systèmes linéaires et continus. 2^{ème} édition. Dunod, Paris. 2006.
- [30] E. Boukas : Systèmes asservis. Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1995
- [31] R. Bründlinger: prEN 50530 – The new european standard for performance characterisation of PVinverters. Article, Germany.2009.
- [32] Site: <http://www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites>.
- [33] A. Ayache : Commande MPPT et contrôle d'un système PV par la logique Floue. Article, Sidi Bel Abbés 22000 Agléria, 2013.
- [34] H. Abbes : Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système PV. Article, Sousse Tunisie, 2013.

Résumé

Ce mémoire met en œuvre par simulation le contrôle indirect de l'énergie solaire extraite du panneau photovoltaïque isolé du réseau électrique, à travers l'utilisation d'une commande numérique « perturbation et observation » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV (IFRIT 260-60). Dans un premier temps, on a présenté dans ce mémoire une étude sur le convertisseur DC/DC Boost qui présente des formules non linéaires et à temps variant rendant le problème de la commande difficile. La linéarisation des modèles mathématiques permet de se ramener à un problème de commande simple. Puis on a effectué une approche de commande qui fait appel à un régulateur PI classique pour régler de la tension photovoltaïque, Ces stratégies assurent un bon compromis entre la rapidité de réponse, stabilité et le rejet de perturbation. Le montage global est alors réalisé via le logiciel Matlab/Simulink. Plusieurs simulations sont effectuées à chaque effectuation d'un changement, soit dans l'éclairement ou dans la température ou le pas d'incrément. Ensuite une validation expérimentale a été effectuée à l'aide d'un banc expérimental disponible au sein du laboratoire L2CSP. Les résultats de simulation obtenus montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique du système photovoltaïque, l'efficacité de la MPPT (P&O), sa robustesse, sa rapidité et de la diminution les perturbations vis-à-vis les variations climatiques ainsi que des paramètres du système.

Mots clés : Panneau photovoltaïque, algorithme MPPT (P&O), convertisseur DC/DC Boost, Régulateur PI, contrôle indirect.