

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BEN SI LEKHAL Hamza Ibrahim

pour l'obtention du diplôme de Master en Electronique option Microélectroniques
microsystèmes et conception des circuits

Thème

Implémentation sur cible FPGA d'un MPPT sous l'effet de l'ombrage

Proposé par : Mr HASSANI Adnane et Mm NACEUR Djamilia.

Année Universitaire 2015-2016

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, je tiens à remercier Mr : Adnane HASSANI et Dr NACEUR Djamila pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.


Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce Projet en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce mémoire :



À Mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

À Mes sœurs ainsi qu'à mes frères et leurs enfants pour leur tendresse, leur complicité et leur présence.

À Toute ma famille ainsi qu'à mes amis, mes collègues et mes camarades.

ملخص: ان الاستطاعة الناتجة عن المولد الكهروضوئي مرتبطة بتغير شدة الاشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، ونظرا للخصائص الكهربائية اللاخطية لهذه الخلايا فان مردود النظام الكهروضوئي يمكن تحسينه باستعمال تقنيات اتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية.

في هذا العمل قمنا بتحليل التصميم ومحاكاة الاشتغال الكهربائي للنظام الكهروضوئي وفق الية التحكم "الاضطراب والملاحظة" و " المنطق المشوش" لضمان متابعة الاستطاعة الاعظمية المنتجة عن طريق المولد الكهروضوئي.

ومحاولة حل مشكلة الحدود القصوى المحلية في منحى الاستطاعة للمولد الكهروضوئي التي تحدث خلال التظليل الجزئي.

الكلمات المفتاح: النظام الكهروضوئي، المحول Boost ، التحكم MPPT ، التصميم، ومحاكاة.

Résumé : La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque GPV dépend de l'intensité du rayonnement solaire et la température des cellules. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Dans ce travail, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par des commandes MPPT « P&O » et « logique floue » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le GPV, et essayer de résoudre le problème des maxima locaux dans la courbe de puissance du GPV survenant lors d'un ombrage partie.

Mots clés : Système PV, Convertisseur Boost, Commande MPPT, Modélisation, Simulation.

Abstract : The output power of a GPV depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature. Because of the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the system performance can be improved by PV based solutions MPPT techniques. In this work, we analyze the modelisation and the simulation of the electric operation of a photovoltaic (PV) system adapted by an MPPT control « P&O » and « fuzzy logic » ensuring the tracking of the maximum power provided by the PV generator in uniform condition, and try to solve the problem of local maxima in the power curve of the PV generator occurring during partial shading is processed.

Keywords : PVsysteme, Boost converter, MPPT command, Modelisation, Simulation.

Listes des acronymes et abréviations

AM : Nombre de masse d'air

G : Eclairement (W/m²).

T_C : Température de jonction (°K).

T_{REF} : Température de référence (298 °K).

R_P : Résistance parallèle (Ω).

R_S : Résistance série (Ω).

E_g : Energie de GAP (eV).

K : Coefficient de Boltzman (1.38.10⁻²³ J / K)

I_{PH} : Photo-courant (A).

I_{Sat} : Courant de saturation (A).

I_D : Courant de la diode (A).

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

V_{CO} : Tension de circuit ouvert (V).

FF: Facteur de forme.

N_S : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_P: Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : Puissance maximale produite PV (W).

V_{MP}, V_{PV} : Tension optimale délivré par le panneau (V).

I_{MP}, I_{PV} : Courant optimale délivré par le panneau (A).

P_{PV} : Puissance délivré par le panneau (W).

I_S : Courant de sortie du Boost (A).

P_S : Puissance de sortie du Boost (W).

V_S : Tension de sortie du Boost (V).

η : Rendement

P_I : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface (W).

Listes des acronymes et abréviations

S : Surface de la cellule solaire sous l'éclairement (m²).

I_{psc} : Somme du courant court-circuit en parallèle (A).

V_{sco} : Somme de la tension circuit ouvert en série (V).

R_{ch} : Résistance de charge (Ω).

R_{pv} : Résistance interne du panneau (Ω).

D : Rapport cyclique.

Tr : Transistor.

L : Inductance (H).

C_e : Capacité d'entrée (F).

C_s : Capacité de la sortie (F).

I_L : Courant d'inductance (A).

I_{ce} : Courant du Capacité d'entrée (A).

I_{cs} : Courant du Capacité de la sortie (A).

V_L : Tension au borne du l'inductance (V).

F : Fréquence (Hz).

T : Période (s).

Z : Pas d'incrémentation.

E : Erreur.

CE : Changement d'erreur

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

PPM : point de puissance maximale

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 Spectre électromagnétique solaire..... | 5 |
| Figure 1.2 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM..... | 6 |
| Figure 1.3 Le potentiel du rayonnement solaire en Algérie..... | 8 |
| Figure 1.4 Représentation structure d'une cellule solaire..... | 9 |
| Figure 1.5 circuit électrique équivalent a une cellule photovoltaïque réelle..... | 10 |
| Figure 1.6 Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire..... | 11 |
| Figure 1.7 Notion de facteur de forme FF d'une cellule solaire..... | 12 |
| Figure 1.8 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit..... | 13 |
| Figure 1.9 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en circuit ouvert..... | 14 |
| Figure 1.10 Caractéristiques P -V et I -V d'un module KC200GT Pour un éclairement de 1000 W/m ² et une température ambiante de 25°C..... | 14 |
| Figure 1.11 Caractéristiques I -V d'un module KC200GT pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C..... | 15 |
| Figure 1.12 Caractéristiques P -V d'un module KC200GT pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C..... | 15 |
| Figure 1.13 Caractéristiques I - V d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de 1000 W/m ² | 16 |
| Figure 1.14 Caractéristiques P -V d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de 1000 W/m ² | 16 |
| Figure 1.15 Caractéristiques résultant d'un groupement de NP cellules en parallèle..... | 17 |
| Figure 1.16 Caractéristiques résultant d'un groupement de NS cellules en série..... | 18 |
| Figure 1.17 Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque, dans des conditions identiques. (a) configuration de réseau de PV. (b) I-V caractéristiques (c) P-V caractéristiques..... | 18 |
| Figure 1.18 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour..... | 19 |
| Figure 2.1 Courbe caractéristique de puissance d'un GPV..... | 21 |
| Figure 2.2 : Schéma de principe du convertisseur MPPT..... | 22 |
| Figure 2.3 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période..... | 23 |

| | |
|---|----|
| Figure 2.4 Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)..... | 24 |
| Figure 2.5 Convertisseur Boost (Interrupteur passant)..... | 25 |
| Figure 2.6 Convertisseur Boost (Interrupteur bloqué)..... | 25 |
| Figure 2.7 Formes d'ondes typiques en cc de tension et de courant du hacheur boost..... | 26 |
| Figure 2.8. Caractéristique P-V d'une cellule PV..... | 28 |
| Figure 2.9 Recherche du MPP par la méthode (P&O)..... | 29 |
| Figure 2.10 Organigramme de la méthode P&O..... | 30 |
| Figure 2.11 Configuration du contrôleur flou..... | 32 |
| Figure 2.12 Fonctions d'appartenance des variables du contrôleur flou..... | 33 |
| Figure 2.13 Résultat de défuzzification $D = f(E, CE)$ | 35 |
| Figure 2.14 Caractéristique I –V d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension..... | 36 |
| Figure 2.15 Principe de construction de la caractéristique d'un module PV pour un courant donné.. | 36 |
| Figure 2.16 Caractéristiques d'un réseau de PV en condition ombragée partielle. (a) configuration de réseau de PV. (b) I-V caractéristiques. (c) P-V caractéristiques..... | 37 |
| Figure 2.17 Global MPPT algorithme | 38 |
| Figure 3.1 Schéma de générateur photovoltaïque (3*2) en SIMULINK en condition uniforme..... | 41 |
| Figure 3.2 Schéma de cellule PV en MATLAB-SIMULINK..... | 41 |
| Figure 3.3 Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$ | 42 |
| Figure 3.4 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$ | 42 |
| Figure 3.5 Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}C$ | 43 |
| Figure 3.6 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}C$ | 43 |
| Figure 3.7 Schéma block d'un convertisseur survolteur..... | 44 |
| Figure 3.8 Le rapport cyclique D..... | 44 |
| Figure 3.9 Signal courant de sortie (convertisseur Boost)..... | 44 |
| Figure 3.10 Signal tension de sortie (convertisseur Boost)..... | 45 |
| Figure 3.11 Signal puissance de sortie (convertisseur Boost)..... | 45 |
| Figure 3.12 le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation »..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.13 l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement MATLAB/SIMULINK..... | 46 |
| Figure 3.14 l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement XSG..... | 46 |
| Figure 3.15 Courbe d'insolation variable..... | 47 |
| Figure 3.16 simulation signaux des courants sous SUMULINK (P&O à G variable)..... | 47 |
| Figure 3.17 simulation signaux des courants sous XSG (P&O à G variable)..... | 47 |
| Figure 3.18 simulation signaux des tensions sous SUMULINK (P&O à G variable)..... | 48 |
| Figure 3.19 simulation signaux des tensions sous XSG (P&O à G variable)..... | 48 |
| Figure 3.20 simulation signaux des puissances sous SUMULINK (P&O à G variable)..... | 48 |
| Figure 3.21 simulation signaux des puissances sous XSG (P&O à G variable)..... | 48 |
| Figure 3.22 Courbe de la température variable..... | 49 |
| Figure 3.23 simulation signaux des courants sous SUMULINK (P&O à T variable)..... | 49 |
| Figure 3.24 simulation signaux des courants sous XSG (P&O à T variable)..... | 49 |
| Figure 3.25 simulation signaux des tensions sous SUMULINK (P&O à T variable)..... | 50 |
| Figure 3.26 simulation signaux des tensions sous XSG (P&O à T variable)..... | 50 |
| Figure 3.27 simulation signaux des puissances sous SUMULINK (P&O à T variable)..... | 50 |
| Figure 3.28 simulation signaux des puissances sous XSG (P&O à T variable)..... | 50 |
| Figure 3.29 Modèle « SIMULINK » du contrôleur MPPT flou..... | 51 |
| Figure 3.30 Fonctions d'appartenance des variables du contrôleur flou..... | 52 |
| Figure 3.31 simulation signaux des courants (logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)..... | 53 |
| Figure 3.32 simulation signaux des tensions (logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)..... | 53 |
| Figure 3.33 simulation signaux des puissances (logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)..... | 53 |
| Figure 3.34 Schéma de générateur photovoltaïque (3*2) en SIMULINK en condition ombrage partial. | 54 |
| Figure 3.35 La courbe P-V d'un générateur photovoltaïque (3*2) en condition d'ombrage partial..... | 54 |
| Figure 3.36 La courbel-V d'un générateur photovoltaïque (3*2) en condition d'ombrage partial..... | 54 |
| Figure 3.37 simulation signaux des courants (ombrage -logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)...56 | 56 |
| Figure 3.38 simulation signaux des tension (ombrage -logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$).....56 | 56 |
| Figure 3.39 simulation signaux des puissance (ombrage -logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$).56 | 56 |
| Tableau 2.1 Règles floue (matrice d'inférences)..... | 33 |
| Tableau 2.2. Interprétation des opérateurs logiques..... | 34 |
| Tableau 3.1 Règles floue..... | 52 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 les systèmes photovoltaïques | |
| 1.1 Introduction..... | 4 |
| 1.2 L'énergie solaire..... | 4 |
| 1.2.1 Le soleil | 4 |
| 1.2.2 Le rayonnement solaire..... | 5 |
| 1.2.3 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque..... | 7 |
| a) Avantages..... | 7 |
| b) inconvénients..... | 7 |
| 1.2.4 Le Potentiel Solaire en Algérie..... | 7 |
| 1.3 La cellule photovoltaïque | 8 |
| 1.3.1 Le fonctionnement de cellule photovoltaïque..... | 8 |
| 1.3.2 Circuit électrique équivalent | 9 |
| 1.3.3 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire | 11 |
| 1.3.4 Courant de court-circuit (I_{cc}) : | 13 |
| 1.3.5 Tension de circuit-ouvert (V_{co}) | 13 |
| 1.3.6 Présentation du module KC-200..... | 14 |
| 1.3.7 Influence de l'Éclairement | 15 |
| 1.3.8 Influence de la Température | 16 |
| 1.4 Générateur photovoltaïque (GPV) | 17 |
| 1.4.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle..... | 17 |
| 1.4.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Série..... | 17 |
| 1.4.3 Association en série parallèle | 18 |
| 1.4.4 Protections d'un générateur..... | 19 |
| a) la diode anti-retour | 19 |
| b) Les diodes by-pass | 19 |
| 1.5 Conclusion | 19 |

Chapitre 2 Les commandes MPPT

| | |
|---|----|
| 2.1 Introduction..... | 21 |
| 2.2 Principe de la Recherche du MPP..... | 22 |
| 2.3 Convertisseurs continu/continu (DC/DC)..... | 22 |
| 2.3.1 Introduction | 22 |
| 2.3.2 Type de convertisseurs..... | 23 |
| 2.4 Modélisation et dimensionnement convertisseur Boost | 24 |
| 2.4.1 Modélisation de convertisseur Boost | 24 |
| 2.4.2 Dimensionnement Convertisseur Boost..... | 27 |
| a) Résistance de charge..... | 27 |
| b) Courant de sortie..... | 27 |
| c) Rapport cyclique..... | 27 |
| d) Valeur de l'inductance..... | 27 |
| e) Capacité du condensateur de sortie..... | 27 |
| 2.5 Méthodes de poursuite MPPT..... | 28 |
| 2.5.1 Introduction..... | 28 |
| 2.5.2 Philosophie du MPPT | 28 |
| 2.6 L'algorithme MPPT de perturbation et observation..... | 29 |
| 2.7 Commande MPPT basée sur l'approche floue..... | 31 |
| 2.7.1. Fuzzification..... | 32 |
| 2.7.2. Méthode d'inférence..... | 33 |
| 2.7.3. Défuzzification..... | 34 |
| 2.8 Phénomène d'ombrage sur les modules photovoltaïques..... | 35 |
| 2.8.1 Principe..... | 35 |
| 2.8.2 Modèle approximatif de générateur photovoltaïque sous Ombrage partiel Condition..... | 37 |
| 2.7 Globale MPPT | 38 |
| 2.8 Conclusion..... | 38 |

Chapitre 3 Simulation du système

3.1 Introduction40

3.2 L’outil Matlab/Simulink40

3.3 Condition uniforme.....41

 3.3.1 Simulation du générateur PV41

 3.3.2 Simulation de hacheur survolteur43

 3.3.3 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)45

 3.3.4 Simulation de la Technique (P&O) sous Simulink& XSG.....46

 a) Eclairément variable et température constante.....47

 b) Température variable et éclairément constant.....49

 3.3.5 Commande MPPT floue.....51

 a) Fuzzification.....52

 b) Les règle.....52

3.4 Condition ombrage partial.....54

3.5 Conclusion.....56

Conclusion générale.....57

Bibliographie.....58

Introduction générale

L'énergie a été l'une des forces motrices les plus importantes dans notre monde croissant. Les nations sont dans une recherche sans fin de nouvelles sources d'énergie. Cette recherche a traversé bien des révolutions, de l'utilisation du feu et du charbon pour la découverte de combustibles fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. Cependant, cette recherche a été confrontée à de nombreux défis, car beaucoup de ces ressources sont coûteuses, destructrices de l'environnement, ou cessent d'exister dans un avenir proche.

Des progrès significatifs ont été accomplis au cours des dernières années dans la recherche et le développement de systèmes d'énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, hydraulique et de systèmes d'énergie solaire.

L'une des options les plus prometteuses, permettant d'abandonner à long terme les sources d'énergie qui portent atteinte à l'environnement, est la transformation directe de l'énergie solaire en électricité au moyen de cellules solaires photovoltaïques ou photopiles. Les installations photovoltaïques sont faciles à monter, sans pièces mobiles, immédiatement utilisables, presque sans entretien et d'une durée de vie extrêmement longue.

Une autre incitation de la propagation de ces projets est le fait que l'évolution des coûts des systèmes photovoltaïques est en descente, alors que le prix du carburant est croissant. L'avancement dans les systèmes solaires est basé sur les nouvelles avancées technologiques dans les industries de cellules photovoltaïques, les interrupteurs électroniques de puissance, les microcontrôleurs, et les logiciels de simulation sur ordinateur. Les systèmes solaires peuvent non seulement servir de sauvegarde pour les systèmes énergétiques existants, mais ils peuvent également être facilement intégrés avec les grands systèmes de grille, ou peuvent être utilisés comme systèmes autonomes servant de sources d'énergie indépendantes.

Une des dernières applications de ces contrôleurs intelligents est l'optimisation de l'efficacité des systèmes d'énergie photovoltaïque. Ces techniques sont utilisées pour maximiser la puissance de sortie des systèmes solaires ainsi que d'améliorer leur robustesse contre les perturbations externes.

Pour suivre le point où la puissance est maximale et qu'il se change de façon continue, un dispositif est nécessaire, ce dispositif est appelé le Maximum Power Point Tracker (MPPT). Le MPPT se compose de deux parties principales, un contrôleur avec un algorithme sur lui pour

suivre le MPP. Et un convertisseur pour convertir la tension générée à un niveau désiré pour la charge.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation & observation » et « logique floue » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

En condition ombrage partiel issu de (nuage, ombre d'arbre) survient un changement dans la forme de la courbe $P=f(V)$, il produira plusieurs et différentes pics (sommet) pour la puissance maximale, donc la précision du PPM sera difficile. Pour cette raison nous allons créer une technique « Global MPPT » qui nous permettra de scanner la courbe $P=f(V)$ à l'aide de la commande MPPT « perturbation & observation » pour trouver le plus haut pic, ensuite par la technique « logique floue » on va préciser le point de la puissance maximale, enfin le convertisseur « BOOST » va augmenter la tension de sortie.

D'autre part, la logique floue a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT Floue.

La mémoire présentée est organisée en trois chapitres.

Le chapitre 1 présente une description du gisement solaire puis on a décrit la cellule solaire qui est l'élément essentiel de la transformation de l'énergie solaire d'une forme à une autre après absorption du rayonnement, puis on a terminé par un rappel sur le générateur photovoltaïque (GPV).

Ensuite, nous passerons au chapitre 2 consacré à une modélisation d'un convertisseur DC_DC (Boost). De plus, il montre quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode "Perturbation & Observation" et "logique floue", On a terminé par une présentation de l'effet des conditions d'ombrages partiels et la GLOBAL MPPT.

Dans le chapitre 3, on étudie une modélisation et une simulation par MATLAB-SIMULINK du système PV réalisé (générateur photovoltaïque, convertisseur survolteur (Boost) et commande MPPT « perturbation & observation » et « logique floue ».

CHAPITRE 1

les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent. Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [1]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète. L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties :

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70 [2].

1.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. Ce type d'énergie solaire sera développé dans les paragraphes suivants.

1.2.1 Le soleil

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie, malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (149.6×10^6 kilomètres). Il s'agit d'une immense sphère lumineuse composée principalement de gaz ionisé, et du plus grand corps céleste du système solaire. Il est si grand qu'il pourrait contenir plus d'un million de planètes Terre.

La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à 90×10^{15} GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que 180×10^6 GW. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux

phénomènes d'absorption et de diffusion. De là, on introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteinte $1\text{kW}/\text{m}^2$ pour un site situé au niveau de la mer.

1.2.2 Le rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,28\ \mu\text{m}$ à $4\ \mu\text{m}$. La (Figure 1.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- ✓ 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4\ \mu\text{m}$),
- ✓ 47% dans la bande visible ($0,4\ \text{à}\ 0,8\ \mu\text{m}$),
- ✓ 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8\ \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de $1,37\ \text{kilowatt}$ au mètre carré (kW/m^2), a plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200\ \text{W}/\text{m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [3].

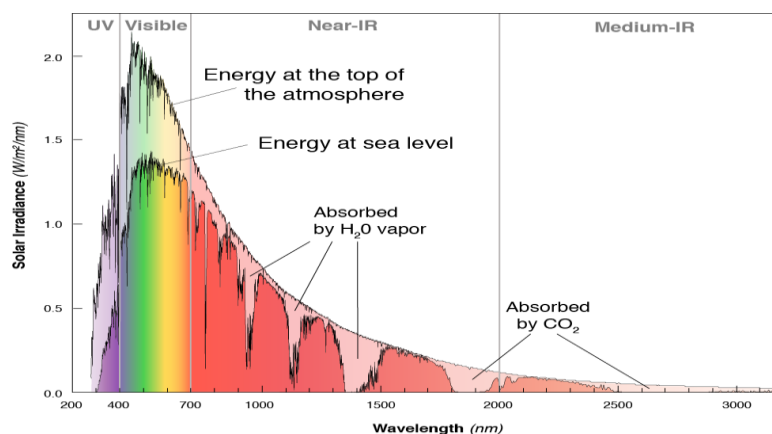


Figure 1.1 Spectre électromagnétique solaire.

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident, on introduit un coefficient appelé *nombre de masse d'air* (AM) défini par :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \tag{1.1}$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de 48° par rapport au zénith, la lumière incidente est dit AM1.5, illustré sur la (Figure 1.2) Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm^2 pour AM1.5), et de plus sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

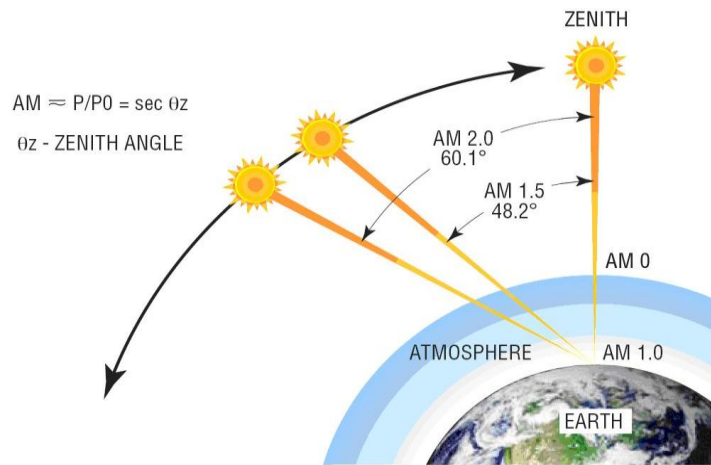


Figure 1.2 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Les conditions standards de caractérisation, sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100mW/cm^2 et pour une température de cellule de 25°C . Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes: une composante directe et une composant diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global [4].

1.2.3 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque

a) Avantages

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont [5] [6] :

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

b) inconvénients

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

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

1.2.4 Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde, la durée d'insolation sur la totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²par année au Nord et 2263 kwh/m²par année au Sud du pays.

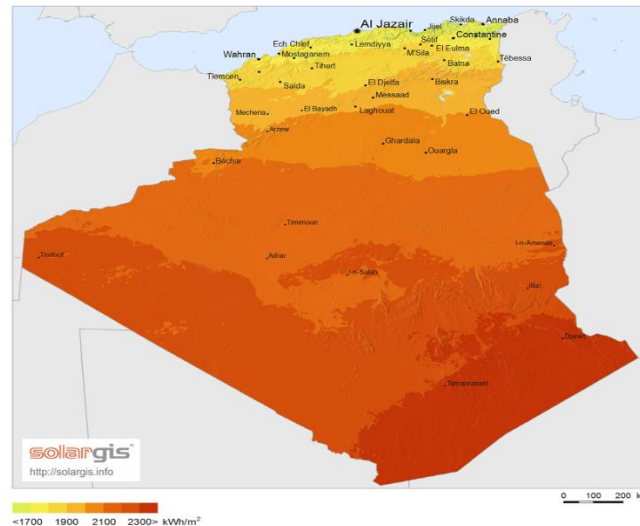


Figure 1.3 Le potentiel du rayonnement solaire en Algérie.

On utilise cette énergie solaire pour produire de l'électricité grâce à l'utilisation de cellules solaires.

1.3 La cellule photovoltaïque

1.3.1 Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore).

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés (Figure 1.4).

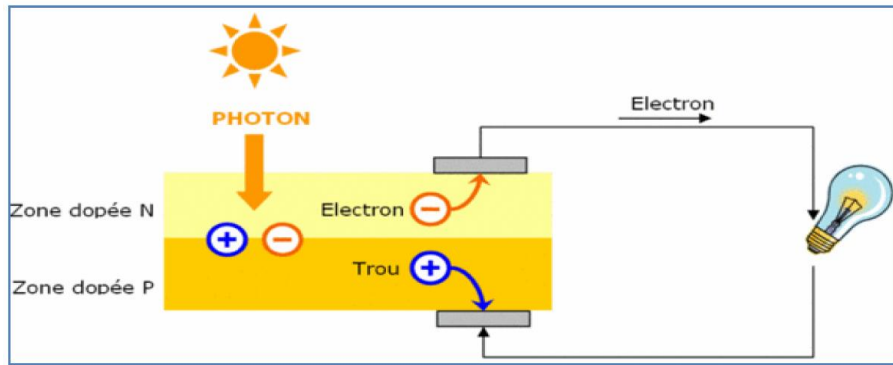


Figure 1.4 Représentation structure d'une cellule solaire.

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

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

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/ trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [7].

1.3.2 Circuit électrique équivalent

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la (figure 1.5).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode 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 parallèle (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [8].

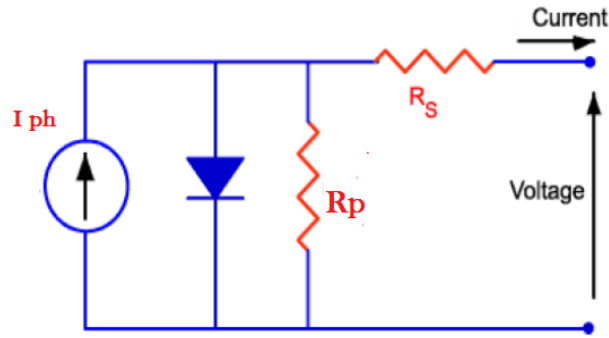


Figure1.5 circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante [9] :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_D - I_{Rp} \tag{1.2}$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque [A].

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) [A].

I_D : Le courant circulant dans la diode [A].

$$I_{PH} = [K_I (T_C - T_{REF}) + I_{CC}] * \frac{G}{1000} \tag{1.3}$$

$$I_D = I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{q (V_{PV} + I_{PV} * R_S)}{N_S * A * K * T_C} \right) - 1 \right] \tag{1.4}$$

$$I_{Sat} = I_0 \left(\frac{T_C}{T_{REF}} \right)^3 \left[\exp \frac{q E_g \left(\frac{1}{T_{REF}} - \frac{1}{T_C} \right)}{A * K} \right] \tag{1.5}$$

$$I_0 = \left[\frac{I_{CC}}{\exp \left(\frac{q * V_{CO}}{K * A * N_S * T_C} \right) - 1} \right] \tag{1.6}$$

I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode [A].

I_0 : courant de court-circuit de la cellule à la température de référence TREF [A].

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

V_{co} : La tension de circuit ouvert [v].

$$I_{RP} = \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_S)}{R_P} \tag{1.7}$$

V_{PV} : La tension de sortie de PV [v].

I_{RP} : Le courant circulant dans la résistance R_P [A].

En substituant les équations (1.3 – 1.4 – et 1.7) dans l'équation (1.2) le courant I_{PV} devient :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV} * R_S)}{N_S * A * K * T_C} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_S)}{R_P} \tag{1.8}$$

1.3.3 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

Les performances d'une cellule solaire sous illumination peuvent être complètement décrites via la caractéristique $I=f(V)$. Cependant, et pour des raisons pratiques, il est suffisant d'exprimer $I=f(V)$, seulement, par quelques paramètres caractéristiques (Figure 1.6).

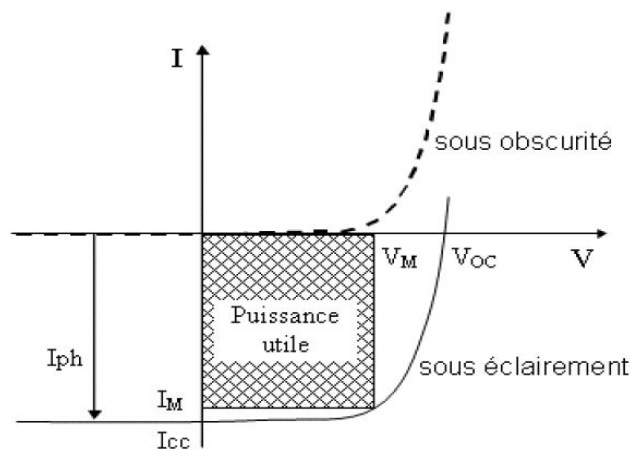


Figure 1.6. Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire.

À partir de la caractéristique $I=f(V)$ illustrée ci-dessus qui montre, les deux caractéristiques d'une diode à jonction pn sous obscurité et sous éclairement, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule, à savoir :

I_{CC} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$),

V_{CO} : Tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$),

I_{MP} : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque,

V_{MP} : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la photopile,

FF : Le facteur de forme, appelé également fill-factor, paramètre important est souvent utilisé. Pour qualifier la qualité d'une cellule solaire, il est également appelé «facteur de remplissage» illustré sur la (Figure 1.7).

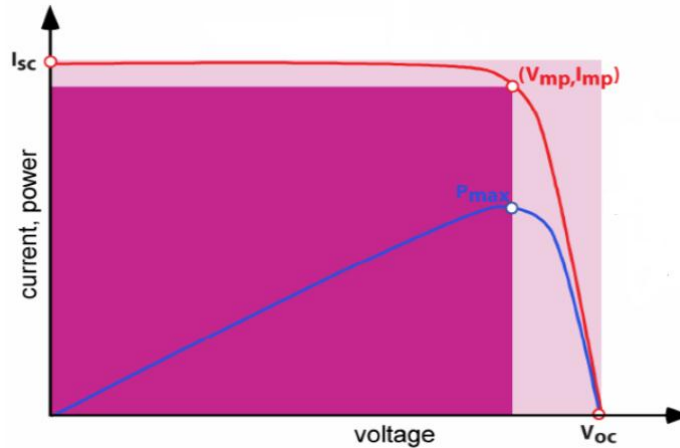


Figure 1.7. Notion de facteur de forme FF d'une cellule solaire.

Le facteur de forme est défini comme suit :

$FF = (\text{Puissance maximale délivrée sur la charge}) / (I_{cc} \times V_{co})$ Donc :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{MP} V_{MP}}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.9)$$

Ce coefficient représente le rapport entre, la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et, la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques, pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

η : Rendement de conversion, qui est défini comme suit : $\eta = (\text{Puissance électrique maximale fournie}) / (\text{Puissance solaire incidente})$ Ou encore :

$$\eta = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{P_I \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_I \cdot S} \quad (1.10)$$

Avec :

P_I : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface,

S : Surface de la cellule solaire sous l'éclairement.

I.3.4 Courant de court-circuit (I_{CC}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{PH} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.8), on obtient [10] :

$$I_{CC} = I_{PH} - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{q(I_{CC} * R_s)}{n K T} - 1 \right) \right] - \frac{I_{CC} * R_s}{R_p} \tag{1.11}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme I_{Sat} [exp (q(I_{PV} * R_S) / n K T) - 1] devant I_{PH}. L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{CC} \cong \frac{I_{PH}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right)} \tag{1.12}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (Pratiquement I_{CC} = I_{PH}).

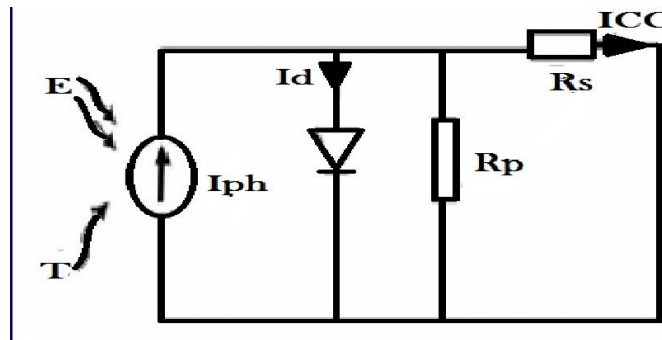


Figure 1.8 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit.

I.3.5 Tension de circuit-ouvert (V_{CO})

C'est la tension V_{CO} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{CC} - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{q V_{PV}}{n K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV}}{R_p} \tag{1.13}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{Sat}} + 1 \right] \tag{1.14}$$

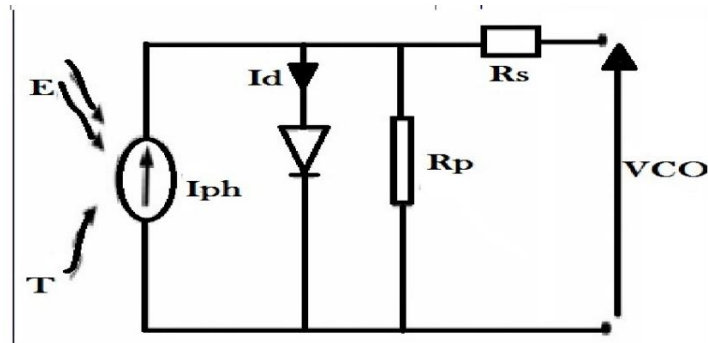


Figure 1.9 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en circuit ouvert.

1.3.6 Présentation du module KC-200 kyocera

Ce module de 54 cellules en série possède les caractéristiques suivantes fournies par le constructeur à 1000 (w/m^2) et 25°C

- Puissance optimale $P_{opt} = 200.1 w$
- Courant de court- circuit $I_{cc} = 8.21A$
- Tension a circuit ouvert $V_{oc} = 32.9 V$
- Courant optimale $I_{opt} = 7.61A$
- Tension optimale $V_{opt} = 26.3V$

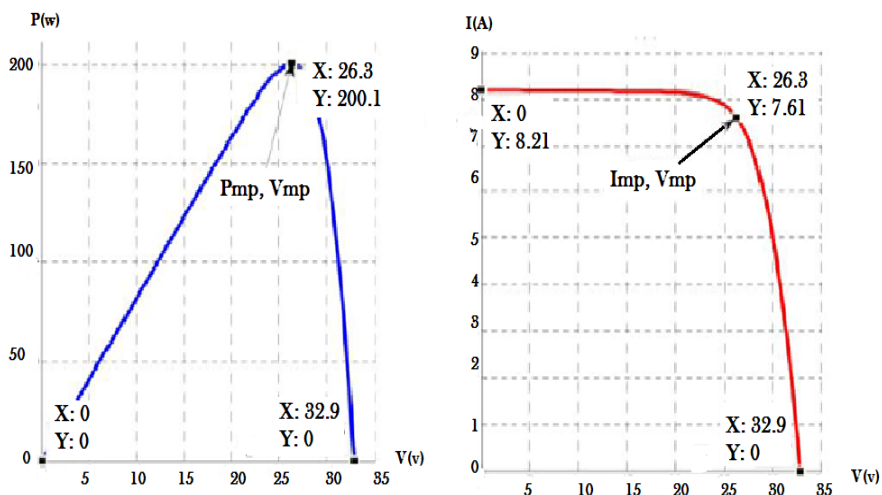


Figure 1.10 Caractéristiques P -V et I -V d'un module KC200GT Pour un éclairement de 1000 W/m^2 et une température ambiante de 25°C.

1.3.7 Influence de l'Éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200. La caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ est donnée par les figures (1.11-1.12). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C.

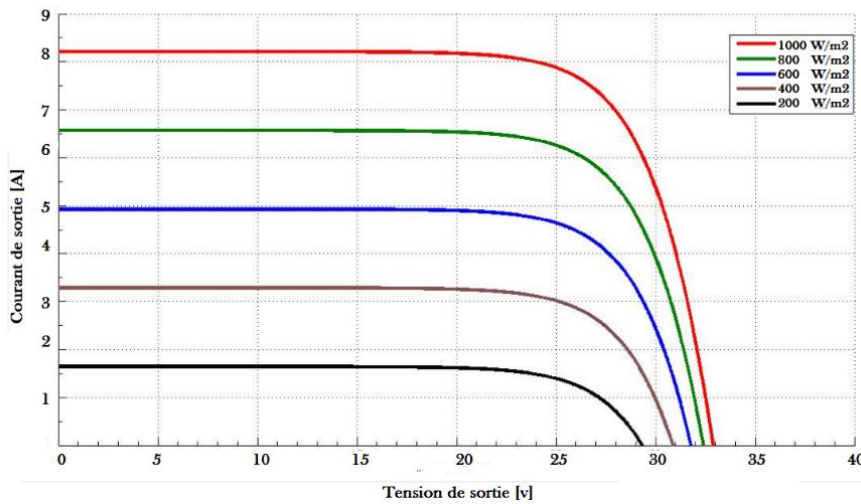


Figure 1.11 Caractéristiques I -V d'un module KC200GT pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C.

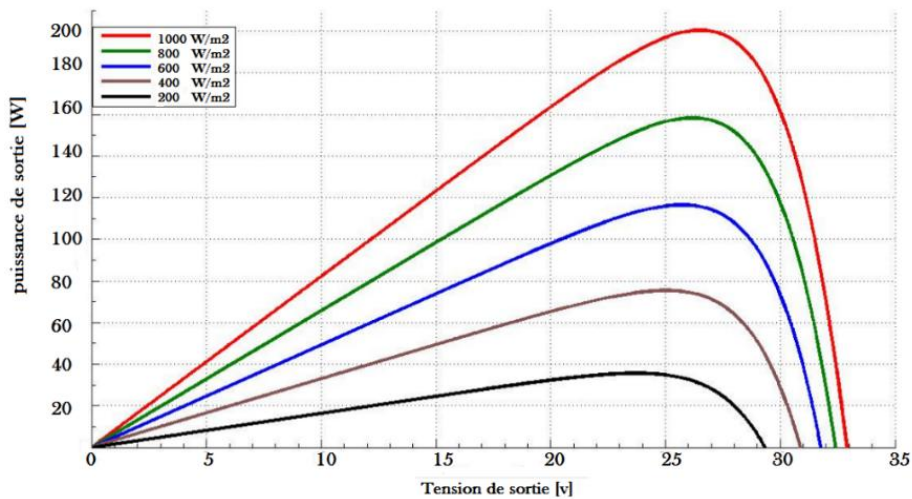


Figure 1.12 Caractéristiques P -V d'un module KC200GT pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C.

1.3.8 Influence de la Température

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 90°C, la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par les figures (1.13 – 1.14). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

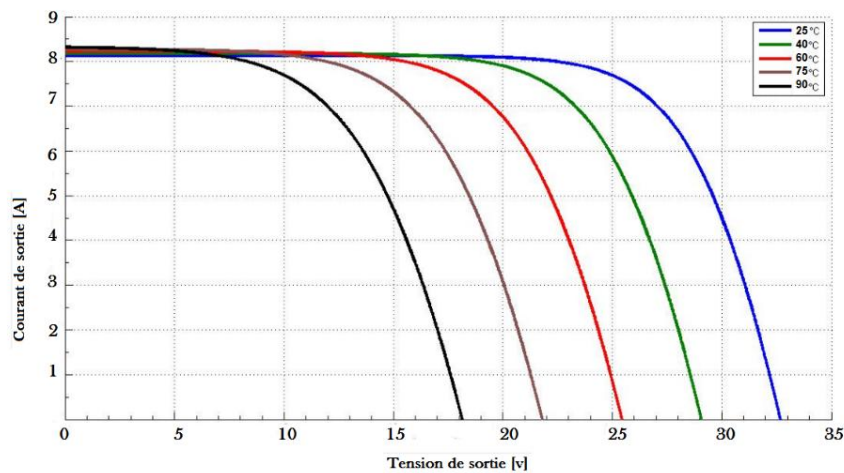


Figure 1.13 Caractéristiques I - V d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de 1000 W/m².

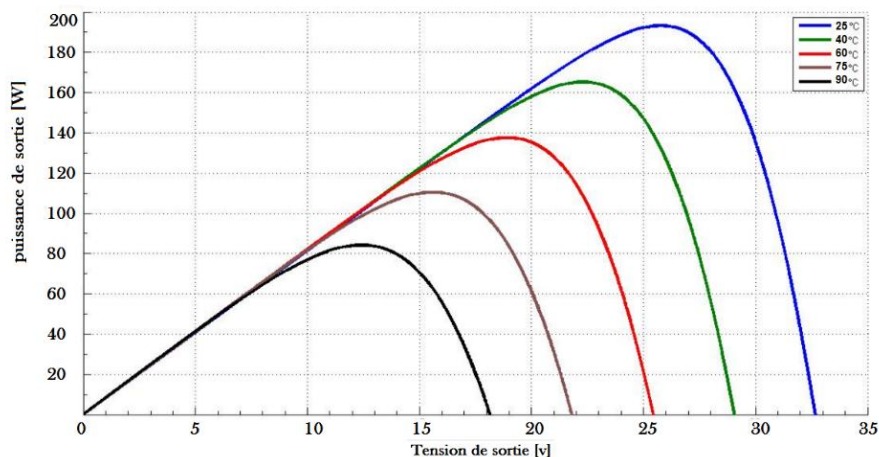


Figure 1.14 Caractéristiques P -V d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de 1000 W/m².

Ces cellules solaires sont l'infrastructure pour former Générateur photovoltaïque Que nous allons les voir pour plus tard.

1.4 Générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures suivantes :

1.4.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La (figure 1.15) montre les caractéristiques résultantes (I_{PCC} , V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques :

$$I_{PCC} = N_p * I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{PCO} = V_{CO}$$

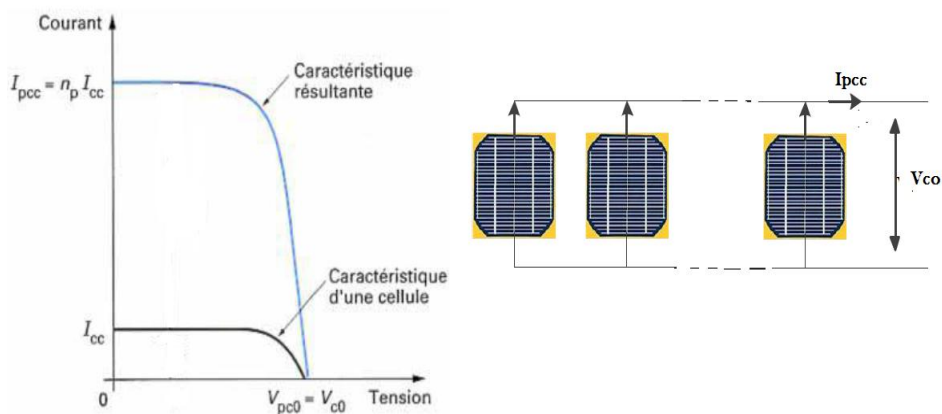


Figure 1.15 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

1.4.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La (figure 1.16) montre la caractéristique résultante (I_{SCC} , V_{SCO}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{CC} , V_{CO}) :

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{SCO} = N_s * V_{CO}$$

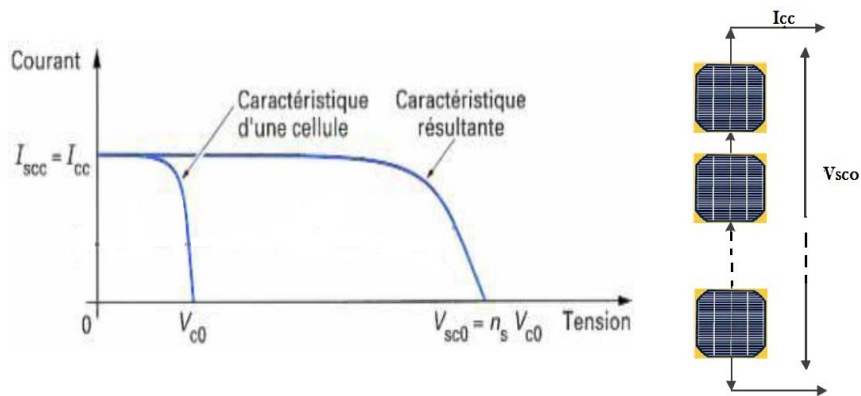


Figure 1.16 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_s cellules en série.

1.4.3 Association en série parallèle

Afin d'obtenir des puissances de quelque kW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux, et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un *générateur photovoltaïque* ou sous-station [11].

$$I_{PCC} = N_P * I_{cc} \text{ et } V_{sc0} = N_s * V_{c0}$$

La (figure 1.17) montre les caractéristiques d'un capteur photovoltaïque, qui est configurée pour 3*2 modules PV dans des conditions identiques.

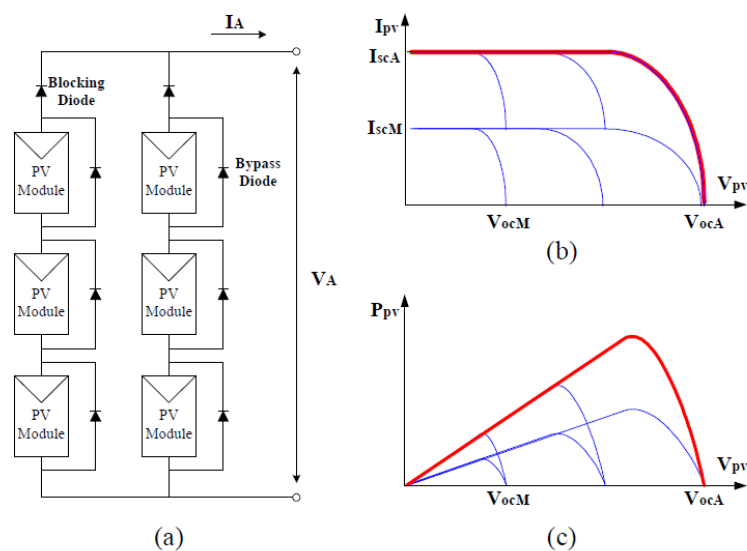


Figure 1.17 Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque, dans des conditions identiques.

(a) configuration de réseau de PV. (b) I-V caractéristiques (c). P-V caractéristiques.

1.4.4 Protections d'un générateur

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association des cellules en séries et des panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles [12], [13], [14].

a) la diode anti-retour

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

b) Les diodes by-pass

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées (Figure 1.18).

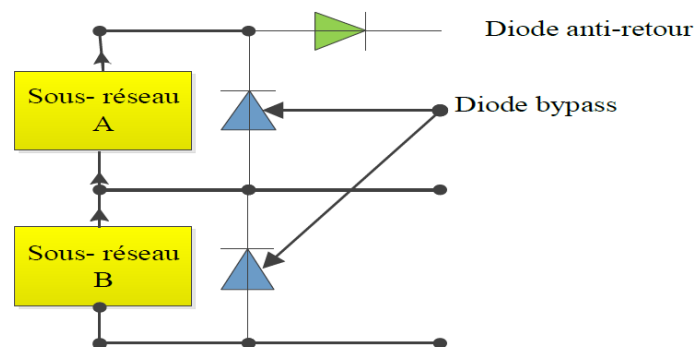


Figure 1.18 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une description du gisement solaire puis on a décrit la cellule solaire qui est l'élément essentiel de la transformation de l'énergie solaire d'une forme à une autre après absorption du rayonnement, puis on a terminé par un rappel sur le générateur photovoltaïque (GPV).

CHAPITRE 2

Les commandes

MPPT

2.1 Introduction

La puissance délivrée par un générateur photovoltaïque (GPV) dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée. Elle est de ce fait très imprévisible. Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre précédent, la courbe caractéristique de la puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un point de fonctionnement de coordonnées V_{MPP} pour la tension et I_{MPP} pour le courant (figure 2.1). Le fait que la position du MPP dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, elle n'est jamais constante dans le temps. Un circuit de recherche du maximum d'énergie (MPPT : Maximum Power Point Tracker) doit être utilisé afin de suivre ces changements. Un système MPPT de puissance est muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

En condition ombrage partial issu de (nuage, ombre d'arbre ...) survient un changement dans la forme de la courbe $P=f(V)$, il produira plusieurs et différents pics pour la puissance maximale, donc la précision du PPM sera difficile. Pour cette raison nous allons créer une technique « Global MPPT » qui nous permettra de scanner la courbe $P=f(V)$ à l'aide de la commande MPPT « perturbation & observation » pour trouver le plus haut pic, ensuite par la technique « logique floue » on va préciser le point de la puissance maximale, enfin le convertisseur « BOOST » va augmenter la tension de sortie.

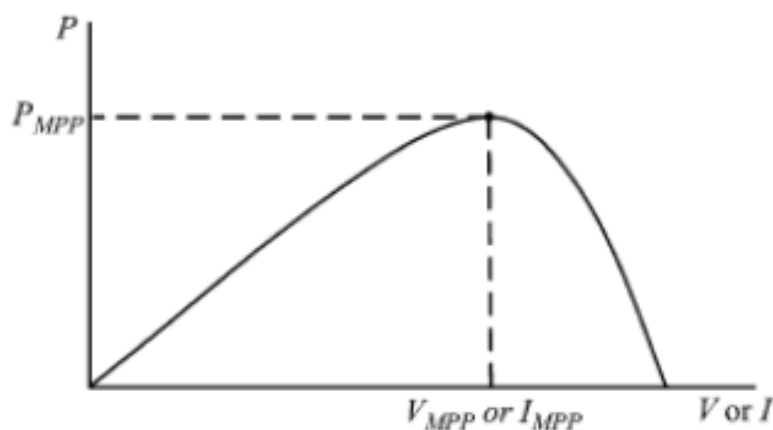


Figure 2.1 Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.

2.2 Principe de la Recherche du PPM

La (figure 2.2) représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du Convertisseur continu en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont présents dans la littérature, nous présentons quelques-uns plus loin dans ce chapitre [1].

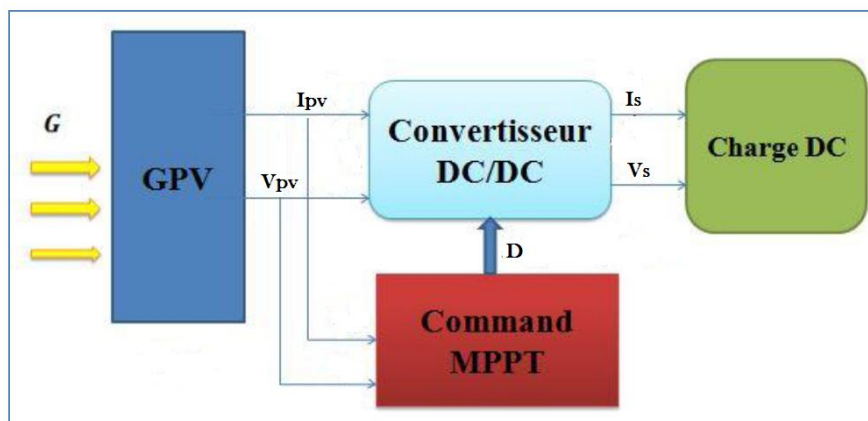


Figure 2.2 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.

2.3 Convertisseurs continu/continu (DC/DC)

2.3.1 Introduction

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé qui dans notre cas va nous permettre de poursuivre le point de fonctionnement optimum. Dans cette partie nous allons voir les principes de fonctionnement des hacheurs qui sont des convertisseurs directs du type continu-continu, dont le rôle primordial est de transformer une puissance d'entrée $P_{PV} = V_{PV} * I_{PV}$ en une puissance de sortie $P_S = V_S * I_S$ avec ($V_S \neq V_{PV}$) et un rendement de conversion $\eta = P_S / P_{PV} = (V_S * I_S) / (V_{PV} * I_{PV})$. En effet, contrairement aux alimentations classiques, les alimentations à découpage mettent en œuvre un commutateur qui travaille en tout ou rien.

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance

active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT. Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f avec un temps de fermeture égal à T et un temps d'ouverture égal à DT ou :

- T est la période de commutation qui est égale à $1/f$.
- D le rapport cyclique du commutateur $D \in [0, 1]$. (Figure : 2.3).

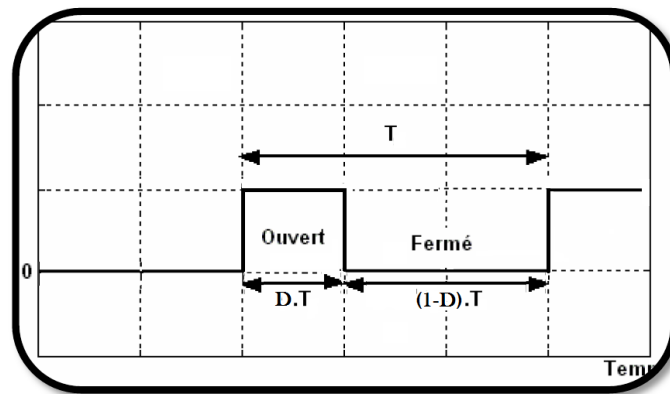


Figure 2.3 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.

2.3.2 Type de convertisseurs

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée, et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque). Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_S > V_{PV}$.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_S < V_{PV}$.
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST) : mélange entre les deux précédents.

Dans notre système, on va s'intéresser au hacheur « Boost » et on donne ici son étude avec un peu de détail.

2.4 Modélisation et dimensionnement convertisseur Boost

2.4.1 Modélisation de convertisseur Boost

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique D ($0 < D < 1$) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la (figure 2.4) [2].

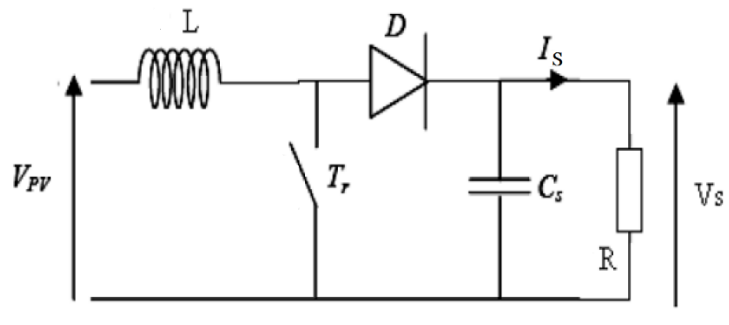


Figure 2.4 Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost).

- Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, le système d'équations devient [3] :

$$I_L = I_{PV} \quad (2.1)$$

$$I_S = (1 - D)I_L \quad (2.2)$$

$$V_{PV} = (1 - D)V_S \quad (2.3)$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_S et I_S) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{PV} et I_{PV}) en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure 2.2) par le système d'équations :

$$V_S = \frac{V_{PV}}{1 - D} \quad (2.4)$$

$$I_S = (1 - D)I_{PV} \quad (2.5)$$

A partir le système d'équations (2.4) et (2.5), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{PV}) en fonction de D et R_{CH} :

$$R_{PV} = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{(1-D)V_S}{I_S/(1-D)} = R_{CH}(1 - D)^2 \quad (2.6)$$

Alors, le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances R_{PV} et R_{CH} :

$$\frac{R_{PV}}{R_{CH}} = (1 - D)^2 \Rightarrow D = 1 - \sqrt{\frac{R_{PV}}{R_{CH}}} \quad (2.7)$$

Puisque le rapport α est vérifié l'inégalité $0 < D < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_{CH} remplit la condition suivante : $R_{CH} > R_{PV}$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_{CH} donnée, la résistance interne du panneau ($R_{PV} = R_{OPT}$) et le rapport cyclique ($D = D_{OPT}$) obéissent donc à l'équation :

$$R_{OPT} = (1 - D_{OPT})^2 R_{CH} \quad (2.8)$$

- Dans le cas idéal, le fonctionnement du hacheur *Boost* peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor Tr

Tr est fermé (passant) durant DT de la période de découpage T , la diode d est bloquée. La tension aux bornes de l'inductance $V_L = V_{PV}$. Cette inductance stocke le courant provenant du panneau photovoltaïque.

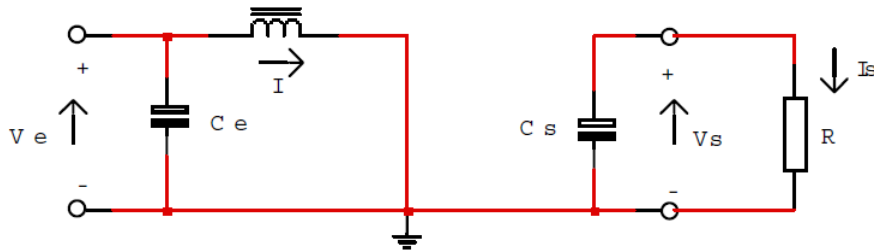


Figure 2.5 Convertisseur Boost (Interrupteur passant).

Lorsque l'interrupteur s'ouvre (bloqué), c'est la deuxième phase de fonctionnement, l'interruption du courant dans l'inductance provoque une surtension qui est dérivée dans le condensateur et la résistance

$$V_L = V_{PV} - V_s \quad (2.9)$$

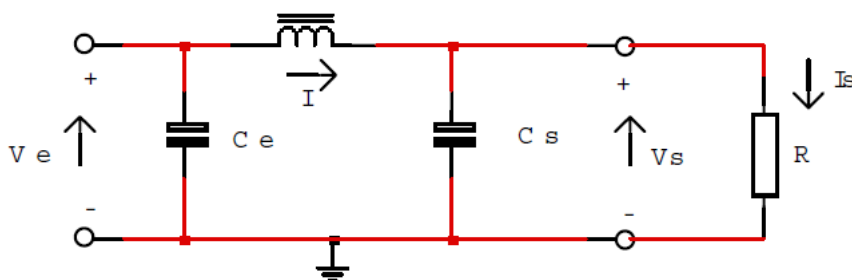


Figure 2.6 Convertisseur Boost (Interrupteur bloqué).

Le condensateur est chargé par le courant provenant du générateur et emmagasiné dans l'inductance lors de la première phase de fonctionnement. Il sert à lisser la tension de sortie. Les formes d'onde du courant dans l'inductance ainsi que la tension de sortie sont données dans la (figure 2.7).

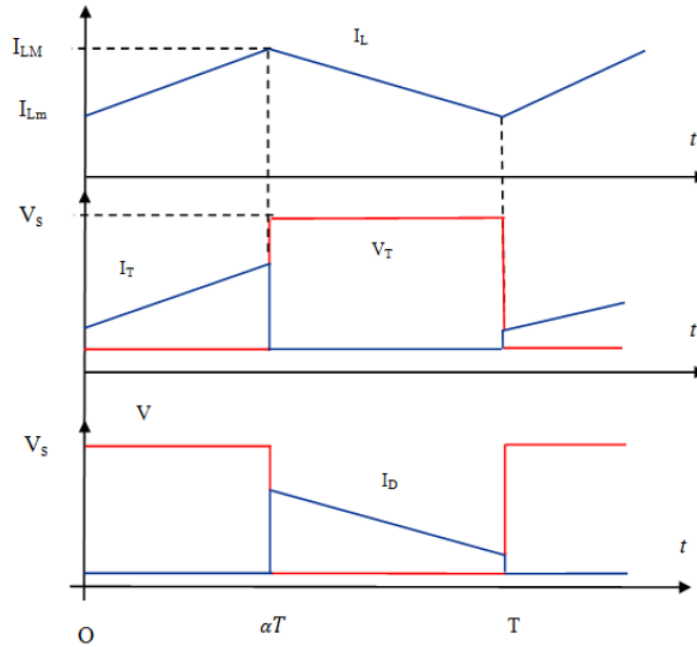


Figure 2.7 Formes d'ondes typiques en cc de tension et de courant du hacheur boost.

- On montre dans ce qui suit le modèle mathématique du hacheur pour le mode de fonctionnement continu [4].

$$\begin{aligned}
 (0 < t < DT) \quad & \left\{ \begin{aligned} I_{Ce} &= C_e \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L & (2.10) \\ I_{CS} &= C_s \frac{dV_S}{dt} = -I_S & (2.11) \\ V_L &= L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} & (2.12) \end{aligned} \right. \\
 (DT < t < T) \quad & \left\{ \begin{aligned} I_{Ce} &= C_e \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L & (2.13) \\ I_{CS} &= C_s \frac{dV_S}{dt} = I_L - I_S & (2.14) \\ V_L &= L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_S & (2.15) \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Pour pouvoir présenter la dynamique du système on suppose que la variation des grandeurs dynamiques I_L , V_L , V_S est linéaire. On trouve donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_L = I_{PV} - C_e \frac{dV_{PV}}{dt} \\ I_S = (1 - D)I_L - C_S \frac{dV_S}{dt} \\ V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} (1 - D)V_S \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.16) \\ (2.17) \\ (2.18) \end{array}$$

2.4.2 Dimensionnement Convertisseur Boost

$$V_{pv} = 78.9V. \quad I_{pv} = I_L = 15.2A. \quad P_{pv} = 1200W. \quad V_S = 132V. \quad P_S = 1200W.$$

$$\Delta I_L = 10\% I_L = 1.52A \quad \Delta V_S = 5\% V_S = 6.65V \quad F = 10^5 \text{ Hz}$$

a) Résistance de charge

$$R_{CH} = \frac{V_S^2}{P_S} \quad (2.19)$$

$$R_{ch} = 14.7 \ \Omega$$

b) Courant de sortie

$$I_S = \frac{P_S}{V_S} \quad (2.20)$$

$$I_S = 9.1 \text{ A}$$

c) Rapport cyclique

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_S} \quad (2.21)$$

$$D = 0.4$$

d) Valeur de l'inductance

$$L = \frac{D * V_{PV}}{F * \Delta I} \quad (2.22)$$

$$L = 207.6 \ \mu\text{H}$$

e) Condensateur de sortie

$$C_S = \frac{I_S * D}{F * \Delta V_S} \quad (2.23)$$

$$C_S = 5.41 \ \mu\text{F}$$

2.5 Méthodes de poursuite MPPT

2.5.1 Introduction

Afin de faire la poursuite du P.P.M du système photovoltaïque, la tension de sortie du système photovoltaïque est régulé par le convertisseur DC/DC qui lui-même est contrôlé continuellement par son rapport cyclique. Il existe plusieurs méthodes de commande pour la poursuite MPPT.

2.5.2 Philosophie du MPPT

Presque la plupart des méthodes de poursuite du PPM reposent sur la caractéristique P-V de la cellule PV (figure 2.8).

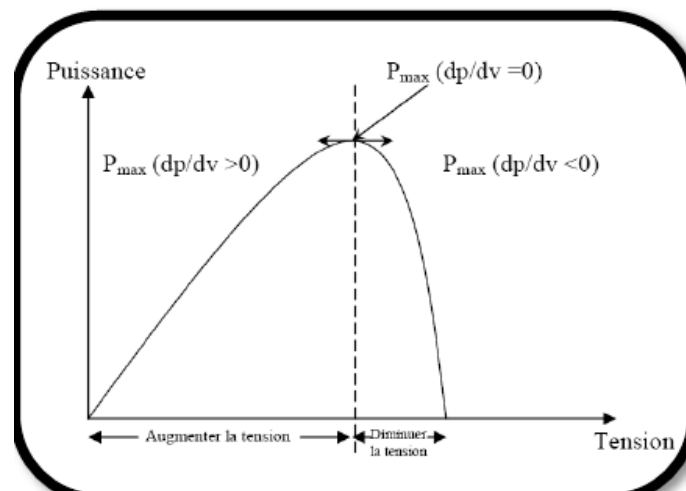


Figure 2.8. Caractéristique P-V d'une cellule PV.

La caractéristique P-V est découpée en deux demi plans :

- Le demi plan gauche ou la dérivée $(dP/dV) > 0$: Si on est dans cette zone donc on essaye d'augmenter la tension pour aller vers le PPM et cela se fait par la décrémentation du rapport cyclique D ce qui veut dire que :

$$D_k = D_{k-1} - Z \quad (2.24)$$

(Avec Z : le pas d'incrément),

- Le demi-plan droit ou la dérivée $(dP/dV) < 0$: Si on est dans cette zone donc on essaye de diminuer la tension pour aller vers le PPM et cela se fait par-là l'incrément du rapport cyclique D ce qui veut dire que :

$$D_k = D_{k-1} + Z \quad (2.25)$$

Il existe cite plusieurs méthodes qui fonctionnent suivant cette philosophie, par exemple :

- L'Algorithme Perturbation et Observation (P & O).
- L'Algorithme de contrôle MPPT logique floue
- L'Algorithme de l'incrémentatation de conductance.
- Méthodes MPPT par contre réaction de tension.

Les deux premières sont expliquées brièvement par la suite.

2.6 L'algorithme MPPT de perturbation et observation

L'algorithme mis en œuvre dans les premières MPPT conçus était relativement simple.

La commande exposée dans ce mémoire est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est représenté à la (figure 2.8), et peut être implanté entièrement en numérique [5].

L'algorithme de perturbation et observation de poursuite du PPM étant le plus utilisé, on mesure la tension (V) et le courant (I) puis on calcule la puissance (P).

Nous décrivons le fonctionnement de l'algorithme MPPT. Le signe de la dérivée de puissance dP/dV nous permet d'exécuter cet algorithme.

- Si la dérivée est positive : $dP/dV > 0$; l'augmentation du rapport cyclique D , indique que nous nous approchons du PPM. (*à gauche du PPM*).
- Si la dérivée est négative : $dP/dV < 0$; la diminution du rapport cyclique D , indique que nous nous dépassons du PPM. (*à droite du PPM*).
- Si la dérivée est nulle : $dP/dV = 0$; ceci indique que c'est la PPM.

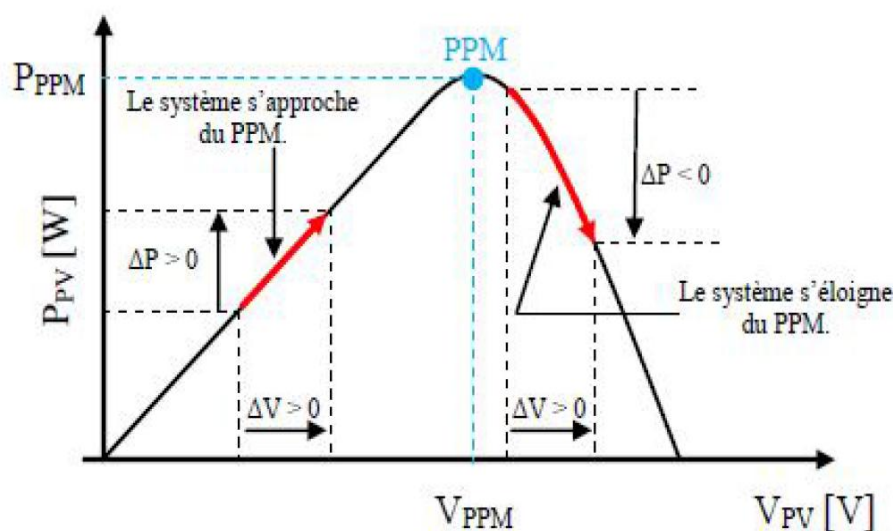


Figure 2.9 Recherche du MPP par la méthode (P&O).

A partir du signe de la dérivée de puissance nous pouvons déterminer le sens recherche du point de puissance maximal à l'aide de ce que nous notons dans la (figure 2.9) ci-dessus :

Deux capteurs sont généralement nécessaires pour mesurer la tension et le courant à partir desquels la puissance est calculée. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant.

Il existe une variante de l'algorithme **P&O** qui utilise uniquement deux mesures, à savoir le courant et la tension en sortie du convertisseur. Le but est de maximiser la puissance en sortie. Le principe de fonctionnement est alors le même moyennant quelques changements.

Bien que cette technique donne de bons résultats en simulation avec un convertisseur idéal, il n'est pas prouvé en pratique que le PPM soit atteinte [6].

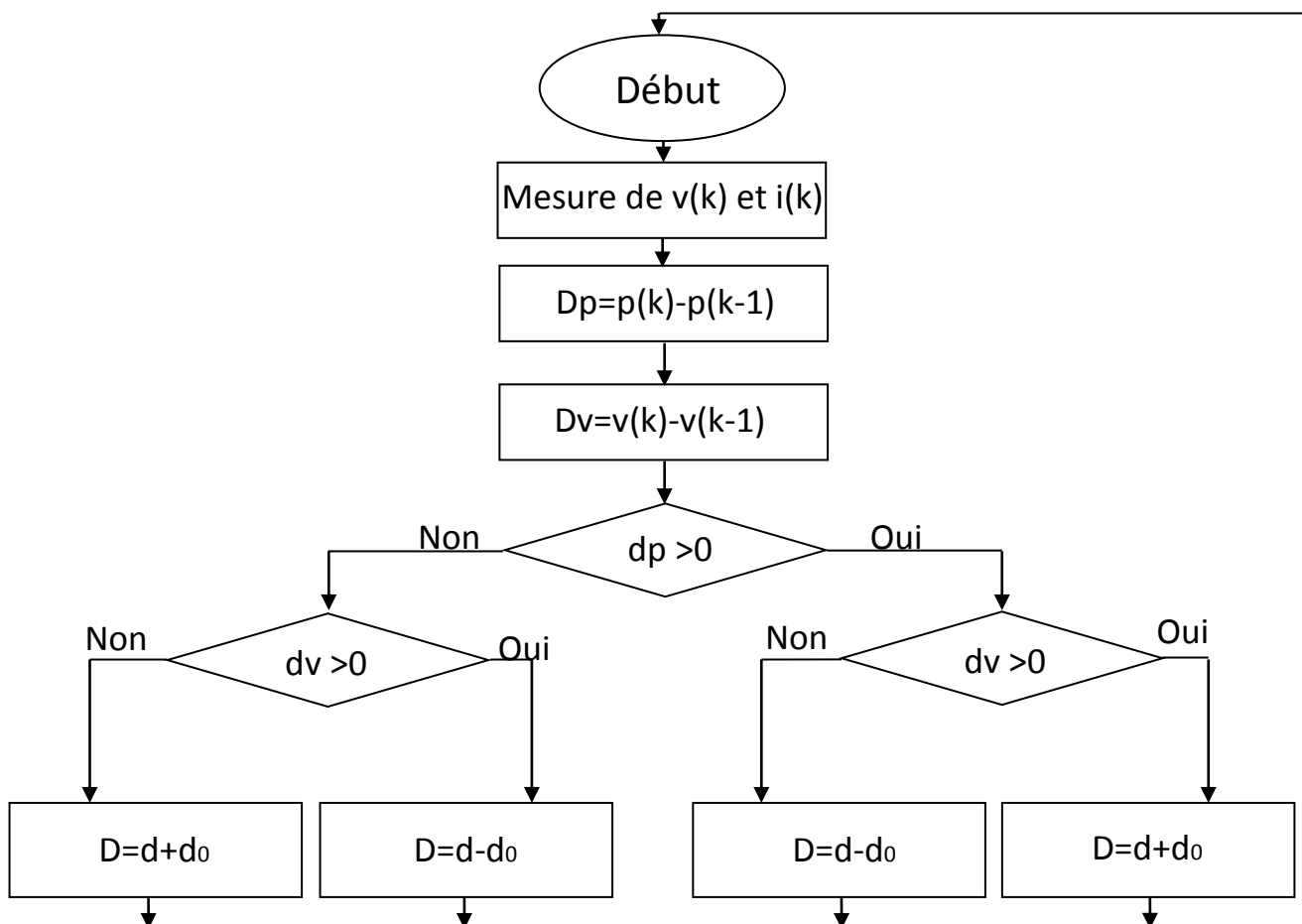


Figure 2.10 Organigramme de la méthode P&O.

2.7 Commande MPPT basée sur l'approche floue

Le but de ce chapitre est de présenter en bref un rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système photovoltaïque. Nous introduisons d'abord quelques notions de la logique floue ; nous nous limiterons aux propriétés essentielles, puis nous appliquerons cette technique d'optimisation pour maximiser le rendement du système PV.

La puissance de sortie des modules photovoltaïques est influencée par l'intensité du rayonnement solaire, la température et la surface des cellules, ainsi que la charge. Par conséquent, pour maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (PPM) de la source d'entrée. Dans ce chapitre, nous proposons un système de commande MPPT basé sur la théorie des ensembles flous pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV. L'algorithme flou basé sur les règles linguistiques est appliqué à la commande du convertisseur DC-DC (survolteur) pour la MPPT. Le contrôleur flou a été intégré afin de réduire non seulement le temps requis pour la poursuite du point de puissance maximale (PPM), mais également la fluctuation de la puissance.

La logique floue ou la théorie des ensembles floue est une nouvelle méthode de commande MPPT permettant d'obtenir le point de puissance maximale (PPM). Le contrôleur flou fonctionne en deux modes de base grossier et fin [7]. Cet algorithme de commande comprend trois étapes, à savoir :

- La fuzzification.
- La méthode d'inférence.
- La défuzzification.

La (figure 2.11) montre la configuration du contrôleur flou, qui se compose de la graduation (scaling) d'entrée-sortie, la fuzzification, la décision floue, et la défuzzification.

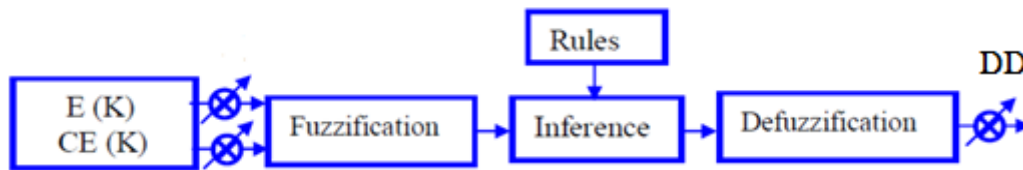


Figure 2.11 Configuration du contrôleur flou.

2.7.1. Fuzzification

La fuzzification permet de passer des variables réelles à des variables floues. La tension et le courant réels du module PV peuvent être mesurés continuellement et la puissance peut être calculée. La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrée du contrôleur proposé, à savoir l'erreur (E) et le changement d'erreur (CE), à un instant d'échantillonnage k.

Les variables E et le CE sont exprimées comme suit :

$$E(K) = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \quad (2.26)$$

$$CE(K) = E(K) - E(K - 1) \quad (2.27)$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont respectivement la puissance et la tension du GPV. Par conséquent, $E(k)$ est nulle au MPP du GPV.

Ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables ou étiquettes linguistiques telles que le :

- NB (Négatif Big),
- NS (Négatif Small),
- ZE (Zéro),
- PS (Positif Small),
- PB (Positif Big)

La (figure 2.12) montre les degrés (ou fonctions) d'appartenance de cinq sous-ensembles flous de base pour les variables d'entrée et de sortie.

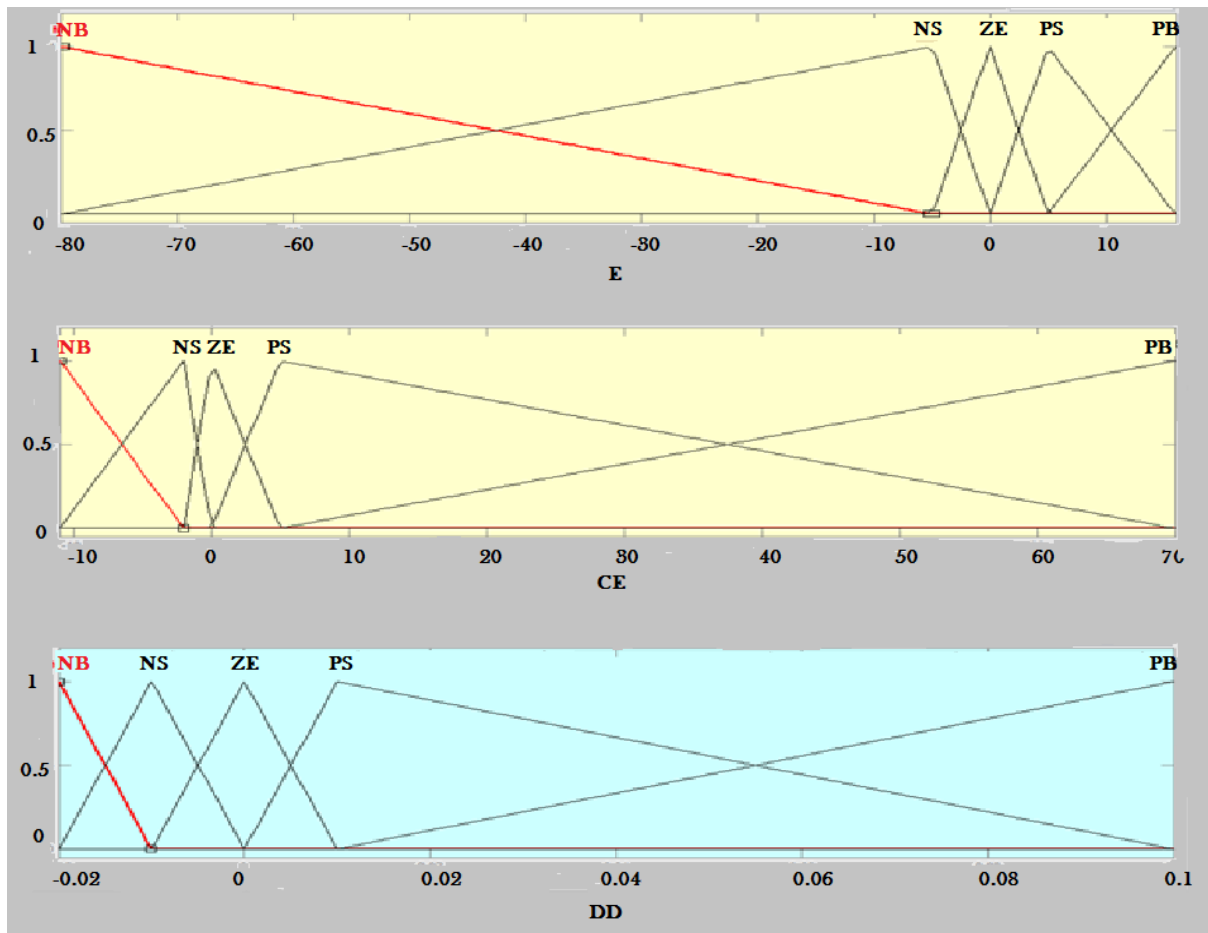


Figure 2.12 Fonctions d'appartenance des variables du contrôleur flou.

2.7.2. Méthode d'inférence

Le (tableau 2.1) [8] montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (E), le changement de l'erreur (CE) et le changement du rapport cyclique (DD) du convertisseur. Dans le cas de la commande floue, la règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée E soit toujours nulle.

| E \ CE | NB | NS | ZE | PS | PB |
|--------|----|----|----|----|----|
| NB | ZE | ZE | NB | NB | NB |
| NS | ZE | ZE | NS | NS | NS |
| ZE | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| PS | PS | PS | PS | ZE | ZE |
| PB | PB | PB | PB | ZE | ZE |

Tableau 2.1 Règles floue (matrice d'inférences).

Le (tableau 2.1) comprend 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande du convertisseur survolteur (ou dévolteur) telle que la puissance maximum du panneau solaire soit atteinte.

Par exemple la case (5, 3) du (tableau 2.1) représente la règle de commande.

Si E est **PB** et CE est **ZE** alors DD est **PB**.

Ceci implique que. "Si le point de fonctionnement est éloigné du point de puissance maximale (MPP) du côté gauche et le changement de la pente de la courbe $P-I$ est presque nul, alors il y a une grande augmentation du rapport cyclique D.

Pour la commande floue, on utilise en général une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence MAX-MIN.
- Méthode d'inférence MAX-PROD.
- Méthode d'inférence SOMME-PROD.

Dans notre cas, on utilise la méthode d'inférence de Mamdani qui est la combinaison floue MAX-MIN. Les opérateurs logiques sont interprétés comme suit :

| Opérateur logique | Interprétation |
|-------------------|----------------|
| ET | Minimum |
| OU | Maximum |
| Implication | Minimum |

Tableau 2.2. Interprétation des opérateurs logiques.

2.7.3. Défuzzification

On a vu que les méthodes d'inférence fournissent une fonction pour la variable d'appartenance résultante, il s'agit donc d'une information floue. Etant donné que le convertisseur DC-DC nécessite un signal de commande D précis à son entrée il faut prévoir une transformation de cette information floue en une information déterminée, cette transformation est appelée défuzzification.

La (figure 2.13) donne le graphe en 3 dimensions de la sortie D en fonction des deux entrées E et CE.

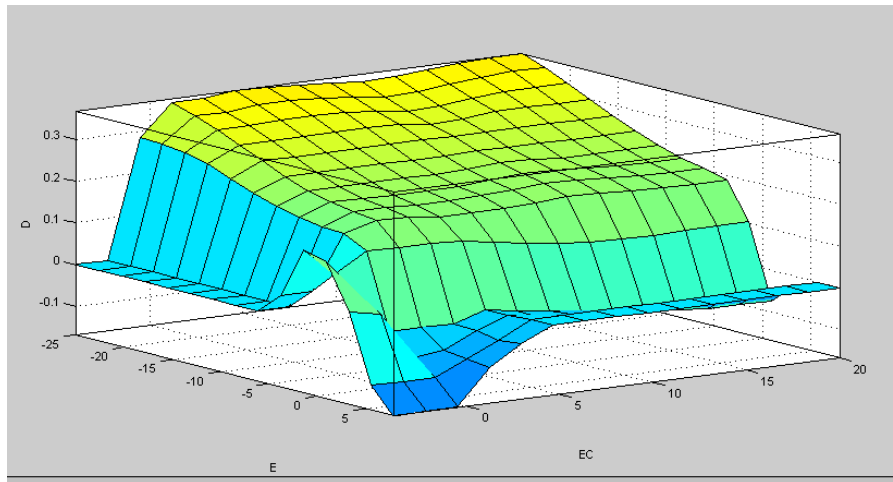


Figure 2.13 Résultat de défuzzification $D = f(E, CE)$.

2.8 Phénomène d'ombrage sur les modules photovoltaïques

Effet d'ombrage partiel est situation courante en raison de l'ombre des bâtiments, des arbres, des nuages et des souillures, etc. Sous condition d'ombrage partiel, seule une des chaînes en série des PV modules est moins éclairée et qui doit alors dissiper une partie de la puissance générée par le reste des modules. Il signifie que le courant disponible à une connexion en série.

2.8.1 Principe

Additionner les tensions dans le cas d'un assemblage série de cellules PV est aisé si toutes les cellules sont identiques et qu'elles travaillent sous les mêmes conditions d'ensoleillement et de température. Mais, comme nous l'avons précisé précédemment, dans les conditions réelles de fonctionnement, si les cellules sont légèrement différentes ou ne sont pas uniformément éclairées, le comportement électrique n'est pas facilement prévisible et dépend des caractéristiques de chaque cellule et des conditions d'éclairage. Plusieurs études ont présenté des modèles mathématiques afin de calculer les effets de cellules non-identiques dans un module [9] [10].

La (figure 2.14) montre la caractéristique $I - V$ d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension. On constate que si, pour un éclairement solaire et une température ambiante donnés, le courant traversant une cellule est supérieur à son courant de court-circuit, alors la cellule fonctionnera en mode inversé (reverse-bias conditions) avec une tension négative. Dans ce cas, la puissance excessive sera dissipée dans la cellule ombragée et la cellule ou

l'encapsulation de la cellule en plastic peuvent être irrémédiablement endommagées et peuvent conduire à un court-circuit dans la cellule. Cet effet est appelé 'hot spot'.

Dans le domaine en sens direct (mode normal de fonctionnement), la tension de circuit ouvert de la cellule est de l'ordre de 0,6 V pour les cellules cristallines alors que dans le sens inversé (polarisation inversée), les tensions peuvent atteindre plus de (-20 V) [11].

Dans un assemblage série, le courant est le même dans toutes les cellules. Si le courant de la rangée est plus grand que le photocourant de la cellule ombragée (courant de court-circuit), ce qui se produit dans la plupart des cas, cette cellule ombragée se met à fonctionner en mode inversé et dissipe de la puissance. Une telle situation est illustrée sur la (figure 2.15) dans le cas de trois cellules connectées en série.

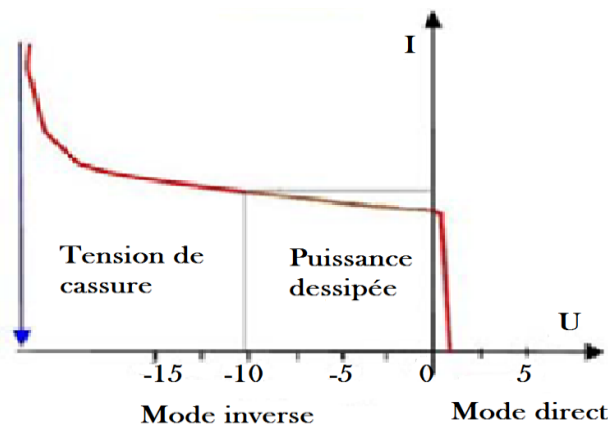


Figure 2.14 Caractéristique I -V d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension.

Si la rangée de cellules travaille à un point de fonctionnement correspondant à un courant I_{MP} au-delà du courant de court-circuit de la cellule ombragée (cellule 2), le point de fonctionnement de la cellule ombragée se situe dans la région aux tensions négatives et cette tension négative de la cellule 2 peut être supérieure à la contribution positive de toutes les autres cellules.

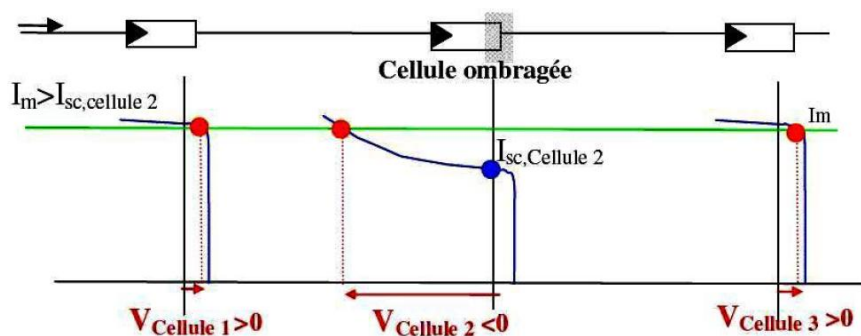


Figure 2.15 Principe de construction de la caractéristique d'un module PV pour un courant donné.

Pour résoudre ce problème (mais que partiellement), on utilise une diode by-pass connectée en parallèle sur chaque connexion série des multiples cellules PV. Si une telle diode by-pass était connectée dans chaque cellule alors le problème induit par l'ombrage serait fortement réduit. Cependant, ce n'est pas une solution envisageable d'un point de vue commercial [12]. Cependant, les caractéristiques deviennent plus compliquées par les diodes de dérivation. La (figure 2.16) montre les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque qui est configuré pour 3*2 modules PV sous partiellement état ombragé (à savoir l'un des modules PV est grisé). Comme représenté sur la (figure 2.16 (c)), les maxima locaux multiples pourrait présenter en tension - puissance courbe caractéristique.

2.8.2 Modèle approximatif de générateur photovoltaïque sous Ombrage partiel Condition

Comme on le voit sur la (figure 2.16 (b)), les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque reçoivent plus compliquée dans des conditions d'ombrage partiel et le l'équation du courant de sortie du réseau de PV est ne convient pas.

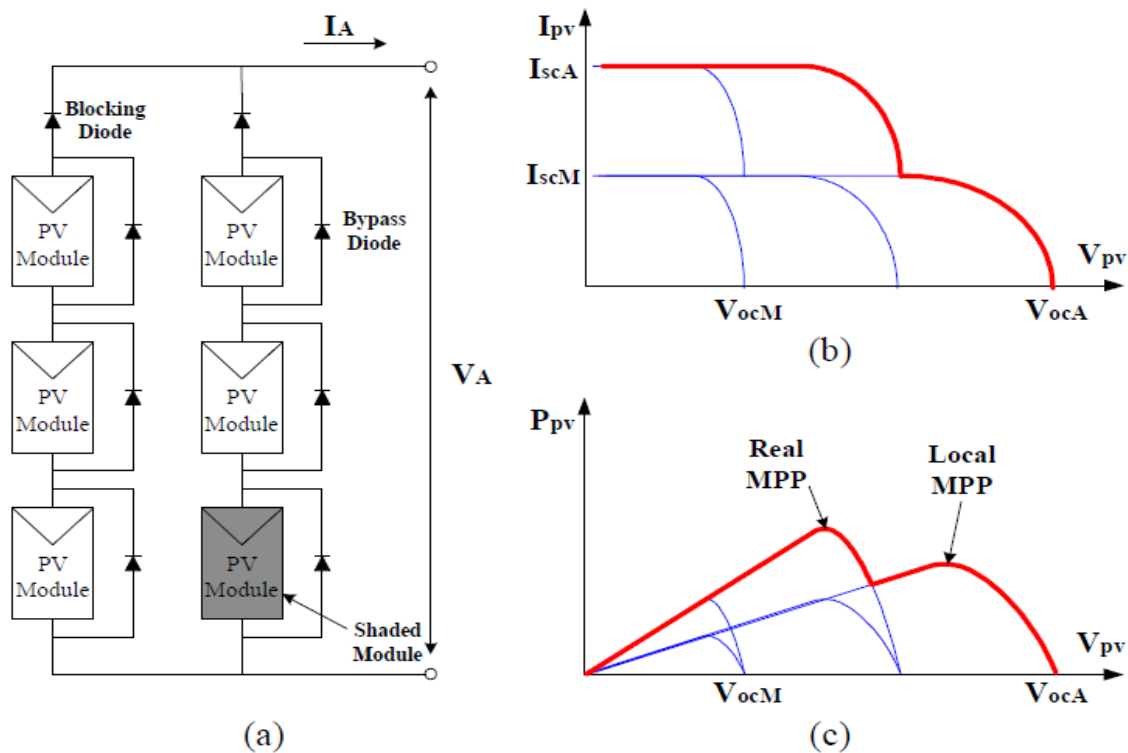


Figure 2.16 Caractéristiques d'un réseau de PV en condition ombragée partielle.
 (a) configuration de réseau de PV. (b) I-V caractéristiques. (c) P-V caractéristiques.

2.7 Globale MPPT

La (figure 2.17) représente le schéma synoptique de l'algorithme GMPPT. Au premier l'algorithme adopte la méthode P&O à chercher le premier pic et la puissance P_1 seront enregistrées comme P_{mpp} . Ensuite, continuer la méthode P&O jusqu'à deuxième pic. S'il y a $P_2 > P_{mpp}$, P_{mpp} sera mis à jour en P_2 , sinon P_{mpp} reste le même (P_1). Alors continuer à chercher le dernier pic P_n , jusqu'à P_{mpp} est mis à jour le point de puissance maximale [13].

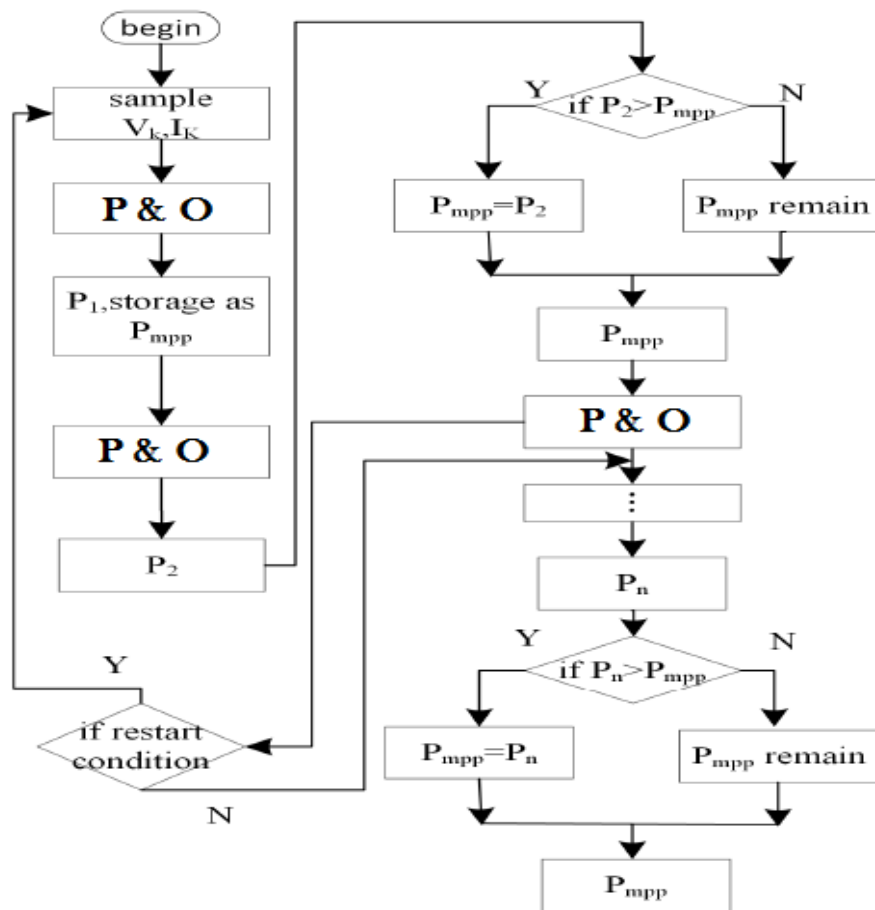


Figure 2.17 Global MPPT algorithme.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique sur le convertisseur élévateur boost. Un rappel sur les différents MPPT est introduit suivi d'une description de la methode perturb and observe ; puis la démarche détaillée pour la conception d'un contrôleur MPPT flou en utilisant la boite à outil Fuzzy de Matlab. On a terminé par une présentation de l'effet des conditions d'ombrages partiels et la GLOBAL MPPT.

CHAPITRE 3

Simulation

du système

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation & observation » ou « logique floue ».

Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur «boost», une commande MPPT ainsi qu'une charge.

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

3.2 L'outil Matlab/Simulink

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

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

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

3.3 Condition uniforme

3.3.1 Simulation du générateur PV

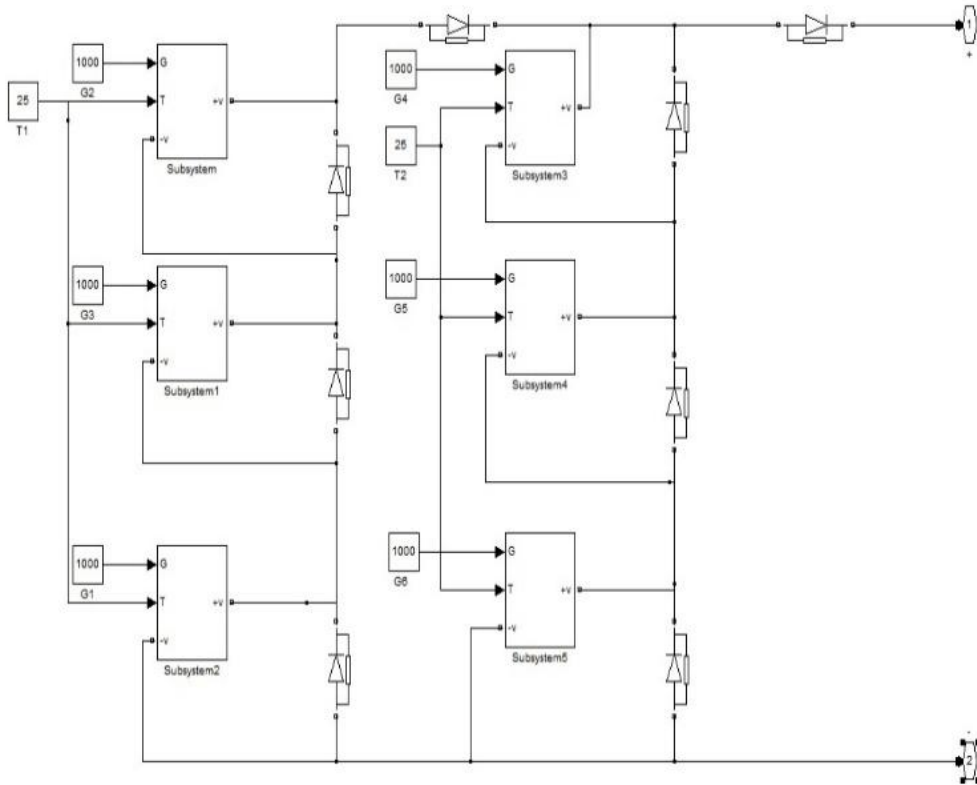


Figure 3.1 Schéma de générateur photovoltaïque (3*2) en SIMULINK en condition uniforme.

Le schéma de cellule photovoltaïque en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par

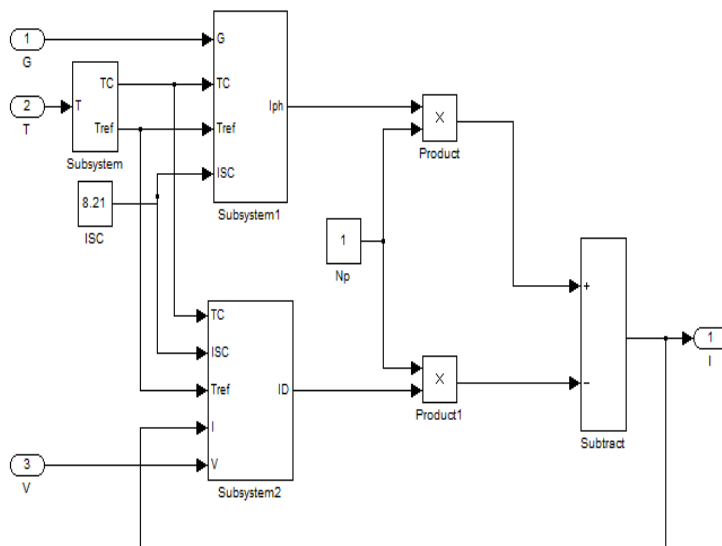


Figure 3.2 Schéma de cellule PV en MATLAB-SIMULINK.

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par la (figure 3.3) jusqu'à (figure 3.6). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclairements.

En faisant varier la température de 0°C jusqu'à 60°C , la (figure 3.3) ci-dessous montre que la tension à vide d'une cellule photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température de la cellule PV. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule solaire.

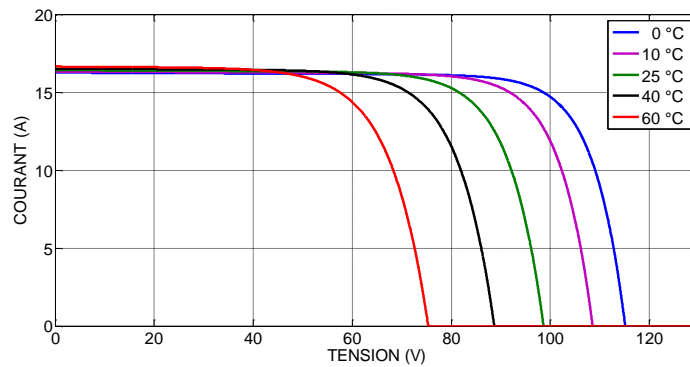


Figure 3.3 Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (3.4) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

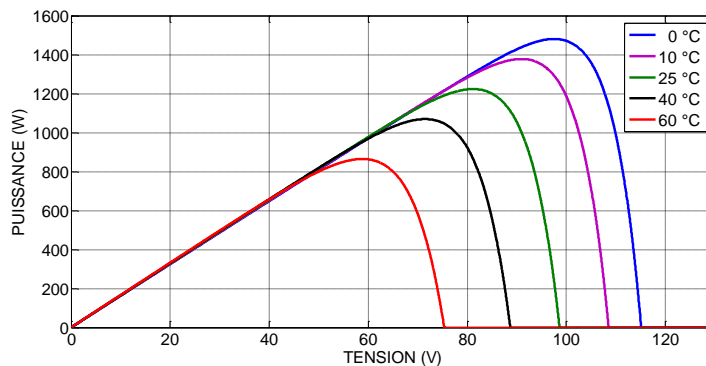


Figure 3.4 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200.

La (figure 3.5) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

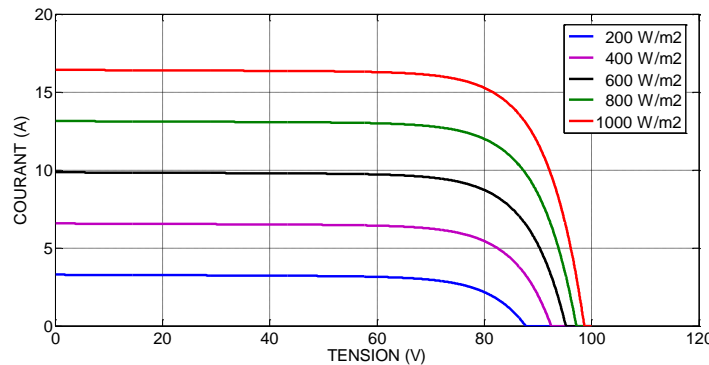


Figure 3.5 Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température T=25°C

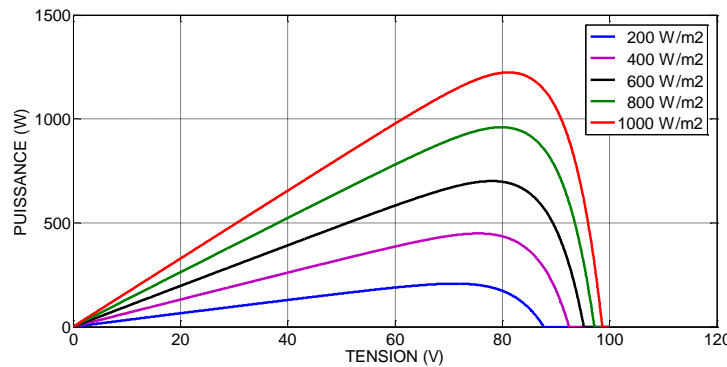


Figure 3.6 Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension pour différents éclairement et une température T=25°C

On peut remarquer sur la (figure 3.6) que l'augmentation de la puissance est causée par l'augmentation de l'insolation.

3.3.2 Simulation de hacheur survolteur

$V_{pv} = 78.9V.$ $I_{pv} = I_L = 15.2A.$ $P_{pv} = 1200W.$ $V_s = 132V.$ $P_s = 1200W.$

$\Delta I_L = 10\% I_L = 1.52A$ $\Delta V_S = 5\% V_S = 6.65V$ $F = 10^5 \text{ Hz}$

- a) Résistance de charge $R_{ch} = 14.7 \Omega$ b) Courant de sortie $I_s = 9.1 \text{ A}$
- c) Rapport cyclique $D = 0.4$ d) Valeur de l'inductance $L = 207.6 \mu\text{H}$
- e) Condensateur de sortie $C_s = 5.41 \mu\text{F}$

La (figure 3.7) représente le schéma block d'un convertisseur survolteur.

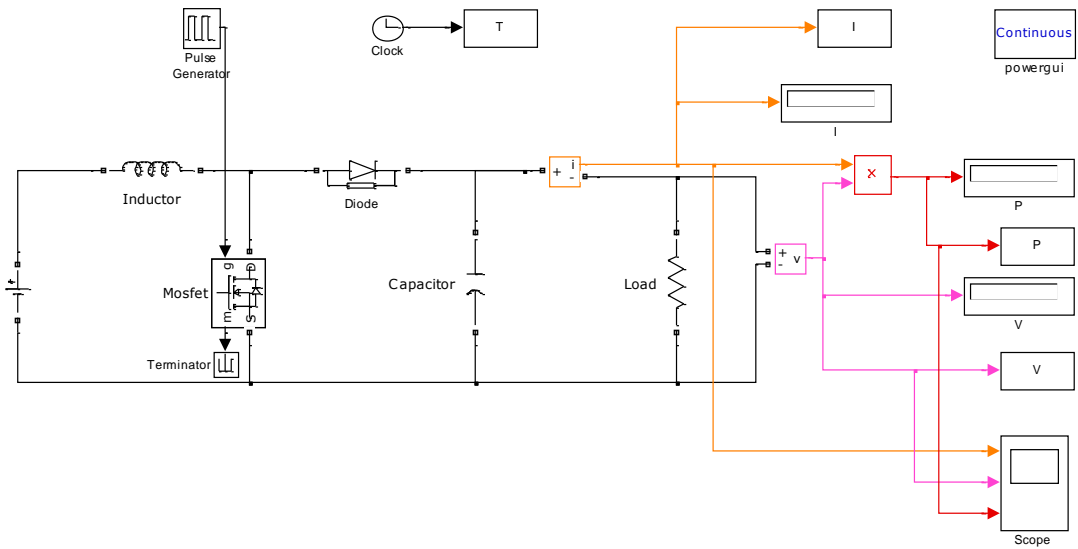


Figure 3.7 Schéma block d'un convertisseur survolteur.

On commande le rapport cyclique (D) à partir la valeur V_{PV} et V_S à l'aide d'un comparateur on fait la comparaison avec signal de la porteuse (figure 3.7), on obtient en sortie le signal de commande illustré dans la (figure 3.8).

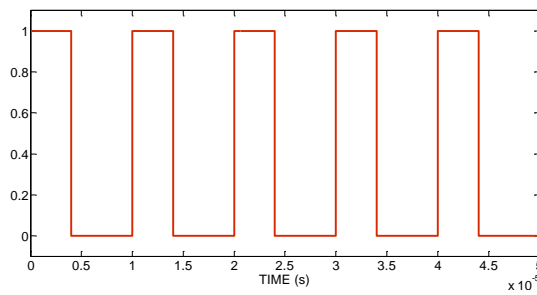


Figure 3.8 Le rapport cyclique D .

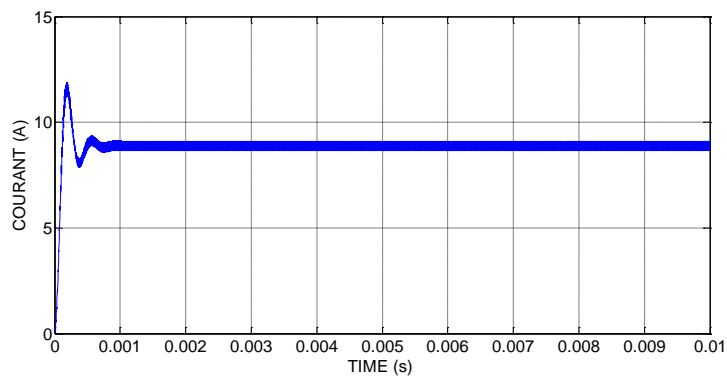


Figure 3.9 Signal courant de sortie (convertisseur Boost)

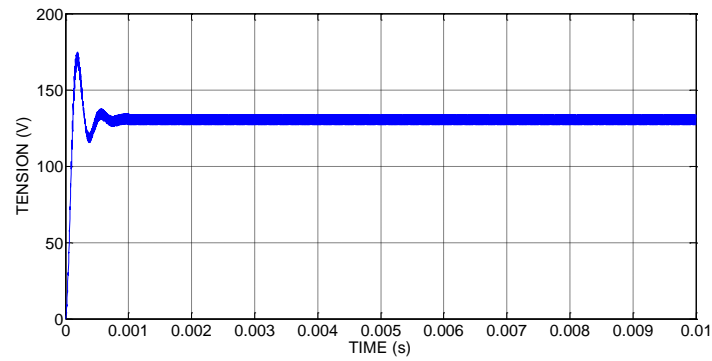


Figure 3.10 Signal tension de sortie (convertisseur Boost)

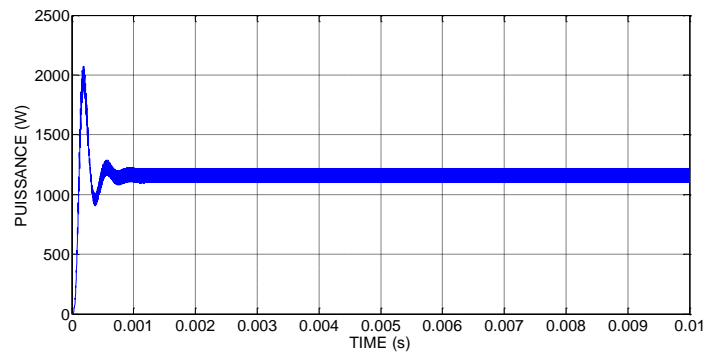


Figure 3.11 Signal puissance de sortie (convertisseur Boost)

3.3.3 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

La (figure 3.11) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation ».

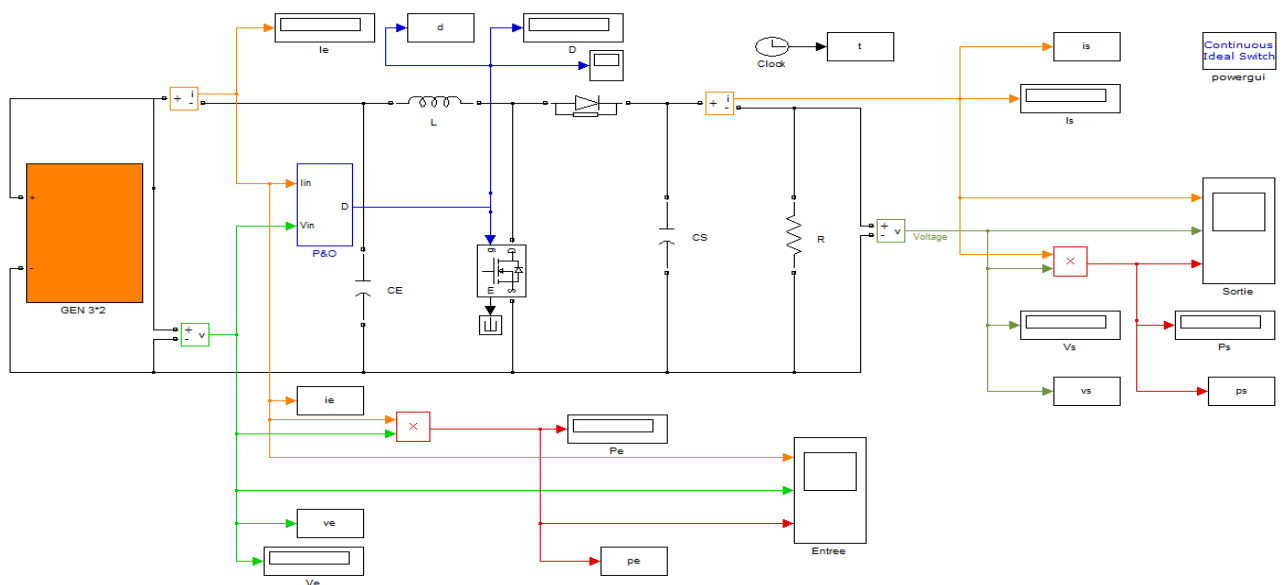


Figure 3.12 le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation ».

3.3.4 Simulation de la Technique (P&O) sous Simulink & XSG.

- Le bloc ci-dessous (figure 3.13) représente l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement MATLAB/SIMULINK.

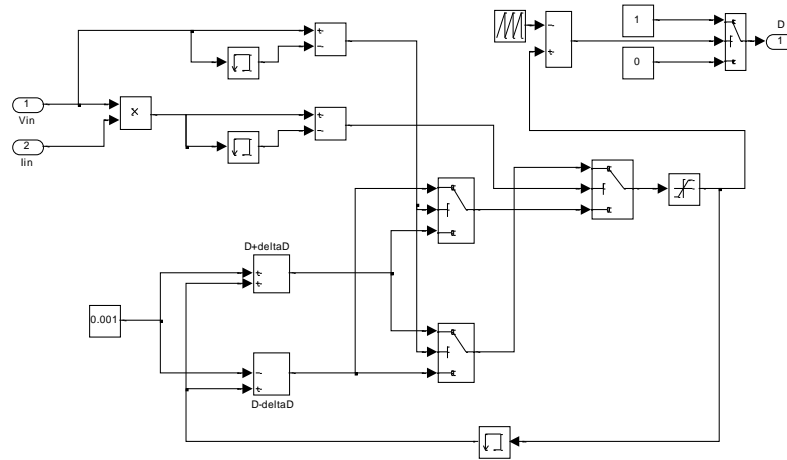


Figure 3.13 l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètres de mesure. Il opère en perturbant périodiquement la tension du panneau, et en comparant l'énergie précédemment délivrée avec la nouvelle après perturbation, en suivant l'organigramme figure (2.10),

- Le bloc ci-dessous (figure 3.14) représente l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement XSG.

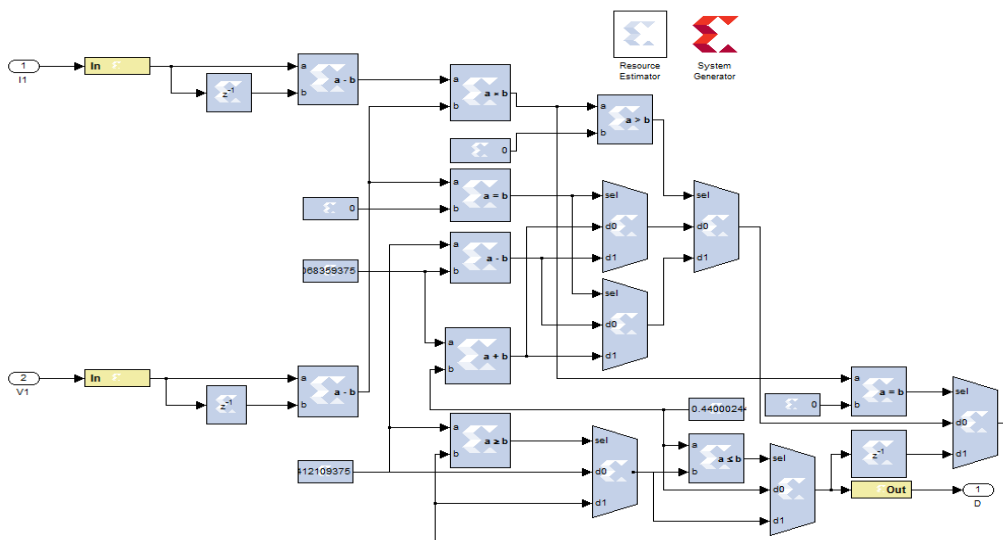


Figure 3.14 l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement XSG.

a) Eclairage variable et température constante

Pour présenter l'effet de l'éclairage E sur la puissance, on fait maintenir la température à une valeur constante $T=25^{\circ}\text{C}$ et on fait varier rapidement l'éclairage plusieurs fois (200, 600, 1000 et 800) W/m^2 pour créer plusieurs points de puissance maximale que le contrôleur doit les suivre.

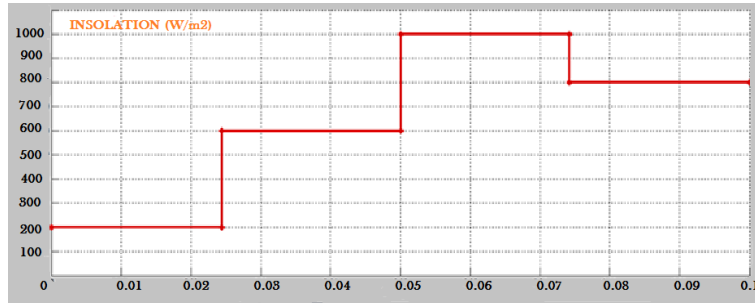


Figure3.15 Courbe d'insolation variable

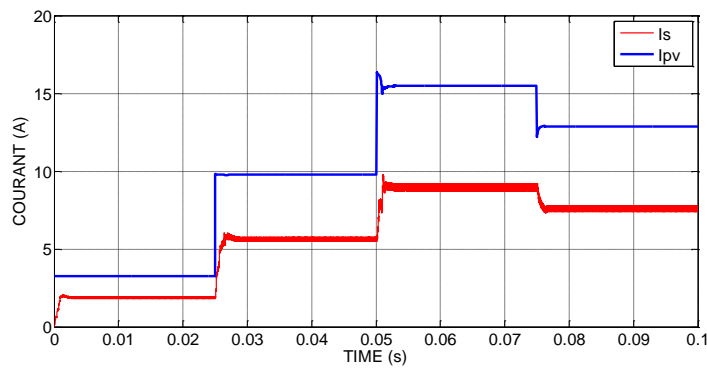


Figure3.16 simulation signaux des courants sous SUMULINK (P&O à G variable)

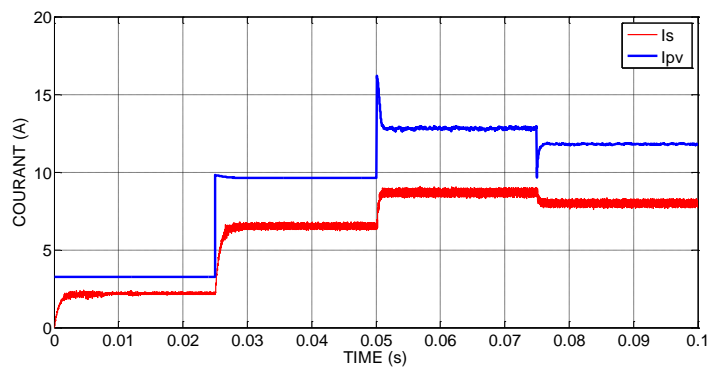


Figure 3.17 simulation signaux des courants sous XSG (P&O à G variable)

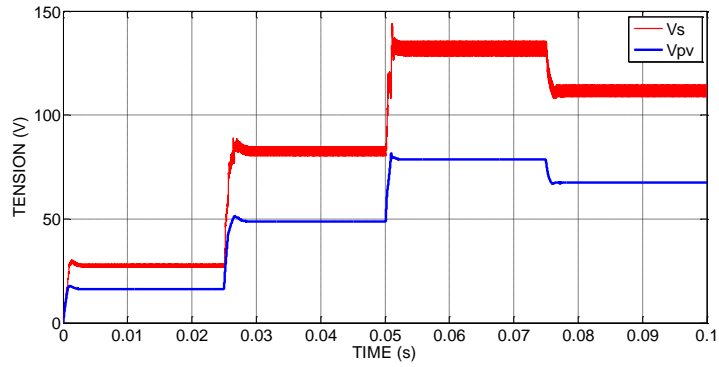


Figure 3.18 simulation signaux des tensions sous SUMULINK (P&O à G variable)

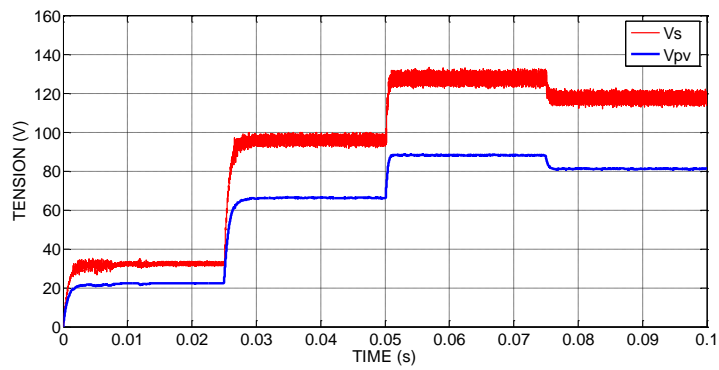


Figure 3.19 simulation signaux des tensions sous XSG (P&O à G variable)

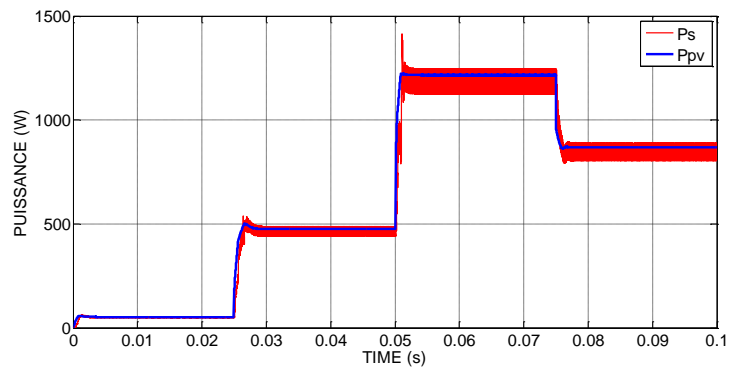


Figure 3.20 simulation signaux des puissances sous SUMULINK (P&O à G variable)

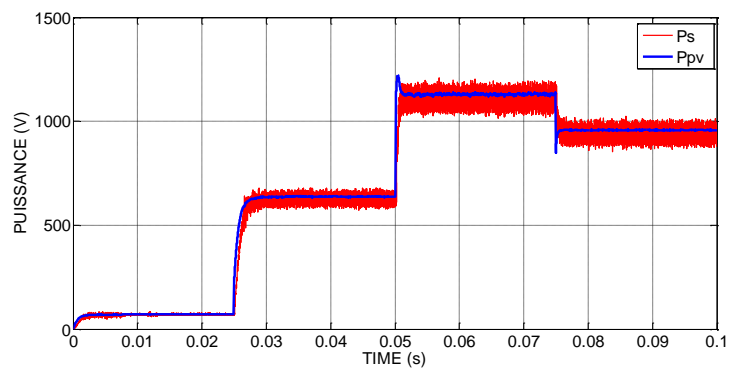


Figure 3.21 simulation signaux des puissances sous XSG (P&O à G variable)

On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement. La (figure 3.20) et (figure 3.21) représentent la puissance de sortie du GPV qui va augmenter rapidement jusqu'au niveau de 1200W où elle se stabilise, ainsi elle présente une oscillation importante autour du point de la puissance maximale.

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que les courbes de la puissance, de la tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent. En plus, le temps de réponse est plus rapide que la commande de (P&O).

a) Température variable et éclairement constant

Pour présenter l'effet de la température T sur la tension, on fait maintenir l'éclairement à une valeur constante $G= 1000 \text{ w/m}^2$ et on fait varier rapidement la température plusieurs fois (25, 0 et 40) °C.

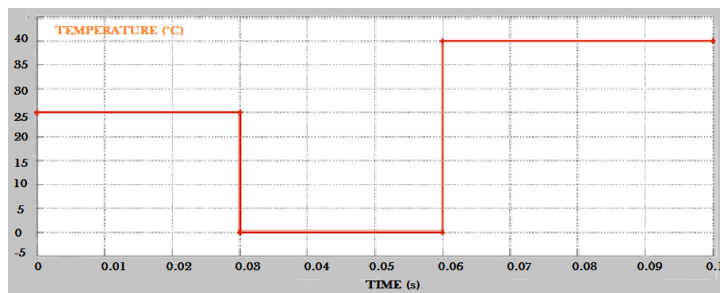


Figure 3.22 Courbe de la température variable

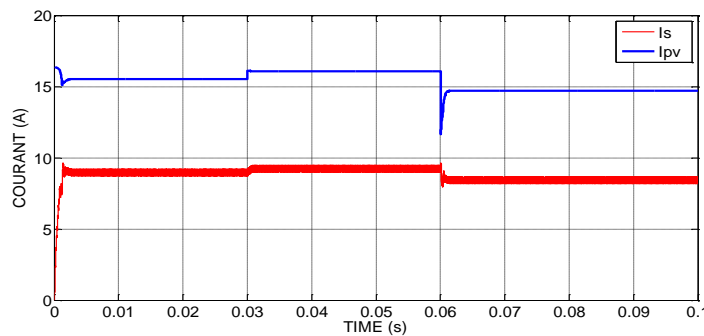


Figure 3.23 simulation signaux des courants sous SUMULINK (P&O à T variable)

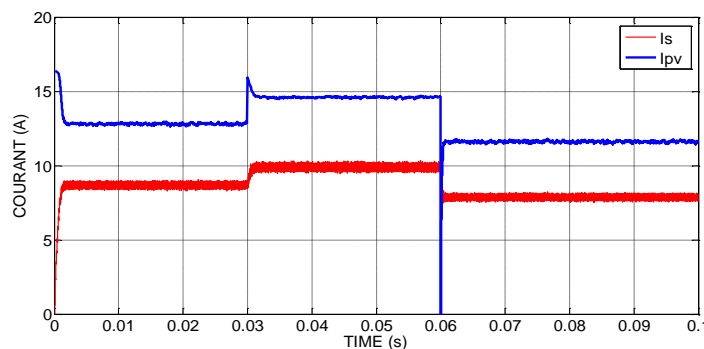


Figure 3.24 simulation signaux des courants sous XSG (P&O à T variable)

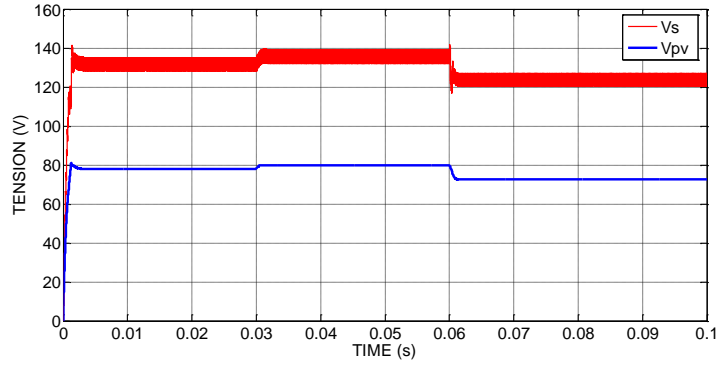


Figure 3.25 simulation signaux des tensions sous SUMULINK (P&O à T variable)

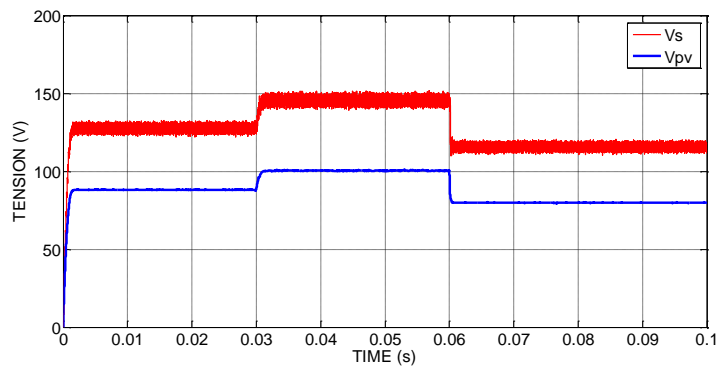


Figure 3.26 simulation signaux des tensions sous XSG (P&O à T variable)

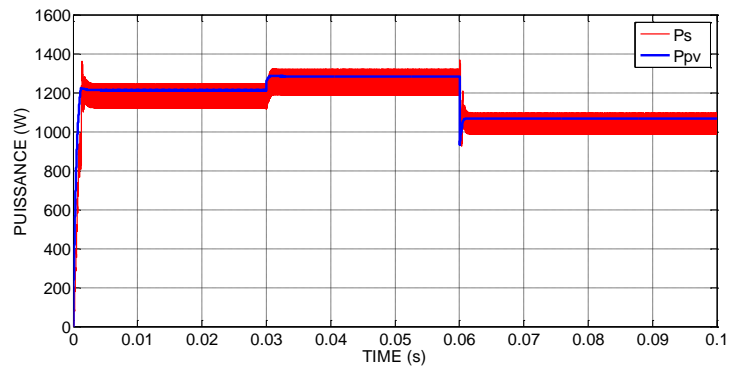


Figure 3.27 simulation signaux des puissances sous SUMULINK (P&O à T variable)

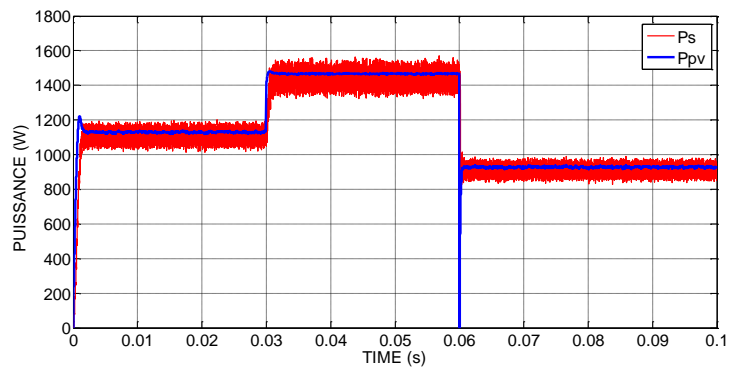


Figure 3.28 simulation signaux des puissances sous XSG (P&O à T variable)

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'une variation rapide de la température (augmentation ou diminution) provoque une variation considérable de la tension

(V_{pv}), par contre le courant I_{pv} dans ce cas se varie légèrement. Ainsi on constate que les courbes de puissance, de tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent.

3.3.5 Commande MPPT floue

Compte tenu des possibilités offertes en matière de modélisation et de simulation des systèmes dynamiques, de la simplification d'implantation des modèles grâce à son interface graphique, et de la mise en œuvre facile du contrôleur flou grâce aux blocs disponibles, l'étude en simulation de notre système a été menée sous Matlab/Simulink. L'objectif de la commande est de poursuivre la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

La Figure (3.29) illustre le contrôleur logique flou remplaçant le contrôleur à base de la méthode (P&O).

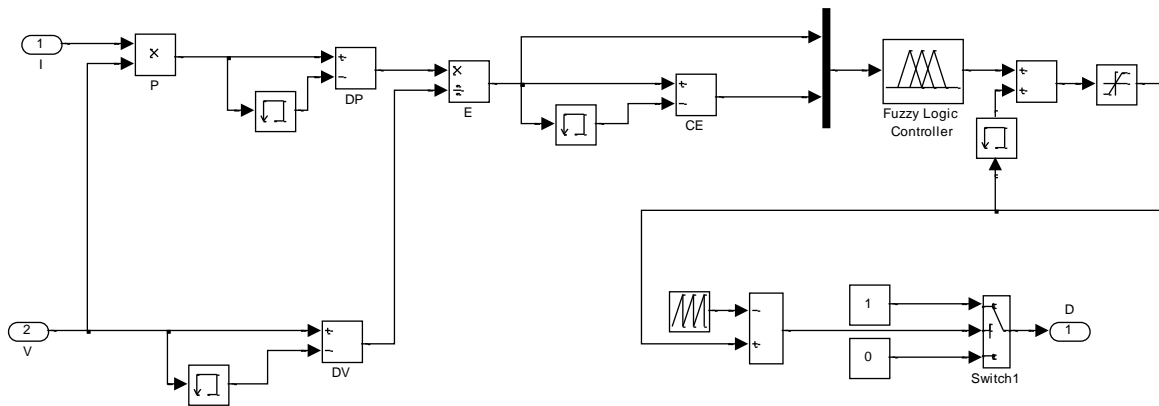


Figure 3.29 Modèle « SIMULINK » du contrôleur MPPT flou.

a) Fuzzification

La (figure 3.30) montre les degrés (ou fonctions) d'appartenance de cinq sous-ensembles flous de base pour les variables d'entrée et de sortie.

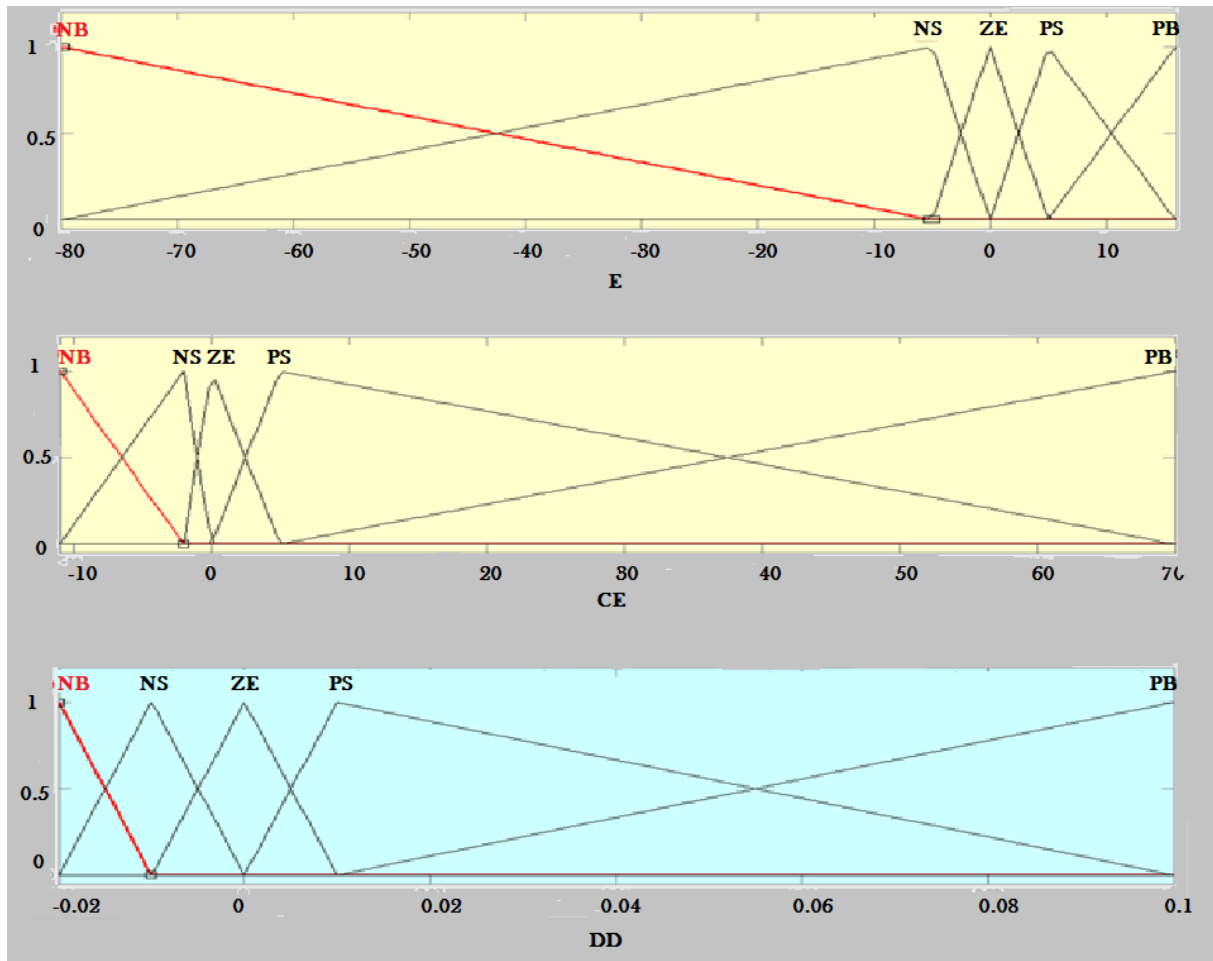


Figure 3.30 Fonctions d'appartenance des variables du contrôleur flou.

b) Les règles

| | CE | NB | NS | ZE | PS | PB |
|----|----|----|----|----|----|----|
| E | | | | | | |
| NB | | ZE | ZE | NB | NB | NB |
| NS | | ZE | ZE | NS | NS | NS |
| ZE | | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| PS | | PS | PS | PS | ZE | ZE |
| PB | | PB | PB | PB | ZE | ZE |

Tableau 3.1 Règles floues.

Les (figures 3.31) jusqu'à (figure 3.33) représentent respectivement les résultats obtenues sous un éclairage $G = 1000 \text{ w/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$.

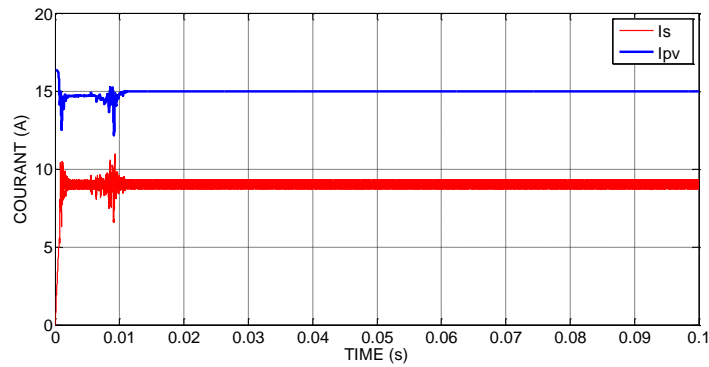


Figure 3.31 simulation signalaux des courants (logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

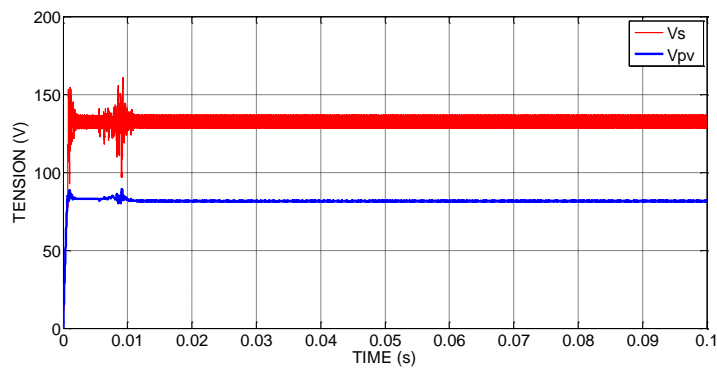


Figure 3.32 simulation signalaux des tensions (logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

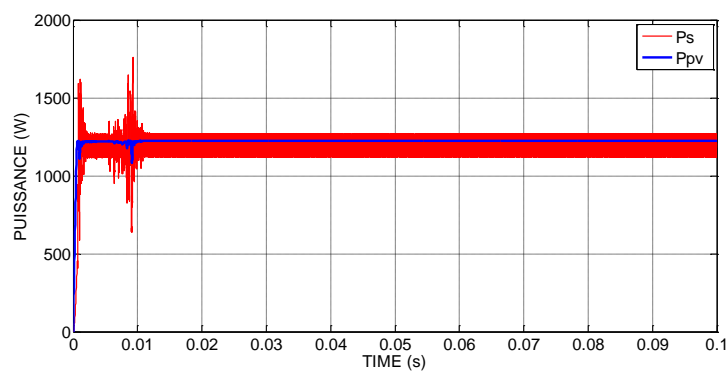


Figure 3.33 simulation signalaux des puissances (logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

3.4 Condition ombrage partiel

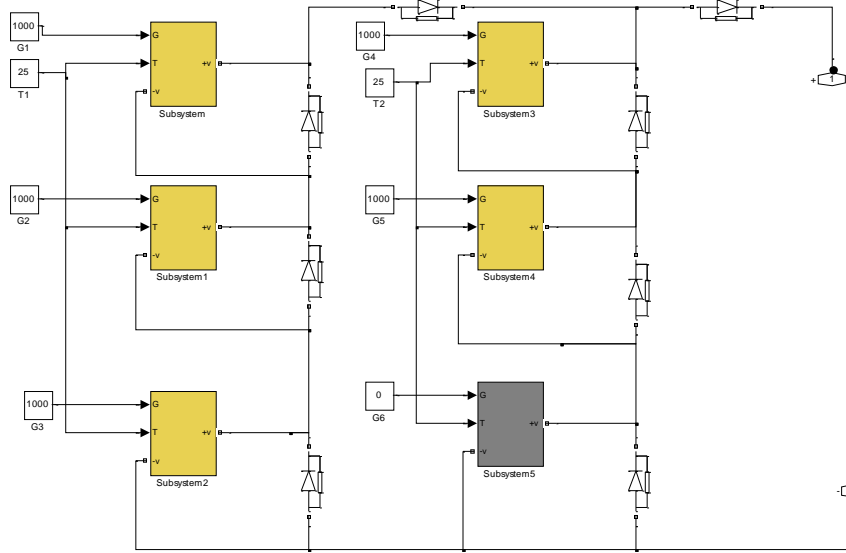


Figure 3.34 Schéma de générateur photovoltaïque (3*2) en SIMULINK en condition ombrage partiel.

La (figures 3.35) et (figure 3.35) représentent les courbes I-V et P-V d'un générateur photovoltaïque (3*2) en condition d'ombrage partiel.

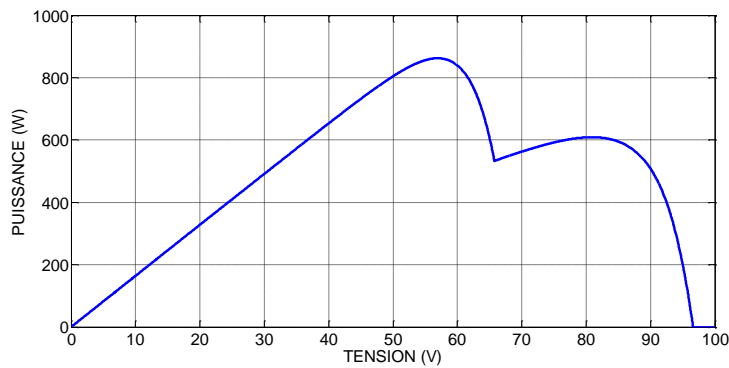


Figure 3.35 La courbe P-V d'un générateur photovoltaïque (3*2) en condition d'ombrage partiel.

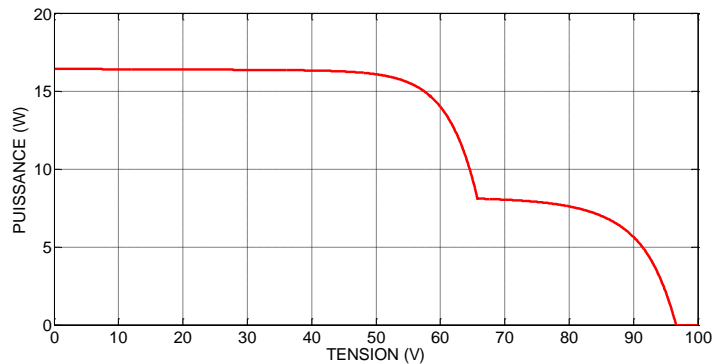


Figure 3.36 La courbel-V d'un générateur photovoltaïque (3*2) en condition d'ombrage partiel.

Pour localiser le PPM en condition ombrage partiel nous utilisons la technique logique floue, ce dernier donne le PPM de le premier pic.

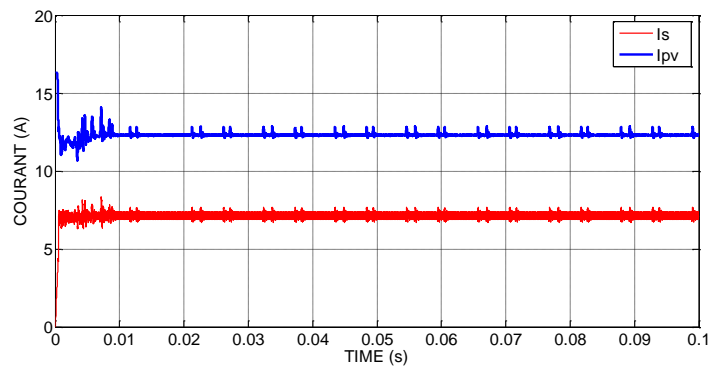


Figure 3.37 simulation signaux des courants (ombrage -logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

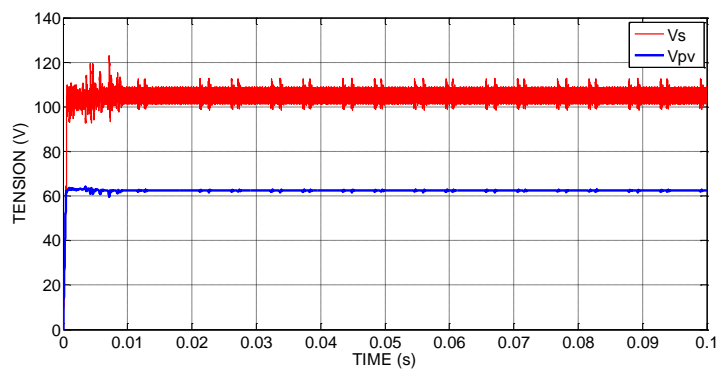


Figure 3.38 simulation signaux des tension (ombrage -logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

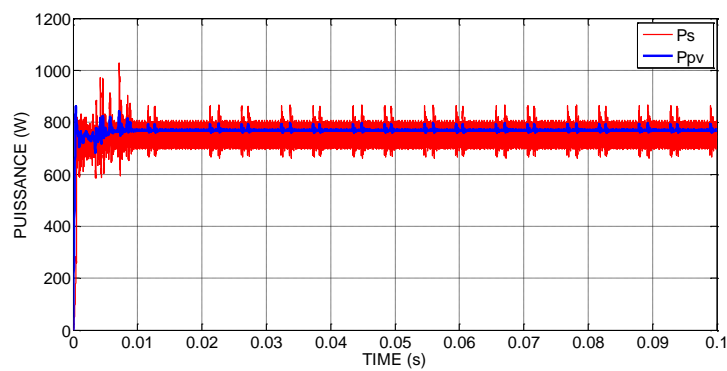


Figure 3.39 simulation signaux des puissance (ombrage -logique floue à $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation & observation » et « logique floue » sont présentée. Les modèles SIMULINK et XSG sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement $1000\text{W}/\text{m}^2$ température 25°C .
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Conclusion générale

Le monde s'engage sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque qui sert à convertir en électricité l'énergie du rayonnement solaire.

Une installation photovoltaïque présente une caractéristique de courant en fonction de tension non linéaire, et c'est donc un problème majeur pour bénéficier de la puissance maximale de l'installation. Pour remédier à ce problème, il faut un contrôleur dit MPPT pour suivre le point de puissance maximale d'une telle installation.

En premier temps, une description de générateur photovoltaïque (GPV). Les performances du Ce dernier se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards : éclairement $1000\text{W}/\text{m}^2$ température 25°C .

Ensuite, une modélisation d'un convertisseur DC_DC (Boost) qui effectue correctement leurs rôles De plus, il montre quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) qui assurer le transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Comme notre but était d'utiliser le Global MPPT pour localiser le point de puissance maximale en condition ombrage partial par le scan de la courbe $P=f(V)$ à l'aide de la commande MPPT « perturbation & observation » pour localiser la plus haut pic, ensuite la précision de PPM par la technique « logique floue ». Parmi les difficultés que nous avons rencontrées pendant la réalisation de ce projet, le problème de stockage, en raison de contraintes de temps, Nous avons étudié théoriquement l'ombrage partial.

Ce modeste travail n'est qu'une petite goutte dans un vaste domaine et il est juste une initiation aux utilisations des circuits FPGAs dans le domaine des énergies renouvelables.

Bibliographie

Chapitre 1

- [1]. S.Zeng, "Study on improving output current waveform of photovoltaic grid-connected system", IEEE, pp. 1-5,2006.
- [2]. B.Bendib, "Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative", mémoire de Magister, département d'Electronique .Université Ferhat Abbes-Sétif 2007.
- [3] ZekaiSen, "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques" ; Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [4] S. R. Wenham, M. A. Green and M. E. Watt Applied Photovoltaic, Bridge Printery: Sidney, 1994.
- [5] Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [6] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [7] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [8] A.Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [9] SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » UNIVERSITE de SETIF, Mémoire de Magister
- [10] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Université Kasdi Merbah–Ouargla, Mémoire de Magister, 2012.
- [11]. N.Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués," Ecole doctorale.Thèse de doctorat, 2005.
- [12] N.Femia, G. Lisi, G. Petrone,and M.Vitelli "Distributed Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays: Novel Approach and System Analysis". IEEE transaction on industrial electronics, vol. 55, No. 7. 2008.
- [13] C.Andrés, G.Spagnuolo, G. Petrone, M.Vitelli and J.David Bastidas. " A Multivariable MPPT algorithm for Granular Control of Photovoltaic Systems".IEEE 2010.
- [14] W. Herrman, W. Wiesner, W. Vaaben, "Hot spot investigations on PV modules – New concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes", 26th PVSC, Sept. 30 – Oct. 1997, Anaheim, CA.

Chapitre 2

- [1] M. Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques", Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [2] I. Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de Doctorat, Université de Havre, France 15 Décembre 2005.
- [3] BEDIDA Tarek, BEN AMAR Radhia, « Étude d'un système d'énergie renouvelable avec système de stockage » Université d'EL-Oued, 2014.
- [4] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Université Kasdi Merbah–Ouargla, Mémoire de Magister, 2012.
- [5] : Abdelhak Aziz. « Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire ». Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2006.
- [6] : V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [7]. S.Lei, "Solar peak power point tracking", Bachelor of engineering (IEEE), University of Queensland, 15th October, 1999.
- [8]. M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum MPPT d'un système photovoltaïque". JCGE'08 Lyon, 16 et 17 décembre 2008.
- [9] V. Quashning and R. Hanitsch, 'Numerical Simulation of Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic Systems with Shaded Solar Cells', Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 513 - 520, 1996.
- [10] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger, C.W.M. Prieb, '*Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis*', Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, N°1, pp. 26 -32, 2002.
- [11] W. Hermann and W. Wiesner, '*Modeling of PV Modules – the Effects of nonuniform Irradiance on Performance Measurements with Solar Simulators*' In Proceedings of the 16th EPSEC, Glasgow, 2000.
- [12] A. Woyte, J. Nijs and R. Belmans, '*Partial Shadowing of Photovoltaic Arrays with Different System Configurations: Literature Review and Field Test Results*', Solar Energy, Vol. 74, N°3, pp. 217 - 233, 2003.
- [13] Qichang Duan. Jiajun Leng. Pan Duan. Bei Hu. Mingxuan Mao « An Improved Variable Step PO and Global Scanning MPPT Method for PV Systems under Partial Shading Condition » 2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics