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

Université Dr. Yahia Farés De MEDEA

Faculté Des Sciences et Technologie

Département de Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme de
MASTER 2 en Génie Électrique

Option : *Energies solaire et Eolienne*

Thème

Conception et réalisation d'un système de pompage photovoltaïque

Préparé par :

- **Mr : BELHADJA M^{ed} RAMZI**
- **Melle : HAMANI KHADOUDJA**

Promoteur :
- Dr : A.ABBADI
- Dr : H.HOUASSINE

Promotion 2016

Remerciement

Au terme de la rédaction de ce mémoire, nous remercions Allah qui nous a toujours donné la force pour mener à terme cette recherche.

À tous ceux et celles qui nous ont encadrées et accompagnées, avec intelligence et abnégation, pendant tout notre cursus universitaire et à qui nous vouons respect et considération. Grâce à eux nous avons atteint l'autre rive, la rive du savoir et de la science.

Nos premiers remerciements vont d'abord à notre encadreuse Dr ABBADI AMEL, qui nous a accompagnées tout au long de notre mémoire. Sa disponibilité, sa générosité et son secours au cours de certains de nos moments difficiles ont été d'une très grande importance.

Nos sincères remerciements s'adressent également à tous les membres du jury.

Sans oublier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celui qui ma toujours encouragé et soutenu durant toutes mes années d'études. Merci pour ton amour et ta confiance totale...a toi très cher papa.

A Celle qui matant bercé, tant donné et tant enseigné, toi qui ma guidé dans le droit chemin, toi qui ma appris que rien n'est impossible...A toi ma maman.

Ma grand-mère que Dieu la garde et la protège.

À mes chère sœurs Khadidja et Fatima

À mes chères frères : Brahim , Nadhir et Adel

Ma belle sœur, mes neveu et nièce « FIDOU et MIRALE »

Tous les oncles, tantes, leurs épouses et époux

À mes ami(e)s Amine, Ilyes, Abdelah, Abderaouef, Mohamed…. Et à tous ceux et celles que nous avons eu la chance et le plaisir de rencontrer durant notre cursus universitaire

Un remerciement particulier à 3ami Halim pour son soutien et ses idées

A l'étudiante de notre groupe de travail : khadoudja

A tous ceux qui me sont chères.
A tous ceux qui m'aiment.
A tous ceux que j'aime.
Je dédie ce travail

Ramzi

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne peut

exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience

Illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en

Témoignage de mon profond amour et respect

Pour leurs grands sacrifices.

Mon cher frère et mes chères sœurs,

Pour leur grand amour

Et leur soutien qu'ils trouvent ici

L'expression de ma haute gratitude.

Mes chers amies qui sans leur encouragement ce travail

N'aura jamais vu le jour.

Et à toutes les familles« Djemmah, Hamani ,

A l'étudiant de notre groupe de travail : Ramzi

et à tous ceux qui nous aimons.

Khadoudja

Summary: This memory presents a theoretical design and the realization of maximum power point tracking (MPPT) for photovoltaic (PV) system. The study includes discussion of various MPPT algorithms. Some important applications of the MPPT for different loads are described; first the PV system with resistive load is discussed, the modeling and the simulation of the PV generator and the DC/DC converter is carried 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 and without MPPT in terms of PV total energy produced and total volume of water pumped per day is carried out.
Results show that MPPT can very significantly improve the performances of PV pumping system.

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

ملخص: العمل المقدم في هذه الأطروحة يتعلق بالتصميم النظري والتطبيقي لتقنية متابعة نقاط الاستطاعات الاعظمية (MPPT) لنظام الطاقة الضوئية. وتشمل الدراسة مناقشات حول مختلف الخوارزميات MPPT. كما تم تداول بعض التطبيقات الهامة ل MPPT. أولا، تم مناقشة تطبيق نظام الطاقة الضوئية لتغذية مقاومة حيث قمنا بتنفيذ النمذجة والمحاكاة للمولد الكهروضوئي والمحول تيار مستمر/ تيار مستمر باستخدام برنامج ماتلاب . ثانيا، تم إجراء دراسة لنظام الطاقة الضوئية من اجل ضخ المياه باستخدام محرك تيار مستمر يتم إجراء مقارنة بين أداء هذه الأنظمة مع وبدون MPPTمن حيث مجموع الطاقة التي تنتجها الأنظمة الكهروضوئية وإجمالي حجم المياه التي يتم ضخها يوميا. وتشير النتائج إلى أن MPPTيمكن 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 et la réalisation d'un suiveur du point maximum de puissance (MPPT) pour le système photovoltaïque (PV). L'étude comprend des discussions sur divers algorithmes MPPT. Certaines applications importantes du MPPT pour différentes charges sont décrites ; en premier lieu, un système photovoltaïque avec une charge résistive est discuté, la modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque et du convertisseur continu / continu 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 et sans MPPT 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 le MPPT peut améliorer de façon très significative les performances du système PV de pompage.

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

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques...……11
Tableau IV.1: Les caractéristiques électriques du module BP SX 150 ..……54
Tableau IV.2 : Cahier de charge pour une charge résistive...……..55
Tableau IV.3 : Cahier de charge du monteur à CC ……..……..56
Tableau IV.4 : Choix des composants …...……..……...56
Tableau IV.5 : La puissance et le rendement du système de pompage avec et sans MPPT d'une journée ensoleillée en Avril à Barcelone, en Espagne ……...66
Tableau IV.6 : La puissance et le rendement du système de pompage avec et sans MPPT d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie……...66
Tableau IV.7 : Le cahier de charge de la pompe (PRATIQUE)……...……...71

Liste des figures :

Figure I.1 : semi-conducteur type N……..5
Figure I.2 : dopage de type P ……6
Figure I.3 : jonction **P-N ……...**6
Figure I.2 : Spectre du rayonnement solaire ……8
Figure I.3 : Les composantes du rayonnement solaire reçu au sol …...……..10
Figure I.4 : Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel……...11
Figure I.5 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu……..……..……...12
Figure II.1 : Exemple de la structure d'un système PV autonome…….....……..…13
Figure II.2: Système hybride……...……..……..14
Figure II.3: Système autonome « au fil du soleil »……..……...15
Figure II.4: Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau…….…..…….15
Figure II.5 : Structure d'une cellule solaire …….…….16
Figure II.6 : Caractéristique I-V d'une cellule PV…….……17
Figure II.7: Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque…….…….…….18
Figure II.8: Modèle réel d'une cellule photovoltaïque…..…….…….……..19
Figure II.9 :Types de cellules photovoltaïques : (a) silicium monocristallin, (b) silicium poly-cristallin, (c) siliciumamorphe …….22
Figure II.10 : Constitution d'un module photovoltaïque…..……...…..22
Figure II.11: Influence de la température sur le fonctionnement du module PV (I-V)…...…25

Figure II.12: Influence de la température sur le fonctionnement du module PV (P-V)……..25
Figure II.13: L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV (I-V)…….26
Figure II.14:L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV (P-V)…….27
Figure II.15: Caractéristique courant tension de Ns cellules en série…...……..28
Figure II.16: Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle……..…28
Figure II.17 : Protection par diode by-pass……..…30
Figure II.18: Protection par diode anti-retour……...30

Figure III.1 : Un module PV directement couplé à une charge résistive ……..…….....32
Figure III.2 : Courbes I-V du module PV BP SX 150 et des diverses charge résistives simulés avec MATLAB (1 kW/m²,25°C)…….33
Figure III.3: le point opérationnel est le point d'intersection des courbes courant-tension de la charge et du PV…….34
Figure III.4:L'efficacité du module PV avec une charge résistive fixe conçue pour des différents niveaux d'ensoleillement …….35
Figure III.5: Machine à courant continu connecte à un PV……..…….…….....36
Figure III.6: Caractéristiques électrique d'un moteur à C.C à aimant permanent…….….37
Figure III.7: Un convertisseur DC-DC pour aider à démarrer ou maintenir le moteur en marche avec une basse lumière du soleil……..38
Figure III.8: convertisseur DC-DC…….…….……..……..39
Figure III.9 : Circuit idéal d'un convertisseur Buck…….…….……..……....39
Figure III.10 : Circuit équivalent d'un hacheur Buck quand le commutateur est fermé ($T \in [0,\ \alpha T_S]$) ……...40
Figure III.11 : Circuit équivalent d'un hacheur Buck quand le commutateur est ouvert ($T \in [\alpha T_S,\ T_S]$)……40
Figure III.12 : Circuit Convertisseur Boost……41
Figure III.13: Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est fermé ($T \in [0,\ \alpha T_S]$) ……42
Figure III.14: Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est ouvert ($T \in [\alpha T_S,\ T_S]$)……..42
Figure III.15: Circuit idéal d'un convertisseur buck-boost……..43
Figure III.16: Circuit équivalent d'un hacheur buck-boost quand le commutateur est fermé ($T \in [0,\ \alpha T_S]$)……...44

Figure III.17: Circuit équivalent d'un hacheur buck- boost quand le commutateur est ouvert……44
Figure III.18 : Les caractéristiques P-V (à droite), I-V (à gauche) et la trajectoire de PPM (en gras)……...46
Figure III.19 : Chaîne élémentaire de la conversion photovoltaïque…….....……46
Figure III.20 : Algorithme de la méthode de perturbation et d'observation « P&O »…….48
Figure III.21 : Caractéristiques du dérivé autour du point de puissance maximale (MPP)…50
Figure III.22 : L'algorithme de la méthode d'incrémentation de la conductance « IncCond »……...52
FigureIV.1 : Organigramme de simulation du MPPT……61
Figure IV.2 : Simulation du MPPT avec une charge résistive……62
Figure IV.3: Diagramme de performance de la pompe à eau de type Honda…….……64
Figure IV.4 : Les simulations du MPPT avec une charge de pompe avec moteur à C.C(20 à 1000W/m2, à 25C^0)……...65
Figure IV.5 : 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 ensoleillée en Avril à Barcelone, en Espagne……68
Figure IV.6 : 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…….……..68
Figure IV.7 : Carte Arduino "Uno"……..……69
Figure IV.8 : Logiciel Arduino……70
Figure IV.9 : Motopompe……72
Figure IV.10 : La tension du panneau en circuit ouvert ……72
Figure IV.11 : La tension du sortie du hacheur……...73
Figure IV.12 : Les résultats de simulation avec différentes irradiations……74

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_m	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_m	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_m	: 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	m²
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_m	la tension maximale (V).	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.	/
η	Facteur de qualité pour une diode.	/
η	Le rendement.	/
λ	longueur d'onde	µm
ω	vitesse angulaire	rad/s

Table des matières :

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Introduction générale ……1

Chapitre I : Généralités

I.1. Introduction ……3

I.2. Le photovoltaïque ……3

I.3. Historique ……3

I.4. Les semi-conducteurs……4

I.4.1. Le silicium……4

I.4.2. Dopage du silicium ……4

a. Dopage de type **N** ……5

b. Dopage de type **P** ……5

c. Jonction **P – N** ……6

I.5. La conversion photovoltaïque ……6

I.6. Le rayonnement solaire ……7

I.6.1. Le soleil ……7

I.6.2. Le spectre solaire ……7

I.6.3. Le rayonnement solaire extraterrestre ……8

I.6.4. Gisement solaire ……10

I.7. Conclusion ……12

Chapitre II : Système photovoltaïque

II.1. Introduction ……13

II.2. Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques ……13

II.2.1. Système autonome avec stockage ……13

II.2.2. System autonomes hybrides ……14

II.2.3. Système autonome « au fil du soleil » 14
II.2.4. Systèmes connectés au réseau 15
II.3. Générateur photovoltaïque 16
II.3.1. Cellule photovoltaïque 16
II.3.1.1. Principe de fonctionnement 16
II.3.1.2. La caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque 17
II.3.1.3. La modélisation électrique de la cellule photovoltaïque 17
a) Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque 17
b) Modèle réel d'une cellule photovoltaïque 19
II.3.1.4 Type de cellule 21
II.3.2. Module ou panneau photovoltaïque 22
II.3.2.1. Paramètre des modules photovoltaïques 23
II.3.2.2. Influence de l'clairement et de la température sur le fonctionnement du module PV 24
II.3.2.3. Association des modules photovoltaïque 27
a. Association en série 27
b. Association en parallèle 28
c. Association hybride (série parallèle) 29
II.3.2.4. Diode de protection des cellules PV 29
II.4. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque 30
II.5. Conclusion 31

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

III.1 Problématique 32
III.2. Courbes courant-tension pour des charges 33
III.2.1 Courbe I-V d'une charge résistive simple 33
III.2.2. Courbe I-V d'un moteur à C.C 35
III.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge 38
III.3.1. Le convertisseur à courant continu (DC-DC) 38
III.3.1.1. Les hacheurs 38
a) Hacheur Buck 39
b) Convertisseur Boost (hacheur survolteur) 41
c) Convertisseur buck-boost (hacheur dévolteur-survolteur) 43
III.3.2. Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) 45

a) Principe de fonctionnement de MPPT.....45
b) Les méthodes de poursuite de MPP Les méthodes de poursuite de MPP 47
III.4. Conclusion 53

Chapitre IV : Conception et simulation de système de pompage PV

IV.1. Introduction.....54
IV.2. Partie simulation 54
IV.2.1. Conception du générateur photovoltaïque 54
IV.2.2. Conception du convertisseur DC/DC 55
IV.2.2.1. Choix des composantes 56
IV.2.2.1.1. Charge résistive 57
a. Choix des inductance 57
b. Choix du condensateur 58
IV.2.2.1.2. Motopompe 58
a. Le choix des inductances 58
b. Choix de condensateur 59
IV.2.3. Simulation du MPPT 59
IV.2.3.1. Simulation du MPPT avec une charge résistive 59
IV.2.3.2. Simulations de MPPT avec une charge de type moteur à C.C d'une pompe 62
a. Modélisation de la pompe à eau à C.C 63
b. Résultats de la simulation avec MATLAB 64
c. Comparaison entre un Système de pompage avec MPPT et un système directement couplé 66
IV.3. Partie pratique 69
IV.3.1. Arduino Uno 69
IV.3.1.1. Le logiciel arduino 69
IV.3.1.2. La méthode d'Installation 70
IV.3.2. Hacheur Buck (réalisé) 70
IV.3.2.1. Le choix du composant 70
IV.3.3. Moteur à C.C 72
IV.3.4. Les résultats de la réalisation 72
IV.4. Conclusion 74

Conclusion général 75

Références bibliographiques

Annex A

Annex B

Introduction générale

Introduction générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que la demande énergétique du monde s'élève continuellement. Étant donné que ces formes d'énergie couvrent une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue une urgence capitale, vu le risque qui pèse sur l'avenir de l'humanité voire de toutes les espèces.

Poussée par un contexte favorable (volonté politique, intérêt économique…), la production d'électricité d'énergie renouvelable se développe d'une façon extraordinaire dans de nombreux pays puisqu'elle est non polluante et aussi parce qu'elle se base sur le facteur de la durabilité de la ressource primaire d'énergie utilisée : le soleil, le vent, les marées, la biomasse, etc.

Le potentiel énergétique solaire en Algérie est très important, la moyenne annuelle de l'éclairement solaire sur une surface inclinée est environ 7 kWh/m^2/jour [1]. La technologie photovoltaïque est une solution attrayante pour remplacer ou complémenter des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de se nombreux avantages :

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien ;
- Elle fournit de l'électricité avec l'énergie gratuite et renouvelable du soleil ;
- Elle est silencieuse et non polluante respectueuse de l'environnement ;
- Elle est polyvalente et peu être ajustée selon les besoins.

Étant donné que l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques et d'irrigation reste le souci quotidien des habitants des zones enclavées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement bien adaptés pour l'alimentation en eau à partir des puits ou des forages

L'objet de notre mémoire porte sur l'analyse, la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, le premier chapitre (Généralités) va décrire le rayonnement solaire et le photovoltaïque (PV)**.** La modélisation des éléments du système PV

va être définie dans le second chapitre. Le troisième chapitre traitera deux algorithmes très importants à savoir l'algorithme de la perturbation et observation (P & O) et l'algorithme incrémentation de la conductance pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Dans le quatrième chapitre des simulations vont être effectuées afin d'évaluation l'algorithme P&O sous logiciel Matlab et ceci dans le but de contribuer à une meilleure compréhension des performances du convertisseur DC-DC adapté à la commande numérique du système de pompage photovoltaïque. Un système de pompage avec comme charge une moto-pompe DC est décrit et simulé. Une comparaison entre les systèmes PV couplés directement à la charge et les systèmes avec MPPT est effectuée.

La réalisation du circuit de poursuite de point de puissance maximale est basée sur un convertisseur élévateur Buck. L'algorithme est mis en application avec la carte Arduino Uno, c'est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328.

Enfin, nous allons terminer le travail avec une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I
Généralités

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire directement électrique 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 photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, ayant pour propriété de libérer leurs porteurs de charge sous l'influence d'une excitation extérieure.

Cette conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le Français Edmande Becquerel en 1839 [1],[2]. Il a découvert l'effet photovoltaïque en constatant l'apparition d'un potentiel électrique entre deux électrodes lorsqu'elles sont illuminées.

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[1][3].

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 [4].

I.4. Les semi-conducteurs

La conversion photovoltaïque s'effectue à l'aide de matériaux semi-conducteurs, ces derniers sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celles des isolants. Cette conductivité, dépend fortement de la température. Un semi-conducteur est un matériau ou les électrons périphériques se répartissent entre deux bandes d'énergies (la bande de conduction et la bande de valence), séparées par une bande interdite, un intervalle d'énergie appelé : gap, de l'ordre de quelques eV. Il existe plusieurs semi-conducteurs tel que : le 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).

I.4.1. Le silicium

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé pour la fabrication de dispositifs microélectroniques ainsi que des cellules photovoltaïques.

Le silicium existe sous différentes formes :

- Sous forme multicristalline et monocristalline pour les couches massives,
- Sous forme amorphe et polycristalline 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 consiste à implanter des impuretés à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque afin d'en contrôler les propriétés électriques. La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur.

Les atomes de silicium ‘Si’ ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome ‘Si’ voisin par une liaison covalente.

a. Dopage de type N

Si un atome ayant cinq électrons de valence **(**le phosphore (P), l’arsenic (As) ou l’antimoine (Sb)**)** est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l’atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d’électrons dépasse le nombre de trous.

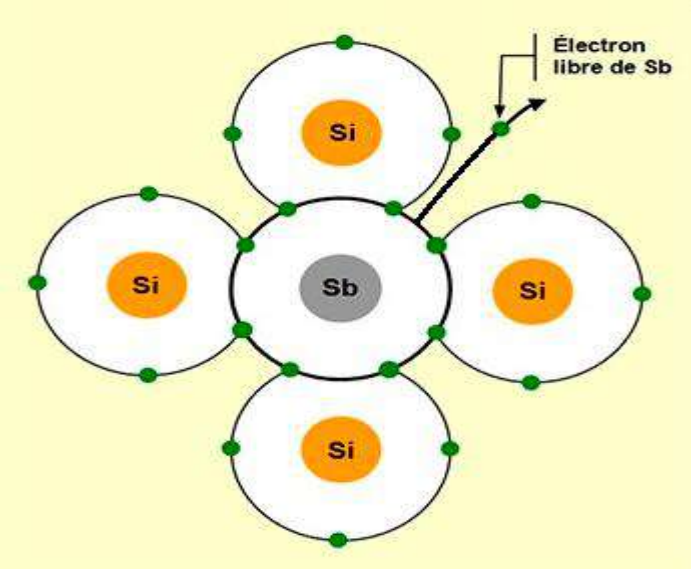


Figure I.1 : semi-conducteur type N

b. Dopage de type P

Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l’une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacentes et l’atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d’électrons.

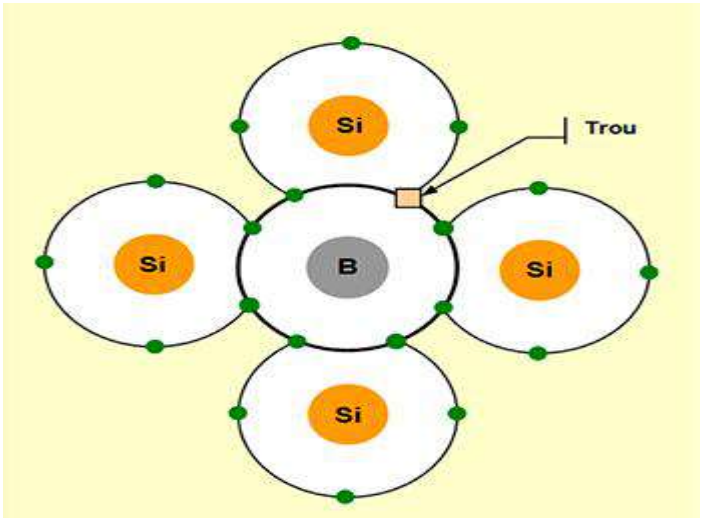


Figure I.2 : dopage de type P.

c. Jonction P – N

La jonction **P – N** est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est crée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type **P** et d'un semi-conducteur de type **N** (théoriquement). Dans la zone de contact, les électrons libres du segment **N** pénètrent dans le segment **P** et se recombinent avec les trous. De même, les trous du segment **P** pénètrent dans le segment **N** et se recombinent avec les électrons [5].

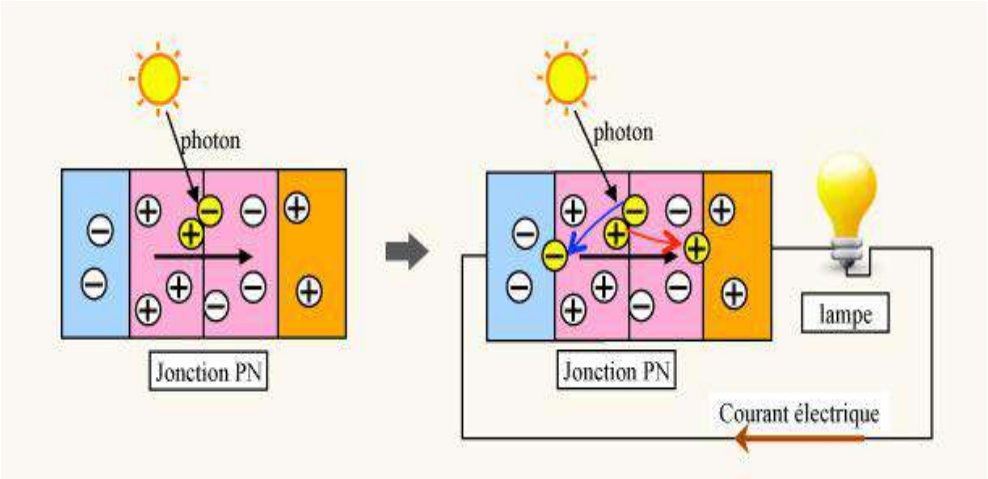


Figure I.3 : jonction **P-N**

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 ($E.\lambda = hc$) est supérieure à celle associer à la bande interdite E_g).
- 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 P et N (électrode et anode) [1].

I.6. Le rayonnement solaire

I.6.1. Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint les 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 150000000 km de la terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 °k [6].

Le corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre. Il n'ayant n'a aucune autre hypothèse sur la nature de l'objet.

La lumière étant un rayonnement électromagnétique, elle est absorbée totalement et l'objet éclairé devrait donc apparaître noir, d'où son nom. Cependant, un corps noir peut émettre de la lumière s'il a une température suffisamment élevée, il n'apparaîtra donc pas noir dans toutes les conditions.

I.6.2. Le spectre solaire

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° k. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de $AM0$. Sa distribution en énergie est répartie en :

- Ultraviolet **UV** : 0.20 <λ< 0.38 mm 6.4% ;
- Visible : 0.38 <λ< 0.78 mm 48.0% :
- Infrarouge **IR** : 0.78 <λ< 10 mm [7].

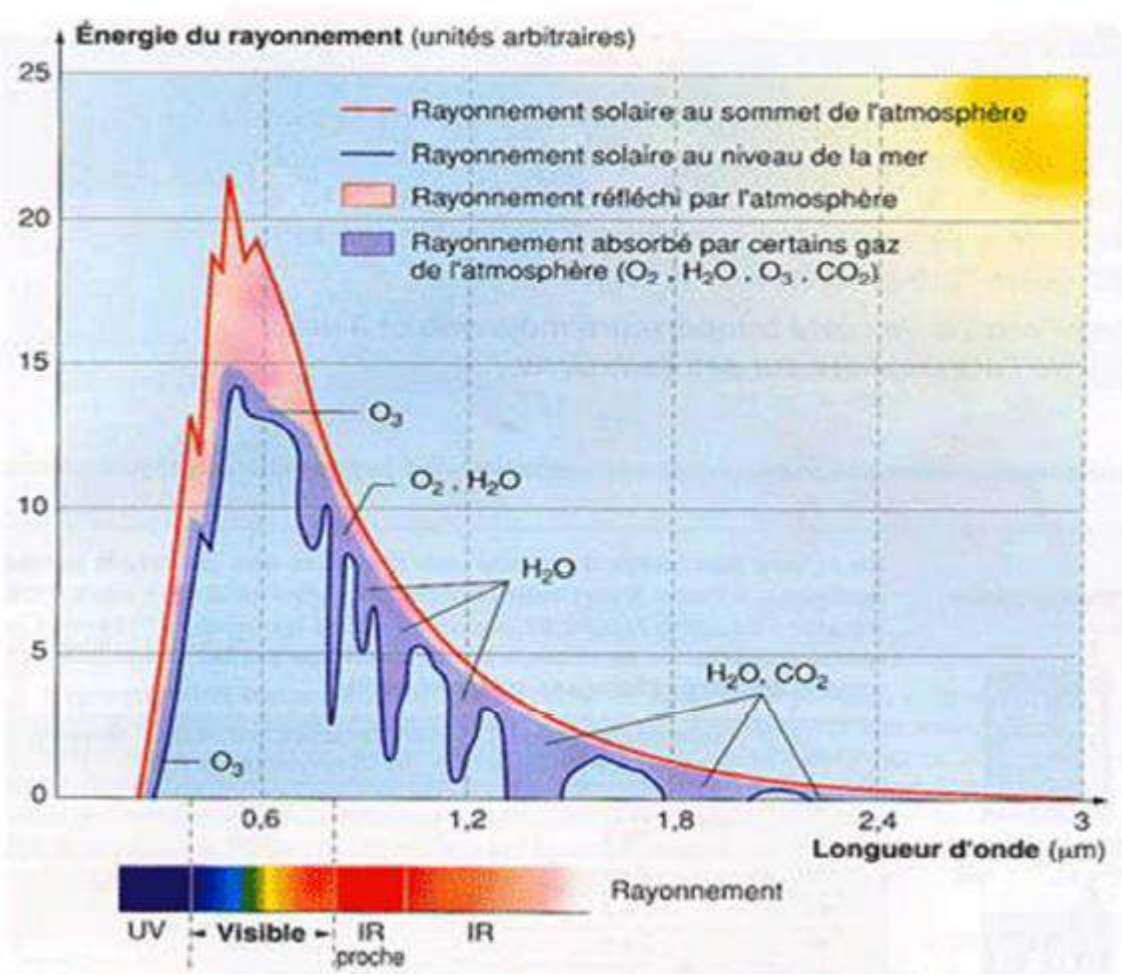


Figure I.4 : Spectre du rayonnement solaire [8]

La plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge : 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 0,2µm et 4 µm. Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité vers le haut à 2,5 µm environ (figure I.4).

A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O_3,CO_3, H_2O,...)[1].

I.6.3. Le rayonnement solaire extraterrestre

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes

infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes.

Le rayonnement solaire dit « extraterrestre » c'est à dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut 1367W/m². Il s'agit de l'irradiation reçue, ou le rayonnement solaire instantané au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est à dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil).

On appelle cette valeur « constante solaire » mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance terre-soleil. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

Le rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière. il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [1][9].

I.6.3.1. Le rayonnement reçu au sol

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil.

a. Les composantes du rayonnement solaire

Il existe quatre types de rayonnement :

- ***Le rayonnement direct***

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair [10].

- ***Le rayonnement diffus***

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

- ***Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol***

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.…).

➢ ***Le rayonnement global***

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflète par le sol.

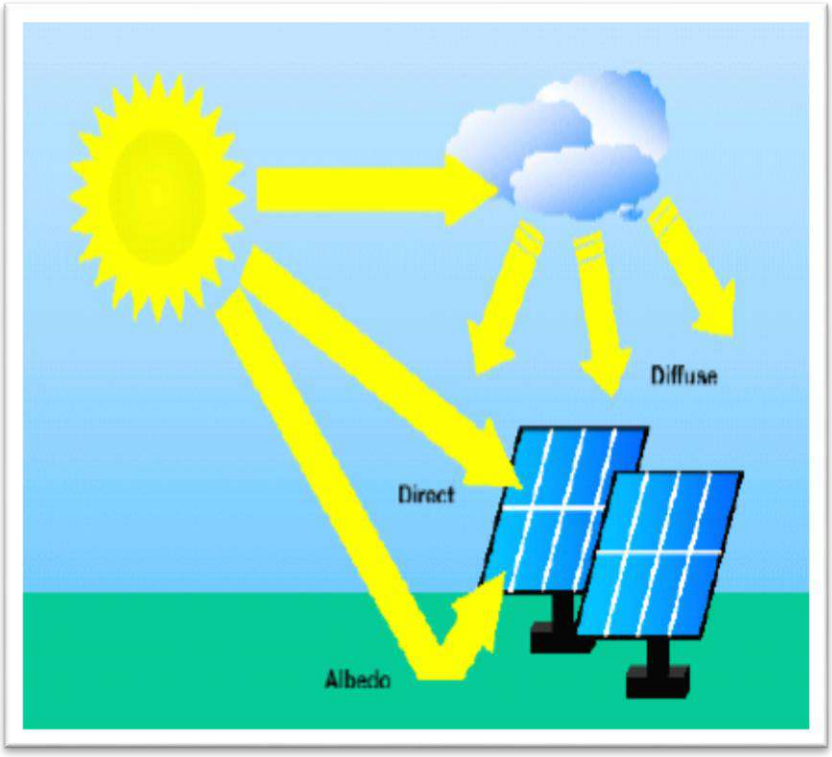


Figure I.5 : Les composantes du rayonnement solaire reçu au sol [11].

I.6.4. Gisement solaire

I.6.4.1. Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [12].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (I.6) :

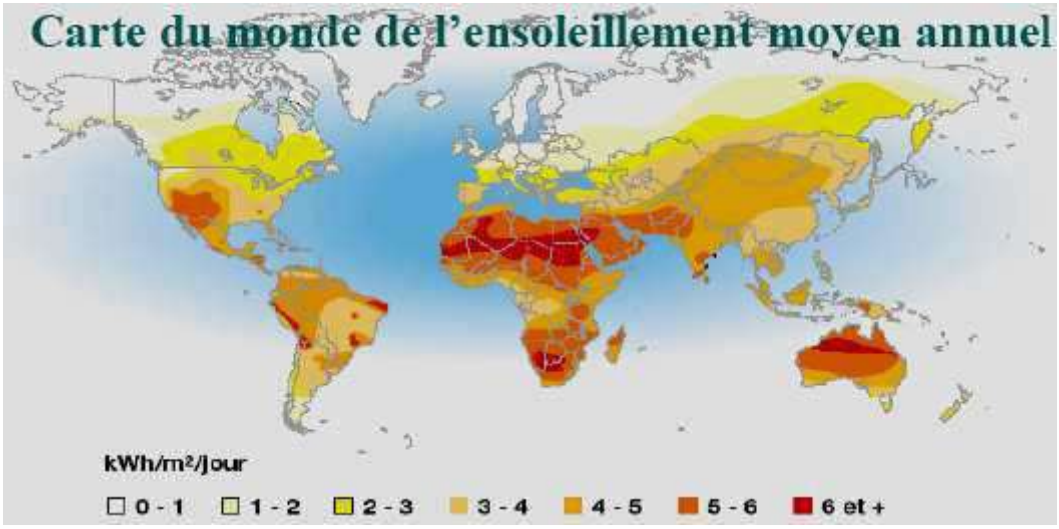


Figure I.6 : Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel.

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.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau I.1 : 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 dans le sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an. Elle est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région de Tamanrasset est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.7)[12].

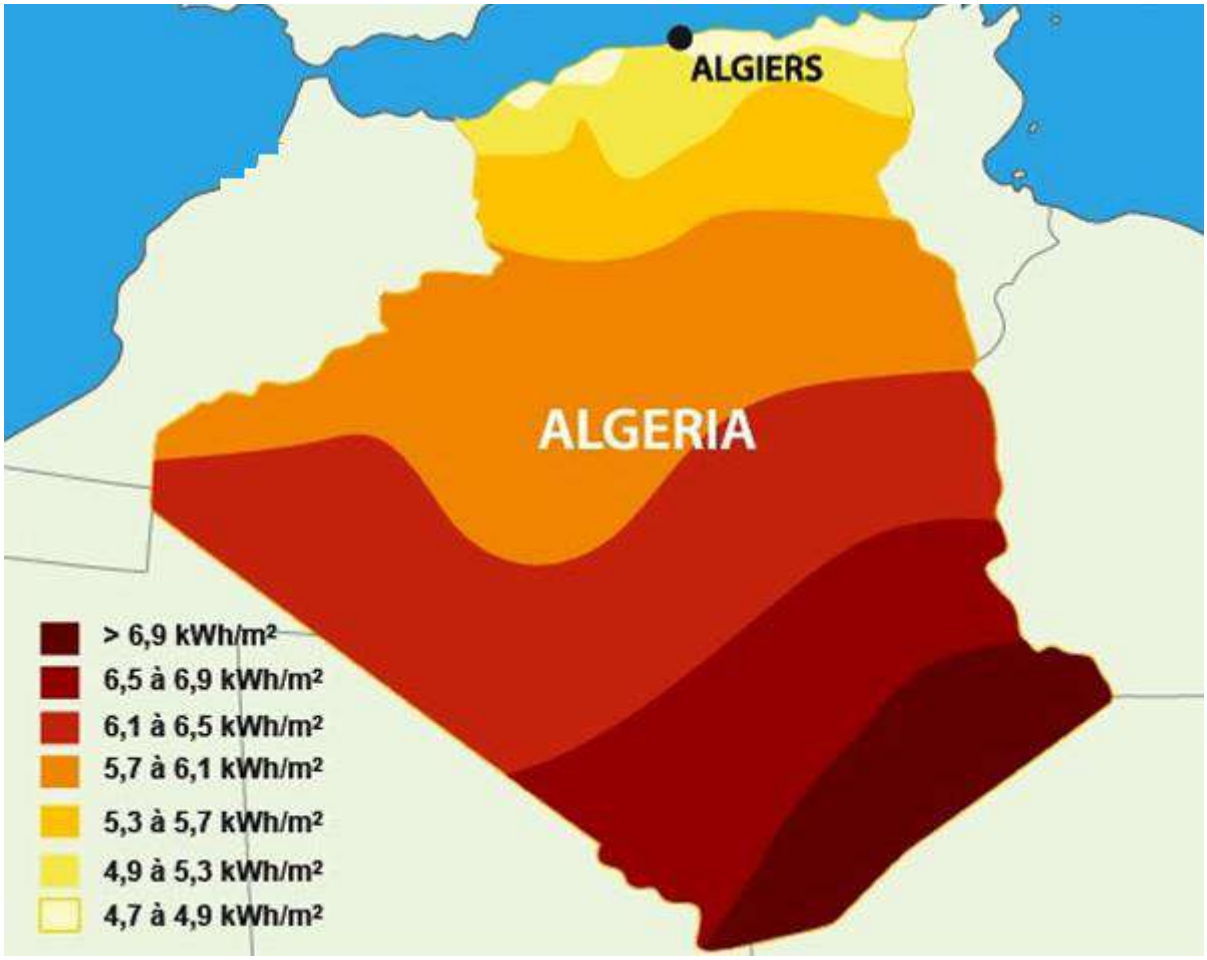


Figure I.7 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

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.

Chapitre II

Système photovoltaïque

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. Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques

II.2.1. Système autonome avec stockage

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi que les applications comme la surveillance à distance et le pompage d'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [13].



Figure II.1 : Exemple de la structure d'un système PV autonome [14].

II.2.2. System autonomes hybrides

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle qu'une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise[5].

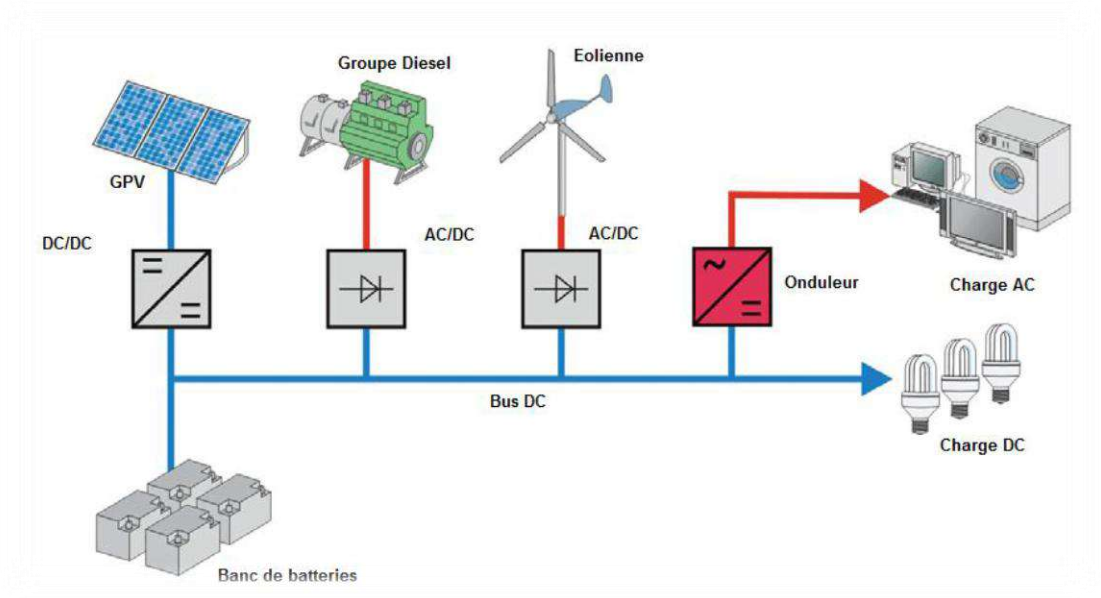


Figure II.2: Système hybride[15]

II.2.3. Système autonome « au fil du soleil »

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux, ce système est plus communément utilisé pour l'application du pompage au fil du soleil. Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir varie, directement en fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil »[15].

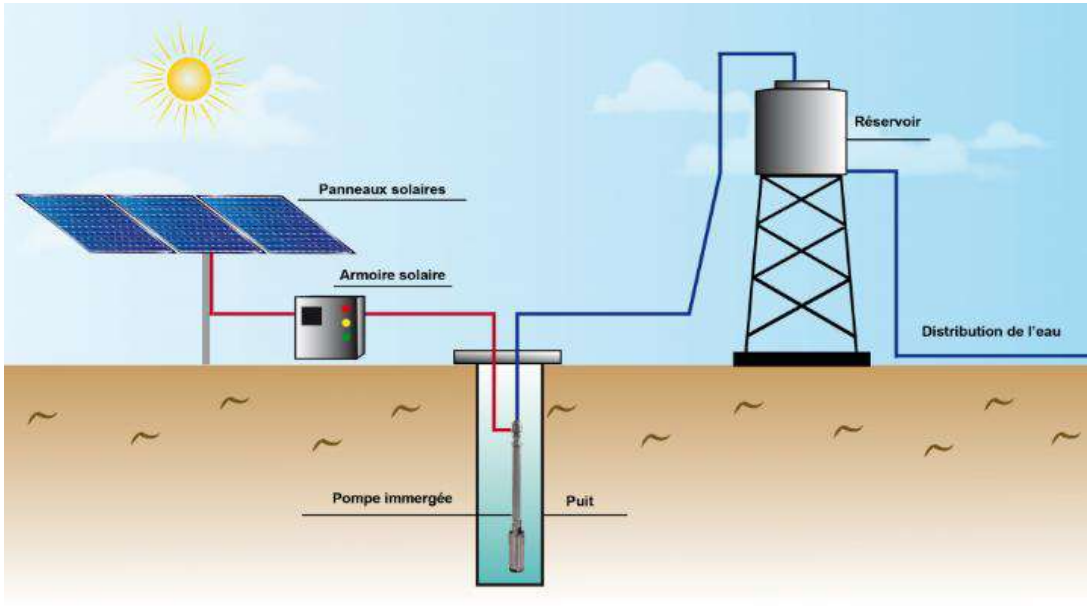


Figure II.3 : Système autonome « au fil du soleil »[15]

II.2.4. Systèmes connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu-courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires. L'énergie produite est consommée sur place, le surplus est injecté dans le réseau et c'est ce dernier qui va alimenter les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [13].

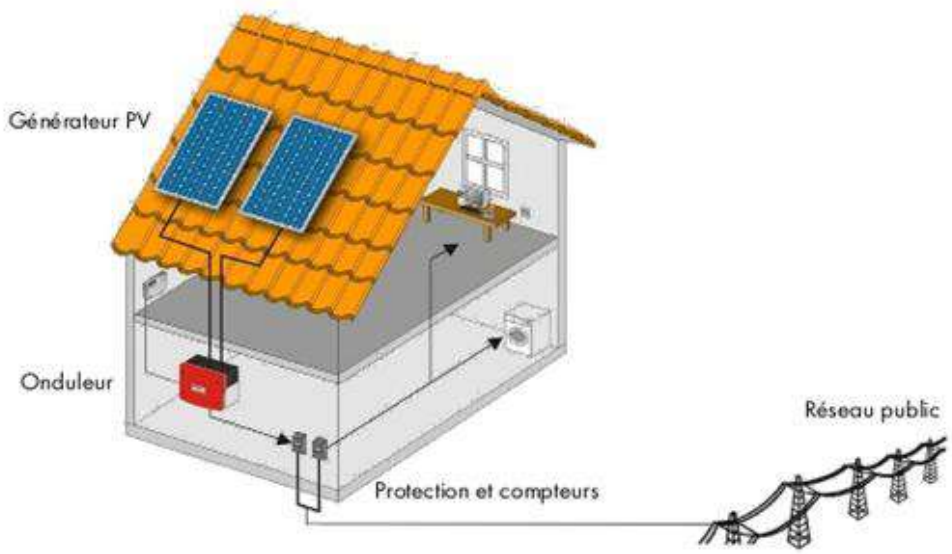


Figure II.4 : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau

II.3. Générateur photovoltaïque

II.3.1. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension [5].

II.3.1.1. Principe de fonctionnement

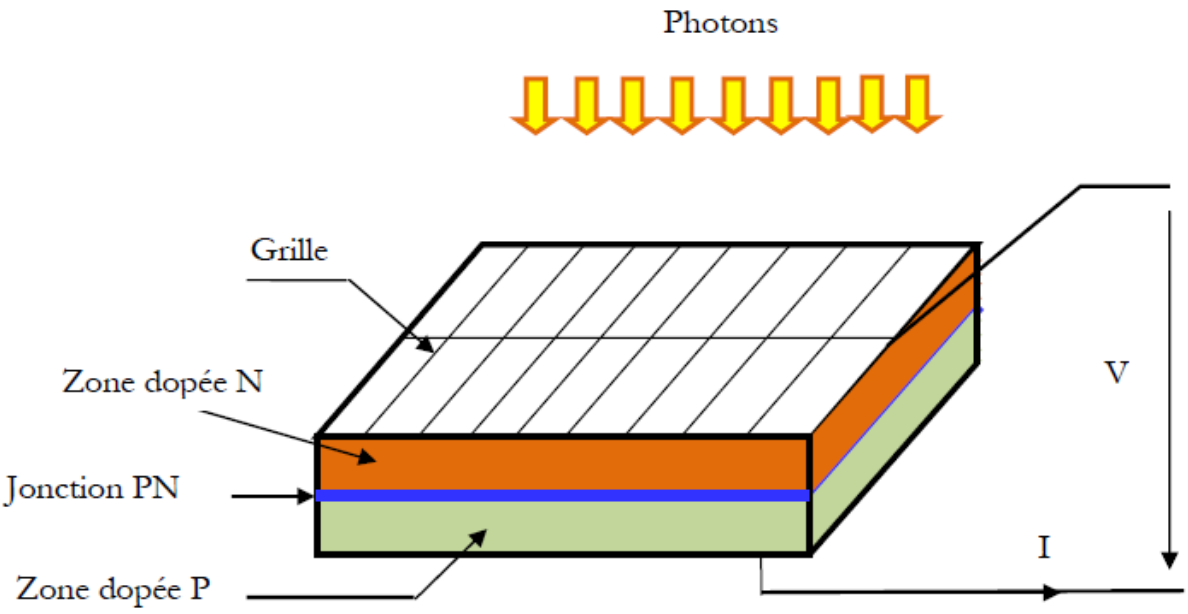


Figure II.5 : Structure d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à générer une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de la cellule [16].

II.3.1.2. La caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque

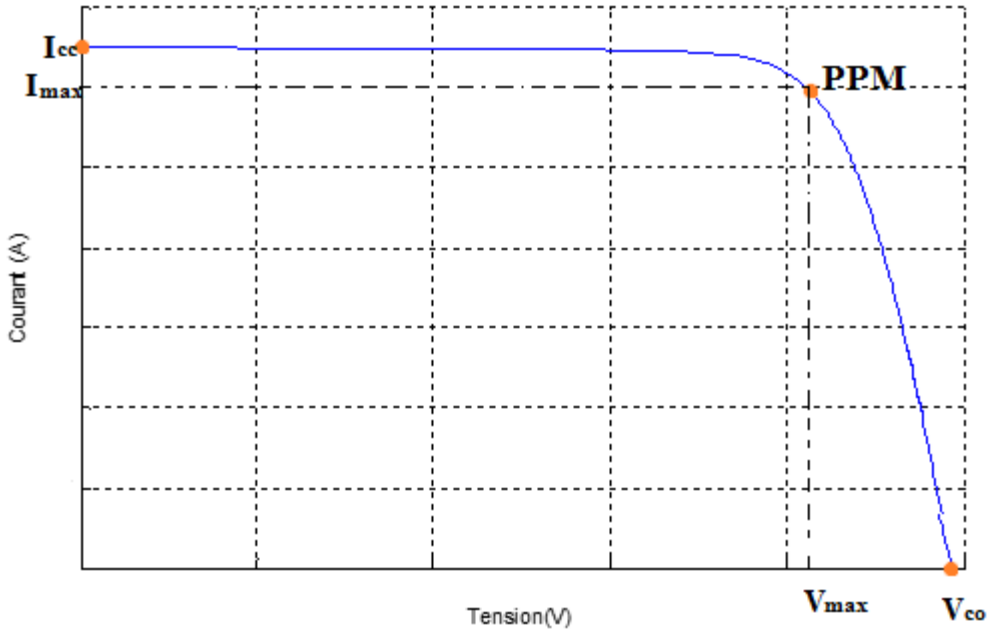


Figure II.6 : Caractéristique I-V d'une cellule PV.

Comme le montre la figure (II.6) la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe I(V) non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de la température.

Il y a trois points importants sur cette courbe :

- Le point de fonctionnement optimal PPM (**P**oint de la **P**uissance **M**aximale de la cellule).
- Le point du courant maximal (I_{cc}). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- Le point de la tension maximale de la cellule (V_{co}) (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{co})[13].

II.3.1.3. 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.7)).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 $I_{D.}$

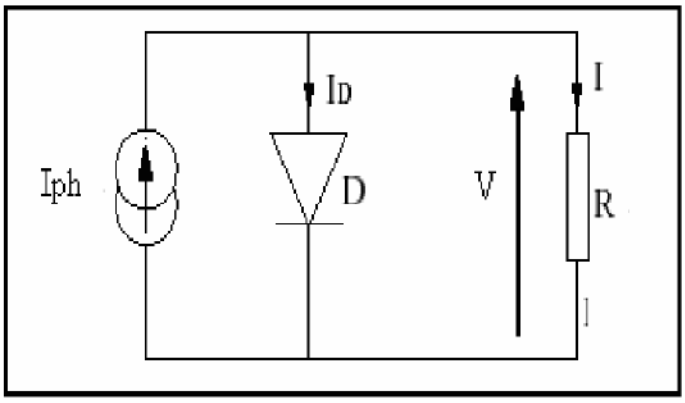


Figure II.7 : Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

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).

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

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

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

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

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).

b) 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.8) par un générateur de courant, une diode et deux résistances R_s et R_{sh}.

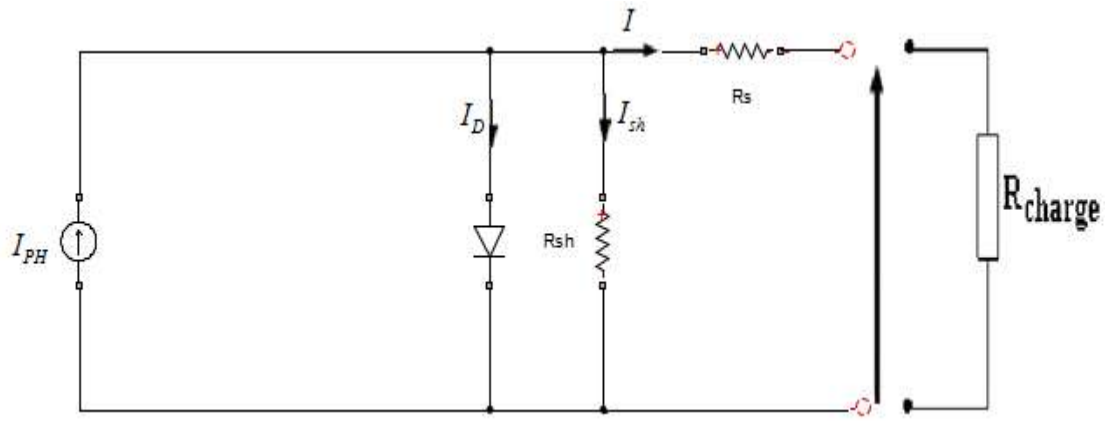


Figure II.8 : Modèle réel d'une cellule photovoltaïque

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire (figure II.8)), on a :

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

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

$$I_D = I_S[e^{\frac{V+I*R_s}{\eta*V_T}} - 1] \tag{II.8}$$

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

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

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

$$I = I_{PH} - I_0[e^{\frac{V+I*R_s}{\eta*V_T}} - 1] - \frac{V + I * R_S}{R_{sh}} \quad \text{(II.12)}$$

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 [17].

G : L'irradiation solaire en W / m^2

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure (II.6) 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 [7].

Donc l'équation (II.12) devienne :

$$I = I_{PH} - I_0[e^{\frac{V+I*R_s}{\eta*V_T}} - 1] \quad \text{(II.13)}$$

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

$$R_S = -\frac{dV}{dI} - \frac{\eta KT/q}{I_0 e^{\left(\frac{V+I*R_s}{\eta*V_T}\right)}} \quad \text{(II.14)}$$

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

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad \text{(II.15)}$$

$f'(x_n)$ 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 :

$$f(I) = I_{CC} - I - I_0[e^{\frac{V+I*R_s}{\eta*V_T}} - 1] = 0 \quad \text{(II.16)}$$

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

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

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.

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

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

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.3.1.4 : Type de cellule

Les différents types de cellules PV existants sont :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%) ;
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%) ;
- Cellule en silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%) [18].

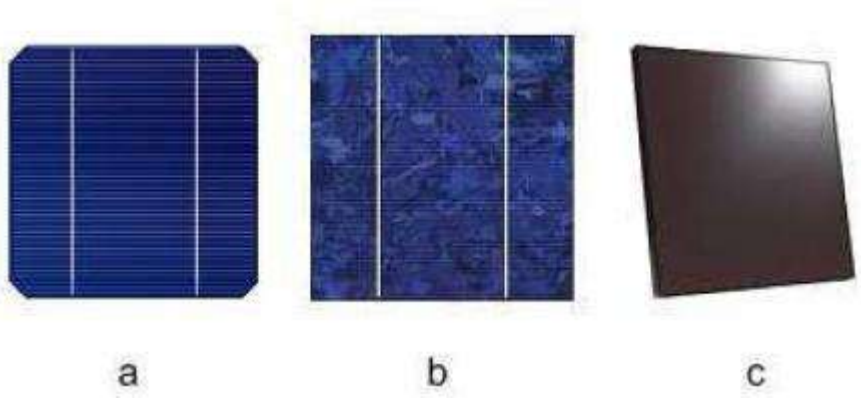


Figure II.9 : Types de cellules photovoltaïques : (a) silicium monocristallin, (b) silicium poly-cristallin, (c) siliciumamorphe

II.3.2. Module ou panneau photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt [19]. Un module est constitué de cellules associées en série encapsulées et protégées de l'humidité par un matériau qui enrobe les cellules c'est l'Acétate d'éthylène-vinil (EVA).

La face avant du module doit être en verre. Elle doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bonne transparence.
- Résistance à l'impact et à l'abrasion.
- Étanchéité à l'humidité.

La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (polyéthylène) [18].

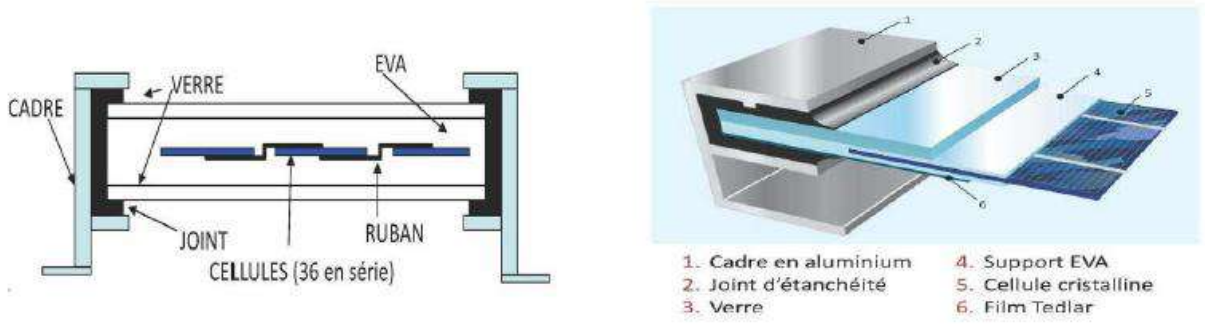


Figure II.10 : Constitution d'un module photovoltaïque [20].

II.3.2.1. Paramètre des modules photovoltaïques

Les paramètres des modules photovoltaïques sont :

- I_{CC} : courant de court-circuit ;
- V_{CO} : Tension à circuit ouvert ;
- FF: Facteur de forme ;
- η: Le rendement ;
- P : Puissance débitée.

Extraits des caractéristiques courant - tension, permettent de comparer les différentes GPVs éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit $I_{CC}(A)$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la GPV. Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la GPV, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

b) Tension à circuit ouvert V_{CO} (V)

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la GPV est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, de la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

c) Puissance débitée *P(W)*

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.

$$P_m = I_m V_m \tag{II.21}$$

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

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

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.

$$\eta = \frac{P_m}{E\ S_C} 100\% \qquad \text{(II.23)}$$

Avec :

η: le rendement ;

P_m : la puissance maximale (W) ;

E : Éclairement ($^{W}/_{m^2}$) ;

Sc : Surface de la GPV solaire (m^2) [17].

II.3.2.2. Influence de l'clairement et de la température sur le fonctionnement du module PV

a) L'influence de la température sur le fonctionnement du module PV

On fixe la valeur de l'irradiation constante *E*=1000W/m² et on fait varier la température de 5°C jusqu'à 45°C, avec un pas de 10°C. Les caractéristiques *($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$)* sont données respectivement par les figures (II.11) et (II.12). 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.

➢ ***Caractéristiques I-V d'un module PV***

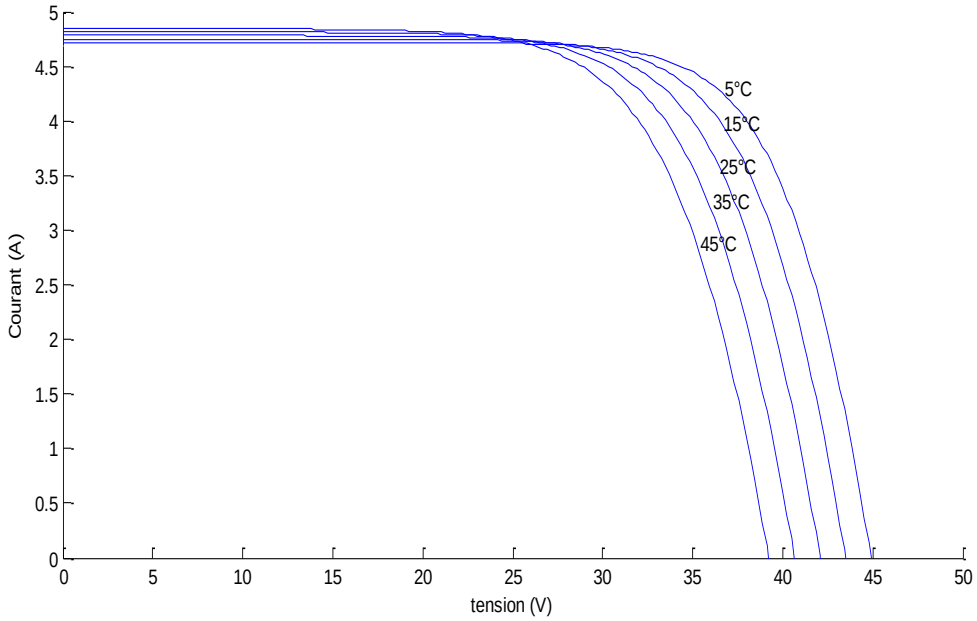


Figure II.11: Influence de la température sur le fonctionnement du module PV (I-V).

➢ ***Caractéristiques P-V d'un module PV***

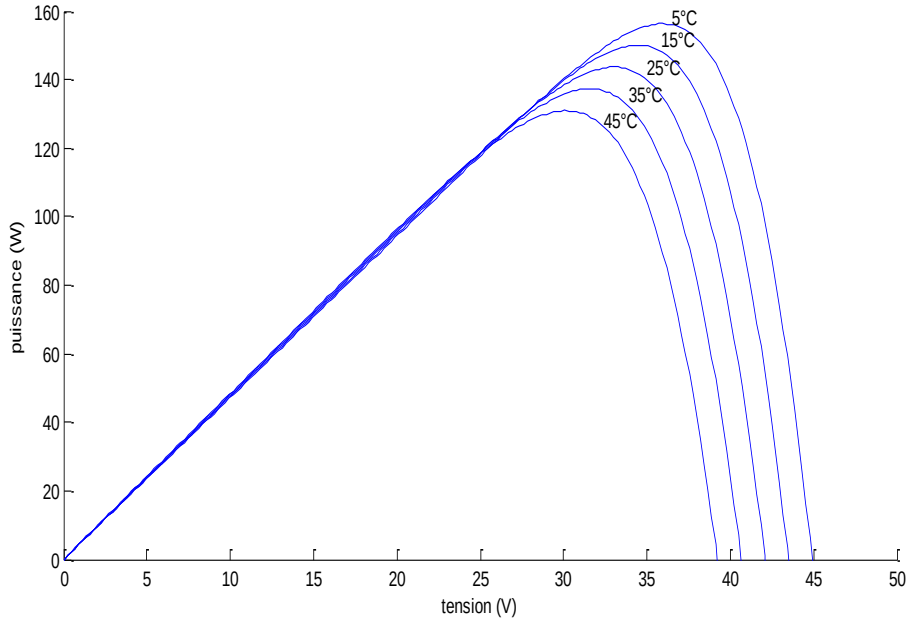


Figure II.12: Influence de la température sur le fonctionnement du module PV (P-V).

b) L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV

On fixe la valeur de la température constante T=25 °C et on fait varier l'éclairement entre 200 W/m² et 1000 W/m² avec un pas de 200. Les caractéristiques $(I_{pv}=f(V_{pv}))$ et $(P_{pv}=f(V_{pv}))$ sont données respectivement par les figures ((II.13) et (II.14)).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.

- ***Caractéristiques I-V d'un module PV***

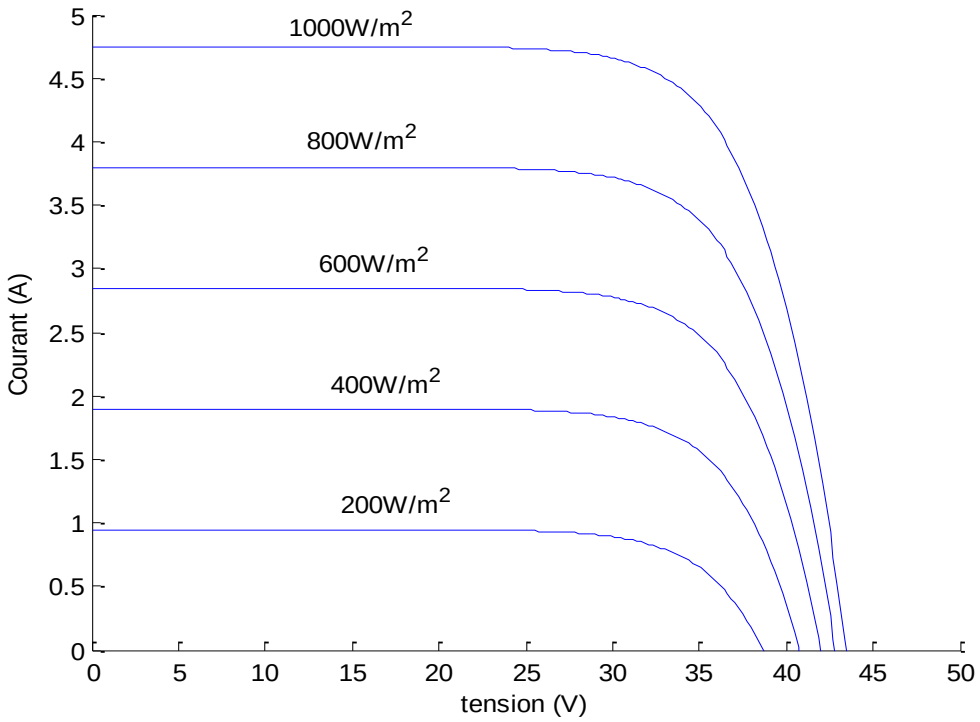


Figure II.13: L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV (I-V).

➢ ***Caractéristiques P-V d'un module PV***

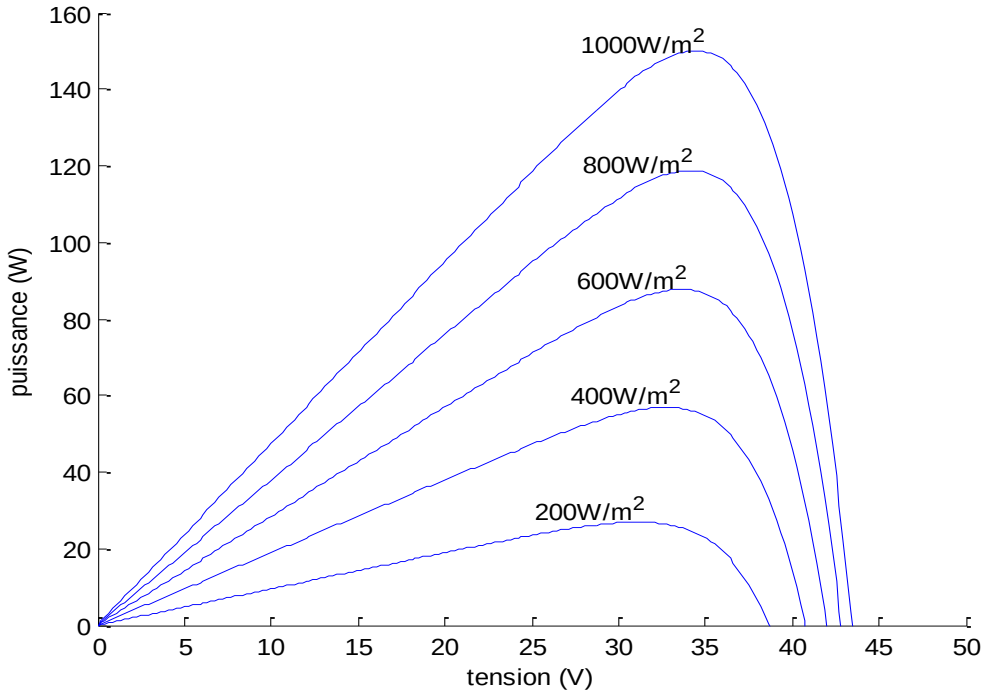


Figure II.14:L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du module PV (P-V).

II.3.2.3. Association des modules photovoltaïque

a) Association en série

Une association de plusieurs modules photovoltaïque en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les modules photovoltaïques sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque GPV. Les équations qui résument les caractéristiques électriques d'une association série de (Ns) GPVs sont telles que :

$$V_{CONs} = Ns \times V_{CO} \quad \text{(II.24)}$$

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

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

I_{CCNs}: Courant de court-circuit de Ns GPVs en série ;

Ns : Nombre des GPVs en série [21].

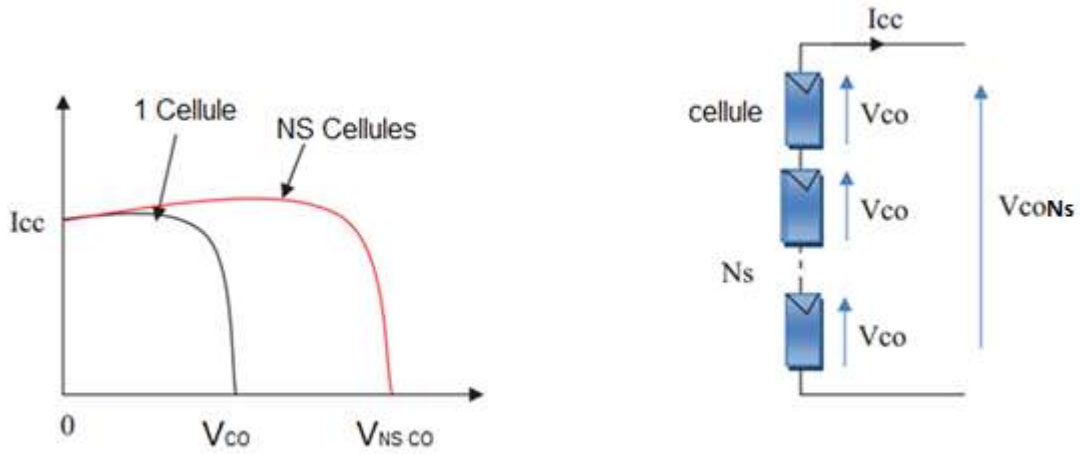


Figure II.15: Caractéristique courant tension de Ns cellules en série [22].

b) Association en parallèle

Une association de plusieurs modules photovoltaïque en parallèle permet d'augmenter le courant du générateur photovoltaïque. Dans un groupement de module identique connecté en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. Donc on aurra:

$$I_{CCNp} = Np \times I_{CC} \tag{II.26}$$

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

I_{CCNp}:La somme des courants de court-circuit de (Np) GPVs en parallèle.

V_{CONp}: Tension du circuit ouvert de (Np) GPVs en parallèle.

N_p : Nombre des GPVs en parallèle [22].

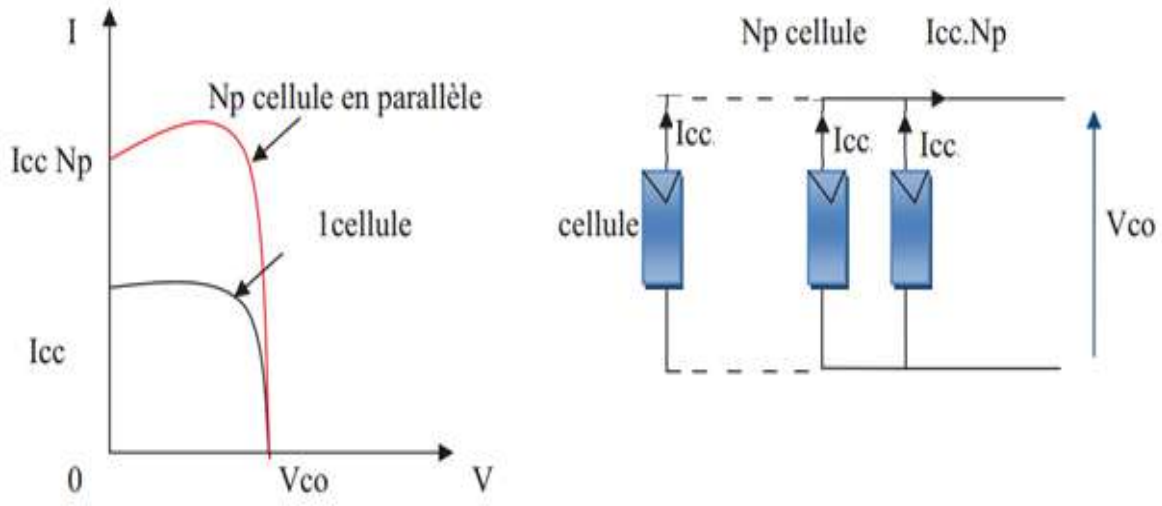


Figure II.16: Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle [22].

c) Association hybride (série parallèle)

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

$$I_{CC\ (total)} = Np \times I_{CC} \tag{II.28}$$

$$V_{CO\ (total)} = Ns \times V_{CO} \tag{II.29}$$

$I_{CC\ (total)}$: la somme des courants de court-circuit de Np de GPVs. ;

$V_{CO\ (total)}$: la somme de la tension du circuit ouvert de Ns de GPVs [23].

On note l'interconnexion des modules entre eux, en série et/ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant [13][16].

II.3.2.4. 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 :

- ✓ **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.17) [24].

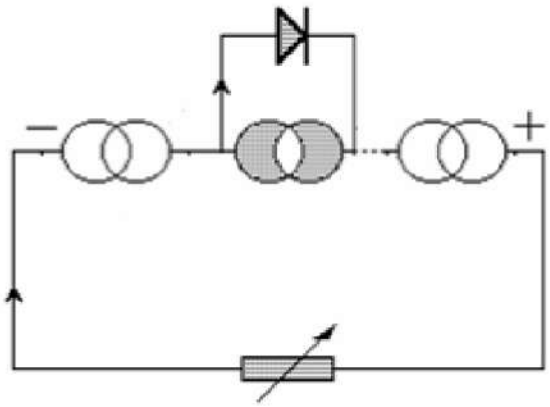


Figure II.17 : Protection par diode by-pass

✓ **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 (figure (II.18)) [24].

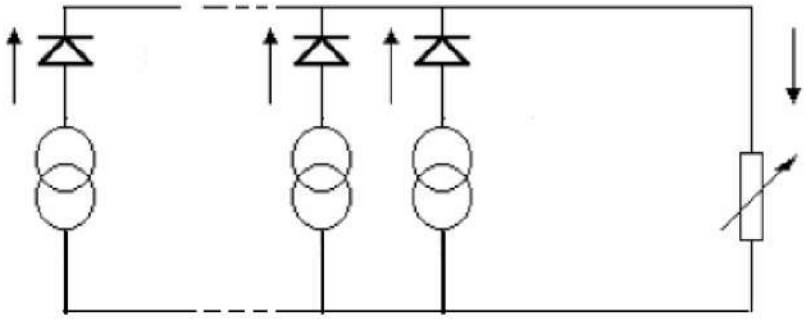


Figure II.18: Protection par diode anti-retour [24].

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.

❖ **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'agitd'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 degaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

❖ **Inconvénients du PV**

- 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 configurations des systèmes PV. 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.

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.

Chapitre III

Le suiveur du point de puissance maximale (MPPT)

III.1 Problématique

Quand un module PV est directement couplé à une charge, le point opérationnel du module PV est le point d''intersection de sa courbe I-V avec celle de la charge. Par exemple sur la (figure III-1), une charge résistive a une ligne droite avec une pente de $1/R_{charge}$ comme le montre la figure III-2. En d'autres termes, c'est l'impédance de la charge qui dicte les conditions opérationnelles du module PV. Généralement ce point opérationnel est rarement au PPM (**P**oint à **P**uissance **M**aximale) du module PV, de ce fait il ne peut pas produire sa puissance maximale.

Un rang PV est habituellement surdimensionné pour compenser le rendement de faible puissance pendant les mois d'hiver. Cette mauvaise adaptation entre le module PV et la charge exige des modules supplémentaires ce qui augmente le coût du système global. Pour mitiger ce problème, un suiveur du point de puissance maximale (MPPT) peut être utilisé pour maintenir le point opérationnel du module PV au PPM. Le MPPT peut extraire plus de 97% de la puissance PV [25].

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.

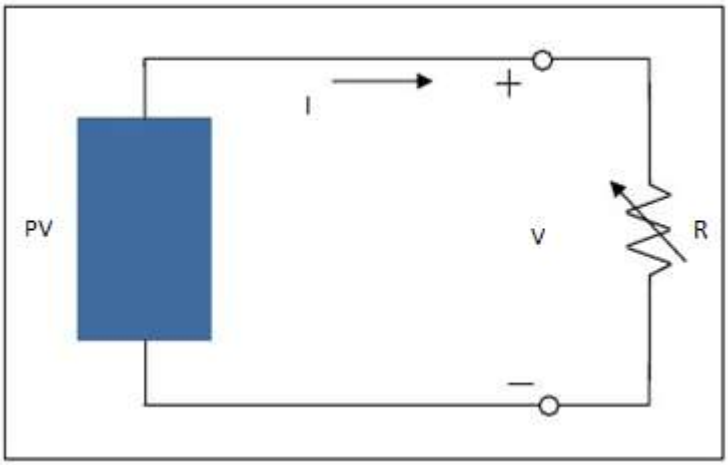


Figure III.1 : Un module PV directement couplé à une charge résistive

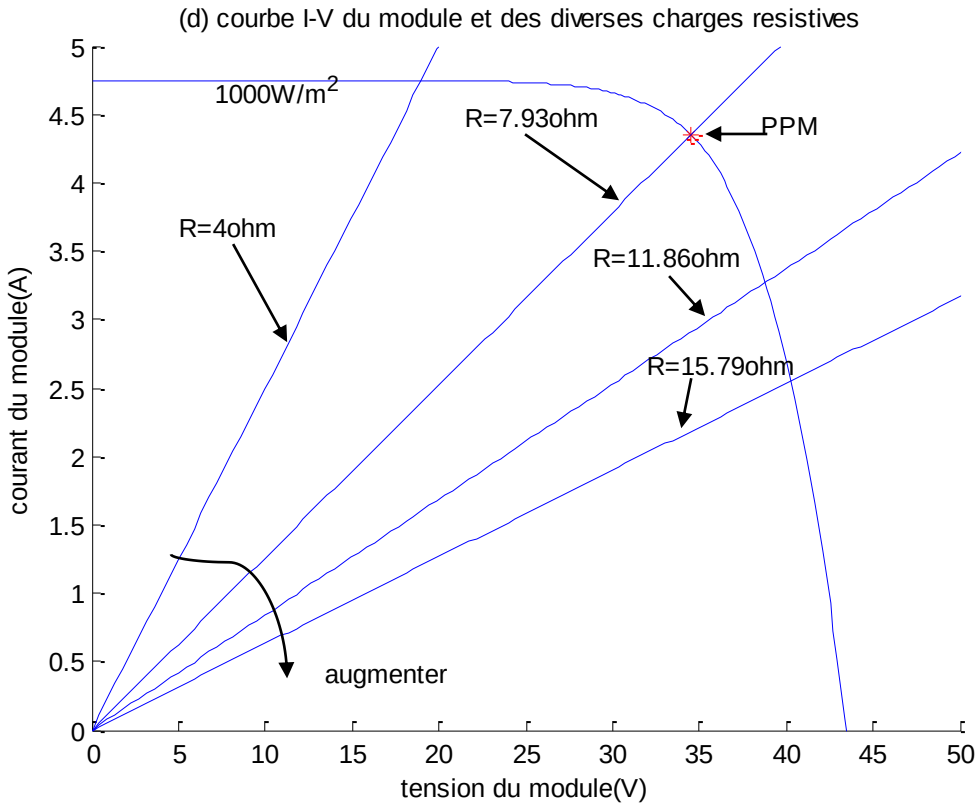


Figure III.2 : Courbes I-V du module PV BP SX 150 et des diverses charge résistives simulés avec MATLAB (1 kW/m²,25°C)

III.2 Courbes courant-tension pour des charges

Bien que la courbe I-V d'une cellule photovoltaïque, un module, ou une rangé définisse les combinaisons tension-courant sous les conditions ambiantes existantes, elle ne nous indique pas où sur cette courbe le système fonctionnera réellement. Cette détermination dépend de la charge pour laquelle les PVs fournissent leur puissance. Si on trace la courbe I-V d'une charge sur le même graphe qui contient la courbe I-V d'un PV (figure (III.3)), le point d'intersection est le point opérationnel.

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.2).

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

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

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 sur le long de la courbe I-V du module PV (figure (III.3)).

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 :

$$R_m = \frac{V_m}{I_m} \tag{III.3}$$

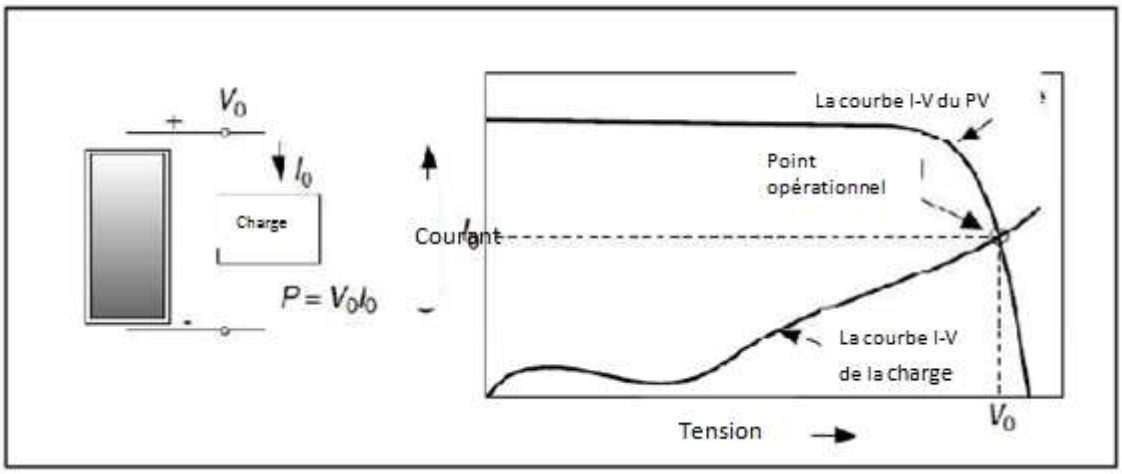


Figure III.3: le point opérationnel est le point d'intersection des courbes courant-tension de la charge et du PV

Où V_m et I_m sont la tension et le courant au point de puissance maximale (PPM). Sous les conditions spécifiques auxquelles les modules sont testés, le PPM correspond à la tension V_m et au courant I_m calibrés du module. Cela signifie que la meilleure valeur de la résistance, pour transfert la puissance maximal, devrait être V_m / I_m . 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.

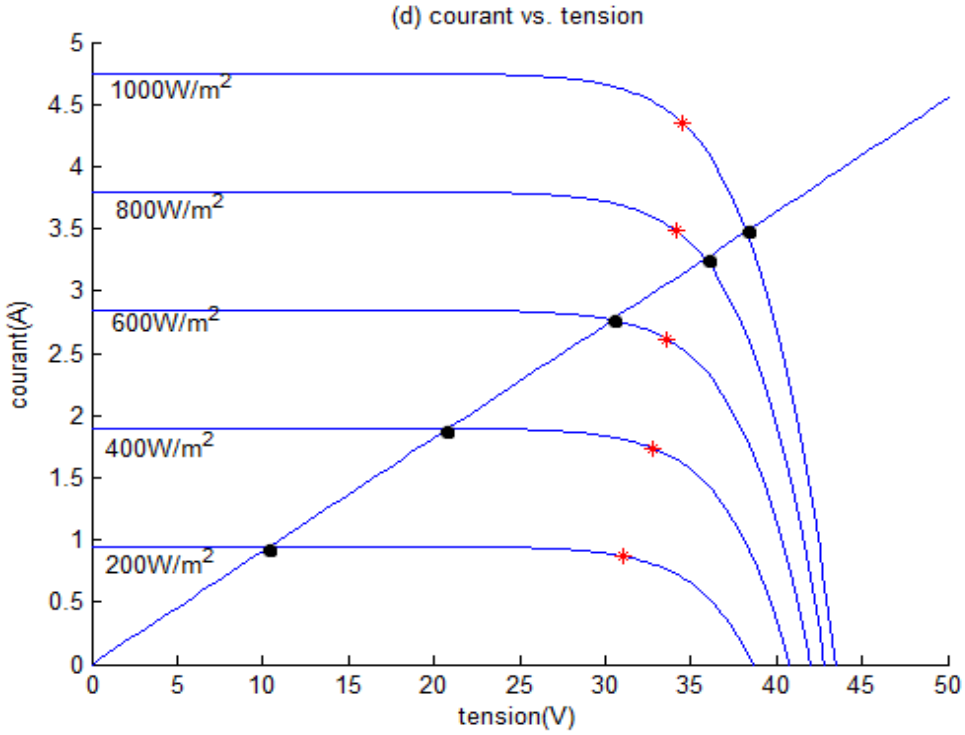


Figure III.4:L'efficacité du module PV avec une charge résistive fixe conçue pour des différents niveaux d'ensoleillement

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 :

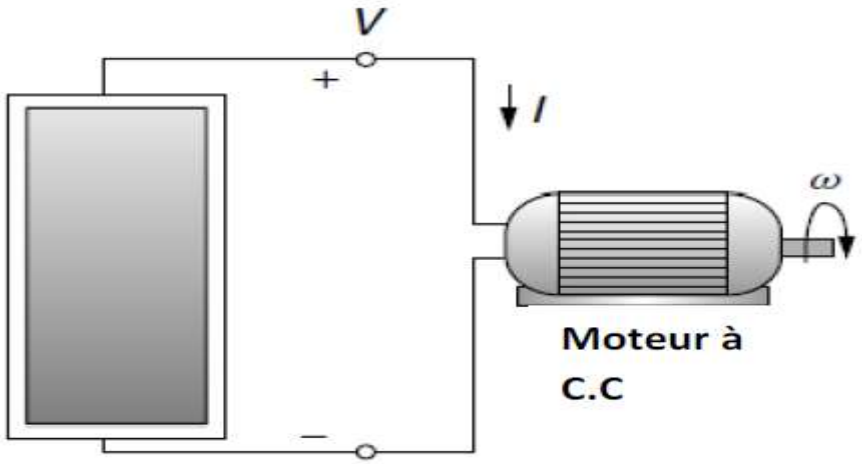


Figure III.5 : Machine à courant continu connecte à un PV

a. Équation électrique :

L'équation de tension induite s'écrit :

$$u_a(t) = R_a\, i_a(t) + L_a\, \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \qquad \text{(III.4)}$$

b. Équation électromagnétique :

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

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

k_e*:* Constantes de tension

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

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

k_t*:* constantes de couple de moteur.

c. Équation mécanique:

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

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

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.6). 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. Noter que si vous bloquez un moteur à C.C tandis que la tension est au-dessus de la tension de démarrage, le courant peut être fort et peut bruler les enroulements de l'induit [25].

La courbe I-V d'un moteur à C.C est superposée à un ensemble de courbes photovoltaïques dans la (figure III.6). La mauvaise adaptation des points opérationnels avec le **PPM** idéal est claire. Noter dans cet exemple, 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.

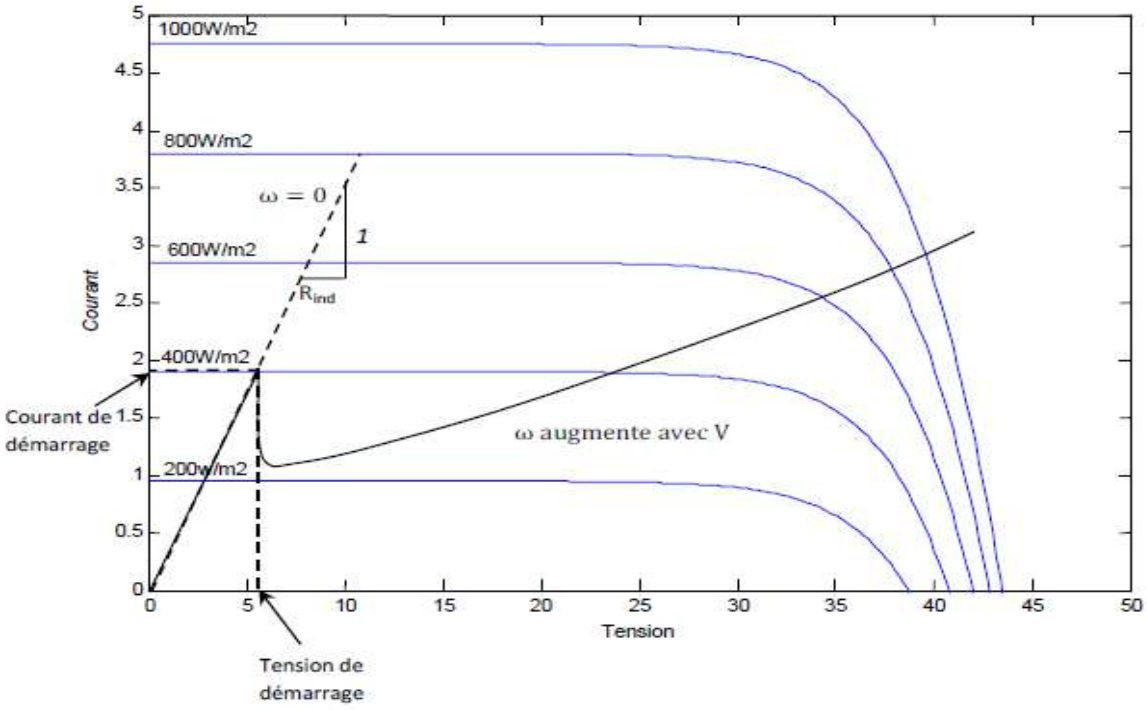


Figure III.6: Caractéristiques électrique d'un moteur à C.C à aimant permanent

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.6) 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.

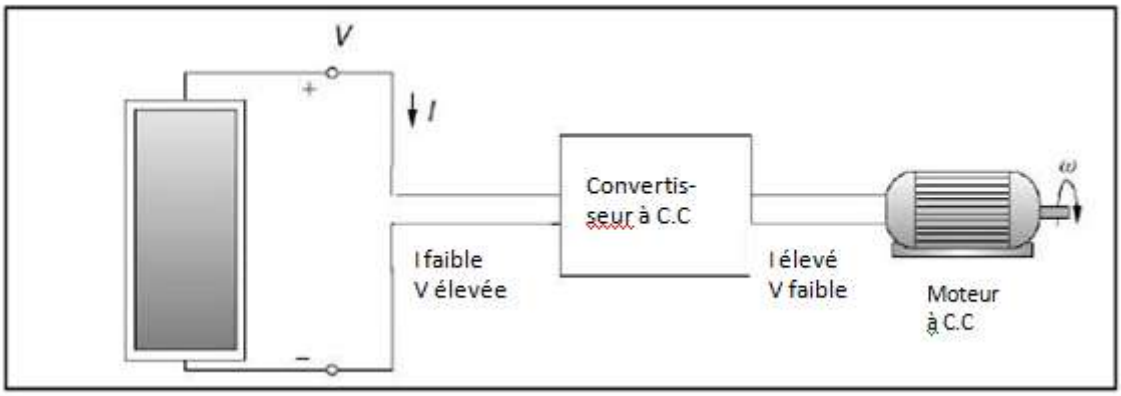


Figure III.7: Un convertisseur DC-DC pour aider à démarrer ou maintenir le moteur en marche avec une basse lumière du soleil

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

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

Le cœur du matériel du suiveur du PPM est le convertisseur à courant continu (DC-DC). Il est très utilisé dans les alimentations à C.C ainsi que pour la commande des moteurs à C.C afin de régler la tension d'entrée au niveau désiré [28]. MPPT utilise le même convertisseur pour un but différent, il assure :

- La régulation de la tension d'entrée au PPM du panneau PV
- Assure l'adaptation de la charge pour un transfert maximal de la puissance.

III.3.1.1. Les hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue

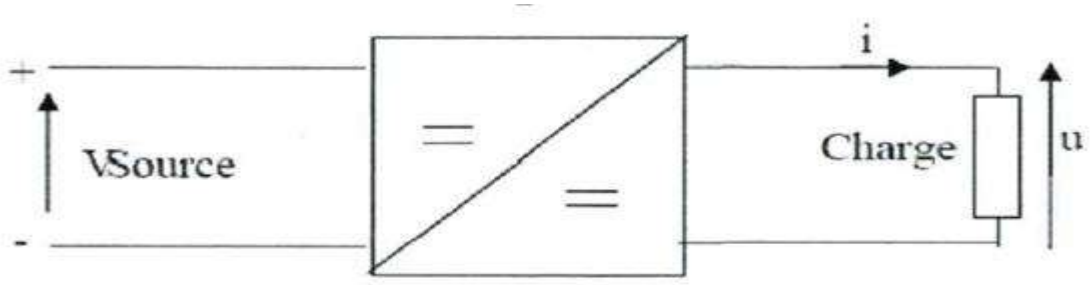


Figure III.8: convertisseur DC-DC [22].

a) Hacheur Buck

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

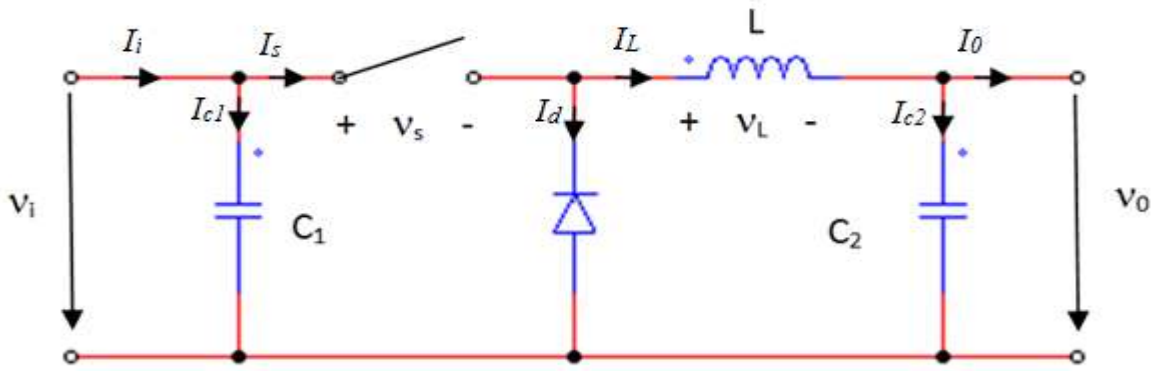


Figure III.9 : Circuit idéal d'un convertisseur Buck.

➢ **Fonctionnement**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_S, la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f = \frac{1}{T_S}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_S, T_S]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle. Ce qui donne que :

$$V_0 = \alpha V_i \qquad \text{(III.8)}$$

➢ ***Modèle du circuit équivalent***

Pour avoir le modèle mathématique du convertisseur buck, on analyse le fonctionnement pour des deux états (interrupteur ouvert et fermé). La (figure III.10) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur buck avec le commutateur fermé. La figure (III.11)

représente le convertisseur buck avec le commutateur ouvert pendant l'intervalle de temps $\alpha' T_S$, où α' désigne le complément du rapport cyclique α, défini comme suit :

$$\alpha' = 1 - \alpha \tag{III.9}$$

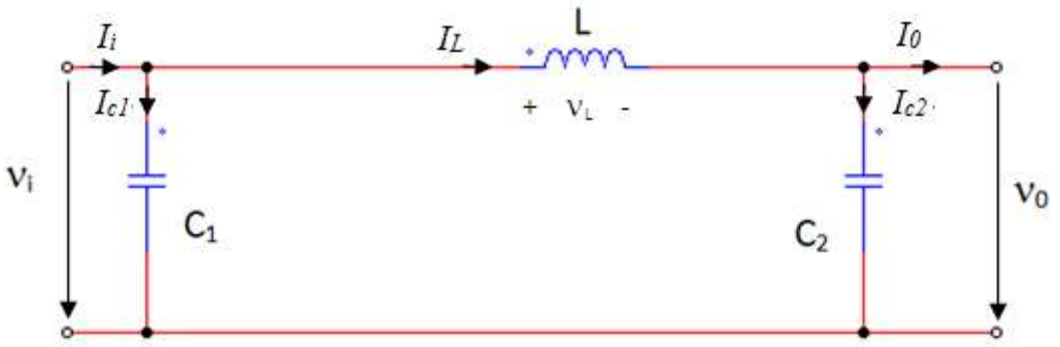


Figure III.10 : Circuit équivalent d'un hacheur Buck quand le commutateur est fermé ($T \in [0,\ \alpha T_S]$),

L'application de la loi de Kirchhoff au circuit de la figure (III.10) (interrupteur fermé) conduit à la série d'équations suivante :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \dfrac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \dfrac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\ V_L(t) = L \dfrac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \tag{III.10}$$

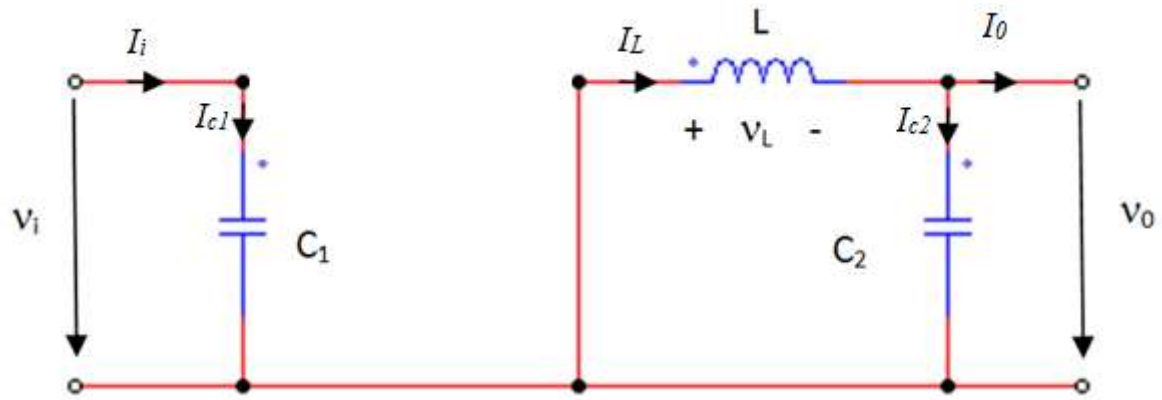


Figure III.11: Circuit équivalent d'un hacheur Buck quand le commutateur est ouvert ($T \in [\alpha T_S,\ T_S]$)

En Utilisant la loi de Kirchhoff pour le circuit de la figure(III.11)(interrupteur ouvert), une deuxième série d'équations est obtenue :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \dfrac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \dfrac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\ V_L(t) = L \dfrac{dI_L(t)}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \qquad \text{(III.11)}$$

b) Convertisseur Boost (hacheur survolteur)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

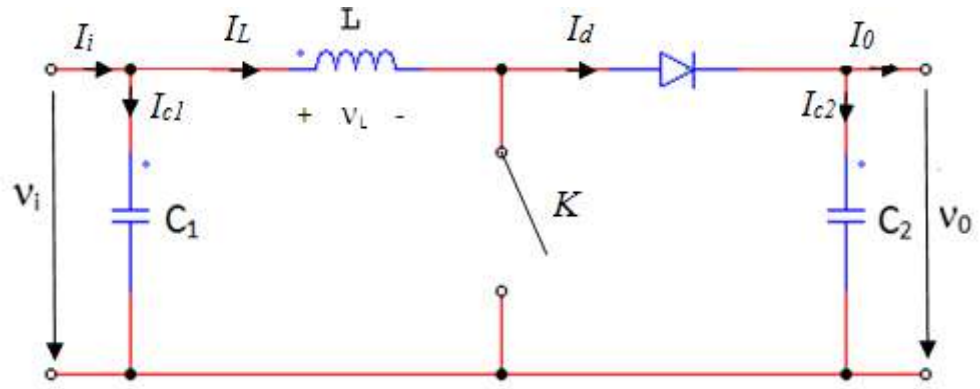


Figure III.12 : Circuit Convertisseur Boost.

- **Fonctionnement**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_S , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de l'interrupteur K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_S, T_S]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_K = V_0$. La tension de sortie du convertisseur boost est telle que :

$$V_0 = V_i / (1-\alpha) \qquad \text{(III.12)}$$

- ***Modèle du circuit équivalent***

Pour avoir le modèle mathématique du convertisseur boost, on l'analyse pour des deux états : interrupteur ouvert et fermé. La figure (III.13) montre le schéma de circuit équivalent d'un convertisseur boost avec le commutateur fermé. La (figure III.14) représente le convertisseur boost avec le commutateur ouvert pendant l'intervalle de temps $\alpha' T_S$,

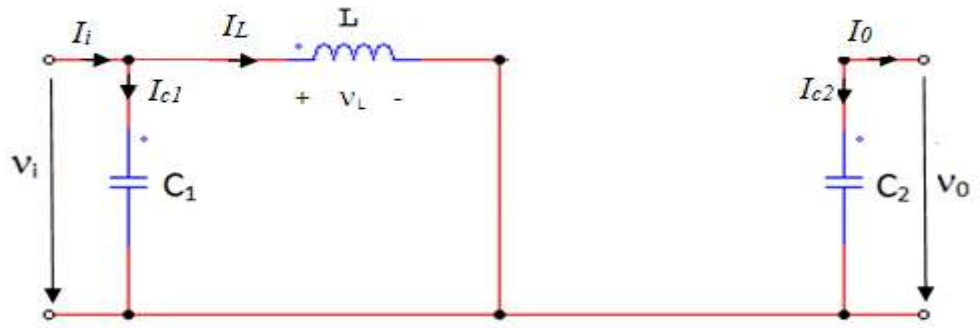


Figure III.13: Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est fermé

$$(T \in [0,\ \alpha T_S]\ ),$$

L'application de la loi de Kirchhoff au circuit de la figure (III.13) conduit à la série d'équation suivante :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \dfrac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \\ V_L(t) = L \dfrac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \qquad \text{(III.13)}$$

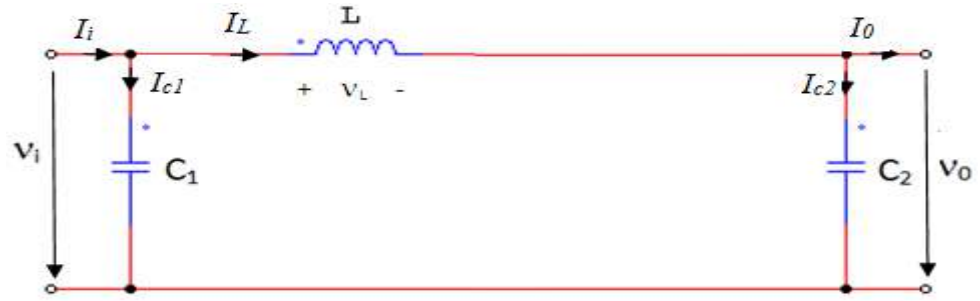


Figure III.14: Circuit équivalent d'un hacheur boost quand le commutateur est ouvert

$$(T \in [\alpha T_S,\ T_S]\ )$$

Pour la période de temps ou l'interrupteur est ouvert $\alpha' T_S$ montré à la figure (III.14), une deuxième série d'équations peut être obtenue :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \dfrac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \dfrac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\ V_L(t) = L \dfrac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

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.

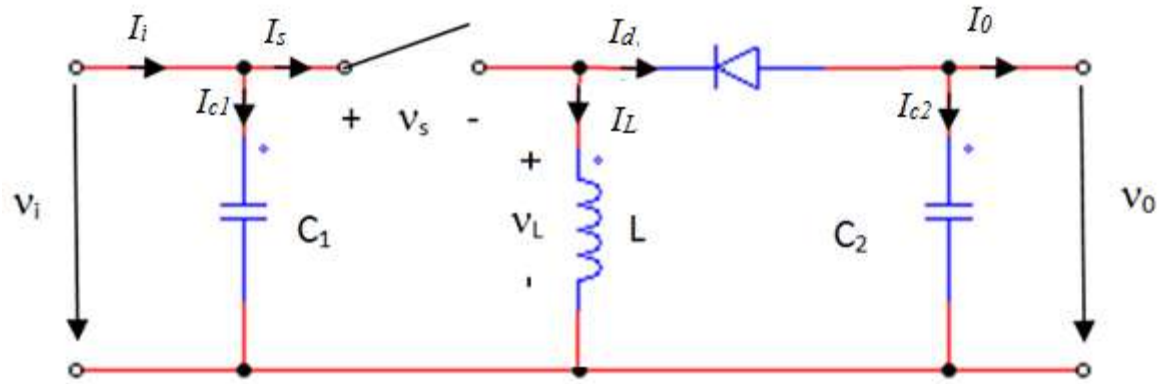


Figure III.15: Circuit idéal d'un convertisseur buck-boost.

- **Fonctionnement**

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté à la figure (III.15). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_S, le courant augmente linéairement. La tension V_L est égale à V_i . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à $-V_0$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que [29] :

$$V_0 = \alpha V_i / (1-\alpha) \quad \text{(III.15)}$$

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

- **Modèle du circuit équivalent**

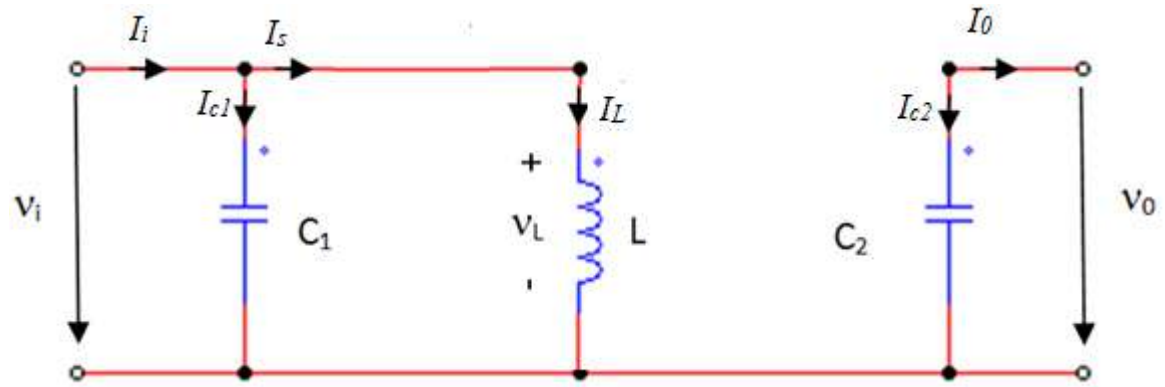


Figure III.16 : Circuit équivalent d'un hacheur buck-boost quand le commutateur est fermé ($T \in [0,\ \alpha T_S]$),

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.16) donne la première partie des équations du système pour la période de temps αT_S :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \dfrac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \\ V_L(t) = L \dfrac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \qquad \text{(III.16)}$$

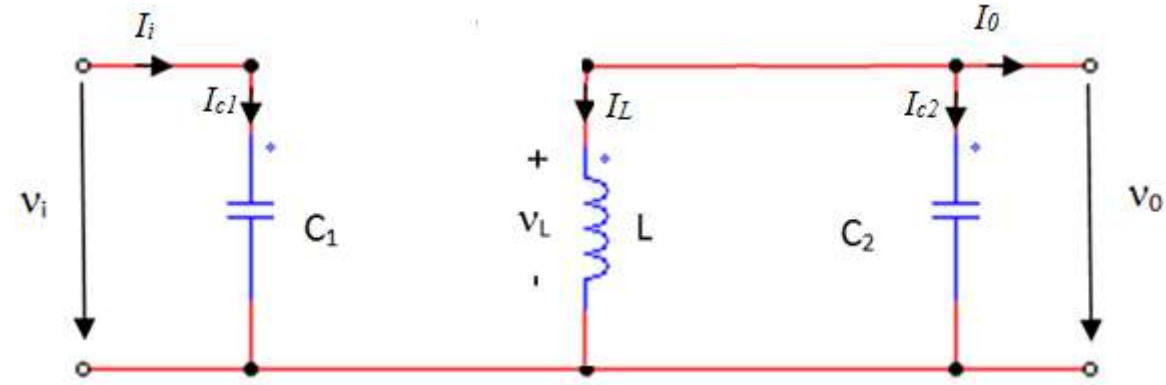


Figure III.17 : Circuit équivalent d'un hacheur buck- boost quand le commutateur est ouvert

et pour la deuxième période de temps $\alpha' T_S$, d'après la figure (III-17) on aura :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \dfrac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) - I_L(t) \\ V_L(t) = L \dfrac{dI_L(t)}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad \text{(III.17)}$$

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'.

a) Principe de fonctionnement de MPPT

Un régulateur MPPT permet 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 et à chaque instant. La figure (III.18) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

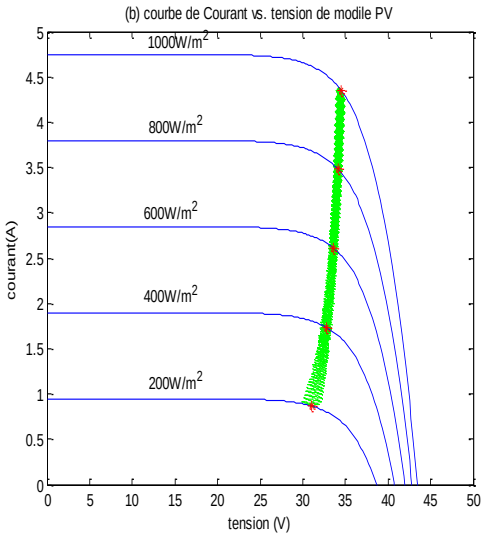


Figure III.18 : Les caractéristiques I-V et la trajectoire de PPM (en gras).

La Figure (III.19) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le générateur photovoltaïque et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. 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.

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction des conditions climatiques en se basant sur des méthodes d'optimisations [13],[19].

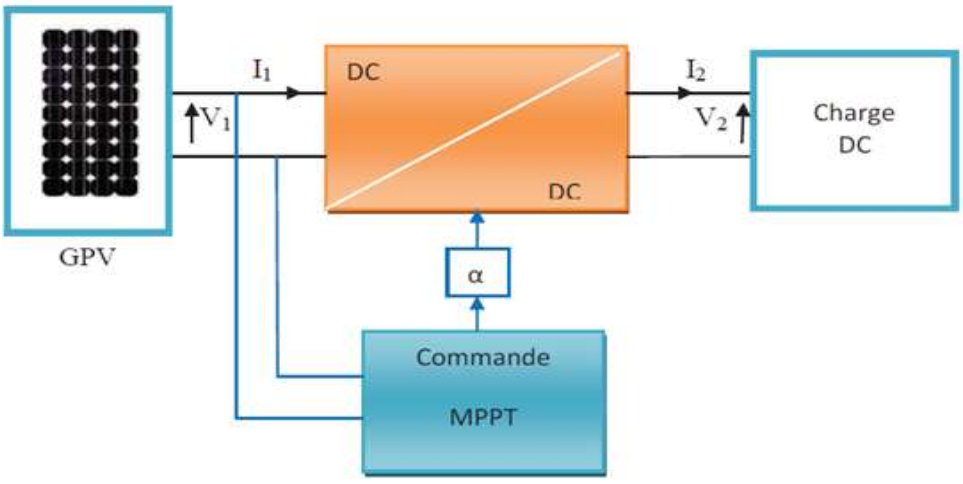


Figure III.19: Chaîne élémentaire de la conversion photovoltaïque [13][17]

b) Les méthodes de poursuite de MPP Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale.

❖ 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. Parmi ces méthodes on peut citer :

- 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.

❖ 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 Perturbation et Observation (P&O).
- L'incrément de la conductance.

➢ La méthode de perturbation et d'observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le puis utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC,), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (α)

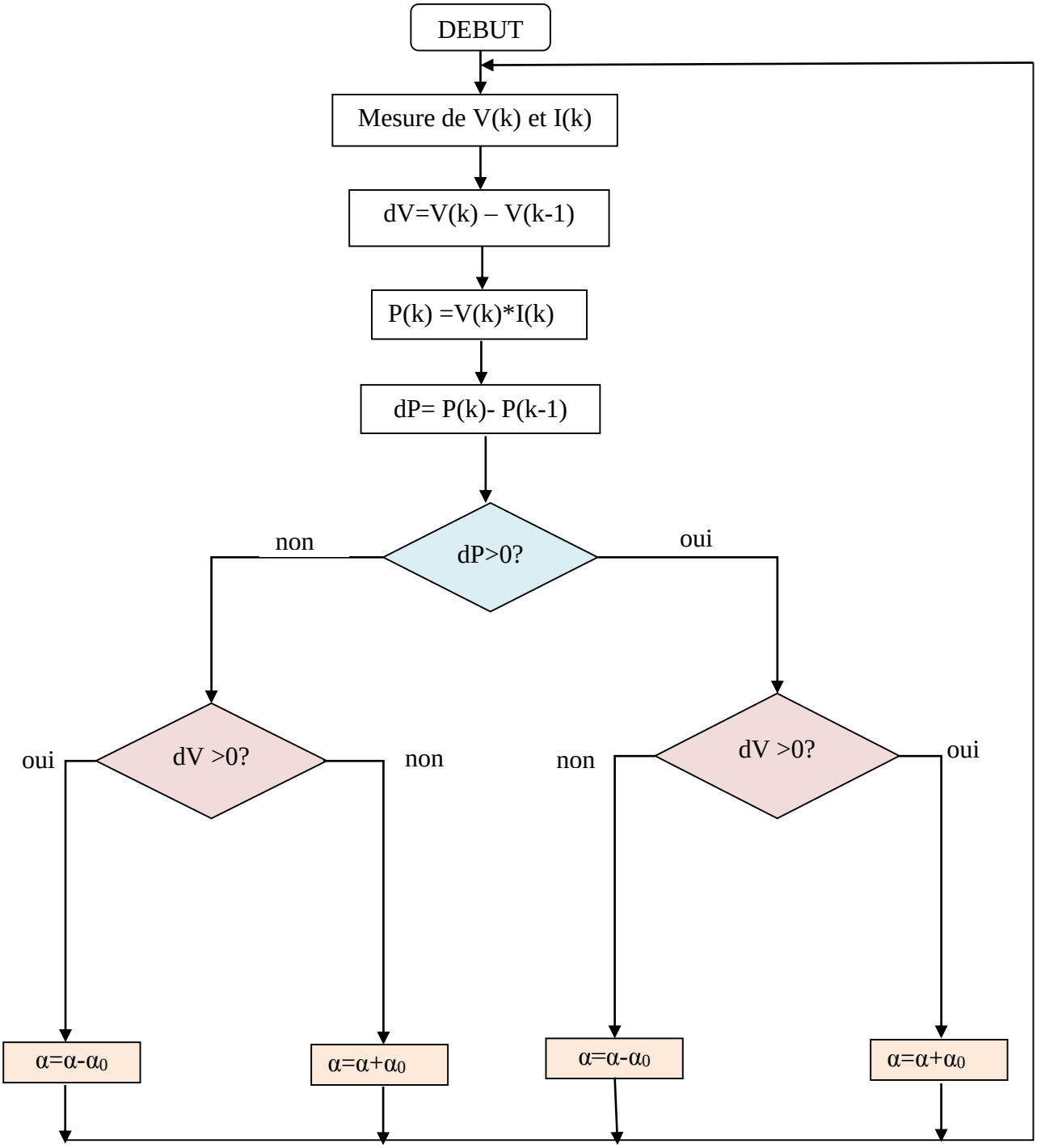


Figure III.20: Algorithme de la méthode de perturbation et d'observation « P&O ».

Le fonctionnement de cet algorithme est interprété comme suit :

D'abord la tension *V* et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance *P(k)*. Cette valeur *P(k)* est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$.

- Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la décrémentation du rapport cyclique α continuera dans le même sens que dans le dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .
  - Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $\alpha=\alpha+\alpha_0$. Donc on fait la même chose.
  - Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $\alpha = \alpha - \alpha_0$.Donc on fait la même chose.
- Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la des incrémentations du rapport cyclique α sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci suivant la valeur de dV .

- **La méthode d'incrémentation de la conductance**

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes

On a $P = V \times I$ alors on développe la dérivé dP/dV

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V\,I)}{dV} = I\,\frac{dV}{dV} + V\,\frac{dI}{dV} \qquad \text{(III.18)}$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \qquad \text{(III.19)}$$

Les caractéristiques de ce dérivé sont explicitées à la figure (III.21).

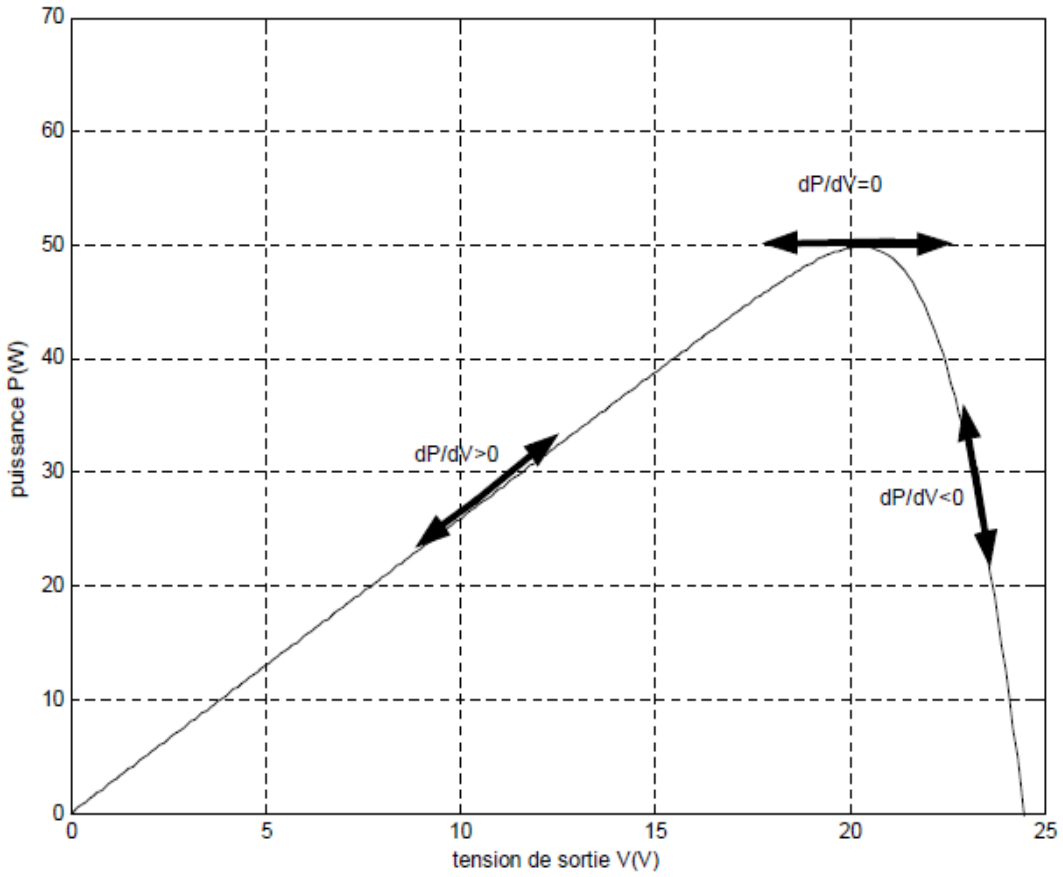


Figure III.21: Caractéristiques du dérivé autour du point de puissance maximale (MPP).

Ceci donne les équations suivantes

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{Pour} V = V_m \tag{III.20}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{Pour} V > V_m \tag{III.21}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{Pour} V < V_m \tag{III.22}$$

La combinaison de ces équations donne :

$$I = -V\frac{dI}{dV} \quad \text{Pour} V = V_m \tag{III.23}$$

$$I < -V\frac{dI}{dV} \text{ Pour} V > V_m \quad \text{(III.24)}$$

$$I > -V\frac{dI}{dV} \text{Pour } V < V_m \quad \text{(III.25)}$$

$-\frac{I}{V}$: C'est la conductance ;

$-\frac{dI}{dV}$: La conductance instantanée.

Avec ces relations on pourrait développer l'algorithme d'incrémentation de la conductance ce dernier est représenté sur le schéma suivant (figure III.22):

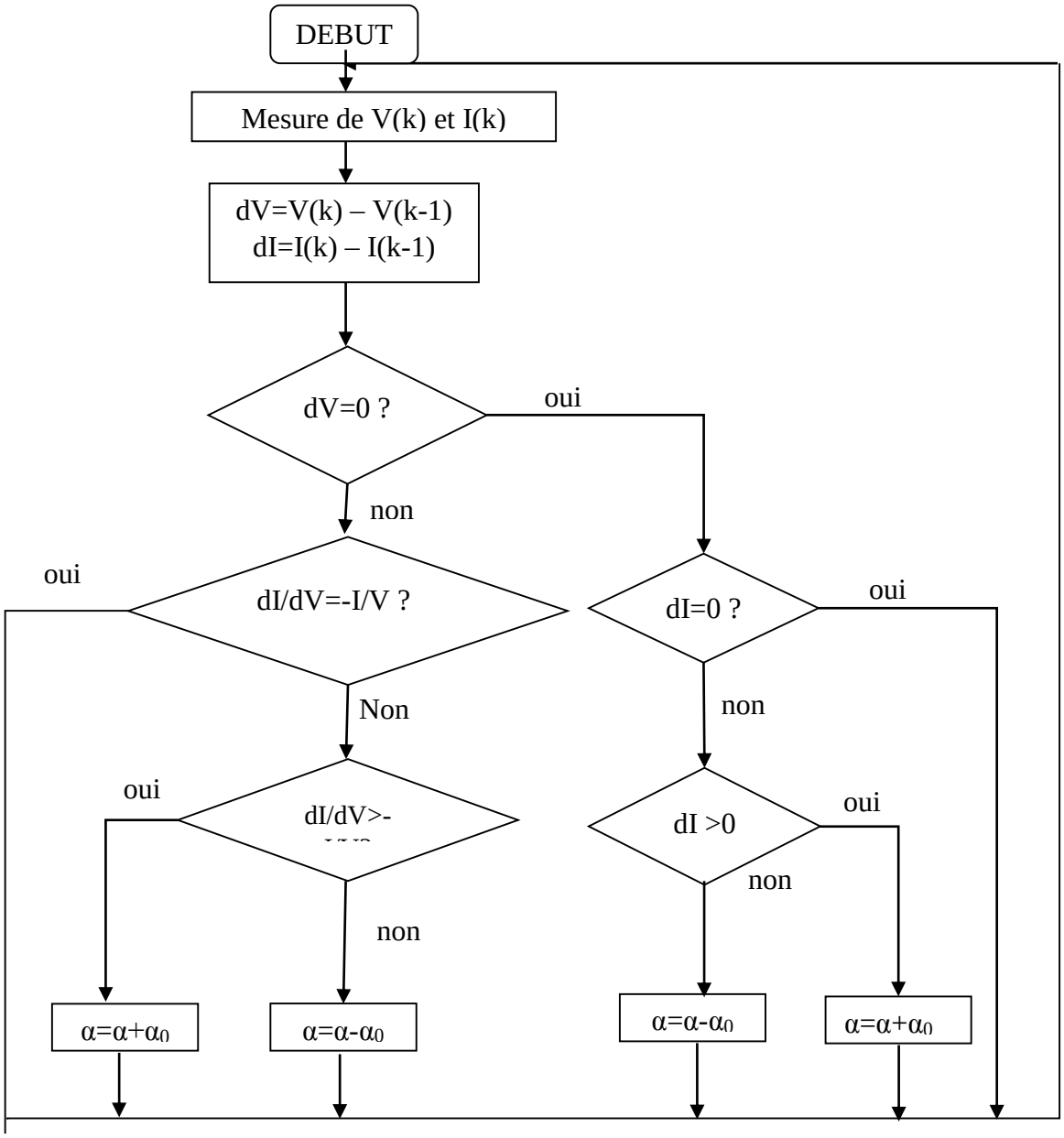


Figure III.22:L'algorithme de la méthode d'incrémentation de la conductance « IncCond ».

L'algorithme de la méthode d'incrémentation de la conductance nous permet de trouver le point de fonctionnement maximum et cela en mesurant *V* et *I* et en faisant l'approximation sur les dérivées *dV* et *dI* avec la différence entre les plus récentes valeurs mesurées de *V* et *I* et celles mesurées dans le cycle précédent :

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \tag{III.26}$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \tag{III.27}$$

Si on est dans le cas où on a atteint le point de fonctionnement maximum donc $\frac{dP}{dV} = 0$,

alors $I = -V\frac{dI}{dV}$ pour $V = V_m$ l'algorithme prend ça en considération et ne change pas le paramètre α donc rien ne change.

Dans le cas ou le système fonctionnait au MPP pendant le cycle précédent, la dérivée de la tension de fonctionnement sera zéro ($dV(k) = 0$). Ceci mènerait à une division par zéro. Pour éviter un arrêt du système, cette condition est tester en premier et si c'est vrai une autre branche dans l'algorithme test les possibles changements des conditions de fonctionnement du panneau (dI). Puisque la tension n'a pas changé, les seules informations utiles sur les changements possibles peuvent être obtenues du courant *I*.

- S'il est stable, $dI = 0$, alors aucun changement du rapport cyclique n'est effectué parce qu'il est au point de fonctionnement maximum.
- S'il y a accroissement de dI, alors on se trouve dans le cas semblable à $I > -V\frac{dI}{dV}$

donc : $V < V_m$,alors le rapport cyclique $\alpha = \alpha + \alpha_0$

- S'il y a diminution de dI c'est le cas $I < -V\frac{dI}{dV}$ alors $V > V_m$ donc $\alpha = \alpha - \alpha_0$

Et bien sûr si $\frac{dP}{dV} \neq 0$ on utilisera le test $\frac{dI}{dV} > -\frac{V}{I}$ employé pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de V_m et l'ajustement du rapport cyclique α est déterminé comme on l'a évoqué précédemment.

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 de perturbation et observation et la méthode incrémentation de l'inductance.

Chapitre IV

Conception et Simulation de système de pompage PV

IV.1.Introduction

Ce chapitre donne la conception, la simulation et la réalisation du suiveur du point de puissance maximale (MPPT). Il discute la conception du panneau et des convertisseurs (buck,boost et buck-boost). Comme charge, on a commencé la simulation avec la charge résistive et puis avec notre motopompe. La méthode utilisée est la méthode P&O, ce choix est justifié par la simplicité que présente cette méthode lors de la conception sans omettre son faible cout [HAMZA Azzedine].

IV.2.Partie simulation

IV.2.1. Conception du générateur photovoltaïque

Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de BP Solaire. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W. Le tableau (IV.1) donne ses caractéristiques électriques.

Tableau IV.1 : Les caractéristiques électriques du module BP SX 150

Les caractéristiques électriques	
La puissance maximale	150W
La tension maximale	34.5V
Le courant maximal	4.35A
La tension de court-circuit	43.5V
Le courant de circuit ouvert	4.75A
Le coefficient de température du I_{CC}	$0.065 \pm$ 0.015%/°C
Le coefficient de température du V_{CO}	$-(160 \pm 20)\, mV / °C$
Le coefficient de température de puissance	$-(0.5 \pm 0.05)\% / °C$
La température nominale opérationnelle de la cellule	47 ± 2°C

IV.2.2. Conception du convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC/DC sont conçus en se basant sur les cahiers de charges données par les tables ci-dessous.

Tableau IV.2 : Cahier de charge pour une charge résistive

Caractéristiques électriques	
Tension du panneau (V_i)	20-48V
Courant du panneau (I_i)	0-5A
Puissance du panneau maximale(P_{max})	150W
Courant de sortie (I_S)	0-5A
Tension de sortie (V_S)	12-86.6V
Fréquence de hachage	50 kHz
Rapport cyclique	$0.1 \leq \alpha \leq 0.6$

TableauIV.3 : Cahier de charge du moteur à CC

Caractéristiques électriques	
Tension du panneau (V_i)	20-48V
Courant du panneau (I_i)	0-5A
Puissance du panneau maximale(P_{max})	150W
Courant de sortie (I_S)	0-5A
Tension de sortie (V_S)	12-30V
Fréquence de hachage	50 kHz
Rapport cyclique	$0.1 \le \alpha \le 0.6$

IV.2.2.1. Choix des composantes

Tableau IV.4 : Choix des composantes [30]

Paramètre	Boost	Buck	Buck-boost
$A_V = \frac{V_o}{V_i}$	$\frac{1}{1-\alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$
$A_I = \frac{I_o}{I_i}$	$1-\alpha$	$\frac{1}{\alpha}$	$\frac{(1-\alpha)}{\alpha}$
L	$\frac{V_i \alpha}{\Delta I_{PV} f}$	$\frac{V_0 (1-\alpha)}{\Delta I_{PV} f}$	$\frac{(1-\alpha) V_0}{\Delta I_{PV} 2 f}$
C	$\frac{\alpha V_o}{\Delta V_o R_{ch} f}$	$\frac{(1-\alpha) V_O}{8 \Delta V_O L f^2}$	$\frac{\alpha V_O}{\Delta V_O R_{ch} f}$

IV.2.2.1.1. Charge résistive

Pour la charge résistive notre choix c'est porté sur un hacheur boost. Pour la détermination du rapport cyclique on a :

$$\alpha = \frac{\frac{V_0}{V_i} - 1}{\frac{V_0}{V_i}} = 0.6 \qquad \text{(IV.1)}$$

a. Choix des inductance

Les valeurs des inductance sont choisies de telle sortes que la variation des courants des inductances n'est pas supérieur à 5% de la valeur moyenne du courant. L'equation suivante donne la variation du courant de l'inductance.

$$\Delta I_{PV} = \frac{V_i \alpha}{L \times f} \qquad \text{(IV.2)}$$

Ou :

V_i : est la tension d'entrée

α : est le rapport cyclique

f : est la fréquence de commutation

Supposer que la plus mauvaise oscillation du courant se produit dans la condition maximale de la puissance. Dans cette condition, le courant I_i est 4.35A, et le courant d'ondulation est 5% de I_i .

$$\Delta I_i = 0.05 I_i = (0.05)(4.35) = 0.2175 \qquad \text{(IV.3)}$$

De l'équation (IV.1), (IV.2)et (IV.3)

$$L = \frac{V_i \alpha}{\Delta I_{PV} f} = \frac{(34.5 \times 0.6)}{0.2175 \times 50000} = 1.9 \times 10^{-3} H \qquad \text{(IV.4)}$$

b. Choix du condensateur

Le critère de choix du condensateur est que la tension d'oscillation ne doit pas dépasser les 5%. L'equation suivante donne la variation de la tension admisible.

$$\Delta V_o = \frac{\alpha V_o}{C R_{ch} f} \tag{IV.5}$$

La résistance de la charge est :

$$R_{ch} = \frac{V_0^2}{P_o} = 50\Omega \tag{IV.6}$$

La valeur de C est calculée avec l'équation suivante :

$$C = \frac{\alpha V_o}{\Delta V_o R_{ch} f} = \frac{0.6 \times 86.6}{4.33 \times 50 \times 50000} = 4.8\mu F \tag{IV.7}$$

IV.2.2.1.2. Motopompe

On cas d'utilisation d'un moteur à CC, un hacheur buck-boostest retenu, la valeur du rapport cyclique est telle que :

$$\alpha = \frac{\frac{V_0}{V_i}}{\frac{V_0}{V_i} + 1} = 0.465 \tag{IV.8}$$

a. Le choix des inductances

Le courant d'ondulation est 5% de I_i .

$$\Delta I_{PV} = \frac{(1-\alpha)V_0}{2Lf} \tag{IV.9}$$

Des équations (IV.8) et (IV.9) :

$$L = \frac{(1-\alpha)V_0}{2\Delta I_{PV} f} = \frac{(1-0.465) \times 30}{2 \times 0.2175 \times 50000} = 7.38 \times 10^{-4} \tag{IV.10}$$

b. Choix de condensateur

La résistance de la charge $R_{ch} = 0.2\Omega$

$$C = \frac{\alpha V_o}{\Delta V_o R_{ch} f} = \frac{0.465 \times 86.6}{1.5 \times 0.2 \times 50000} = 2.685mF \quad \text{(IV.11)}$$

IV.2.3.Simulation du MPPT

IV.2.3.1. Simulation du MPPT avec une charge résistive

Le système simulé est constitué par un module PV BP SX 150, un convertisseur idéalboost, un suiveur MPPT et une charge résistive (50Ω).

Le point opérationnel du module PV est déterminé d'après la charge (R).

$$R = \frac{V_a}{I_a} \quad \text{(IV.12)}$$

La tension et le courant du convertisseur boost sont tels que.

$$V_S = \frac{1}{1-\alpha} V_a \quad \text{(IV.13)}$$

$$I_S = (1-\alpha) I_a \quad \text{(IV.14)}$$

De l'équation (IV.13) et (IV.14), l'impédance d'entrée du convertisseur est

$$R_{in} = \frac{V_a}{I_a} \quad \text{(IV.15)}$$

Où : α est le rapport cyclique du convertisseur boost.

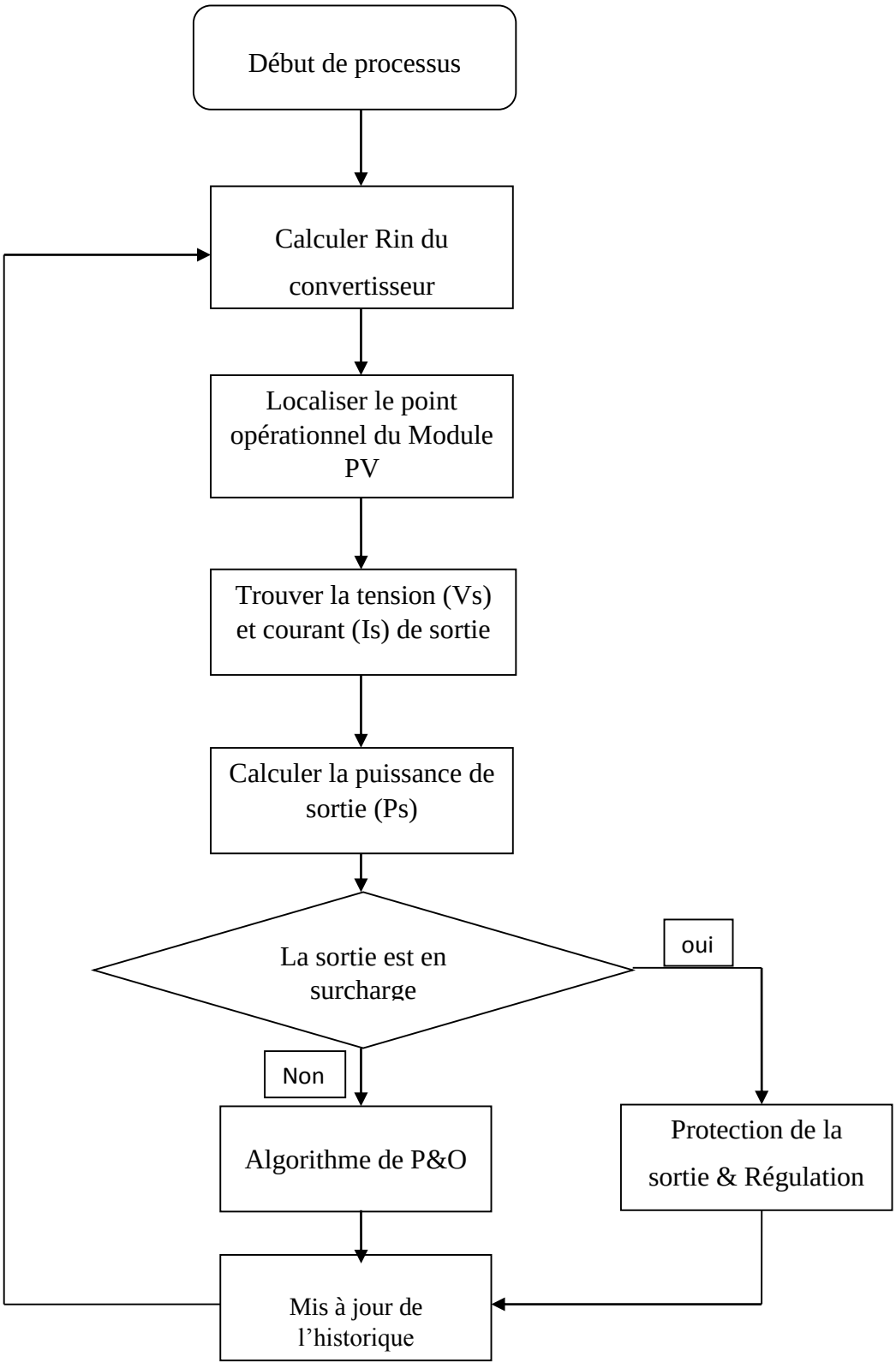
$$R_{charge} = \frac{1}{(1-\alpha)^2} R_{in} \quad \text{(IV.16)}$$

L'organigramme représenté sur la figure (IV.1), explique le principe de fonctionnement du système simulé.

La simulation est effectuée sous une irradiation linéairement croissante et variante de

200W/m^2 à 1000W/m^2 avec une cadence modérée de 0.3W/m^2 par échantillon.

La figure (IV.2) (a) et (b) montrent clairement que la trace du point opérationnel reste près des PPM pendant la simulation. La figure (IV.2) (c) affiche la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et son rapport cyclique. La figure (IV.2) (d) représente la relation entre le courant et la tension du convertisseur.et l'équation $\frac{I_S}{V_S} = \frac{1}{R_{charge}}$ de la charge résistive. On peut remarquer la correspondance entre les deux courbes.



FigureIV.1 : Organigramme de simulation du MPPT

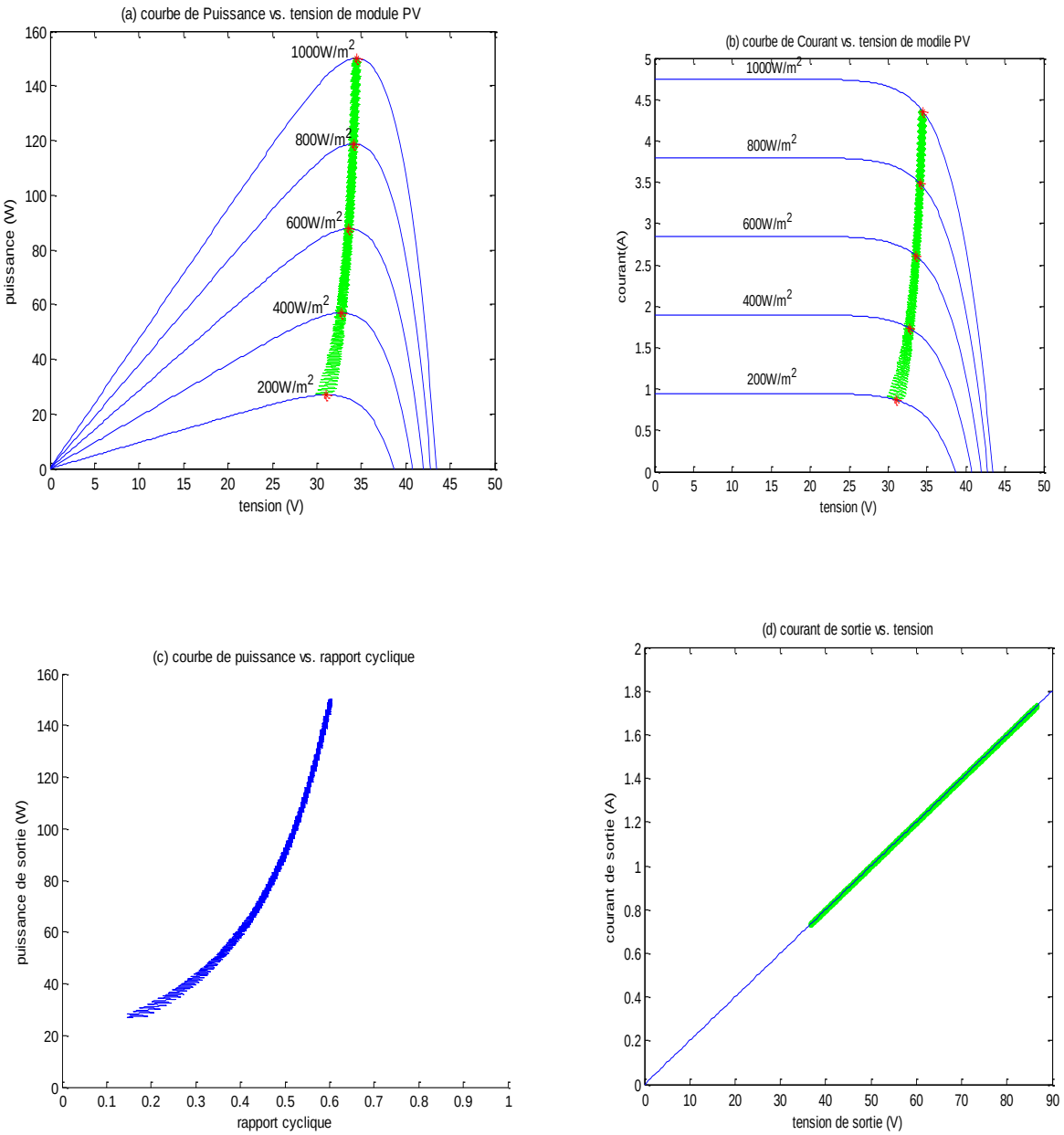


Figure IV.2 : Simulation du MPPT avec une charge résistive

IV.2.3.2. Simulations de MPPT avec une charge de type moteur à C.C d'une pompe

Le système simulé est constitué par un module PV BP SX 150, un convertisseur idéal Buck-boost, un suiveur MPPT et une motopompe.

Le point opérationnel du module PV est déterminé d'après la résistance de la moto pompe ($R = V_a / I_a$). La tension et le courant issus du convertisseur sont tels que

$$V_S = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_a \tag{IV.17}$$

$$I_S = \frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_a \tag{IV.18}$$

De l'équation (IV.17) et (IV.18), l'impédance d'entrée du convertisseur est

$$R_{in} = \frac{V_a}{I_a} \tag{IV.19}$$

Où : α est le rapport cyclique du convertisseur buck-boost.

$$R_{charge} = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)^2} R_{in} \tag{IV.20}$$

a. Modélisation de la pompe à eau à C.C

Nous allons adopter pour le modèle du moteur à C.C à aiment permanent le moteur exploité par HAMZA Azzedine dans leur travail [25].

Le débit de la pompe est proportionnel à la vitesse du moteur, qui est réglé parla tension d'entrée. La figure (IV.3)donne la relation entre le débit d'eau,la profondeur du puits et la puissance nominale de la moto pompe. Lors du fonctionnement, on peut aller à une puissance maximale de 150W.

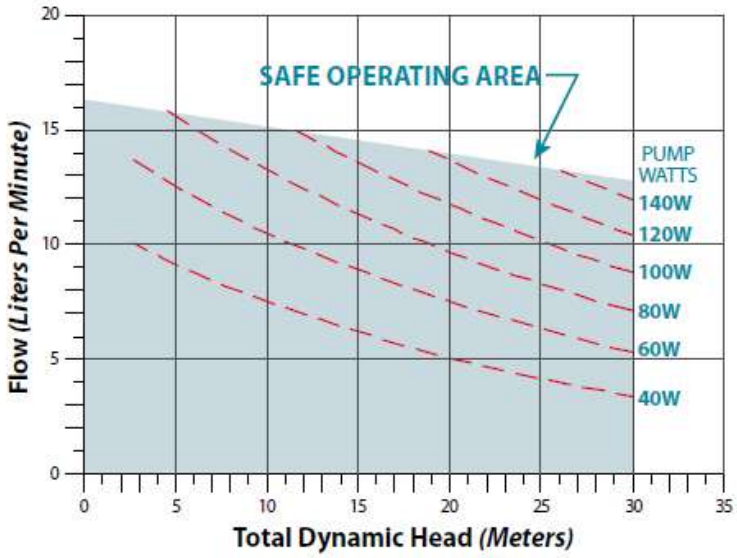


Figure IV. 3: Diagramme de performance de la pompe à eau de type Honda

A froid, la résistance de charge est de l'ordre de 0.2. Cependant à chaud,(lors du fonctionnement), la résistance variée en fonction de la tension [25].

$$R_{charge} = 9.5\times10^{-5}\times V_S^3 - 8.7\times10^{-3}\times V_S^2 + 0.37\times V_S + 0.2 \qquad \text{(IV.21)}$$

Où Vs est la tension de sortie du convertisseur.

b. Résultats de la simulation avec MATLAB

La simulation est effectuée d'une façon similaire à celle de la charge résistive. L'irradiation est augmentée linéairement de 20W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2 avec la même échelle de 0.3W/m^2 par échantillon. Les figures(IV.4) (a) et (b) montrent que la trace du point opérationnel reste près des PPM dans toute la simulation. La figure(IV.4) (c) donne la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et de son rapport cyclique.

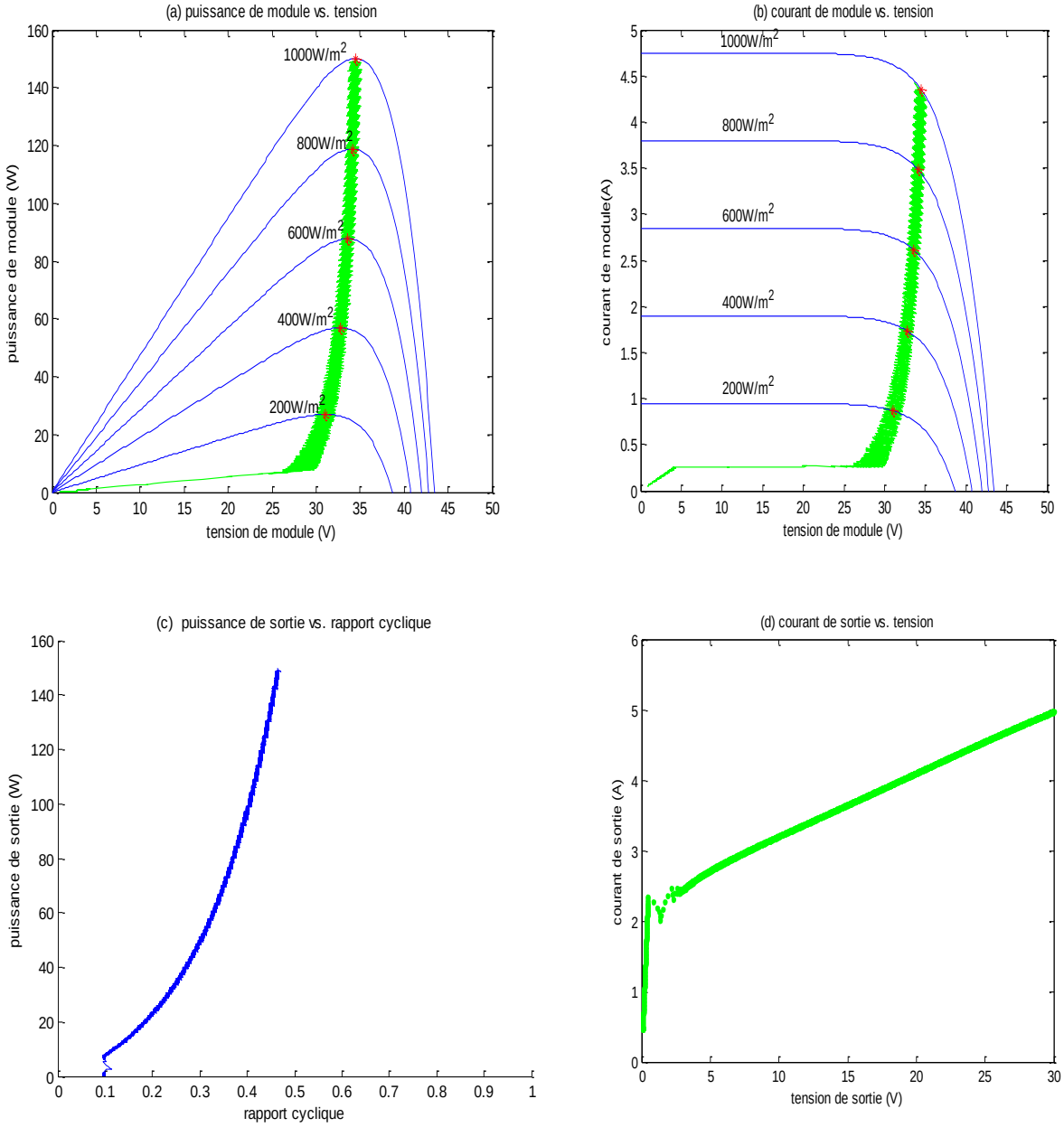


Figure IV.4 : Les simulations du MPPT avec une charge de pompe avec moteur à C.C*(20 à 1000W/m2, à 25C^0)*

La figure(IV.4) (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. Dès que le moteur développe sa fcem, le courant diminue puis ré-augmente lentement avec a fur et à mesure que la tension augmente.

c. Comparaison entre un Système de pompage avec MPPT et un système directement couplé

La puissance du système de pompage simulé dans la section précédente est comparée 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 ensoleillée en Avril à Barcelone, en Espagne (Tableau IV.5) et d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie (Tableau IV.6), L'énergie électrique totale produite au cours d'une période de 12 heures est calculée.

Tableau IV.5 : La puissance et le rendement du système de pompage avec et sans MPPT d'une journée ensoleillée en Avril à Barcelone, en Espagne

	Avec MPPT	**Sans MPPT**
Énergie totale (Simulation)	1.1335KWh	0.7021 KWh
Énergie totale (Théorique Maximale)	.1480 KWh	1.1480 KWh
Le rendement	98.7362 %	61.1545 %

Tableau IV.6: La puissance et le rendement du système de pompage avec et sans MPPT d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie

	Avec MPPT	**Sans MPPT**
Énergie totale (Simulation)	1.1509 KWh	0.6294 KWh
Énergie totale (Théorique Maximale)	1.1521KWh	1.1521KWh
Le rendement	99.8976%	54.6307%

Les résultats de la comparaison montrent que le système PV couplé directement à la charge a un rendement médiocre dans les deux cas considérés 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 MPPT peut utiliser plus de 98% de sa capacité. Le système peut augmenter le rendement global de plus de 37% par rapport au système sans MPPT (cas d'un système de pompage en une journée ensoleillée en Avril à Barcelone, en Espagne)
- Le système avec MPPT peut utiliser plus de 99% de sa capacité. le système peut augmenter le rendement global de plus de 35% par rapport au système sans MPPT (cas d'un système de pompage en une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie).

Une autre série de simulations (Figures (IV.5-IV.6)) fournit une comparaison entre les deux systèmes en termes de débits de l'eau pompée. Les résultats montrent que la MPPT peut augmenter de façon significative les performances du système.

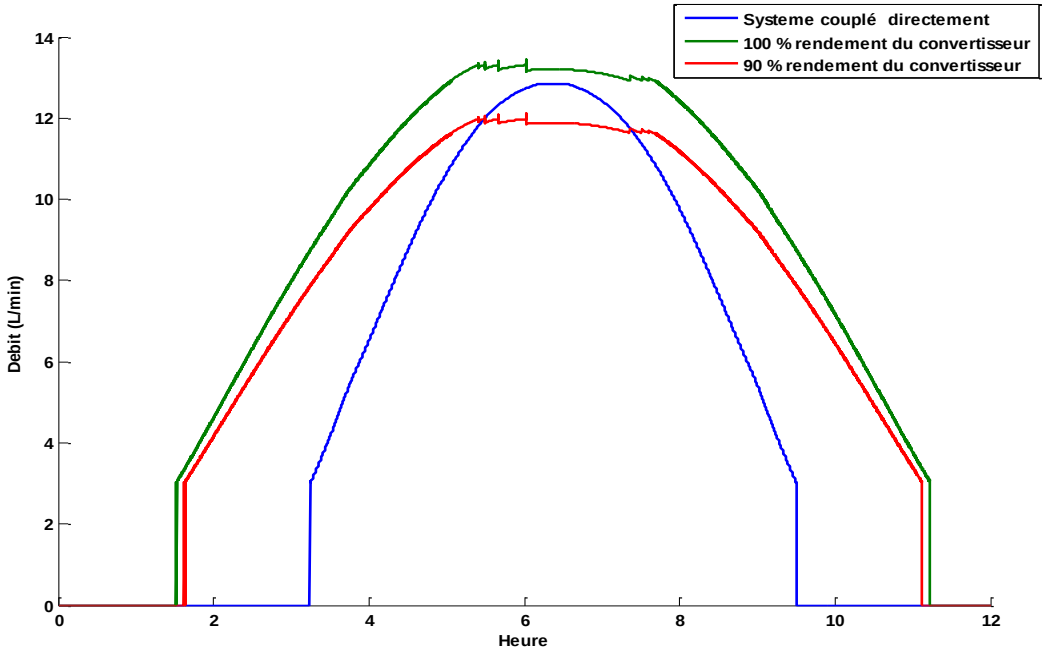


Figure IV.5: Débits de la pompe à eau d'un système PV pour une période de 12 heures simulé avec les données d'irradiation d'une journée ensoleillée en Avril à Barcelone, en Espagne

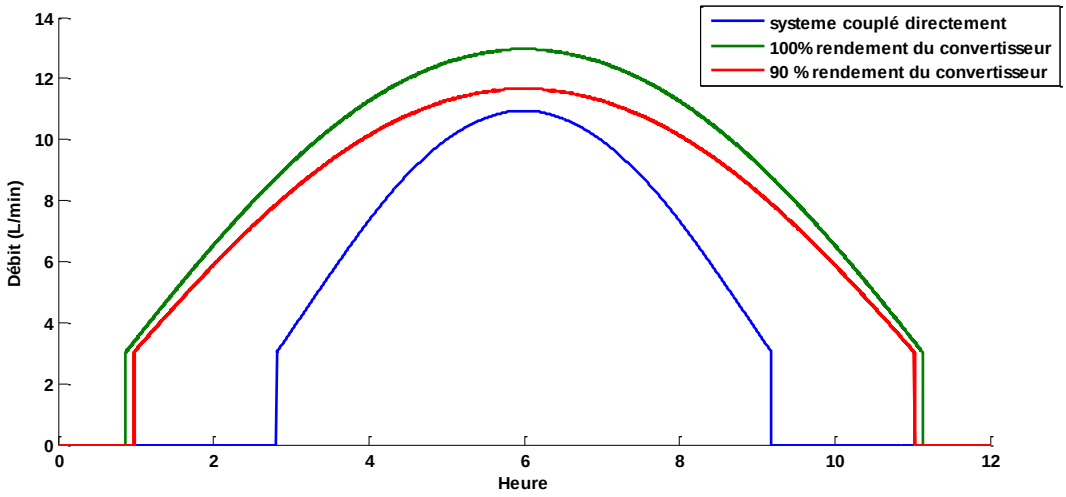


Figure IV.6 :Débits de la pompe à eau d'un système PV pour une période de 12 heures simulé avec les données d'irradiation d'une journée éclairée en janvier à Tindouf, en Algérie

IV.3.Partie pratique

IV.3.1. Arduino Uno

La carte Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328

Elle dispose :

- de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset).



Figure IV.7 : Carte Arduino "Uno"

IV.3.1.1. Le logiciel arduino

Le logiciel va nous permettre de programmer la carte Arduino.

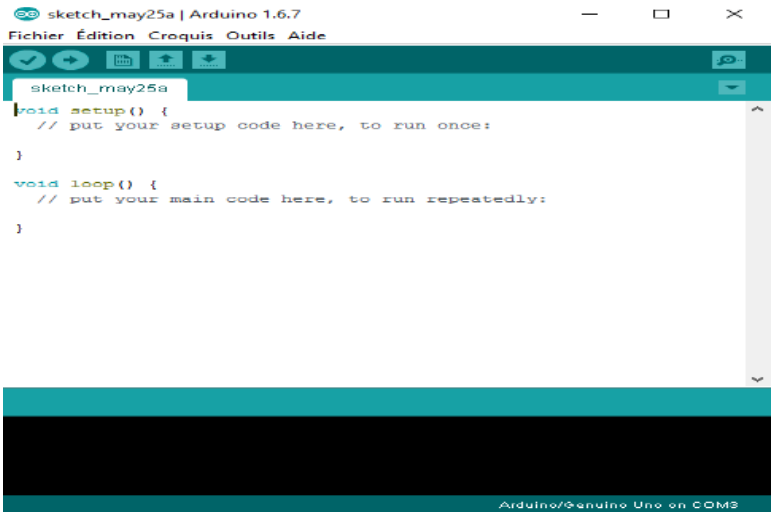


Figure IV.8 : Logiciel Arduino

IV.3.1.2. La méthode d'Installation

Lorsque vous connectez la carte à votre ordinateur sur le port USB, un petit message en bas de l'écran apparaît. Théoriquement, la carte que vous utilisez doit s'installer toute seule. Si ce n'est pas le cas, il faut aller au panneau de configuration, puis ajout de nouveau matériel et suivre les étapes de l'assistant.

IV.3.2.Hacheur Buck (réalisé)

IV.3.2.1. Le choix du composant

Les convertisseurs DC/DC sont conçus en se basant sur les cahiers de charge donnée par le tableau ci-dessous.

TableauIV.7 : Le cahier de charge de la pompe (PRATIQUE)

Caractéristiques électriques	
Tension du panneau (V_i)	10-17.88V
Courant du panneau (I_i)	0-1.27A
Puissance du panneau maximale (P_{max})	12W
Courant de sortie (I_S)	0-1.1A
Tension de sortie (V_S)	8-12V
Fréquence de hachage	50 kHz
Rapport cyclique	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$

a. Le rapport cyclique

$$\alpha = \frac{V_i}{V_O} = 0.67 \qquad \text{(IV.23)}$$

b. Choix de l'inductance

Le courant d'ondulation est 5% de I_i.

$$L = \frac{V_0(1-\alpha)}{\Delta I_i \, f} = 120\mu H \qquad \text{(IV.24)}$$

c. Choix du condensateur

$$C = \frac{(1-\alpha)}{8^{\Delta V_O}\!/_{V_O} \, Lf^2} = 10\mu F \qquad \text{(IV.25)}$$

IV.3.3. Moteur à C.C

Le moteur que nous avons utilisé dans la réalisation est un moteur a aimant permanant dont les caractéristiques électriques sont : P_n=12 Watt et U_n =12V.

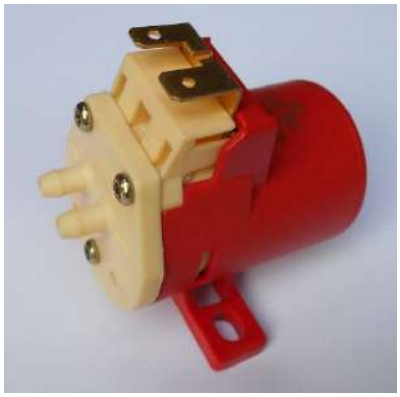


Figure IV.9 : Motopompe

IV.3.4. Les résultats de la réalisation

D'après le résultat du la figure (IV.10), la tension du circuit ouvert $V(t)$ de notre panneaux avec un éclairement constant est égale à 20 V ce qui correspond bien au datasheet de notre panneau.

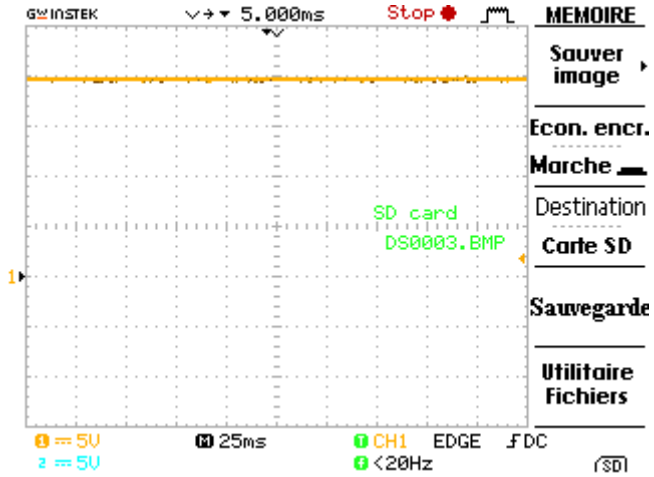


Figure IV.10 : La tension du panneau en circuit ouvert

Le résultat de la figure IV.11 correspond à la tension consommé par la charge motopompe, la tension consommée est égale à de 12.5 V. Donc cette valeur correspond bien aussi à la tension nominale de notre pompe.

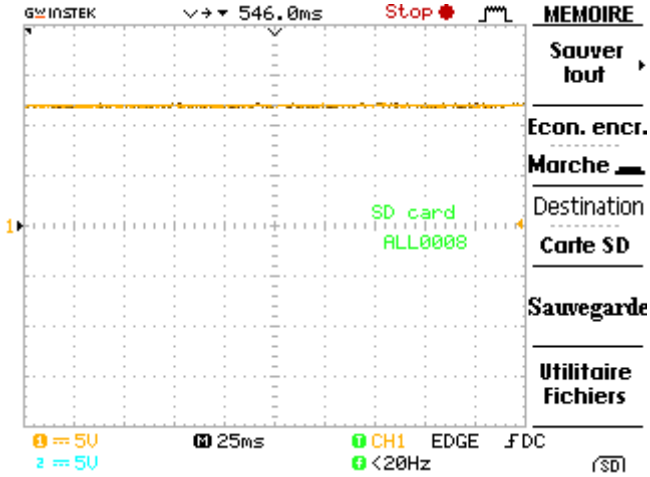
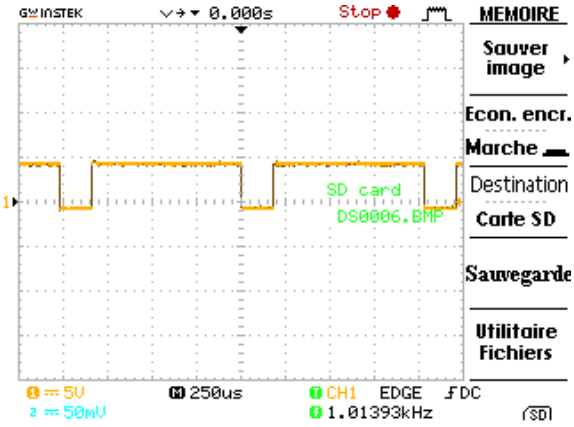
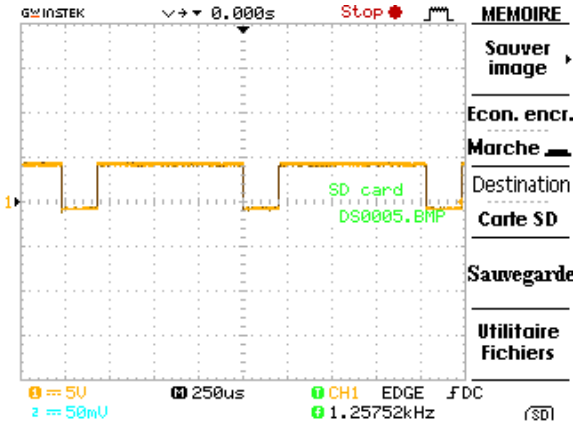


Figure IV.11 : La tension du sortie du hacheur

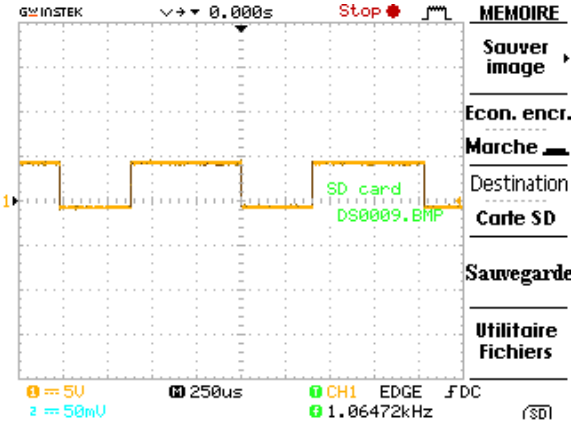
On a provoqué un changement d'irradiation en jouant sur l'inclinaison du panneau puis on a observé le changement du rapport cyclique du panneau (figure (IV.12)).



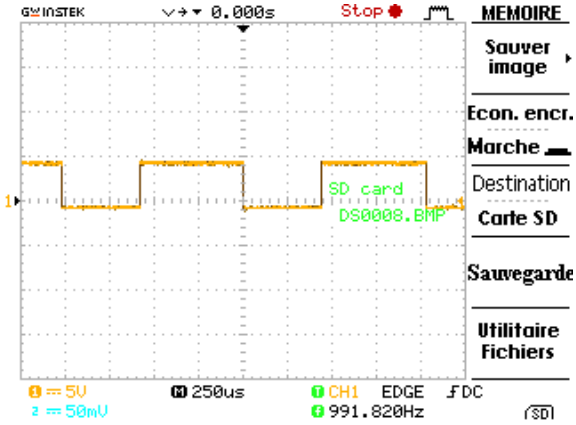
(a) Irr1



(b) Irr2



(c) Irr3



(d) Irr4

Figure IV.12 : Les résultats de simulation avec différentes irradiations

Le résultat de la figure IV.12 met en évidence la relation du rapport cyclique avec l'éclairement. En effet, quand l'irradiation augment $Irr1 < Irr2 < Irr3 < Irr4$ le rapport cyclique diminue.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a simulé le système de pompage photovoltaïque (le générateur PV; le convertisseur et le groupe motopompe) en fonction de l'influence du changement de l'éclairement dans deux sites différents à savoir à Barcelone, en Espagne et à Tindouf, en Algérie. Une comparaison entre les performances de ces systèmes avec et sans MPPT en termes d'énergie totale produite par le système photovoltaïque et le volume total de l'eau pompée par jour est effectuée. Les résultats de simulations ont montré que le MPPT peut améliorer de façon très significative les performances du système de pompage PV. Les résultats pratiques du MPPT réalisé, ont permet de valider l'algorithme développé pour la poursuite du point de la puissance maximale.

Conclusion générale

Conclusion général

Le présent travail a porté sur la modélisation et la simulation des systèmes de pompage photovoltaïque. Ces systèmes se présentent comme une solution idéale pour l'alimentation en eau pour les régions isolées.

Le premier chapitre est consacré à l'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). Ainsi, 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.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation et à la réalisation pratique du système de pompage photovoltaïque avec la commande MPPT perturbation et observation. Pour ce faire, on a commencé par un dimensionnement des différents composants du générateur et ceci dans le but de mettre en place les différents étages d'adaptation et par la suite nous permettre la simulation du système de pompage photovoltaïque sans et avec MPPT en termes d'énergie totale produite par le système photovoltaïque et le volume total de l'eau pompée par jour. Les résultats présentés dans le mémoire montrent que l'utilisation de cette commande permet d'améliorer le rendement de l'installation du pompage solaire.

La carte Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328. Elle dispose de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)), et de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques), La machine peut être programmée en langue

" C ". Dans ce travail, on cherche à optimiser le fonctionnement du générateur solaire lors de la commande de la moto pompe DC à travers un hacheur Buck. Les résultats pratiques du MPPT réalisé, ont permet de valider l'algorithme développé pour la poursuite du point de la puissance maximale.

Des perspectives peuvent être envisagées, il s'agit d'étudier d'autres techniques modernes, insensibles et robustes, basées sur l'intelligence artificielle qui permettront une optimisation en temps réel du système de pompage tel que la logique flou et les réseaux neurones.

Bibliographie

Bibliographie

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

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

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

[4] BOUCHRITTE wafa ; convertisseurs multi-niveaux dans les systèmes pv connectés au réseau ; mémoire de master; université mohamed khider-biskra.

[5] BOUKLI-HACEN omar ; conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion energétique ; thèse de doctorat; universite abou bakr belkaid-tlemcen .

[6] ANNE labouret, MICHEL villoz ; energie solaire photovoltaique ; live ; dunod ,paris 4éédition ; 2009.

[7] BELHADJ mohammed ; modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ; mémoire de magister; centre universitaire de bechar ; 2008.

[8]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.

[9] PIERRE bessemoulin et JEAN oliviéri. 'le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette ', météo-france, service central d'exploitation de la météorologie toulouse, la météorologie 8eme série - n°31 - septembre 2000.

[10] HADJ BELKACEMI mohammed ; modélisation et etude expérimentation d'un capteur solaire non vitré et perforé ; mémoire de magister; université abou bekr belkaid de tlemcen ; 2011.

[11] slama fateh ; modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ; mémoire de magister; universite ferhat abbas – setif ; 2011.

[12] BENKHELIFA abdelaziz ; modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur ; mémoire de magister; université kasdi merbah ouargla ; 2012.

[13] BELAKEHAL soltane.« conception & commande des machines a aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables ». thèse doctorat en électrotechnique. université de Constantine 2010.

[14] BENDJAMAA ibrahim. « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » mémoire de magister. Université de tlemcen 2011.

[15] AOUFI saliha ; modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ; mémoire de magister ; université ferhat abbas-setif-1 2014.

[16] LOUAZENE mohamed lakhdar ; etude technico économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de ouargla ; mémoire de magister ; universite el hadj lakhdar batna ; 2008.

[17] BOUSSAID mohammed ; modélisation des phénomènes vieillissement des modules photovoltaïque ; mémoire de magister; universite abou bakr belkaid-tlemcen.

[18] NIA mohamed ; etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire ; memoire de magister; universite ferhat abbas – setif ; 2010.

[19] DEBILI narimene ; etude et optimisation en environnement matlab/simulink d'un système de pompage photovoltaique ;mémoire de magister ; 2015

[20] HELALI kamelia ;modélisation d'une cellule photovoltaique etude comparative ;mémoire de magister ; universite mouloud mammeri de tizi-ouzou ; 2012

[21]BRIHMAT fouzia ; l'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride pv/éolien ; memoire de magister; université mouloud mammeri de tizi-ouzou ; 2012.

[22] BENSEDDIK ET DJALOUD ; étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ; mémoire de master; universite kasdi merbah- ouargla ; 2012.

[23] ABDELHAK maoucha ; etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique ; mémoire de magister; universite de batna

[24] MEDJHED adel ; extraction des paramètres des cellules solaires en utilisant le modèle à deux exponentielles ; memoire de magister; universite ferhat abbas-setif ; 2011.

[25] HAMZA Azzedine.modélisation et commande d'un système photovoltaique ; mémoire de magister; université badji mokhtar annaba.

[26] GILBERT m. masters. renewable and efficient electric power systems. john wiley & sons.2004.

[27] ANTONIO luque et STEVEN hegedus. handbook of photovoltaic science and engineering. john wiley & sons ltd, 2003.

[28] ERICKSON r. w.. fundamentals of power electronics, isbn 0-412-08541-0, new york: chapman and hall, may 1997.

[29] MECHALIKH med nadjib ;hamada charaf eddine ; modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ;mémoire de master; 25/06/2013.

[30] ESRAM T. and P. L. Chapman, "Comparison of Photo-voltaic Array Maximum Power Point Tracking Tech-niques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, 2007.

Annexe A

Annexe A

bp solar

BP SX 150

150-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

BP Solar's SX series provides cost-effective photovoltaic power for general use, operating DC loads directly or, in an inverter-equipped system, AC loads. The SX 150 is one of the largest products in this series, providing 150 watts of nominal maximum power. With 72 cells in series, it charges 24V batteries (or multiples of 24V) efficiently in virtually any climate. It is used primarily in utility grid-supplemental systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Electrical output is via cables terminated with installation-speeding polarized connectors.

This product is available as the SX 150S module, with a clear anodized frame; and as a frameless laminate, the SX 150L.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of SX 150 construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells in series;
- Polarized weatherproof DC-rated plug-and-socket connectors provide reliable low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation;
- SX 150S frame strength exceeds requirements of certifying agencies;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass.



DC Connectors

Limited Warranties

- Power output for 20 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 2 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.



Clear-Anodized Universal Frame

Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- SX 150S is listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- SX 150S is certified by TÜV Rheinland as Class II equipment and for use in systems with voltage up to 1000 VDC;
- SX 150S complies with the requirements of IEC 61215, including:
  - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
  - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
  - 2200 VDC frame/cell string isolation test;
  - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).



BP SX 150S

©BP Solar Global Marketing Department 2001

01-4014-1 11/01

Figure A.1 : Description du panneau BP SX 150S

Mechanical Characteristics

Weight
SX 150S 15.0 kg (33.1 pounds)
SX 150L 12.4 kg (27.3 pounds)

Dimensions
SX 150S: See drawing
SX 150L: 1580(62.2) x 783(30.8) x 19(0.75)
Dimensions in brackets are in inches.
Unbracketed dimensions are in millimeters
Overall tolerances ±3mm (1/8")

Output
600mm long RHW, AWG #12 (4mm²) 2-conductor cable with weatherproof polarized connectors

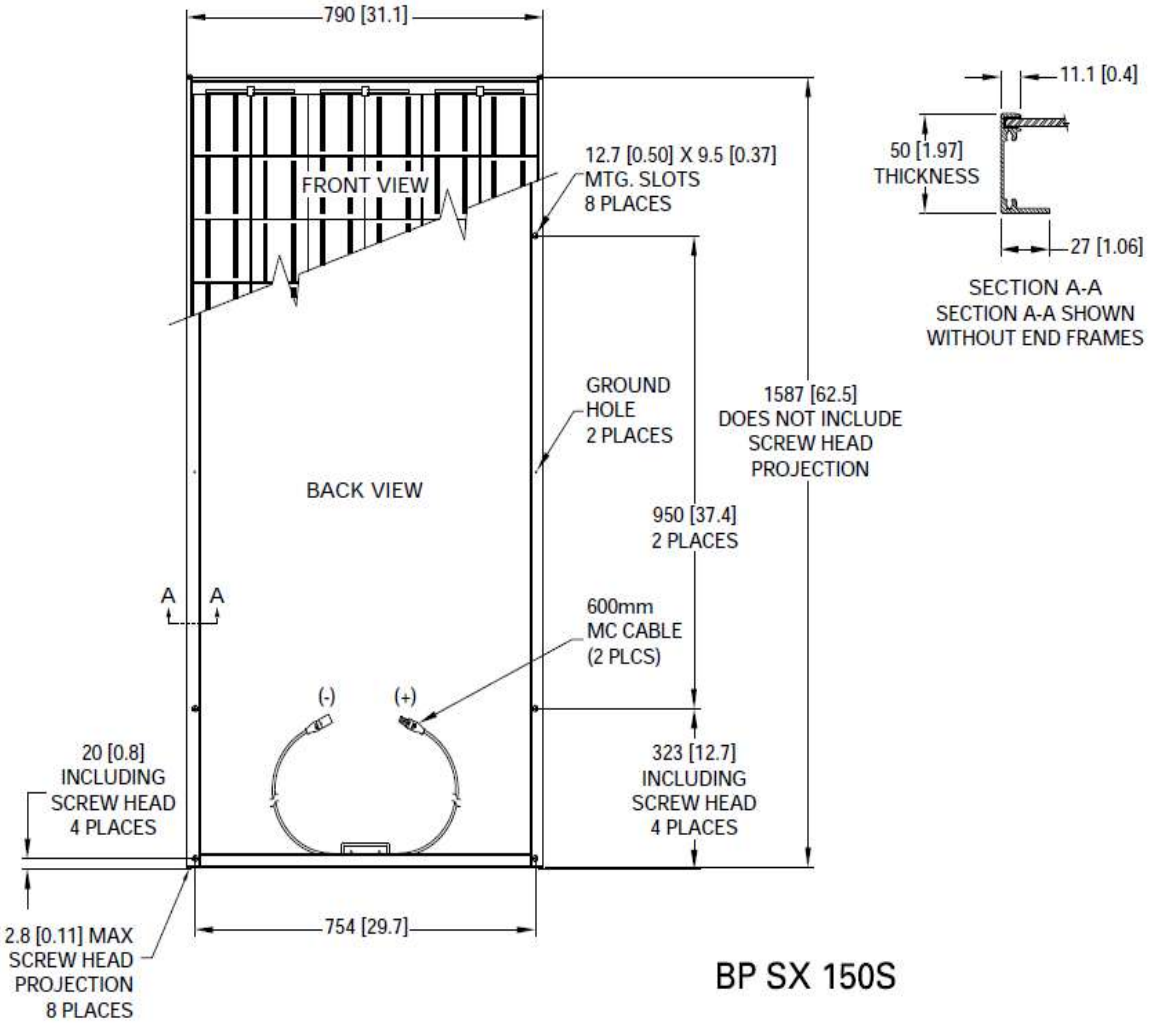


Figure A.2 : les caractéristiques mécaniques du panneau BP SX 150S

Electrical Characteristics[1]

	SX 150	SX 140[2]
Maximum power (P_{max})[3]	150W	140W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	34.5V	34.0V
Current at P_{max} (I_{mp})	4.35A	4.11A
Warranted minimum P_{max}	140W	130W
Short-circuit current (I_{sc})	4.75A	4.5A
Open-circuit voltage (V_{oc})	43.5V	42.8V
Maximum system voltage[4]	600V	
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	– (160±20)mV/°C	
Temperature coefficient of power	– (0.5±0.05)%/°C	
NOCT[5]	47±2°C	

Notes

1. These data represent the performance of typical SX 150 and SX 140 modules and laminates as measured at their output connectors. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
   - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
   - cell temperature of 25°C.
2. The power of solar cells varies in the normal course of production; the SX 140 is assembled using cells of slightly lower power than the SX 150.
3. During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max}.
4. U.S. NEC rating.
5. The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1m/s.

BP SX 150 I-V Curves

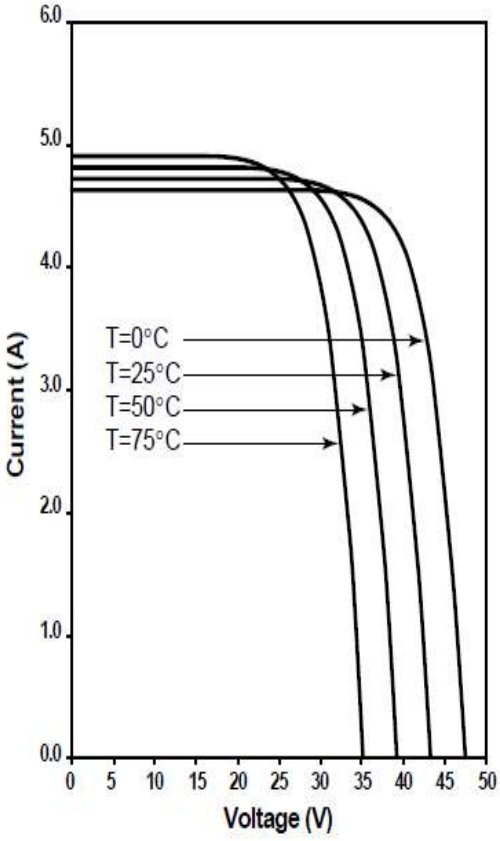


Figure A. 3 : Les caractéristiques électriques du panneau BP SX 150S

Photovoltaics is our passion

ET Module

ET-M53620 20Wp



EFFICIENCY

- Low voltage-temperature coefficient ensures high-temperature operation
- Exceptional low-light performance combined with high sensitivity to light enables excellent energy delivery

MATERIALS

- Highest quality, high-transmission tempered glass provides enhanced stiffness and impact resistance
- Advanced EVA encapsulation system with triple-layer back sheet meets the most stringent safety requirements for high-voltage operation
- A sturdy, anodized aluminum frame allows modules to be easily roof-mounted with a variety of standard mounting systems
- Ultra reliable bypass diodes prevent damage through overheating due to shaded or defective cells

BENEFITS

- Manufactured in an ISO 9001:2000 certified plant
- High efficiency, high safety, high reliability
- Output power tolerance of +/-3%
- 25-year limited warranty on power output, 5-year limited warranty on materials and workmanship

CE

ET SOLAR GROUP

Available from: www.solar-wind.co.uk

ET Solar China
24F, A2 World Trade Center Mansion,
67 Shanxi RD, Nanjing 210009, China
Tel: +86 25 8689 8096 Fax: +86 25 8689 8097
Email: sales@etsolar.com

ET Solar USA
4900 Hopyard Road, Suite 290,
Pleasanton, CA 94588, USA
Tel: +1 925 4609 898 Fax: +1 925 4609 929
Email: sales@etsolar.us

ET Solar Europe
ET Solar GmbH, Munich City Tower,
Landsbergerstr. 110 / 9 Fl. D-80339 Munich, Germany
Tel: +49 89 309040 263 Fax: +49 89 309040 466
Email: sales@etsolar.de
(Italy Office) Tel: +39 392 2340606 Email:sales@etsolar.it

Figure A. 4 : Description du panneau ET-M53620.

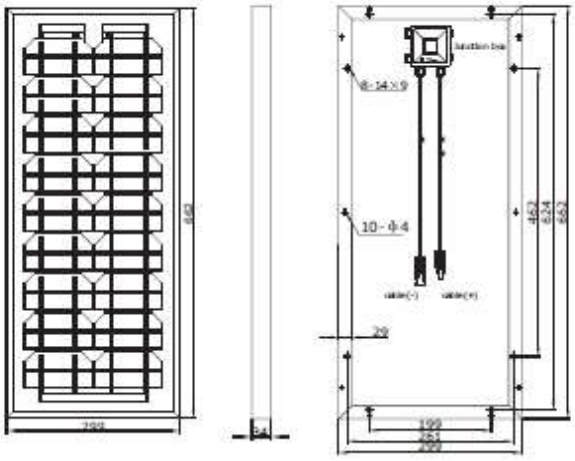
ET Module
ET-M53620

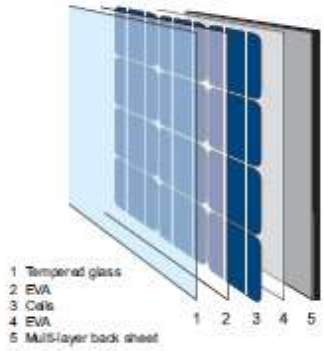
SPECIFICATIONS

Model type	ET-M53620
Peak power(Pmax)	20W
Weight	2.7kg (6.0lbs)
Dimensions	662×299×34mm 26.1×11.8×1.3inch
Maximum power voltage (Vmp)	17.82V
Maximum power current (Imp)	1.14A
Open circuit voltage (Voc)	21.96V
Short circuit current (Isc)	1.27A
Maximum system voltage	DC 1000V
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	0.06 %/ ℃
Temp. Coeff. of Voc (TK Voc)	-0.397 %/℃
Temp. Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.549 %/℃
Normal Operating Cell Temperature	44.4±2℃

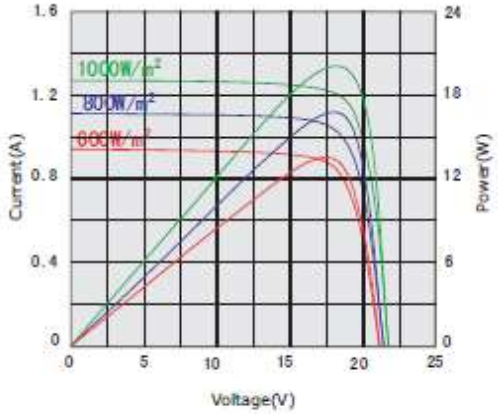
Note: the specifications are obtained under the Standard Test Conditions (STCs): 1000 W/m² solar irradiance, 1.5 Air Mass, and cell temperature of 25℃.

PHYSICAL CHARACTERISTICS Unit: mm(inch)

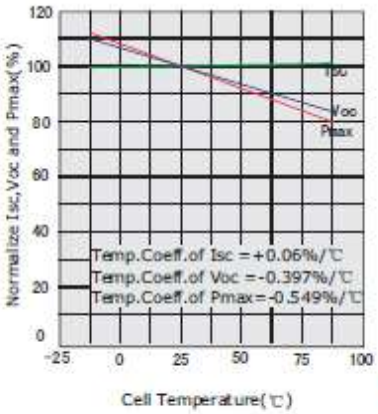




Electrical Performance cell temperature:25℃



Temperatur dependence of Isc, Voc and Pmax



Please contact Support@etsolar.com for technical support

Figure A. 5: Les caractéristiques mécaniques et électriques du panneau ET-M53620.

Annexe B

Annexe B

KYOCERA SOLAR PUMPS

SD Series Pumps





- WATER DELIVERY UP TO 4.36 GPM / 16.5 LPM, PUMPING RANGE 0-230 FEET / 0-70 METERS
- HIGHEST QUALITY SUBMERSIBLE PUMP IN ITS CLASS
- FIELD SERVICEABLE WITH SIMPLE HAND TOOLS

The Kyocera SD Series of submersible solar pumps are highly efficient, low voltage, DC powered, diaphragm type positive displacement pumps designed specifically for water delivery in remote locations.

They operate on 12 to 30 volts of direct current that may be supplied from a variety of independent power sources including solar panels and/or batteries. Power requirements can be as little as 35 watts. Constructed of marine grade bronze and 304 stainless steel, these pumps are the highest quality submersible pumps in their class.

Kyocera's SD series pumps can be installed below water level in a pond, river or cistern, or installed by hand into a ground water well. They can be used to fill an open tank or in a pressurized water delivery system.

Simplicity is the key feature of the SD series pumps. They are easy to install, require very little maintenance and are completely field serviceable.

The SD series pumps are designed for use in ***stand alone*** water delivery systems. They are pollution-free, corrosion-resistant and quiet. It is the ideal way to provide water for livestock, remote homes, campsites, small farms or any other need beyond the commercial power grid.

Models SD 3-70/6-35
Suitable for installation in 4.0 inch (100.0 mm) minimum inside diameter wells. The addition of a sand shroud requires installation in 5.0 inch (127.0 mm) minimum inside diameter wells. Flow rates up to 2.4 GPM (9.0 LPM) and heads up to 230 feet (70.0 meters).
Dimensions (Outside Diameter, Length, Weight):
3.8 in. (96.0 mm), 10.75 in. (273.0 mm), 21.0 lbs. (9.5 kg)

Model SD 12-30
Suitable for installation in 5.0 inch (127.0 mm) minimum inside diameter wells. The addition of a sand shroud requires installation in 6.0 inch (152.0 mm) minimum inside diameter wells. Flow rates up to 4.5 GPM (17.0 LPM) and heads up to 100 feet (30.0 meters).
Dimensions (Outside Diameter, Length, Weight):
4.62 in. (117.35 mm), 10.75 in. (273.0 mm), 23.4 lbs. (10.6 kg)

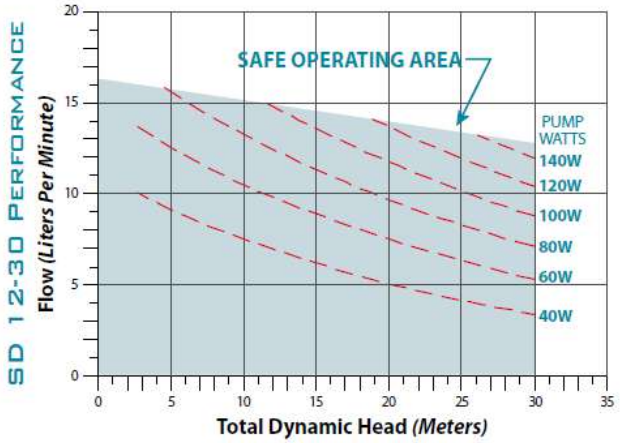
KYOCERA SOLAR WATER PUMPING SYSTEMS AND COMPONENTS ARE MANUFACTURED BY KYOCERA SOLAR, INC.

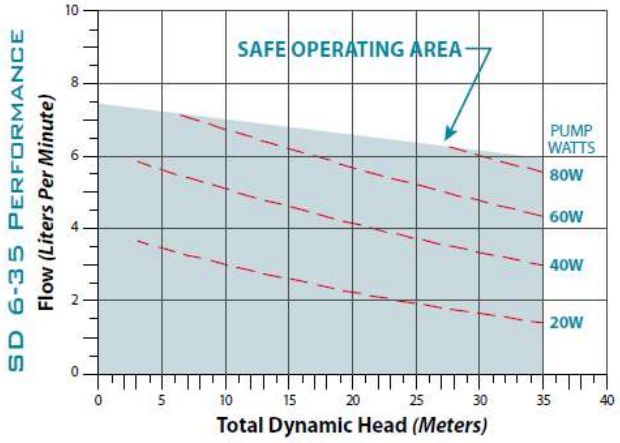
KYOCERA

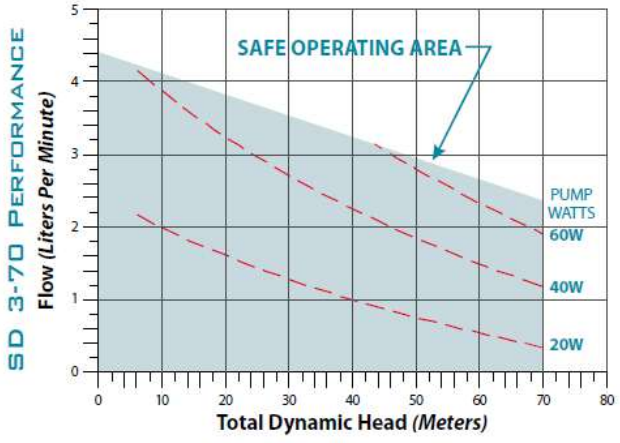
KYOCERA SOLAR, INC.

Figure B.1 : Description de la motopompe Honda.

SD Series Pump Performance







Conversion Formulas:

Gallons per Minute = Liters per Minute/3.79

Feet=Meters/3.28

SD 12-30 SPECIFICATIONS

Maximum Pump Voltage: **30 Volts**
Maximum Total Dynamic Head: **30 Meters (100 Feet)**
Output Connection: **3/4" NPT or 3/4" Hose Barb**

SD 6-35 SPECIFICATIONS

Maximum Pump Voltage: **30 Volts**
Maximum Total Dynamic Head: **35 Meters (115 Feet)**
Output Connection: **1/2" NPT or 1/2" Hose Barb**

SD 3-70 SPECIFICATIONS

Maximum Pump Voltage: **30 Volts**
Maximum Total Dynamic Head: **70 Meters (230 Feet)**
Output Connection: **1/2" NPT or 1/2" Hose Barb**

To do an approximate sizing for your pump system:

1. Select the best Kyocera SD pump for your needs, based on depth of well and amount of water required
2. Find intersection of head and flow on performance chart
3. Estimate pump wattage, or use next highest pump wattage curve on chart
4. Multiply pump watts from curve by 1.33 to find solar watts
5. Select the best single solar module*, or use two modules in series to reach solar watts

Note: Actual liters pumped will depend on actual sun hours at installation site. Increasing the array amperage will extend morning/evening run times. Optimum performance based on full sun at site.

**Single module use only possible when using the Kyocera CD 300 Pump Controller. Total solar array VOC must not exceed 43 volts at 25°C.*

Northern Arizona Wind & Sun — Electricity From the Sun

KYOCERA

KYOCERA SOLAR, INC.
7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260 USA
480.951.6330
FAX: 480.951.6329
800.544.6466
www.kyocerasolar.com

Figure B.2 : Les caractéristiques de la motopompe.