الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DR. YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique
et de l'Informatique**



Mémoire de Fin d'Études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique**

Option : Réseaux Électriques

THÈME

Commande d'un système de pompage photovoltaïque Avec Les méthodes Perturbation Et Observation (P&O) Améliorées

Proposé et dirigé par,

Mme. ABBADI AMEL

Mme. HAMIDIA FATHIA

Préparé et présenté par,

Mme. BOUKHALKHEL HAYET

Melle. MOHRI OUMAIMA

Année Universitaire 2016-2017

Remerciement

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir
Donné la force et le courage.
A la suite Nous tenons à remercier vivement ***Mme. ABBADI AMEL***
notre promotrice qui a fourni des efforts énormes, par ses
Informations ses conseils et ses encouragements.
Et notre Co promotrice ***Mme. HAMIDIA FATHIA.***
Nous tenons également à remercier messieurs ***GASMI*** *et* ***MOURSLI*** *les*
membres de jury pour l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de
siéger à notre soutenance,
Pour nous avoir fait
L'honneur de présider le jury de cette mémoire.

Nos vifs remerciements aussi
Tous deux maîtres assistants à l'université
De Médéa, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.
Et tous les professeurs de département de Génie électrique
A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante
de ce travail.
Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et de
loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire
Et à toute la promotion du génie Electrique

2017.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail
A celui qui ma toujours encouragé durant toutes mes années d'études
toi qui ma après que rien n'est impossible...a toi très cher papa.
A celle qui ma guidé dans le droit chemin Merci a ton amour et ta confiance totale… à toi ma maman.
A Mon mari que dieu me le garde et le protège.
A ma très chère sœur Siham.
A Mon chers frère :Anwar, ADel et Yazid.
Et ma belle sœur Mariem.
A toutes mes tantes et aussi mes cousine.
A Mes cheres amies amira et fatima et randa.
Et à toutes la famille Boukhalkhel et Belhdjar.
A l'étudiante de notre groupe de travail : Oumaima.
A tous ceux qui me sont chères.
A tous ceux qui m'aiment.
A tous ceux que j'aime.
Je dédie ce travail.

Hayet

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :
Mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pour voir le jour là et pour ces précieux conseils ainsi pour ses recommandation.

A mes très chérs frères : Lotfi , Mourad ,tahar ,ismail et adlen

A mes chéres nièces et chers neveux

A toute ma famille Elmohri,grand et petit sans exception.

A ma binome Hayet

A touts mes amis de la clase.

A mes amies Nabila,faiza,kawther,fatiha,samia.

Merci pour les moments grandioses passés et a venir.

Oumaima

Table des matières

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Liste des symboles

Introduction générale.....1

CHAPITRE I : Généralité

I.1. Introduction :.....2
I.2. L'énergie photovoltaïque :.....2
I.3. Historique : 2
I.4. Les semi-conducteurs : 2
I.4.1. Le silicium : 3
I.4.2. Dopage du silicium : 3
I.4.2.1 Dopage de type N : 3
I.4.2.2 Dopage de type P : 4
I.4.2.3 Jonction P-N : 5
I.5. La conversion photovoltaïque :.....6
I.6. Le rayonnement solaire :.....6
I.6.1. Le soleil : 6
I.6.2. Le spectre solaire : 7
I.6.3. Le rayonnement solaire extraterrestre : 7
I.6.3.1. Le rayonnement reçu au sol : 8
a) Les composantes du rayonnement solaire : 8
I.6.4. Gisement solaire : 9
I.6.4.1. Le gisement solaire en Algérie : 9
I.7. Conclusion : 11

CHAPITRE II : Système photovoltaïque

II.1. Introduction: 12

II.2.Générateur photovoltaïque : 12
II.2.1.Cellule photovoltaïque: 12
II.2.1.1.Principe de fonctionnement:..... 12
II.2.1.2. La caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque : 13
II.2.1.3. La modélisation électrique de la cellule photovoltaïque : 14
a) Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque:..... 14
a) Modèle réel d'une cellule photovoltaïque: 15
II.2.1.4: Les déférents types de cellule: 18
a) Première génération "cellules cristallines": 18
b) Deuxième génération " Amorphe ":..... 19
II.2.1.5. La comparaison entre les trois types des cellules :..... 20
II.2.2. Module ou panneau photovoltaïque:..... 21
II.2.2.1. La constitution d'un module photovoltaïque:..... 21
II.2.2.2. Les paramètres photovoltaïques d'un module: 22
a) Courant de court-circuit (Icc) : 23
b) tension de circuit ouvert (VCO)..... 23
c) Puissance débitée (P) 23
d) Le rendement (η)..... 24
II.2.2.3. L'association des modules photovoltaïque: 24
a) Mise en série: 24
b) Mise en parallèle:..... 25
c) Mise en hybride (série parallèle) : 26
II.2.2.4. Diode de protection des cellules PV : 26
a) Diode by-pass : 27
b) Diode anti-retour :..... 27
II.2.2.5. Influence de l'clairement et de la température :..... 27
a) Effet d'éclairement sur le module photovoltaïque: 27
b) Effet de la température sur le module photovoltaïque:..... 28
II.3. Les différents types d'utilisation de générateurs photovoltaïques : 30
II.3. 1 .Alimentations électriques faibles puissances :..... 30
II.3.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :..... 30
II.3.3. Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau : 31
II.3.3.1 Installation PV raccordée au réseau sans injection (« auto-consommation") : 32

II.3.3.2 Installation PV raccordée au réseau avec injection de l'énergie produite : 32
II.4 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque : 33
II.4.1.Avantages du photovoltaïque : 33
II.4.2. Inconvénients du photovoltaïque : 33
II.5. Conclusion :……..……34

CHAPITRE III : Le suiveur du point de puissance maximale (MPPT)

III.1 Introduction : 35
III.2 Courbes de charges : 35
III.2.1 Courbe I-V d'une charge résistive simple : 35
III.2.2 Courbe I-V d'un moteur à C.C : 37
III.2.2.1 Équation électrique :…….37
III.2.2.2 Équation électromagnétique :……...38
III.2.2.3 Équation mécanique:…….38
III.3. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge : 39
III.3.1. Le convertisseur à courant continu (DC-DC) : 39
III.3.1.1 Types des convertisseurs DC-DC :……...40
a) Convertisseur Buck (hacheur dévolteur) : 41
b) Convertisseur Boost (hacheur survolteur) : 42
c) Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur) : 44
III.3.2. Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) : 46
III.3.2.1 Principe de fonctionnement de MPPT :…….. 46
III.3.2.2Gestion de la MPPT :……... 47
III.3.3 Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max : 48
III.3.3.1 Les méthodes indirectes :……..48
a) La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur : 49
III.3.3.2 Les méthodes directes :…….49
a) La méthode incrémentation de la conductance : 49
b) La méthode Perturbe & Observe (P&O) : 51
III.4. Conclusion : 55

CHAPITRE IV : Régulateurs P&O Amélioré

IV.1. Introduction :.....56
IV.2. Généralité sur la logique floue:.....56
IV.2.1. Commande par logique floue : 56
IV.2.2.Description générale d'un régulateur flou : 57
IV.2.2.1. Fuzzification : 57
IV.2.2.2. Base de règle :..... 58
IV.2.2.3. Moteur d'inférence : 58
❖ Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani) :..... 58
❖ Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen) :..... 59
❖ Méthode de Sugeno : 59
IV.2.2.*4.* Interface de défuzzification : 59
❖ Méthode du maximum :..... 59
❖ Méthode des moyennes des maximal : 59
❖ Méthode du centre de gravité : 59
❖ Méthode des hauteurs pondérées :..... 60
VI.3. L'algorithme P&O avec la logique floue :.....60
V.3.1. l'algorithme P&O modifié avec un pas variable : 61
VI.3.1.1. Régulateur flou (FLC) utilisé avec un pas variable :..... 62
VI.3.1.2.Résultat de simulation de la méthode P&O modifié : 64
IV.3.2. l'algorithme P&O simplifié avec un pas variable : 65
IV.3.2.1. le résultat de simulation de la méthode P&O simplifié : 66
IV.4. Comparaison entre les différentes méthodes cote oscillations autour des points de fonctionnement :.....68
IV.4.1. Comparaison entre P&O et P&O modifié : 68
IV.4.2. Comparaison P&O et P&O simplifie : 69
IV.4.3. Comparaison P&O modifié et P&O simplifié : 70
IV.5.Comparaison entre les systèmes de pompage commandes avec les différentes méthodes MPPT : 72
IV.6. Conclusion : 73
Conclusion Générale …...……..……74
Référence bibliographiques

LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1 : SEMI-CONDUCTEUR TYPE N 4
FIGURE I.2 : DOPAGE DE TYPE P. 5
FURE I.3 : JONCTION P-N 5
FIGURE I.4 : SPECTRE DU RAYONNEMENT SOLAIRE 7
FIGURE I. 5 : COMPOSANTS DU RAYONNEMENT SOLAIRE EXTRATERRESTRE 8
FIGURE I.6 : CARTE DU MONDE D'INFLUENCE DE LA LOCALISATION SUR LE GISEMENT SOLAIRE. 9
FIGURE I.7 : CARTE DE GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE 10
FIGURE II.1 : STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE [15] 12
FIGURE II.2 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOELECTRIQUE 13
FIGURE II. 3: CARACTERISTIQUE I-V D'UNE CELLULE PV. 14
FIGURE II.4 : MODELE IDEAL D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE. 15
FIGURE II.5 : MODELE REEL D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE. 16
FIGURE II.6:FABRICATION DE CELLULES CRISTALLINES. 18
FIGURE II.8 : LES CELLULES MONOCRISTALLINES. 19
FIGURE II.10: RUBAN METALLIQUE D'UNE CELLULE [A]. 21
FIGURE II.11: ENCAPSULATION DES CELLULES [14]. 21
FIGURE II.12: CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION ET PARAMETRE PHYSIQUE D'UNE CELLULE. 22
FIGURE II.13: CARACTERISTIQUE COURANT TENSION DE NS CELLULES EN SERIE. 24
FIGURE II.14: CARACTERISTIQUE COURANT TENSION DE *N*P CELLULES EN PARALLELE. 25
FIGURE II.15: CARACTERISTIQUE COURANT TENSION DES CELLULES EN HYBRIDE 25
FIGURE II.16 : PROTECTION PAR DIODE BY-PASS ET DIODE ANTI-RETOUR. 26
FIGURE II.17: L'INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LE FONCTIONNEMENT DU MODULE PV CARACTERISTIQUE (I-V). 27
FIGURE II.18: L'INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LE FONCTIONNEMENT DU MODULE PV CARACTERISTIQUE (P-V). 28
FIGURE II.19: L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE FONCTIONNEMENT DU MODULE PV CARACTERISTIQUE (I-V). 28
FIGURE II.20: L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE FONCTIONNEMENT DU MODULE PV CARACTERISTIQUE (P-V). 29

FIGURE II.21: ALIMENTATION ELECTRIQUE FAIBLE PUISSANCE. 29
FIGURE II.22 : INSTALLATIONS ELECTRIQUES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES 30
FIGURE II.23 : POMPAGE SOLAIRE. 30
FIGURE II.24 : SCHEMA D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME. 30
FIGURE II.25: INSTALLATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME..... 31
FIGURE II.26 : SCHEMA D'INSTALLATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDEE AU RESEAU SANS INJECTION 31
FIGURE II.27 : SCHEMA D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDE AU RESEAU AVEC INJECTION TOTALE DE L'ENERGIE PRODUITE. 32
FIGURE II.28 : INSTALLATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE RACCORDEE AU RESEAU AVEC INJECTION TOTALE DE L'ENERGIE……...…….32
FIGURE III.1 : COURBES I-V DU MODULE PV BP SX 150 POUR DIVERSES CHARGE RESISTIVES SIMULES AVEC MATLAB (1 KW/M²,25°C)..... 35
FIGURE III.2: LE POINT OPERATIONNEL EST LE POINT D'INTERSECTION DES COURBES COURANT-TENSION DE LA CHARGE ET DU PV. 36
FIGURE III.3:L'EFFICACITE DU MODULE PV AVEC UNE CHARGE RESISTIVE FIXE CONÇUE POUR DES DIFFERENTS NIVEAUX D'ENSOLEILLEMENT. 37
FIGURE III.4 : MACHINE A COURANT CONTINU CONNECTE A UN PV. 37
FIGURE III.5: CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE D'UN MOTEUR A C.C A AIMANT PERMANENT. 39
FIGURE III.6:UN CONVERTISSEUR DC-DC POUR AIDER A DEMARRER OU MAINTENIR LE MOTEUR EN MARCHE AVEC UNE BASSE LUMIERE DU SOLEIL. 40
FIGURE III.7: CONVERTISSEUR DC-DC. 40
FIGURE III.8 : CIRCUIT IDEAL D'UN CONVERTISSEUR BUCK. 41
FIGURE III. 9 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UN HACHEUR BUCK QUAND LE COMMUTATEUR EST FERME. 41
FIGURE III.10 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UN HACHEUR BUCK QUAND LE COMMUTATEUR EST OUVERT. 42
FIGURE III. 11: CIRCUIT CONVERTISSEUR BOOST. 43
FIGURE III. 12 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UN HACHEUR BOOST QUAND LE COMMUTATEUR EST FERME Tϵ[0,DTS]. 43
FIGURE III. 13 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UN HACHEUR BOOST QUAND LE COMMUTATEUR EST OUVERT T ϵ [DTS, TS]. 44
FIGURE III.14 : CIRCUIT IDEAL D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST 44
FIGURE III. 15 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UN HACHEUR BUCK-BOOST QUAND LE COMMUTATEUR EST FERME *T* ϵ [*0, DTS*]. 45

FIGURE III. 16 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UN HACHEUR BOOST QUAND LE COMMUTATEUR EST OUVERT T ϵ [DTS, TS]. 45

FIGURE III.17 : CHAINE ELEMENTAIRE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE. 47

FIGURE III.18 : RECHERCHE ET RECOUVREMENT DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE..... 48

FIGURE III.19 : TRAJECTOIRE PAR INCREMENTATION DE CONDUCTANCE. 50

FIGURE III.20: ALGORITHME D'INCREMENTATION DE LA CONDUCTANCE..... 51

FIGURE III.22 : ALGORITHME DE MPPT A BASE DE LA METHODE P&O. 53

FIGURE III.23 : LES SIMULATION DU MPPT (P&O) AVEC MOTOPOMPE A C.C *(20 A 1000W/M2, A 25C0)* 54

Figure IV.1 : SCHEM A GENERALE D'UN REGULATEAUR FLOU TYPE-1……...……57

FIGURE IV.2 : L'ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME DE P&O FLOU AVEC UN PAS VARIABLE[34]..... 61

FIGURE IV.3 : SCHEMA BLOC DE L'ALGORITHME P&O FLOU[34]. 62

FIGURE IV.4 : FONCTIONS D'APPARTENANCE DE LA 1ERE VARIABLE D'ENTREE (ΔPpv) 62

FIGURE IV.5 : FONCTIONS D'APPARTENANCE DE LA 2EME VARIABLE D'ENTREE (ΔIpv). 63

FIGURE IV.6 : FONCTIONS D'APPARTENANCE DE LA VARIABLE DE SORTIE (ΔS). . 63

FIGURE IV.7 : SIMULATION DU MPPT (P&O FLOU) AVEC LA MOTOPOMPE A C.C (20 A 1000W/M^2, A 25C^0)..... 64

FIGURE IV.8 : SCHEMA BLOC DE L'ALGORITHME P&O SIMPLIFIE[35]..... 65

FIGURE IV.9 : CARACTERISTIQUES P-V ET $dP/dV - dI$-V 65

FIGURE IV.10 : SIMULATION DU MPPT (P&O SIMPLIFIE) AVEC LA MOTOPOMPE A C.C (20 A 1000W/M^2, A 25C^0)..... 66

FIGURE IV.11. COMPARAISON ENTRE P&O ET P&O FLOU (P&O MODIFIE). 67

FIGURE IV.12. COMPARAISON P&O ET P&O FLOU SIMPLIFIE..... 68

FIGURE IV.13. COMPARAISON P&O FLOU (P&O FLOU MODIFIE) ET P&O SIMPLIFIE. 69

FIGURE IV.15. DEBITS DE LA POMPE A EAU D'UN SYSTEME PV COMMANDE PAR LA METHODE P&O FLOU POUR UNE PERIODE DE 12 HEURES SIMULE AVEC LES DONNEES D'IRRADIATION D'UNE JOURNEE ECLAIREE EN JANVIER A TINDOUF, EN ALGERIE 71

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I.1 : LE RAYONNEMENT SOLAIRE EXTRATERRESTRE 7

TABLEAU I.2 : ENSOLEILLEMENT REÇU EN ALGERIE PAR REGIONS CLIMATIQUES. 10

TABLEAU II.1 : COMPARAISON ENTRE LES TROIS TYPES DES CELLULES..... 20

TABLEAU VI.1 : LES REGLES DE BASE DE LA LOGIQUE FLOUE[34]..... 63

TABLEAU IV.2 : PRINCIPE DE LA METHODE P&O AMELIORE AVEC UNE TAILLE DE PAS VARIABLE. 65

TABLEAU IV.3: LA PUISSANCE ET LE RENDEMENT DU SYSTEME DE POMPAGE AVEC ET SANS MPPT D'UNE JOURNEE ECLAIREE EN JANVIER A TINDOUF, EN ALGERIE 70

TABLEAU IV.4: DEBITS DE LA POMPE A EAU D'UN SYSTEME PV POUR UNE PERIODE DE 12 HEURES SIMULE AVEC LES DONNEES D'IRRADIATION D'UNE JOURNEE ECLAIREE EN JANVIER A TINDOUF, EN ALGERIE..... 71

Liste des abréviations	
AM	air masse
As	l’arsenic.
C-C	courant-continu.
CC-CA	courant continu-courant alternatif.
DC-DC	convertisseurs à courant continu.
EVA	l’Acétate d’éthylène-vinil .
FF :	Facteur de forme.
GaAs	l’arséniure de gallium.
GdTe	le tellurure de cadmium.
Ge	le germanium.
GPV	générateur photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
N	Négatif.
P	Positif.
p	le phosphore.
PPM	la puissance maximale de la cellule
PV	photovoltaïque.
Sb	l’antimoine.
Se	le sélénium.
Si	silicium.

Liste des Symboles		
C	la vitesse de la lumière dans le vide.	$m \cdot S^{-1}$
D	diode.	/
dI	dérivé de courant	A
dP	dérivé de puissance	W
dV	dérivé de tension	V
E	Éclairement	W/m^2
E_g	L'énergie de la bande interdite (gap)	eV
$f(x_n)$	Le dérivé de la fonction $f(x_n)$	/
f_e	la fréquence de découpage	Hz
G	L'irradiation solaire en	W/m^2
h	est la constante de Planck.	J.S
I_0	Courant de saturation	A
I_{CC}	courant de court-circuit	A
$I_{CC\ (total)}$	la somme des courants de court-circuit de Np de GPVs.	A
I_{CCNp}	La somme des courants de court-circuit de (Np) GPVs en parallèle.	A
I_{CCNs}	courant de court-circuit de Ns GPVs en série .	A
I_D	Courant traversant la diode	A
I_{max}	le courant maximale ().	A
I_{ph}	photo-courant().	A
Ipv	courant du module PV (A).	A
K	Constante de Boltzmann (1.36*10^-23 J*K-1) ;	$J.K^{-1}$
N_p	Nombre des GPVs en parallèle.	/
Ns	nombre des GPVs en série.	/
P	Puissance débitée (W).	W

P_{max}	la puissance maximale (W).	W
Ppv	puissance du module PV (W).	W
q	Charge de l'électron (C) ;	C
R	résistance ().	Ω
R_{charge}	résistance de la charge ().	Ω
R_{max}	la résistance a qui correspondra la puissance maximale	Ω
R_s	résistance série	Ω
R_{sh}	résistance shunt	Ω
S_C	Surface de la GPV solaire	m^2
T	Température absolue	K
T_e	temps	S
T_R	Température de référence	C°
V_0	tension de sortie (V).	V
V_{CO}	Tension à circuit ouvert (V).	V
$V_{CO\ Ns}$	la somme des tensions en circuit ouvert de Ns GPVs en série.	V
V_{CONp}	Tension du circuit ouvert de (Np) GPVs en parallèle.	V
$V_{CO\ (total)}$	la somme de la tension du circuit ouvert de Ns de GPVs.	V
V_K	la tension aux bornes de la diode.	V
V_{max}	la tension maximale (V).	V
V_{MPP}	la tension de point de puissance maximale	V
Vpv	tension du module PV (V).	V
V_T	Tension thermique (V) ;	V
X_n	La présente itération.	/
X_{n+1}	L'itération suivante.	/
α	rapport cyclique.	/

β	Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.	/
$\delta(T)$	Le coefficient dépendant faiblement de la température	A/W
η	Facteur de qualité pour une diode.	/
η	Le rendement.	/
λ	longueur d'onde	μm
ω	vitesse angulaire	rad/s

مخلص : العمل المقدم في هذه الأطروحة يتعلق بالتصميم النظري لتقنية متابعة نقاط الاستطاعات العظمية(MPPT) لنظام الطاقة الضوئية(PV). وتشمل الدراسة مناقشات حول مختلف الخوارزميات MPPT..أولا النمذجة والمحاكاة للمولد الكهروضوئي والمحول تيار مستمر: تيار مستمر مع مختلف الخوارزميات MPPT. باستخدام برنامج ماتالب. ثانيا تم إجراء دراسة لنظام الطاقة الضوئية من اجل ضخ المياه باستخدام محرك تيار مستمر يتم إجراء مقارنة بين أداء هذه الأنظمة مع خوارزمية P&O التقليدية ،كلا الخوارزميات P&O flou وبدون MPPT من حيث مجموع الطاقة التي تنتجها الأنظمة الكهروضوئية وإجمالي حجم المياه التي يتم ضخها يوميا .وتشير النتائج إلى أن الخوارزميات المعدلة و المبسطة يمكن أن تحسن بشكل كبير جدا أداء نظام الضخ الكهروضوئي .

كلمات مفتاحية: مولد كهروضوئي، تحكم, MPPT المحول تيار مستمر/ تيار مستمر ، الضخ الكهروضوئي

Résumé: Ce mémoire présente une étude théorique d'un suiveur du point maximum de puissance (MPPT) pour le système photovoltaïque (PV). L'étude comprend des discussions sur différente algorithmes MPPT. En premier lieu, une modélisation et une simulation du générateur photovoltaïque et du convertisseur continu / continu avec les différente méthodes P&O MPPT est effectuée à l'aide du logiciel Matlab. En second lieu, une étude du système de pompage photovoltaïque de l'eau a été effectuée en utilisant un moteur à courant continu. Une comparaison entre les performances de ces systèmes avec P&O conventionnel, les deux algorithme P&O flou en termes d'énergie totale produite par le système photovoltaïque et le volume total de l'eau pompée par jour est effectuée. Les résultats montrent que les algorithmes P&O modifié et simplifié peut améliorer de façon très significative les performances du système PV de pompage.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Contrôle MPPT, Convertisseur DC/DC, pompage photovoltaïque

Summary: This memory presents a theoretical design of maximum power point tracking (MPPT) for photovoltaic (PV) system. The study includes discussion of various MPPT algorithms. First, the modeling and the simulation of the PV generator and the DC/DC converter is carried with different algorithms out using MATLAB software. After that, a study of PV water pumping system has been undertaken using DC motor. A comparison between the performance of those systems with algorithm P&O conventional, both of algorithm P&O fuzzy and without MPPT in terms of PV total energy produced and total volume of water pumped per day is carried out. Results show that algorithms modified and simplified can vary significantly improve the performances of PV pumping system.

Keywords: Photovoltaic generator, MPPT control, DC/DC converter, Photovoltaic pumping.

INTRODUCTION GENERALE

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.
Aujourd'hui l'énergie solaire fournit un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minerai fossile est au mieux de 30 à 35% [1].
Dans le temps présent, cette utilisation doit être encouragée par des mesures appropriées et une politique énergétique des états. Dans les pays industrialisés, les lois sur les énergies renouvelables ont permis de booster fortement le marché du photovoltaïque.
L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire [2].
Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique [3], et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global. Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes ou reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, réfrigération, climatisation, sources lumineuses, véhicules électriques, centrales photovoltaïques, utilisation militaire [4].
Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée [5]. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence [1]. Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature. Parmi ces méthodes on trouve l'algorithme de perturbation et observation (P&O). Cet algorithme est largement utilisé pour la poursuite du point de puissance maximale, cependant son utilisation entraîne une oscillation excessive autour du MPP du fait de l'utilisation d'un pas de variation grand. Si le pas est choisi petit, dans ce cas la on aura des oscillations réduites mais des dynamiques de poursuite très lentes. Pour remédier à ces problèmes, on opte pour un pas de variation variable en utilisant des systèmes flous.
Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, le premier chapitre (Généralités) va décrire le rayonnement solaire et photovoltaïque (PV)**.** La modélisation des éléments du système PV va être définie en détail dans le second chapitre. Le troisième chapitre traitera deux algorithmes très importants à savoir l'algorithme incrémentation de la conductance et l'algorithme de la perturbation et observation (P&O) pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).
Le régulateur par logique floue va être défini dans le quatrième chapitre, dans ce chapitre on traitera deux nouveaux algorithmes P&O avec des pas variables pour la poursuite du point de puissance maximale. À savoir l'algorithme P&O flou et P&O flou simplifié commandant un système de pompage photovoltaïque.
Enfin, nous allons terminer le travail avec une conclusion générale

I.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire directement l'électricité à partir de la lumière à l'aide des panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. Ce chapitre est consacré aux notions fondamentales de l'énergie photovoltaïque et la description des semi-conducteurs

I.2. L'énergie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue en convertissant une partie de l'énergie du rayonnement solaire en électricité. Cette opération se fait par le biais d'installations photovoltaïques. Il s'agit d'une énergie renouvelable. Le terme « photovoltaïque » fait référence à un effet du même nom, qui a été décrit pour la première fois en 1839 par Antoine Becquerel [6], [7].

Schématiquement, un photon pénétrant dans un matériau semi-conducteur(comme silicium (Si), le germanium(Ge), le sélénium(Se) ou les composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium(GaAs), ou le tellurure de cadmium(CdTe), peut être en mesure d'exciter un électron. Celui-ci peut alors se déplacer et être récolté.

En outre le mot photovoltaïque trouve ses racines dans le mot grec ; phôtos, qui signifie lumière (photon) et dans : Volta, nom du physicien italien qui découvrit la pile électrique en 1800 [6][8].

I.3. Historique :

Quelques dates importantes dans le domaine de l'énergie photovoltaïque.

1839 : Le physicien français Edmond Beckerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 :Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 :Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace ; Une cellule avec un rendement de 9 %.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [9].

I.4. Les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant des propriétés électriques particulières se situant entre celles des métaux et des isolants. Ils sont à la base de l'électronique moderne et interviennent dans de nombreuses technologies telles que les transistors, les cellules solaires photovoltaïques ou encore les diodes électroluminescentes.

Les semi-conducteurs présentent un certain nombre de propriétés intéressantes. Ils sont notamment capables de changer de conductivité sous l'effet de la température, de la lumière ou par addition d'impuretés (dopage). Cette capacité permet de construire des dispositifs permettant d'amplifier, de modifier ou de convertir une énergie incidente.

I.4.1. Le silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïque .Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique.

Le silicium existe sous différentes formes :

- Sous forme multi-cristalline et monocristalline pour les couches massives,
- Sous forme amorphe et poly-cristalline pour les couches minces.

Ces différentes formes se distinguent par l'épaisseur de la couche mais aussi par la taille des grains. On va décrire brièvement leur mode de production et indiquer leur efficacité en particulier dans le domaine de la conversion photovoltaïque .

I.4.2. Dopage du silicium :

Le dopage est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité.

Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de porteurs de charge qu'ils contiennent. Ces porteurs sont les électrons ou les trous. Le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous.

I.4.2.1 Dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le semi-conducteur.

Par exemple, dans le cas du silicium (Si), les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome O voisin par une liaison covalente formant un

tétraèdre. Pour doper le silicium en N, on inclut un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux de la colonne V (VA) de la table périodique : le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb)…

Cet atome incorporé dans le réseau cristallin présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Aux températures ordinaires, quasiment tous ces électrons le sont. Comme l'excitation de ces électrons ne conduit pas à la formation de trous dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse de loin le nombre de trous. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires. Et parce que les atomes à cinq électrons ont un électron supplémentaire à « donner », ils sont appelés atomes donneurs

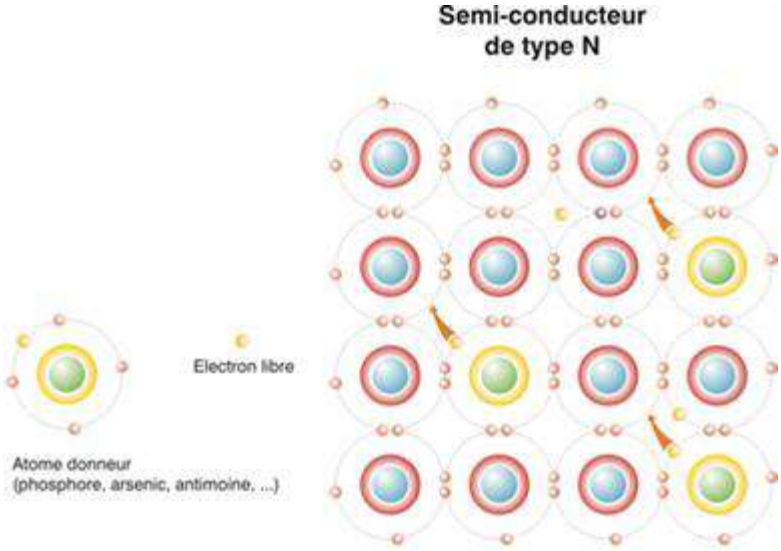


Figure I.1 : semi-conducteur type N

I.4.2.2 Dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur. Pour le faire, on inclut un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous. Dans l'exemple du silicium, on inclura un atome trivalent (colonne III du tableau périodique), généralement un atome de bore.

Cet atome n'ayant que trois électrons de valence, il ne peut créer que trois liaisons covalentes avec ses quatre voisins créant ainsi un trou dans la structure, trou qui pourra être rempli par un électron donné par un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons. Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires

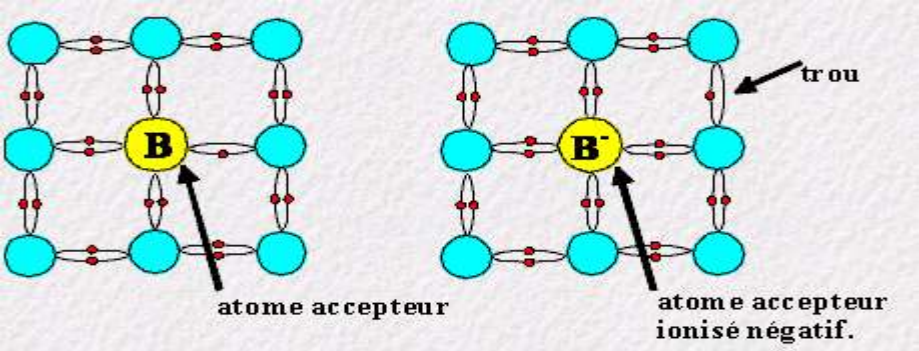
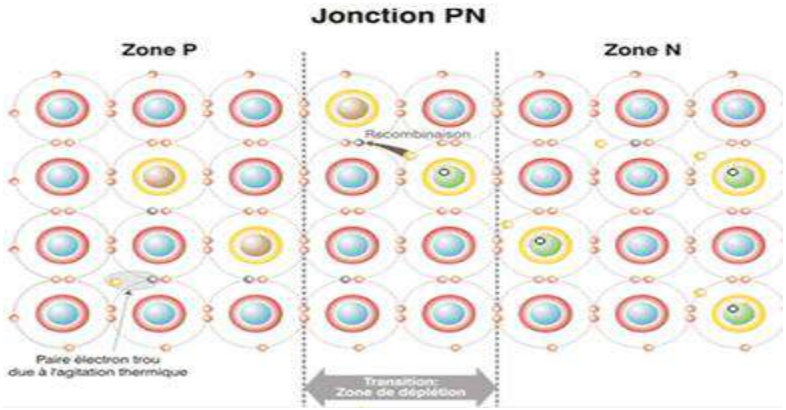
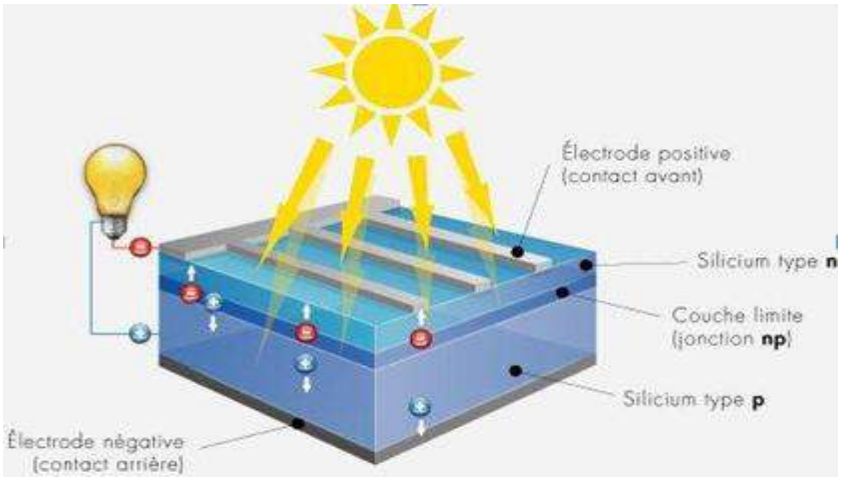


Figure I.2 : dopage de type P.

I.4.2.3 Jonction P-N :

une jonction P-N désigne une zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage P à un dopage N. Lorsque la région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de déplétion où la concentration en porteurs libres est quasiment nulle. Alors qu'un semi-conducteur dopé est un bon conducteur





Fure I.3 : jonction P-N

I.5. La conversion photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque consiste à transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

Absorption de la lumière dans le matériau (des photons dont l'énergie (E.λ = hc) est supérieure à celle associer à la bande interdite E_g).

E : Éclairement (W/m^2)

λ : longueur d'onde (μm)

h : la constante de Planck (J.S)

c : la vitesse de la lumière dans le vide ($m.S^{-1}$)

E_g : L'énergie de la bande interdite (eV)

Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron trou dans la zone de charge d'espace : les électrons vont aller vers la région P, les trous vers la région N , on aura donc un photo-courant de génération. Dans la zone N ou P , les porteurs minoritaires engendrent un photo-courant de diffusion. Ces deux courants s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph}.

Collecte des charges générées dans le dispositif ; se fait grâce aux contacts métalliques des régions Pet N (électrode et anode) [6].

I.6. Le rayonnement solaire :

I.6.1. Le soleil :

Le soleil est une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète (soit 2.10^{30} Kg) [10].

Cette étoile nous offre de l'énergie sous forme de rayonnement solaire qui peut être utilisée pour produire de l'électricité.

I.6.2. Le spectre solaire :

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grandes quantités. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes. On distingue par leur longueur d'onde les différents types de rayons : c'est le spectre solaire. Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont

heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère. Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles à la surface de terre.

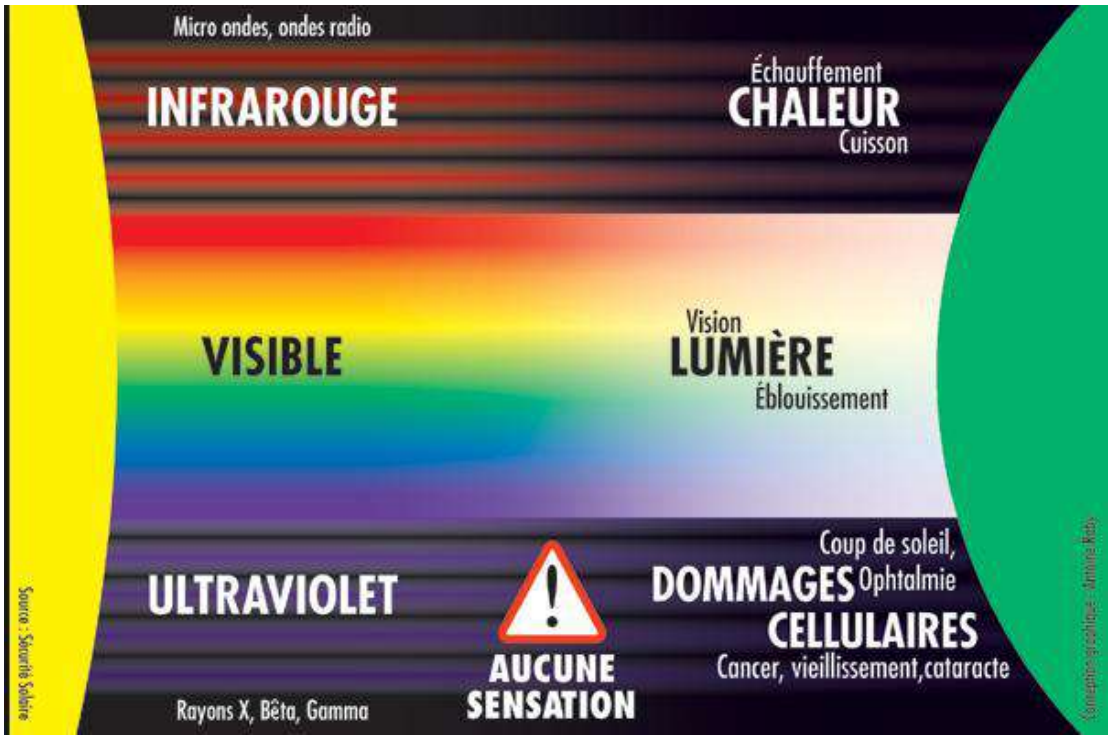


Figure I.4 : Spectre du rayonnement solaire

I.6.3. Le rayonnement solaire extraterrestre :

Le rayonnement est de l'énergie transportée par des ondes électromagnétiques. La surface du soleil qui nous envoie le rayonnement est appelée la photosphère et se trouve à une température de 5777 K. L'énorme quantité d'énergie émise par le soleil trouve sa source dans les réactions nucléaires qui y ont lieu. Le rayonnement émis par le soleil se rapproche fort de celui d'un corps noir à la température de 5777 K. Au sommet de l'atmosphère, le spectre solaire s'étend de 200 nm à 3000 nm. L'énergie reçue se répartit comme suit :

Tableau I.1 : Le rayonnement solaire extraterrestre

Répartition (%)	Longueurs d'onde	Lumière
9	inférieures à 400 nm	Ultraviolet
43	comprises entre 400 nm et 700 nm	Visible
48	comprises entre 700 nm et 3000 nm	Infrarouge proche

L'intensité du rayonnement croit à partir des longueurs d'onde proches de 250 nm pour atteindre son maximum vers 500 nm et décroît plus ou moins régulièrement pour les longueurs d'onde plus grandes. 98.8 % de l'énergie du spectre est contenu dans la bande des longueurs d'onde inférieures à 2500 nm.

I.6.3.1. Le rayonnement reçu au sol :

L'énergie du Soleil est transmise sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque l'énergie a voyagé 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre, sa densité extraterrestre totale diminue à $1367 W/m^2$. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire Cs.

a) Les composantes du rayonnement solaire :

Il existe quatre types de rayonnement :

- **Rayonnement direct :** rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- **Rayonnement diffus :** rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol :** le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige)....
- **Rayonnement global :** la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran [11].

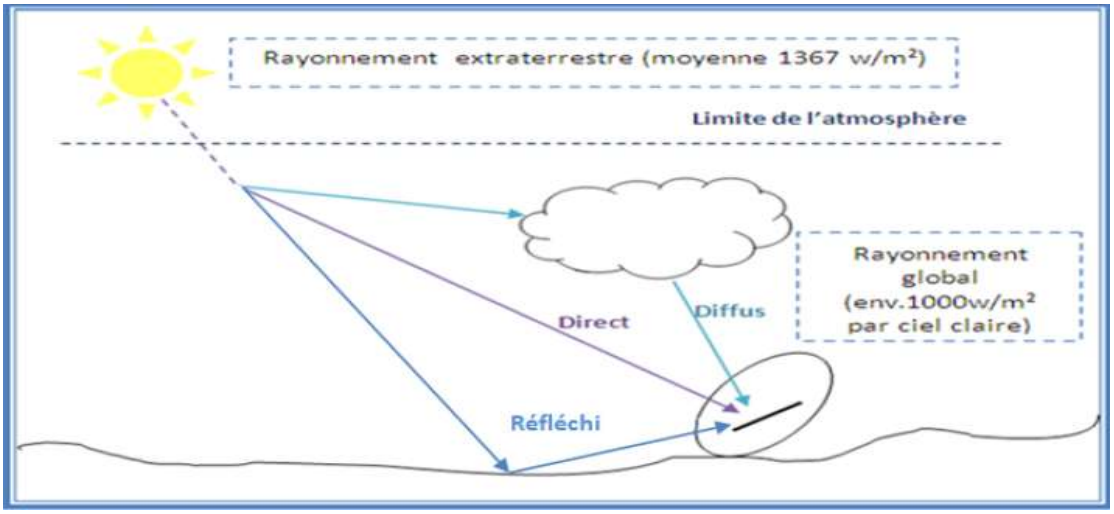


Figure I. 5 : Composants du rayonnement solaire extraterrestre

I.6.4. Gisement solaire :

I.6.4.1. Le gisement solaire en Algérie :

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. Par gisement solaire, on entend les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné [12].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

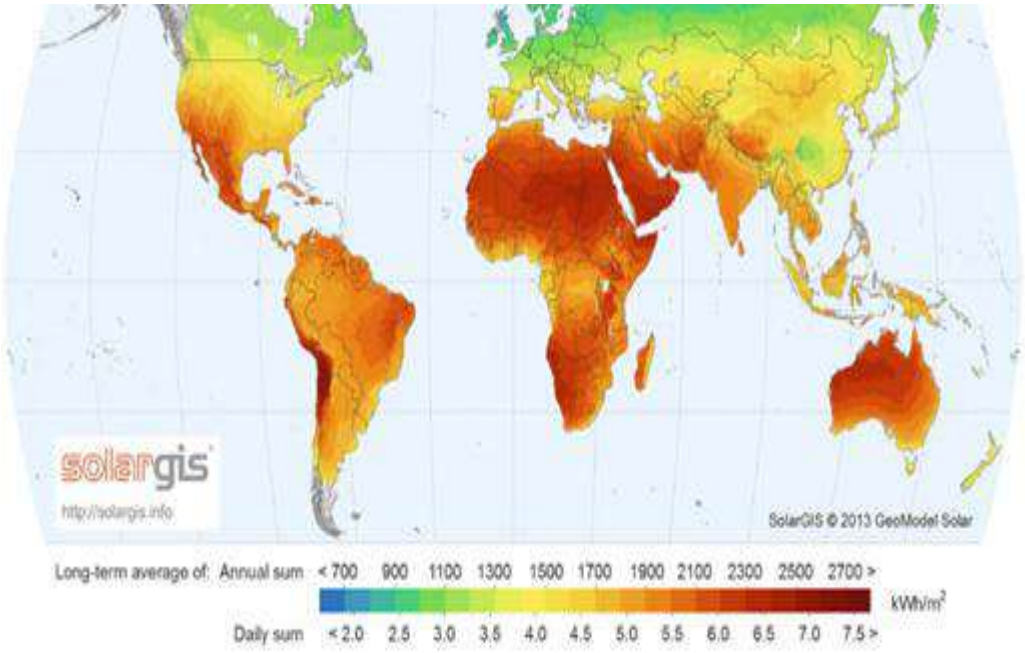


Figure I.6 : Carte du monde d'influence de la localisation sur le gisement solaire.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau(I.2) selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau I.2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée Moyenne D'ensoleillement (h/An)	2650	3000	3500
Énergie Moyenne Reçue (KWh/m^2/An)	1700	1900	26500

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). La figure suivante indique le taux d'irradiation pour chaque région de l'Algérie [9].

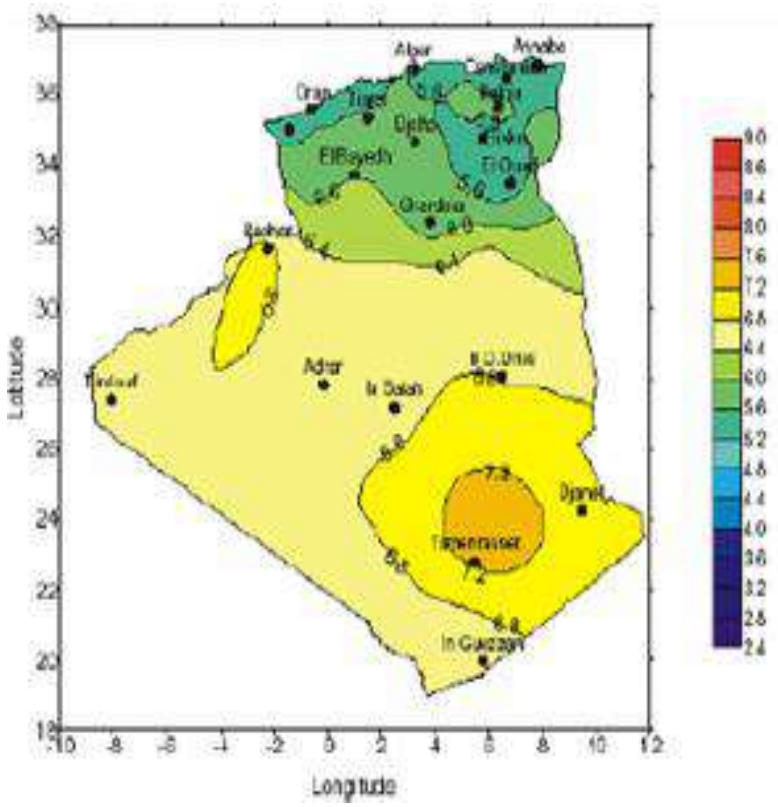


Figure I.7 : Carte de gisement solaire en Algérie [13].

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le photovoltaïque, le semi-conducteur et les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo et global).

Ensuite, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire en Algérie.

II.1. Introduction:

Nous allons maintenant aborder le phénomène de la conversion photovoltaïque qui consiste à la conversion de la lumière en électricité à travers un dispositif qui s'appelle photopile ou « cellule solaire ». Des rappels sur les différentes configurations des systèmes PV et sur les principales caractéristiques de la source PV vont être donnés.

II.2.Générateur photovoltaïque :

II.2.1.Cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs. C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité [14].

II.2.1.1.Principe de fonctionnement:

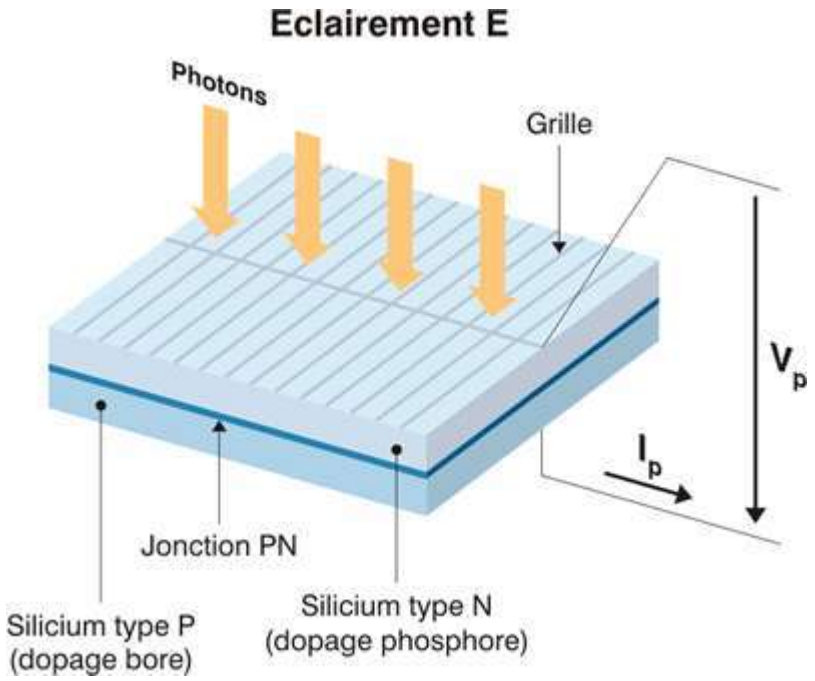


Figure II.1 : Structure d'une cellule solaire [15]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites

respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formé [16].

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [16].

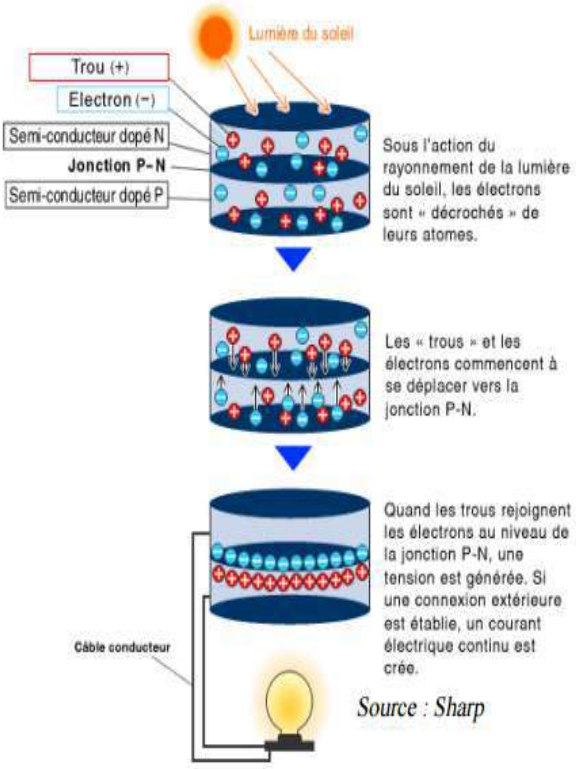


Figure II.2 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique

II.2.1.2. La caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque :

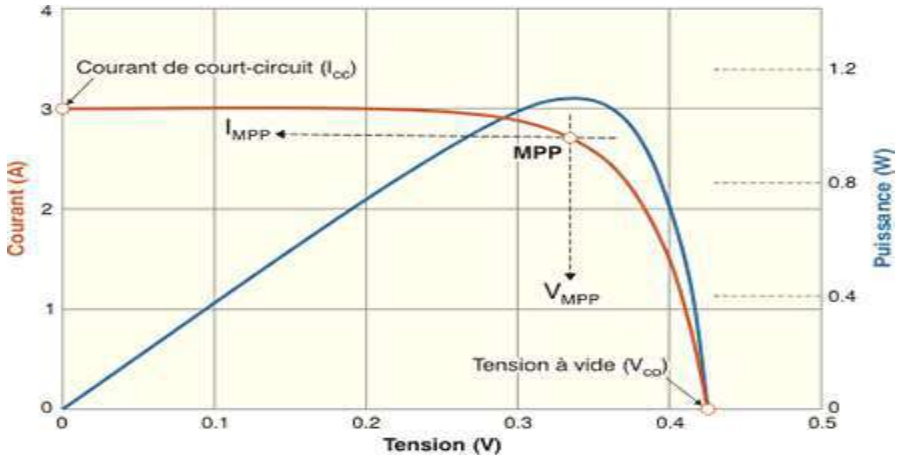


Figure II. 3: Caractéristique I-V d'une cellule PV.

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [15]:

Sa tension à vide : V_{co} Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court-circuit : I_{cc}Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux :V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

II.2.1.3. La modélisation électrique de la cellule photovoltaïque :

a) Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque:

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent ci-dessous (figure II.4).Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant une source de courant et une diode en parallèle. La source du courant I_{ph} représente le photo- courant (générer). Dans la branche de diode, on a un courant I_D [17].

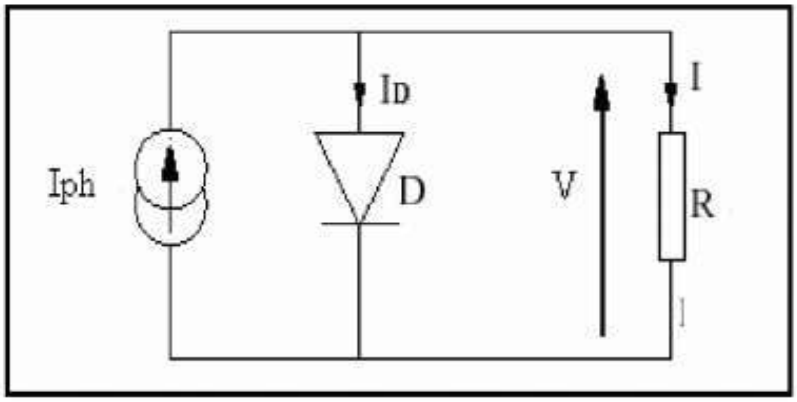


Figure II.4 : Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque.

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée sur une charge R s'écrit :

$$I_{ph} = I_D + I \quad \text{(II.1)}$$

I_{ph}: Le Photo-courant généré (A).

I_D : Courant traversant la diode (A).

$$I = I_{ph} - I_D \quad \text{(II.2)}$$

$$I_D = I_0\left[e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right] \quad \text{(II.3)}$$

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad \text{(II.4)}$$

$$I = I_{ph} - I_0\left[e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right] \quad \text{(II.5)}$$

q : Charge de l'électron (C) ;

K : Constante de Boltzmann ($1.36.10^{-23}$ J.K^{-1}) ;

V_T: Tension thermique (V) ;

I_0 : Courant de saturation (A) ;

V : Tension au borne de la diode (V) ;

T : Température absolue (en kelvin).

a) Modèle réel d'une cellule photovoltaïque:

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres (tenant comptent des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords...etc.) doivent être pris-en considération. Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la figure (II.5) par un générateur de courant, une diode et deux résistances R_S etR_{sh} [18].

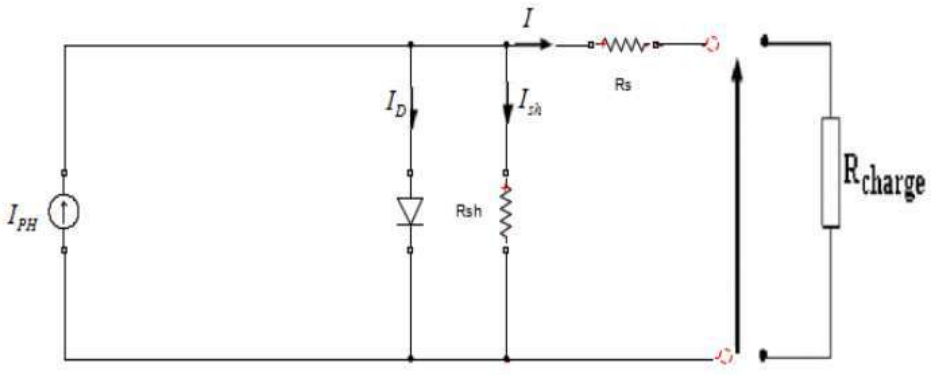


Figure II.5 : Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire (figure II.5), on a :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{sh} \tag{II.6}$$

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{II.7}$$

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{V + I \cdot R_S}{\eta V_T}} - 1 \right] \tag{II.8}$$

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_s} = \frac{V + I \cdot R_S}{R_{sh}} \tag{II.9}$$

$$I_0 = I_{CC} \Big/ e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \tag{II.10}$$

$$I_{CC} = I_{CCR} \left(\frac{G}{1000} \right) \tag{II.11}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V + I \cdot R_S}{\eta V_T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{sh}} \tag{II.12}$$

R_S : Est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux(Ω).

R_{sh} : Est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques(Ω).

η : Facteur de qualité pour une diode 0.67

G : L'irradiation solaire en W / m ²

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure II.3 dépend de ses caractéristiques internes(R_S ,R_{sh}) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température.

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que I_{PH} =I_{CC} parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée.

Donc l'équation (II.12) devienne :

$$I = I_{ph} - I_0\left[e^{\frac{V+I\cdot R_S}{\eta V_T}} - 1\right] \qquad \text{(II.13)}$$

La valeur de la résistance série R_S est mesurée de la pente dV/dI de la courbe I-V à la tension de circuit ouvert. L'équation de R_S est donnée par :

$$R_S = -\frac{dV}{dI} - \frac{\eta KT/q}{I_0 e^{\frac{V+I\cdot R_S}{\eta V_T}}} \qquad \text{(II.14)}$$

Pour résoudre l'équation non linéaire (II.14), on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \qquad \text{(II.15)}$$

$f'(X_n)$ Le dérivé de la fonction $f(X_n)$

X_n La présente itération.

X_{n+1} L'itération suivante.

Ainsi, en supposant que $I_{PH} = I_{CC}$,

l'équation (II.13) devient sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{CC} - I - I_0\left[e^{\frac{V+I\cdot R_S}{\eta V_T}} - 1\right] = 0 \qquad \text{(II.16)}$$

Ainsi, l'expression du courant (I) sous forme itérative est donnée par :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{CC} - I - I_0\left[e^{\frac{V+I\cdot R_S}{\eta V_T}} - 1\right]}{-I - I_0\left(\frac{R_S}{\eta \cdot V_T}\right)e^{\frac{V+I\cdot R_S}{\eta V_T}}} \qquad \text{(II.17)}$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal, pour généraliser notre calcul pour différentes éclairements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{CC}(T) = I_{CCR}|_{T_R} .\left[1 + \beta(T - T_R)\right] \qquad \text{(II.18)}$$

$$I_0(T) = I_0|_{T_R} .\left(\frac{T}{T_R}\right)^{\frac{3}{n}} e^{\left(\frac{-q.E_g}{\eta.K}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right)} \qquad \text{(II.19)}$$

T_R : Température de référence (25°)

β : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

E_g : L'énergie de la bande interdite (gap) du semi-conducteur (en eV) $E_g \approx 1.12$ pour le silicium poly-cristallin à 25°C

II.2.1.4: Les déférents types de cellule:

Deux technologies de cellules existent suivant leur mode de production :

a) Première génération "cellules cristallines":

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction P-N. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pure, reste très énergivore et coûteuse.



Figure II.6: fabrication de cellules cristallines.

Le cristal se formé par refroidissement du silicium en fusion dans des creusets parallélépipédiques. Il est ensuite découpé en fines tranches appelées "wafers". Les cellules sont alors obtenues après "dopage" et traitement de surface.

On distingue deux types de cellules cristallines :

- **Les cellules poly-cristallines:**



Figure II.7 : Les cellules poly-cristallines.

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

- **Les cellules monocristallines:**



Figure II.8 : Les cellules monocristallines.

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium.

b) Deuxième génération " Amorphe ":



Figure II.9: cellule amorphe.

Dans ce cas le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). Le silicium amorphe (a-Si) c'est un silicium non cristallisé de couleur gris foncé. Ce sont des cellules que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,… dite solaires

II.2.1.5. La comparaison entre les trois types des cellules :

Tableau II.1 : Comparaison entre les trois types des cellules [16].

Technologie	Monocristalline	Poly-cristalline	Amorphe
Cellule et module			
Le rendement	Très bon rendement : 14 à 20%.	Bon rendement : 11 à 15 %.	Rendement faible : 5 à 9 %.
La Durée de vie	Importante (30 ans)	Importante (30 ans)	assez importante (20 ans)
Coût de fabrication	Élevé	meilleur marché que les panneaux monocristallins	peu onéreux par rapport aux autres technologies
Puissance	100 à 150 Wc/m² 7 m²/kWc	100 Wc/m² 8 m² /kWc	50 Wc/m² 16 m² /kWc
L'influence de l'éclairement	Rendement faible sous un faible éclairement.	Rendement faible sous un faible éclairement.	Fonctionnement correct avec un éclairement faible.
L'influence de la température	perte de rendement avec l'élévation de la température	perte de rendement avec l'élévation de la température	Peu sensible aux températures élevées
Fabrication	élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal	élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.	couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
La couleur	bleue uniforme	Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux	gris foncé
Part de marché	43 %	47 %	10 %

II.2.2. Module ou panneau photovoltaïque:

II.2.2.1. La constitution d'un module photovoltaïque:

Câble de connexion: les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+).

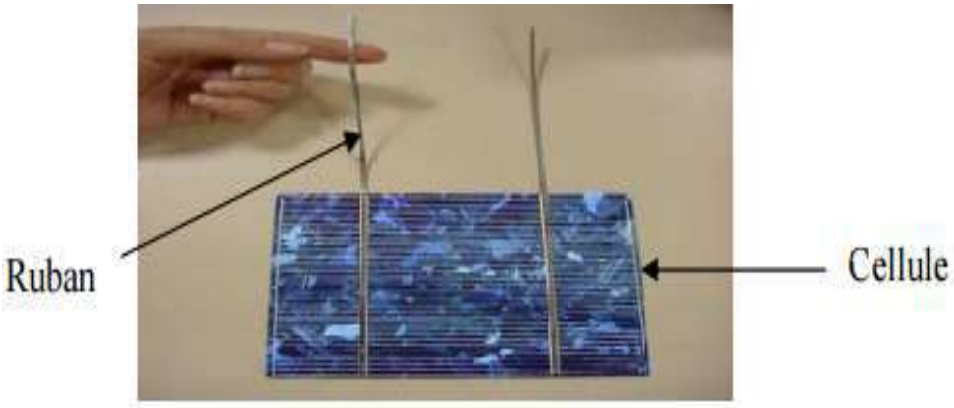


Figure II.10: Ruban métallique d'une cellule [A].

Deux films thermoplastique transparents : les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastique transparents (EVA: Éthylène Acétate de Vinyle).

Cadre en aluminium : ce cadre avec joint périphérique pour permettre la dilatation.

Un verre trempé en face avant : il protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.

La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR .

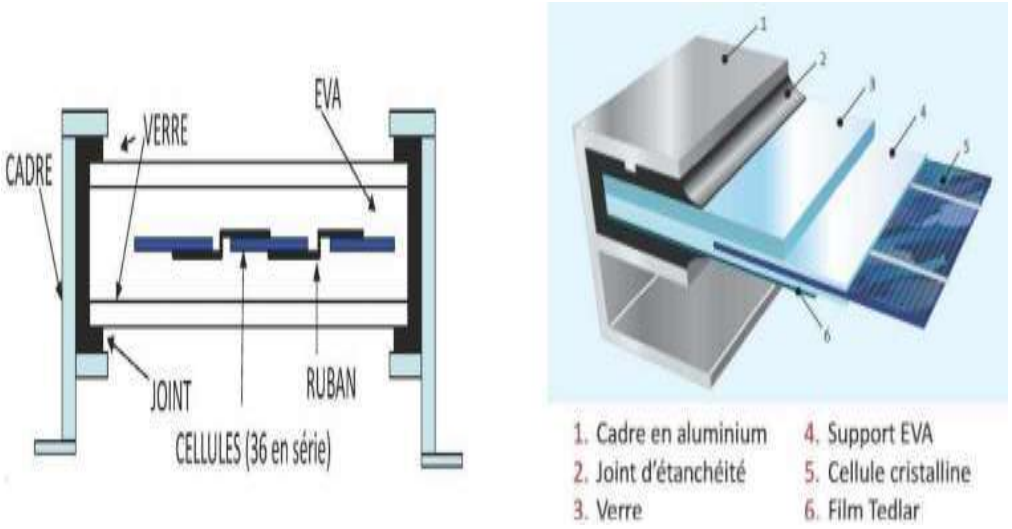


Figure II.11: encapsulation des cellules [14].

Connexion: la boite de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass.

Les 2 câbles unipolaires sont raccordés [14].

II.2.2.2. Les paramètres photovoltaïques d'un module:

Il existe de nombreux paramètre qui permettent de caractériser une solaire. Ces paramètre sont appelés paramètres photovoltaique et sont déduits de la caractéristique I(V)

La figure II.12 Représente une caractiréstique courant-tension I(V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaique à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à un bon nombre de paramètres physiques cararactéristiques du composant. Les premies paramètre qui apparaissent sur la caractèristique courant-tension d'une cellule photovoltaique sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{CO}) et le facteur de forme (FF) du composant [14].

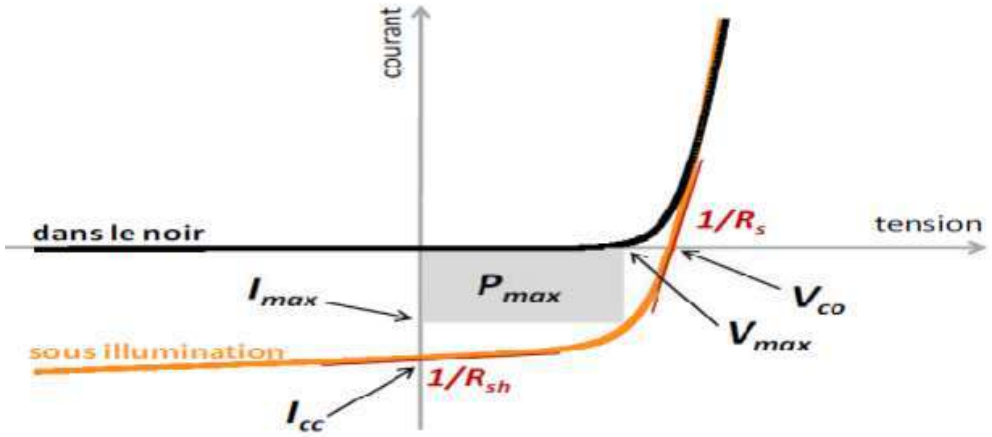


Figure II.12: caractéristique courant-tension et paramètre physique d'une cellule.

a) Courant de court-circuit (I_{cc}) :

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

b) tension de circuit ouvert (V_{CO})

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky),

des matériaux de la courbe active et de la nature des contact de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de cellule.

c) Puissance débitée (P)

La puissance fournie par la pile est donnée par le produit tension et courant.

$$P = V.I \tag{II.20}$$

Cette puissance est maximum au point MPPT

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \tag{II.21}$$

d) Facteur de forme (FF)

Il permet de juger la qualité d'une GPV. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et le produit courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} V_{CO}} \tag{II.22}$$

e) Le rendement (η)

Nous pouvons définir le rendement d'une GPV comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la GPV. Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la GPV par l'ensoleillement.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E.S_C} 100\% \tag{II.23}$$

Avec :

η: Le rendement ;

P_{max} : La puissance maximale (W) ;

E : Éclairement (W/m²) ;

S_C : Surface de la GPV solaire (m²).

II.2.2.3. L'association des modules photovoltaïque:

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un

même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.
Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules [15].

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable.

a) Mise en série:

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules [15].

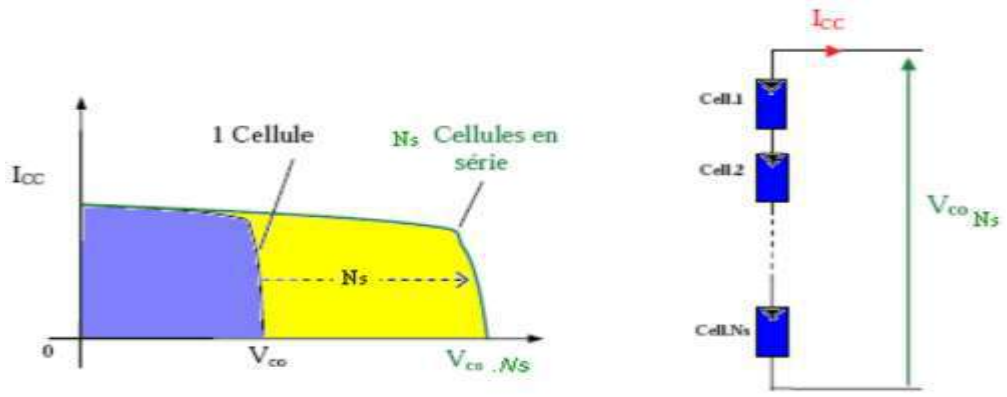


Figure II.13: Caractéristique courant tension de Ns cellules en série [14].

Les équations qui résument les caractéristiques électriques d'une association série de N_S cellules sont telles que:

$$V_{CO\ N_S} = N_S V_{CO} \quad \text{(II.24)}$$

$$I_{CC\ N_S} = I_{CC} \quad \text{(II.25)}$$

$V_{CO\ N_S}$: La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série ;

$I_{CC\ N_S}$: Courant de court-circuit de Ns cellules en série ;

b) Mise en parallèle:

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

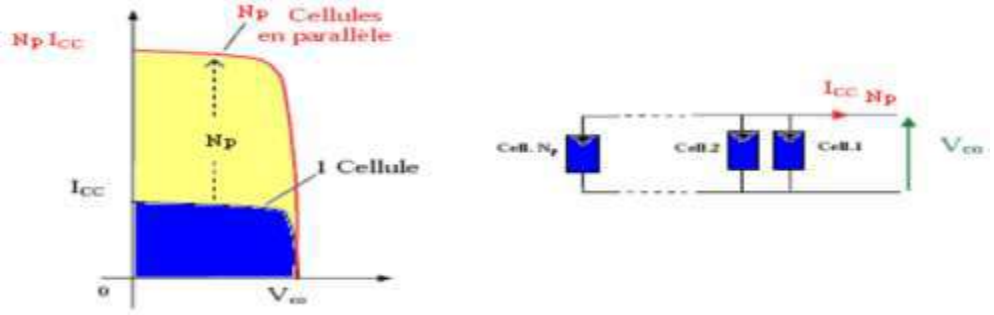


Figure II.14: Caractéristique courant tension de N_p cellules en parallèle [14].

Donc on aura:

$$I_{CC\ \ N_P} = N_P . I_{CC} \tag{II.26}$$

$$V_{CO\ \ N_P} = V_{CO} \tag{II.27}$$

$I_{CC\ N_P}$: La somme des courants de court-circuit de N_P cellules en parallèle.

$V_{CO\ N_P}$: Tension du circuit ouvert de N_P cellules en parallèle.

c) Mise en hybride (série parallèle) :

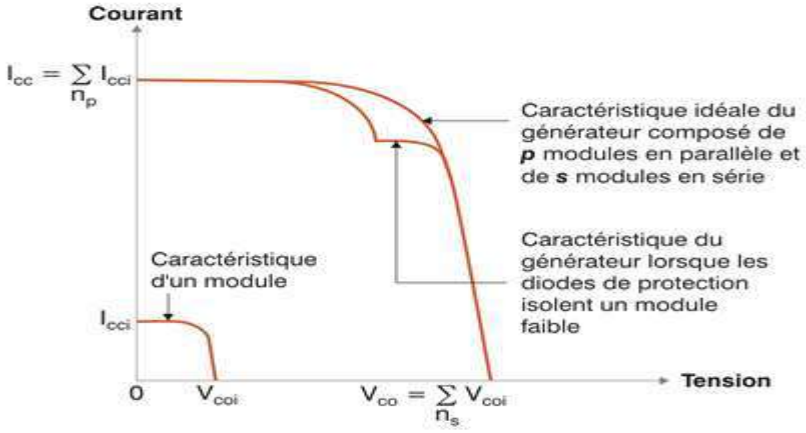


Figure II.15: Caractéristique courant tension des cellules en hybride [15].

Selon l'association en série et/ou en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide total sont données par les relations suivants :

$$V_{CO\ \ total} = N_S V_{CO} \tag{II.28}$$

$$I_{CC\ \ total} = N_P . I_{CC} \tag{II.29}$$

$I_{CC\ total}$: La somme des courants de court-circuit de N_P cellules en parallèle;

$V_{CO\ total}$: La somme de la tension du circuit ouvert de N_S cellules en série.

la puissance disponible en sortie du GPV est donnée par:

$$P_{pv} = N_S V_{CO\ \ total} . N_P . I_{CC\ \ total} \tag{II.30}$$

II.2.2.4. Diode de protection des cellules PV :

Lors de la fabrication du panneau photovoltaïque ; nous devons assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter la durée de vie en évitant des pannes dommageables liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement, en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement définis :

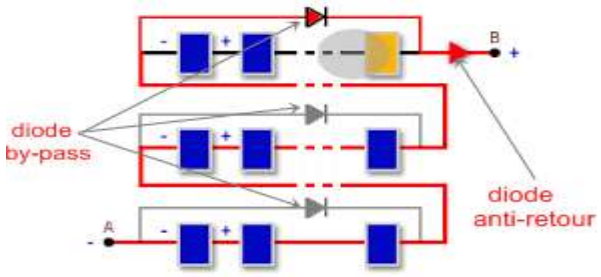


Figure II.16 : Protection par diode by-pass et diode anti-retour.

a) Diode by-pass :

Ce type de protection est conseillé dans le groupement en série, car dans ce cas, le courant qui traverse chaque cellule est le même que celui du module photovoltaïque. Quand une cellule du panneau est ombrée, cette partie sous-irradiée peut se trouver polariser en inverse et devenir réceptrice. La puissance dissipée ne peut être extraite, ce qui engendre un échauffement de la zone sous-irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des points chauds " hot spot " qui peuvent endommager la zone affecté et dégrade définitivement les performances du module photovoltaïque entier. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées aux cellules comme le montre la figure (II.16)[20].

b) Diode anti-retour :

Dans le cas de plusieurs cellules connectées en parallèle et pour éviter le risque que des cellules éclairées débitent leur énergie sur les/ou la cellule ombrée, ou que la batterie ne se décharge à travers le générateur, il faut installer dans chaque branche une diode anti retour [20].

II.2.2.5. Influence de l'clairement et de la température :

L'éclairement et la température modifient la caractéristique I-V de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeursI_{cc},V_{co}, I_{max} et V_{max} :

a) Effet d'éclairement sur le module photovoltaïque:

On fixe la valeur de la température constante T=25 °C et on fait varier l'éclairement entre 0 W/m² et 1000 W/m² avec un pas de 200W/m². Les caractéristiques (I_{pv} =f(V_{pv})) et (P_{pv} =f(V_{pv})) sont données respectivement par les figures ((II.17) et (II.18)).On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

la variation de I_{cc} avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante [15] :

$$I_{CC} \approx I_{ph} = \delta(T).E.S \qquad \text{(II.31)}$$

Où

E : est l'éclairement en W/m².

S : est la surface de la cellule en m².

δ(T) : coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co}.

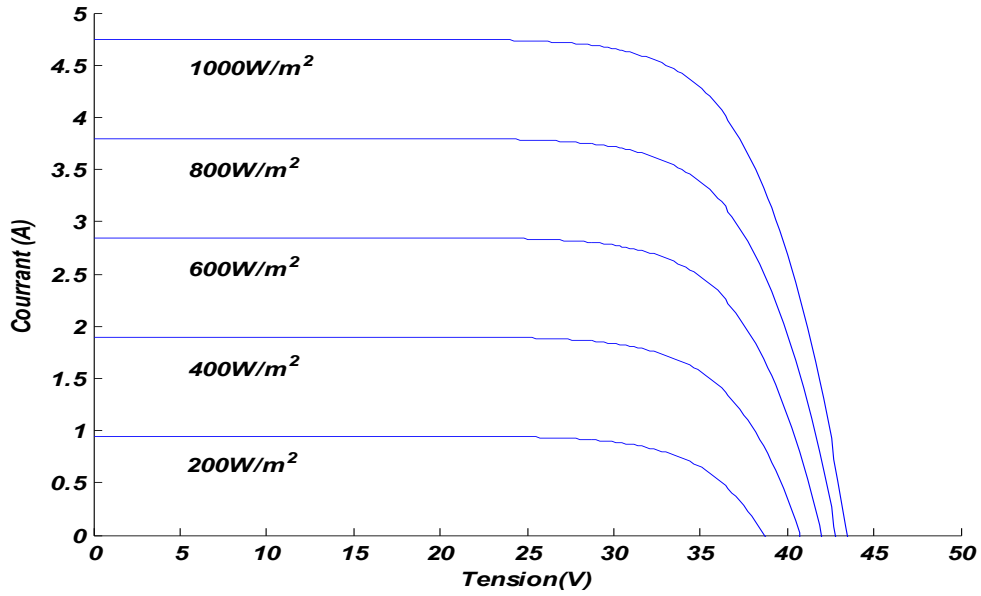


Figure II.17: L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV caractéristique (I-V).

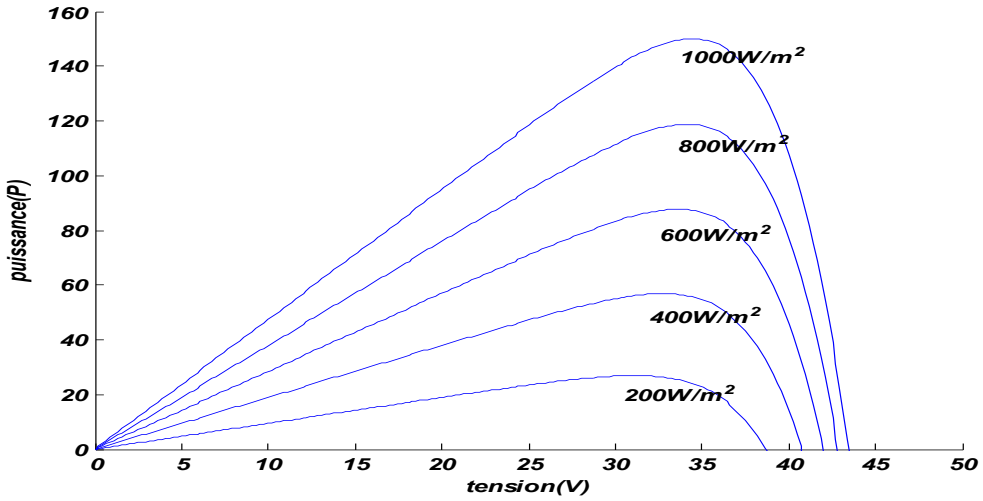


Figure II.18: L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV caractéristique (P-V).

b) Effet de la température sur le module photovoltaïque:

On fixe la valeur de l'irradiation constante E=1000W/m² et on fait varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, avec un pas de 25°C. Les caractéristiques (I_{pv} =f(V_{pv})) et (P_{pv} =f(V_{pv})) sont données respectivement par les figures (II.19) et (II.20). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte

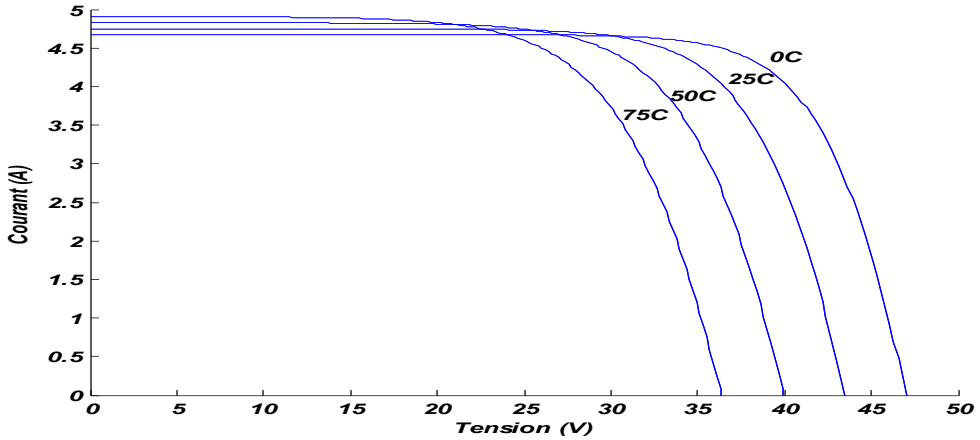


Figure II.19: L'influence de la température sur le fonctionnement du module PV caractéristique (I-V).

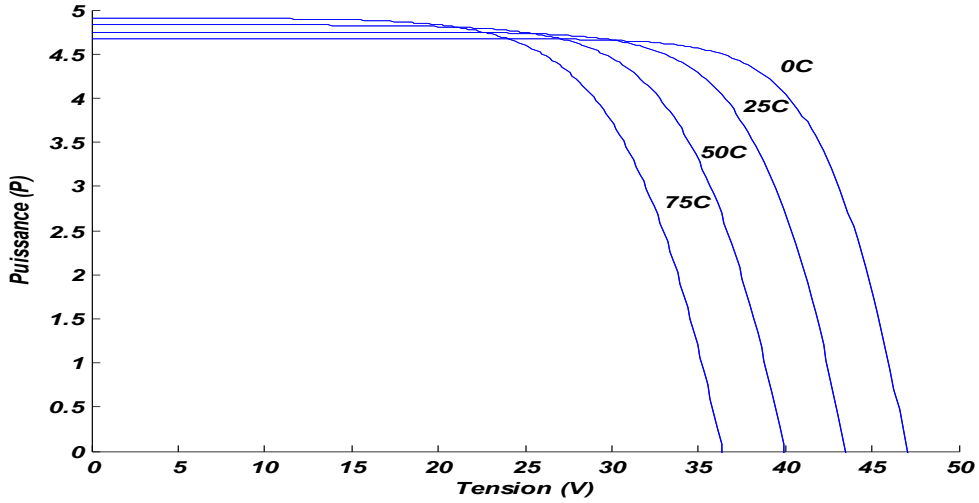


Figure II.20: L'influence de la température sur le fonctionnement du module PV caractéristique (P-V).

II.3. Les différents types d'utilisation de générateurs photovoltaïques :

II.3. 1 .Alimentations électriques faibles puissances :

Les modules PV peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles [16].

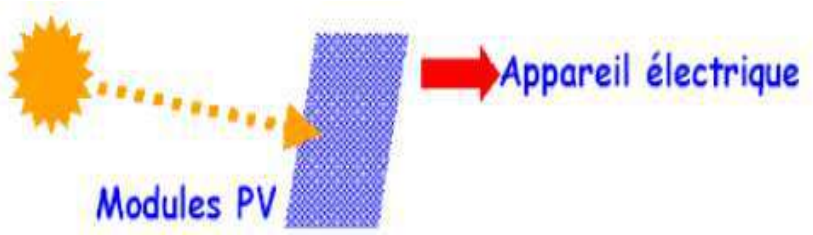
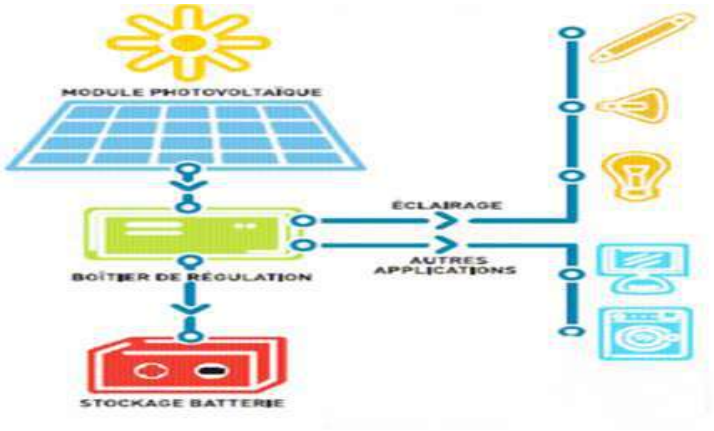


Figure II.21: Alimentation électrique faible puissance.

II.3.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :

En site isolé, le champ photovoltaïque peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil [16].



Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques:

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

Figure II.22 : Installations électriques photovoltaïques autonomes

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

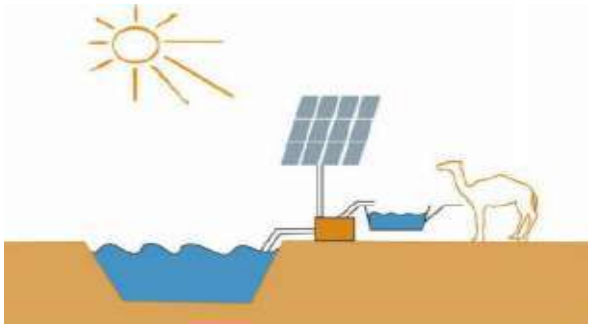


Figure II.23 : pompage solaire.

En site isolé on peut utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur.

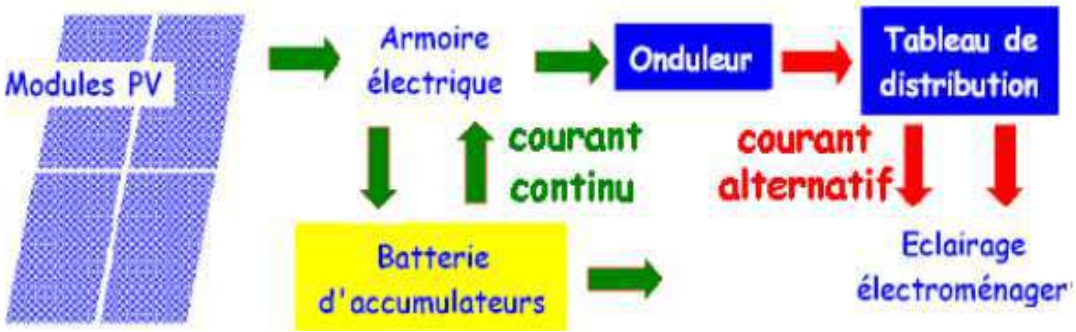
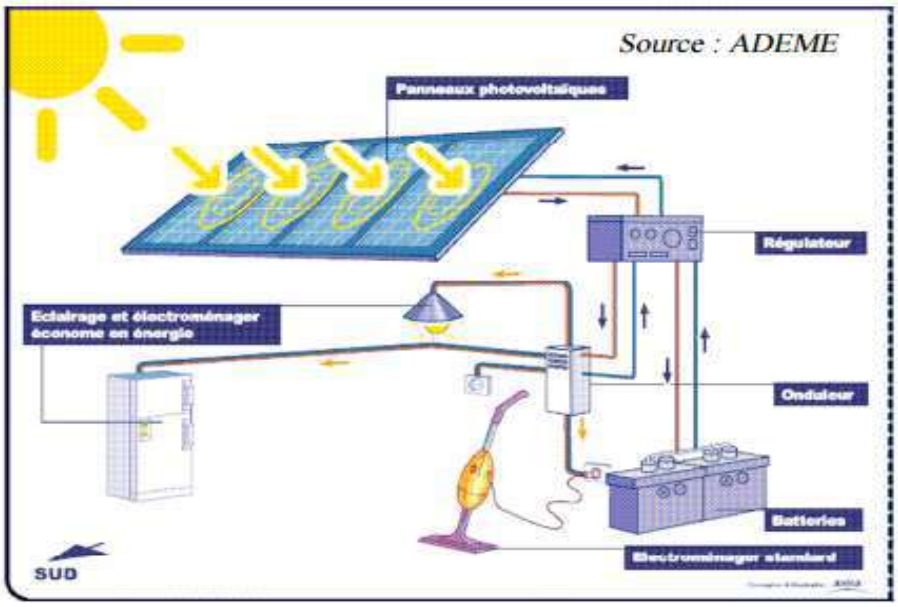


Figure II.24 : schéma d'un système photovoltaïque autonome.



Un onduleur est un dispositif électronique et statique qui convertit le courant électrique continu en courant alternatif avec la fréquence souhaitée.

Figure II.25: installation d'un système photovoltaïque autonome.

II.3.3. Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau :

II.3.3.1 Installation PV raccordée au réseau sans injection (« auto-consommation") :

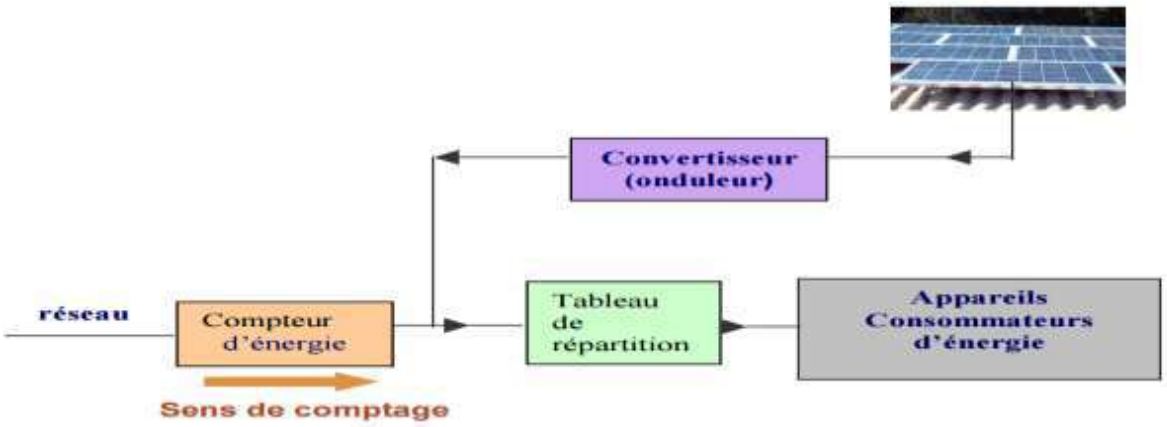


Figure II.26 : schéma d'installation d'un système photovoltaïque raccordée au réseau sans injection

II.3.3.2 Installation PV raccordée au réseau avec injection de l'énergie produite :

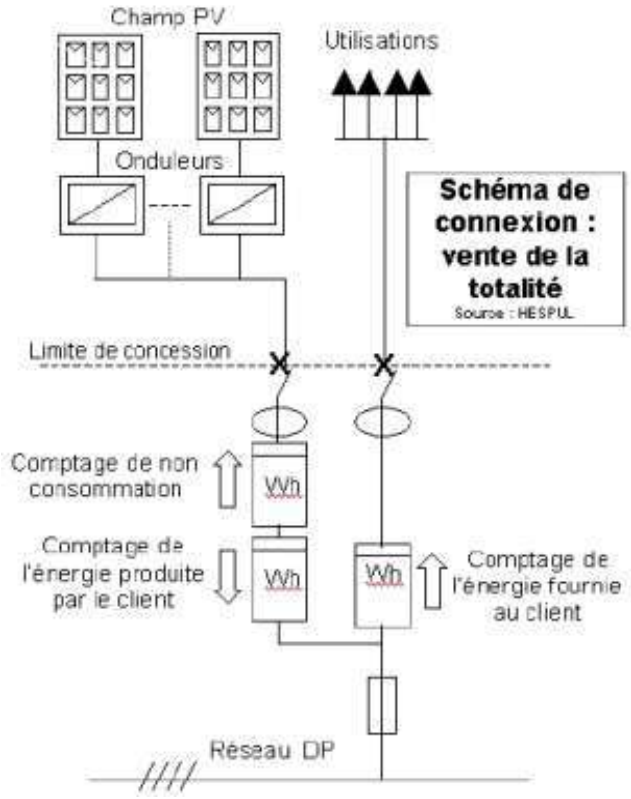


Figure II.27 : schéma d'un système photovoltaïque raccordé au réseau avec injection totale de l'énergie produite.

La tête de l'installation comprendra 2 disjoncteurs et 3 compteurs :

-un pour compter l'énergie d'origine photovoltaïque produite (« comptage énergie produite par le client »).

- un pour compter l'énergie achetée au fournisseur et consommée par les récepteurs de l'installation (« comptage énergie fournie au client »).

- et un pour que le fournisseur d'énergie s'assure que le client ne consomme pas de l'énergie sur la ligne électrique de production (« comptage de non consommation ») [16].

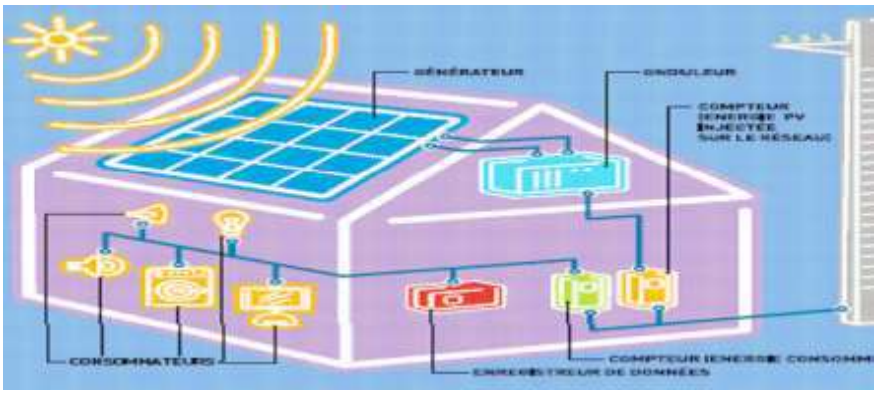


Figure II.28 : Installation d'un système photovoltaïque raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite.

II.4 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients [17].

II.4.1.Avantages du photovoltaïque :

♣ Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.

♣ Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.

♣ Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.

♣ Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.

♣ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

II.4.2. Inconvénients du photovoltaïque :

♣ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 % .

♣ Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.

♣ Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.

♣ La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différentes type de la cellule photovoltaïques .On a vu que la cellule PV présente des caractéristiques électriques non linéaires I(V) et P(V). La tension en circuit ouvert est directement influencée par l'augmentation de la température par contre lors de l'augmentation de l'irradiation c'est le courant de court-circuit qui varie. on a présenté aussi les différentes installations du générateur. Pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge donc le régulateur du point maximal de puissance fera l'objet du chapitre suivant.

III.1 Introduction :

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking : MPPT) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules. A noter que la caractéristique d'une cellule est affectée par l'éclairement et la température.

Cette partie discute les caractéristiques I-V des modules PV et des charges, l'adaptation entre les deux, et l'utilisation des convertisseurs à courant continu (DC-DC). Elle discute aussi les détails de quelques algorithmes MPPT

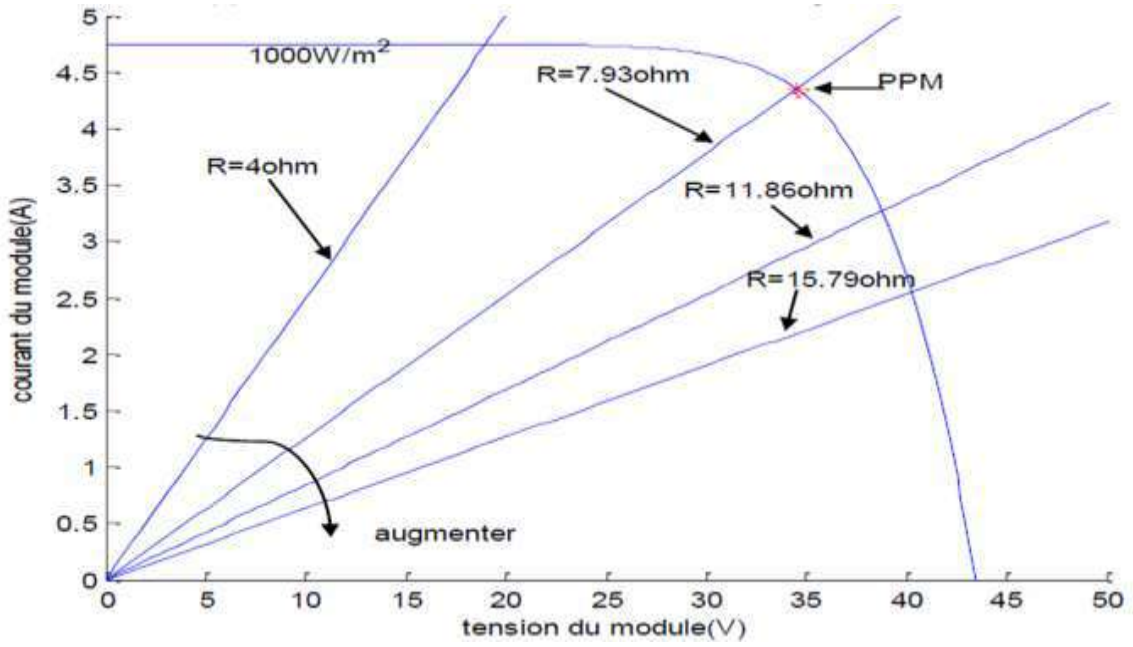


Figure III.1 : Courbes I-V du module PV BP SX 150 pour diverses charge résistives simulés avec MATLAB (1 kW/m²,25°C)

III.2 Courbes de charges :

III.2.1 Courbe I-V d'une charge résistive simple :

Pour illustrer l'importance des courbes de charge, considérant une charge résistive simple figure (III.1).

$$V = RI \tag{III.1}$$

$$I = \left(\frac{1}{R}\right)V \tag{III.2}$$

Donc, la courbe du courant en fonction de la tension, est une ligne droite avec une pente de 1/R. Si R augmente, le point opérationnel se déplace de gauche à droite le long de la courbe I-V du module PV figure (III.1).

Puisque la puissance fournie à n'importe quelle charge est le produit du courant et de la tension, il y aura qu'une valeur particulière de résistance a qui correspondra la puissance maximale :

$$R_{max} = \frac{V_{max}}{I_{max}} \tag{III.3}$$

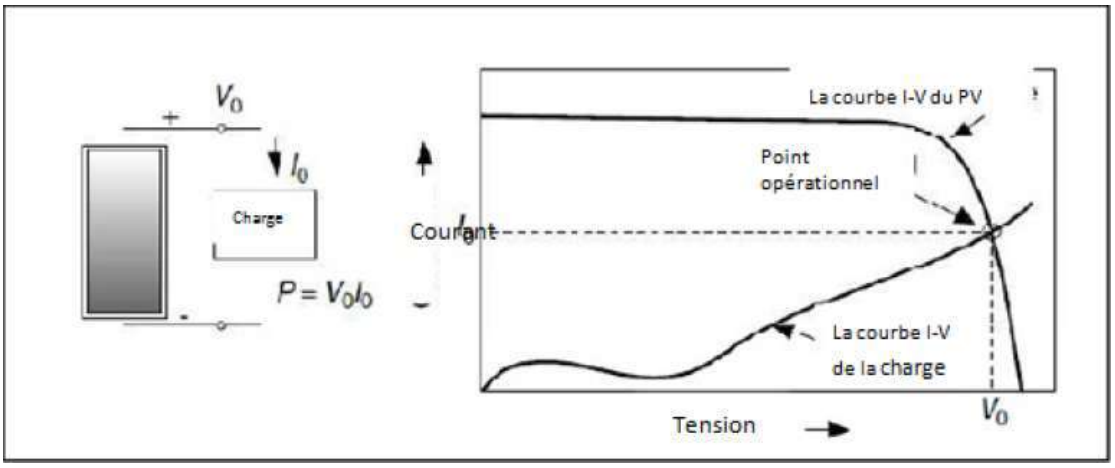


Figure III.2: Le point opérationnel est le point d'intersection des courbes courant-tension de la charge et du PV.

Où V_{max} et I_{max} sont la tension et le courant au point de puissance maximale (PPM). Sous les conditions spécifiques aux quelles les modules sont testés, le MPP correspond à la tension V_{max} et au courant I_{max} calibrés du module. Cela signifie que la meilleure valeur de la résistance, pour transfert la puissance maximal, devrait être V_{max}/I_{max} .

La figure(III.3) montre, pour une résistance fixe, comment le point opérationnel s'éloigne du PPM quand les conditions changent ce qui implique que le module devient de moins en moins efficace, d'où, on a besoin d'introduire un suiveur de puissance maximale pour maintenir le rendement du PV le plus élevé à tout moment.

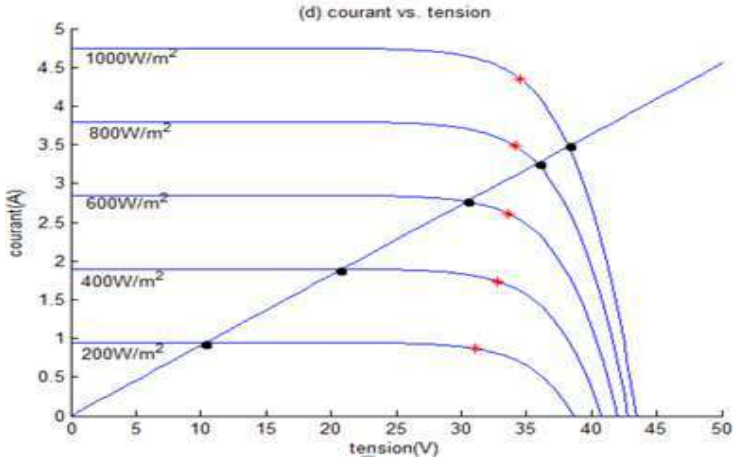


Figure III.3:L'efficacité du module PV avec une charge résistive fixe conçue pour des différents niveaux d'ensoleillement.

III.2.2 Courbe I-V d'un moteur à C.C :

La majorité des systèmes de pompage photovoltaïque utilisent des moteurs à courants continus vue qu'ils peuvent être couplés directement au système PV puisque on n'a pas besoin d'un d'onduleur. Le moteur à courant continu le plus utilisé dans les systèmes de pompage est le moteur à courant continu (MCC) à aimant permanent parce qu'il présente un couple de démarrage élevé mais aussi parce on n'a ni de collecteur ni de balais. Ces deux paramètres ont été toujours le point faible du MCC, ce commutateur mécanique limite la puissance et la vitesse et ils demandent beaucoup d'entretien, les balais se détériorent avec le temps, sachant que la durée de vie des balais est approximativement 1000 h pour un fonctionnement nominale.

Le schéma technologique d'un MCC est représenté sur la figure suivante :

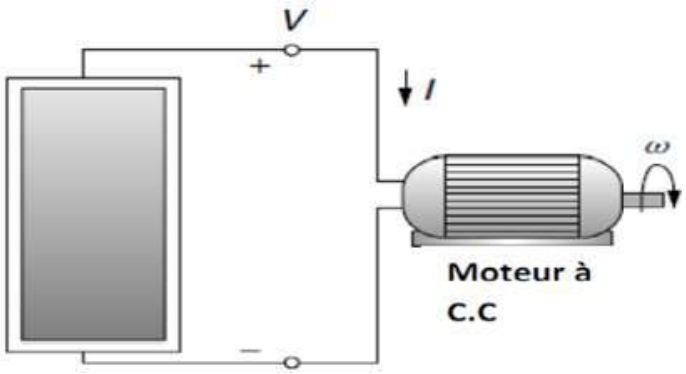


Figure III.4 : Machine à courant continu connecte à un PV.

III.2.2.1 Équation électrique :

L'équation de tension induite s'écrit :

$$U_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad \text{(III.4)}$$

III.2.2.2 Équation électromagnétique :

La tension induite $e_m\ (t)$ est donnée par :

$$e_m(t) = k_e \omega(t) \quad \text{(III.5)}$$

k_e: Constante de tension

Le couple électromagnétique $T_{em}\ (t)$ développé a pour expression :

$$T_{em}(t) = k_t I_a \quad \text{(III.6)}$$

k_t: constantes de couple de moteur.

III.2.2.3 Équation mécanique:

Le moteur en rotation est décrit par l'équation dynamique suivante :

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - B_m \omega(t) - T_r - T_f \quad \text{(III.7)}$$

Où:

J_t : Inertie totale entraînée (moteur Jm et charge) .

B_m : Coefficient de frottement visqueux.

T_r : Couple résistant.

T_f : Couple de frottement de coulomb.

En se basant sur l'équation (III.4), la courbe électrique caractérisant le moteur à C.C est représentée sur la figure(III.5). Noter qu'au démarrage, quand ω = 0, le courant s'élève rapidement avec une augmentation de la tension jusqu'à ce que le courant soit suffisant pour créer assez de couple de démarrage pour libérer le moteur du frottement statique. Une fois que le moteur commence à tourner, la *fcem* diminue le courant, ensuite 'I' augmente plus lentement avec l'augmentation de la tension [17].

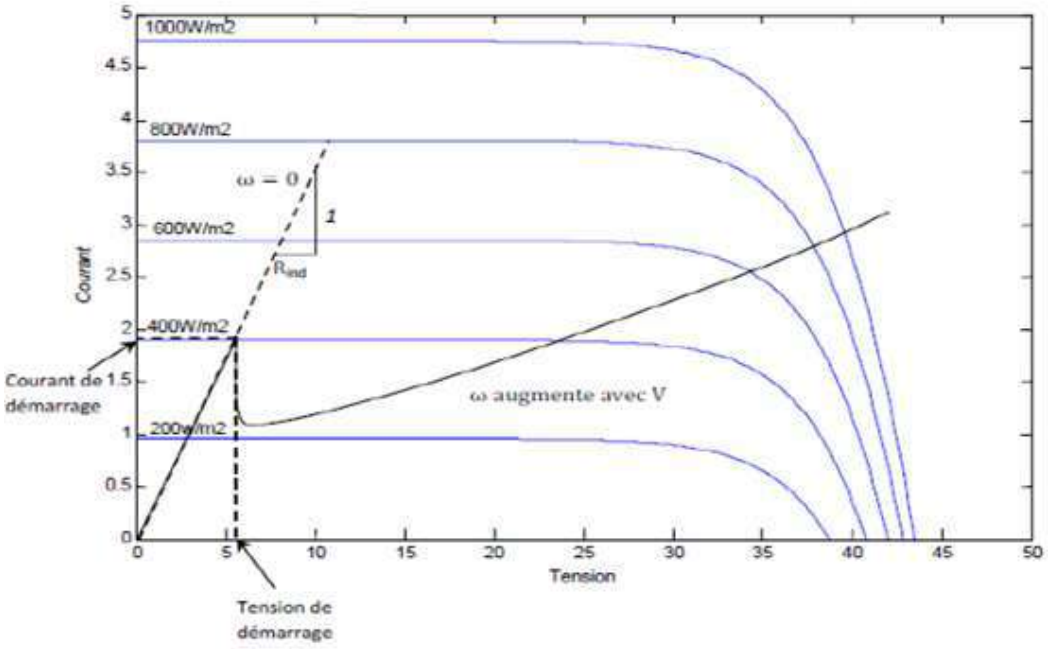


Figure III.5: Caractéristique électrique d'un moteur à C.C à aimant permanent.

La courbe I-V d'un moteur à C.C est superposée à un ensemble de courbes photovoltaïques dans la (figure III.5). La mauvaise adaptation des points opérationnels avec le **MPP** idéal est claire. On note que le moteur n'a pas assez de courant pour dépasser le frottement statique jusqu'à ce que l'insolation atteigne au moins 400 W/m^2. Une fois qu'il commence à tourner, il a besoin seulement d'environ 200 W/m^2 pour continuer de tourner.

Ceci signifie qu'une quantité insuffisante d'insolation est insuffisante si on veut démarrer le moteur au petit matin. On note d'après la courbe I-V de la figure (III.5) que le point opérationnel est loin d'être près du coude de la courbe d'insolation où se trouve la puissance maximale le matin.

Il y a un dispositif, appelé convertisseur à courant continu (DC-DC), conçu pour fournir l'énergie nécessaire au moteur afin de démarrer au petit matin et fonctionner au MPP.

III.3. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge :

III.3.1. Le convertisseur à courant continu (DC-DC) :

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

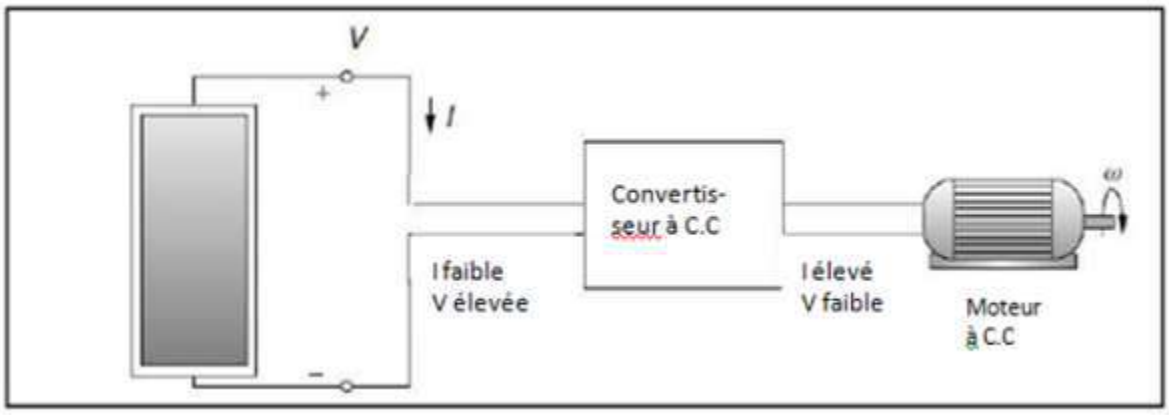


Figure III.6: Un convertisseur DC-DC pour aider à démarrer ou maintenir le moteur en marche avec une basse lumière du soleil.

III.3.1.1 Types des convertisseurs DC-DC :

Il y a plusieurs topologies de convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [21].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entrainement des moteurs à courant continu [21]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck);
- Elévateurs (Boost);
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

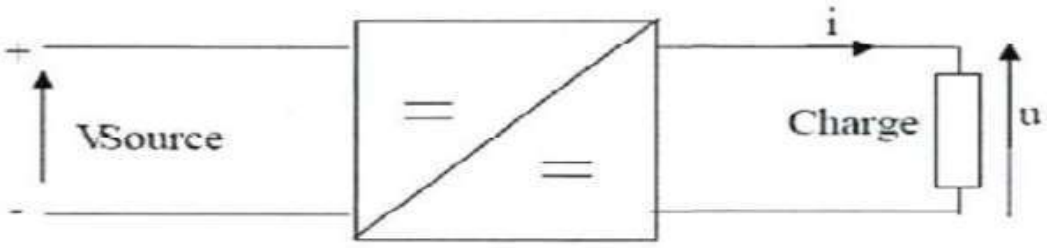


Figure III.7: convertisseur DC-DC.

a) Convertisseur Buck (hacheur dévolteur) :

Le convertisseur Buck (abaisseur) a pour rôle la conversion de la tension d'entrée en une tension de sortie plus faible.

Le rapport de conversion $M = V_0/V_i$ varie avec le rapport cyclique α du commutateur.

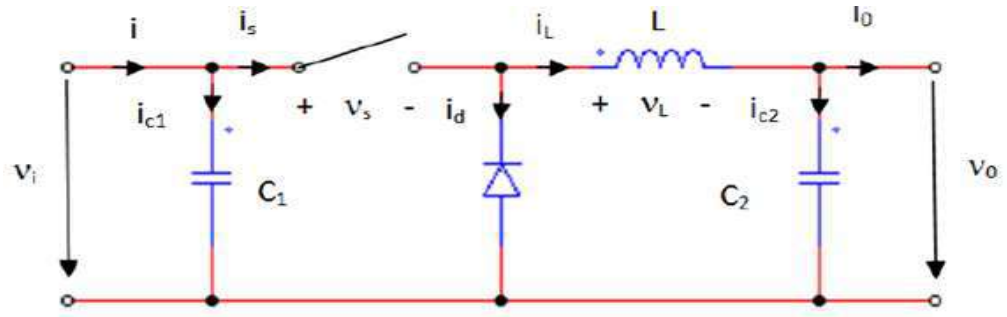


Figure III.8 : Circuit idéal d'un convertisseur Buck.

Lorsque le commutateur de la figure (III.8) est fermé ($T \in [0, DTs]$), la diode sera bloquée et le courant circulera dans la charge à travers l'inductance (Figure III.9).

Dès que le commutateur est ouvert ($T \in [DTs, Ts]$), l'inductance maintiendra la circulation du courant dans la charge, mais maintenant la boucle se referme à travers de la diode placée en avant Figure(III.10).

❖ **Modèle du circuit équivalent**

Pour avoir le modèle mathématique du convertisseur buck, les deux états de fonctionnement (interrupteur ouvert et fermé) doivent être analysés. La figure (III.9) montre le schéma de circuit équivalent d'un convertisseur buck avec le commutateur fermé. La figure (III.10) représente le convertisseur buck avec le commutateur ouvert pendant l'intervalle de temps [DTs, Ts], où D' désigne le complément du rapport cyclique D, défini comme suit :

$$D' = 1 - D \qquad \text{(III.8)}$$

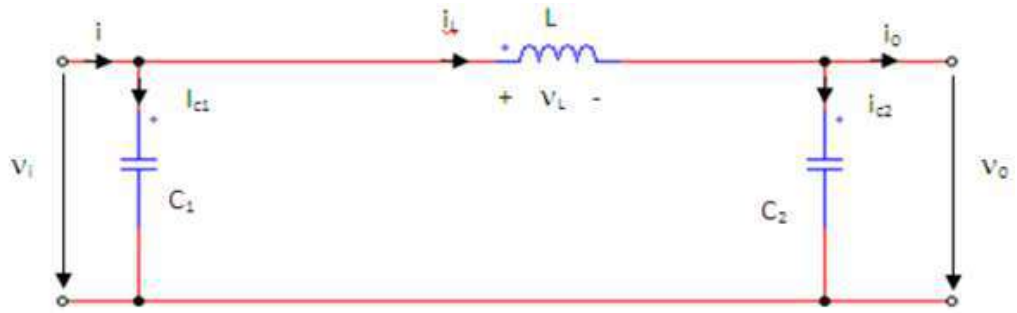


Figure III. 9 : Circuit équivalent d'un hacheur Buck quand le commutateur est fermé.

- $T \epsilon [0, DTs]$

L'application de la loi de Kirchhoff pour le circuit de la figure (III.9) (interrupteur fermé) conduit à la série d'équations suivante :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad \text{(III.9)}$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \quad \text{(III.10)}$$

$$V_L(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \text{(III.11)}$$

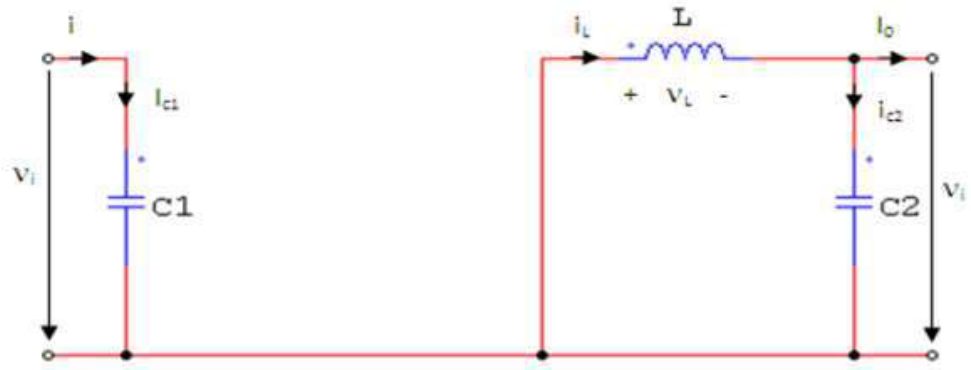


Figure III.10 : Circuit équivalent d'un hacheur Buck quand le commutateur est ouvert.

- Tϵ [DTs, Ts]

En utilisant de la loi de Kirchhoff sur la figure (III.10) (interrupteur ouvert), une deuxième série d'équations est obtenue :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \quad \text{(III.12)}$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \quad \text{(III.13)}$$

$$v_L(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = -v_0(t) \quad \text{(III.14)}$$

b) Convertisseur Boost (hacheur survolteur) :

Le convertisseur boost, comme le montre la figure (III.11), est aussi connu comme le convertisseur élévateur "step-up". Le nom implique son application typique de la

conversion d'une faible tension d'entrée à une haute tension de sortie, l'essentiel le fonctionnement est l'inverse d'un convertisseur buck.

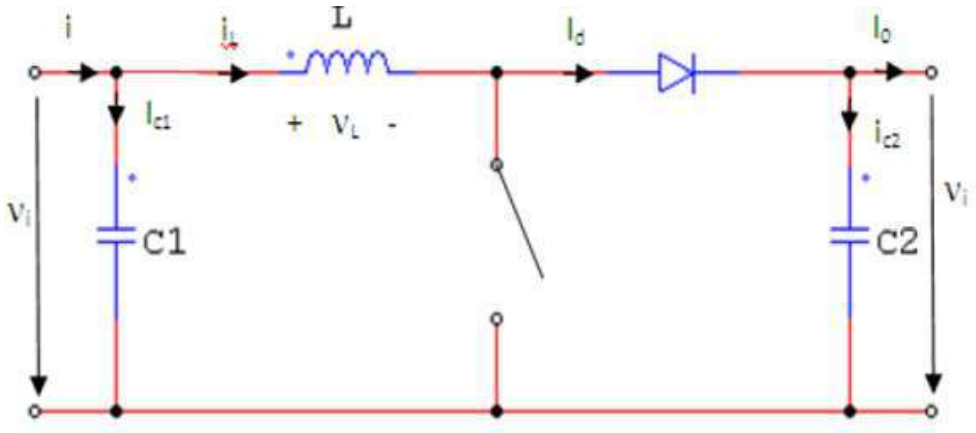


Figure III. 11: Circuit Convertisseur Boost**.**

❖ **Modèle du circuit équivalent**

En premier temps *DTs*, figure (III.12), le commutateur est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, à fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période ; le commutateur s'ouvre et l'inductance *L* s'oppose à la diminution du courant i_L, ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode figure(III.13).

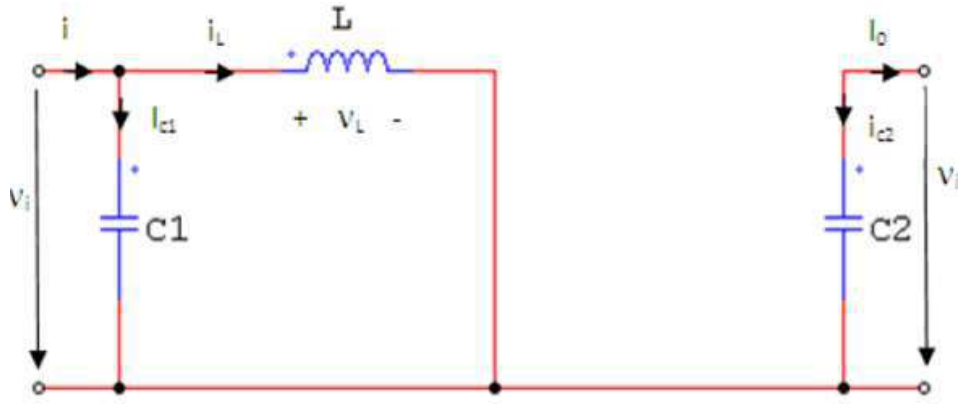


Figure III. 12 : Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est fermé Tϵ[0,DTs].

La figure (III.12) montre le circuit équivalent d'un convertisseur boost pendant l'intervalle de temps DTs, lorsque l'interrupteur est fermé. L'application de la loi de Kirchhoff des équations du circuit mène à la série d'expressions suivante :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} - i(t) - i_1(t) \qquad \text{(III.15)}$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \qquad \text{(III.16)}$$

$$v_L(t) = L\frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \qquad \text{(III.17)}$$

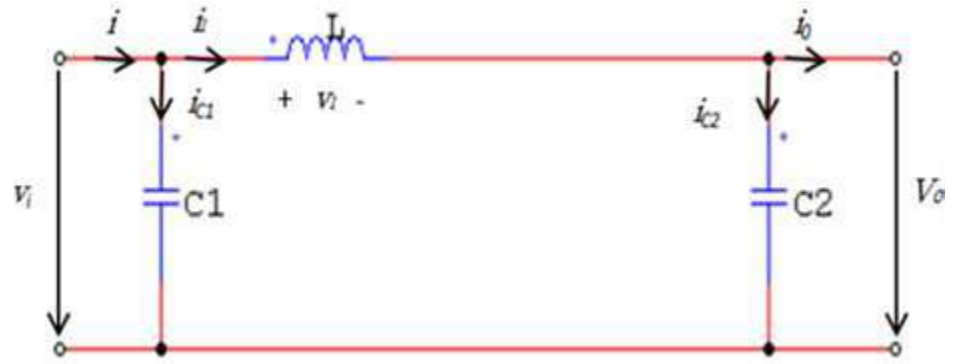


Figure III. 13 : Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est ouvert T ϵ [DTs, Ts].

Pour la période de temps ou l'interrupteur est ouvert *D'Ts* montré à la figure (III.13), une deuxième série d'équations peut être obtenue :

$$i_{c_1}(t) = c_1\frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_1(t) \qquad \text{(III.18)}$$

$$i_{c_2}(t) = c_2\frac{dv_0(t)}{dt} = i_1(t) - i_0(t) \qquad \text{(III.19)}$$

$$v_L(t) = L\frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \qquad \text{(III.20)}$$

c) Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur) :

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des configurations de buck et de boost. Il peut être utilisé pour transformer idéalement n'importe quelle tension d'entrée continue en n'importe quelle tension de sortie continue désirée. En pratique, l'usage de l'idéalité est naturellement limité par les pertes des composants.

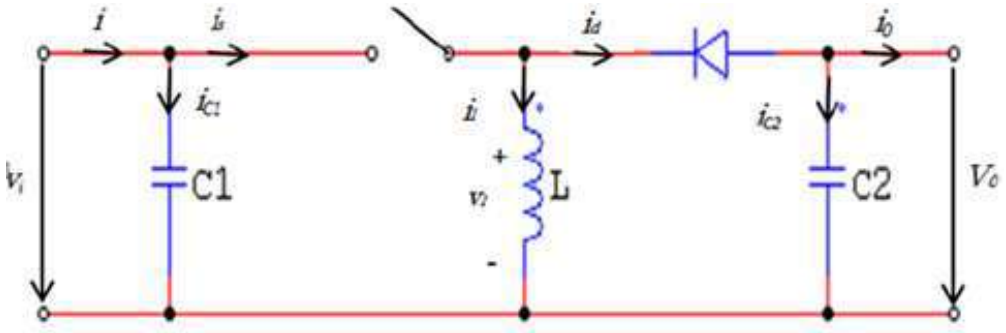


Figure III.14 : circuit idéal d'un convertisseur buck-boost .

❖ **Modèle du circuit équivalent**

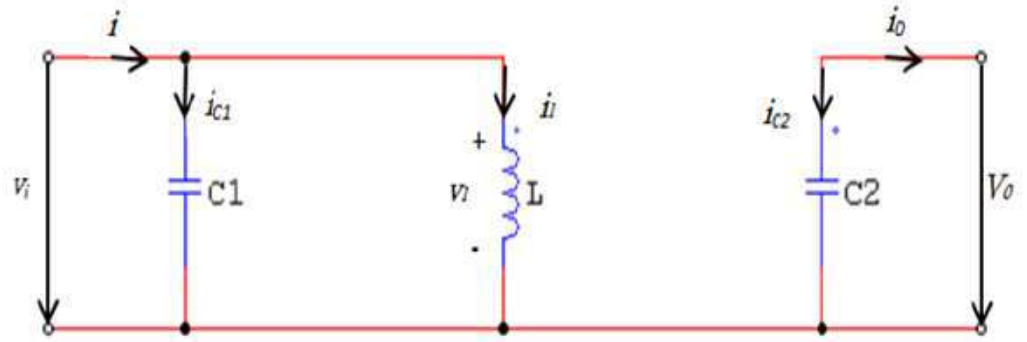


Figure III. 15 : Circuit équivalent d'un hacheur buck-boost quand le commutateur est fermé $T \in [0, DTs]$.

L'application de la loi de Kirchhoff et les équations de nœuds du circuit dans le premier état de commutation illustré à la figure (III.15) donne la première partie des équations du système pour la période de temps $[0, DTs]$. :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \qquad \text{(III.21)}$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \qquad \text{(III.22)}$$

$$v_L(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \qquad \text{(III.23)}$$

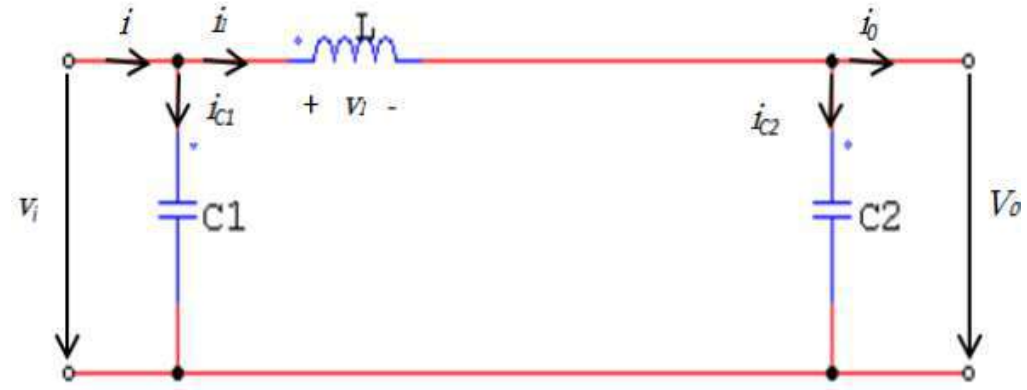


Figure III. 16 : Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est ouvert T ϵ [DTs, Ts].

Et pour la deuxième période de temps [DTs, Ts] , d'après la figure (III.16) on aura :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \qquad \text{(III.24)}$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) - i_l(t) \quad \text{(III.25)}$$

$$v_L(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_0(t) \quad \text{(III.26)}$$

III.3.2. Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) :

Un régulateur MPPT ou maximum power point tracking (traduction française : recherche du point de puissance maximum) est un convertisseur électronique DC/DC (courant continu vers courant continu) qui optimise en permanence les paramètres électrique de fonctionnement entre les 3 composants de systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque (constitué de un ou plusieurs panneaux solaires) ;
- Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries) ;
- Les applications utilisant l'énergie (moteur, éclairage…. Etc.).

Ces régulateurs peuvent aussi être appelés 'power trackers'.

III.3.2.1 Principe de fonctionnement de MPPT :

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

La Figure (III.17) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées.

Cependant au final tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé[21].

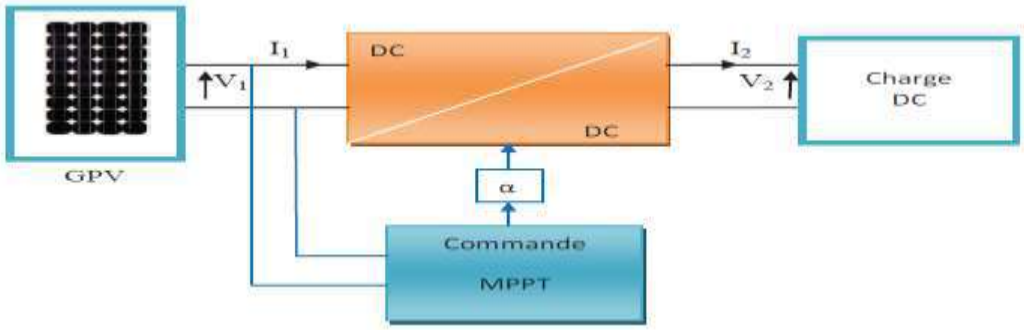


Figure III.17 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM),des contrôleur MPPT sont utilisés ,ces contrôleurs sont destinés a minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthode optimale[22].

III.3.2.2Gestion de la MPPT :

La figure (III.18) illustre trois cas de perturbations suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ce cas pour une variation d'ensoleillement, il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas **b** pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas **c** la variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV, dans ce cas aussi, il faut également agir au niveau de la commande [21].

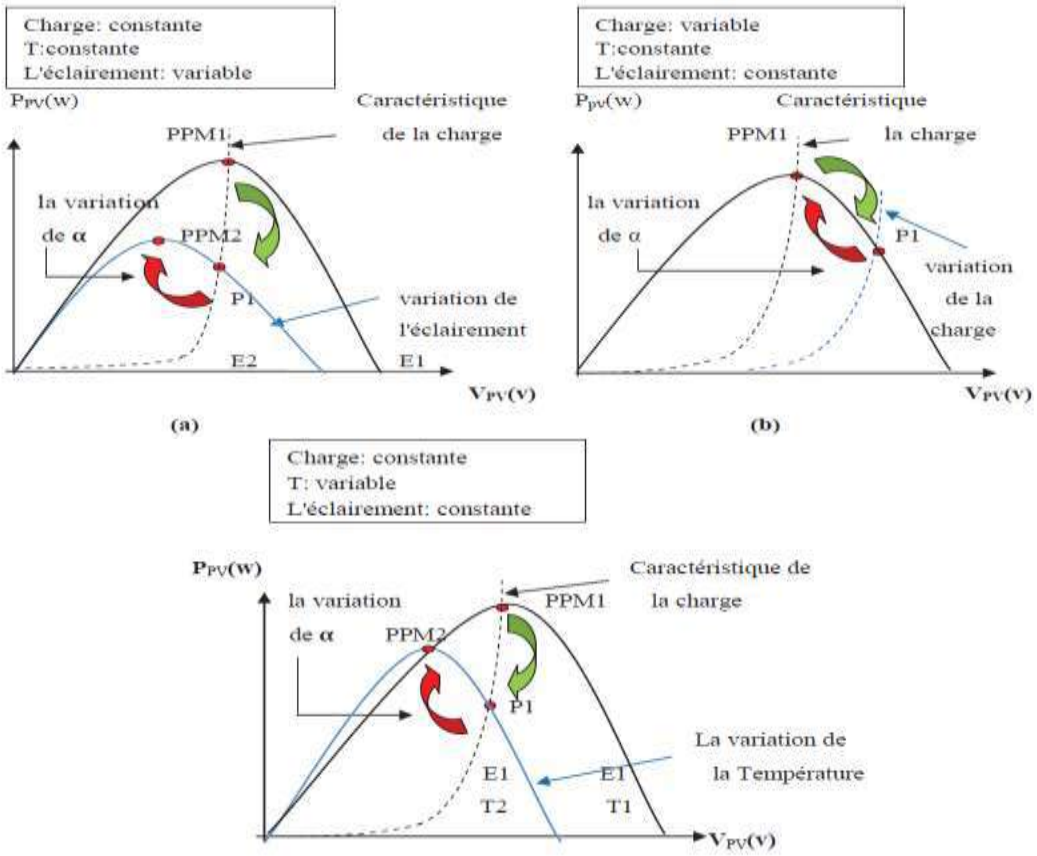


Figure III.18 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale.

a) suite à une variation d'éclairement,

b) suite à une variation de charge,

c) suite à une variation de température

III.3.3 Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

III.3.3.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement…) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode

d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court circuit.

a) La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur :

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{CO}. La constante proportionnelle K_1, dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{v_{CO}} cte \prec 1 \qquad \text{(III.27)}$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. La méthode de court-circuit :

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existante entre le courant de court circuit et le courant au point de puissance maximale (équation III.29):

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{CC}} \cong Cte \prec 1 \qquad \text{(III.28)}$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

III.3.3.2 Les méthodes directes :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance…

a) La méthode incrémentation de la conductance :

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement **.**

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par:

$$Ppv = IpvVpv \qquad \text{(III.30)}$$

La conductance et l'incrémentation de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension Ppv:

$$\frac{1}{V}\frac{dPpv}{dVpv} = \frac{Ipv}{Vpv} + \frac{dIpv}{dVpv} \tag{III.31}$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance :

$$G = \frac{Ipv}{Vpv} \tag{III.32}$$

$$\Delta G = \frac{dIpv}{dVpv} \tag{III.33}$$

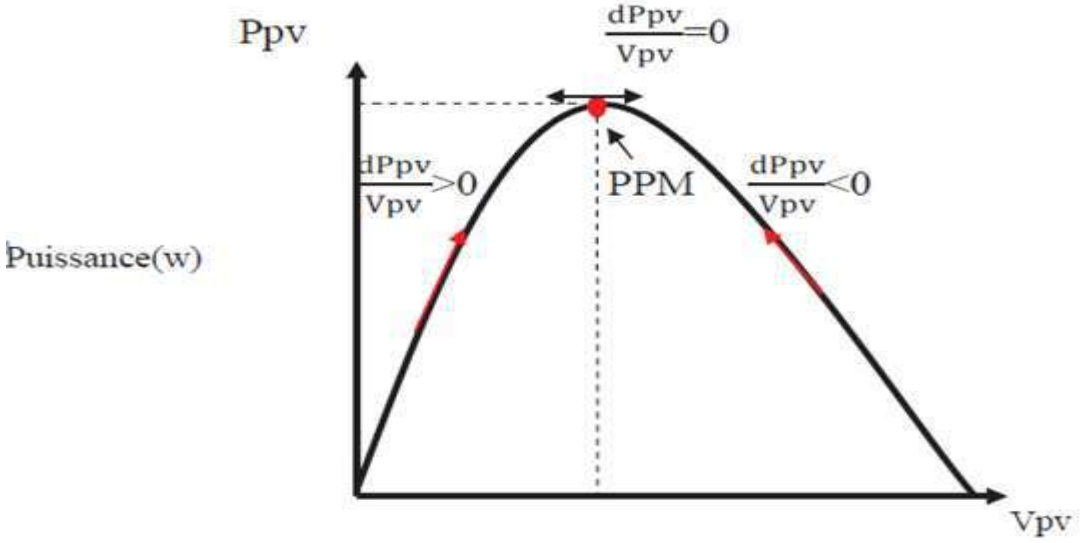


Figure III.19 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance.

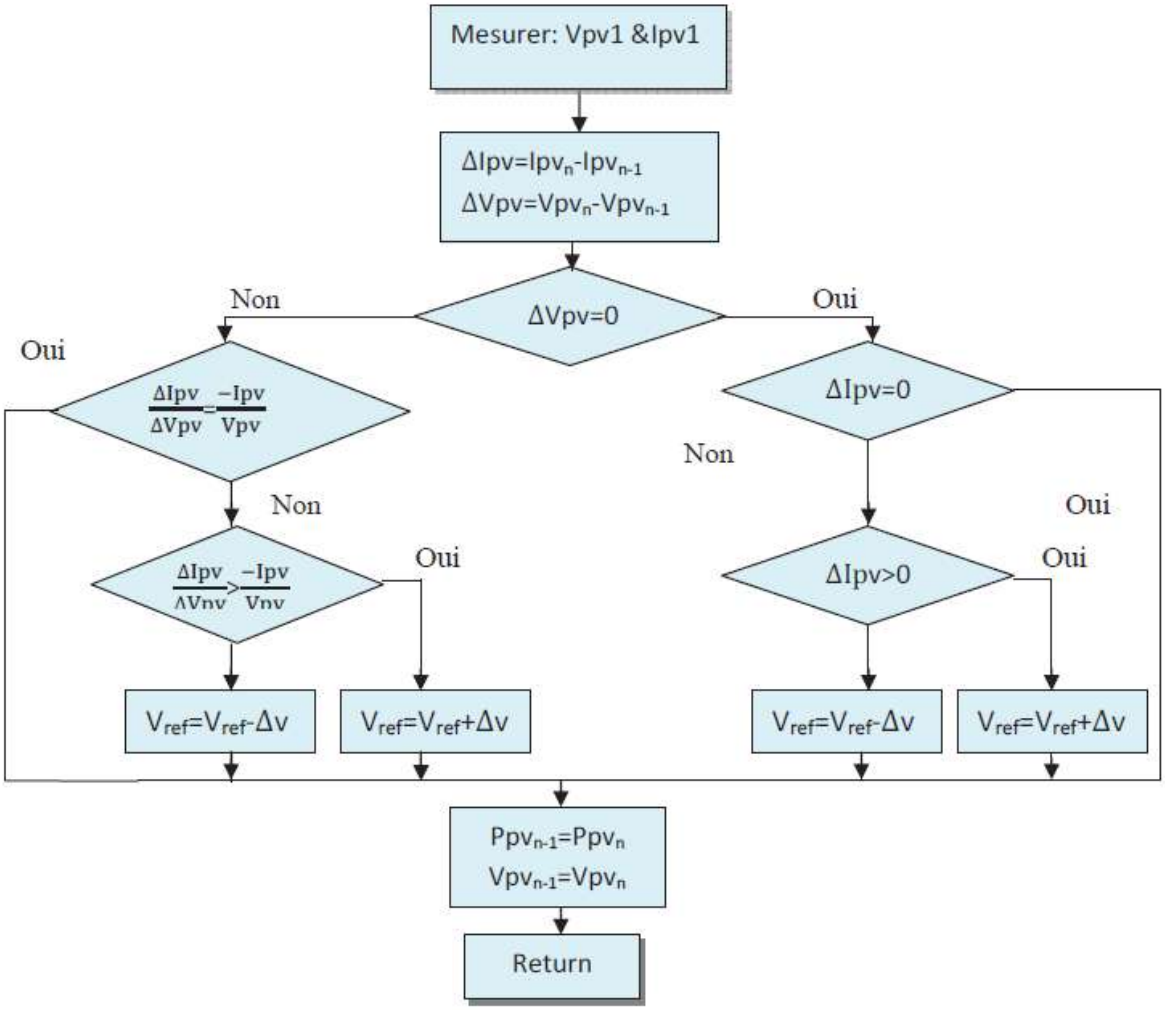


Figure III.20: Algorithme d'incrémentation de la conductance.

On peut écrire aussi :

$\frac{dPpv}{dVpv} > 0$ **:** Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dPpv}{dVpv} = \mathbf{0}$ **:** Le point de fonctionnement sur le PPM**.**

$\frac{dPpv}{dVpv} < 0$ **:** Le point de fonctionnement est droit de PPM.

b) La méthode Perturbe & Observe (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte Ainsi, comme l'illustre la figure (III.21), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un

accroissement de la puissanceP_{PV}, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

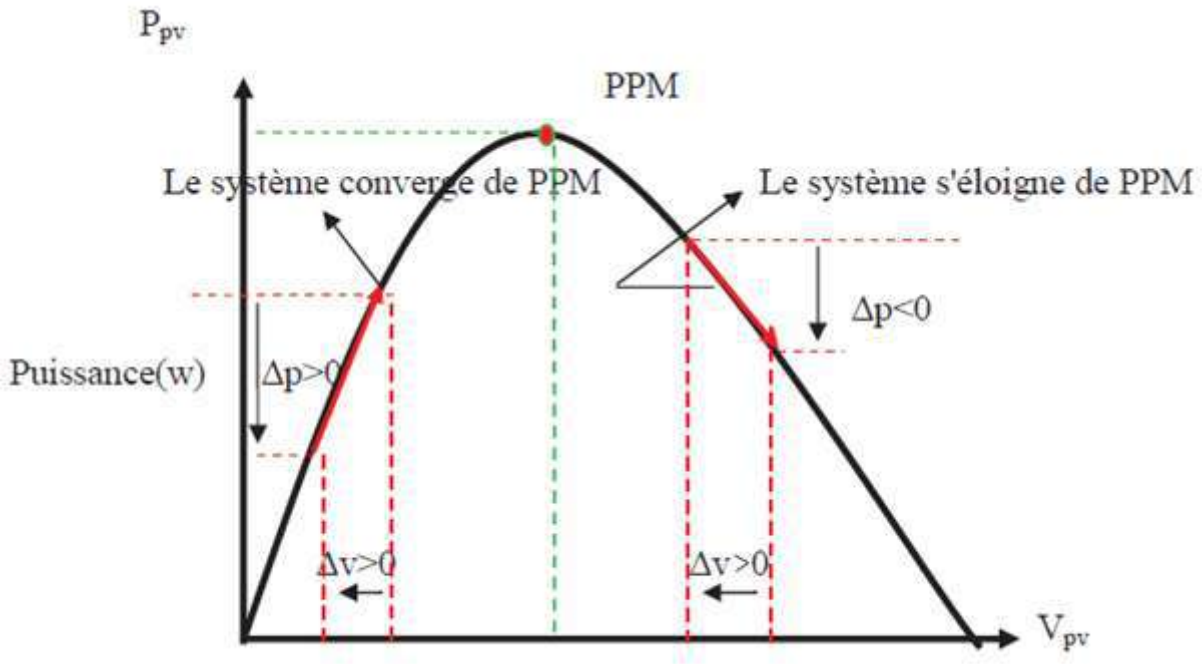


Figure III.21: Schéma de converge vers le PPM par P&O.

La figure (III.22) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [22].

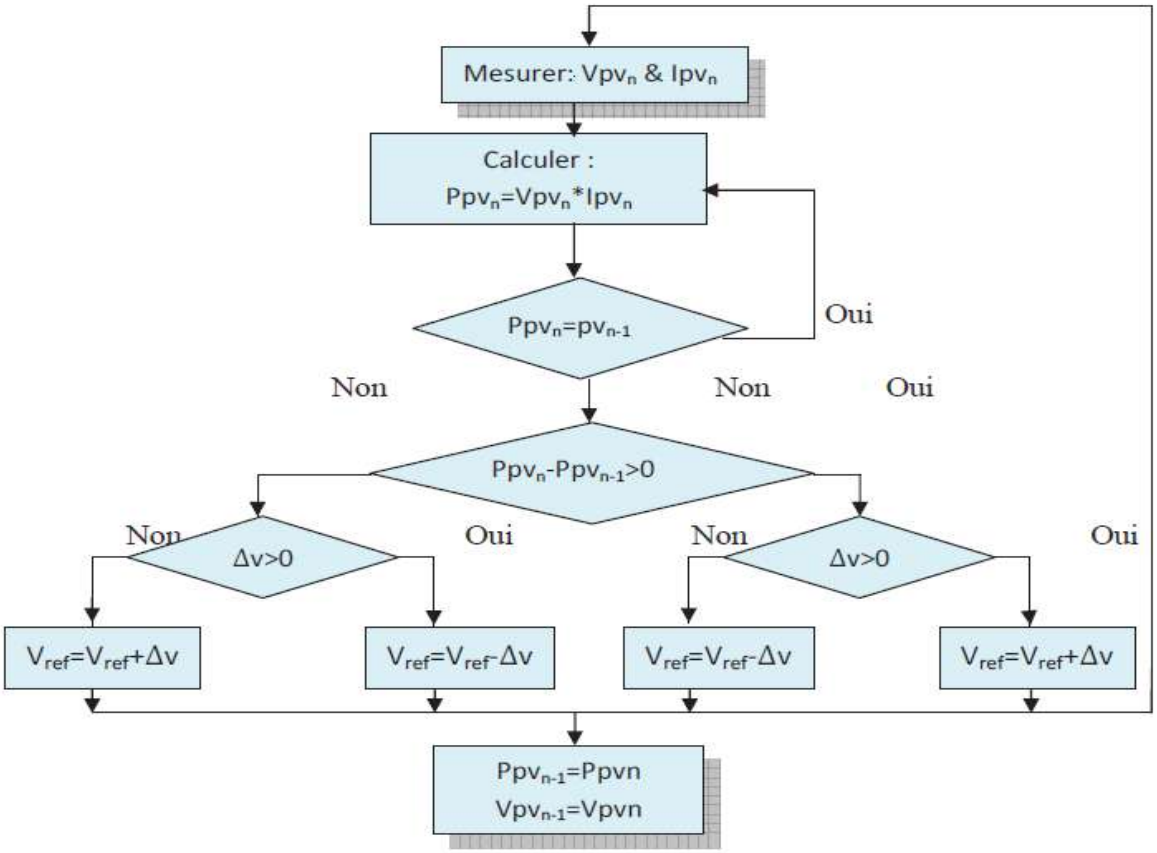


Figure III.22 : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O.

Telle que :

Ppv_n : la nouvelle puissance

Ppv_{n-1} : l'enceint puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta v = V_{PV_n} - V_{PV_{n-1}} \quad \text{(III.34)}$$

$$\Delta p = P_{PV_n} - P_{PV_{n-1}} \quad \text{(III.35)}$$

- **Résultats de la simulation avec MATLAB :**

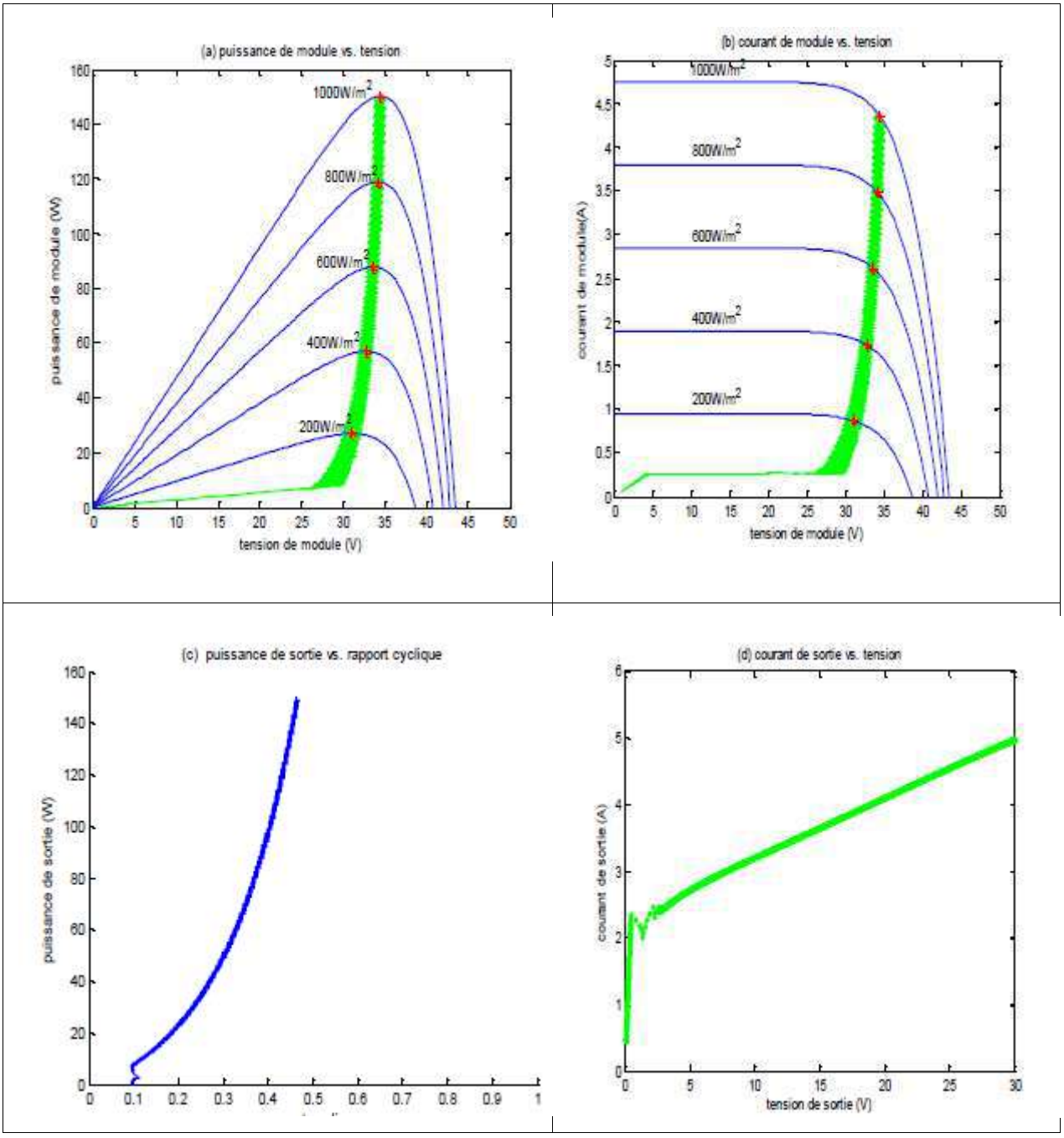


Figure III.23 : Les simulation du MPPT (P&O) avec motopompe à C.C *(20 à 1000W/m2, à 25C0)*

La simulation est effectuée d'une façon similaire à celle de la charge résistive. L'irradiation est augmentée linéairement de 20W/m² jusqu'à 1000W/m2 avec la même

échelle de 0.3W/m2 par échantillon. Les figures(III.23) (a) et (b) montrent que la trace du point opérationnel reste près des PPM dans toute la simulation. La figure(III.23) (c) donne la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et de son rapport cyclique.

La figure(III.23) (d) représente le rapport entre le courant et la tension du convertisseur. On remarque que le courant monte rapidement une fois le moteur alimenté ce qui correspond bien au courant de démarrage.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, Le principe de fonctionnement des convertisseurs DC/DC ont été développée, donc on a vu le convertisseur buck, boost et enfin le convertisseur buck-boost. On a aussi donné une description du régulateur MPPT qui est un convertisseur de puissance (DC/DC) commandé par des algorithmes MPPT. On a présenté ainsi la méthode incrémentation de l'inductance et méthode de perturbation et observation c'est la méthode qui on a utilisé dans notre mémoire.

IV.1. Introduction :

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Le choix du pas de l'algorithme P&O a toujours été très critique car il peut affecter de façon significative les performances globales de l'algorithme. Par conséquent, l'algorithme P&O avec la logique floue est proposé avec un pas variable afin d'éliminer les oscillations à l'état d'équilibre de l'algorithme P&O classique. Ce chapitre donne la simulation du suiveur du point de puissance maximale (MPPT). Les méthodes utilisées sont la méthode P&O conventionnel et les deux méthodes P&O floues proposées.

IV.2. Généralité sur la logique floue:

Les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues, soit parce que nous avons un doute sur leur validité ou encore parce que nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement. Donc il s'est avéré nécessaire de développer un nouveau type de raisonnement, le raisonnement approché, qui permettra de traiter mathématiquement l'imprécis et l'incertain. Le premier à avoir souligner ces possibilités de développement est Lotfi. A. Zadeh, qui dés 1965 introduit la théorie de la logique floue [23].

La logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles [24]. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous. Introduite par Zadeh, cette théorie est une extension de la théorie des ensembles classiques dans le sens où elle permet d'exprimer l'idée d'appartenance partielle d'un élément à un ensemble. C'est une théorie formelle et mathématique puisque, en partant du notion de la fonction d'appartenance, Zadeh a proposé des concepts, des techniques et des méthodes formellement rigoureuses pour recueillir, représenter et traiter des connaissances et des données floues, c'est-à-dire contenant de l'imprécision, de l'incertitude ou de la subjectivité.

IV.2.1. Commande par logique floue :

En automatique, la majorité des approches de la commande non linéaire exige la disponibilité d'un modèle mathématique du système et ceci n'est pas toujours réalisable à cause de l'imprécision et l'incertitude liées aux paramètres mal connus, difficilement identifiables et/ou

des dynamiques négligées. D'autre part, les méthodes de modélisation traditionnelles s'avèrent souvent incapables de refléter le comportement global d'un système donné.

L'utilisation de régulateurs basés sur l'expertise humaine (régulateurs flous) peut être une alternative à la commande de ce type de systèmes. Leur succès réside, en grande partie, dans leur capacité à traduire une stratégie de commande d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques «***Si*** … ***Alors***» facilement interprétables. Ils présentent l'avantage de tolérer l'incertitude du modèle et compensent son effet. Les incertitudes, les non linéarités négligées et les différentes contraintes peuvent être ainsi compensées.

IV.2.2.Description générale d'un régulateur flou :

Les régulateurs flous ont connu beaucoup de succès et sont devenus un sujet principal dans le domaine de la recherche des systèmes intelligents [24] ,[25],[26],[27],[28],[29]. Un régulateur flou se distingue d'un contrôleur classique par le fait que l'approche par logique floue synthétise une loi de commande à partir de l'expertise d'un opérateur humain. Alors que, les approches classiques de l'automatique consistent à élaborer une loi de commande à partir d'un modèle mathématique du procédé.

En général, la figure (IV.1) représente la configuration interne d'un régulateur par logique floue. Cette présentation se scinde en quatre blocs principaux :

- Interface de fuzzification
- Base de règle
- Mécanisme d'inférence
- Interface de défuzzification

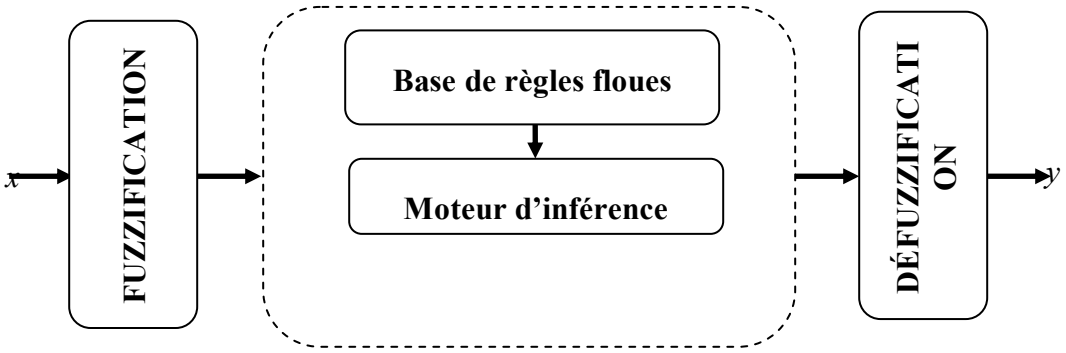


Figure IV.1 : Schéma général d'un régulateur flou type-1.

IV.2.2.1. Fuzzification :

L'entrée x varie dans un domaine appelé univers de discours X, divisé en un nombre fini de sous-ensembles flous de telle sorte que dans chaque zone il y a une situation dominante. Afin de faciliter le traitement numérique et l'utilisation de ces sous-ensembles, nous les décrirons par des fonctions convexes dites d'appartenance. Elles admettent comme argument la position de x dans l'univers de discours et comme sortie le degré d'appartenance de x à la situation décrite par la fonction.

Il est à noter qu'il existe une autre forme de fonctions d'appartenance appelée singleton qui est largement utilisée dans les systèmes flous de type Takagi-Sugeno (T-S). Cette fonction est définie par : $\mu(x)=1$ si $x=x_0$ et $\mu(x)=0$ *si* $x\neq x_0$ où l'ensemble se limite à un seul élément $E=\{x_0\}$.

La fuzzification proprement dite consiste à la conversion des grandeurs physiques en des variables linguistiques et à y définir leurs fonctions d'appartenances. Il s'agit d'une projection de la variable physique sur les ensembles flous qui la caractérisent. Cette opération permet d'avoir une mesure précise sur le degré d'appartenance de la variable d'entrée à chaque ensemble flou.

IV.2.2.2. Base de règle :

Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du système flou en fonction des signaux d'entrée, elles sont exprimées sous la forme « ***Si***– ***Alors*** ». En générale, nous distinguons classiquement deux grandes familles de systèmes flous: systèmes flous à conclusions symboliques (systèmes de Mamdani) [30] et systèmes flous à conclusion fonctionnelle (systèmes flous de Takagi-Sugeno).

Avec l'approche de Mamdani, la sortie du système flou est un sous ensemble flou, de la forme :

$$R_1 : \textbf{\textit{Si}}\ x_1\ est\ \mathbb{A}_{11}\ \textbf{\textit{Et}}.....\textbf{\textit{Et}}\ x_n\ est\ \mathbb{A}_{1n}\ \textbf{\textit{Alors}}\ y\ est\ \mathbb{B}_1 \qquad \text{(IV.1)}$$

Avec l'approche de Takagi-Sugeno, la sortie du système flou est représentée par un polynôme ou encore un modèle flou dont les variables sont les états du système $(x_1,...,x_n)$.

$$R_1 : \textbf{\textit{Si}}\ x_1\ est\ \mathbb{A}_{11}\ \textbf{\textit{Et}}.....\textbf{\textit{Et}}\ x_n\ est\ \mathbb{A}_{1n}\ \textbf{\textit{Alors}}\quad y=f_i(x_1,...,x_n) \qquad \text{(IV.2)}$$

IV.2.2.3. Moteur d'inférence :

Les connaissances de l'opérateur humain sur un processus donné sont transformées en un ensemble de règles floues de la forme : ***Si*** prémisse ***Alors*** conclusion. La prémisse est un ensemble de conditions liées entre elles par des opérateurs flous. La partie conclusion peut être une description d'évolution dans le cas d'identification ou une action dans le cas de commande. Dans ces règles floues interviennent les opérateurs

«***ET***» et «***OU***». L'opérateur «***ET***» s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur «***OU***» lie les différentes règles. L'interprétation de ces operateurs dépend directement du type du moteur d'inférence adopté, à titre d'exemple, nous pouvons citer :

- **Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani) :**

Au niveau de la condition, l'opérateur «***ET***» est formuler par le minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par «***Alors***», est réalisée par la formation du minimum. Enfin l'opérateur «***OU***», qui lie les différentes règles, est réalisé par la formation du maximum [23].

- **Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen) :**

Au niveau de la condition, l'opérateur «***ET***» est formuler par le produit. La conclusion dans chaque règle, introduite par «***Alors***», est réalisée par la formation du produit. L'opérateur «***OU***» qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [23].

- **Méthode de Sugeno :**

L'opérateur «***ET***» est formulé par le produit ou le minimum. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue [31].

IV.2.2.*4*. Interface de défuzzification :

C'est une interface de laquelle il résulte une valeur précise à partir de descriptions floues. Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont [23], [32] :

- Méthode du maximum.
- Méthode de la moyenne des maxima.
- Méthode du centre de gravité.
- Méthode des hauteurs pondérées.

- **Méthode du maximum :**

Cette méthode génère une commande qui correspond à la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence:

$$\bar{y} = Max\mu_{res}(y) \qquad \text{(IV.3)}$$

- **Méthode des moyennes des maximal :**

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

❖ **Méthode du centre de gravité :**

La méthode du centre de gravité est une des méthodes les plus mentionnées dans la littérature. L'abscisse du centre de gravité est déterminée par [23], [33] :

$$\bar{y} = \frac{\int y \mu_{res}(y) dy}{\int \mu_{res}(y) dy} \tag{IV.4}$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface. La détermination du centre de gravité nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel.

❖ **Méthode des hauteurs pondérées :**

Au fond, cette méthode n'est qu'un cas particulier de la méthode du centre de gravité. Dans ce cas, les fonctions d'appartenance pour la variable de sortie sont représentées par des singletons, cette méthode simplifie la détermination de l'abscisse du centre de gravité [23].

L'abscisse du centre de gravité se calcule telle que :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \mu_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^{M} \mu_i} \tag{IV.5}$$

où :

M : Nombre de règles,

μ_i : représente le degré de confiance où d'activation de la règle R_i,

$\bar{y}_i$: est l'abscisse du centre de gravité de l'ensemble flou de la variable de sortie associée à la règle R_i .

Cette méthode présente une simplicité notable dans la détermination de l'abscisse du centre de gravité.

IV.3. L'algorithme P&O avec la logique floue :

L'algorithme P&O est largement utilisé dans les systèmes de production photovoltaïque en raison de sa facilité de mise en œuvre et son faible coût. Cependant, sa principale limitation est le compromis entre la réponse dynamique rapide et l'oscillation à l'état d'équilibre. Généralement, l'algorithme P&O est exécuté avec un pas fixe. Si ce pas est défini comme étant grand, l'algorithme aura une réponse plus rapide aux conditions dynamiques pour suivre le MPP, cependant, l'algorithme avec un grand pas entraîne une oscillation excessive autour du vrai MPP dans des conditions stables, conduisant à une plus faible efficacité d'extraction de puissance. Cette situation est inversée lorsque

le MPPT P&O fonctionne avec des pas plus petits. Par conséquent, le suivi du MPP avec un pas fixe ne fournit pas un compromis satisfaisant entre l'oscillation à l'état stationnaire et l'état dynamique. L'efficacité de l'algorithme P&O dépend donc du pas. En particulier, il est difficile de trouver un pas optimal pour obtenir une réponse dynamique rapide de faible oscillation à l'état stationnaire. Comme solution à ce problème, on propose d'introduire un système flou pour générer le pas variable adéquat.

IV.3.1. L'algorithme P&O flou avec un pas variable :

L'algorithme MPPT proposé est basé sur l'algorithme P&O classique auquel, on a additionné un régulateur flou pour fournir un pas variable pour surmonter la limitation qui existe dans les implémentations de l'algorithme P&O classique. L'organigramme de l'algorithme de P&O modifié avec un pas variable est illustré à la Figure VI.2.

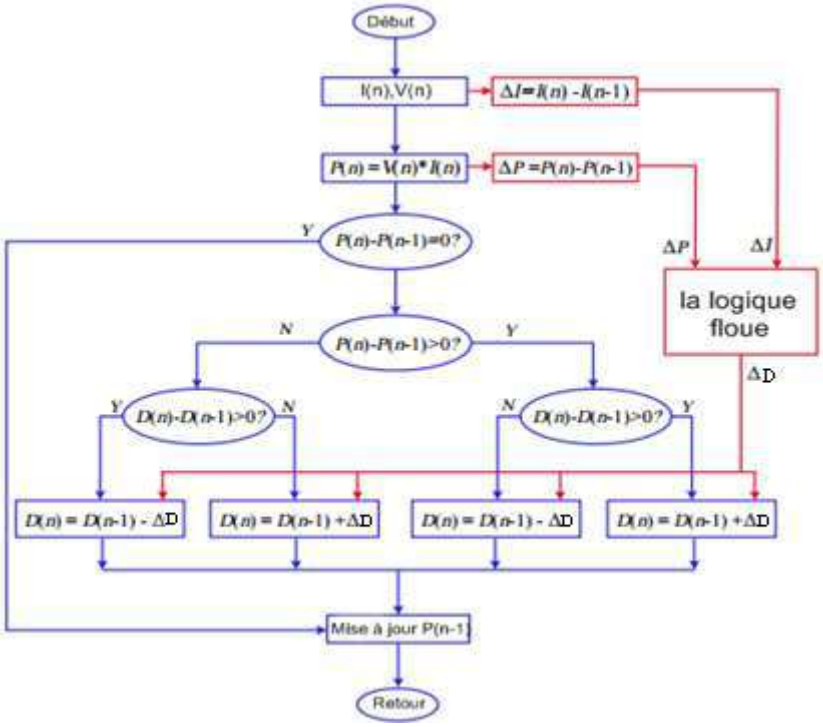


Figure IV.2 : L'organigramme de l'algorithme de P&O flou avec un pas variable[34].

Les entrées du régulateur flou sont la variation de la puissance du réseau PV(ΔP_{PV}) et la variation du courant du réseau PV(ΔI_{PV}), et la sortie du régulateur flou est la variation du pas ΔD de l'algorithme P&O.

Comme le FLC utilise la mesure de la tension et du courant du réseau photovoltaïque comme signaux d'entrée, il peut partager les mêmes capteurs avec le P&O pour réduire le coût et la complexité de la mise en œuvre du régulateur.

Le principe du P&O conventionnel a déjà été introduit, il fonctionne en perturbant périodiquement la tension de sortie PV (V_{PV}) et en calculant la variation de la puissance de sortie PV(P_{PV}) tout en comparant la puissance instantanée à celle du cycle de

perturbation précédent. Si le changement de puissance est positif, la perturbation continuera dans la même direction dans le prochain cycle de perturbation, sinon la perturbation se déplacera dans la direction opposée. En répétant ce processus, le point de fonctionnement se déplace progressivement vers le point de puissance maximum.

Le principe du bloc FLC adopté consiste à ajuster la valeur de la grandeur ΔD en fonction de la position du point de fonctionnement. Si le point de fonctionnement est proche du MPP, la valeur de la grandeur est ajustée à une valeur faible. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le MPP est atteint, par conséquent, le FLC définit la taille de pas à la valeur zéro. Par conséquent, cela garantit une réponse dynamique rapide avec diminution des oscillations autour du MPP lorsqu'un état stable est atteint[34].

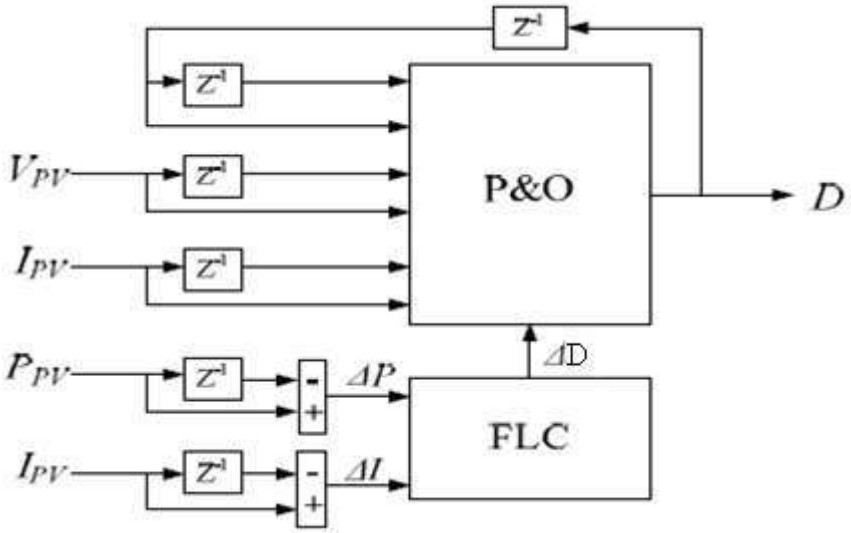


Figure IV.3 : schéma bloc de l'algorithme P&O flou[34].

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sortie utilisées dans ce modèle ont la même forme et sont représentées par les figures (VI.4- VI.5- VI.6). Toutes les fonctions d'appartenance sont exprimées par des fonctions triangulaires et sont constituées de cinq sous-ensembles flous qui sont notés NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZZ (zero), PS (Positive Small) et PB (Positive Big) [34].

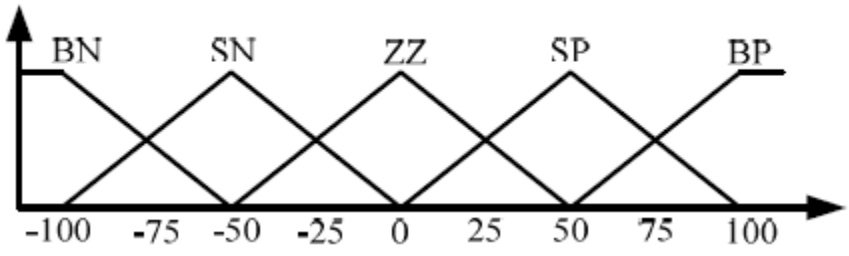


Figure IV.4 : Fonctions d'appartenance de la 1ère variable d'entrée (ΔP_{pv})

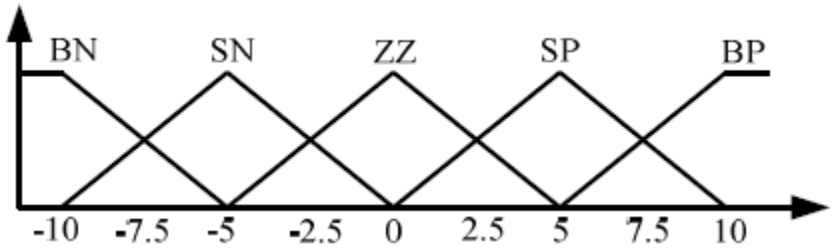


Figure IV.5 : Fonctions d'appartenance de la 2ème variable d'entrée (ΔI_{pv}).

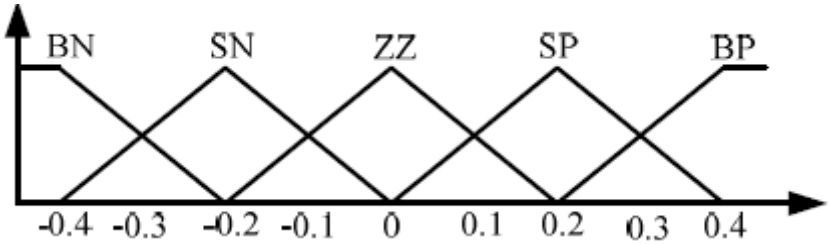


Figure IV.6 : Fonctions d'appartenance de la variable de sortie (ΔS).

La base de règles floues est une collection de règles si alors. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5, les règles d'inférence floue du FLC sont constituées de 25 règles, comme le montre le tableau V.1.

Tableau VI.1 : Les règles de base de la logique floue[34]

	ΔP_{PV}				
ΔI_{PV}	NB	NS	ZZ	PS	PB
NB	NB	NS	NS	ZZ	ZZ
NS	NS	ZZ	ZZ	ZZ	PS
ZZ	ZZ	ZZ	ZZ	PS	PS
PS	ZZ	PS	PS	PS	PB
PB	PS	PS	PB	PB	PB

IV.3.1.1. Résultat de simulation de la méthode P&O Flou :

La simulation est effectuée sous une irradiation linéairement croissante de 20W/m^2 à 1000W/m^2 avec un pas de 0.3W/m^2 par échantillon.

La figure (IV.7) (a) et (b) montrent clairement que la trace du point opérationnel reste près des PPM pendant la simulation. La figure(IV.7) (c) donne la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et de son rapport cyclique. La figure(IV.7) (d) représente la caractéristique courant-tension de la motopompe. On remarque que le

courant monte rapidement une fois le moteur alimenté ce qui correspond bien au courant de démarrage. Dès que le moteur développe sa fcem, le courant diminue puis ré-augmente lentement avec a fur et à mesure que la tension augmente.

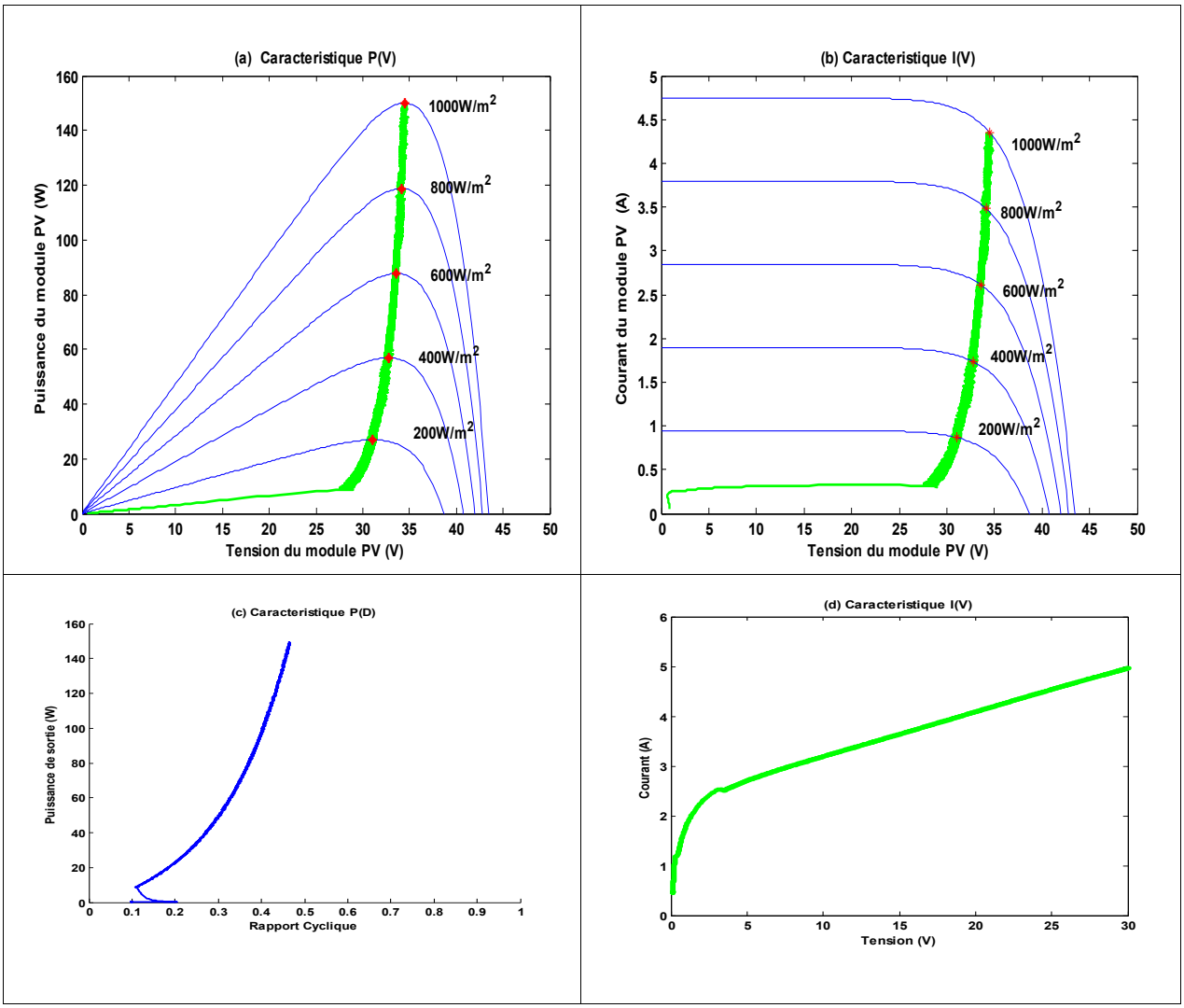


Figure IV.7 : Simulation du MPPT (P&O Flou) avec la motopompe à C.C (20 à 1000W/m^2, à 25C^0)

Les performances du régulateur P&O Flou est très satisfaisante cependant, avec les 25 règles utilisées, on a un temps de calcul important pour trouver la pas à chaque variation.

IV.3.2. l'algorithme P&O flou simplifié:

Dans ce travail, on propose un algorithme P&O MPPT simplifié avec un pas variable, qui peut être implémenté en utilisant la commande par logique floue comme montré dans la figure IV.8.

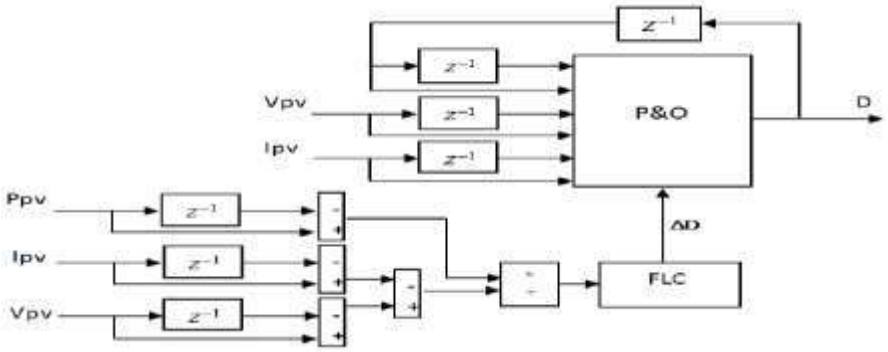


Figure IV.8 : Schéma bloc de l'algorithme P&O simplifié[35].

Les fonctions d'appartenance de l'entrée $|dP/(dV-dI)|$ sont exprimées par des fonctions triangulaires et les ensembles flous de sortie sont définis comme des singletons flous [35].

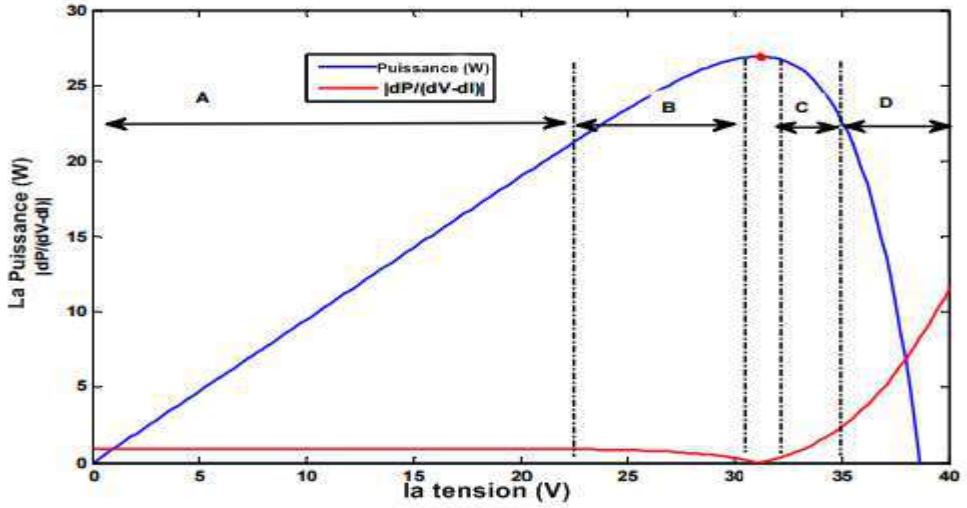


Figure IV.9 : Caractéristiques P-V et $|dP/(dV-dI)|$-V

Nous pouvons voir à partir de la figure IV.8, que la variation du rapport cyclique dans la méthode MPPT devient dynamique (grand pas à l'extrême gauche et à l'extrême droite du MPP, toute fois très petit pas près du MPP et égal à zéro au MPP). Le principe de base de pas variable proposée est illustré dans le tableau VI.2 et la figure IV.9 [35] .

Tableau IV.2 : Principe de la méthode P&O Amélioré avec une taille de pas variable.

Entrée	MPP Gauche		À MPP	MPP	
$\|dP/(dV-dI)\|$	Loin le MPP grand pas (Figure9.A)	Près du MPP Petit pas (Figure9.B)	0	Près du MPP Petit pas (Figure9.C)	Loin le MPP Grand pas (Figure9.D)

IV.3.2.1. le résultat de simulation de la méthode P&O flou simplifié :

La simulation est effectuée d'une façon similaire à celle de la méthode P&O flou. L'irradiation est augmentée linéairement de 20W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2 avec un pas de 0.3W/m^2 par échantillon. Les figures(IV.10) (a) et (b) montrent que la trace du point opérationnel reste près des PPM dans toute la simulation. La figure(IV.10) (c) donne la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et de son rapport cyclique. La figure (IV.10) (d) représente la caractéristique courant-tension de la motopompe.

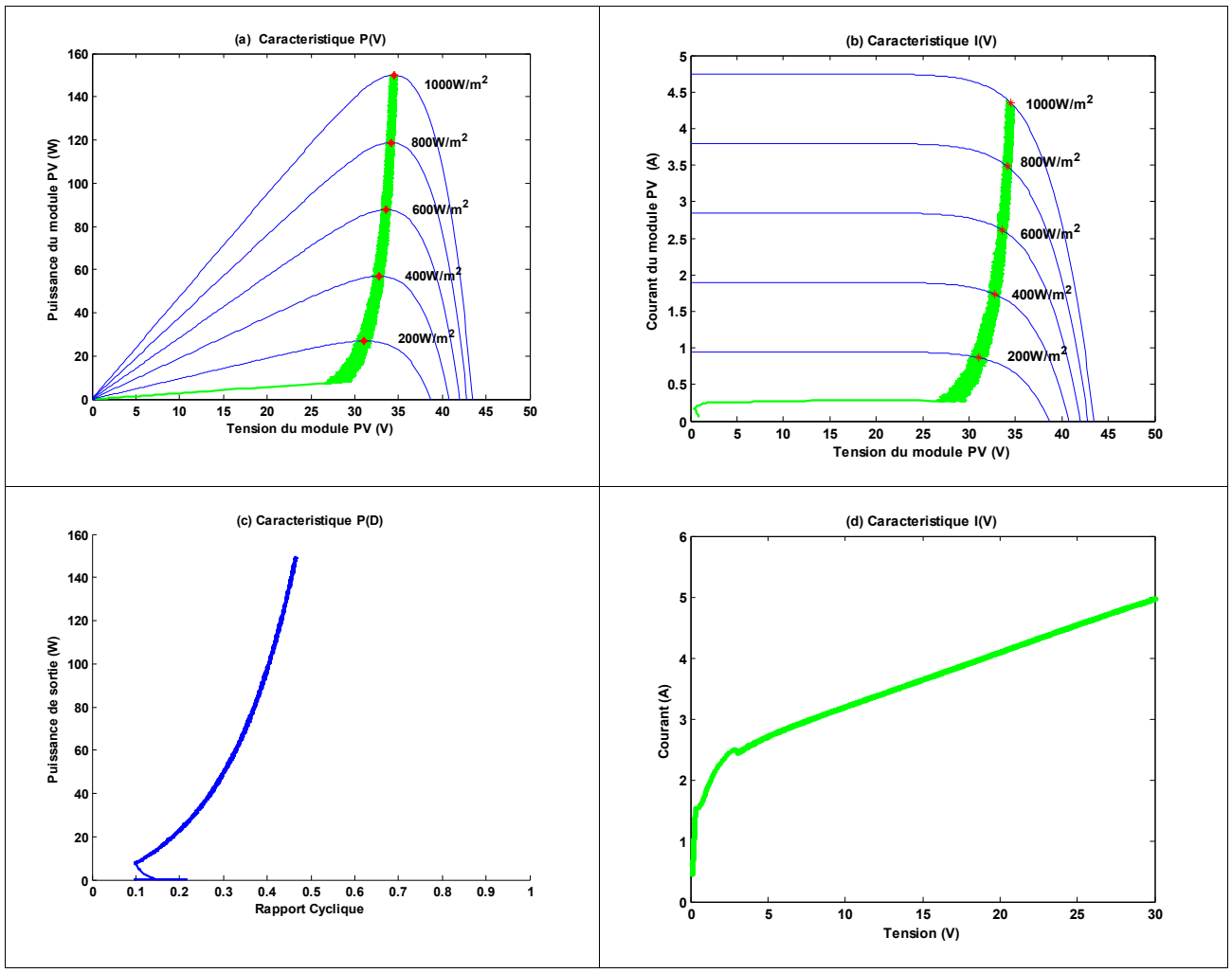


Figure IV.10 : Simulation du MPPT (P&O simplifié) avec la motopompe à C.C (20 à 1000W/m^2, à 25C^0)

IV.4. Comparaison entre les différentes méthodes coté oscillations autour des points de fonctionnement :

IV.4.1. Comparaison entre P&O et P&O flou (P&O modifié) :

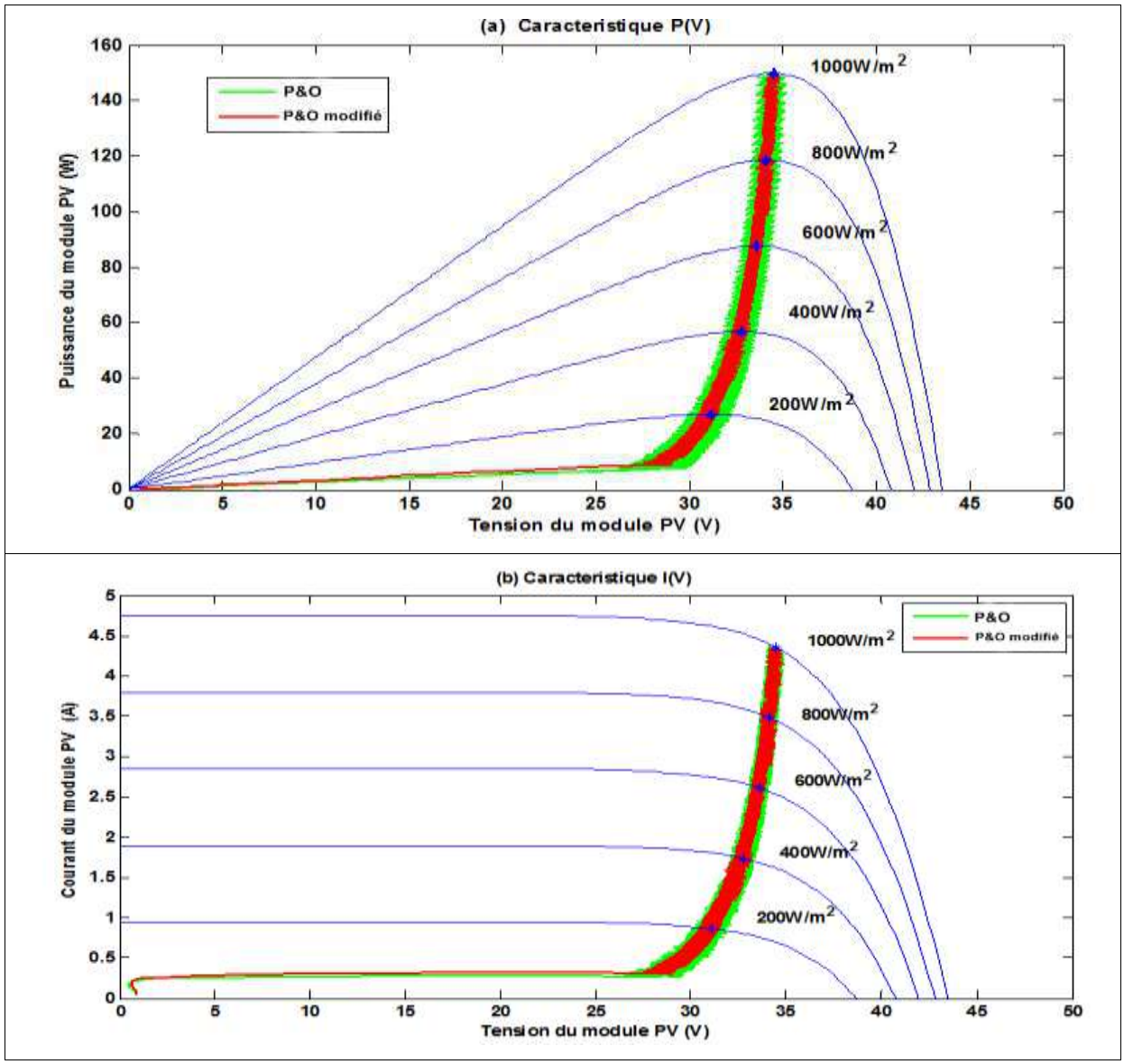


Figure IV.11. Comparaison entre P&O et P&O flou (P&O modifié).

Comme on voie clairement dans la figure (IV.11) que les oscillations autour du PPM avec la méthode P&O est plus large par rapport aux oscillations avec la méthode P&O flou (P&O modifié).

IV.4.2. Comparaison P&O et P&O flou simplifie :

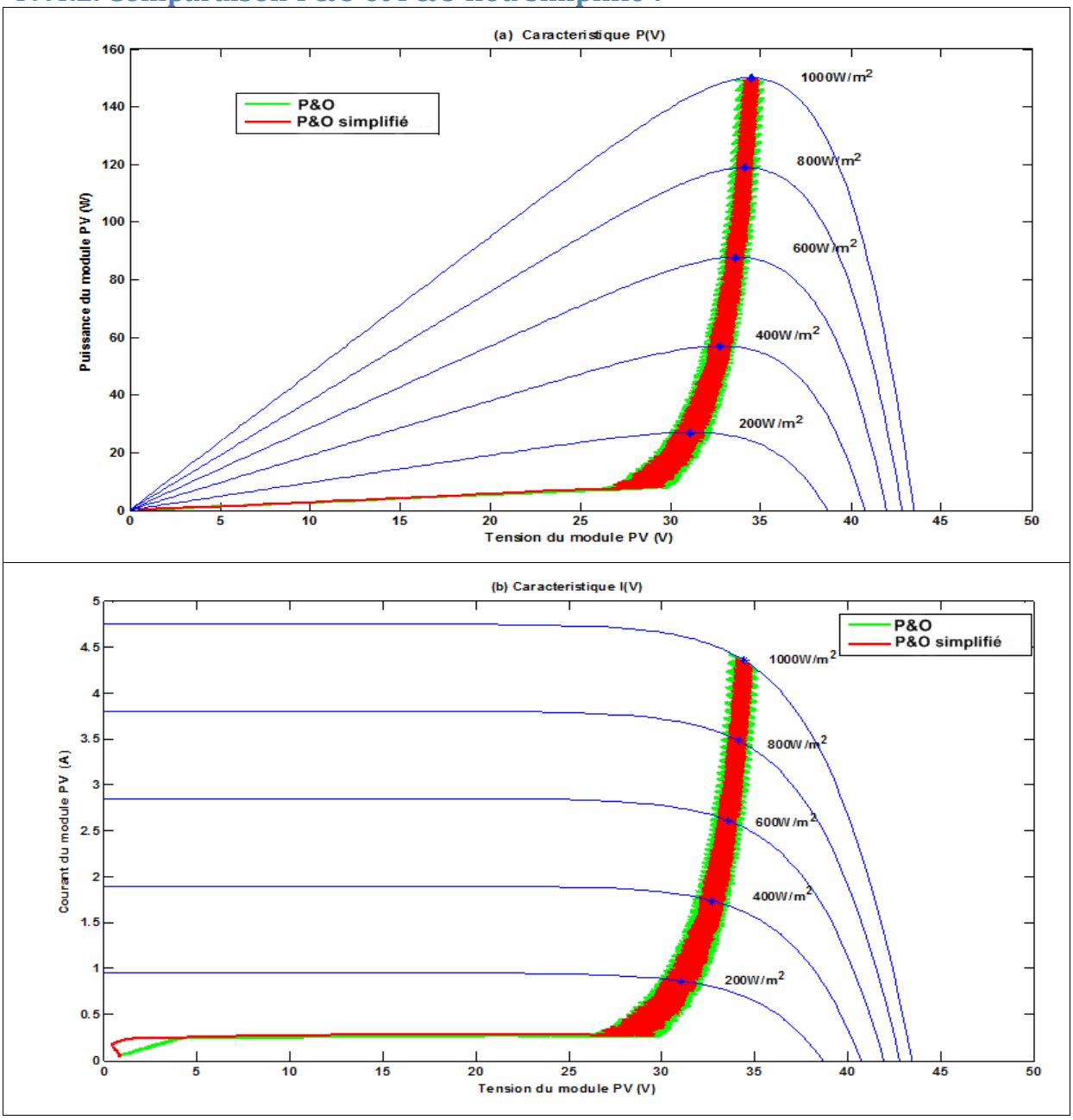


Figure IV.12. Comparaison P&O et P&O flou simplifie.

On remarque dans la figure (IV.12) que les oscillations autour du PPM avec la méthode P&O est large par rapport aux oscillations avec la méthode P&O flou simplifiée.

IV.4.3. Comparaison P&O flou et P&O flou simplifié :

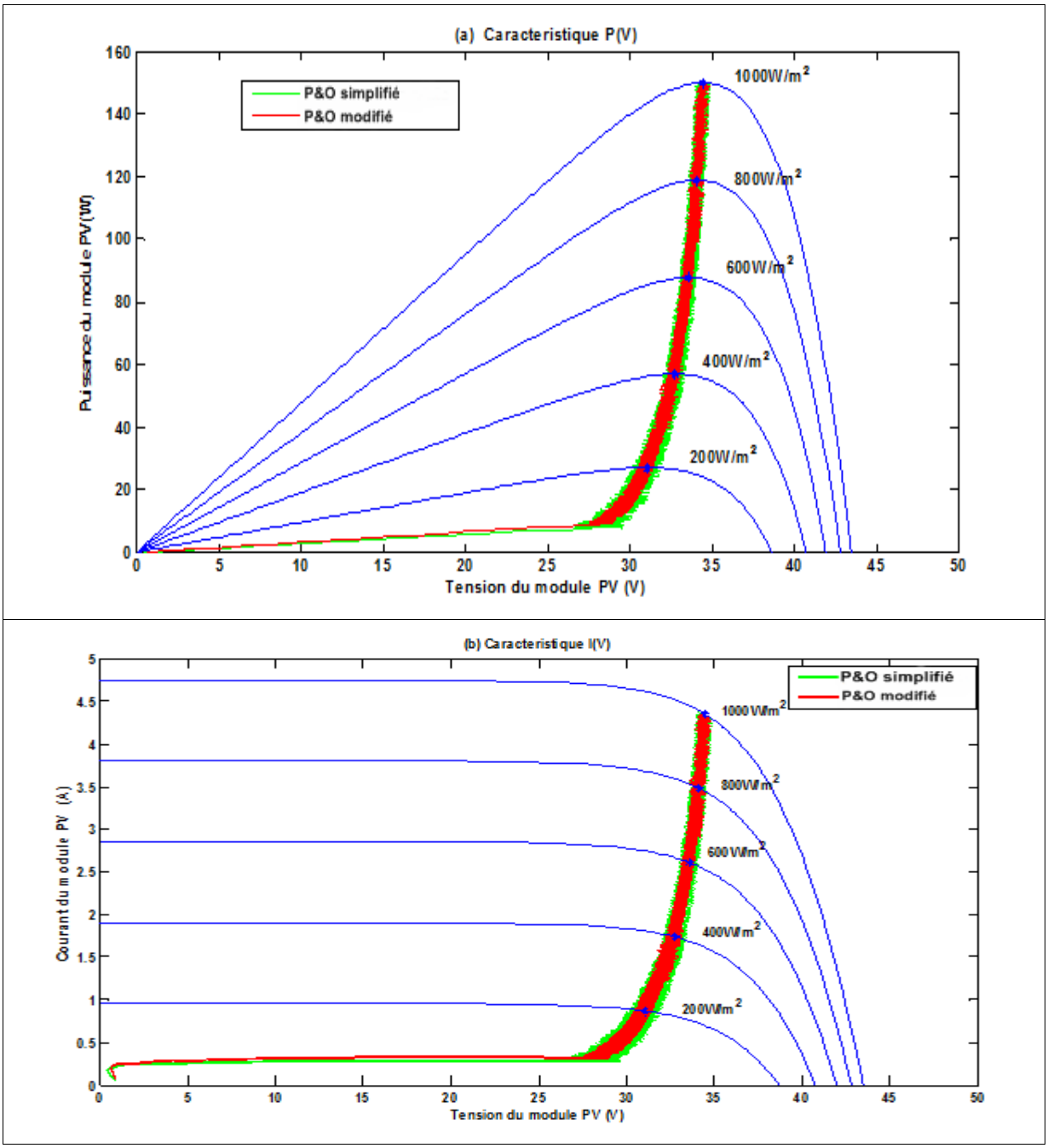


Figure IV.13. Comparaison P&O flou (P&O flou modifié) et P&O simplifié.

La figure (IV.13) nous montre que les oscillations autour de point PPM avec la méthode P&O flou (P&O modifié) est petite par rapport aux oscillations avec la méthode P&O simplifié mais cette dernier est plus rapide que la première.

IV.5.Comparaison entre les puissances des systèmes de pompages commandés avec les différentes méthodes MPPT :

Les puissances des systèmes de pompage simulés dans la section précédente sont comparées à la puissance d'un système PV couplé directement à la charge (système de pompage sans MPPT). Les données d'irradiante utilisées ici sont les mesures d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie (Tableau IV.3). L'énergie électrique totale produite au cours d'une période de 12 heures est calculée.

Tableau IV.3: La puissance et le rendement du système de pompage avec et sans MPPT d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie

	P&O	**P&O Flou**	**P&O Flou Simplifié**	**Sans MPPT**
Énergie totale (Théorique Maximale)	1.1521KWh	1.1521KWh	1.1521KWh	1.1521KWh
Énergie totale (Simulation)	1.1509 KWh	1.1517KWh	1.1516KWh	0.6294 KWh
Le rendement	99.8976%	99.9677 %	99.9578%	54.6307%

Les résultats de la comparaison montrent que le système PV couplé directement à la charge a un rendement médiocre en raison de la désadaptation entre le module photovoltaïque et la charge (moteur à courant continu de la pompe).

En supposant que le convertisseur continu-continu a un rendement de plus de 90%, nous remarquons que le système avec P&O classique peut utiliser plus de 99.897% de sa capacité.

Le système peut augmenter le rendement global de plus de 45% par rapport au système sans MPPT (cas d'un système de pompage en une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie). Cependant avec les méthodes P&O améliorées, on trouve qu'il y'à une nette amélioration par rapport à la méthode P&O classique.

Une autre série de simulations (Tableau IV.4) fournit une comparaison entre les méthodes présentées en termes de débits d'eau pompée.

Tableau IV.4: Débits de la pompe à eau d'un système PV pour une période de 12 heures simulé avec les données d'irradiation d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie

	P&O	P&O modifié	P&O flou Simplifié	Sans MPPT
Énergie totale (Théorique Maximale)	3116.6Kl	3119.1Kl	3118.7Kl	1841.6Kl

Les résultats montrent que la méthode P&O flou est la méthode la plus performante.

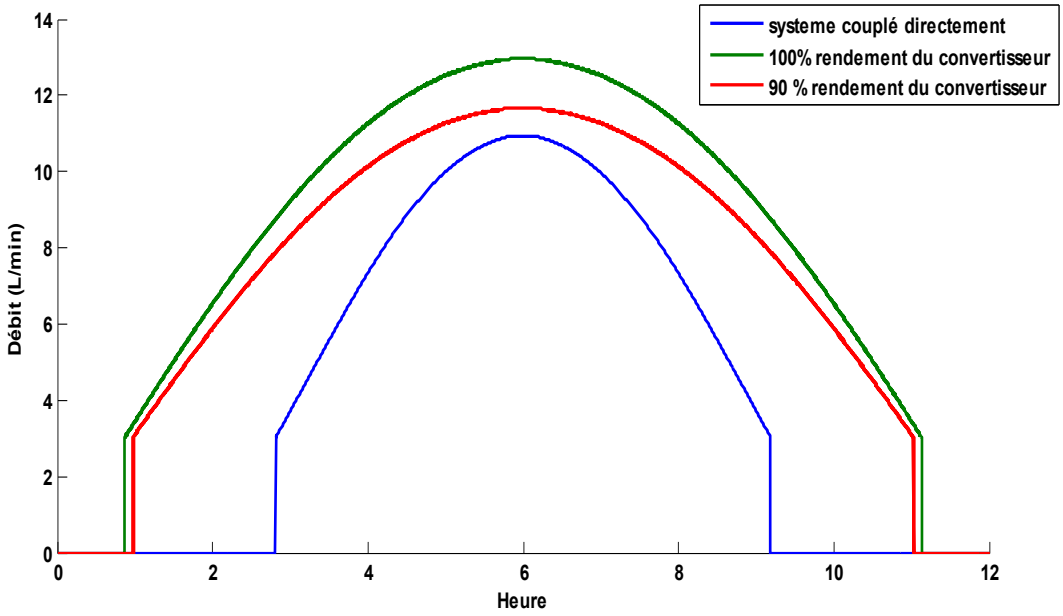


Figure IV.15. Débits de la pompe à eau d'un système PV commandé par la méthode P&O flou pour une période de 12 heures
Simulé avec les données d'irradiation d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a commencé par présenter la logique floue, donc on a vu la commande par la logique floue. On a aussi donné une description générale d'un régulateur flou. On a proposés et discutés en détail les algorithmes P&O flou et P&O flou simplifié avec un pas variable comme un moyen de surmonter la limitation de l'algorithme de P&O conventionnel et d'augmenter son efficacité globale surtout dans des conditions météorologiques instables.

Finalement, on a simulé le système de pompage photovoltaïque en fonction de l'influence du changement de l'éclairement à Tindouf, en Algérie avec les différentes méthodes. Une comparaison entre les différentes méthodes cotées oscillations autour des points de fonctionnement et aussi une comparaison entre les performances de ces systèmes en termes d'énergie totale produite par le système photovoltaïque ainsi que le volume total de l'eau pompée par jour est effectuée ont montré clairement que les algorithmes P&O flou peuvent développer de façon très significative les performances du système de pompage PV.

CONCLUSION GENERALE

Notre objectif dans ce travail est d'apporter des améliorations dans les performances des systèmes de pompage photovoltaïque. Ces systèmes se présentent comme une solution idéale pour l'alimentation en eau dans les régions isolées.

Dans ce contexte, nous avons commencé dans le chapitre 1 par donner une étude du phénomène photovoltaïque, des semi-conducteurs et des différents types de rayonnements sans omettre le gisement solaire en Algérie.

Au deuxième chapitre, l'étude des générateurs photovoltaïques a permis la connaissance du comportement de ces derniers en fonction de l'éclairement et de la température et leurs effets sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement.

On a étudié au troisième chapitre, les différents composants d'un système photovoltaïque. On a commencé par le générateur photovoltaïque et quelques types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme le hacheur dévolteur (buck), le hacheur survolteur (boost) et le hacheur mixte dévolteur-survolteur (buck-boost). Aussi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT basées sur la contre réaction de la puissance, comme l'algorithme d'Incrémentation de l'Inductance « IncCond » et la méthode de Perturbation et Observation « P & O ». Cette dernière méthode est utilisée dans ce travail vue la simplicité quelle présente.

Dans le quatrième chapitre, on a présenté deux régulateurs P&O modifiés tel que le pas de variation du rapport cyclique n'est pas fixe comme le P&O classique mais variable. En effet, l'algorithme P&O classique est exécuté avec un pas fixe et le suivie du MMP avec un pas fixe ne fournie pas un comprimés satisfaisant entre l'oscillation à l'état stationnaire à la rapidité de l'état dynamique par conséquent une amélioration à été propose à cet algorithme en introduisant un régulateur flou pour fournir un pas du rapport cyclique variable.

De ce fait, on a appliqué un régulateur P&O flou à 25 règles et puis un autre régulateur flou simplifie à 5 règles à un système de pompage photovoltaïque. Ces systèmes flous ont pour objectif de fournir le pas de variation du rapport cyclique à l'algorithme P&O. Ensuite nous on a fait une comparaison entre les trois algorithmes du point de vue oscillation, puissance fournie et volume total de l'eau pompée par jour. Les résultats présentés ont montrés que l'utilisation des l'algorithmes P&O flou et P&O flou simplifié ont nettement amélioré le rendement de l'installation du pompage solaire.

Bibliographie

[1] : R. Jimmy et al. Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.

[2] : B. Flèche & D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.

[3]: S. Masoum et al., Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for Photovoltaic application, Vol. 19, September 2004.

[4] : A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.

[5] : A. Fortin, Analyse numérique pour ingénieurs, 2□□□ édition, Presses internationales polytechnique, 1996.

[6] : SOUILAMAS nesrine et KRIMI romaissa ; étude et simulation d'une structure à base de couches minces pour le photovoltaïque ; mémoire de master; université saad dahlab de blida ;2014.

[7] : ZHANG l, JIANG fd, feng jy (2003) sol energy mater sol cells 80:483

[8] : AL-BASSAM aai ;(1999) physica b 266:192

[9] : BOUCHRITTE wafa ; convertisseurs multi-niveaux dans les systèmes pv connectés Au réseau ; mémoire de master; université mohamed khider-biskra

[10] : **Docteur Merad née Mesri Mokhtaria et Professeur Cheknane Ali participation de M. Rougab Ilyes « Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications »** Université Amar Telidji – Laghouat– Faculté de Technologie Département d'Electronique.

[11] :Abdelhalim BORNI « Étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire ». Magister en électrotechnique. Université de Constantine 2009.

[12] :Dariga MEEKHUM. « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique ». Doctorat en génie électrique. Université de Toulouse.

[13] :Omar BOUKLI-HACEN « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique ». Magister en automatique. Université de Tlemcen 2011.

[14] : HELALI KAMELIA «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative» .mémoire de magister en électrotechnique. Université MOUMOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU. 2012

[15] : Énergie, Architecture et Climat-Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)-Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur :http://www.energieplus-lesite.be

[16] : Énergie solaire photovoltaique.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 2007

[17] : BELHADJA Med RAMZI, HAMANI KHADOUDJA «Conception et réalisation d'un système de pompage photovoltaïque» mémoire de master en Génie Électrique, Université Dr. Yahia Farés De MEDEA, 2016.

[18] : BELHADJ Mohammed « modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome »mémoire de magister; centre universitaire de BECHAR; 2008.

[19]: Mr Piekarz «Cours S1.0 L'énergie solaire photovoltaïque», Lycée Professionnel Jean Caillaud de Ruelle sur Touvre, publié le 05/10/2013

[20] : MEDJHED ADEL «extraction des paramètres des cellules solaires en utilisant le modèle à deux exponentielles »mémoire de magister; université Ferhat Abbas-Sétif ; 2011.

[21] :DJERIOU SALIM : «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone» mémoire de magister ;université université Ferhat Abbas-Sétif ; 2011.

[22 :]C. CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008

[**23] :Bülhler, H. : Réglage par logique floue**, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994

[24] : Tlemcani, A. : Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur ulticellulaire série . Thèse de doctorat, ENP d'Alger, 2007.

[25] : **Li,Y., Li, Y., Tong, S. :Adaptive fuzzy decentralized output feedback control for stochastic nonlinear large-scale systems.** Neurocomputing, Vol.83, pp. 38-46, 2012.

[26] : Hussain ,A. : Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants. Thèse de doctorat d'état, Université de Reims Champagne Ardenne, 2009

[27] : Kolokolov, Y. V. , Koschinsky, S. L. ,Hamzaoui, A. : Comparative study of the dynamics and overall performance of boost converter with conventional and fuzzy control in application to PFC, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2165-2171, 2004.

[28] : Carvajal, J. , Chen, G. , Ogmen, H. : Fuzzy PID controller: design performance evaluation and stability analysis. *Inter. Jour, of Information Sciences*, pp. 249-170, 2000.

[29] : Hamidia, F., Larabi,A., Boucherit, M.S. , Abbadi, A. :Fuzzy Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous, Doubly fed and Induction Motors. 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2013, pp.54-58 April 10-12, 2013, Paris, France.

[30] : Barkati, S .:Commande robuste par retour d'état d'une machine asynchrone. Thèse de magistère, ENP d'Alger, 1997

[31] : Sugeno, M. , Kang, G. T. :Structure identification of fuzzy model. ***Fuzzy sets and Systems,*** Vol. 28, pp.15-33, 1988.

[32] : Lee, C. C. : Fuzzy logic in control systems: Logic controller-Part I and Part II. *IEEE Trans. on System*, Vol.20, No.2, pp.404-414, 1990

[33] : Mendel. J. M .:Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial. ***Proc. IEEE***, Vol. 83, No.3, pp. 345-377,1995.