



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ENERGIES
RENOUVLABLES



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

ENERGIES RENOUVLABLES

OPTION : CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Thème :

Etude, modélisation, et simulation des techniques directes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Par :

Mr HAMIDA MOHAMED

Soutenu le 20/06/2016 devant le jury compose de :

Dr H .Mazouz	USDB	présidente
Dr M. Chihk	UDES	examineur
Dr chekired	UDES	examineur
Mr A . BOUNEMRI	USDB	promoteur

2015/2016

Remerciement

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 : ammar bounemri 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.

J'adresse mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, je tiens vivement à leur dire merci.

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

Mohamed

ملخص: توفر الطاقة الضوئية مصدر للكهرباء الصديقة، ويعد تشبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) الناتج من

المولد الكهروضوئي لجميع الظروف الجوية مفتاح الحفاظ على إنتاج طاقة ذات تكلفة منخفضة في التطبيقات الضوئية الناجحة.

في هذه المذكرة تمت دراسة وتحليل للتقنية المباشرة "التشويش و المراقبة" باستعمال Matlab-simulink و Psim النتائج الصادرة عن إستعمال Psim جد مرضية.

كلمات المفاتيح: تتبع نقطة الإستطاعة القصوى، التشويش و المراقبة،

Résumé : L'énergie photovoltaïque offre une source d'électricité respectueuse de l'environnement, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) de la sortie d'un générateur PV pour toutes les conditions météorologiques est un élément clé pour maintenir la puissance de sortie par un faible coût unitaire pour les applications photovoltaïques réussies.

Dans ce mémoire l'étude et l'analyse de la technique directe « Perturbe et Observe », a l'aide de logiciel Matlab-simulink et du logiciel psim, ont été faites. Les résultats obtenus par psim sont satisfaisants.

Mots clés : MPPT; Perturbe et Observe ; Matlab-simulink ; psim.

Abstract: Photovoltaic energy provides an environmentally friendly source of electricity, tracking the maximum power point (MPPT) of the output of a PV generator for all weather conditions is a key to keep the output power per unit cost low for successful PV applications.

In this thesis «Perturb and Observe» technic has been studied and analysed, using matlab simulink and Psim software. The results with psim are quite satisfied.

Keywords : MPPT ; Perturbe and Observe ; Matlab-simulink ; psim.

Listes des acronymes et abréviations

AC	Alternatif Current
C	Capacité du condensateur
CCM	Continuous Conduction Mode
DC	Direct Current
DC/DC	Direct Current/Direct Current Converter
DCM	Discontinuous Conduction Mode
E	Energie
Eg	Energie du Gap du semi conducteur
FF	Fill Factor
Gb	le flux global incliné
GPV	Générateur Photovoltaïque
Id	Le courant à travers la diode
Impp	Le courant au point de puissance maximale
InCond	Incrémental Conductance
Iph	Photocurrent
Is	Le courant de saturation de la diode
Isc	Le courant de court-circuit
I-V	Le courant en fonction de la tension
K	Constant de Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$
Ki	Coefficient de changement de courant de court-circuit par la température
L	L'inductance de la bobine
mpp	Maximum PowerPoint
MPPT	Maximum Power Point Tracking
n	Facteur d'idéalité de la diode
P	La puissance
P&O	Perturbe et Observe
Pc	Puissance Crête
PN	Jonctionsemi-conducteur
PPM	Point de Puissance Maximale
PV	Photovoltaïque
P-V	La puissance en fonction de la tension
PWM	Pulse Width Modulator
q	Charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ c}$
Ri	La charge à l'entrée du hacheur
Ro	La charge aux bornes du hacheur
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance de shunt
S	Surface du champ PV

T	La température
Tnom	La température nominale
Vi	Tension d'entrée du hacheur
V0	Tension de sortie du hacheur
V _D	Tension de diode
V _{mpp}	La tension au point de puissance maximale
Voc	La tension de circuit ouvert
V _t	La tension thermique
W _p	Watt Peak
α, D	rapport cyclique
β	le niveau de l'ensoleillement
η	le rendement

Liste des figures

Figure I.1	: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque	7
Figure I.2	: L'effet photovoltaïque	8
Figure I. 3	: Représentation la cellule PV idéale.....	9
Figure I. 4	: Représentation la cellule PV réelle.....	10
Figure I. 5	: Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.....	11
Figure I. 6	: Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant- tension.....	11
Figure I. 7	: Le courant de module PV en fonction de la tension.....	12
Figure I.8	: Le courant et la puissance d'un module PV en fonction de sa tension.....	13
Figure I.9	: Influence de la température sur la courbe I-V.....	15
Figure I.10	: Influence de la température sur la courbe P-V.....	16
Figure I.11	: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V.....	17
Figure I.12	: Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V.....	17
Figure II.1	: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.....	21
Figure II.2	: Chaîne de conversion photovoltaïque.....	22
Figure II. 3	: Schéma électronique d'un hacheur série.....	23
Figure II. 4	: état passante.....	24
Figure II. 5	: état bloquante.....	24
Figure II.6	: Formes d'ondes d'un hacheur série.....	25
Figure II.7	: Principe du PWM	27
Figure II.8	: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande.....	28
Figure II.9	: Nécessité de MPPT pour la bonne adaptation de la charge.....	29
Figure II.10	: Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.....	29
Figure II.11	: Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	30
Figure II.12	: Principe de la commande P&O.....	31
Figure II.13	: L'algorithme perturbe et observe P&O.....	32
Figure II.14	: Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un Panneau.....	33
Figure III.1	: Le système photovoltaïque sous l'environnement simulink.....	38
Figure III.2	: Modèle simulink du panneau photovoltaïque.....	39
Figure III.3	: Modèle simulink du hacheur_série.....	40
Figure III.4	: Modèle simulink de contrôleur_MPPT perturbe et observe.....	41
Figure III.5	: Modèle simulink de la charge de batterie.....	42
Figure III.6	: Conditions météorologiques standards.....	43
Figure III.7	: Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques standards 'P&O'.....	43
Figure III.8	: La puissance du panneau sous les conditions standards 'P&O'.....	44
Figure III.9	: Conditions météorologiques avec une température variable.....	45
Figure III.10	: Le suivi de Mpp pendant les variations de la température 'P&O'.....	46
Figure III.11	: La puissance du panneau pendant les variations de la température 'P&O'.....	46
Figure III.12	: Conditions météorologiques avec une insolation variable.....	47
Figure III.13	: Le suivi de Mpp pendant les variations de l'insolation 'P&O'.....	48
Figure III.14	: La puissance du panneau pendant les variations de l'insolation 'P&O'.....	48
Figure III.15	: Conditions météorologiques aléatoires.....	49
Figure III.16	: Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques aléatoires 'P&O'.....	50
Figure III.17	: La puissance du panneau sous les conditions aléatoires 'P&O'.....	50
Figure III.18	: Modèle simulink couple avec psim du panneau photovoltaïque.....	52
Figure III.19	: caractéristique I(v), p(v) sous les conditions standards.....	53

Figure III.20 :	Modèle psim du hacheur_série (buck).....	53
Figure III.21 :	tension de sortie du hacheur_série (buck).....	54
Figure III.22 :	Modèle psim du de panneau pv avec l' hacheur_série(buck).....	54
Figure III.23 :	tension de sortie du panneau avec l' hacheur_série (buck).....	55
Figure III.24 :	Le système photovoltaïque sous l'environnement psim.....	56
Figure III.25 :	Conditions météorologiques standards.....	57
Figure III.26 :	La puissance du panneau sous les conditions standards 'P&O'.....	57
Figure III.27 :	Conditions météorologiques avec une insolation variable.....	58
Figure III.28 :	Le suivi de Mpp pendant les variations de l'insolation 'P&O'.....	58
Figure III.29 :	Conditions météorologiques avec une température variable.....	59
Figure III.30 :	Le suivi de Mpp pendant les variations de la température 'P&O'.....	60
Figure III. 31:	Conditions météorologiques aléatoires.....	61
Figure III.32 :	Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques aléatoires 'P&O'.....	61

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Modélisation d'un générateur photovoltaïque	
I.1 Etat de l'art.....	4
I.2 Introduction.....	6
I.3 Générateur photovoltaïque.....	6
I.4 Effet photovoltaïque.....	7
I.5 La cellule Photovoltaïque.....	8
I.6 Représentations électroniques des cellules PV.....	9
I.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	10
I.7.1 Association en série.....	11
I.7.2 Association en parallèle.....	11
I.7.3 Association mixte série/parallèle des cellules PV.....	12
I.8 Les caractéristiques électriques d'une module PV.....	12
I.8.1 La tension de circuit ouvert.....	13
I.8.2 Le courant de court-circuit.....	13
I.8.3 La puissance de crête P_c (wc).....	14
I.8.4 le point de fonctionnement maximal mpp.....	14
I.8.5 le facteur de forme FF.....	14
I.8.6 le rendement d'un module.....	14
I.9 L'influence des conditions météorologiques sur les cellules.....	15
I.9.1 l'influence de la température.....	15
I.9.2 l'influence de l'ensoleillement.....	16
I.10 Conclusion.....	18
Chapitre II : Convertisseurs DC-DC et techniques MPPT	
II.1 Introduction.....	20
II.2 Connexion directe entre la source et la charge.....	20
II.3 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.....	21
II.4 Principe de base du hacheur série.....	23
II.4.1 état passant.....	22
II.4.2 état bloqué.....	24
II.5 Le hacheur série en mode de conduction continue.....	25

II.6 Le hacheur série en mode de conduction discontinue.....	27
II.7 Principe du PWM.....	27
II.8 Les commande MPPT.....	28
II.9 les différents types d’algorithmes MPPT existants dans la littérature.....	29
II.10 Principe des commandes « Hill Climbing ».....	30
II.10.1 Méthode « Perturbation et Observation ».....	31
II.10.2 Méthode de la « Conductance Incrémentielle ».....	33
II.11 Mesure de VOC (Fraction de VOC).....	34
II.12 Mesure de ICC (Fraction de ICC).....	34
II.13 Conclusion.....	35

Chapitre III : Simulation de technique directe p&o

III.1 Introduction.....	37
III.2 Simulation avec logiciel Matlab-simulink.....	38
III.2.1 Modélisation du système PV autonome.....	38
III.2.1.1 Conditions_météorologiques.....	38
III.2.1.2 Panneau PV.....	39
III.2.1.3 Hacheur_série.....	40
III.2.1.4 Controleur_MPPT.....	41
III.2.1.5 Batterie.....	41
III.2.2 Simulation de la technique perturbe et observe.....	42
III.2.2.1 Simulation du système avec les conditions standards.....	42
III.2.2.2 Simulation du système sous conditions variables de temperatur.....	45
III.2.2.3 Simulation du système sous conditions variables de l’insolation.....	47
III.2.2.4 Simulation du système sous conditions météorologiques aléatoires.....	49
III.3 Simulation avec logiciel Psim.....	51
III.3.1.1 Simulation de panneau PV.....	51
III.3.1.2 Simulation de hacheur_série (buck).....	53
III.3.1.3 Simulation de panneau pv avec l’ hacheur_série (buck).....	54
III.3.2 Simulation de la technique perturbe et observe.....	55
III.3.2.1 Conditions_météorologiques.....	55
III.3.2.2 Simulation du système avec les conditions standards.....	55
III.3.2.3 Simulation du système sous conditions variables de l’insolation.....	58
III.3.2.4 Simulation du système sous conditions variables de température.....	59
III.3.2.5 Simulation du système sous conditions météorologiques aléatoires.....	61

III.4 Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	63

Bibliographie

- [1] R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [2] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [3] Manuel scolaire « TERMINALE STI ELECTROTECHNIQUE Nathan », ‘Ce qu’il faut savoir sur L’énergie solaire photovoltaïque’, office fédéral suisse des questions conjoncturelles-Suisse, 2011/2012.
- [4] David Sanz Morales, ‘Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications’, Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology, 14.12.2010.
- [5] Francisco M, González-Longatt, ‘Model of Photovoltaic Module in Matlab’, 2do congreso iberoamericano de estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y computación ,pp 1-5, 2005.
- [6] K.TAHRI, B. BENYOUCEF, ‘Etude de Modélisation d’un Générateur Photovoltaïque’, 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 , pp 192-197, 2010.
- [7] Tarek SALMI, Mounir BOUZGUENDA, Adel GASTLI, ‘MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell’, international journal of renewable energy research, Vol.2, No.2, pp 213-218, 2012.
- [8] Saurav SATPATHY, ‘photovoltaic power control using mppt and boost converter’, a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology in Electrical Engineering, May 2012.
- [9]: Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [10]: Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques, thèse de doctorat, soutenue le 29 septembre 2006.
- [11]: Alain Bilbao Learreta, "Réalisation de Commande MPPT Numériques", septembre 2006.
- [12] Shane McMORROW, ' Variable Inductance for Solar Power Applications', B.E. Electronic Engineering Project Report, 2011.
- [13] http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck
- [14] Richard A. CULLEN, 'what is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work?', Blue Sky Energy Inc.
- [15]: Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport_PIP_Microtransat_Energie_II, "Partie électronique et énergétique", 2005-2006.

- [16] A. Brahmi, A. Abounada et M. Ramzi, "Application de la commande 'Perturb and Observe' pour L'extraction de la puissance maximale des cellules photovoltaïques", Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 121 – 124
- [17] G.F. Tchoketch Kebir, "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Mémoire de Magistère, ENP Alger, 2006.
- [18] D. P. Hohm, M. E. Ropp, "*Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental programmable, maximum power point tracking test bed*", IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000 pp. 1699-1702, Sept.2000.
- [19] A. S. Masoum, H. Dehbonei and E. F. Fuchs, "*Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems with voltage and current based maximum power point tracking*", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, pp. 514-522, Dec. 2002. [20]
- J. Ghaisari, M. Habibi, A. Bakhshai, "*An MPPT controller design for photovoltaic (PV) system based on the optimal voltage factor tracking*", IEEE Electrical Power Conference, EPC 2007, pp. 359-362, Oct. 2007.

Remerciement

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 : ammar bouemrie 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.

J'adresse mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, je tiens vivement à leur dire merci.

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

Mohamed

ملخص: توفر الطاقة الضوئية مصدر للكهرباء الصديقة، ويعد تشبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) الناتج من

المولد الكهروضوئي لجميع الظروف الجوية مفتاح الحفاظ على إنتاج طاقة ذات تكلفة منخفضة في التطبيقات الضوئية الناجحة.

في هذه المذكرة تمت دراسة وتحليل للتقنية المباشرة "التشويش و المراقبة" باستعمال Matlab-simulink و Psim

النتائج الصادرة عن إستعمال Psim جد مرضية.

كلمات المفاتيح: تتبع نقطة الإستطاعة القصوى، التشويش و المراقبة،

Résumé : L'énergie photovoltaïque offre une source d'électricité respectueuse de l'environnement, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) de la sortie d'un générateur PV pour toutes les conditions météorologiques est un élément clé pour maintenir la puissance de sortie par un faible coût unitaire pour les applications photovoltaïques réussies.

Dans ce mémoire l'étude et l'analyse de la technique directe « Perturbe et Observe », a l'aide de logiciel Matlab-simulink et du logiciel psim, ont été faites. Les résultats obtenus par psim sont satisfaisants.

Mots clés : MPPT; Perturbe et Observe ; Matlab-simulink ; psim.

Abstract: Photovoltaic energy provides an environmentally friendly source of electricity, tracking the maximum power point (MPPT) of the output of a PV generator for all weather conditions is a key to keep the output power per unit cost low for successful PV applications.

In this thesis «Perturb and Observe» technic has been studied and analysed, using matlab simulink and Psim software. The results with psim are quite satisfied.

Keywords : MPPT ; Perturbe and Observe ; Matlab-simulink ; psim.

Listes des acronymes et abréviations

AC	Alternatif Current
C	Capacité du condensateur
CCM	Continuous Conduction Mode
DC	Direct Current
DC/DC	Direct Current/Direct Current Converter
DCM	Discontinuous Conduction Mode
E	Energie
Eg	Energie du Gap du semi conducteur
FF	Fill Factor
Gb	le flux global incliné
GPV	Générateur Photovoltaïque
Id	Le courant à travers la diode
Imp	Le courant au point de puissance maximale
InCond	Incrémental Conductance
Iph	Photocurrent
Is	Le courant de saturation de la diode
Isc	Le courant de court-circuit
I-V	Le courant en fonction de la tension
K	Constant de Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$
Ki	Coefficient de changement de courant de court-circuit par la température
L	L'inductance de la bobine
mpp	Maximum PowerPoint
MPPT	Maximum Power Point Tracking
n	Facteur d'idéalité de la diode
P	La puissance
P&O	Perturbe et Observe
Pc	Puissance Crête
PN	Jonctionsemi-conducteur
PPM	Point de Puissance Maximale
PV	Photovoltaïque
P-V	La puissance en fonction de la tension
PWM	Pulse Width Modulator
q	Charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ c}$
Ri	La charge à l'entrée du hacheur
Ro	La charge aux bornes du hacheur
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance de shunt
S	Surface du champ PV
T	La température
Tnom	La température nominale

V_i	Tension d'entrée du hacheur
V_0	Tension de sortie du hacheur
V_D	Tension de diode
V_{mpp}	La tension au point de puissance maximale
V_{oc}	La tension de circuit ouvert
V_t	La tension thermique
W_p	Watt Peak
α	rapport cyclique
β	le niveau de l'ensoleillement
η	le rendement

Liste des figures

Figure I.1	: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque	7
Figure I.2	: L'effet photovoltaïque	8
Figure I. 3	: Représentation la cellule PV idéale.....	9
Figure I. 4	: Représentation la cellule PV réelle.....	10
Figure I. 5	: Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.....	11
Figure I. 6	: Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant- tension.....	11
Figure I. 7	: Le courant de module PV en fonction de la tension.....	12
Figure I.8	: Le courant et la puissance d'un module PV en fonction de sa tension.....	13
Figure I.9	: Influence de la température sur la courbe I-V.....	15
Figure I.10	: Influence de la température sur la courbe P-V.....	16
Figure I.11	: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V.....	17
Figure I.12	: Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V.....	17
Figure II.1	: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.....	21
Figure II.2	: Chaîne de conversion photovoltaïque.....	22
Figure II. 3	: Schéma électronique d'un hacheur série.....	23
Figure II. 4	: état passante.....	24
Figure II. 5	: état bloquante.....	24
Figure II.6	: Formes d'ondes d'un hacheur série.....	25
Figure II.7	: Principe du PWM	27
Figure II.8	: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande.....	28
Figure II.9	: Nécessité de MPPT pour la bonne adaptation de la charge.....	29
Figure II.10	: Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.....	29
Figure II.11	: Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	30
Figure II.12	: Principe de la commande P&O.....	31
Figure II.13	: L'algorithme perturbe et observe P&O.....	32
Figure II.14	: Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un Panneau.....	33
Figure III.1	: Le système photovoltaïque sous l'environnement simulink.....	38
Figure III.2	: Modèle simulink du panneau photovoltaïque.....	39
Figure III.3	: Modèle simulink du hacheur_série.....	40
Figure III.4	: Modèle simulink de contrôleur_MPPT perturbe et observe.....	41
Figure III.5	: Modèle simulink de la charge de batterie.....	42
Figure III.6	: Conditions météorologiques standards.....	43
Figure III.7	: Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques standards 'P&O'.....	43
Figure III.8	: La puissance du panneau sous les conditions standards 'P&O'.....	44
Figure III.9	: Conditions météorologiques avec une température variable.....	45
Figure III.10	: Le suivi de Mpp pendant les variations de la température 'P&O'.....	46
Figure III.11	: La puissance du panneau pendant les variations de la température 'P&O'.....	46
Figure III.12	: Conditions météorologiques avec une insolation variable.....	47
Figure III.13	: Le suivi de Mpp pendant les variations de l'insolation 'P&O'.....	48
Figure III.14	: La puissance du panneau pendant les variations de l'insolation 'P&O'.....	48
Figure III.15	: Conditions météorologiques aléatoires.....	49
Figure III.16	: Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques aléatoires 'P&O'.....	50
Figure III.17	: La puissance du panneau sous les conditions aléatoires 'P&O'.....	50
Figure III.18	: Modèle simulink couple avec psim du panneau photovoltaïque.....	52
Figure III.19	: caractéristique I(v), p(v) sous les conditions standards.....	53

Figure III.20 :	Modèle psim du hacheur_série (buck).....	53
Figure III.21 :	tension de sortie du hacheur_série (buck).....	54
Figure III.22 :	Modèle psim du de panneau pv avec l' hacheur_série(buck).....	54
Figure III.23 :	tension de sortie du panneau avec l' hacheur_série (buck).....	55
Figure III.24 :	Le système photovoltaïque sous l'environnement psim.....	56
Figure III.25 :	Conditions météorologiques standards.....	57
Figure III.26 :	La puissance du panneau sous les conditions standards 'P&O'.....	57
Figure III.27 :	Conditions météorologiques avec une insolation variable.....	58
Figure III.28 :	Le suivi de Mpp pendant les variations de l'insolation 'P&O'.....	58
Figure III.29 :	Conditions météorologiques avec une température variable.....	59
Figure III.30 :	Le suivi de Mpp pendant les variations de la température 'P&O'.....	60
Figure III. 31:	Conditions météorologiques aléatoires.....	61
Figure III.32 :	Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques aléatoires 'P&O'.....	61

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Modélisation d'un générateur photovoltaïque	
I.1 Etat de l'art.....	4
I.2 Introduction.....	6
I.3 Générateur photovoltaïque.....	6
I.4 Effet photovoltaïque.....	7
I.5 La cellule Photovoltaïque.....	8
I.6 Représentations électroniques des cellules PV.....	9
I.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	10
I.7.1 Association en série.....	11
I.7.2 Association en parallèle.....	11
I.7.3 Association mixte série/parallèle des cellules PV.....	12
I.8 Les caractéristiques électriques d'une module PV.....	12
I.8.1 La tension de circuit ouvert.....	13
I.8.2 Le courant de court-circuit.....	13
I.8.3 La puissance de crête P_c (wc).....	14
I.8.4 le point de fonctionnement maximal mpp.....	14
I.8.5 le facteur de forme FF.....	14
I.8.6 le rendement d'un module.....	14
I.9 L'influence des conditions météorologiques sur les cellules.....	15
I.9.1 l'influence de la température.....	15
I.9.2 l'influence de l'ensoleillement.....	16
I.10 Conclusion.....	18
Chapitre II : Convertisseurs DC-DC et techniques MPPT	
II.1 Introduction.....	20
II.2 Connexion directe entre la source et la charge.....	20
II.3 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.....	21
II.4 Principe de base du hacheur série.....	23
II.4.1 état passant.....	22
II.4.2 état bloqué.....	24
II.5 Le hacheur série en mode de conduction continue.....	25
II.6 Le hacheur série en mode de conduction discontinue.....	27
II.7 Principe du PWM.....	27

II.8 Les commande MPPT.....	28
II.9 les différents types d’algorithmes MPPT existants dans la littérature.....	29
II.10 Principe des commandes « Hill Climbing ».....	30
II.10.1 Méthode « Perturbation et Observation ».....	31
II.10.2 Méthode de la « Conductance Incrémentielle ».....	33
II.11 Mesure de VOC (Fraction de VOC).....	34
II.12 Mesure de ICC (Fraction de ICC).....	34
II.13 Conclusion.....	35

Chapitre III : Simulation de technique directe p&o

III.1 Introduction.....	37
III.2 Simulation avec logiciel Matlab-simulink.....	38
III.2.1 Modélisation du système PV autonome.....	38
III.2.1.1 Conditions_météorologiques.....	38
III.2.1.2 Panneau PV.....	39
III.2.1.3 Hacheur_série.....	40
III.2.1.4 Controleur_MPPT.....	41
III.2.1.5 Batterie.....	41
III.2.2 Simulation de la technique perturbe et observe.....	42
III.2.2.1 Simulation du système avec les conditions standards.....	42
III.2.2.2 Simulation du système sous conditions variables de temperatur.....	45
III.2.2.3 Simulation du système sous conditions variables de l’insolation.....	47
III.2.2.4 Simulation du système sous conditions météorologiques aléatoires.....	49
III.3 Simulation avec logiciel Psim.....	51
III.3.1.1 Simulation de panneau PV.....	51
III.3.1.2 Simulation de hacheur_série (buck).....	53
III.3.1.3 Simulation de panneau pv avec l’ hacheur_série (buck).....	54
III.3.2 Simulation de la technique perturbe et observe.....	55
III.3.2.1 Conditions_météorologiques.....	55
III.3.2.2 Simulation du système avec les conditions standards.....	55
III.3.2.3 Simulation du système sous conditions variables de l’insolation.....	58
III.3.2.4 Simulation du système sous conditions variables de température.....	59
III.3.2.5 Simulation du système sous conditions météorologiques aléatoires.....	61
III.4 Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	63

Bibliographie

- [1] R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [2] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [3] Manuel scolaire « TERMINALE STI ELECTROTECHNIQUE Nathan », 'Ce qu'il faut savoir sur L'énergie solaire photovoltaïque', office fédéral suisse des questions conjoncturelles-Suisse, 2011/2012.
- [4] David Sanz Morales, 'Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications', Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology, 14.12.2010.
- [5] Francisco M, González-Longatt, 'Model of Photovoltaic Module in Matlab', 2do congreso iberoamericano de estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y computación ,pp 1-5, 2005.
- [6] K.TAHRI, B. BENYOUCEF, 'Etude de Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque', 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 , pp 192-197, 2010.
- [7] Tarek SALMI, Mounir BOUZGUENDA, Adel GASTLI, 'MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell', international journal of renewable energy research, Vol.2, No.2, pp 213-218, 2012.
- [8] Saurav SATPATHY, 'photovoltaic power control using mppt and boost converter', a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology in Electrical Engineering, May 2012.
- [9]: Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [10]: Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques, thèse de doctorat, soutenue le 29 septembre 2006.
- [11]: Alain Bilbao Learreta, "Réalisation de Commande MPPT Numériques", septembre 2006.
- [12] Shane McMORROW, ' Variable Inductance for Solar Power Applications', B.E. Electronic Engineering Project Report, 2011.
- [13] http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck
- [14] Richard A. CULLEN, 'what is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work?', Blue Sky Energy Inc.
- [15]: Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport_PIP_Microtransat_Energie_II, "Partie électronique et énergétique", 2005-2006.
- [16] A. Brahmi, A. Abounada et M. Ramzi, "Application de la commande 'Perturb and Observe' pour L'extraction de la puissance maximale des cellules photovoltaïques",

[17] G.F. Tchoketch Kebir, "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Mémoire de Magistère, ENP Alger, 2006.

[18] D. P. Hohm, M. E. Ropp, "*Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental programmable, maximum power point tracking test bed*", IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000 pp. 1699-1702, Sept.2000.

[19] A. S. Masoum, H. Dehbonei and E. F. Fuchs, "*Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems with voltage and current based maximum power point tracking*", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, pp. 514-522, Dec. 2002. **[20]**

J. Ghaisari, M. Habibi, A. Bakhshai, "*An MPPT controller design for photovoltaic (PV) system based on the optimal voltage factor tracking*", IEEE Electrical Power Conference, EPC 2007, pp. 359-362, Oct. 2007.

Introduction Générale

Depuis le siècle dernier, la consommation en énergie a augmenté de manière considérable. Mais nos ressources en pétrole, charbon ou gaz ne sont pas éternelles et il est en outre préférable de ne pas les brûler plus pour ne pas aggraver la pollution.

La solution consiste en l'utilisation d'énergies renouvelables telles que l'énergie hydraulique, éolienne ou solaire. L'utilisation de ce type d'énergie a progressé de 12,5% depuis 1990 [1].

L'Algérie, recèle à cet effet d'importantes ressources énergétiques renouvelables qui peuvent pallier notamment dans le cadre de la production de l'énergie électrique, vecteur principal de tout développement économique et social. Le gisement solaire constitue la principale de ces ressources.

L'énergie solaire fournit aujourd'hui un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minéral fossile est au mieux de 30 à 35%.

L'utilisation de cette énergie renouvelable de nature « aléatoire et diffuse » nécessite la combinaison de moyens de stockage et de contrôle de gestion de puissance où chaque générateur PV devrait fonctionner en un point optimal, appelé le point de puissance maximale (MPP), qui est subordonné à la variation de la température et de l'insolation.

Pour augmenter le rendement en puissance d'un module PV ou d'un champ de modules PV, un contrôleur électronique est incorporé entre le générateur PV et la charge, dont le rôle principal est la surveillance en continu du point de puissance maximale du générateur PV appelé communément **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*) et cela en général par action sur un dispositif de conversion DC-DC.

Les techniques de régulation et de contrôle assurent la fonction de transfert, à la charge, la puissance électrique maximale issue du générateur PV quelque que soit les variations des conditions de température et d'ensoleillement.

La comparaison des systèmes avec et sans les dispositifs de poursuite du point de puissance maximale montre que les systèmes avec un **MPPT** produisent 80 à 90% de leur puissance maximale théorique, tandis que ceux sans **MPPT** fonctionnent seulement à 30% de leur rendement de puissance maximale.

L'objectif de ce travail est d'étudier et de simuler la technique directe : perturber et observer (P&O).

Dans le cadre de ce travail Nous aborderons dans le premier chapitre le principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, sa modélisation mathématique et ses caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre on va présenter l'inconvénient de la méthode de raccordement direct du générateur photovoltaïque à une charge, et expliquer la nécessité d'un contrôleur MPPT pour bénéficier du maximum de puissance. On présentera par la suite les différentes techniques directes et indirectes utilisées pour traquer le point de puissance maximale sous conditions météorologiques variables

Le troisième chapitre est réservé à la simulation de la technique directe : perturber et observer (P&O). Cette technique est simulée avec le logiciel de calcul scientifique MATLAB-SIMULINK et le logiciel Psim (PowerSimulation) en considérant différentes conditions météorologiques.

A la fin de ce mémoire, une conclusion générale présente les résultats de notre travail, et offre une brève synthèse des idées traitées dans le document.

Introduction Générale

Depuis le siècle dernier, la consommation en énergie a augmenté de manière considérable. Mais nos ressources en pétrole, charbon ou gaz ne sont pas éternelles et il est en outre préférable de ne pas les brûler plus pour ne pas aggraver la pollution.

La solution consiste en l'utilisation d'énergies renouvelables telles que l'énergie hydraulique, éolienne ou solaire. L'utilisation de ce type d'énergie a progressé de 12,5% depuis 1990 [1].

L'Algérie, recèle à cet effet d'importantes ressources énergétiques renouvelables qui peuvent pallier notamment dans le cadre de la production de l'énergie électrique, vecteur principal de tout développement économique et social. Le gisement solaire constitue la principale de ces ressources.

L'énergie solaire fournit aujourd'hui un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minéral fossile est au mieux de 30 à 35%.

L'utilisation de cette énergie renouvelable de nature « aléatoire et diffuse » nécessite la combinaison de moyens de stockage et de contrôle de gestion de puissance où chaque générateur PV devrait fonctionner en un point optimal, appelé le point de puissance maximale (MPP), qui est subordonné à la variation de la température et de l'insolation.

Pour augmenter le rendement en puissance d'un module PV ou d'un champ de modules PV, un contrôleur électronique est incorporé entre le générateur PV et la charge, dont le rôle principal est la surveillance en continu du point de puissance maximale du générateur PV appelé communément **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*) et cela en général par action sur un dispositif de conversion DC-DC.

Les techniques de régulation et de contrôle assurent la fonction d'adaptation d'impédance, en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du générateur PV quelque que soit les conditions de température et d'ensoleillement.

La comparaison des systèmes avec et sans les dispositifs poursuivant le point de puissance maximale montre que les unités avec un **MPPT** produisent 80 à 90% de leur puissance maximale théorique, tandis que les unités sans **MPPT** fonctionnent seulement à 30% de leur rendement de puissance maximale.

L'objectif de ce travail étant de diagnostiquer et de simuler technique directe perturbe et observe (P&O).

Dans le cadre de ce travail Nous aborderons dans le premier chapitre le principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque, sa modélisation mathématique et ses caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre on va présenter l'inconvénient de la méthode fil du soleil de raccordement du générateur photovoltaïque à une charge, et expliquer la nécessité d'un contrôleur MPPT pour bénéficier du maximum de puissance, et on va présenter par la suite des différentes techniques directes et indirectes utilisées pour traquer le point de puissance maximale sous le changement des conditions météorologiques.

Le troisième chapitre est réservé à la simulation de technique directe le plus récurrente au suivi de MPP la technique perturbe et observe (P&O). Cette technique simulée avec le logiciel de calcul scientifique MATLAB-SIMULINK et logiciel Psim sous différentes conditions météorologiques.

A la fin de ce mémoire, une conclusion générale présente les résultats de notre travail, et offre une brève synthèse des idées traitées dans le document.

I.1 Etat de l'art

Il existe des travaux concernant les techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT), parmi elles :

-N. Aouchiche 1*, M.S. Aït Cheikh 2 et A. Malek 1.

Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498

Résumé : ce travail consiste à effectuer une étude théorique des composants constituant le système photovoltaïque global à savoir: le module photovoltaïque, le hacheur, et le régulateur MPPT. La seconde étape est consacrée à la simulation du système photovoltaïque, sous différentes conditions.

-H. Abbas 1* , H. Abid 2† , K. Loukil 1, A. Toumi 2 et M. Abid.

Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque.

Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445.

Résumé : Ce travail est une tentative pour étudier et discuter cinq types de techniques MPPT. Les techniques MPPT les plus populaires sont revues : logique floue, FCC, FCO, P&O, InCond. L'environnement Matlab-Simulink est utilisé pour analyser, puis interpréter les résultats de simulation de ces algorithmes, et par conséquent, montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

- A. Brahmi, A. Abounada* et M. Ramzi

Application de la commande 'Perturbe and Observe' pour l'extraction de la puissance maximale des cellules photovoltaïques.

Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 121 – 124.

Résumé : L'idée, consiste à utiliser un hacheur survolteur muni d'un dispositif de contrôle numérique basé sur l'implémentation de l'algorithme (P & O) amélioré sur un microordinateur. Dans ce travail, nous présentons la réalisation de cette structure, permettant d'atteindre l'objectif convoité. Finalement, les résultats expérimentaux montrent que le maximum de puissance est déposé avec une réduction d'oscillations.

- Abdelaziz Talha1, Saida Boukhalifa 2

Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque.

Conférence paper. octobre 2010

Résumé : De même que leurs modèles sont développés sous MATLAB/Simulink.

Le contrôleur MPPT à base de P&O est développé. Les résultats obtenus sous différentes conditions de fonctionnement montrent les bonnes performances de contrôle par P&O du MPPT du système photovoltaïque.

-TALBI Saïd, RIAH Rachid.

Comparaison et Synthèse d'un Nouvel Algorithme MPPT Robuste pour une Chaîne de Production d'Énergie Photovoltaïque.

Projet de fin d'étude.

Résumé : Les modèles des différents composants du système sont proposés. La commande par mode de glissement ainsi que le MPPT développé sont conçus de manière à assurer l'optimisation de l'énergie photovoltaïque, en poursuivant les points de puissance maximale.

- MERAHI REDA.

Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque.

mémoire de Magister.

Résumé : Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

-SMARA Zoubeyr.

Étude de différentes stratégies de commande des systèmes de poursuite de la puissance maximale.

Mémoire de Magister.

Résumé : Afin de minimiser les pertes énergétiques dans les systèmes qui se trouvent face à des problèmes d'ombrage, une étude du comportement du générateur photovoltaïque dans ces conditions est faite et un développement d'une loi de commande 'MPPT' floue est introduit pour remédier au problème d'existence de deux points de puissance maximale.

-BOUDJEMA Mohammed, BELHAOUAS Nasreddine.

Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurons et implémentation sur FPGA et DSP

Mémoire de d'Ingénieur d'Etat.

Résumé : Ce travail s'intéresse à l'étude de la méthode de poursuite du point de puissance maximale par les réseaux de neurones (MPPT-neuronale) des générateurs photovoltaïques, qui a permis de déterminer les différents paramètres influençant le point de puissance maximale. Des simulations effectuées sous MATLAB et "SIMULINK" confirment la bonne performance du contrôleur MPPT, qui sera implémenté sur le circuit FPGA.

I.2 Introduction

Le soleil fournit une énergie colossale à la terre (10.000 fois l'énergie nécessaire) sous forme lumineuse. Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous la recevons n'est pas nécessairement celle sous laquelle elle est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole...) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir.

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque. Dans ce chapitre nous détaillons les éléments ayant trait à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

I.3 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle à la nuit [1].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [1].

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

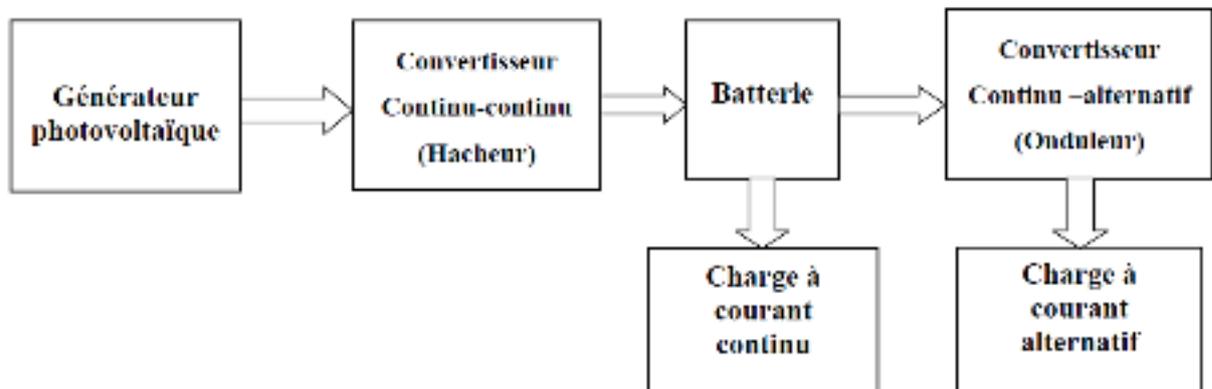


Figure I.1: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque

I.4 Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [1].

I.5 La cellule Photovoltaïque

Les cellules constituent l'élément essentiel des installations photovoltaïques. Elles sont capables, par leur structure, de transformer directement la lumière en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

Lorsque cette jonction est exposée à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière attaquent les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arrachés. Dans les cellules PV, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons arrachés créent une tension électrique continue et faible.

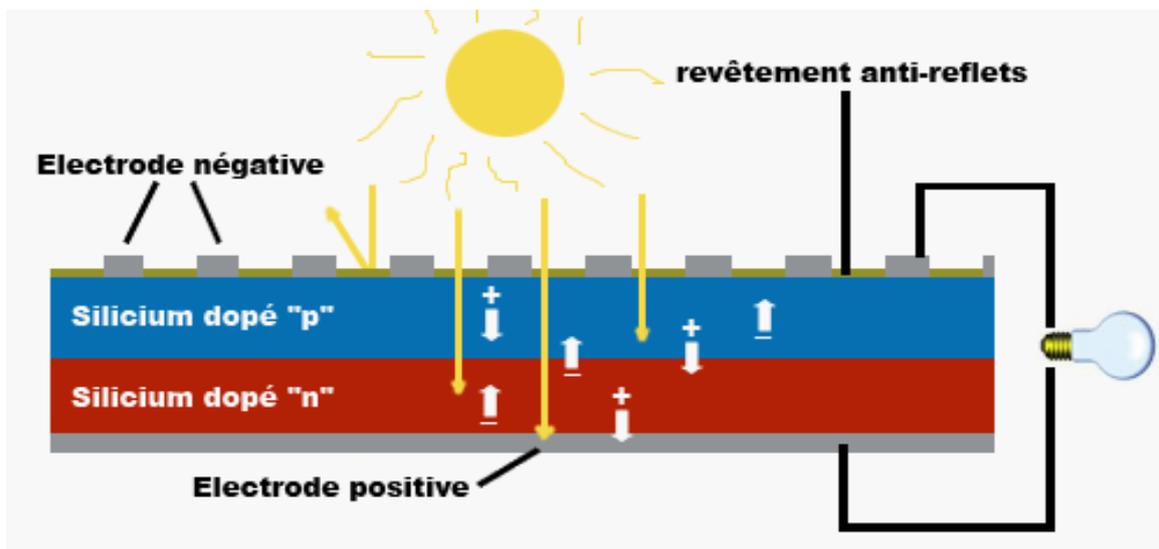


Figure I.2 : L'effet photovoltaïque

I.6 Représentations électrique des cellules PV

On peut facilement représenter la cellule PV par le schéma de la figure (Figure I.3), ou Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par l'éclairement appliqué à la cellule (l'effet photovoltaïque). La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. C'est le cas idéal de la cellule.

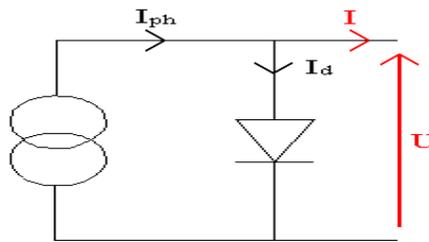


Figure I. 3 : Représentation la cellule PV idéale.

Dans ce cas le courant I est donné par :

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

Avec I_{ph} : Courant créé par l'effet voltaïque.

$$I_d : \text{Courant de la diode exprimé par : } I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Ou : I_s : courant de saturation inverse de la diode.

q : la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ c).

K : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ m²kg/s²K).

T : température de la jonction.

V : tension de sortie de la cellule.

n : le facteur d'idéalité de la diode, dans le cas idéal $n=1$.

Mais en réalité il y a des pertes au niveau de la cellule donc on ajoute au schéma de la cellule idéale deux résistances pour modéliser les pertes internes, représentée en Figure (I. 4).

- Résistance série R_s : cette résistance est constituée de plusieurs composants. Parmi ces composants, l'émetteur et grille supérieure (composé du doigt et de la résistance de barres) dominant la résistance série globale.

- Résistance de shunt R_{sh} : Une faible résistance de shunt provoque des pertes de puissance dans les cellules solaires en fournissant un trajet de courant alternatif pour le courant généré par la lumière. Une telle dérivation réduit la quantité de courant circulant à travers la jonction de cellules solaires et réduit sa tension. L'effet d'une résistance de shunt est particulièrement grave à de faibles niveaux de lumière.

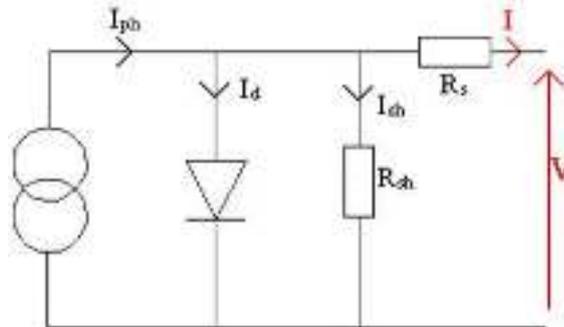


Figure I. 4 : Représentation la cellule PV réelle.

La nouvelle équation modélisant la cellule sera :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3)$$

$$\text{Ou : } I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$\text{Et : } I_d = I_s \left[\exp \left(q \left(\frac{V + IR_s}{nKT} \right) - 1 \right) \right] \quad (5)$$

$$\text{L'équation (3) sera donc : } I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

I.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série.

La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement

et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module Photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces et l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...), peuvent endommager les cellules de façon permanente.

I.7.1 Association en série

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [1]

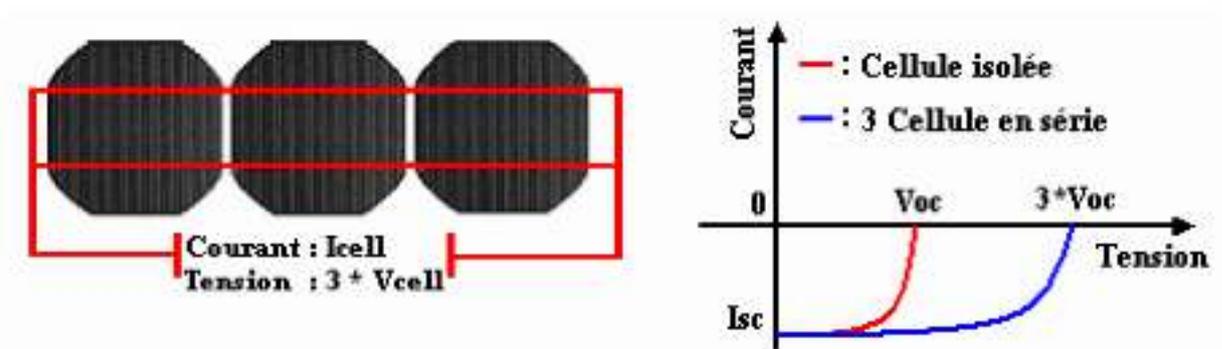


Figure I. 5 : Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension

I.7.2 Association en parallèle

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche [1]

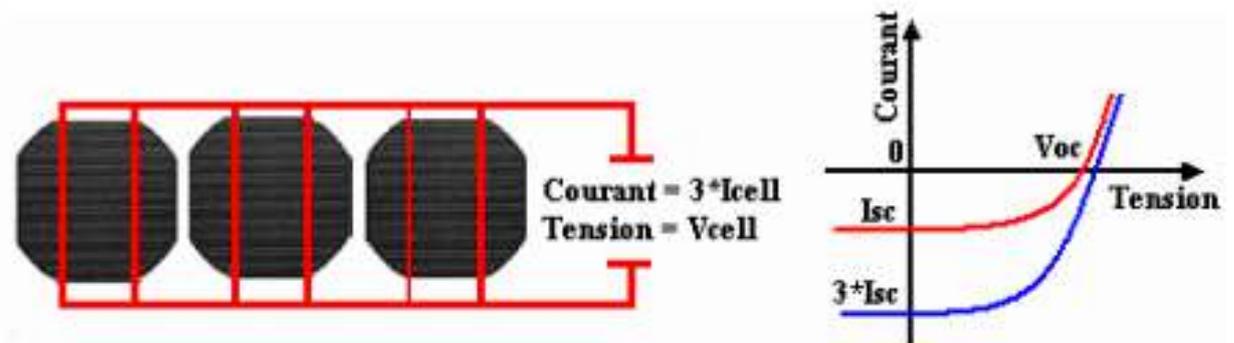


Figure I. 6 : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

I.7.3 Association mixte série/parallèle des cellules PV

Pour bénéficier des deux types d'assemblage des cellules PV (série et parallèle) et par conséquent augmenter la tension et le courant au même temps (la puissance générée), un raccordement mixte série parallèle des cellules est favorable. Dans ce cas le courant résultant soit égale au courant court-circuit d'une cellule multiplié par le nombre de cellules câblées en parallèle, la tension résultante sera égale à la tension d'une cellule multipliée par le nombre de cellules câblées en série.

$$V_{oc} (\text{générateur}) = N.V_{oc} \quad (7)$$

$$I_{sc} (\text{générateur}) = M.I_{sc} \quad (8)$$

Avec : N : nombre de cellules en séries.

M : nombre de cellules en parallèle.

I.8 Les caractéristiques électriques d'un module PV

Un module photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension (I-V). Simulée sous Matlab, elle est illustrée comme ci-dessous

en Figure (I.7).

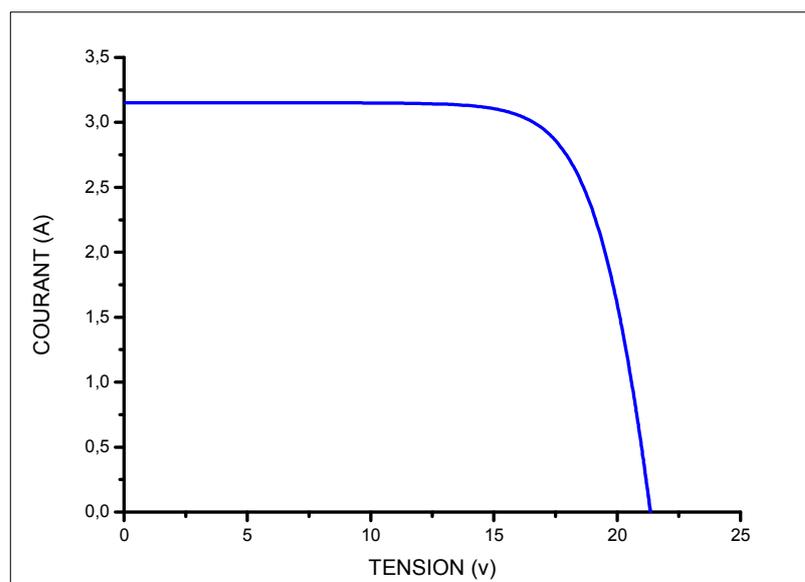


Figure I. 7 : Le courant de module PV en fonction de la tension

Partant de cette courbe on peut tracer sous simulateur avec matlab, la courbe de la puissance P-V de la cellule Figure (I.8).

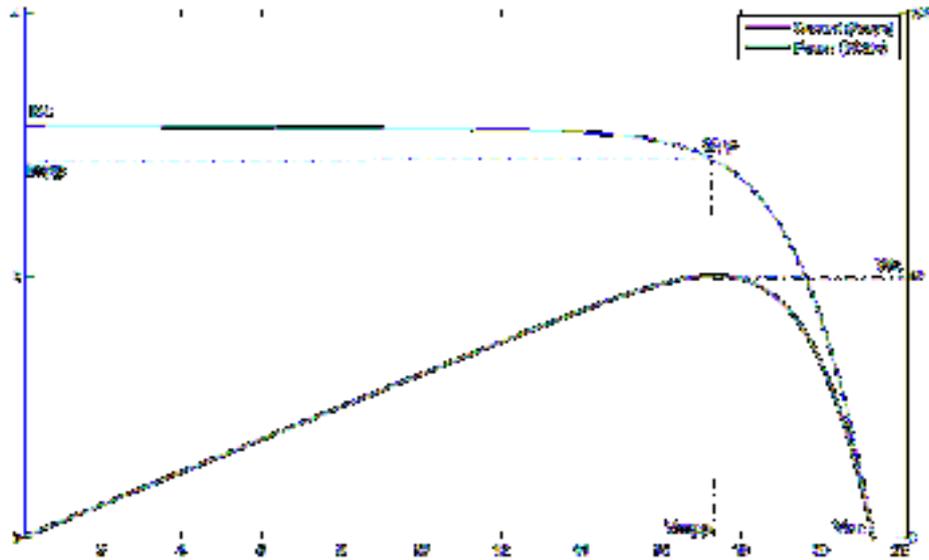


Figure I.8 : Le courant et la puissance d'un module PV en fonction de sa tension

A partir de ces courbes (I-V ; P-V) on peut extraire facilement les caractéristiques d'une module PV qui sont :

I.8.1 La tension de circuit ouvert V_{oc}

La tension en circuit ouvert V_{oc} , est la tension maximale disponible à partir d'une cellule solaire, ce qui se produit à courant nul. La tension en circuit ouvert correspond à la quantité de polarisation en sens direct sur la cellule solaire en raison de la polarisation de la jonction de la cellule solaire avec le courant généré par la lumière [2].

I.8.2 Le courant de court-circuit I_{sc}

Si la résistance de charge aux bornes de la cellule PV est nulle, alors sous une intensité de lumière donnée, le courant qui est généré sera à sa valeur maximale pouvant être atteinte. Dans ces conditions, la cellule photovoltaïque est dite être dans sa configuration de court-circuit et le courant est appelé courant de court-circuit, I_{sc} .

Afin de maximiser l'efficacité d'une cellule photovoltaïque, les chercheurs et les ingénieurs tentent de maximiser la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit [3].

I.8.3 La puissance de crête P_c (w_c)

Mesurée par watt-crête, c'est la puissance électrique maximale délivrée par une Cellule solaire pour un ensoleillement standard de 1000W/m^2 à 25°C . Elle est généralement exprimée par la dénomination W_c (ou W_p de l'anglais Watt-peak).

I.8.4 le point de fonctionnement maximal M_{pp}

C'est le point de la puissance maximale P_c dont les coordonnées sont le courant I_{mpp} , et la tension V_{mpp} [4].

I.8.5 le facteur de forme FF

Le facteur de forme (fill factor en anglais) est une mesure de la véritable caractéristique I-V. Sa valeur est supérieure à 0,7 pour les bonnes cellules [5]. Il est le rapport entre la puissance maximale que peut être délivrée à la charge et le produit de I_{sc} et V_{oc} .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (9)$$

I.8.6 le rendement d'un module

Il représente le rapport entre l'énergie électrique fournie par la cellule et l'énergie incidente et s'exprime par la relation suivante [6]:

$$\eta = \frac{P_c}{G_b \cdot S} \quad (10)$$

Avec : P_c : la puissance maximale délivrée à la charge.

G_b : le flux global incliné.

S : la surface de module photovoltaïque.

Ce rendement de conversion dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- Absorption incomplète des photons et excès des photons absorbés ;
- La réflexion à la surface qui peut être réduit par le traitement antireflet de la surface exposée au rayonnement à incidence normale;
- Rendement de collecte qui dépend des caractéristiques du matériau

I.9 L'influence des conditions météorologiques sur les cellules

I.9.1 l'influence de la température

Le courant de saturation inverse de la diode varie en fonction cubique de la température et il peut être exprimé comme suit:

$$I_s(T) = I_s \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{nom}} - 1 \right) \frac{E_g}{NV_t} \right] \quad (11)$$

Ou : I_s : le courant de saturation inverse de la diode.

T_{nom} : la température nominale.

E_g : l'énergie de gap de semi-conducteur.

V_t : la tension thermique donné par :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (12)$$

En général, pour un rayonnement solaire donné, lorsque la température de la cellule augmente, la tension en circuit ouvert V_{oc} , diminue légèrement, tandis que le courant en court-circuit augmente [7]. Simulée sous matlab elle s'illustre comme ci-dessous en Figure (I.9)

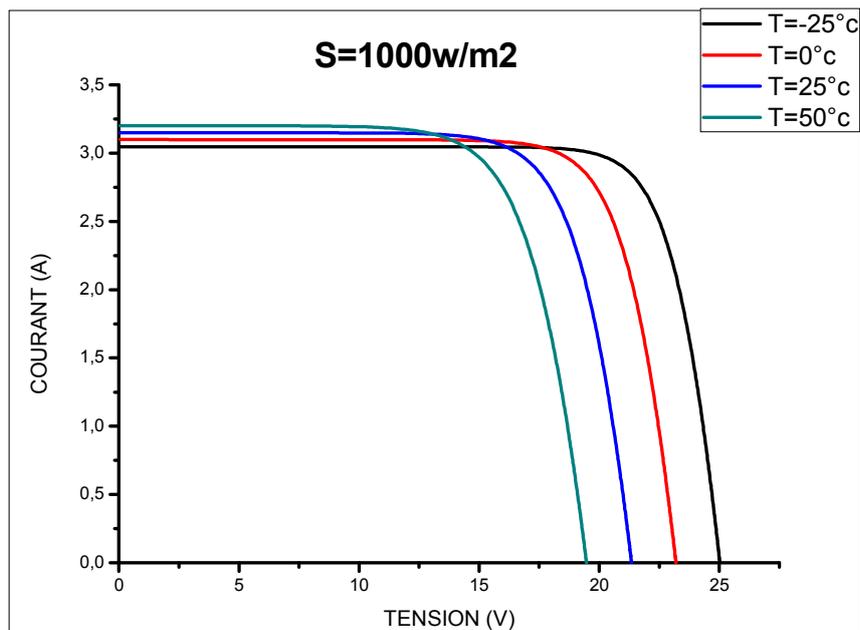


Figure I.9 : Influence de la température sur la courbe I-V

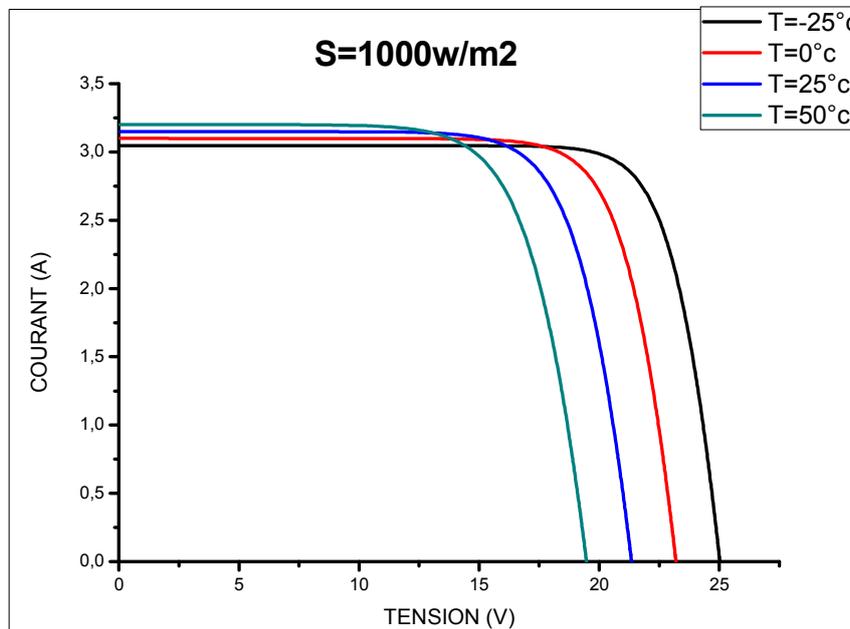


Figure I.10 : Influence de la température sur la courbe P-V

I.9.2 l'influence de l'ensoleillement

Les courbes d'une cellule solaire photovoltaïque sont très dépendants des valeurs de l'ensoleillement solaire. Plus l'ensoleillement solaire est Supérieur, plus élevée sera l'ensoleillement entré à la cellule PV et par conséquent l'amplitude de la puissance qui augmentera pour la même valeur de tension. Avec l'augmentation de l'ensoleillement solaire, la tension de circuit ouvert aussi augmente légèrement. Cela est dû au fait que, lorsqu'on a une incidence solaire élève sur la cellule, les électrons auront donc une énergie d'excitation plus élevée [8].

$$I_{ph} = [I_{sc} + (T298)] \frac{\beta}{1000} \tag{13}$$

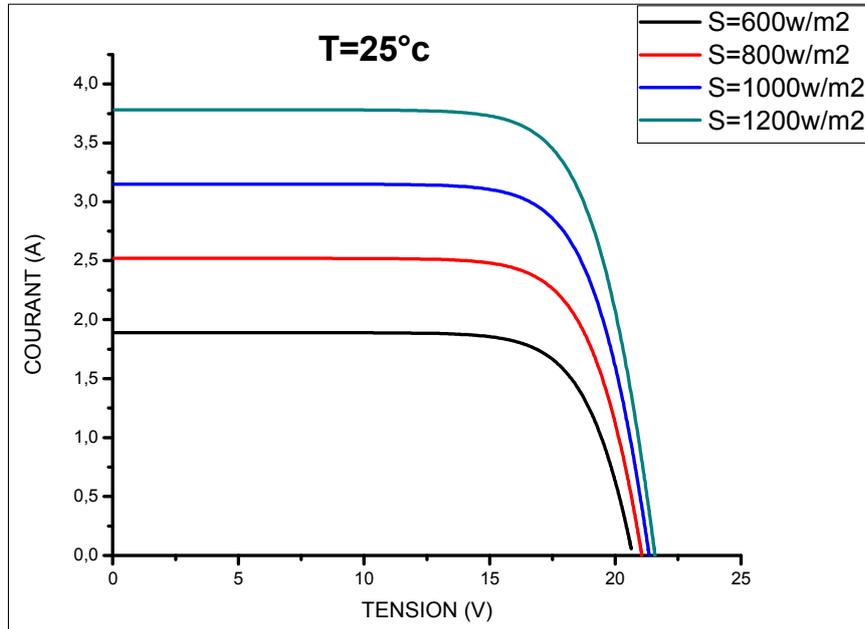


Figure I.11 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V

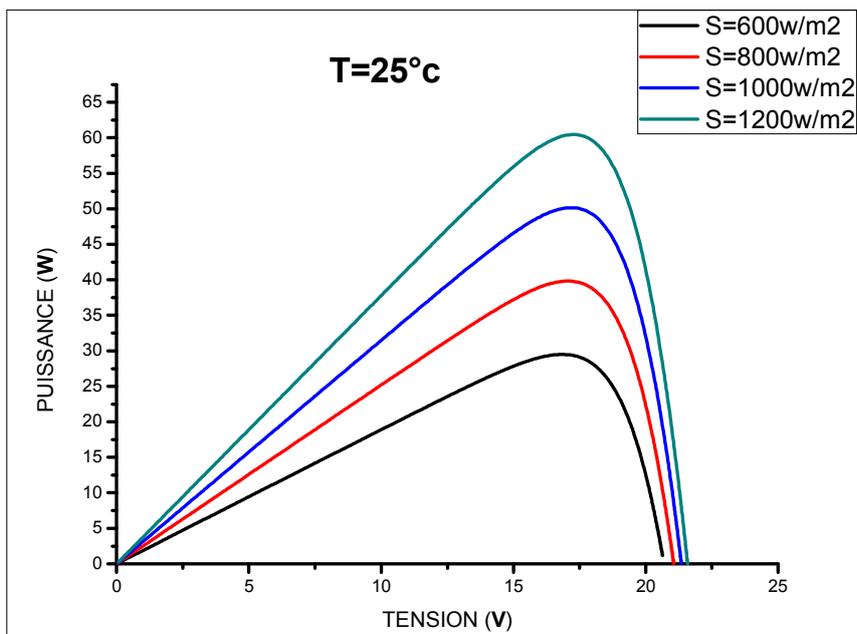


Figure I.12 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V

I.10. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques.

Chapitre I :

Modélisation d'un générateur

Photovoltaïque

II.1 Introduction

La production d'un GPV est variable, elle dépend d'une part du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi du vieillissement de l'ensemble, d'autre part de la charge qu'il alimente. Afin de maintenir la production stable et maximale, il faut assurer deux conditions nécessaires qui sont :

- Des conditions optimales (un éclairement élevé, une température basse et installation récente) pour que la production soit maximale.
- des charges optimales pour un transfert optimal.

La fluctuation de l'éclairement et la température au cours de la journée sont imposées par les conditions climatiques, par contre, l'atteinte de la puissance maximale est assurée l'objectif par le système ou étage dit étage de commande.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge (surtout de type continue) n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le transfert de la puissance maximale du GPV à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale PPM [9][10].

Ce chapitre est consacrée au convertisseur DC-DC étage essentiel pour l'adaptation en puissance, ce convertisseur gérée par un signale de commande délivré par le circuit suiveur du ppm.

Le circuit suiveur de ppm et établit selon plusieurs algorithmes.

II.2 Connexion directe entre la source et la charge

L'utilisation directe de l'énergie sortant d'un générateur PV est possible. Par exemple, un panneau PV peut être directement connecté à une charge. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continus délivrés par le générateur.

Ce type de connexion est aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté [11].

De plus, chaque charge que ce soit en continu ou alternatif (batterie, résistance, impédance) a son comportement propre.

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspond à l'intersection des caractéristiques électriques doivent exister. Pour simplifier en prend l'exemple d'une connexion directe entre un GPV et une charge figure (II.1), la présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.

la connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie.

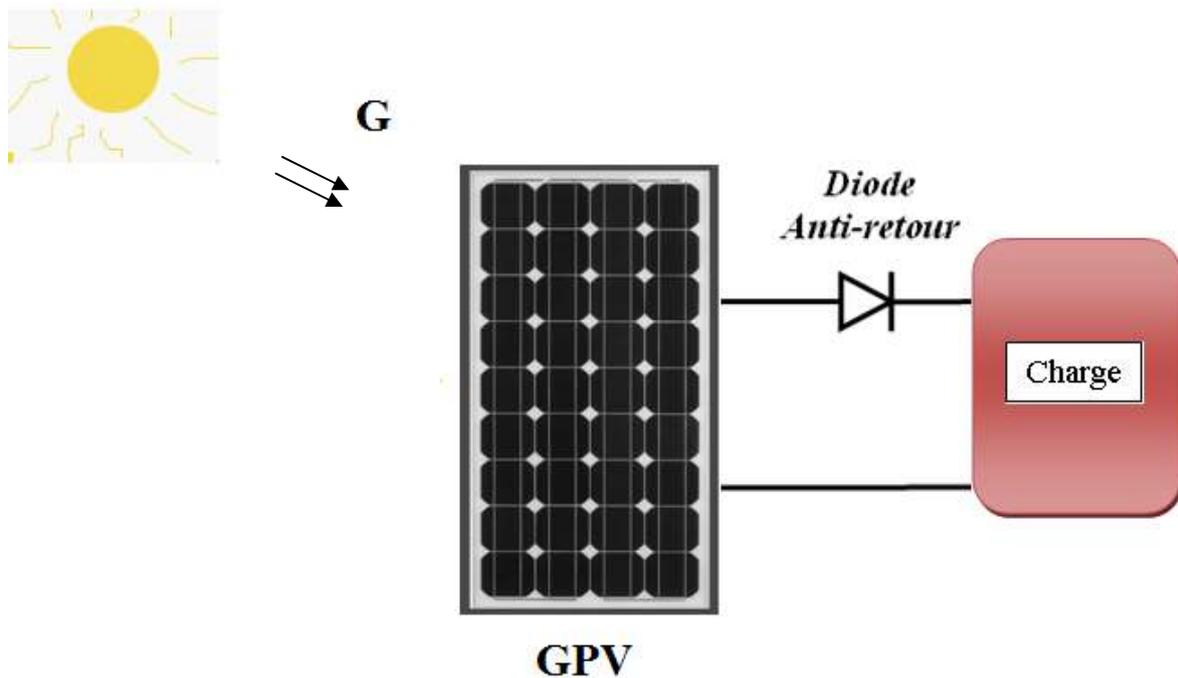


Figure II.1 : Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

II.3 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PMM, ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairage et de la température de la cellule. De plus selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférer à la charge en mode connexion direct [9].

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (II.2). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{\max} disponible [10].

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés.

Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid en anglais).

Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un GPV. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC).

L'étage d'adaptation (partie de puissance) se compose généralement d'un convertisseur statique, qui est situé entre les panneaux solaires et la charge.

Par définition un convertisseur statique est un montage permettant, par une commande réelle par un ou plusieurs interrupteurs à semi-conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur, usuellement, au sein d'un circuit suiveur du ppm, appelé en générale MPPT.

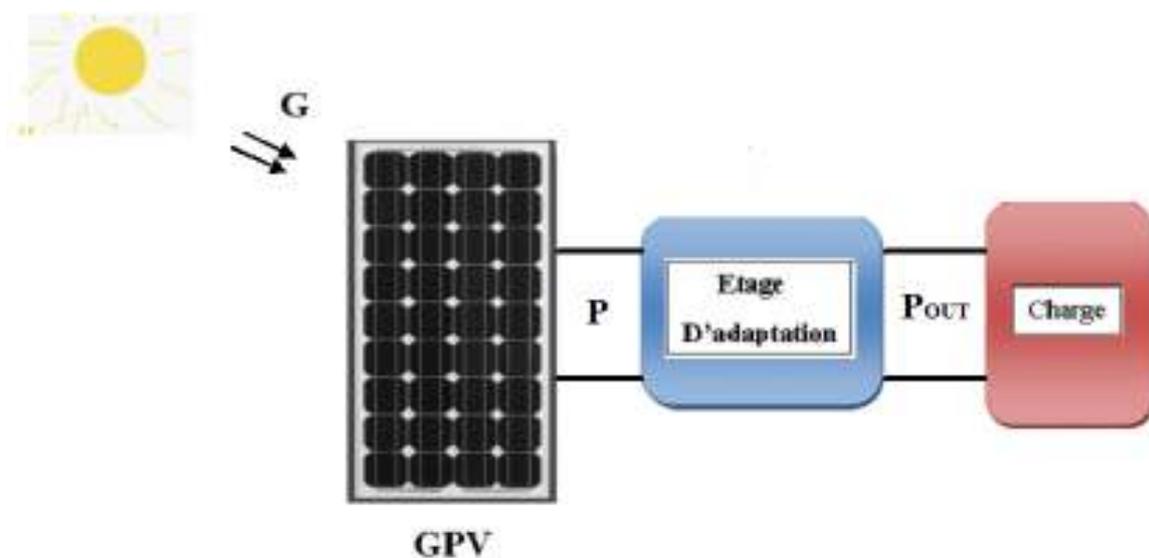


Figure II.2 : Chaîne de conversion photovoltaïque.

Il existe plusieurs types d'étage d'adaptation (hacheurs)

- **hacheur série:** en anglais (Buck converter ; step down converter), Son application typique est de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

- **Hacheur parallèle:** en anglais (Boost converter ; step up converter), L'application typique est l'augmentation de la tension d'entrée et la fournir en sortie.

- **Hacheur série/parallèle:** en anglais (cuk converter), Sa principale caractéristique, c'est la conversion non linéaire de la tension d'entrée et a une amplitude de tension de sortie qui est soit supérieure ou inférieure à l'amplitude de tension d'entrée.

On s'intéresse dans ce mémoire au hacheur série qui est utilisé pour charger une batterie de 12V à partir d'un panneau PV qui produit une tension environ 17 V.

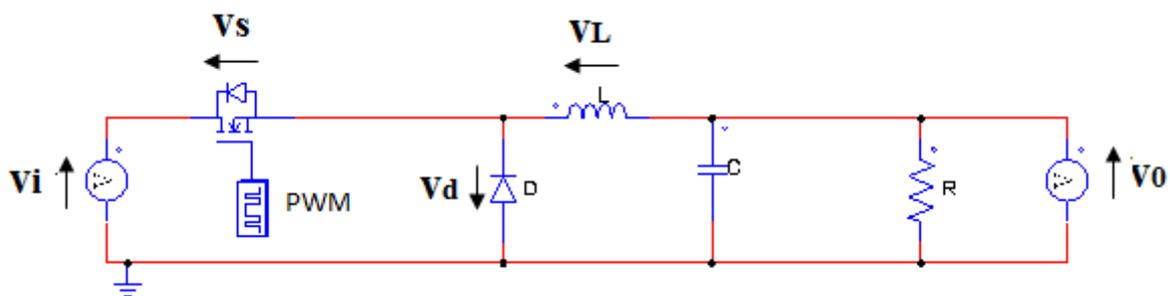


Figure II. 3 : Schéma électronique d'un hacheur série.

II.4 Principe de base du hacheur série

Le hacheur série est une alimentation à découpage atténuatrice, l'alimentation à découpage comme le hacheur série offre une efficacité supérieure à celle des régulateurs linéaires, mais encore plus important pour le but de ce projet il peut offrir une adaptation d'impédance entre la charge de sortie et la résistance interne de la source [12].

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur (transistor en mode commutation) .

II.4.1 état passant

Dans l'état passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i - V_o \quad (14)$$

Le courant à travers l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

II.4.2 état bloqué

Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = -V_o \quad (15)$$

Le courant traversant l'inductance décroît.

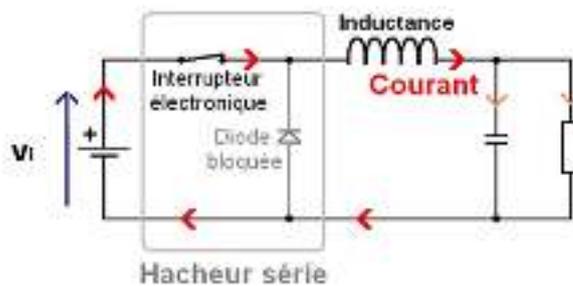


Figure II. 4 : état passant

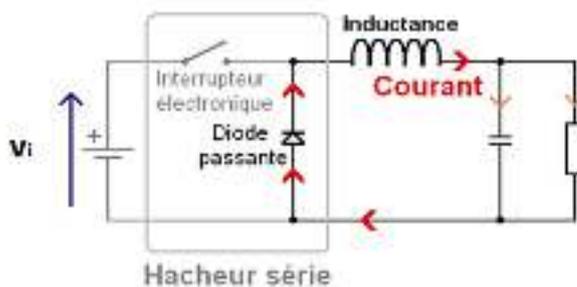


Figure II. 5 : état bloquante

II.5 Le hacheur série en mode de conduction continue

Quand un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue (CCM), le courant traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure (II.6) montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un hacheur série.

Le taux d'accroissement de I_L est donné par :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \tag{16}$$

L'augmentation de I_L durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o)\alpha T}{L} \tag{17}$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée par :

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_{\alpha T}^T dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o(T - \alpha T)}{L} \tag{18}$$

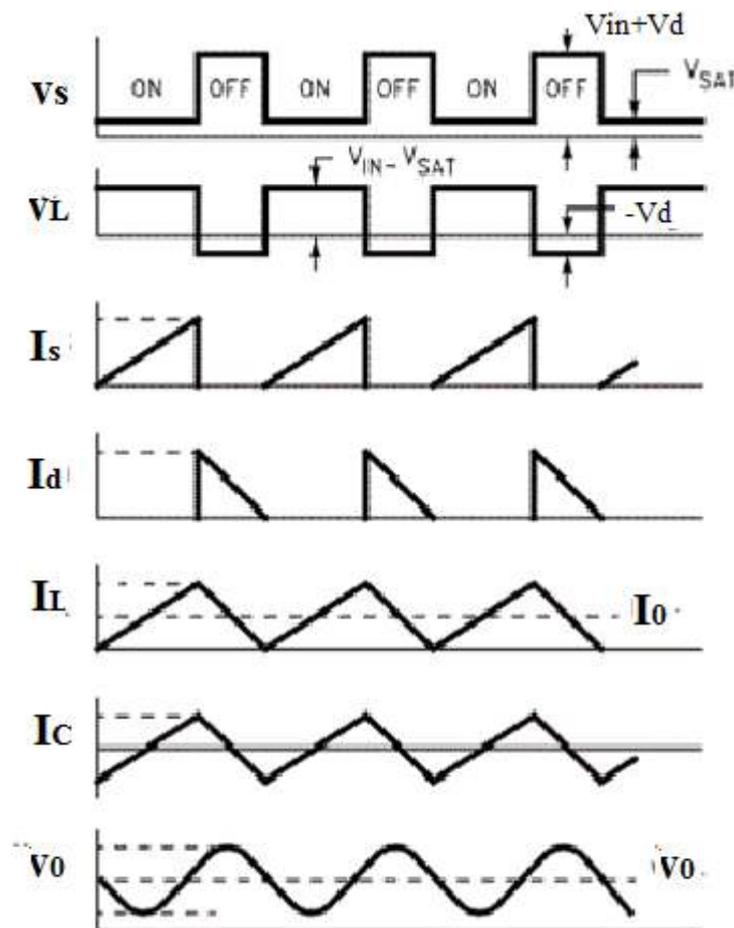


Figure II.6 Formes d'ondes d'un hacheur série.

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (19)$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (20)$$

En remplaçant $\Delta I_{L_{on}}$ et $\Delta I_{L_{off}}$ par leur expression (22) et (21), on obtient :

$$\frac{(V_i - V_o)\alpha T}{L} - \frac{V_o(T - \alpha T)}{L} = 0 \quad (21)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_o = \alpha V_i \quad (22)$$

Grâce à cette équation (22), on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique α étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_o est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle parfois de hacheur dévolteur. Pour mettre en œuvre l'adaptation d'impédance, il est essentiel de connaître la relation entre la charge du hacheur à la sortie et la charge apparente à son entrée (sortie du panneau).

En utilisant la loi d'ohm :

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \quad (23)$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (24)$$

Avec : R_o : La charge aux bornes du hacheur.

R_i : La charge d'entrée du hacheur.

$$R_o = R_i \quad (25)$$

A partir des équations (21), (22), (23) et (24) on aura :

$$R_i = \frac{1}{\alpha^2} R_o \quad (26)$$

II.6 Le hacheur série en mode de conduction discontinue

Dans certains cas, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inductance s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle. Bien que faible, la différence entre conduction continue et discontinue (DCM) a un fort impact sur la formule de la tension de sortie [13].

II.7 Principe du PWM

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie V_o afin d'obtenir une tension moyenne fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = T_{on}/T$ sans modifier T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre la tension V et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

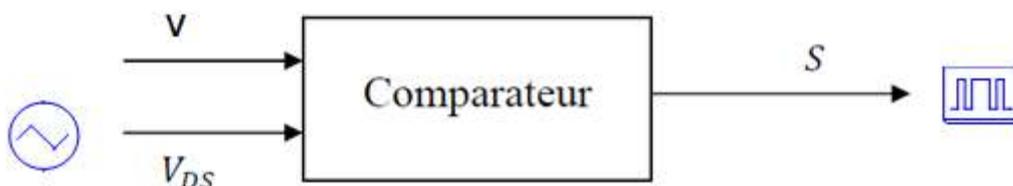


Figure II.7 : Principe du PWM

II.8 Les commande MPPT

La Figure (II.8) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement, de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est associée à un quadripôle. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge. [14].

Prenant l'exemple d'un changement d'éclairage du panneau Figure (II.9), pour le premier temps on est sur le point de fonctionnement maximal dit (Mpp1), le graphe caractéristique du panneau se change suivant l'éclairage, le point de fonctionnement maximal sera donc (Mpp2) mais le générateur reste toujours sur la tension V_1 délivrant la puissance P_3 au lieu de la puissance P_2 maximale dans ces conditions. Dans ce cas la technique MPPT est nécessaire pour assurer le passage du point P_3 au point P_2 .

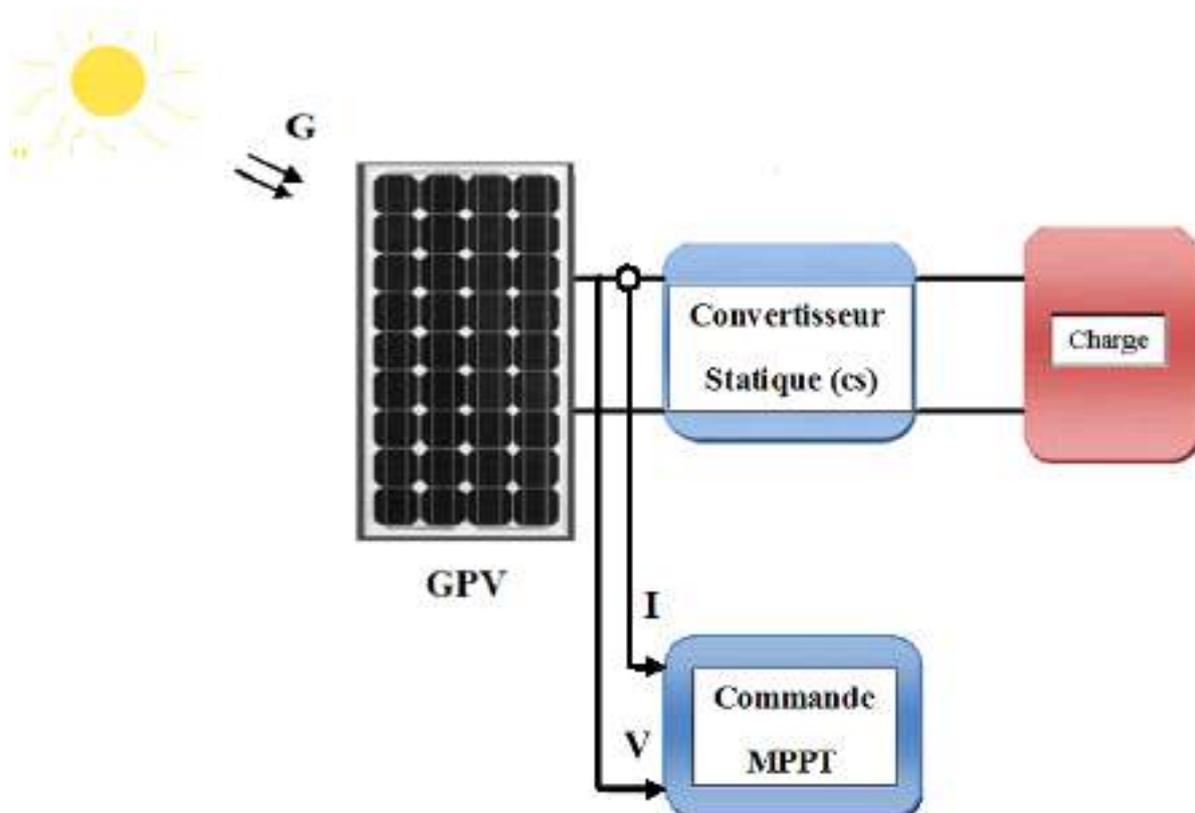


Figure II.8 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande.

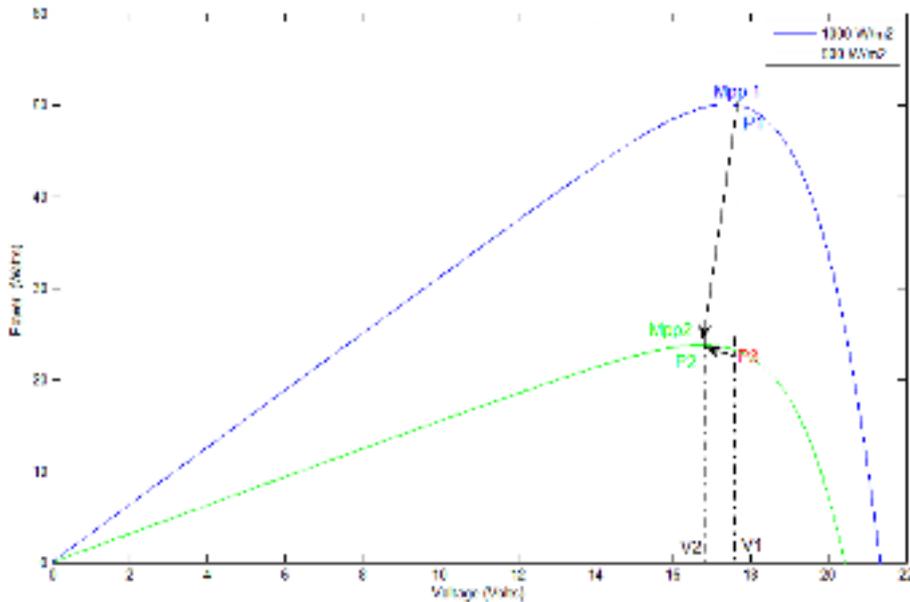


Figure II.9 : Nécessité de MPPT pour la bonne adaptation de la charge.

II.9 Différents types d’algorithmes MPPT existants dans la littérature

Il existe différentes manières de classification des algorithmes MPPT. Cependant il est plus intéressant de les classer selon le nombre de variables (paramètres d’entrée) ou selon la technique utilisée pour la poursuite du PPM.

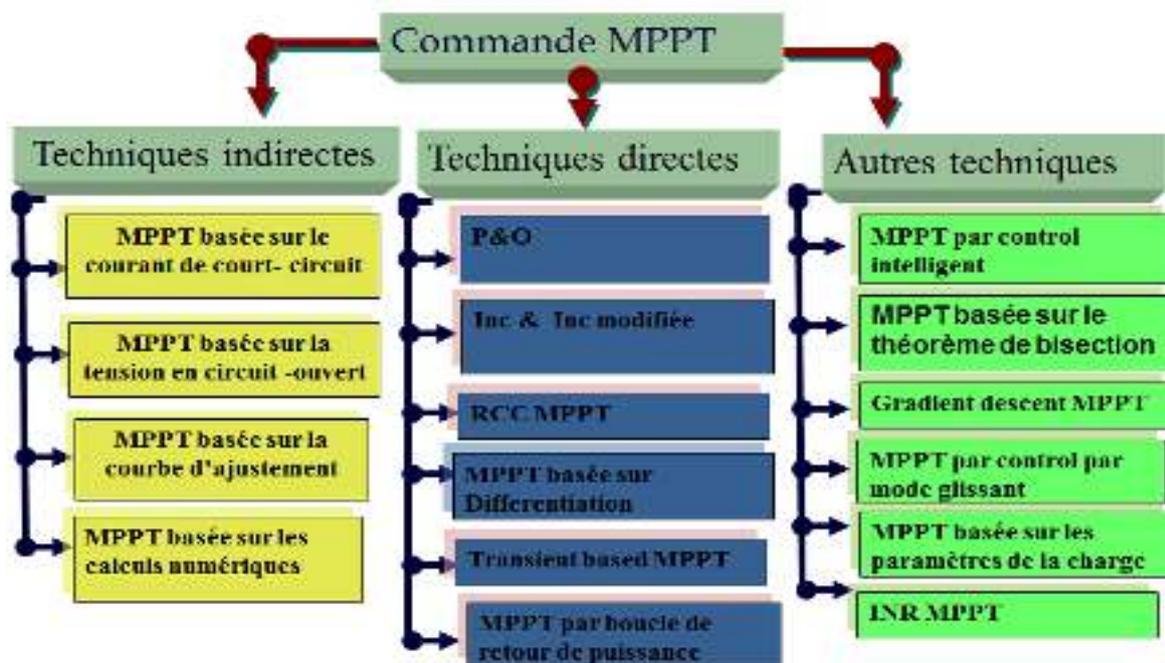


Figure II.10 : Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM

Les méthodes indirectes nécessitent l'identification des paramètres du panneau PV, et nécessitent l'utilisation d'un capteur, par contre les méthodes directe ne le nécessitent pas.

Les techniques directes plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond) [15].

Les techniques indirectes plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Mesure de V_{oc} (Fraction de V_{oc}) et Mesure de I_{cc} (Fraction de I_{cc}).

II.10 Principe des commandes « Hill Climbing »

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS.

Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque dP_{pv}/dD est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure (II.11)

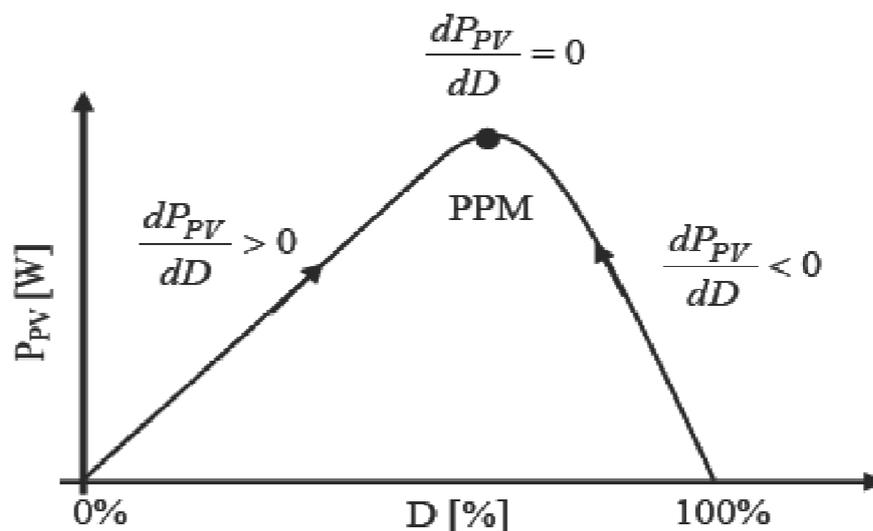


Figure II.11 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.

II.10.1 Méthode « Perturbation et Observation »

La méthode utilisée pour contrôler le point de puissance maximale est la méthode perturber et observer (P&O). Cette dernière est une approche largement utilisée pour la détermination du PPM. Ce dernier utilise comme entrée les valeurs de la tension V et le courant I du panneau, et comme sortie soit la valeur de la tension de référence V_{ref} soit le rapport cyclique. Comme son nom l'indique la méthode de P&O, fonctionne par perturbation du système par augmentation ou diminution de la tension de fonctionnement suivi de son observation sur l'impact de la puissance en sortie du panneau.

La Figure (II.12) présente la diffuant recherche de point de puissance maximale

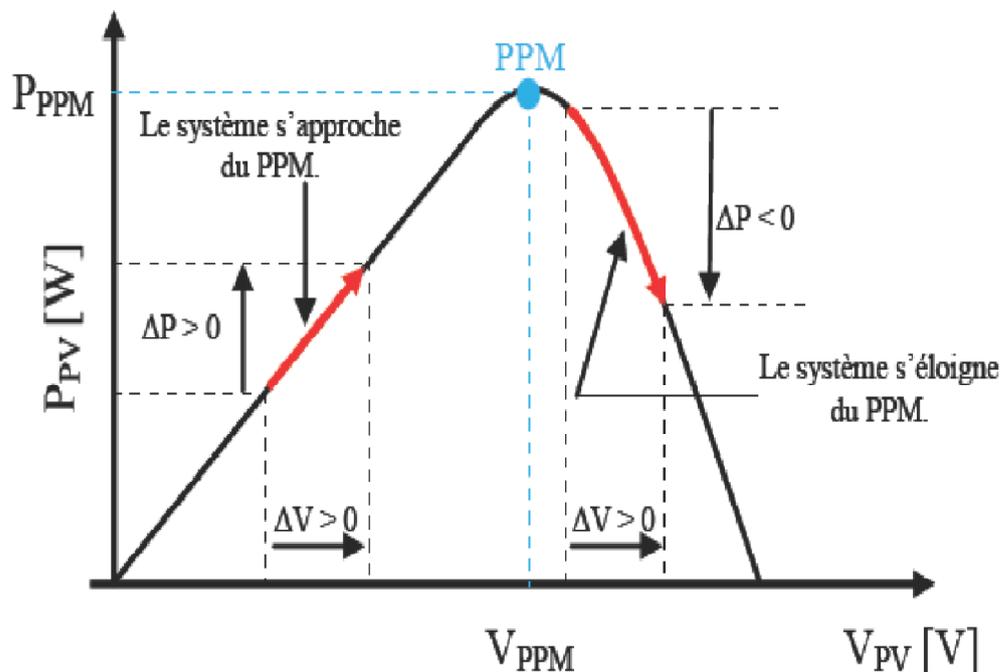


Figure II.12 : Principe de la commande P&O

L'organigramme correspondant de cette technique est donné en Figure(II.13). Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, V et I sont mesurés pour calculer $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée avec celle de $P(k-1)$. Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Si la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, la tension V du GPV est perturbée dans la direction opposée à celle de l'itération précédente [16] [17].

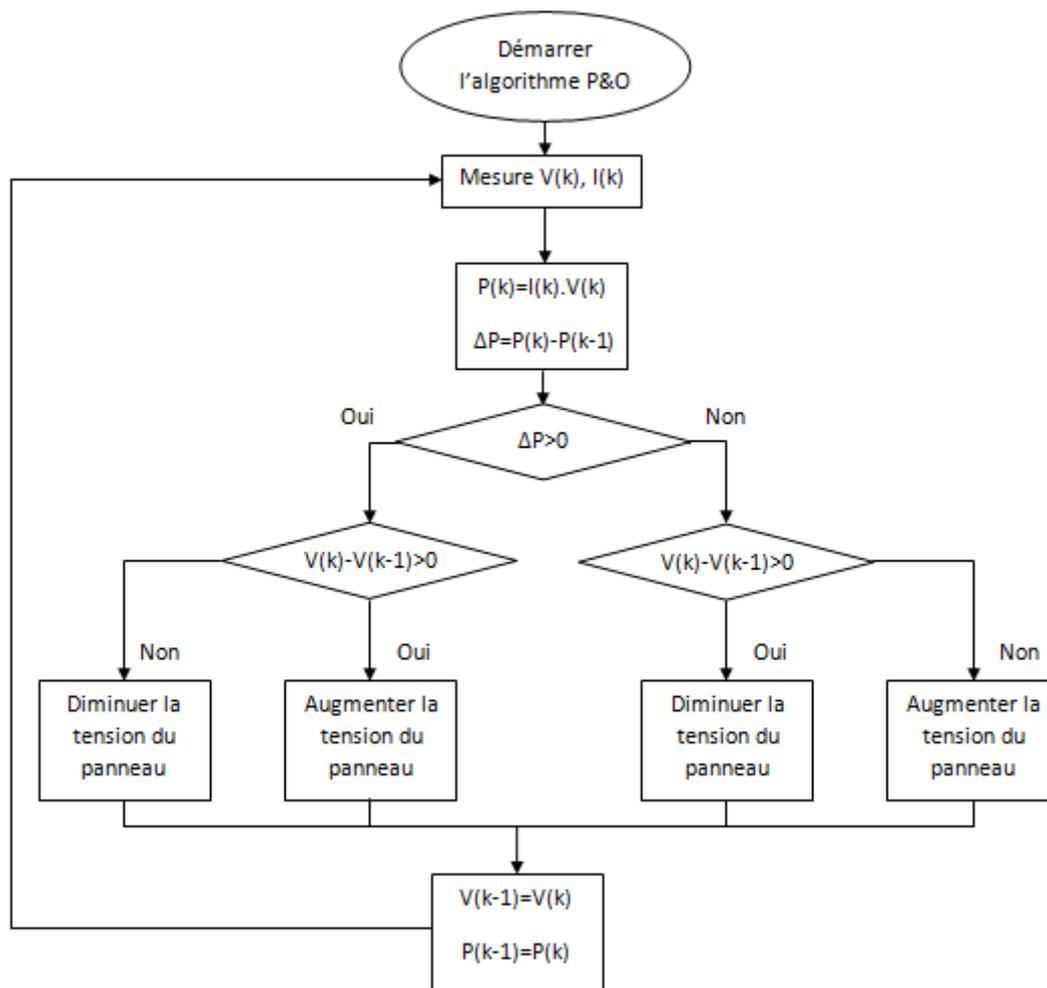


Figure II.13 : L'algorithme perturbe et observe P&O.

II.10.2 Méthode de la « Conductance Incrémentielle »

Nous allons dans cette méthode nous intéresser directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ($G=I/V$). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ($\Delta G = dI / dV$) [11][15].

En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous allons chercher le maximum de la courbe figure (II.14) en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance [16]. Nous déduisons facilement les actions à faire dans les différents cas sur le schéma $P=f(V)$.

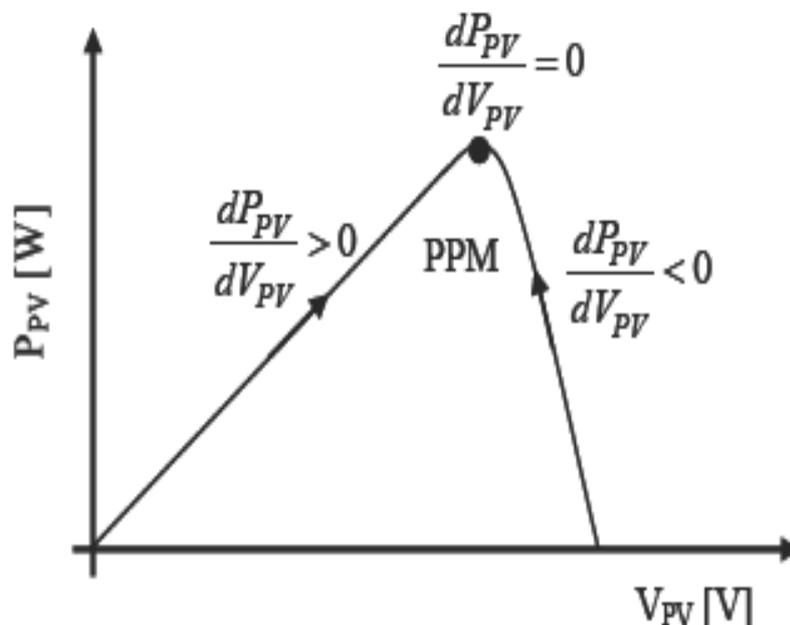


Figure II.14 : Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un Panneau

II.11 Mesure de Voc (Fraction de Voc)

Cette technique de recherche du PPM est très simple. Elle consiste à comparer la tension du panneau (V_{PV}) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale (V_{OPT}) [18][19][20]. L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du CS, afin de faire coïncider les deux tensions. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre V_{OPT} et V_{OC} d'un module PV :

$$V_{OPT} = k_V V_{OC} \quad (27)$$

Avec k_V correspondant à un facteur de tension dont la valeur dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement. Généralement, pour des GPV en Si, il est compris entre 0.71 et 0.78. A partir de (3.7) et connaissant k_V , il faut cependant mesurer la tension de circuit ouvert (V_{OC}) afin d'en déduire la tension de référence (V_{OPT}) à appliquer au PV. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de Voc de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure. Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de k_V dans un GPV suivant les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des GPV en Si qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions inhérentes à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents.

II.12 Mesure de Icc (Fraction de Icc)

Cette nouvelle méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{OPT} et I_{CC} comme le montre l'équation (3.8) [19][20]:

$$I_{OPT} = k_I I_{CC} \quad (28)$$

Avec k_I correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du GPV utilisé et est généralement compris entre 0.78 et 0.92. L'équation (3.8) montre que le courant I_{OPT} peut être déterminé par une mesure de I_{CC} et que le PPM peut être atteinte en appliquant un courant de référence égal à I_{OPT} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure de I_{CC} implique une perte de transfert de puissance due à la mise en court circuit du GPV. Cependant, cette

méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient.

Ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années 80. Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteuses. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module (I_{cc} et V_{co}) qui ne peuvent pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée. Comme le montre l'étude comparative [18] ou le rendement MPPT de la méthode Voc est de 88,1 %, soit 8 à 10 % inférieur à la commande P&O et InCond respectivement.

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté toutes les équations qui régissent le fonctionnement et le principe de fonctionnement des convertisseurs de type Buck .

En effet, côté source, pour un panneau photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Pour qu'un panneau fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge.

La commande MPPT associée à un convertisseur permet de faire fonctionner un panneau photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance.

Chapitre II :

Convertisseurs DC-DC

Et techniques MPPT

III.1 Introduction

Le type de commande MPPT la plus décrite dans la littérature est basé sur la mesure du courant et de la tension de la source. Deux types d'implantation existent (directe ou indirecte) en fonction de la complexité des algorithmes implantés.

Dans ce travail, nous avons opté pour l'approche d'adaptation pour la commande MPPT indirecte par raison de sa simplicité de réalisation et de sa dynamique satisfaisantes vis-à-vis des autres implantations.

Dans ce chapitre on va simuler une simple installation photovoltaïque autonome, c'est-à-dire qu'on va s'intéresser à la partie de production de l'électricité et d'extraction de la puissance du panneau la partie de consommation (les composantes qui se trouvent après la batterie) n'est pas présente dans la simulation.

Au début de ce chapitre on va présenter une modélisation générale de l'installation, et par la suite on va détailler chaque bloc et son fonctionnement.

L'analyse des résultats, de simulation, obtenu a l'aide de logiciel Matlab-simulink et de logiciel Psim, ce ra présentée en fin de chapitre

- La simulation est faite à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab-simulink, est basée sur les équations mathématiques de circuits électroniques.
- logiciel Psim est un logiciel de simulation pour l'électrotechnique et l'électronique de Puissance. Il est constitué de deux programmes :
 - PSIM : Dessin du schéma et simulation (Calcul des variables).
 - SIMVIEW : Trace des courbes.
- Le logiciel Psim peut être couplé avec le logiciel Matlab-simulink par la fonction sim coupler.

III.2 Simulation avec logiciel Matlab-simulink

III.2.1 Modélisation du système PV autonome

La modélisation du PV se fait sous forme de bloc. Chacun des blocs définit une fonction appropriée dans la chaîne système. La figure(III.1) présente une image de la modélisation du système PV.

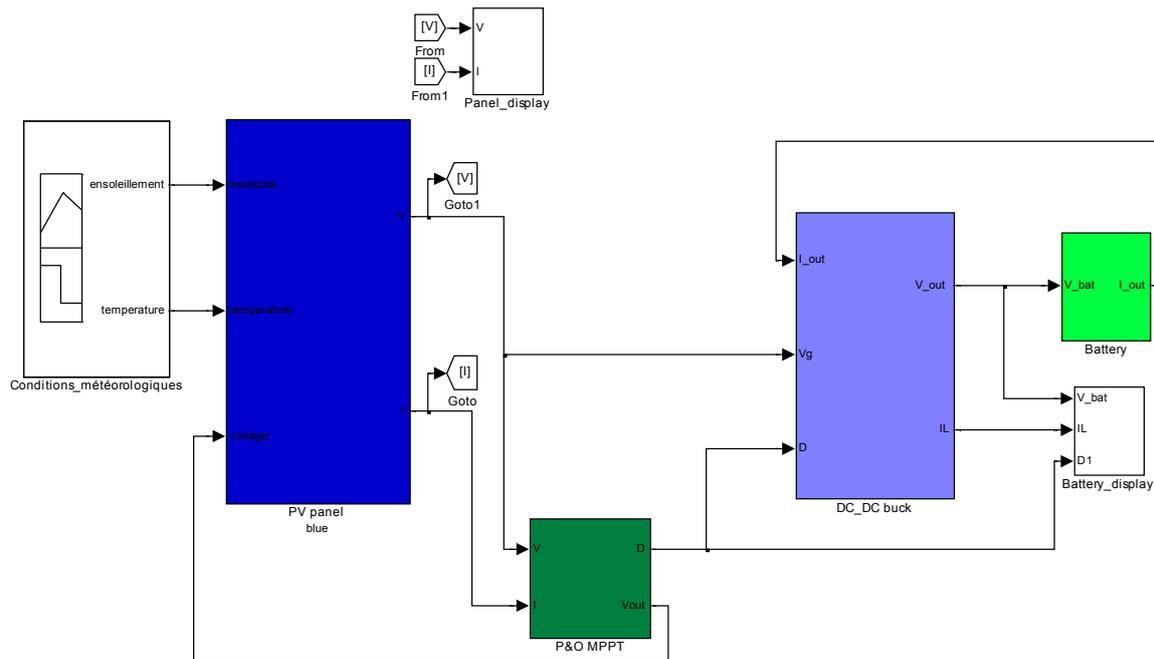


Figure III.1 : Le système photovoltaïque sous l'environnement simulink.

III.2.1.1 Conditions_météorologiques

Ce bloc génère de façon continue deux signaux représentant les changements des conditions météorologiques qui sont l'éclairement solaire et la température, il est intégré dans la bibliothèque simulink sous le nom "signal builder".

L'utilisation accès a cette bibliothèque et peut établir lui-même les signaux a générés, soit par manipulation direct sur le bloc, soit en établissant l'équation du signal.

III.2.1.2 Panneau PV

Ce bloc représente le panneau PV sur la Figure (III.2),il reproduit les grandeurs électriques qui sont la tension V et courant I. Ces grandeurs correspondent aux conditions météorologiques données par le premier bloc.

Ce panneau est modélisées en exploitant les équations mathématiques (6) (11) (12) et (13), et les valeurs caractéristiques telles qu' I_{sc} , K_i , R_s , R_{sh} , n et I_s , ces valeurs sont référencées dans le panneau de l'université de blida et sont comme suite :

PV : SM50 V_{oc} : 21.35v

I_{sc} : 3.15A W_p : 50wp

V_{mpp} : 17.39v I_{mpp} : 2.87A

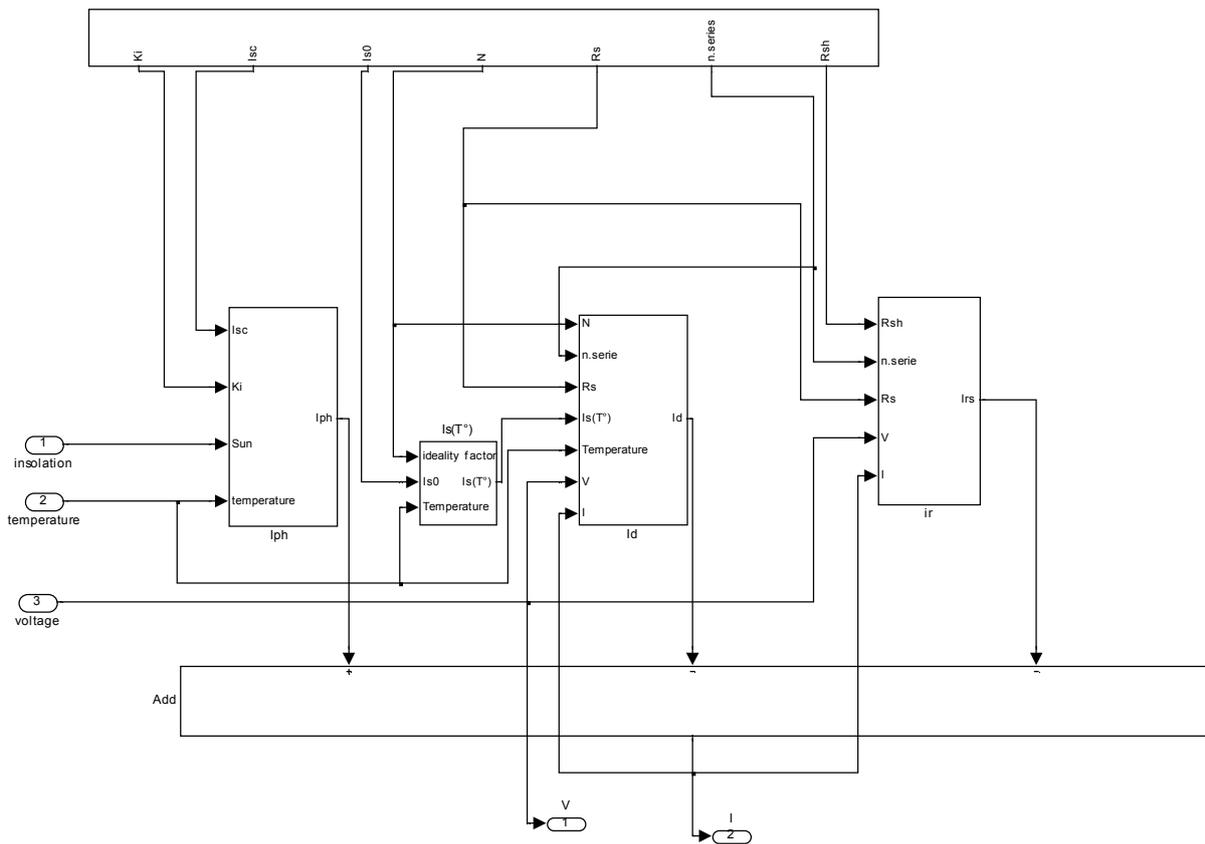


Figure III.2 : Modèle simulink du panneau photovoltaïque.

III.2.1.3 Hacheur_série

le hacheur série est utilisé pour adapter la charge (Batterie) au panneau PV, il réduit la tension d'entrée à une valeur nécessaire pour charger la batterie. Sa modélisation est représentée en Figure(III.3).

Les équations utilisées pour modéliser le hacheur sont :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_g \cdot d - I_L R_L - V_{out}) \tag{29}$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} (I_L - I_{out}) \tag{30}$$

$$V_{out} = V_c + R_c (I_L - I_{out}) \tag{31}$$

Avec : V_g : la tension d'entrée.

V_{out} : la tension de sortie.

V_c : la tension aux bornes du condensateur.

I_L : le courant traversant l'inductance.

I_{out} : le courant de sortie du hacheur.

R_c : la résistance interne du condensateur.

R_L : la résistance interne de l'inductance.

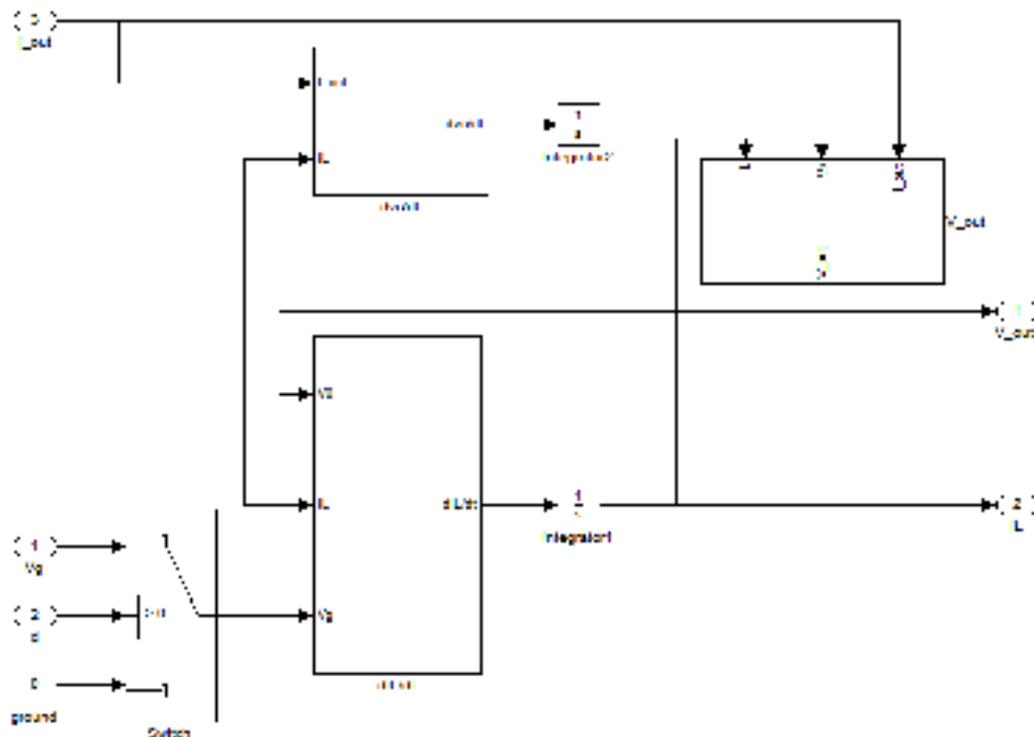


Figure III.3 : Modèle simulink du hacheur_série.

III.2.1.4 Contrôleur_MPPT

Ce bloc dont la modélisation est représenté en Figure (III.4), contient un algorithme de contrôle pour trouver la tension de la puissance maximale V_{mpp} du panneau PV. Dans ce mémoire le système est simulé en utilisant l’algorithme perturbe et observe exposée au chapitre précédent représentés sur la Figure (II.13).

Le bloc PWM, apparaissant dans le modèle du contrôleur, génère un signal carré. Ce signal est nécessaire a la commande du hacheur série. Le fonctionnement de ce signal réside dans le fait que le rapport cyclique varie.

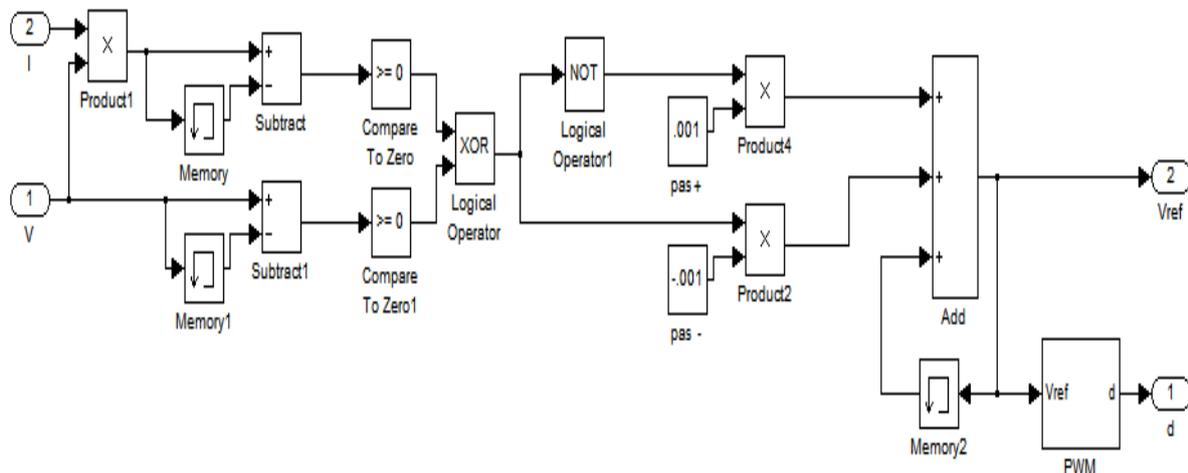


Figure III.4 : Modèle simulink de contrôleur_MPPT perturbe et observe.

III.2.1.5 Batterie

Pour charger une batterie à partir d’un panneau PV il faut toute une chaine de contrôle de la charge, pour que cette batterie se recharge rapidement, et sans risque. Comme on ne s’intéresse qu’au contrôleur MPPT et pas au niveau de charge de la batterie, on va la représenter par une simple résistance de charge. L’équation de bloc batterie sera comme suite :

$$I_{bat} = \frac{V_{bat}}{R} \tag{32}$$

Avec :

I_{bat} : le courant à travers la batterie.

V_{bat} : la tension appliquée pour charger la batterie.

R : la résistance de la batterie.

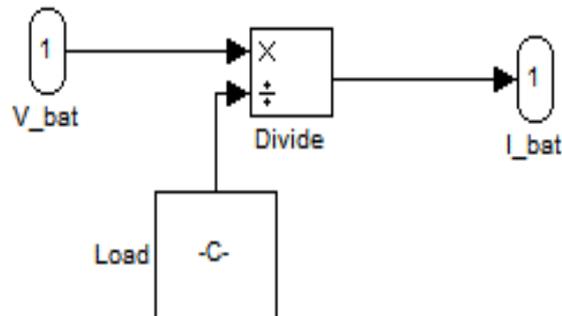


Figure III.5 : Modèle simulink de la charge de batterie.

III.2.2 Simulation de la technique perturbée et observée

III.2.2.1 Simulation du système avec les conditions standards

La simulation du système représenté sur la Figure (III.1), sous conditions standards de l'insolation et de la température (1000 W/m² et 25°C) nous a permis de tracer les graphes de la puissance en fonction de la tension sur la figure (III.7), et la puissance en fonction du temps sur la figure (III.8), les Conditions météorologiques standards en fonctions de temps sont exposés sur la Figure (III.6).

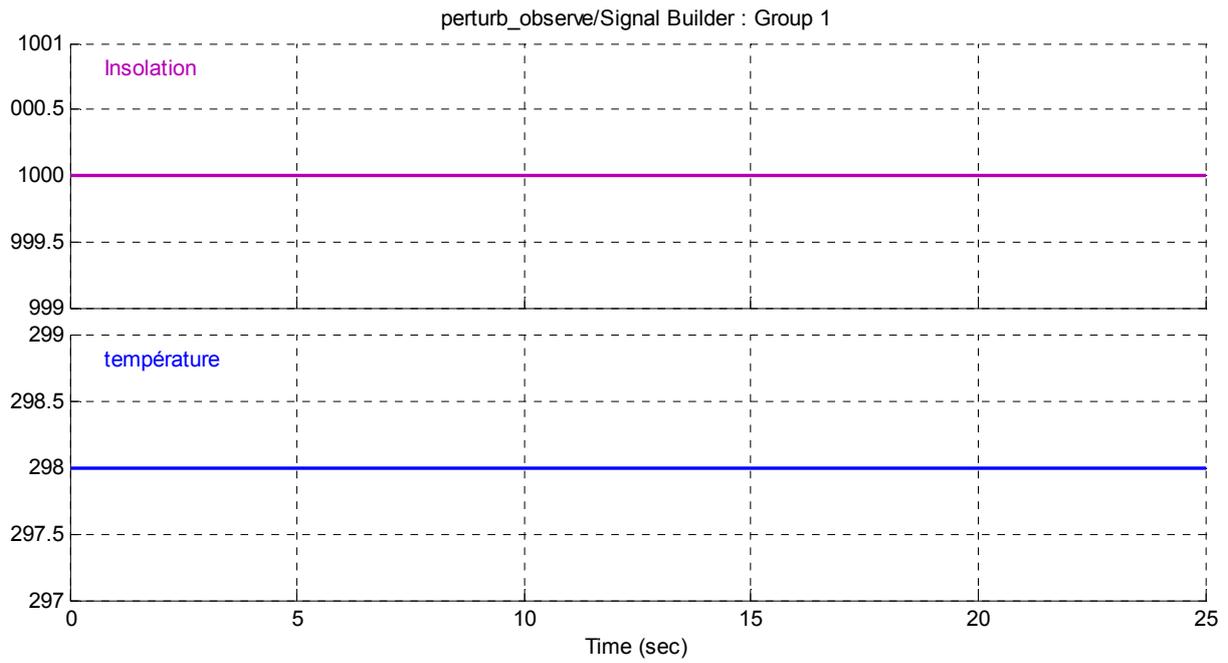


Figure III.6 : Conditions météorologiques standards.

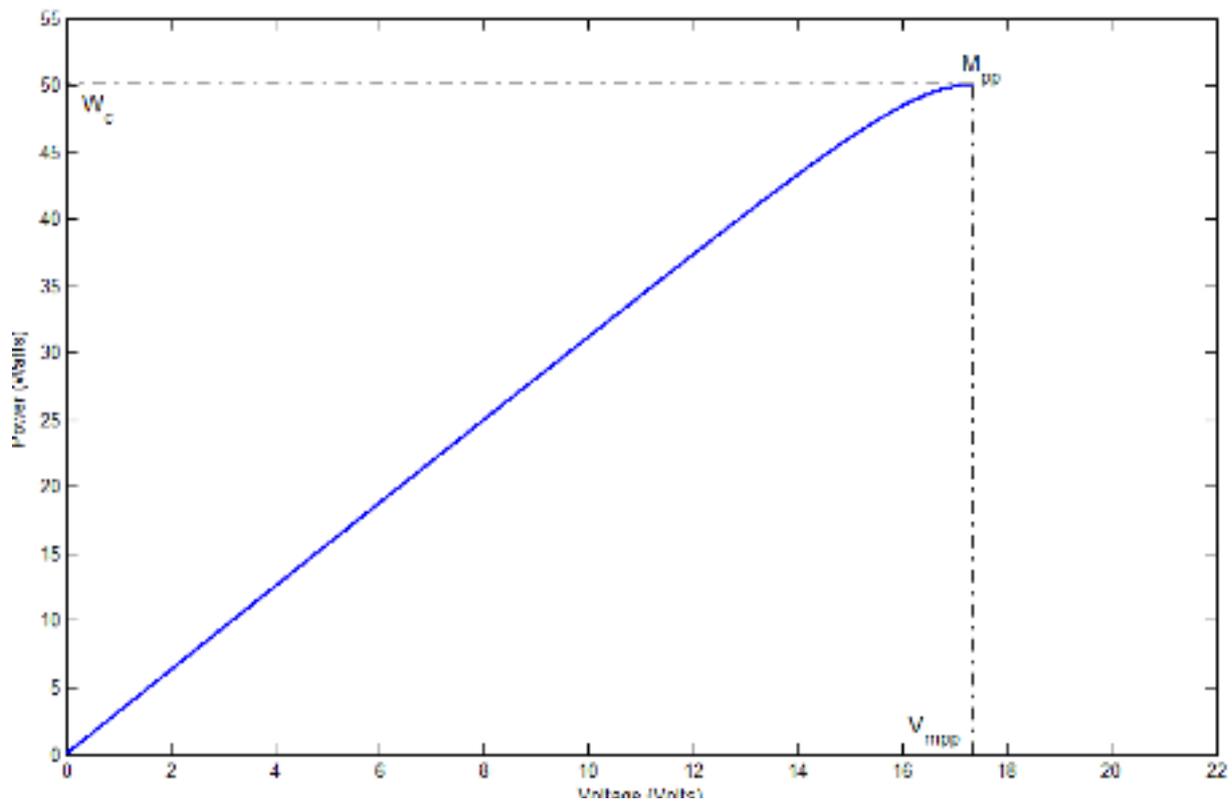


Figure III.7 : Le suivi de M_{pp} sous les conditions météorologiques standards 'P&O'.

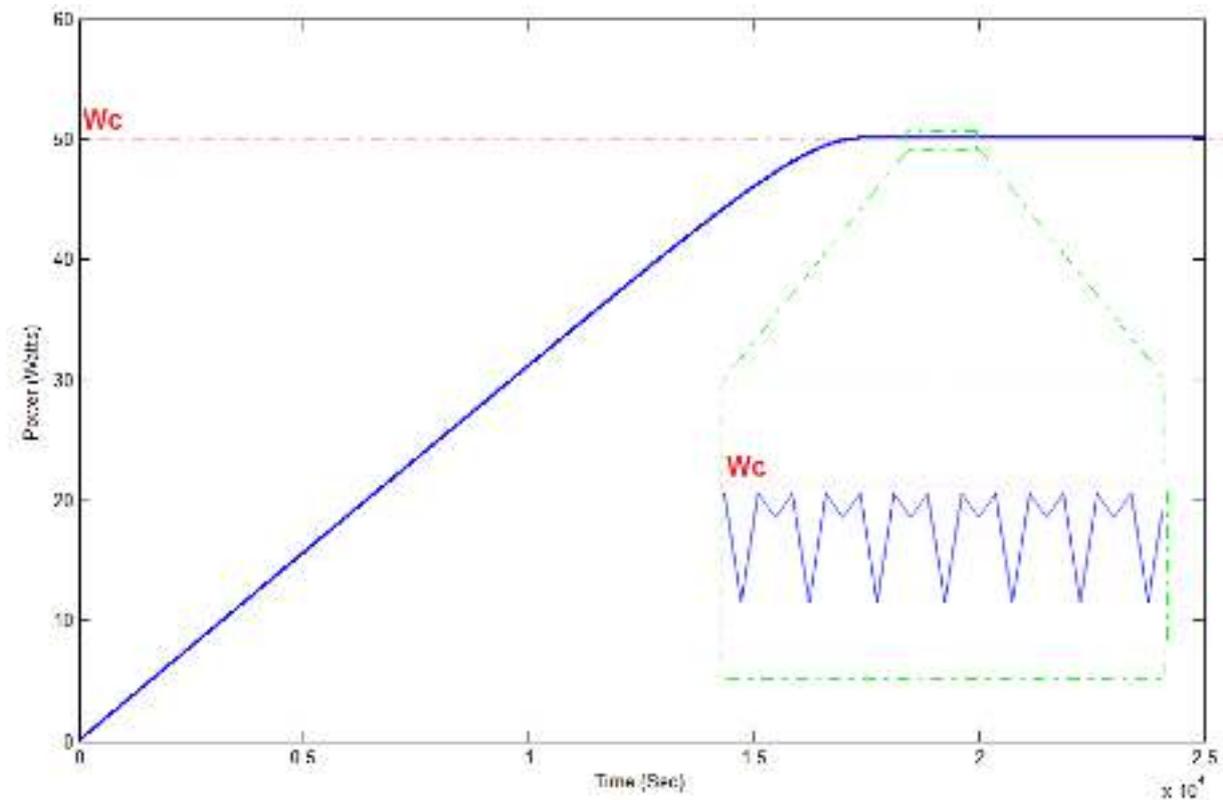


Figure III.8 : La puissance du panneau sous les conditions standards 'P&O'.

Dans la Figure (III.7), la puissance augmente avec la tension ce qui nous permet de dire que le point M_{pp} n'est pas encore atteint, mais une fois la tension arrive à la valeur 17.36 V (V_{mpp} de notre panneau) le processus de suivi de M_{pp} oscille autour de cette tension.

La Figure (III.8) montre le suivi de la puissance avec le temps de simulation.

le système atteint au M_{pp} autour du quel il oscille, ce dernier est relié directement au pas de perturbation et a la tension V_{mpp} : dans notre système par exemple le pas utilisé est 0.001V et le V_{mpp} est 17.36V.

Un autre résultat peut être tiré de la Figure (III.8) et qui est :

La technique P&O n'atteint pas le véritable M_{pp} sauf si le V_{mpp} est un multiple du pas de perturbation, ce qui nous permet d'écrire l'équation :

$$V_{mpp} = n \times \text{pas} \quad (33)$$

III.2.2 Simulation du système sous conditions variables de température

On va maintenant varier le signal représentant la température pour étudier l'influence de cette dernière sur le système, comme indiqué en Figure (III.9).

La température est au début standard ($25^{\circ}\text{C} = 298^{\circ}\text{K}$) pour que le processus atteigne son Mpp. ensuite elle décroît légèrement jusqu'à 0°C , puis une variation brusque entre en jeu à partir de la 25^{ème} seconde entraînant une variation linéaire jusqu'à 50°C .

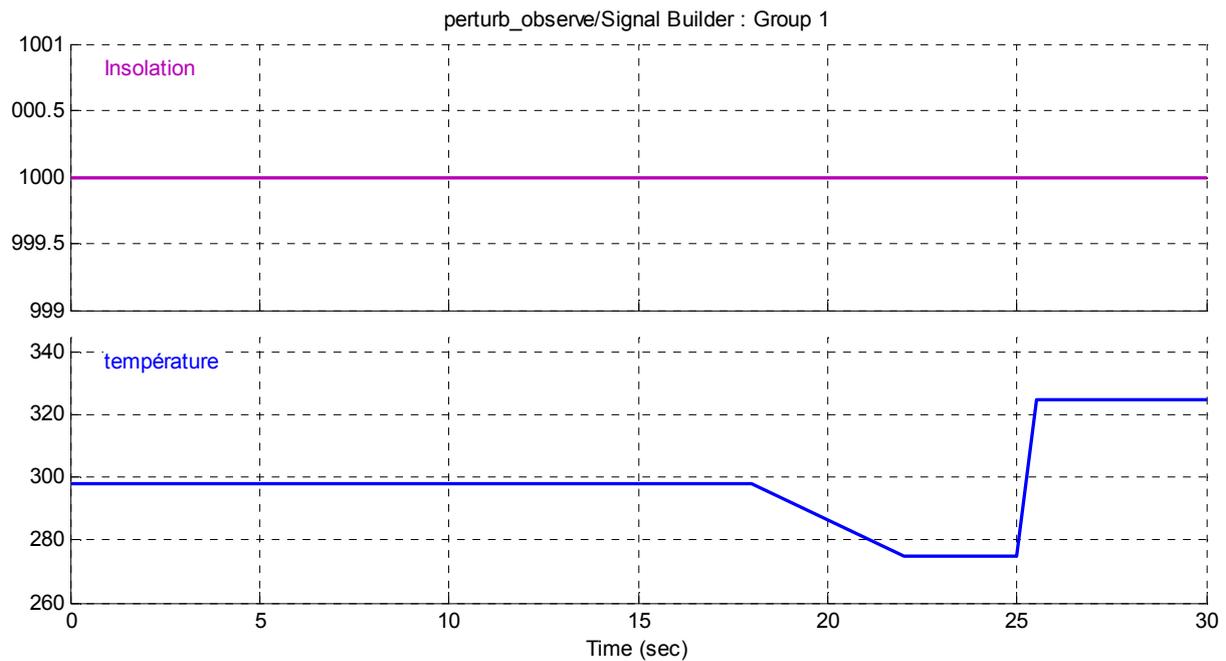


Figure III.9 : Conditions météorologiques avec une température variable.

La Figure(III.10) représente le comportement de contrôleur qui suit Mpp :

En premier temps on cherche le Mpp1 correspondant à la température 25°C .

après le changement de la température le contrôleur oscille pour trouver le point Mpp2 avant de se stabiliser autour, (environ 22 Sec). Il se stabilise pendant un moment de trois secondes.

Ensuite il chute à cause de la variation brusque de la température pour retrouver le Mpp3 dans la 29^{ème} seconde.

Un travail graphique à partir des données de la courbe en Figure (III.10), nous permet de tracer le comportement du contrôleur dans le temps. Le suivi du Mpp en fonction du temps est ainsi exposé en Figure (III.11).

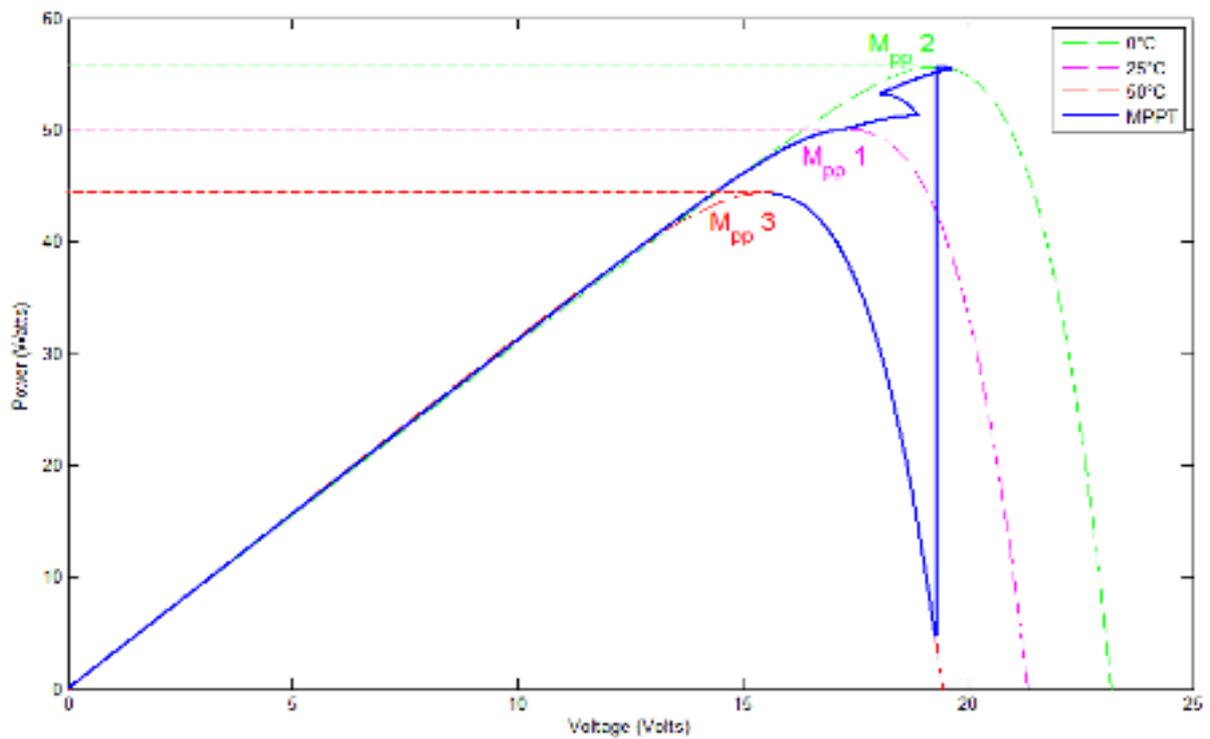


Figure III.10 : Le suivi de Mpp pendant les variations de la température ‘P&O’

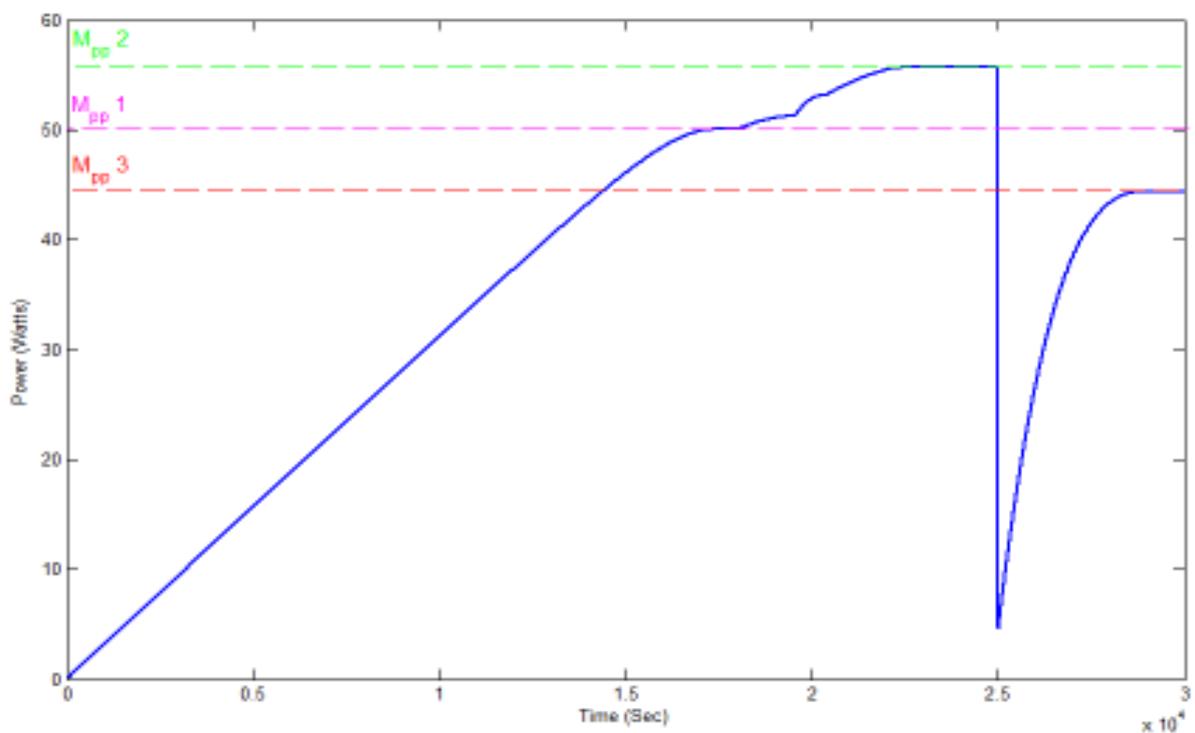


Figure III.11 : La puissance du panneau pendant les variations de la température ‘P&O’.

III.2.2. 3 Simulation du système sous conditions variables de l'insolation

De même comme le changement de température, le changement d'insolation affecte aussi le rendement du système PV. Donc une étude d'un système sous différents niveaux d'insolation peut nous donner une idée sur le comportement de ce système.

La figure (III.12) suivante montre les conditions qu'on propose pour tester le système, en commençant par une insolation idéale de 1000 W/m², le niveau d'insolation augmente pendant la période 18sec et 23sec et atteint le niveau 1200 W/m², il sera stable pour 3 secondes avant de chuter jusqu'à 700 W/m² pour le reste du temps de simulation.

Et tout ça se fait sous une température constante de 25°C, pour que les résultats de simulation ne soient affectés que par le changement de l'insolation.

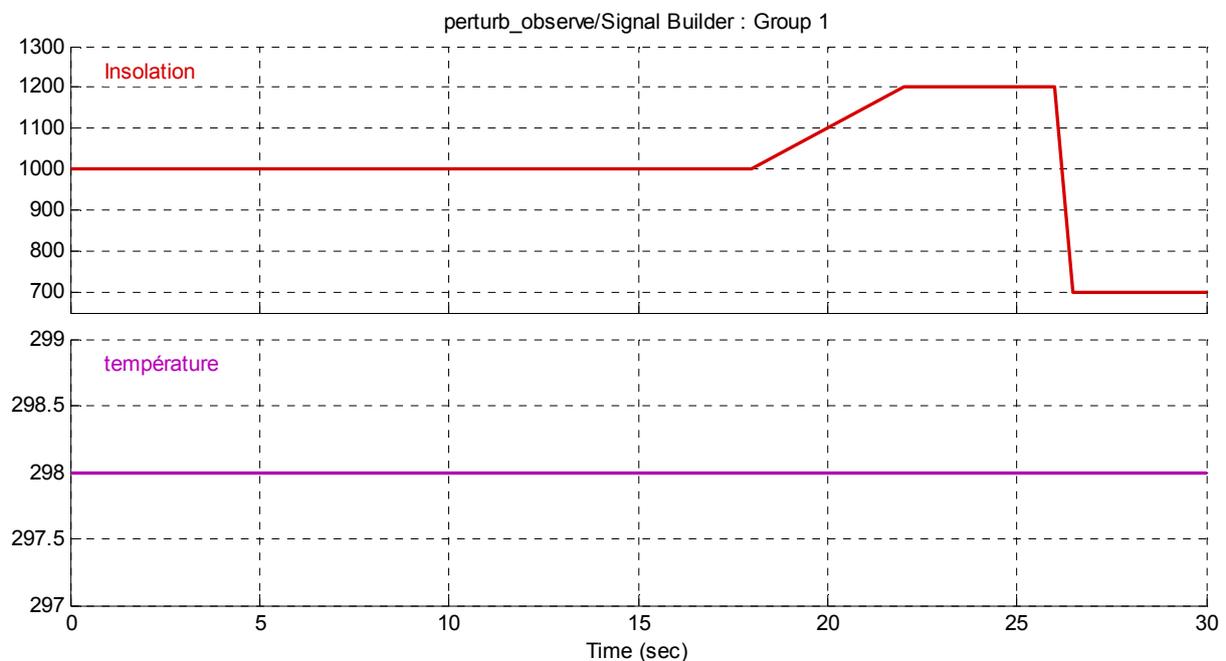


Figure III.12 : Conditions météorologiques avec une insolation variable.

De même que la variation de température, le changement de l'insolation affecte la puissance de la sortie du panneau. Les **Figures(III.13)** et **(III.14)** représentent le processus de suivi de Mpp pendant le changement de l'insolation.

Les deux expériences nous permettent de conclure :

Le temps de stabilité t_s pour la variation de l'insolation est inférieure par rapport à la variation de température.

Existence d'un pic élevé dans le cas de variation de température, par contre on a une stabilisation immédiate lorsque l'insolation varie.

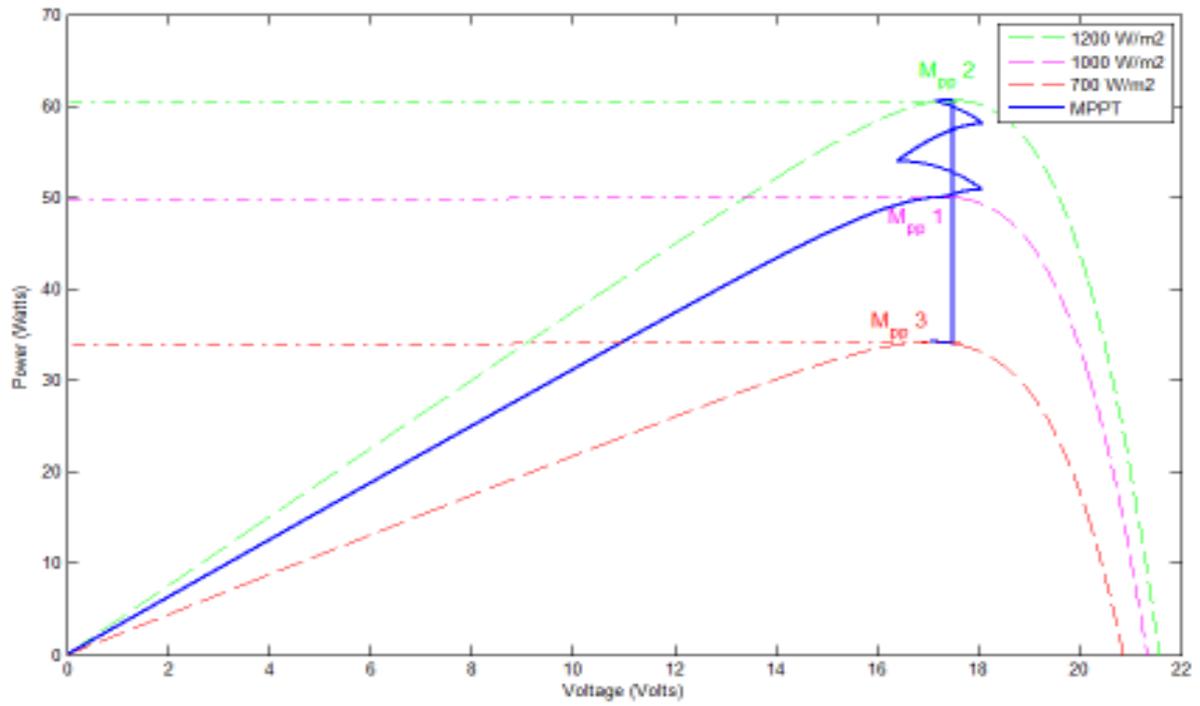


Figure III.13 : Le suivi de Mpp pendant les variations de l’insolation ‘P&O’.

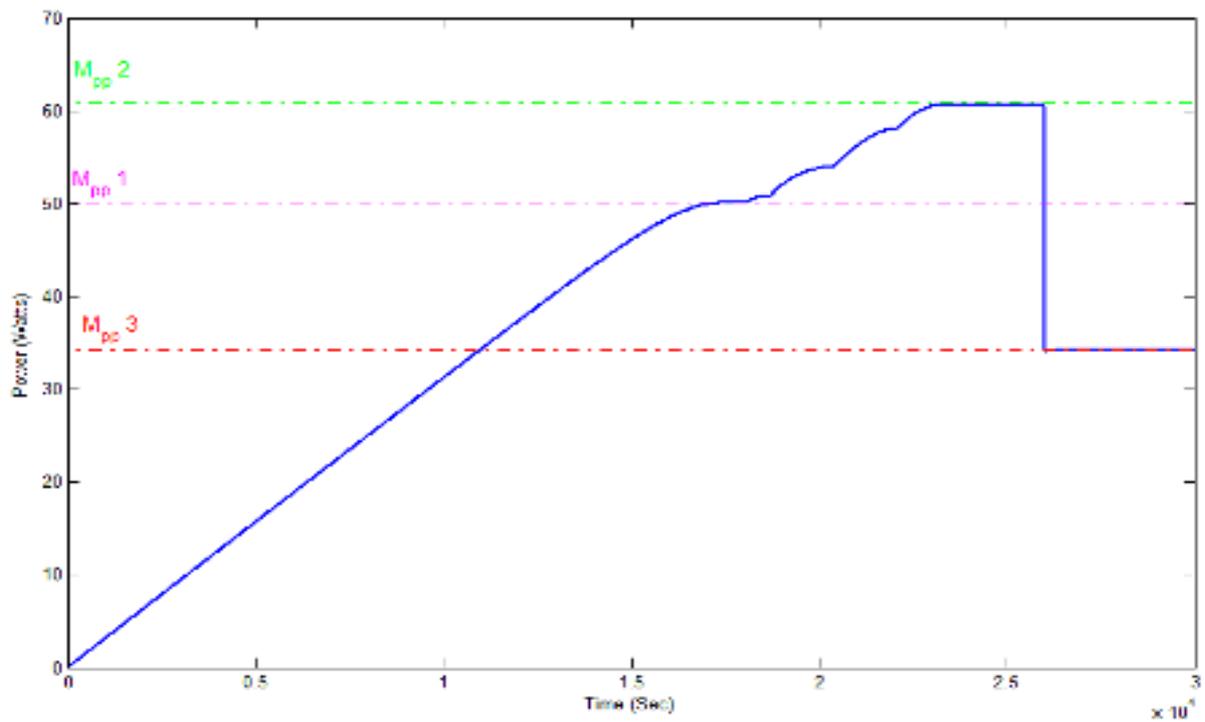


Figure III.14 : La puissance du panneau pendant les variations de l’insolation ‘P&O’

III.2.2. 4 Simulation du système sous conditions météorologiques aléatoires

Les conditions météorologiques varient de façon continue et puisque l'ensoleillement et la température de fonctionnement des systèmes PV sont raccordés fortement par le soleil et le climat à savoir nuageux, venteux, pluvieux...etc. Un changement des deux conditions simultanément est recommandé pour l'étude d'un tel système.

Les résultats de la simulation du panneau sous l'effet de ces conditions météorologique sont configurés en Figure (III.15), en Figure (III.16) et en Figure (III.17).

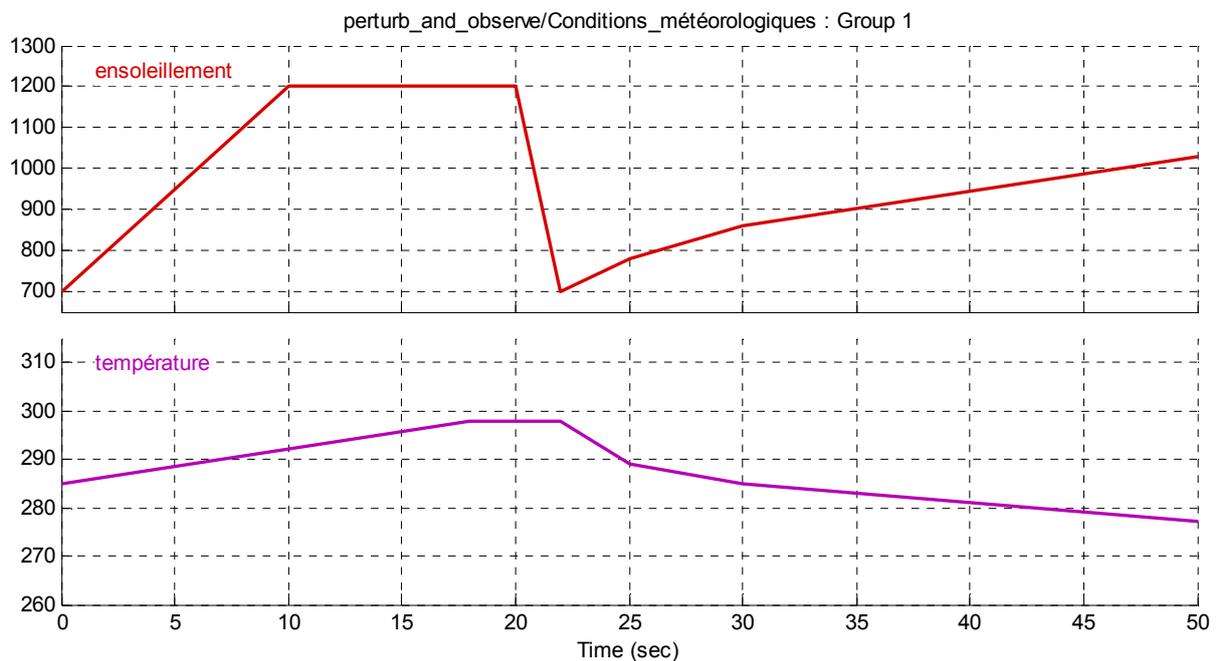


Figure III.15 : Conditions météorologiques aléatoires.

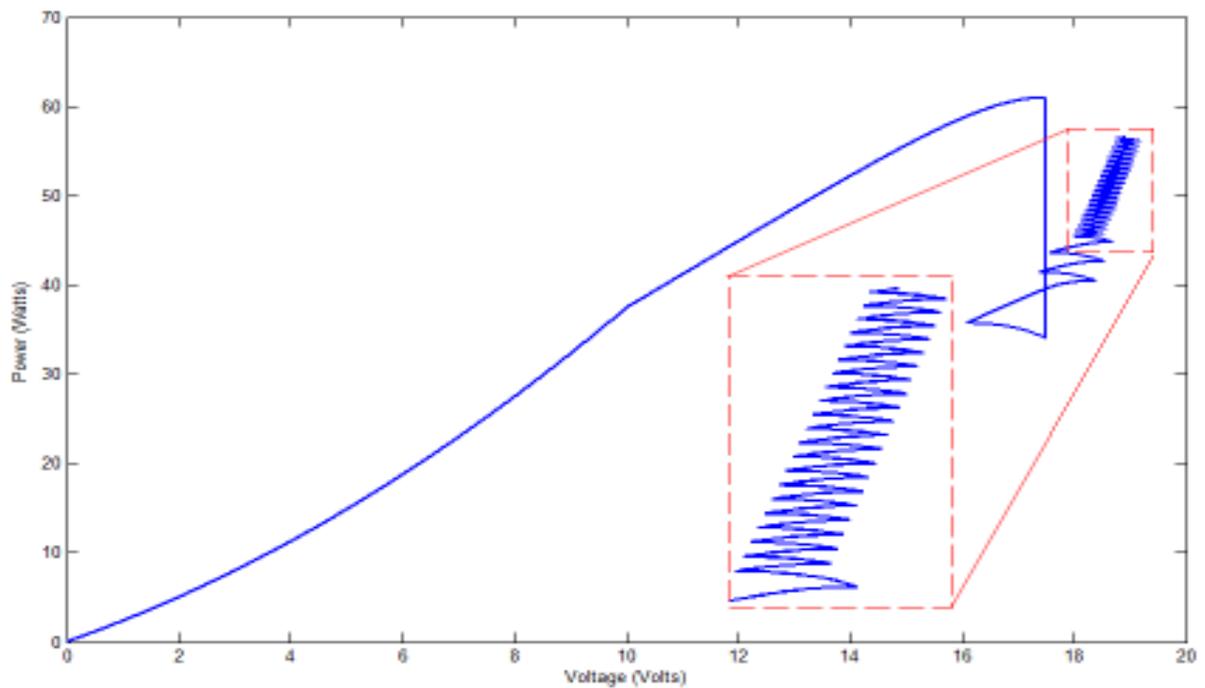


Figure III.16 : Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques aléatoires ‘P&O’

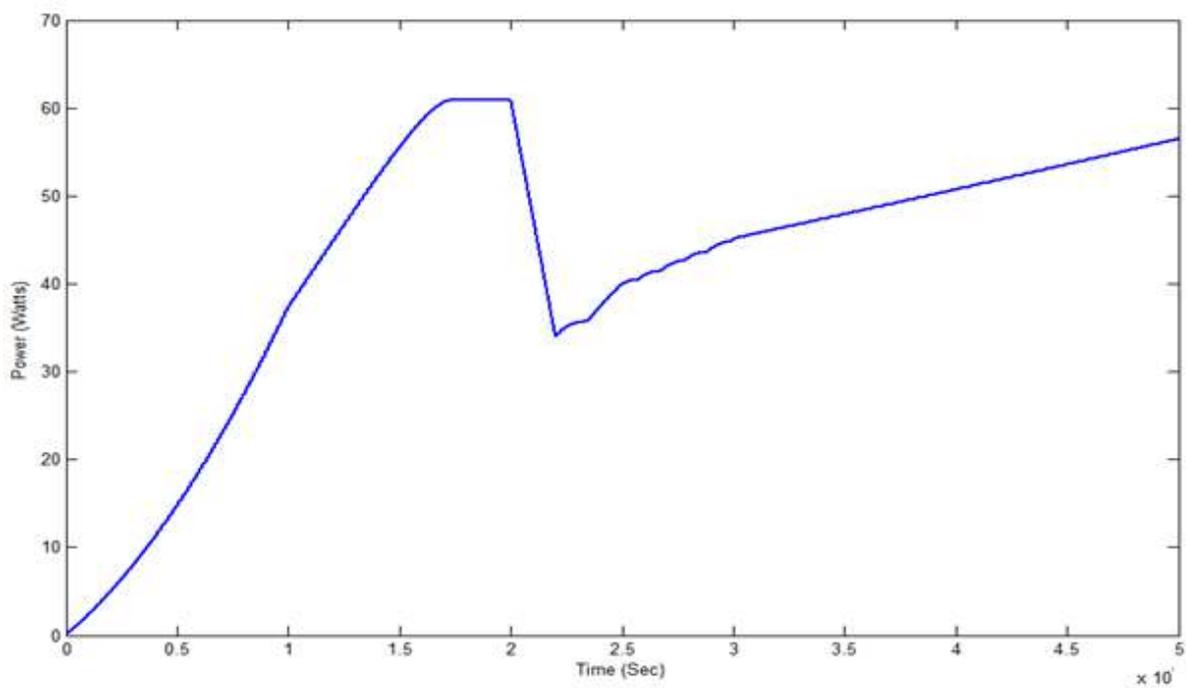


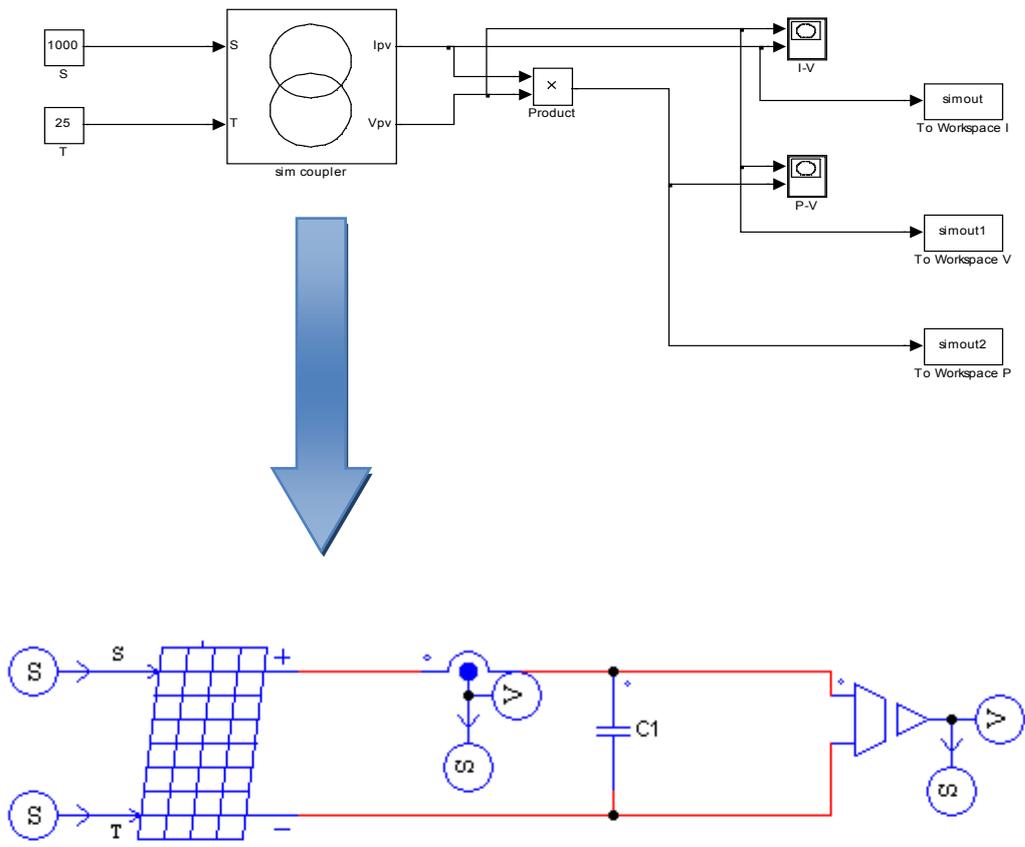
Figure III.17 : La puissance du panneau sous les conditions aléatoires ‘P&O’

Le suivi du Mpp, sous les conditions météorologiques aléatoires, en Figure (III.16) montre une variation exponentielle, entre 0 et 10s, croissant à cause de la forte augmentation de l'ensoleillement, il continue sa montée mais avec une pente décroissante car l'ensoleillement est constante mais il n'a pas encore atteint le Mpp. Entre la 18ème et la 20ème seconde il arrive à Mpp et il se stabilise sur lui pendant deux secondes Figure (III.17), avant de chuter à cause de la chute du signal de l'ensoleillement. Après la 22ème seconde la puissance augmente avec l'ensoleillement ou le contrôleur oscille de manière à augmenter la tension avec la diminution de la température.

III.3 Simulation avec logicielPsim

III.3.1.1 Simulation de panneauPV

La simulation de panneau (SM50) avec couplage de psim et matlab, par la fonction sim couplé est représentée par la Figure (III.18)



Panneau Pv SM50

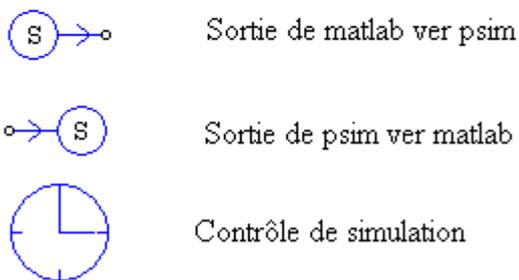


Figure III.18 : Modèle simulink couple avec psim du panneau photovoltaïque.

Le couplage des résultats de simulation de $I(v)$ et de $P(v)$, déjà exposés en Figure (I.9), (I.10), (I.11) et (I.12), entraînent des résultats identiques sous Psim. La Figure (III.19) expose iniquement les résultats pour les conditions standards.

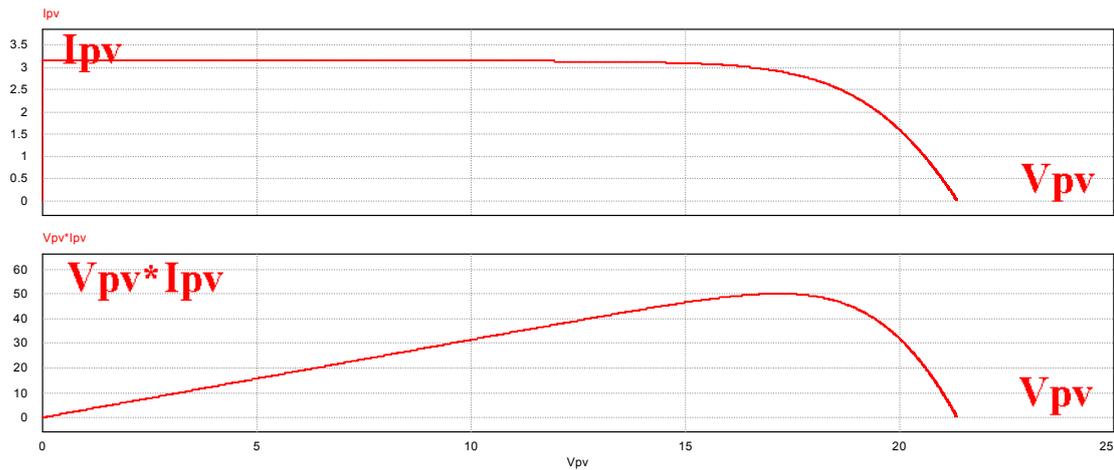


Figure III.19 : caractéristique I(v), p(v) sous les conditions standards

Remarque : On peu simuler le panneau sous Psim sans coupler avec matlab

III.3.1.2 Simulation de hacheur_série (buck)

Le circuit de simulation du hacheur-série ainsi que de signal PWM sont représentés sur la Figure (III.20).

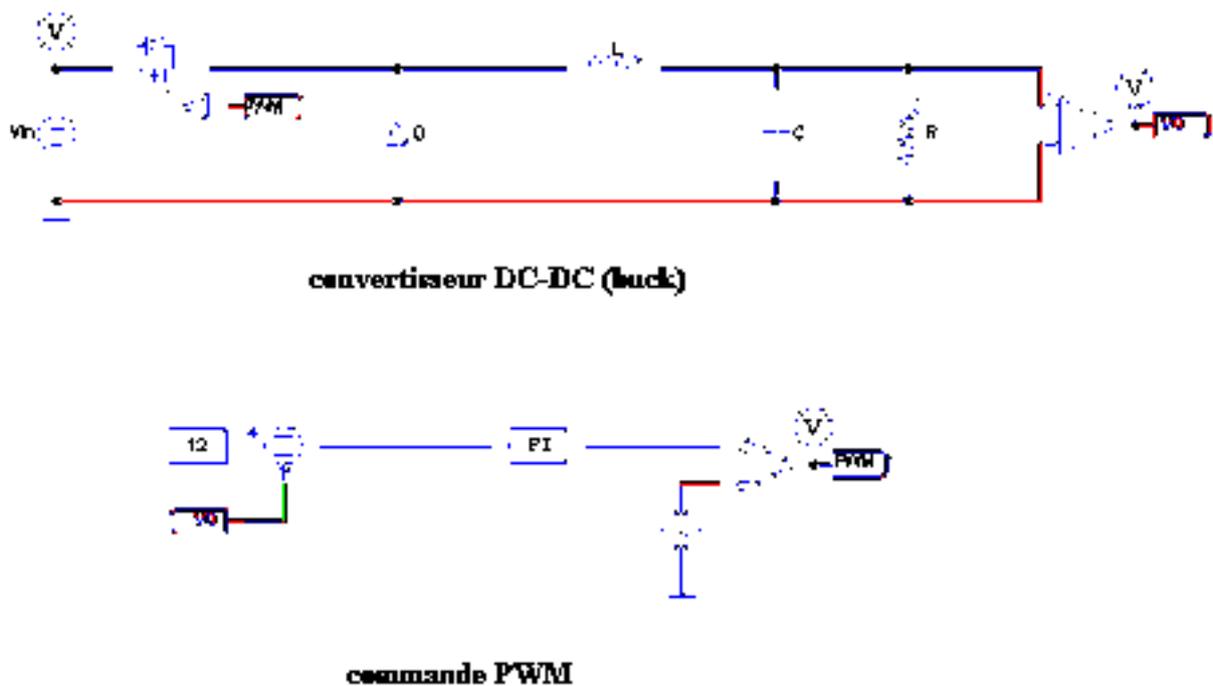


Figure III.20 : Modèle psim du hacheur_série (buck)

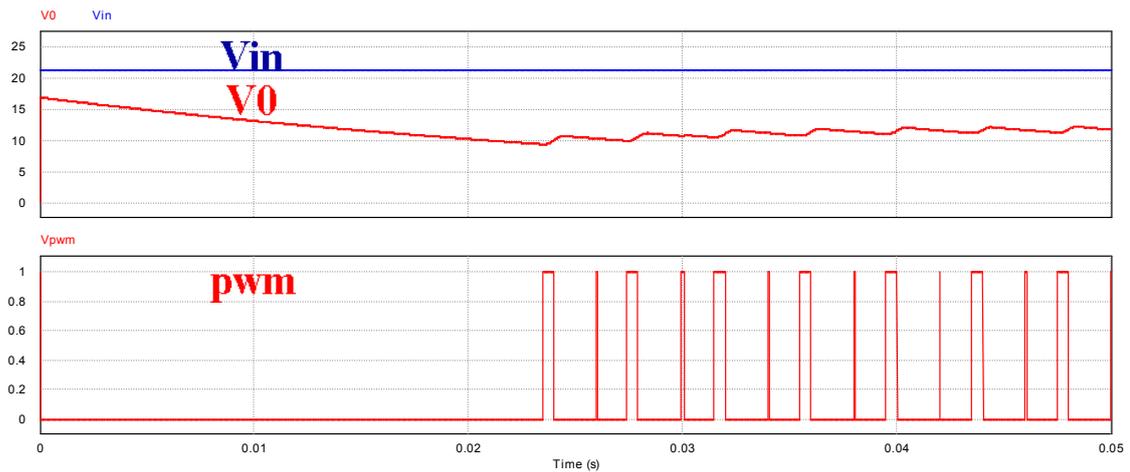


Figure III.21 : tension de sortie du hacheur_série (buck)

La Figure (III.21) montre que le hacheur_série (buck), abaisse la tension de panneau v_{in} (ou v_{pv}) = 21.35v a la tension de batterie v_0 = 12v, sous l'effet de la commande PWM a rapport cyclique variable.

III.3. 1.3Simulation de panneau PV avec l' hacheur_série (buck)

Le panneau PV avec le hacheur-série est représenté en Figure (III.22)

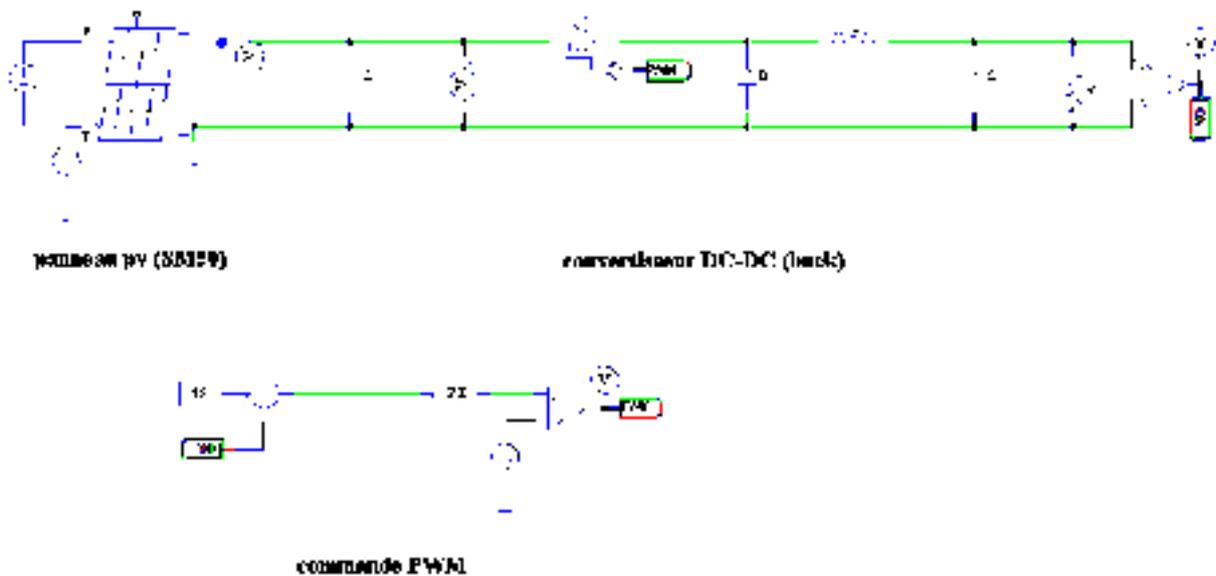


Figure III.22 : Modèle Psim du de panneau PV avec l' hacheur_série(buck)

La Figure (III.23), représente correctement le rôle du hacheur. L'abaissement de la tension panneau (V_{pv}) apparaît clairement, jusqu'à la valeur de tension batterie (V_0).

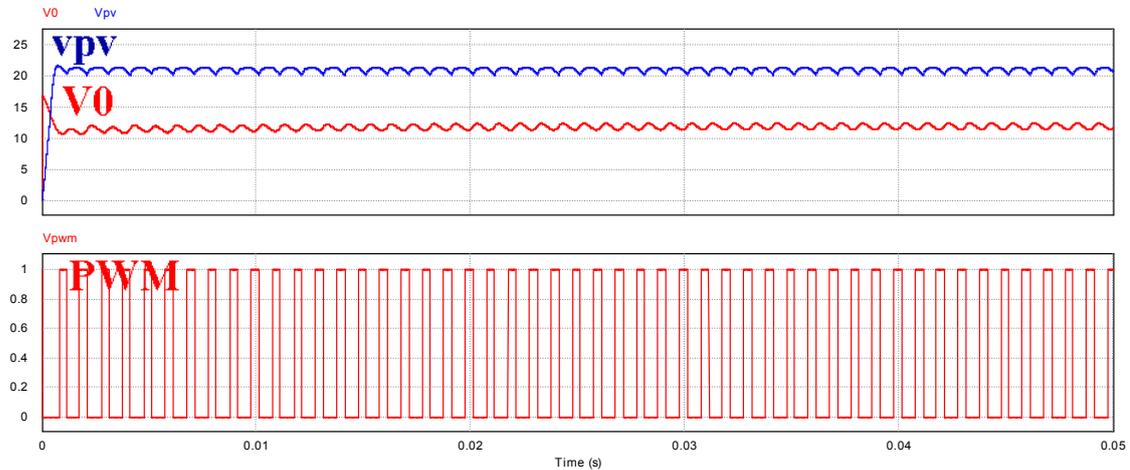


Figure III.23 : tension de sortie du panneau avec l'hacheur_série (buck)

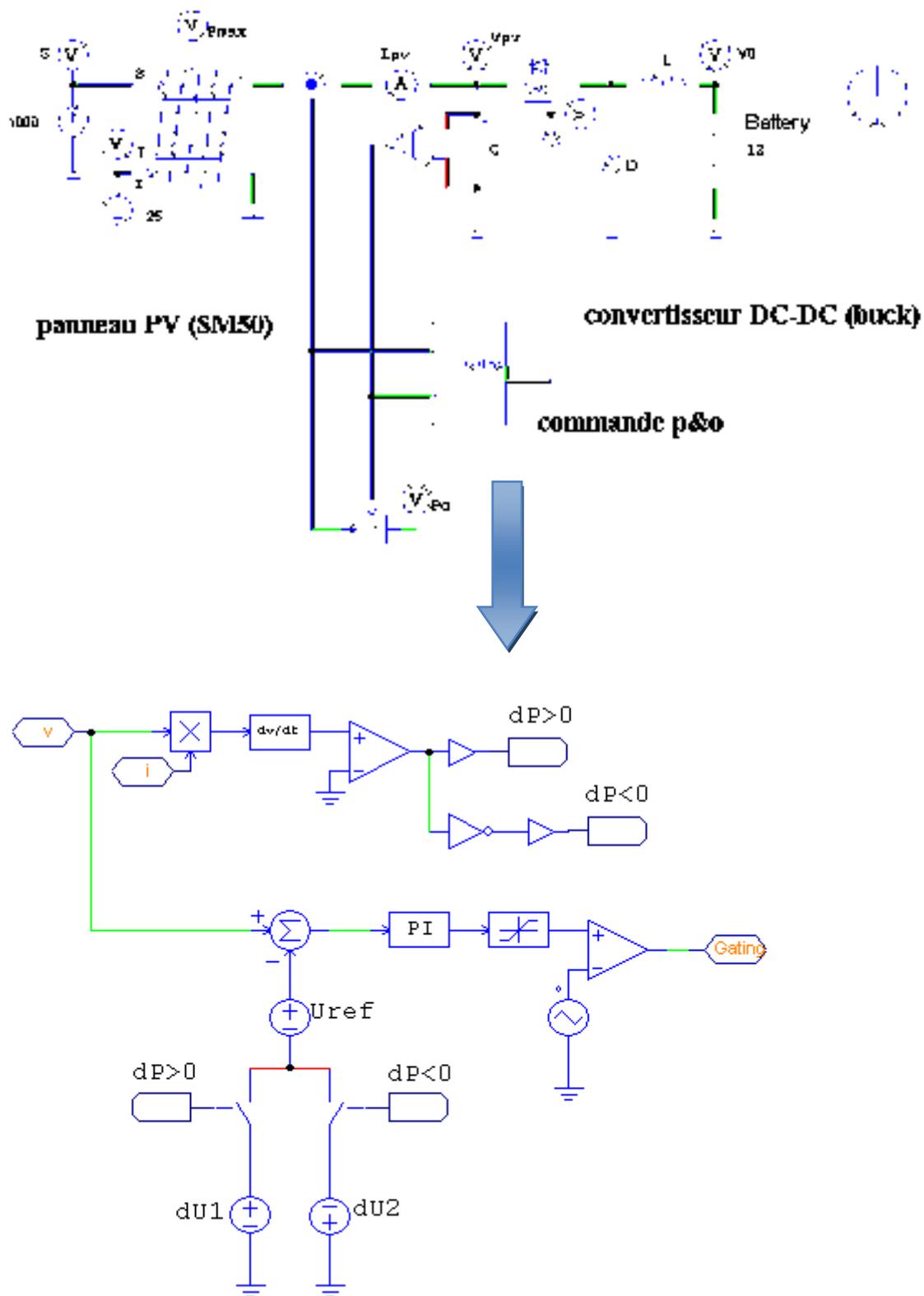
III.3.2 Simulation de la technique perturbe et observe

III.3.2.1 Conditions_météorologiques

Les deux signaux d'entrée du système nommés S et T représentant les changements des conditions météorologiques qui sont respectivement l'éclairement solaire et la température.

III.3.2.2 Simulation du système avec les conditions standards

La simulation du système représenté dans la Figure (III.24) sous conditions standards de l'insolation et la température (1000 W/m^2 et 25°C), entraînent les résultats exposés en Figure(III.25) et Figure (III.26).



FigureIII.24 : Le système photovoltaïque sous l'environnement Psim.

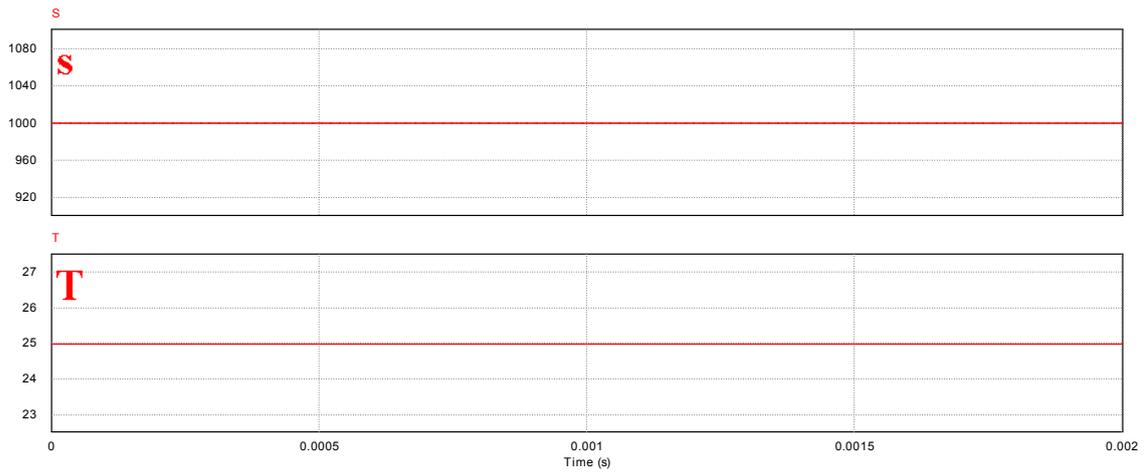


Figure III.25 : Conditions météorologiques standards

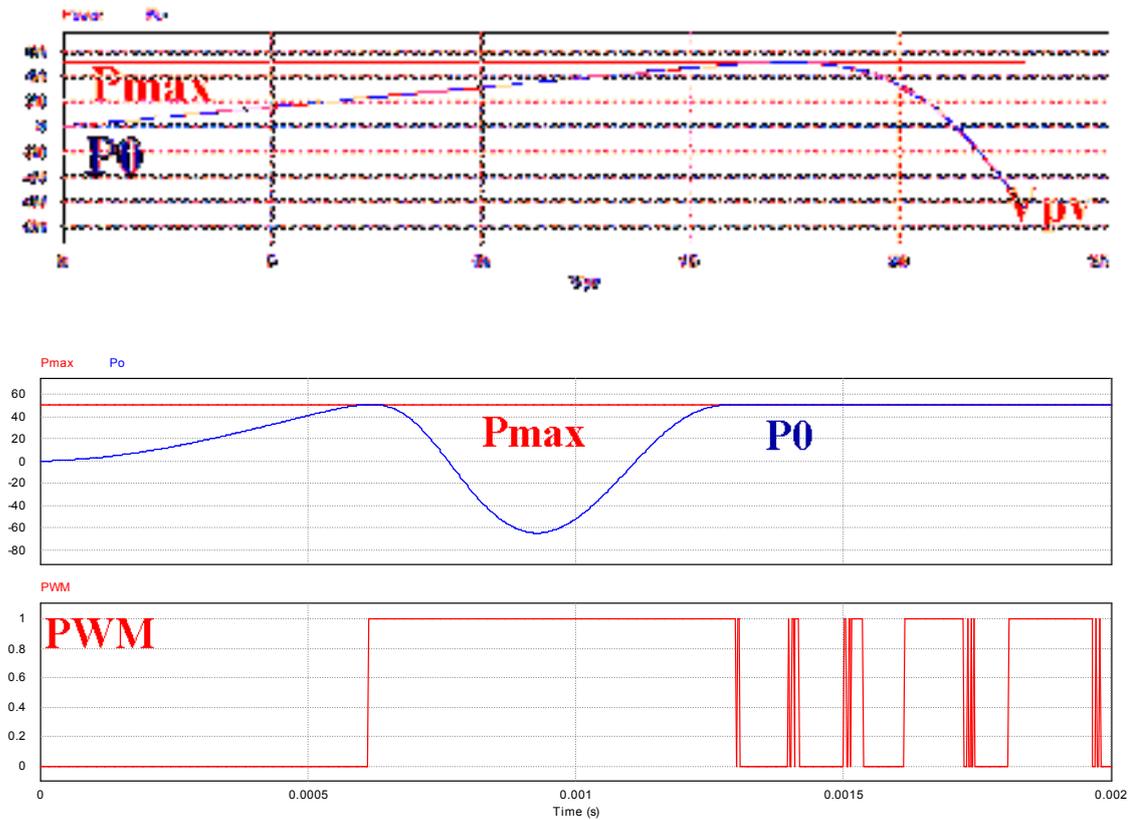


Figure III.26 : La puissance du panneau sous les conditions standards 'P&O'

La figure(III.26) représente respectivement la caractéristique (P-V) et le rapport cyclique dans le cas d'un fonctionnement dans des conditions atmosphériques standard.

On constate que la puissance oscille autour de la valeur 50W, cette valeur représente le M_{pp} du panneau solaire pour les conditions standards Figure(III.25) ce qui montre le bon fonctionnement de notre contrôleur.

III.3.2. 3Simulation du système sous conditions variables de l'insolation

Le graphe de l'éclairement dans la Figure (III.27), représente une mesure réelle de l'éclairement donné par le centre de recherche (UDES). On utilise une échelle temporelle de 2.4 seconde, pour 24 heures.

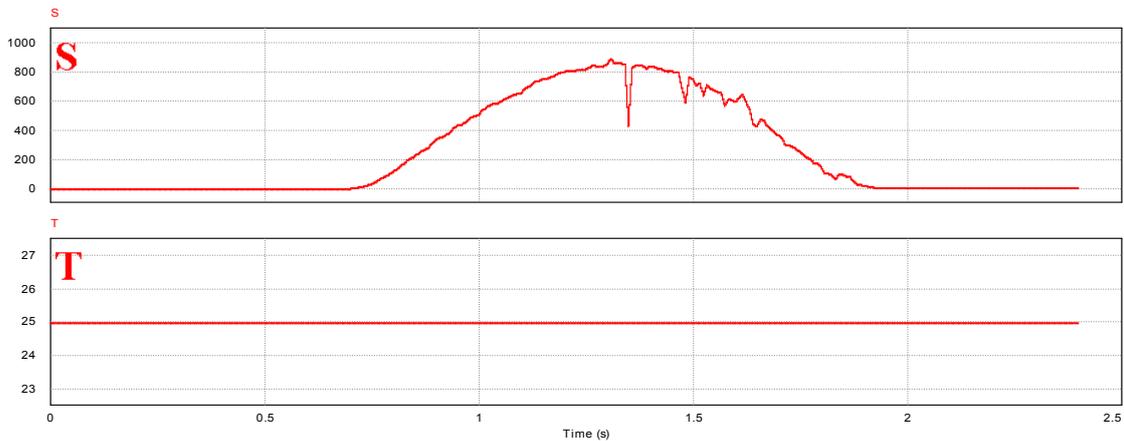


Figure III.27 : Conditions météorologiques avec une insolation variable

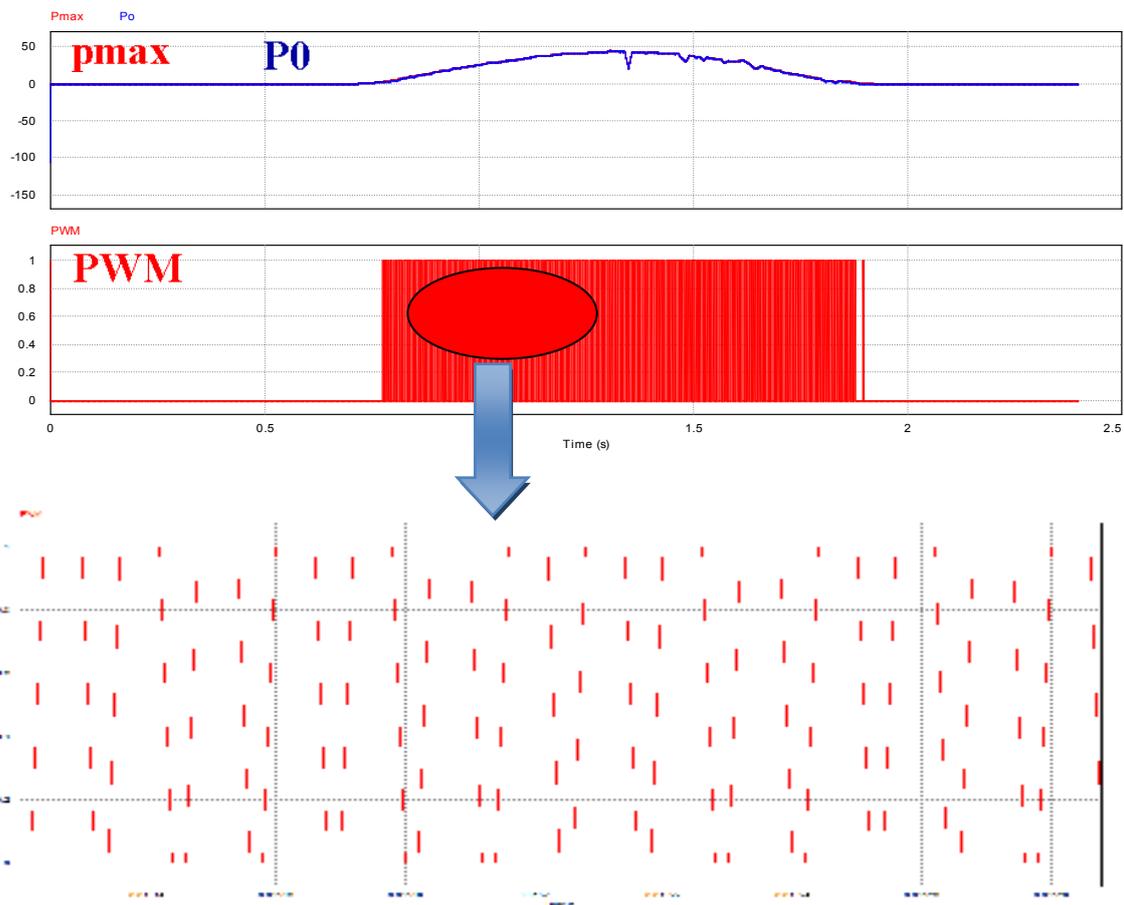


Figure III.28 : Le suivi de Mpp pendant les variations de l'insolation 'P&O'

Le changement de l'insolation affecte la puissance de la sortie du panneau. La figure (III.28) représente le processus de suivi de M_{pp} pendant le changement de l'insolation.

On constate que la puissance du générateur photovoltaïque est proportionnelle à l'ensoleillement.

III.3.2.4 Simulation du système sous conditions variables de température

La variation de température pendant 24 heures. Avec une insolation constante soit représentés sur la Figure (III.29) : 1heure correspond a 0.001 seconde.

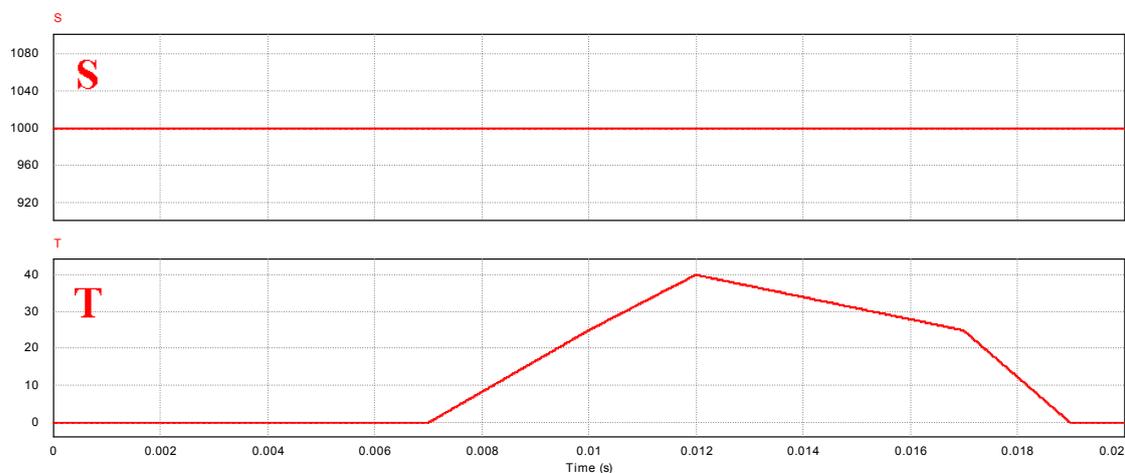


Figure III.29 : Conditions météorologiques avec une température variable

La Figure (III.30) représente le comportement de contrôleur qui suit le Mpp, pendant la variation de température.

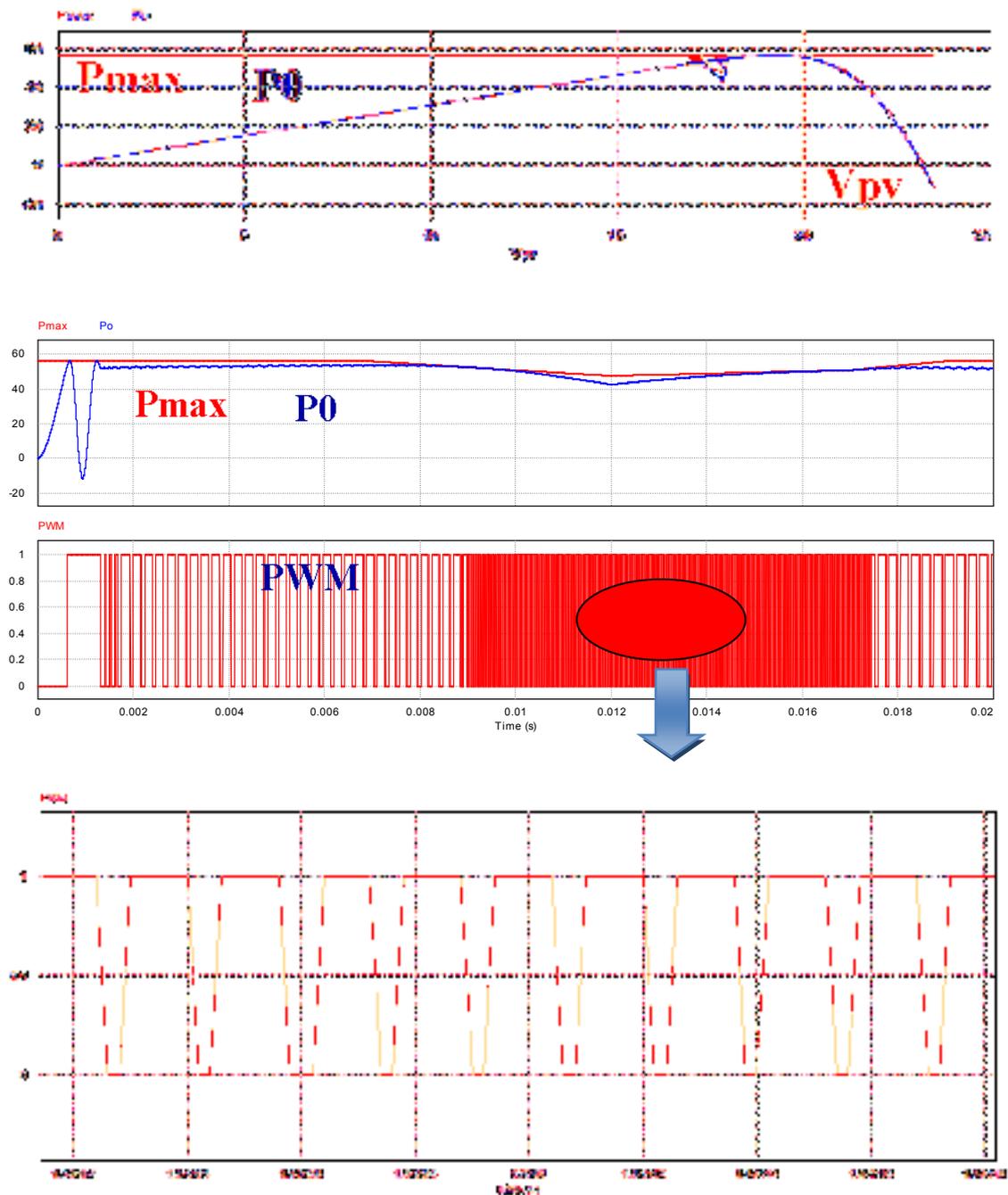


Figure III.30 : Le suivi de Mpp pendant les variations de la température 'P&O'

III.3.2.5 Simulation du système sous conditions météorologiques aléatoires

La Figure (III.31) représente une variation météorologique aléatoire pendant 24 heures, 2.4secondesreprésentent aux 24 heures.

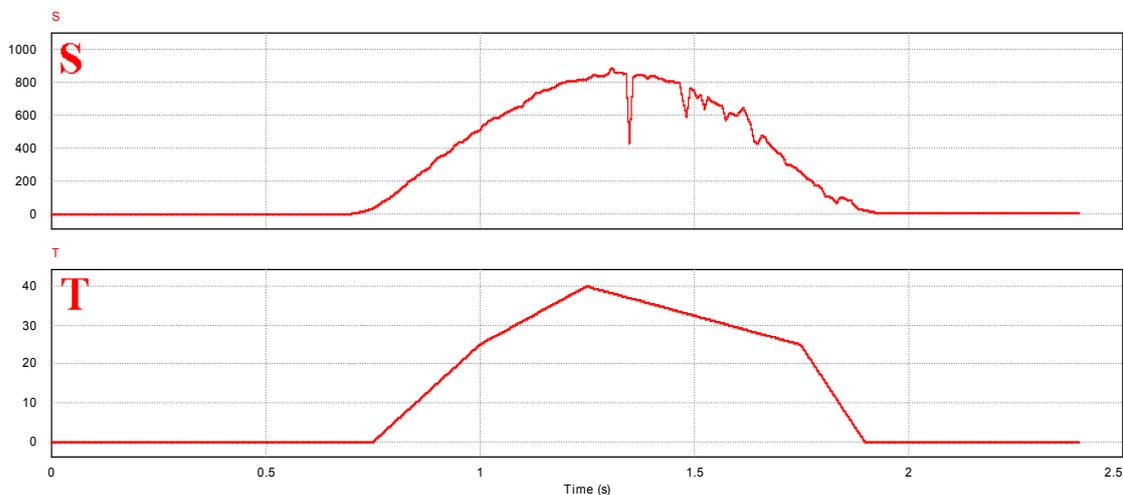


Figure III. 31 : Conditions météorologiques aléatoires

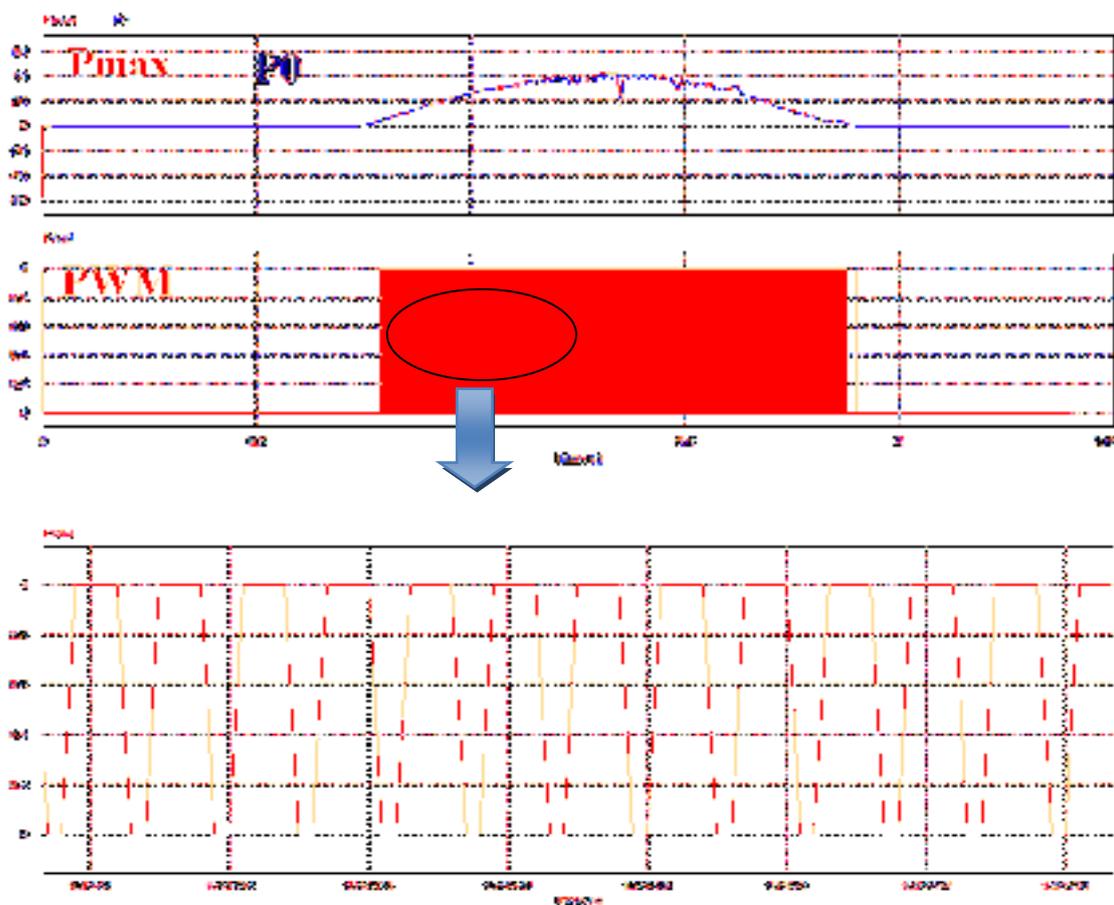


Figure III.32 : Le suivi de Mpp sous les conditions météorologiques aléatoires 'P&O'.

Le rapport cyclique est nul pendant la nuit, lorsque il y a une augmentation de l'insolation pendant la journée la commande p&o commence à suivre la puissance maximale du panneau, cette commande induit un rapport cyclique représenté en Figure (III.32).

III.4 conclusion

Les résultats typiques de simulation, dans l'environnement PSIM et Matlab Simulink de la sortie du panneau et de la sortie du hacheur série contrôlé par la commande P&O, sous différentes conditions météorologiques, montrent que :

-les deux logiciels donnent des résultats identiques sauf que le temps d'exécution de simulation sous PSIM est rapide par rapport au temps d'exécution de simulation sous Simulink de Matlab.

- On constate que la puissance oscille autour de PPM du panneau solaire pour les conditions standards.

-Lorsque le système est sous les conditions variables de l'insolation, on constate que la puissance du générateur photovoltaïque est proportionnelle à l'ensoleillement.

La l'augmentation de la température produit une diminution de la puissance, la diminution de la température produit une augmentation de la puissance.

-l'algorithme P&O de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été conçu puis simulé. Il présente un suivi de PPM, assez correct. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (ombres).

Chapitre III :
Simulation de technique
Directe p&o

Conclusion générale

Pour effectuer ce travail, nous sommes passés par une étude théorique des composants de la chaîne photovoltaïque.

Dans la seconde étape nous avons montré tout d'abord l'importance d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, ce type de connexion est indisponible pour augmenter le rendement et minimiser les pertes de transfère d'énergie.

Dans la troisième étape qui a pour objectif le test des performances des méthodes de la recherche du point de puissance maximale MPPT proposées, nous avons utilisé Simulink de Matlab, et Psim qui nous a permis de simuler les méthodes 'P & O'. Ce techniques ont été testées à l'état stable et lors des changements des conditions météorologiques (ensoleillement, température).

La technique 'P & O' et utilisées dans les systèmes photovoltaïques maximise la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre.

Nous avons montré aussi que dans un système photovoltaïque, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que grâce à des lois de commande spéciale qui réagit directement sur le rapport cyclique.

Finalement, Ce travail valide le régulateur MPPT comme solution pour optimiser le système photovoltaïque.