

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

Recherche Scientifique UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
Domaine: **Science et Technologies**
Filière: **Génie Electrique**
Spécialité: **Réseaux Electriques**

Présenté par

Salim ARAB

Dalila TOUDERT

Thème

Etude d'un Système Photovoltaïque

Mémoire soutenu publiquement le 25/09/2017 devant le jury composé de:

Mr Abd El Ghani KIMOUCHE

Maître assistant classe A, U.M.M.T.O, président.

Mr Nabil MEZZAI

Maîtres de conférences classe B, U.M.M.T.O, Encadreur.

Mr Djamel ZIANE

Maîtres de conférences classe B, U.M.M.T.O, Co encadreur.

Mr Said AISSOU

Maître de conférences classe B, U.M.M.T.O, Examineur.

Mr Hakim DJOUDI

Maître assistant classe A, U.M.M.T.O, Examineur.

REMERCIEMENTS :

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout
puissant, de m'avoir donné le courage et la
volonté pour accomplir ce travail*

*Nous tenons à remercier notre encadreur MEZZAI
NABIL et coencadreur ZIAN DJAMEL d'avoir posé un sujet très
intéressant et
pour leurs conseils et soutien .*

*Nos respectueux remerciements à l'ensemble des
membres du jury pour l'intérêt porté sur mon
travail.*

*Tous nos camarades et amis et
qui nous a aidé pour le bon déroulement de ce
travail et tout personne qui nous aidé à atteindre
ce point-là.*

DÉDICACES :

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum " Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :

Ma mère et père
Que dieu les garde et les protège.
A mes adorables frères et sœurs.
A tous ceux qui me sont chères.
A tous ceux qui m'aiment.
Mon binôme Dalila.
Je dédie ce travail.

DÉDICACES :

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :

Ma mère et père
Que dieu les gardes et les protège.
A mes adorables frères et sœur.
A tous ceux qui me sont chères.
A tous ceux qui m'aiment.
Mon binôme salim.
Je dédie ce travail.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES :

Figure I-1 Le soleil source de l'énergie solaire

Figure I-2 Types de rayonnements solaires reçus au sol

Figure I-3 Composition du rayonnement solaire

Figure I-4 Spectre de rayonnement solaire

Figure I.5 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle)

Figure I-6 Schéma d'une cellule photovoltaïque

Figure I-7 Champ photovoltaïque

Figure I-8 : Système PV autonome ou isolé

Figure I-9 Système PV raccordé au réseau sans batterie

Figure I-10 Système PV hybride

Figure I.11: Cellules ou modules photovoltaïques en série

Figure I-12 : Branchement en série des panneaux PV

Figure I.13 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle

Figure I-14 branchement parallèle des panneaux PV

Figure II-1 : la structure de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque

Figure II-2 : Cellule, module, panneau et champ photovoltaïque

Figure II. 3 : Courbe caractéristique $I = f(V)$ d'un panneau PV

Figure II. 4 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$)

Figure II.5: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

Figure II.6: Caractéristique Puissance - tension pour différents éclairagements

Figure II.7: Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

Figure II.8 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$)

Figure II.9 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Figure II-10 : Schéma de principe du hacheur parallèle

Figure II- 11 : Schéma de principe du convertisseur série

Figure II- 12 : Schéma de principe du convertisseur non inverseur série/parallèle

Figure II.13: Modèle R-C de la batterie

Figure III.1 : Schéma Matlab/Simulink du modèle une diode

Figure III.2 : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m^2 et $T=25$ °C.

Figure III.3 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m^2 et $T=25$ °C.

Figure III.4 : Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements

Figure III.5 : Caractéristique puissance-tension pour différents éclairagements

Figure III.6 : Caractéristique courant-tension pour différents niveaux de températures

Figure III.7 : Caractéristique puissance-tension pour différents niveaux de températures

Figure III.8 : Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau solaire

Figure III.9 : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation

Figure III.10:Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements avec la réponse de l'algorithme (P&O).

Figure III.11:Caractéristique courant-tension pour différents températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

Figure III.12 : Caractéristique puissance-tension pour différents éclairagements avec la réponse de l'algorithme (P&O).

Figure III.13 : Caractéristique puissance-tension pour différents températures

avec la réponse de l'algorithme (P&O).

Figure III.14 : Structure du système photovoltaïque étudié

Figure III.15 : Organigramme de gestion d'énergie dans le système de pompage PV

Figure III.16 : Schéma Matlab/Simulink du système global

Figure III.17 :Ensoleillement mesuré

Figure III.18: Température mesurée

Figure III.19 :Courant photovoltaïque

Figure III.20: Puissance photovoltaïque

Figure III.21: Tension photovoltaïque optimale

Figure III.22: Zoom sur la tension photovoltaïque optimale

Figure III.23:Puissance photovoltaïque et de la charge

Figure III.24:Courant de batterie

Figure III.25:Zoom sur la tension des batteries

Figure III.26:Zoom sur l'état de charge des batteries

*LISTE DES
TABLEAUX*

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau III.1: Paramètres d'un panneau solaire SHARP (175 W)

SOMMAIRE

Sommaire :

Introduction générale

CHAPITRE I :

GÉNÉRALITÉ SUR LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction	1
I-1- Définition de l'énergie renouvelable	1
I-2 -L'énergie solaire	1
I-3 - Rayonnement solaire	3
I-3-1- Le rayonnement direct	3
I-3-2 - Le rayonnement diffus.....	3
I-3-3 - Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	3
I-3-4- Le rayonnement global	3
I-4 - Spectre de rayonnement	4
I-4 -1 Gisement solaire en Algérie	5
I-5 - Les panneaux solaires	6
I-5-1- Définition	6
I-5-2 - La cellule PV	6
I-5-3-Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	6
I-5-4-Technologies des cellules	7
I-6- le champ PV	7
I-7- Différent types de système PV	8
I-7-1-Système autonome.....	8
I-7-3-Système PV hybride	10
I-7-2-Système PV raccordé au réseau	10
I-8- Les différents branchements des panneaux PV	11

I-8-1-Le branchement en série	11
I-8-2-Le branchement en parallèle	13
I-8-3-Association hybride (en série et en parallèle)	14
I-9- Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	15
I-9-1-Avantages	15
I-9-2-Les inconvénients	15
I-10-Conclusion	16

CHAPITRE II :

MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

II.1-Introduction	18
II-2-Principe de conversion photovoltaïque	18
II- 3-La structure de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque	18
II. 3. 1 Panneaux solaires (générateur PV)	19
II. 3. 1. 1 Implantation du champ de modules	20
II. 3. 1. 2 Caractéristiques du module photovoltaïque	20
II. 3.1.3 Zones de fonctionnement du module solaire	21
II. 3. 1. 4 Influence de l'ensoleillement et de la température sur le module PV	22
> L'ensoleillement	22
> La température	23
II.3.1.5 Influence de la résistance série R_S	24
II.3.1.6 Influence de la résistance parallèle R_P	24
II. 4. Modélisation du générateur photovoltaïque	25
II.5 Les convertisseurs DC-DC	27
II.5.1 Modèle mathématique du convertisseur parallèle	27
II.5.2 Modèle mathématique du convertisseur série	28
II.5.3 Modèle mathématique du convertisseur série/parallèle	30
II.6 Modèle de la batterie	30
II. 7 Conclusion	31

CHAPITRE III :

GESTION DE PUISSANCE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction	33
III.2 Caractéristiques des modules photovoltaïques	33
III.2.1 Influence de l'irradiation sur les paramètres des modules PV	35
III.2.2 Influence de la température sur les paramètres des modules PV	36
III.3 Optimisation de la puissance des modules PV	37
III.3.1 La méthode de perturbation et observation (P&O)	38
III.4 Description du système étudié	41
III.4.1 Principe de fonctionnement de la gestion de puissance	42
III.4.2 Résultats de simulation	44
III.5 Conclusion	49

Conclusion générale

Référence bibliographique

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX^{ème} siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses.

Des récentes estimations ont montré qu'actuellement près de 2.2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordés aux grands réseaux d'électricité (ce qui représente environ 44% de la population mondiale), pour la plus part située dans les pays du tiers monde dont l'Algérie, ou plus de 50% vivent encore sans électricité, 95% d'entre eux vivent dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, de la présence des régions rudes et d'une faible densité de population.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La production de l'électricité est donc forcément, malgré une apparence anodine, synonyme de perturbations. L'utilisation excessive d'un monde de production accentue fortement l'effet nuisible qui lui est associé et il apparaît évident que la diversification des sources est une solution à promouvoir.

L'utilisation de source d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources. L'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée : les applications stationnaires connectées ou non au réseau. En particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source renouvelable.

Le rôle d'un système photovoltaïque de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais

ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

Le générateur d'électricité d'origine photovoltaïque avec un système de stockage est assuré par des batteries au plomb pour cela le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

L'intérêt de ce travail est l'étude d'un système d'énergie photovoltaïque autonome.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système PV tels que la cellule, module et champ PV et leurs différents branchement, les différents types de systèmes PV comme le système autonome ,raccordés au réseau et hybride , puis nous nous sommes intéressés aux différentes technologies des éléments constitutifs d'un système PV, finalement nous avons cité les avantages et les inconvénients des systèmes PV en général.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un système PV qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. On a aussi expliqué le principe de conversion pv.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

Le dernier chapitre sera consacré pour la simulation du système PV et la gestion de puissance. La commande de puissance maximale (MPPT) à savoir perturbation et observation (P&O) sera établie.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR

LE

PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction

Alors que les gisements d'énergies fossiles et fissiles ne seront encore plus exploitables que pendant quelques dizaines d'années, l'énergie renouvelable dont l'énergie solaire poursuivra ses bienfaits sur terre pendant encore des milliards d'années. Dans ce chapitre on va essayer de donner une idée générale sur l'énergie solaire, les différents types des systèmes photovoltaïques et quelques concepts qui vont nous aider à bien rentrer dans le thème.

I-1- Définition de l'énergie renouvelable :

Les énergies renouvelables sont toutes les énergies que la nature constitue ou reconstitue plus rapidement que l'Homme ne les utilise. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

Exemple :

- Vent : éolienne
- Soleil : thermique, photovoltaïque, thermodynamique.
- Chaleur terrestre : géothermie.
- Eau : hydroélectrique, marémotrice.
- Biodégradation : biomasse.
- Biocarburant.

I-2 -L'énergie solaire :

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

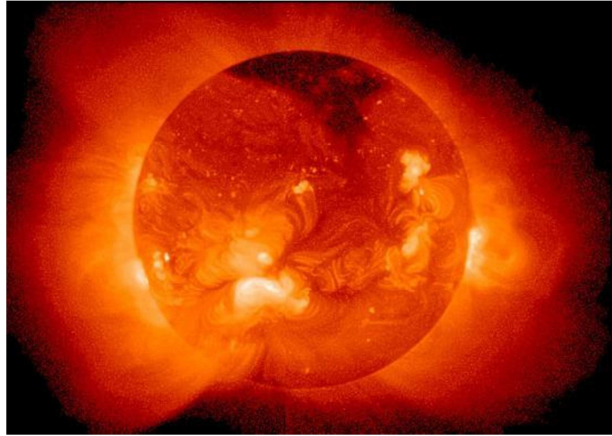


Figure I-1 Le soleil source de l'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m².

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [1] :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

λ : la longueur d'onde de la lumière.

h : la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.24}{\lambda} \quad (1.2)$$

I-3 - Rayonnement solaire :

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C [2].

I-3-1- Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

I-3-2 - 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.

I-3-3 - 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....) [2].

I-3-4- Le rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol). Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [2].

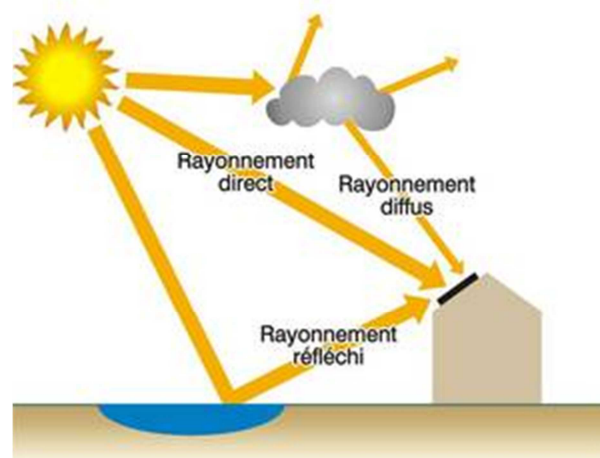


Figure I-2 Types de rayonnements solaires reçus au sol.

I-4 - Spectre de rayonnement :

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grande quantité. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes.

On distingue par leurs longueurs d'ondes les différents types de rayons : c'est le spectre solaire.

Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère.

Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles aux surfaces de terre.

Nous parviennent essentiellement : [3]

- Les Ultraviolets (UV), de 200 nm à 400 nm, invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules [9%].
- La Lumière visible, de 400 à 800 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs [47%].
- Les Infrarouges (IR), de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent. [44%].

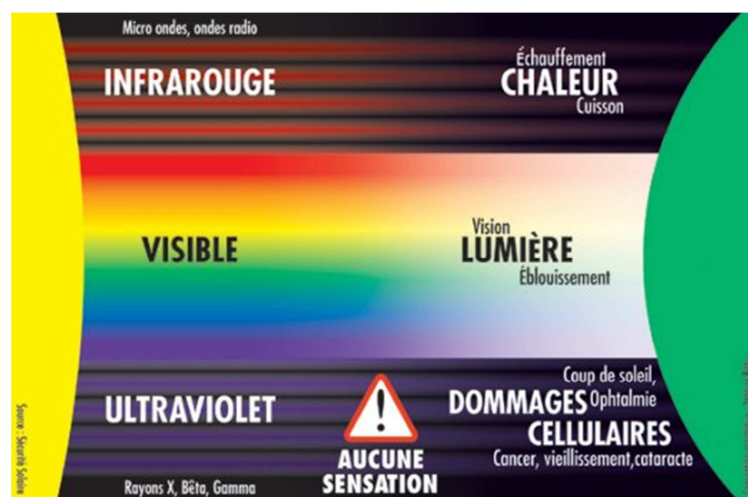


Figure I-3 Composition du rayonnement solaire

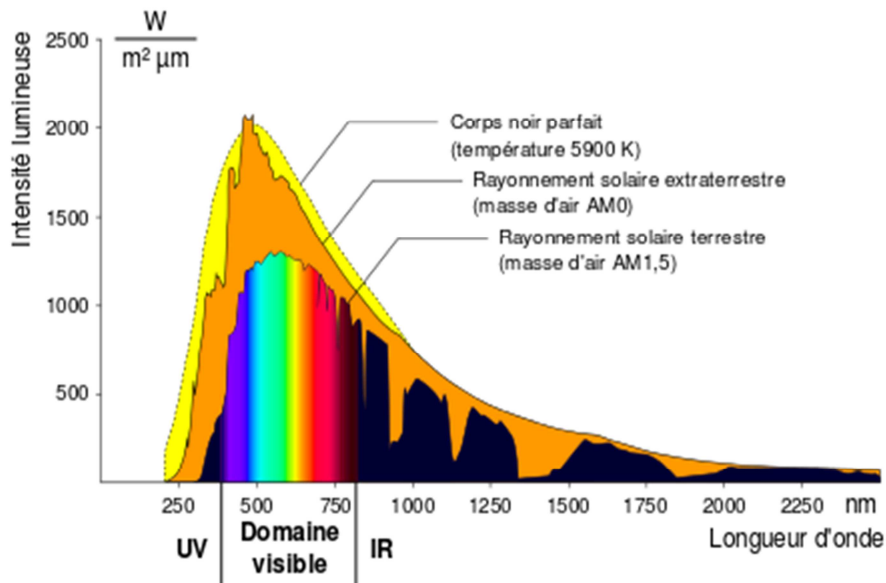


Figure I-4 Spectre de rayonnement solaire

I-4 -1 Gisement solaire en Algérie

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ $7\text{kWh/m}^2/\text{jour}$ [4]. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : $5,6\text{ kWh/m}^2/\text{jour}$
- Au Sud : $7,2\text{ kWh/m}^2/\text{jour}$

La figure (I.5) montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.

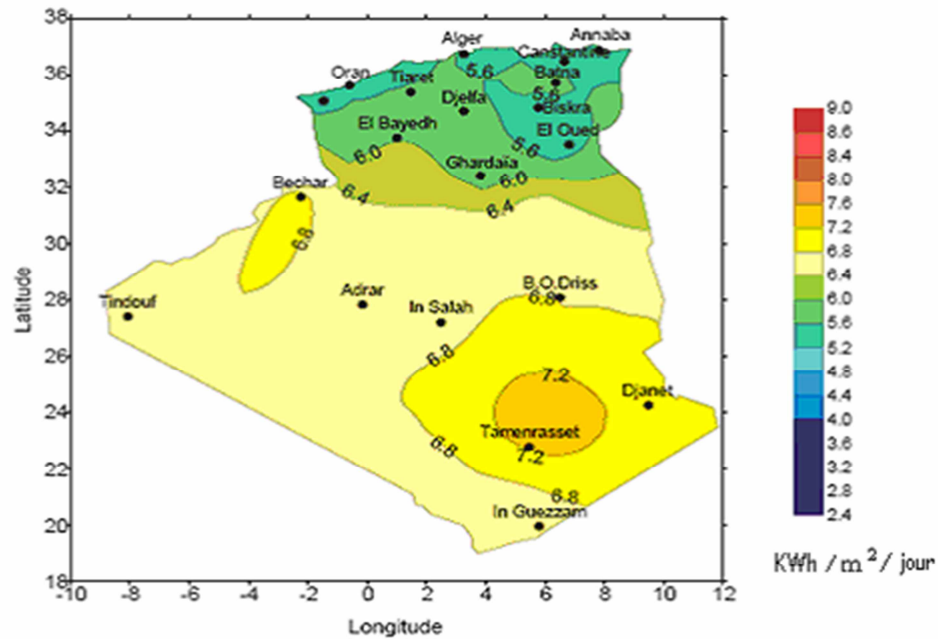


Figure I-5 Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle).

I-5 - Les panneaux solaires :

I-5-1- Définition :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée.

I-5-2 - La cellule PV :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [5].

I-5-3-Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- pour la couche P, déficit d'électrons

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur[6]

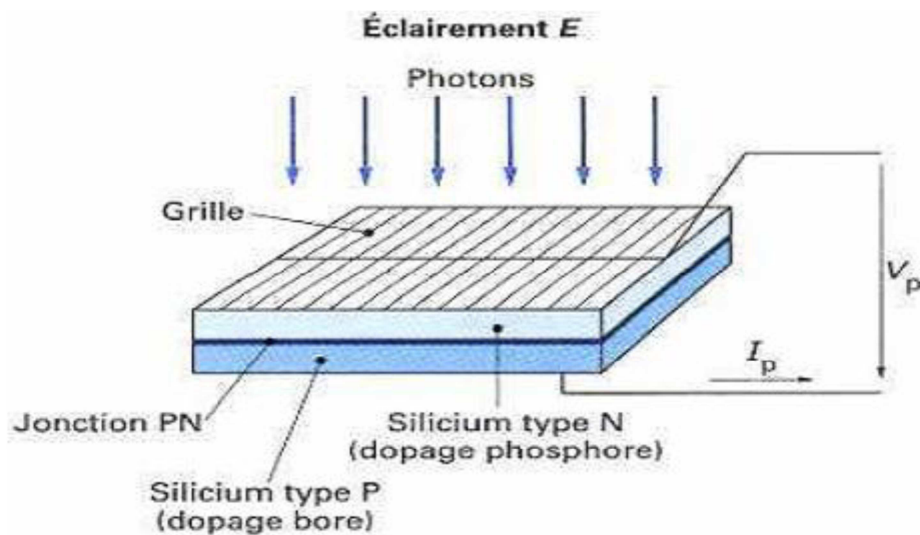


Figure I-6 Schéma d'une cellule photovoltaïque

I-5-4-Technologies des cellules :

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. On utilise également des matériaux composites tel que l'arséniure de gallium et des couches minces comme de CdTe (tellurure de cadmium) et le CIS (cuivre-indium-diséléniure) et encore le CIGS.

Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- Les cellules monocristallines.
- Les cellules polycristallines.
- Les cellules amorphes.....etc.

I-6- le champ PV :

C'est un regroupement de modules solaires photovoltaïques raccordés entre-eux et destiné à produire de l'électricité, soit à titre autonome (panneaux solaires sur les toits des habitations par exemple), soit dans le cadre d'un raccordement à un réseau public de distribution d'électricité.



Figure I-7 Champ photovoltaïque

I-7- Différent types de système PV :

I-7-1-Système autonome :

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil).

➤ Systèmes autonomes avec stockage:

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée (figure I.8). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

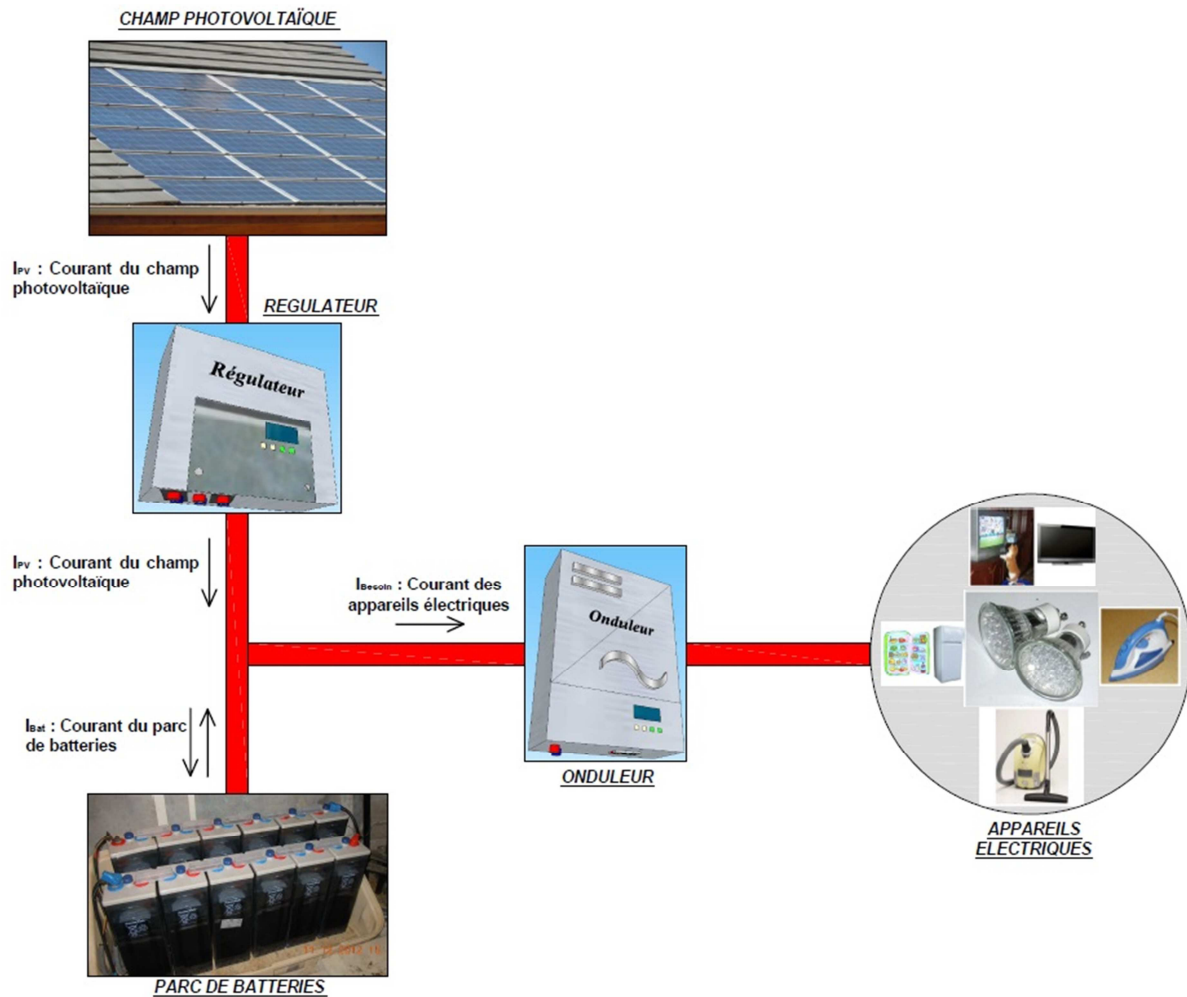


Figure I-8 Système PV autonome ou isolé

➤ **Les systèmes autonomes sans stockage :**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique.

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement

un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et en fonction du rayonnement solaire.

I-7-2-Système PV raccordé au réseau :

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage.

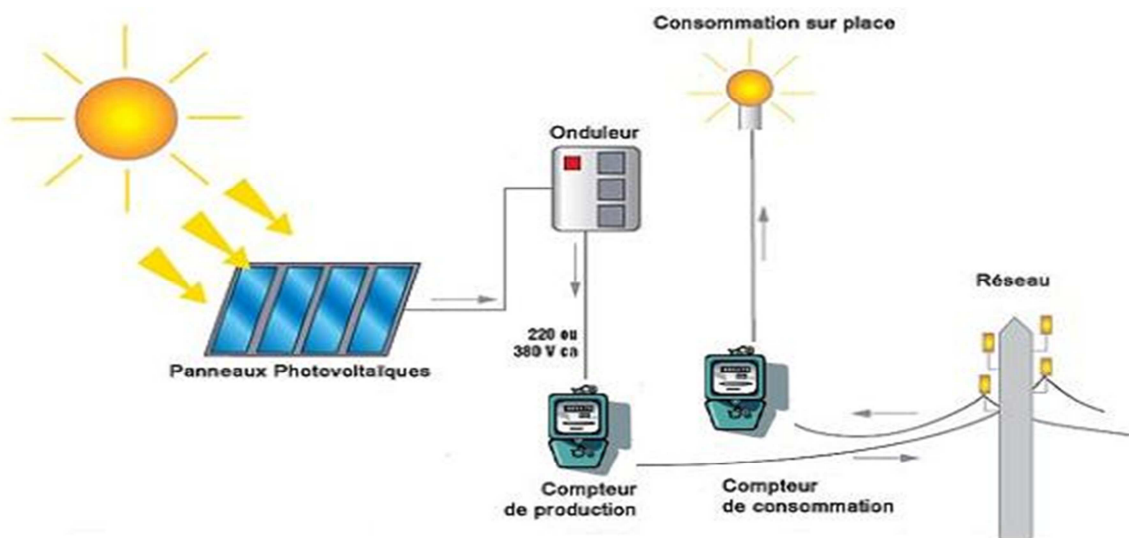


Figure I-9 Système PV raccordé au réseau sans batterie

I-7-3-Système PV hybride :

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité.

En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien.

La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours.

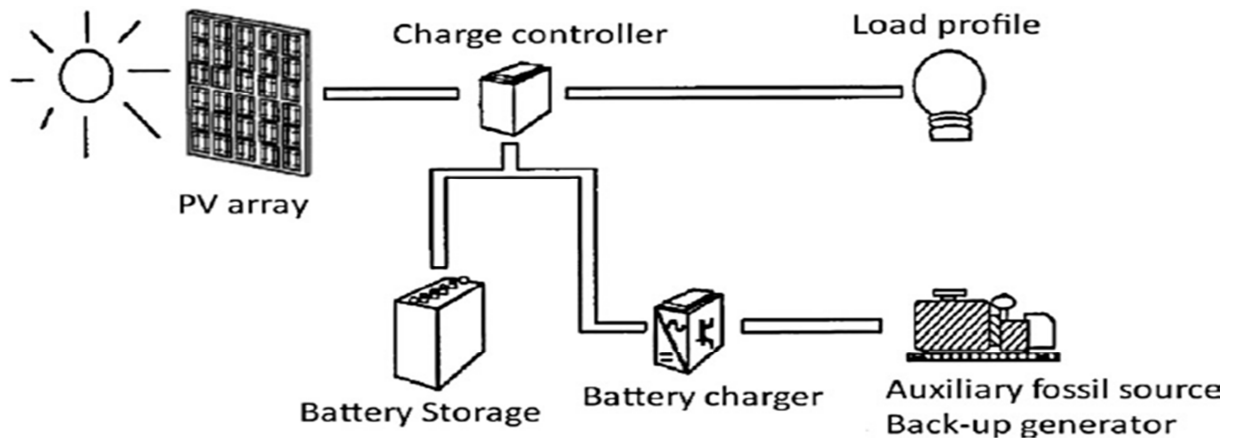


Figure I-10 Système PV hybride

I-8- Les différents branchements des panneaux PV :

I-8-1-Le branchement en série :

➤ **Association en série:**

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. Les figures (I.11et 12) montrent l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [7] :

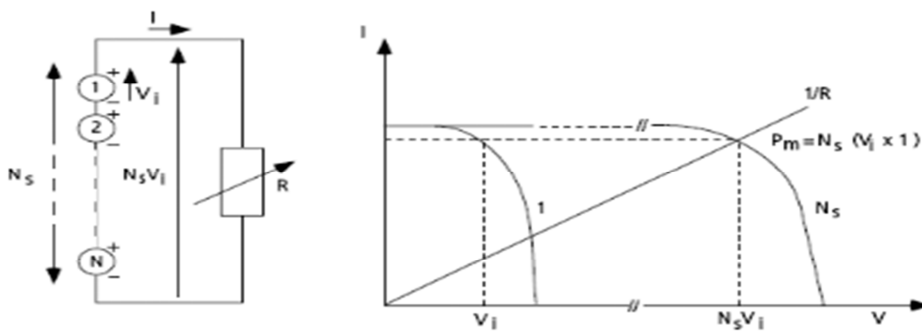


Figure I-11: Cellules ou modules photovoltaïques en série.

Branchement en série

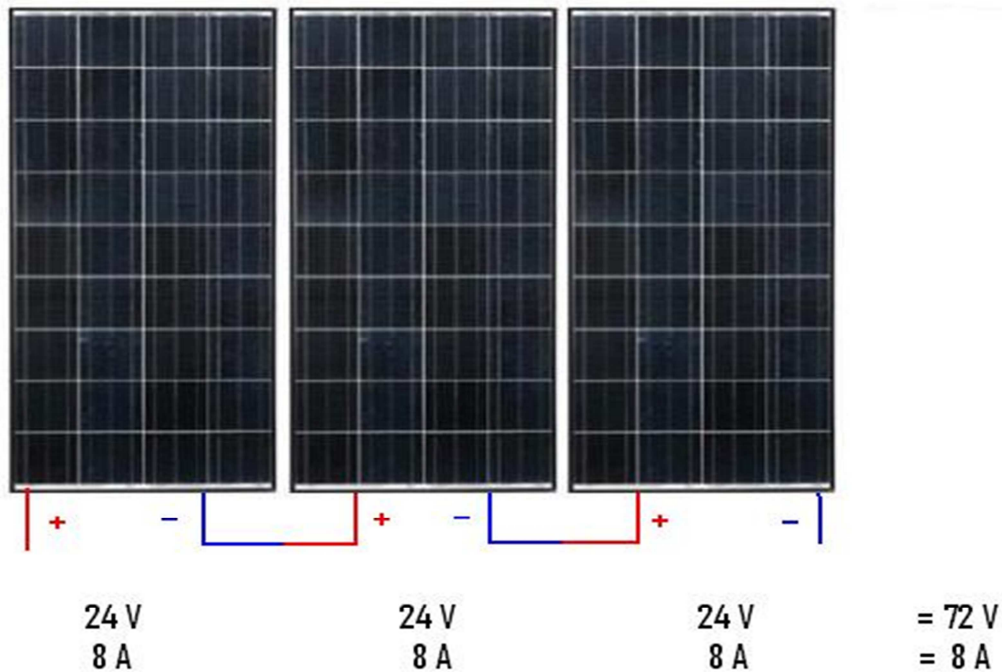


Figure I-12 Branchement en série des panneaux PV

A noter que, si les tensions **V** s'additionnent systématiquement, c'est l'intensité la plus faible **A** qui prime dans le cas de panneaux solaires différents.

Imaginons que sur ces 3 panneaux l'un d'eux ait une intensité de 4 Ampères, l'Ampérage total serait de 4 Ampères même si les autres sont à 8 Ampères.

Par contre si nous avons $24\text{ V} + 12\text{ V} + 10\text{ V} = 46\text{ V}$.

L'inconvénient du branchement en série c'est qu'il y a une perte de puissance si un seul des panneaux est ombragé (arbre, bâtiment, cheminée...)

Si un panneau est ombragé il va perdre en intensité et c'est cette intensité qui va déterminer celle des autres panneaux.

Puissance en plein soleil: $72\text{ V} \times 8\text{ A} = 576\text{ W}$

Avec une ombre sur un panneau, supposons qu'il descende à 4 Ampères (tous les panneaux seront à 4 A)

$72\text{ V} \times 4\text{ A} = 288\text{ W}$ (perte de moitié).

Conclusion il faut bien étudier l'emplacement de ses panneaux solaires.

I-8-2-Le branchement en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. Les figures (I.13 et 14) montrent l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [7] :

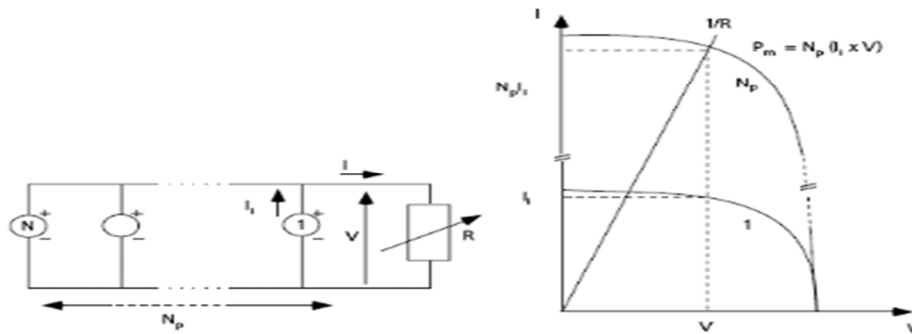


Figure I-13 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.

Branchement en parallèle

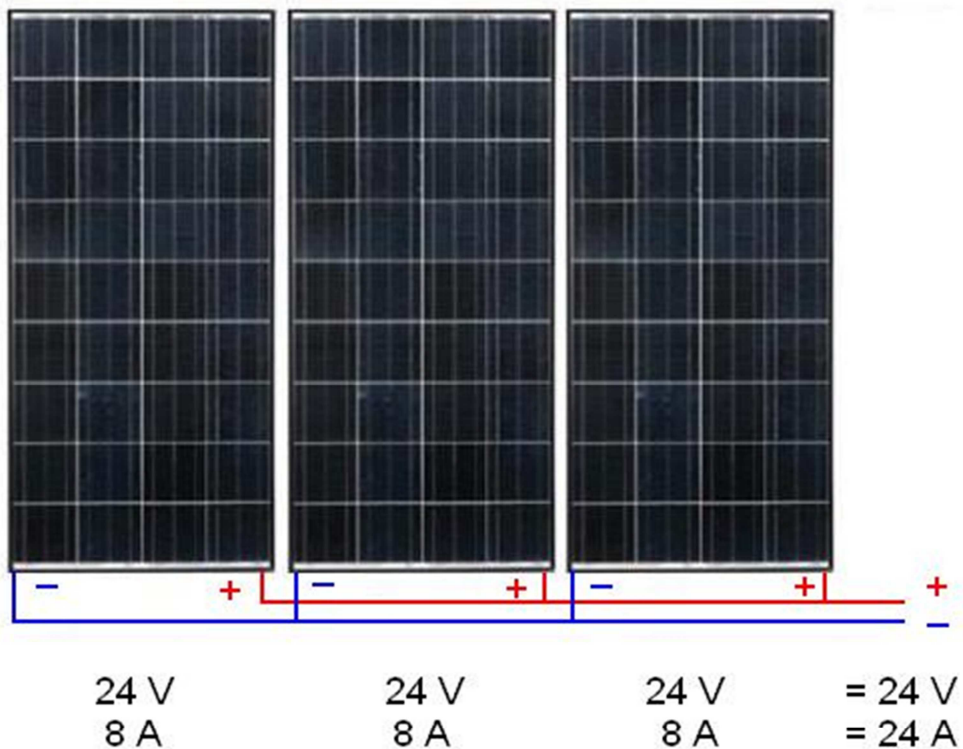


Figure I-14 branchement parallèle des panneaux PV

Ce branchement n'est possible qu'avec des panneaux de mêmes tensions !

Contrairement au branchement en série, il n'est pas possible d'avoir des panneaux de 24 V et un autre de 18 V par exemple (C'est théoriquement possible avec la tension la plus faible qui prime, mais il y a un risque de surtension et court circuit !).

Dans ce branchement c'est donc l'intensité qui s'additionne ! C'est le branchement idéal lorsque l'on a besoin d'une plus grosse intensité.

C'est également le bon montage lorsqu'il peut y avoir un ombrage sur les panneaux photovoltaïque, reprenons le 1er exemple.

Puissance en plein soleil:

$24 \text{ V} \times 24 \text{ A} = 576 \text{ W}$ (exactement comme le montage en série)

Avec un ombrage et un panneau qui descend à 4 Ampères d'intensité.

Nous aurons toujours 24 V de tension et $8 \text{ A} + 8 \text{ A} + 4 \text{ A}$ d'intensité puisque dans le montage en parallèle les intensités s'additionnent alors que dans le montage en série c'est la plus petite qui prime.

$24 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 480 \text{ W}$ (nous avons 288 W dans le montage en série).

I-8-3-Association hybride (en série et en parallèle) :

La caractéristique globale courant/tension d'un générateur photovoltaïque se déduit théoriquement de la combinaison $n_s \cdot n_p$ Cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par le rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et du rapport n_p parallèlement à l'axe des courants. Ainsi que l'illustre la (figure I-15), n_s et n_p étant respectivement le nombre de cellules en série et en parallèle [8].

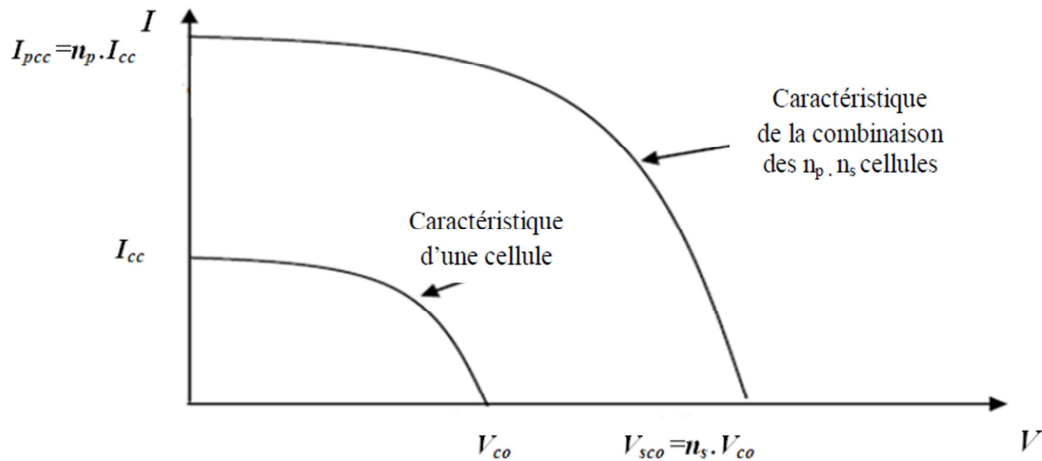


Figure I-15 Caractéristiques d'un générateur à $n_p \cdot n_s$ cellules identiques

I-9- Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

I-9-1-Avantages [9]:

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Consommation gratuite dès l'installation du système.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du MilliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

I-9-2-Les inconvénients [9]:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

Conclusion :

nous avons présenté dans ce présent les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système PV tels que la cellule et module PV et leurs différents branchement, les différents types de systèmes PV comme le système autonome ,raccordés au réseau et hybride , puis nous nous sommes intéressés aux différentes technologies des éléments constitutifs d'un système PV, finalement nous avons cité les avantages et les inconvénients des systèmes PV en général.

CHAPITRE II

MODELISATION D'UN

SYSTÈME

PHOTOVOLTAÏQUE

II.1-Introduction :

Un système photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un ensemble de composants électriques (convertisseur statique, batterie de stockage avec son régulateur de charge, câblage et protection) qui permettent d'adapter la puissance électrique produite aux spécifications des récepteurs.

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque. Nous présenterons les différents modèles mathématiques des sous-systèmes du système étudié.

II-2-Principe de conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.[10]

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

En résumé la conversion PV fonctionne comme suit :

- Absorption de la lumière et création de paire électron/trou ;
- Séparation de paire électron/trou sous l'effet d'un champ induit ;
- Transport de charges vers les électrodes ;
- Collection des charges.

II- 3-La structure de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque :

Notre chaîne de conversion photovoltaïque est composée de six panneaux photovoltaïques branchés en parallèle, qui jouent le rôle d'un générateur PV, et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (hacheur Boost), ce système alimente une charge(Batteries). La structure de notre chaîne de conversion photovoltaïque est représentée dans la figure suivante.

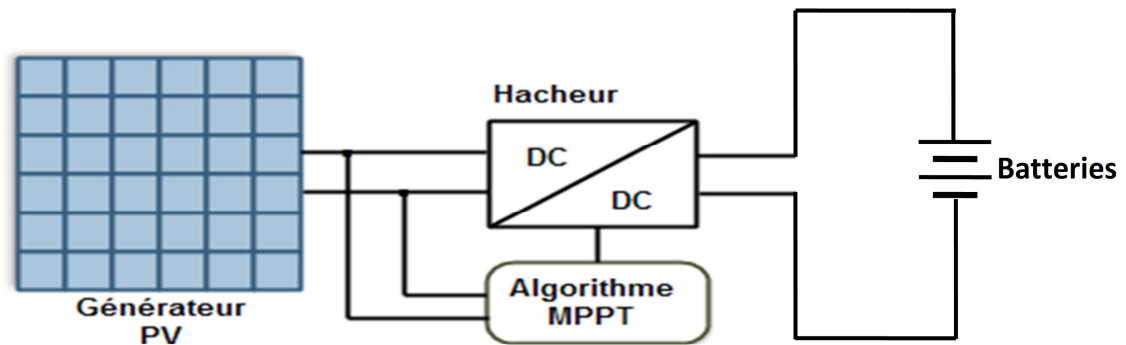


Figure II-1 la structure de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque

II. 3. 1 Panneaux solaires (générateur PV) :

Le module solaire est à l'origine des systèmes solaires. Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de cellules en série et en parallèle, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique. [13]

Les modules captent l'énergie solaire sous forme de lumière (ou d'ensoleillement) et la convertissent en énergie électrique à courant continu (C.C). Plus ils captent la lumière du soleil, plus ils produisent d'électricité. Les modules solaires sont le cœur du système ; se sont des générateurs d'énergie. Ils peuvent également être connectés en série et en parallèle (champs photovoltaïque) afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Les utilisations communes des générateurs photovoltaïques sont classiquement subdivisées en courant continu (12, 24 ou 48 Volts DC) et en courant alternatif produit par un convertisseur (230 Volts AC monophasé ou 380 Volts AC triphasé).

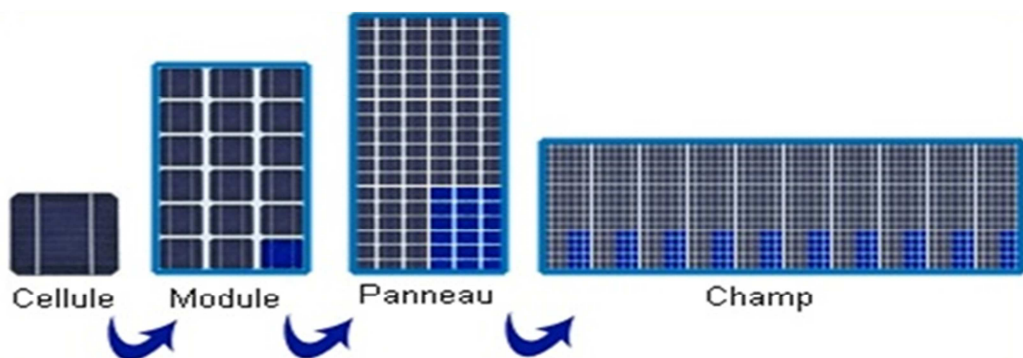


Figure II-2 Cellule, module, panneau et champ photovoltaïque.

II. 3. 1. 1 Implantation du champ de modules

Pour choisir l'implantation du panneau solaire, quatre éléments sont à considérer [14]:

- **L'orientation du champ de modules** : favoriser au maximum une orientation sud dans l'hémisphère Nord.
- **L'inclinaison des modules** : en fonction de la période de fonctionnement de l'installation, il faudra favoriser soit le fonctionnement été (inclinaison de 30° sur l'horizontale) soit le fonctionnement hiver (inclinaison de 60°) soit faire un compromis (inclinaison de 45°).
- **L'ombre portée sur le champ de modules** : un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.
- **La distance module – batteries** : En courant continu basse tension, les chutes de tension peuvent être importantes. Une distance importante entre les modules et la batterie peut rendre nécessaire la pose de câble de sections importantes (10 ou 16 mm² voire plus). Il faut donc limiter au maximum la distance entre le champ de modules et les usages en courant continu.

II. 3. 1. 2 Caractéristiques du module photovoltaïque :

La caractéristique électrique d'un module ou générateur photovoltaïque est similaire à celle d'une cellule mais dans notre projet et pour des raisons de simplicité, le courant I sera dessiné en sens inverse afin de respecter la convention générateur [13].

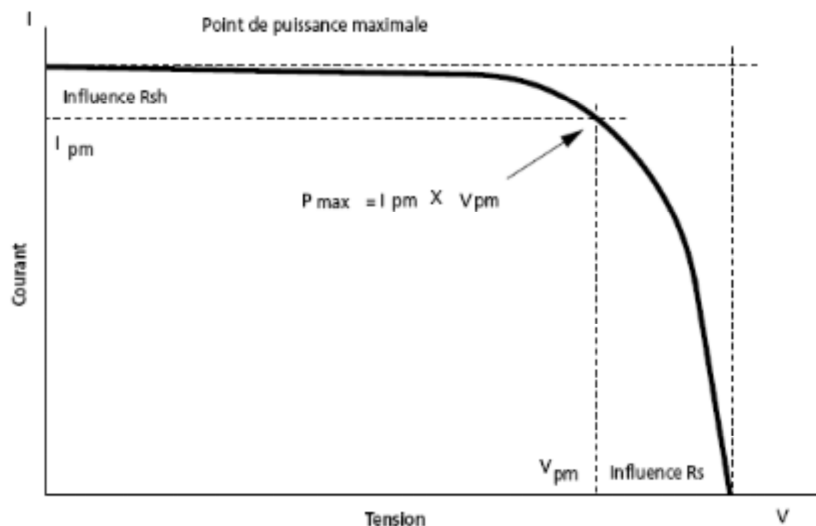


Figure II. 3 Courbe caractéristique $I = f(V)$ d'un panneau PV

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- **Tension à vide V_{oc}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit I_{sc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (V_{mpp} , I_{mpp})** : Lorsque la puissance de crête est maximum en " plein soleil ".
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} \cdot I_{sc}$ [13].

II. 3.1.3 Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe I_{pv} (V_{pv}) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (II.4) représente trois zones essentielles :

- La zone (1-2)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (2-3)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractéristique par une puissance maximale) peut être déterminé.
- La zone (3-4)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension [15].

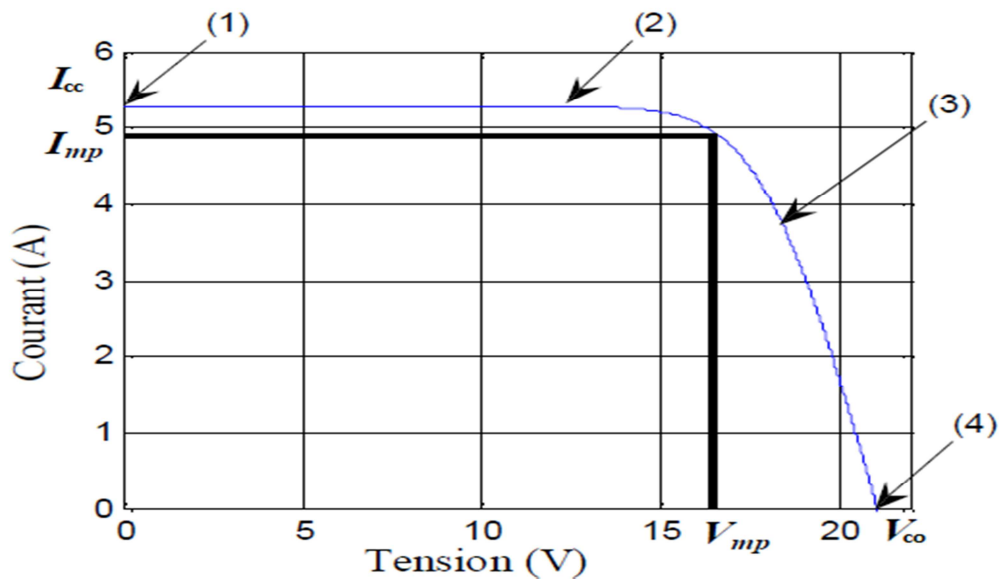


Figure II. 4 Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E_s=1000\text{W/m}^2$).

II. 3. 1. 4 Influence de l'ensoleillement et de la température sur le module PV

➤ L'ensoleillement

Sur les panneaux photovoltaïques une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de paires électron-trou, il y'a donc une baisse du courant solaire (I_{cc}) proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une légère diminution de la tension (V_{co}) d'où un décalage du point de la puissance maximale du panneau vers des puissances inférieures. La figure (II.5) montre la variation de $I=f(V)$ en fonction de l'ensoleillement.

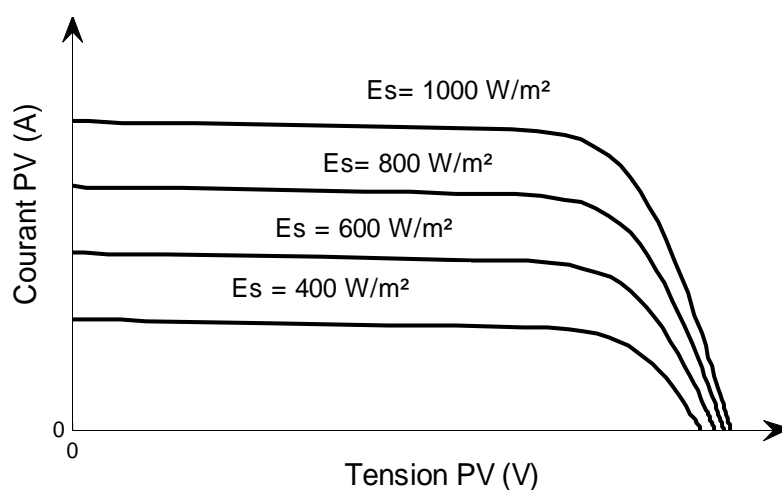


Figure II.5: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

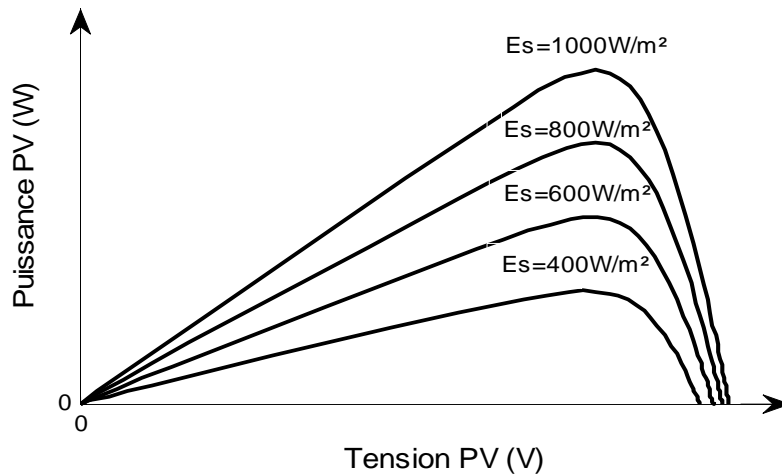


Figure II.6 Caractéristique Puissance - tension pour différents éclaircements.

➤ La température

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. La figure (II.7) donne l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairciment constant.

On remarque, que lorsque la température augmente, le courant augmente très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

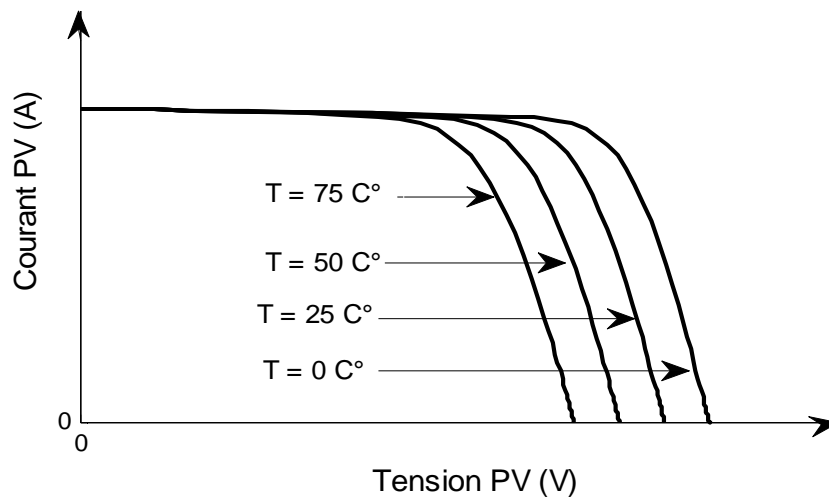


Figure II.7 Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

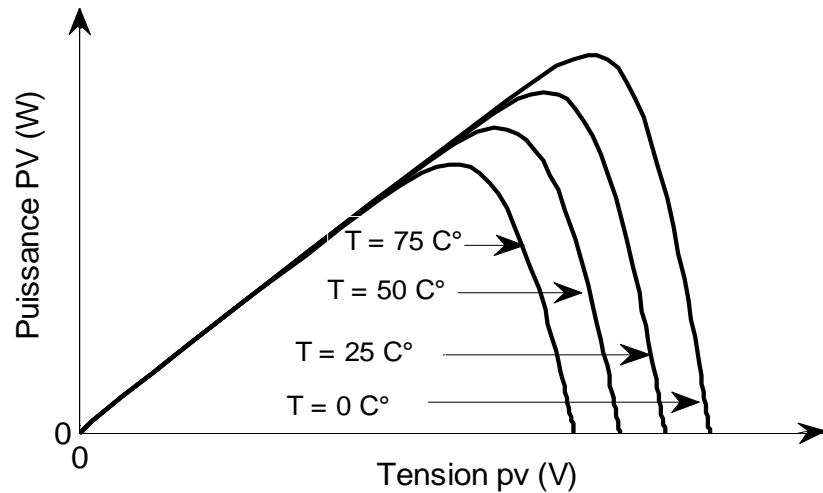


Figure II.8 L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

II.3.1.5 Influence de la résistance série R_S :

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collecte et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

II.3.1.6 Influence de la résistance parallèle R_P :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence des fissures et des défauts des structures complexes le siège de phénomène physique devient assimilable aussi à une résistance parallèle (R_P).

Ordre de grandeur de R_P pour une cellule au Si : $R_P = 10^2$ à $10^4 \Omega$. R_P augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.

II. 4. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour simuler la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire (ou d'un panneau)[12]. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de cette caractéristique. Dans notre travail, nous avons retenu le modèle à une diode qui donne de très bonnes précisions [11]. Ce modèle est caractérisé par son schéma équivalent (figure II.9) :

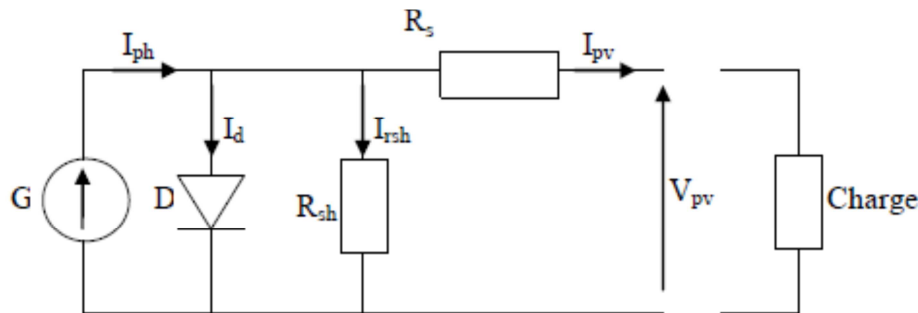


Figure II.9 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

G : Source de courant qui modélise la conversion de flux lumineux en énergie électrique ;

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule ;

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours ;

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens ;

Nous obtenons alors l'équation du courant pour un module photovoltaïque déduite du schéma électrique équivalent de la figure (II.9):

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

I_{pv} : Le courant délivré par le module ;

I_{ph} : Le photo-courant ;

I_d : Courant de diode ;

I_{rsh} : Le courant shunt ;

Le modèle utilisé est le modèle à une diode [11], le courant photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{sc}(1 - K_1(\exp K_2 V_{pv}^m - 1)) \quad (\text{II.2})$$

Dans cette équation, le courant (I) dépend des paramètres $K1$, $K2$, m et de la tension aux bornes du générateur PV.

Les coefficients $K2$, $K3$ et $K4$ sont donnés par les équations suivantes :

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (\text{II.3})$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc}(1 + K_1) - I_{ppm}}{K_1 I_{cc}} \right] \quad (\text{II.4})$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \quad (\text{II.5})$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{ppm}}{V_{co}} \right]} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$K1 = 0.01175;$$

I_{ppm} : Courant au point de puissance maximal [A] ;

V_{ppm} : Tension au point de puissance maximal [V] ;

I_{cc} : Courant de court circuit [A] ;

V_{co} : Tension en circuit ouvert [V] ;

Il est à noter que l'équation (II.2) est applicable seulement dans les conditions standard de fonctionnement ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$). Quand la température et l'ensoleillement changent, le courant et la tension photovoltaïque changent selon les équations suivantes :

$$\Delta_{Tc} = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta v_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{II.9})$$

$$v_{nouv, pv} = v_{pv, stc} + \Delta v_{pv} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{nouv, pv} = I_{pv, stc} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

G_{stc}, T_{stc} : Représentent respectivement le niveau d'éclairement et la température dans les conditions standards de fonctionnement ;

G, T_c : Représentent respectivement le niveau de l'éclairement et la température dans les conditions quelconques ;

ΔT_c : Représentent la variation de la température ;

$\Delta V_{pv}, \Delta I_{pv}$: Représentent respectivement la variation de la tension et du courant par rapport à l'ensoleillement et a la température ;

α_{sc} : Représente le coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} [mA/°C] ;

β_{oc} : Représente le coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} [mV /°C] ;

II.5 Les convertisseurs DC-DC :

Constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les systèmes photovoltaïques, les éoliennes, les systèmes hybrides, Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée pour de diverses simulations dans les systèmes des énergies renouvelables, des modèles précis et exacts de hacheur parallèle, de hacheur série et de hacheur série/parallèle sont requis. Ce travail cherche à analyser et proposer deux méthodes de modélisation simples et précises.

II.5.1 Modèle mathématique du convertisseur parallèle :

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté en figure (II-10) et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur S.

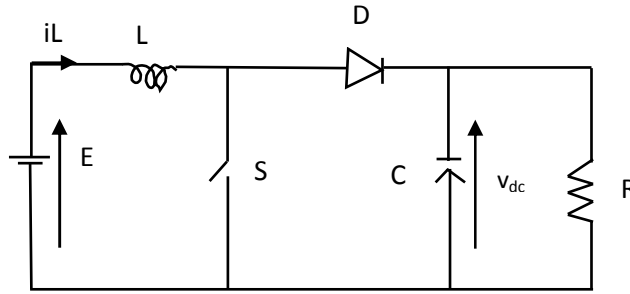


Figure II-1: Schéma de principe du hacheur parallèle

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc}(1 - \alpha) \quad (\text{II-12})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R}$$

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en (II-12) où

i_L : courant dans la bobine L ,

E : tension d'entrée,

V_{dc} : tension de sortie

α : est la commande.

Les paramètres du système sont :

L : l'inductance de la bobine en [H],

C : la capacité du condensateur en [F]

R : la résistance de la charge R en [Ω].

Le signal de contrôle α est compris dans le domaine discret de $\{0;1\}$ et il indique l'état de l'interrupteur S : ouvert pour 0 et fermé pour 1. Il peut être remplacé par sa valeur moyenne sur une période de découpage α qui représente le rapport cyclique $\alpha = T_{on}/T_s$ où :

T_{on} : le temps de conduction ; T_s : la période de découpage.

II.5.2 Modèle mathématique du convertisseur série :

La présentation de l'opération de ce type de convertisseur par des équations mathématiques doit être réalisée en prenant en compte de l'état de l'interrupteur S dans la figure (II-11).

Quand l'interrupteur est en état passant, alors $T_{on} = \alpha * T_s$. Comme résultat, l'énergie stockée dans l'inductance augmente

Quand S est bloqué alors $T_{off} = (1-\alpha)*T_{set}$ l'énergie accumulée dans l'inductance se transfert vers la capacité et la charge.

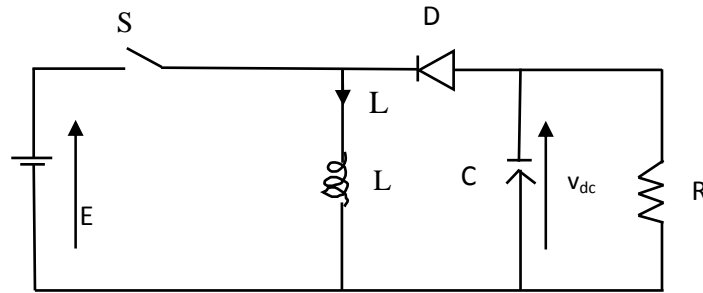


Figure II- 11 : Schéma de principe du convertisseur série

$$L \frac{di_L}{dt} = \alpha E - V_{dc}(1 - \alpha) \quad (\text{II-13})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R}$$

La procédure de dérivation des équations dynamiques en régime de conduction continue est la même que dans le cas du hacheur parallèle. En régime interrupteur passant, S est égal à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = \alpha E \quad (\text{II-14})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{V_{dc}}{R}$$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égal à 0 et la diode conduit. Les équations sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \quad (\text{II-15})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L - \frac{V_{dc}}{R}$$

Les paramètres du système sont toujours les mêmes que dans le cas du hacheur parallèle.

II.5.3 Modèle mathématique du convertisseur série/parallèle :

La présentation de l'opération de ce type de convertisseur par des équations mathématiques doit être réalisée en prenant compte de l'état de l'interrupteur S dans la figure II-12. Quand l'interrupteur est en état passant, alors $T_{on} = \alpha * T_s$. Comme résultat, l'énergie stockée dans l'inductance augmente

Quand S est bloqué Alors $T_{off} = (1-\alpha) * T_s$ et l'énergie accumulée dans l'inductance se transfère vers la capacité et la charge.

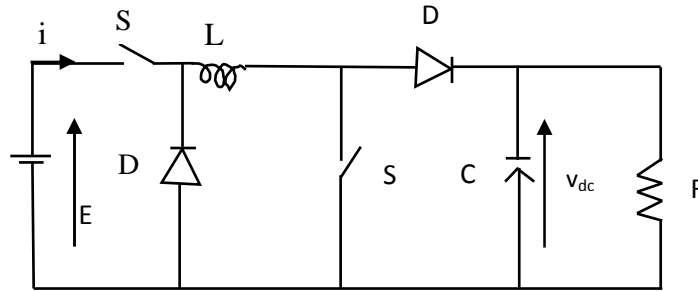


Figure II- 12 Schéma de principe du convertisseur non inverseur série/parallèle

$$L \frac{di_L}{dt} = \alpha E - V_{dc}(1 - \alpha)$$

(II-16)

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R}$$

II.6 Modèle de la batterie :

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, nous utiliserons pour notre étude, le modèle R-C dit aussi modèle simple, qui nécessite pas d'identifications expérimentales de paramètres empiriques nécessaires à l'emploi des autres modèles couramment utilisés, et qui permet également le choix d'un simulateur à pas fixe dont le pas de calcul est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le modèle R-C comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie C_{bat} et une résistance interne R_s .

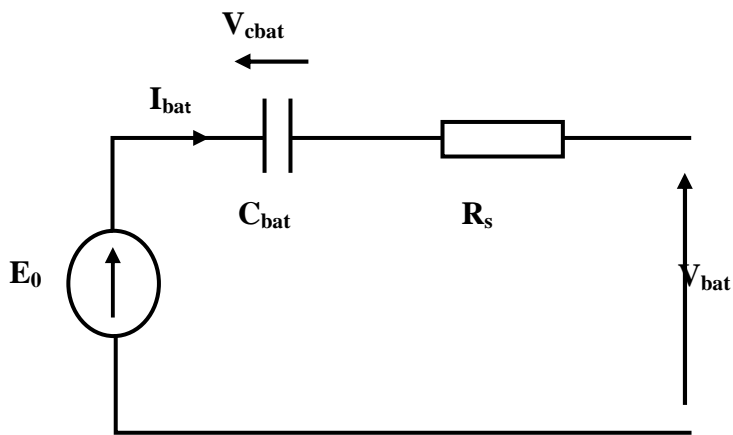


Figure II.13: Modèle R-C de la batterie

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.17})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

- C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie.
- Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

II. 7 Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres des constituants.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications définis dans les chapitres suivants. Pour des raisons économiques, l'étude reste incomplète ce qui nécessite de faire un bon dimensionnement.

CHAPITRE III

GESTION DE

PUISSANCE DU

SYSTÈME

PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction :

Dans n'importe quel système photovoltaïque avec batterie de stockage il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants.

L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge de stockage d'autre part (protection contre les surcharges et les décharges profondes), afin de préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

A cet effet, l'algorithme de gestion est chargé de réguler l'énergie provenant du système photovoltaïque. Pour se faire, ce dernier est implanté sous Matlab/Simulink puis simulé. Mais aussi de traiter les différents cas possibles auxquels nous sommes appelés à être confrontés.

III.2 Caractéristiques des modules photovoltaïques [16]:

Le système photovoltaïque est constitué de six panneau solaire de marque SHARP. Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau (I_{sc} , V_{oc} , I_{pm} , V_{pm}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000W/m^2 et une température de 25°C , 1.5 AM). Le tableau (III.1) montre les paramètres du panneau solaire fourni par le constructeur :

Paramètres	valeurs
Puissance maximale du panneau P_m	175W
Courant au point de puissance maximale I_{pm}	4.95A
Tension au point de puissance maximale V_{pm}	35.4V
Courant de court-circuit I_{sc}	5.4A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44.4V
Coefficient d'incrément de la tension V_{oc} (β_{oc})	-156 mV/ $^\circ\text{C}$
Coefficient d'incrément de courant I_{sc} (α_{sc})	0.053 mA/ $^\circ\text{C}$

Tableau III-1 Paramètres d'un panneau solaire SHARP (175 W) [16].

Le schéma bloc réalisé pour la simulation de modèle a une diode sous Matlab /Simulink est donné par la figure (III.1) :

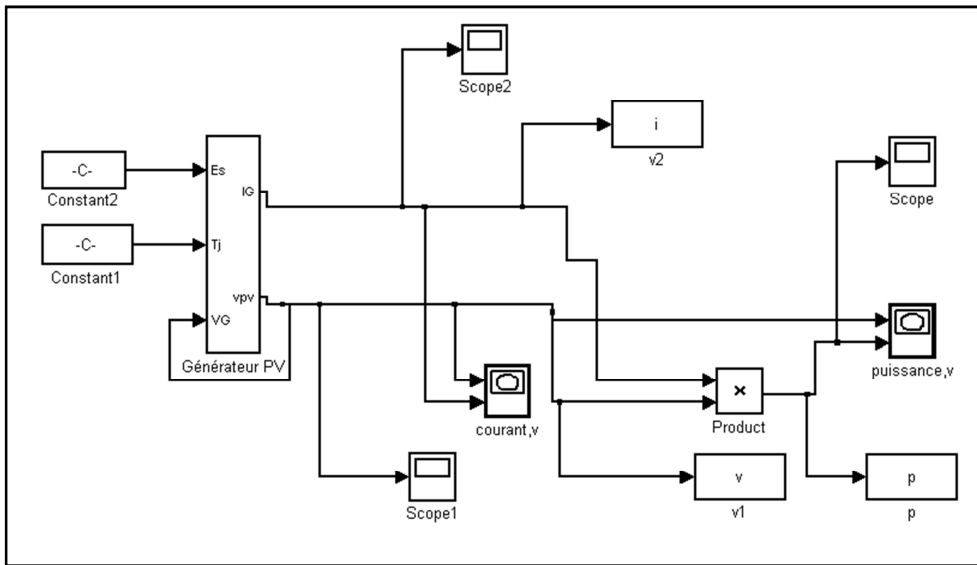


Figure III-1 Schéma Matlab/Simulink du modèle une diode

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. Les figures (III.2 et III.3) montrent les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un panneau solaire dans les conditions standard de fonctionnement.

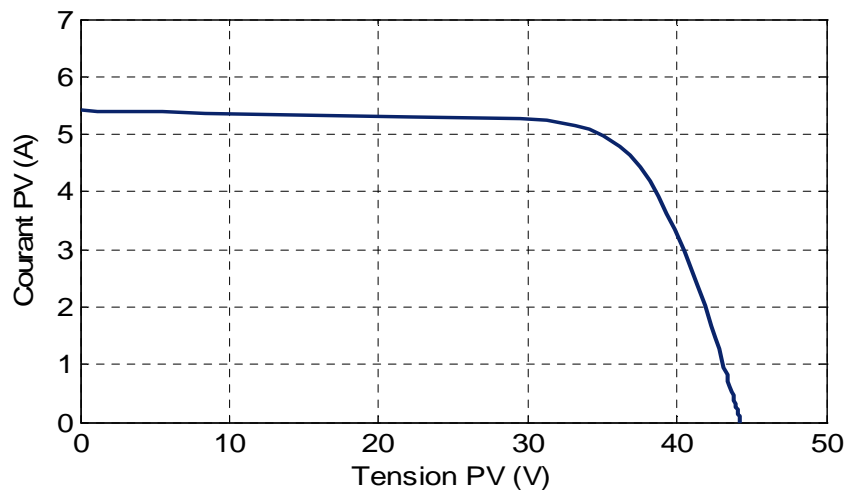


Figure III-2 Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m^2 et $T=25$ °C.

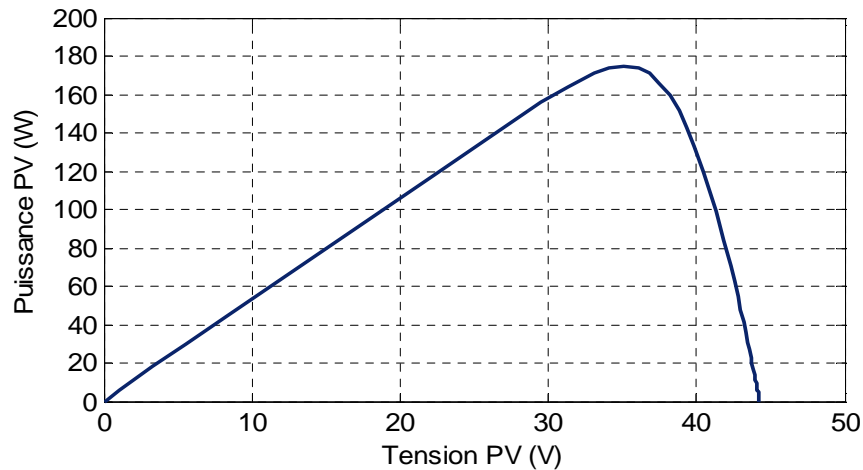


Figure III-3 Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m^2 et $T=25$ °C.

III.2.1 Influence de l'irradiation sur les paramètres des modules PV :

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ suivant l'axe des courants.

L'accroissement du courant de court circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [17].

Les figures (III.4 et III.5) montrent bien la variation du courant (I_{pv}) ainsi que la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) pour différents niveaux d'éclairement ($E_s=200W/m^2$, $400 W/m^2$, $600W/m^2$, $800W/m^2$, $1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$) :

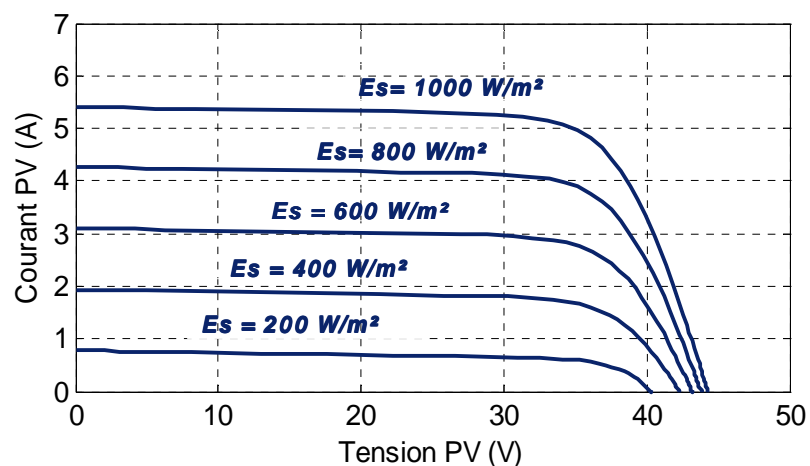


Figure III.4 : Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements

On remarque d'après la figure (III.4) une forte diminution du courant de court-circuit et une faible diminution de la tension du circuit ouvert lorsque l'éclairement diminue.

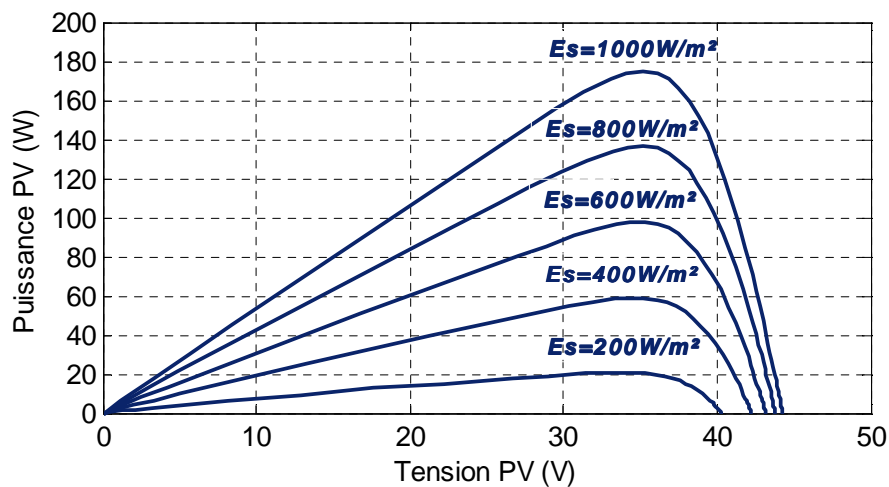


Figure III-5 Caractéristique puissance-tension pour différents éclaircissements

D'après la figure (III.5) on déduit que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque.

III.2.2 Influence de la température sur les paramètres des modules PV :

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente également, et cela est due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0.01% par degré C° . Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule. La diminution de la puissance fournie est estimée à environ de 0.5 % par degré pour un module [18].

Les figures (III.6 et III.7) montrent bien la variation du courant (I_{pv}) ainsi que de la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) pour différents niveaux de la température ($T=0^\circ C$, $T=25^\circ C$, $T=50^\circ C$, $T=75^\circ C$ et $1000W/m^2$) :

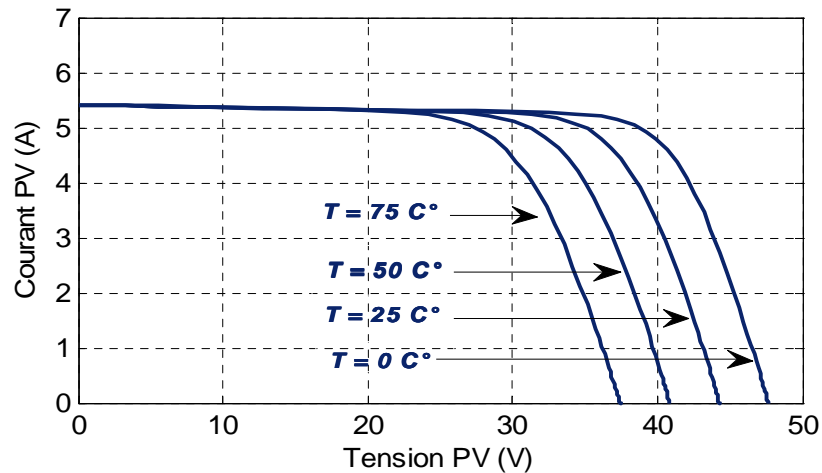


Figure III-6 Caractéristique courant-tension pour différents niveaux de températures

On constate d'après la figure (III.6) que l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert, contrairement au courant de court-circuit qui reste inchangé.

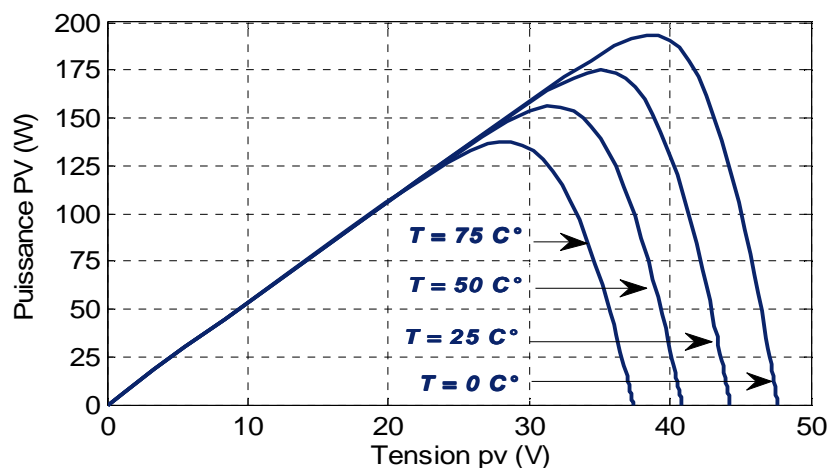


Figure III-7 Caractéristique puissance-tension pour différents niveaux de températures

D'après la figure (III.7), on voit que l'augmentation de la température fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du générateur PV.

III.3 Optimisation de la puissance des modules PV :

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelque soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande place ainsi le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt}, I_{opt}). Le premier système de puissance MPPT à été

introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum, [19]. A savoir plusieurs méthodes d'optimisation :

- Méthode de contrôleur MPPT basée sur le mode glissant.
- Méthode de contrôleur MPPT basée sur la logique floue.
- Méthode de perturbation et d'observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentielle (CI).

III.3.1 La méthode de perturbation et observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} volontairement (augmenter ou diminuer) avec une constante C et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. Si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction, réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [21,20]. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale ceci cause alors une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémentiation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentiation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement [20].

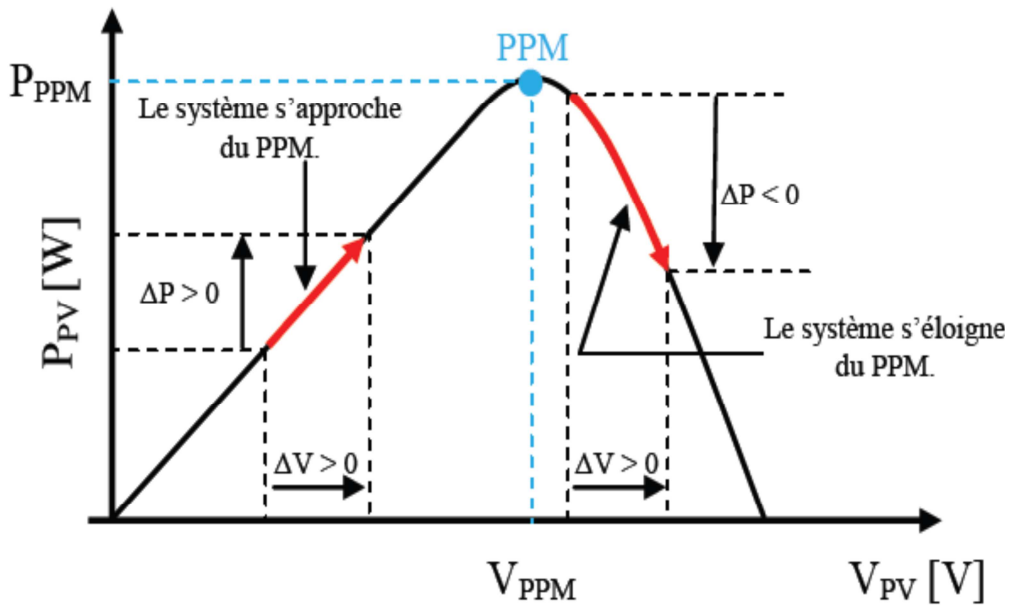


Figure III-8 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.

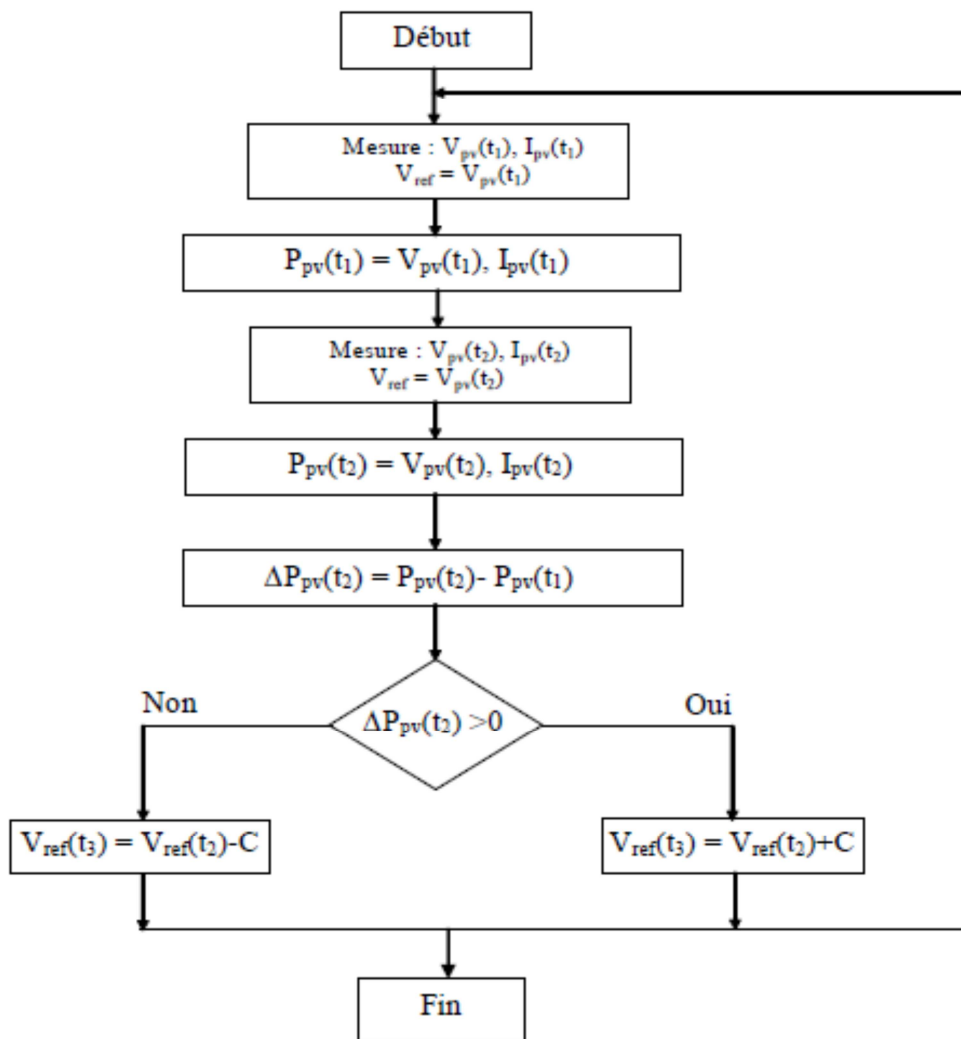


Figure III-9 Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.

➤ **Résultats de simulation:**

Les résultats de simulation illustrés par les figures (III.14 et III.15) concernent l'algorithme P&O pour un panneau de type SHARP NT175E1, pour différentes variations de l'éclairement ($E_s=200-400-600-800-1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25-50-75 \text{ °C}$) :

On a choisi l'algorithme "perturbation et observation" car c'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité. La simulation a été faite en utilisant le logiciel Matlab et les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes :

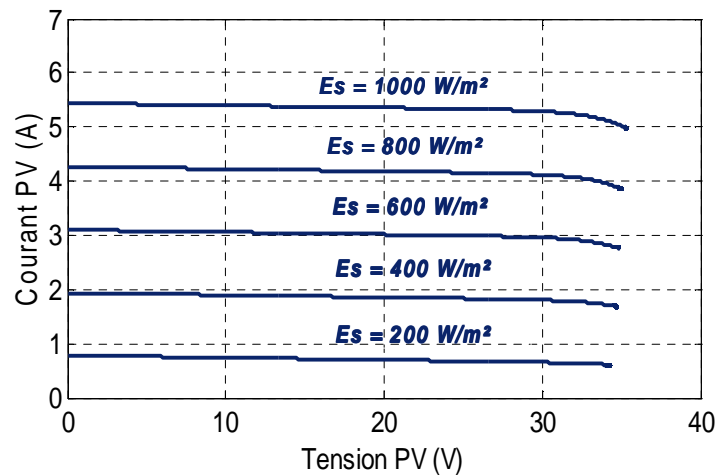


Figure III-10 Caractéristique courant-tension pour différents éclaircements avec la réponse de l'algorithme (P&O).

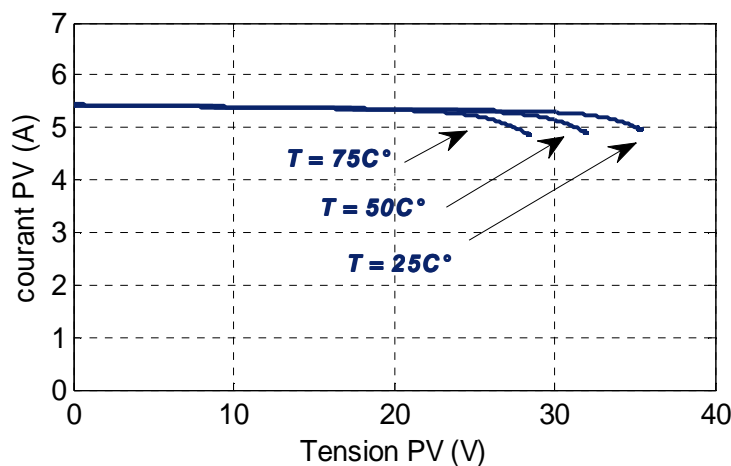


Figure III-11 Caractéristique courant-tension pour différents températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

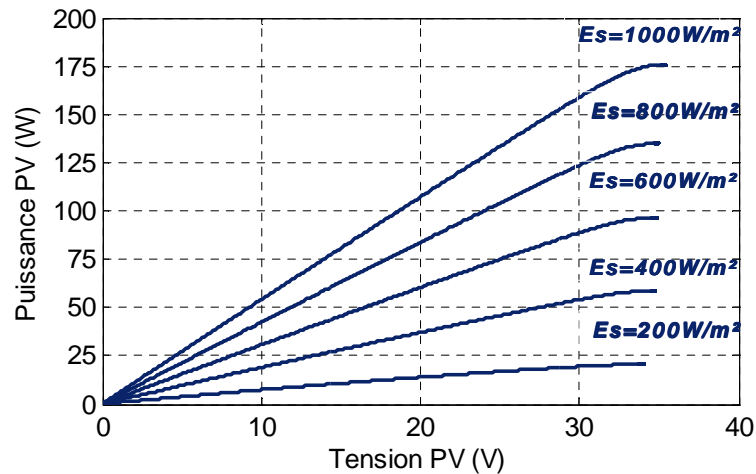


Figure III-12 Caractéristique puissance-tension pour différents éclairagements avec la réponse de l'algorithme (P&O).

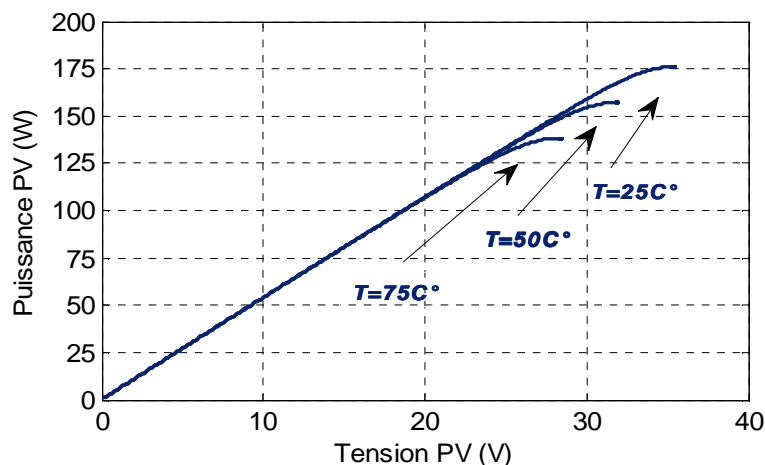


Figure III-13 Caractéristique puissance-tension pour différentes températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

Pour les deux tests on remarque toujours une convergence de la puissance vers le point de puissance maximal (PPM), le courant converge également vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximale.

III.4 Description du système étudié :

La figure (III.14) présente le système photovoltaïque étudié qui est constitué de six panneaux branchés en parallèle de type SHARP 175 W chacun et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (Hacheur BOOST). La source d'énergie est reliée à un contrôleur de charge puis à des batteries de 36 V. Le système alimente une charge DC (500 W).

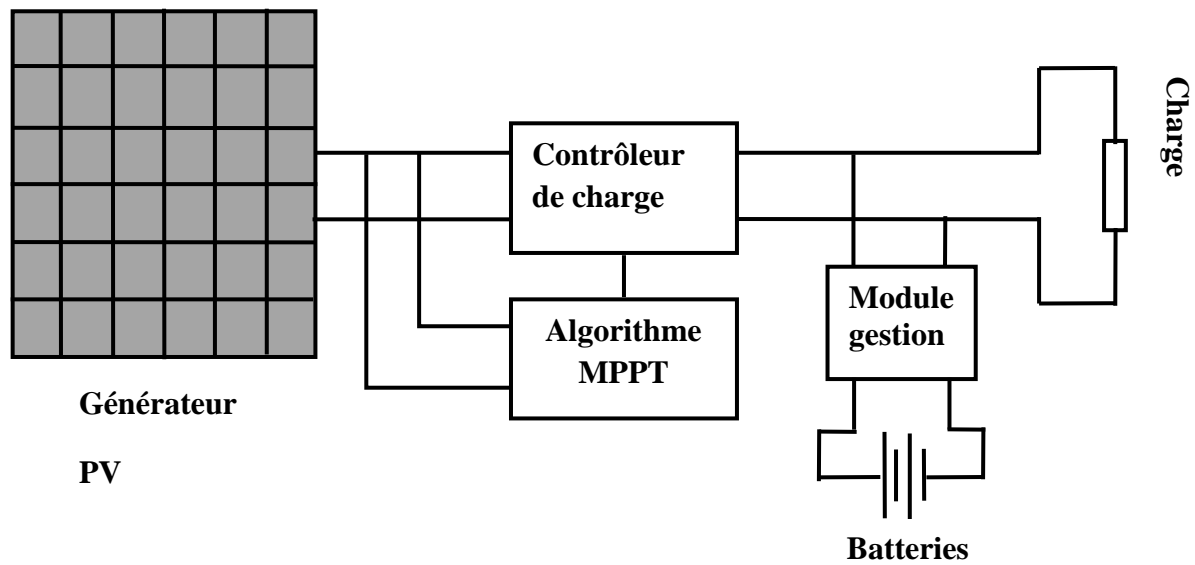


Figure III-14 Structure du système photovoltaïque étudié

III.4.1 Principe de fonctionnement de la gestion de puissance :

Dans un système photovoltaïque il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge et décharge des batteries d'autre part.

Le module de gestion sera chargé de gérer l'énergie provenant des panneaux photovoltaïques et du stockage suivant la puissance exigé par la charge.

La figure suivante représente l'organigramme de gestion de puissance du système photovoltaïque :

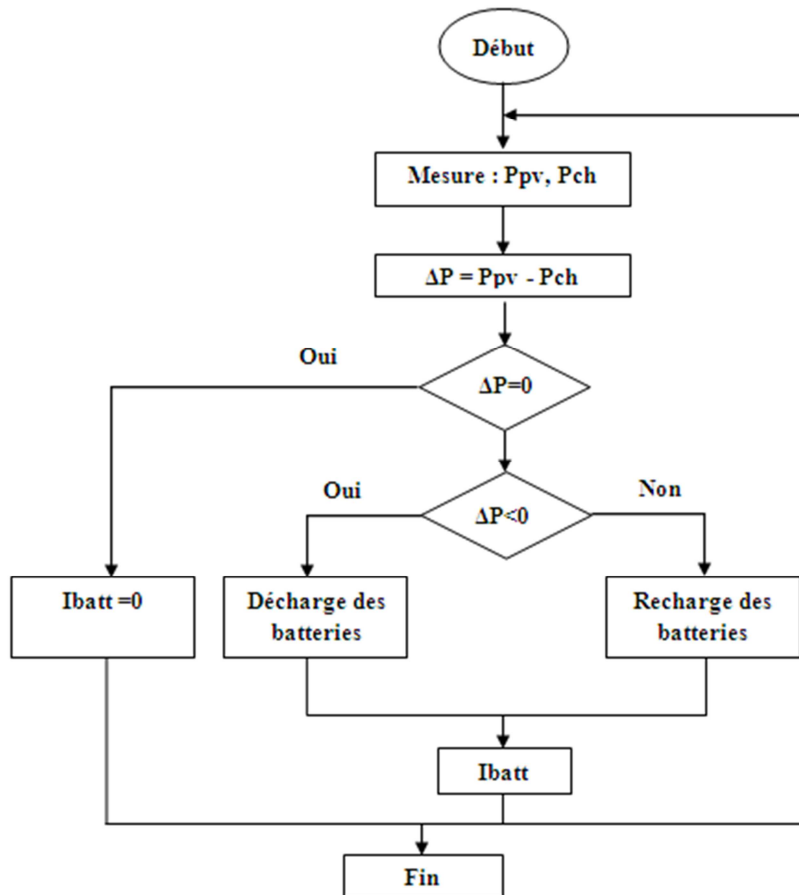


Figure III-15 Organigramme de gestion d'énergie dans le système de pompage PV

Le schéma Matlab / Simulink de la figure (III.16), représente le système photovoltaïque avec stockage supervisé par un algorithme de gestion.

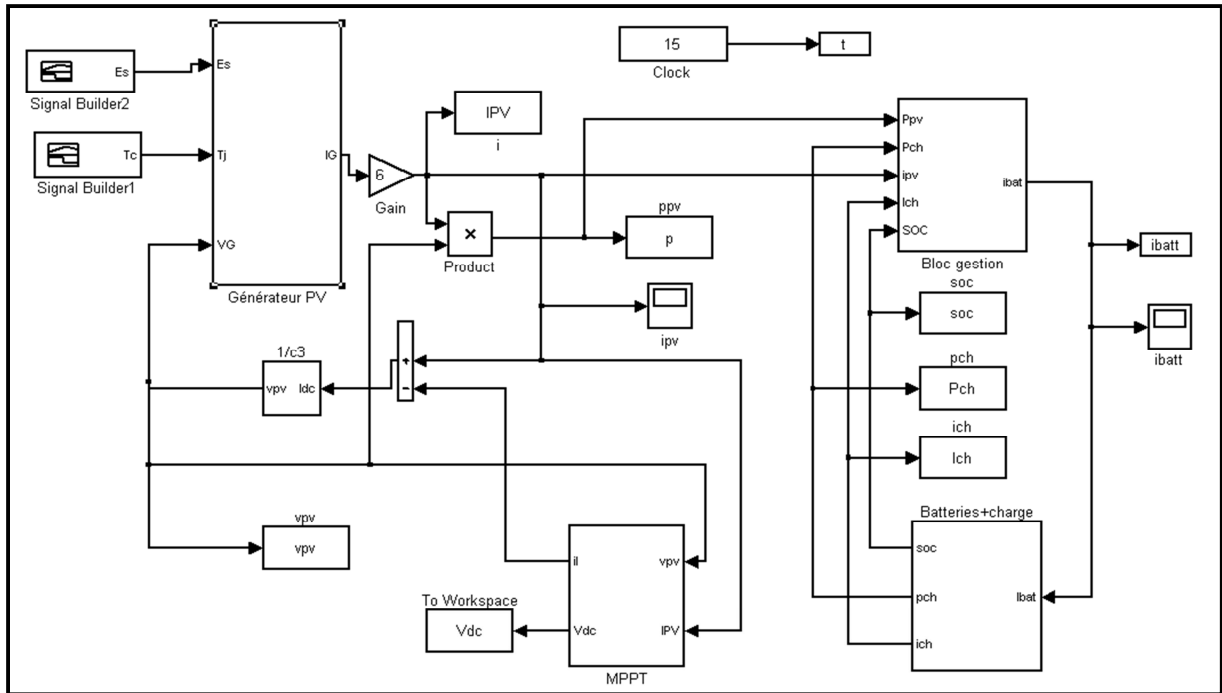


Figure III-16 Schéma Matlab/Simulink du système global

III.4.2 Résultats de simulation :

Nous avons simulé le système photovoltaïque avec batteries pour une variation de l'éclairement et de la température (figures III.21 et III. 22).

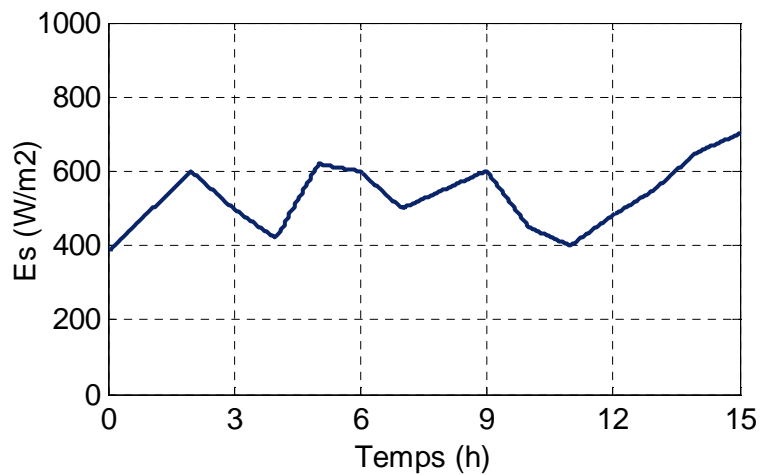


Figure III-17 Ensoleillement mesuré

La figure (III.17) représente la variation de l'ensoleillement en fonction du temps.

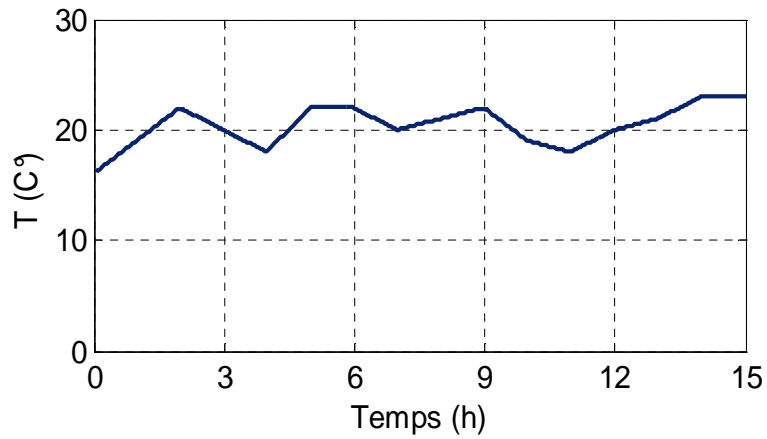


Figure III-18 Température mesurée.

La figure (III.18) représente la variation de la température réelle en fonction du temps. La température varie entre deux valeurs ($T = 17\text{ °C}$ et $T = 22\text{ °C}$).

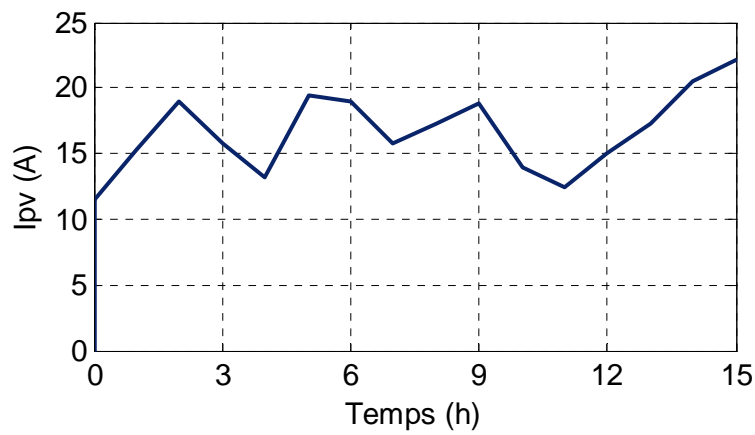


Figure III-19 Courant photovoltaïque

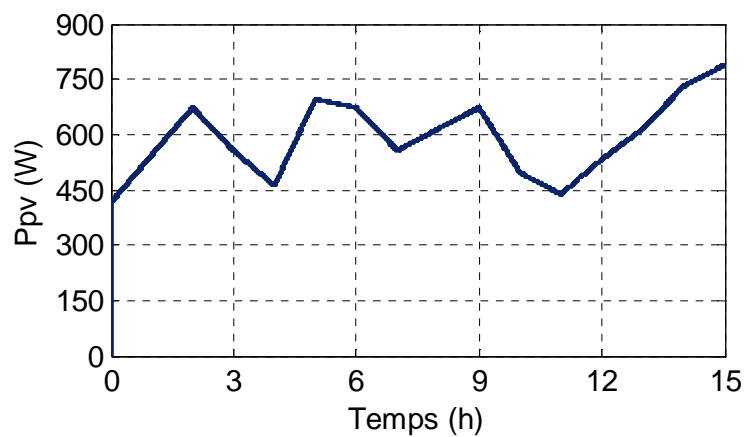


Figure III-20 Puissance photovoltaïque

On remarque que l'évolution des allures du courant et de la puissance photovoltaïque suit l'allure du profil d'éclairement.

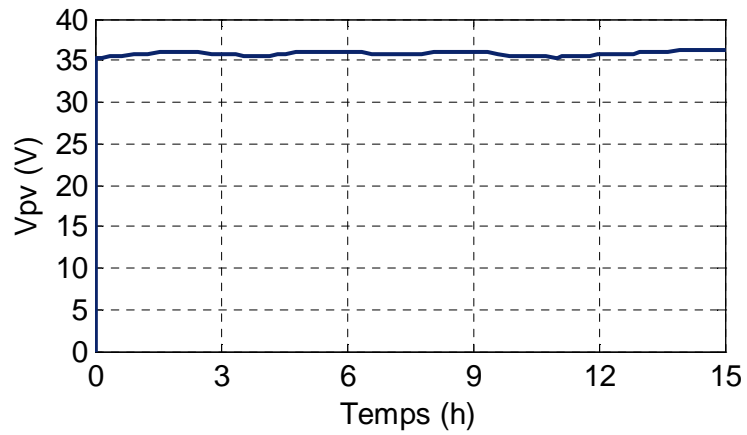


Figure III-21 Tension photovoltaïque optimale

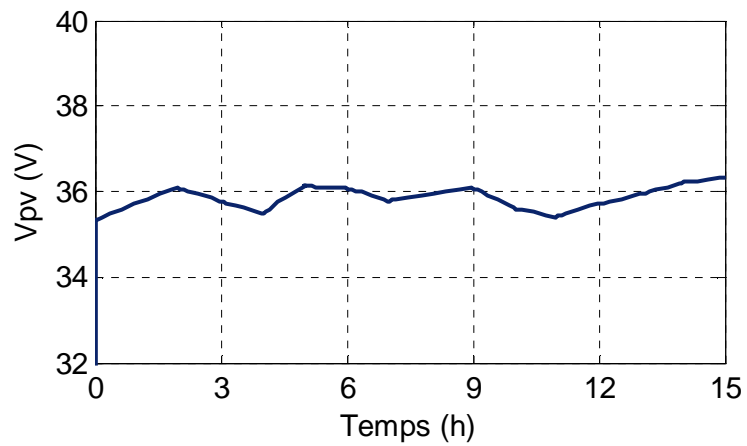


Figure III-22 Zoom sur la tension photovoltaïque optimale

Ce profil de charge est utilisé pour exprimer les modes de fonctionnement du système photovoltaïque autonome (figure III.23).

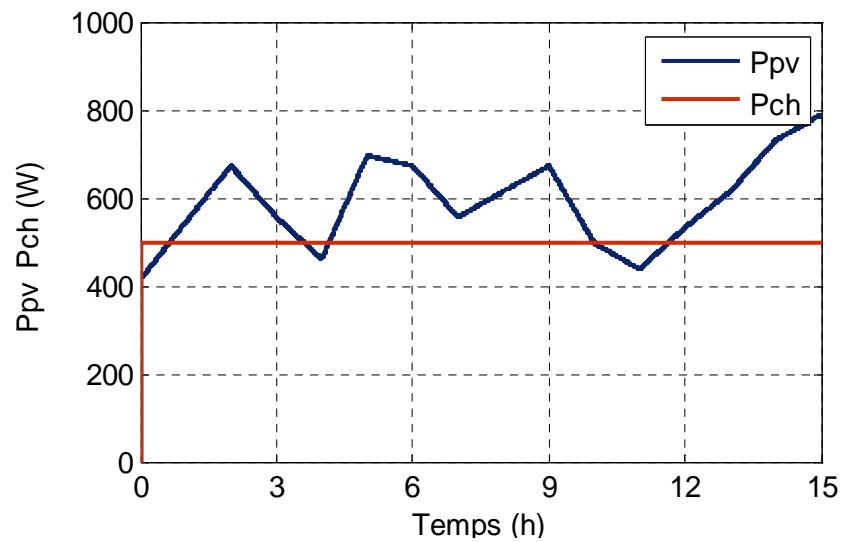


Figure III-23 Puissance photovoltaïque et de la charge

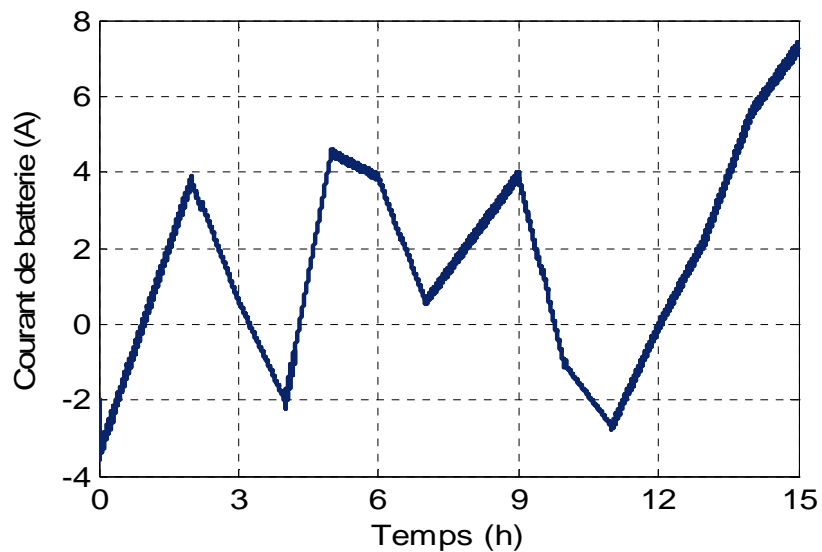


Figure III-24 Courant de batterie

La figure (III.24) présente le courant de la batterie. On peut constater qu'il est positif en cas de charge, et négatif en cas de décharge.

Lorsque la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque est supérieure à la puissance de charge, les batteries se chargent.

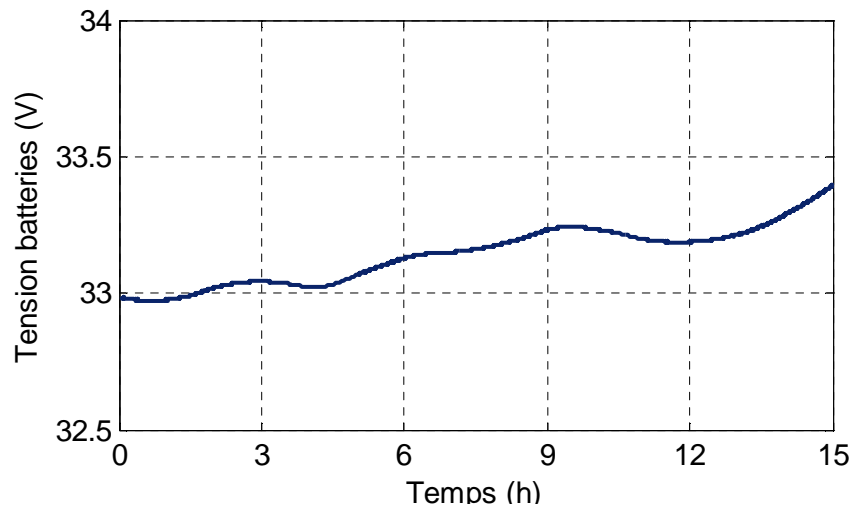


Figure III-25 Zoom sur la tension des batteries

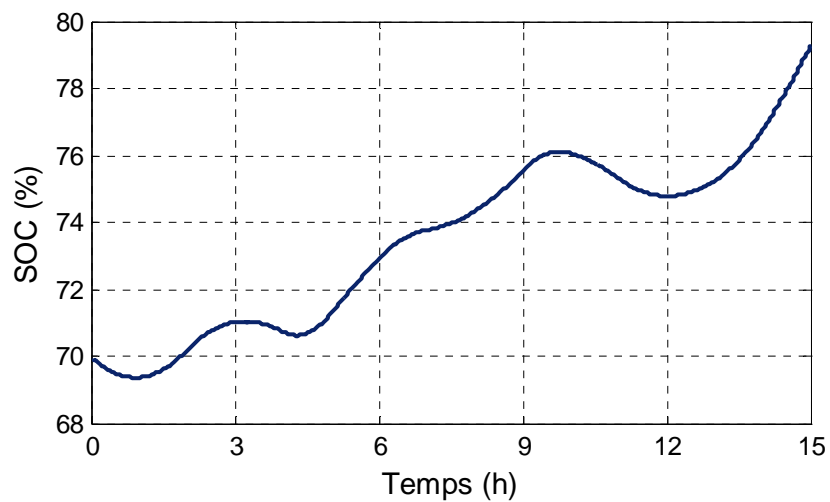


Figure III-26 Zoom sur l'état de charge des batteries

On remarque que l'allure de la tension aux bornes des batteries figure (III.22), ainsi que celle de l'état de charge figure (III.23). Les batteries est initialement chargée à 70 %. On remarque que ces deux allures évoluent de la même manière. Donc le soc est l'image de la tension.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a simulé les différents composants de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque sous Matlab. Nous avons étudié la méthode de maximisation de cette chaîne (P&O).

Nous avons présenté aussi un algorithme de gestion de puissance pour un système photovoltaïque autonome avec stockage alimentant une charge de puissance constante pour une variation de l'éclairement et température.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale :

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude nous a permis de bien comprendre le principe du photovoltaïque consistant en l'exploitation de l'énergie solaire, cela nous a permis aussi de déduire qu'un dimensionnement photovoltaïque passe par un compromis énergie-économie qui se traduit par le choix des éléments composant les installations photovoltaïques.

L'objectif de ce travail est l'étude, modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion photovoltaïque de production d'énergie électrique destinée à l'alimentation d'une charge autonome.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré pour des généralités sur le photovoltaïque, et un rappel sur les différentes combinaisons des systèmes photovoltaïques, ainsi que leurs principaux constituants.

Le travail présenté dans ce deuxième chapitre, a pour but l'étude et la modélisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque.

Dans le dernier chapitre, la simulation de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque sont présentées. Nous avons étudié la méthode de maximisation de cette chaîne (P&O).

Nous avons vu aussi une méthodologie de développement de la loi de gestion de puissance pour un système photovoltaïque avec stockage pour une variation de l'éclairement et température.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] Othman ben seddik.fathi djaloud. etude et optimisation d un sys pv.memoire de master eth .université de Ouargla 2012.
- [2] SLAMA fateh.modelisation d un sys multi generateurs pv interconnectes au reseau electrique.magister en eth.ufasetif.
- [3] Missoum .M et Hamidat.A. Contribution de l'énergie PV dans la performance énergétique de l'habitat a haute qualité énergétique en Algérie. Magister en génie mécanique.2011.
- [4]: A. Maafi, « A survey on PV activities in Algeria ». Renewable Energy, 2000.
- [5] Akassewa Tchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec .stockagehybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [6] : A, Labouret. M, Viloz. « Energie solaire photovoltaïque » le manuel du professionnel.3eme édition Dunod, 2006
- [7]: A. MIRICKI « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [8] : O. Gergoud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [9] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff « photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools» horizon Canada, 2001.
- [10] A. Ould Mohamed Yahia et al. (*Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 483*)
- [11] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [12] D. Rekioua, O.Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [13] : Maouedj Rachid. « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique

sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » mémoire de Magister, Université Abou Baker BELKAÏD Tlemcen: décembre 2005.

[14] : M. MEZZAI et S. MOULOUDI «*Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque* » mémoire de Master , université de Bejaia ,Juin 2014.

[15] : S. Bensmail, «Contribution à la Modélisation et l'Optimisation des systèmes Photovoltaïques». Mémoire de Magister 2012.

[16]: N. Mezzai, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Mohammedi, K. Idjarane, S. Bacha, « Modeling of hybrid photovoltaic/wind/fuel cells power system». International journal of hydrogen energy, 2014, pp. 15158-15168.

[17] R. Maoudejdj « Applications de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » Mémoire de Magister université de Tlemcen, Algérie 2005.

[18] A Betka « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil » Mémoire de Magister université de Biskra ,1997.

[19] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, «Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems», Solar Energy Materials & Solar Cells, vol: 90, N°: 11, pp: 1555 –1578, 2006.

[20] Z. Laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.

[21] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.