



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

خ. ⓄⓂ: Ⓔⓧ Ⓒ://: Ⓜ · ⓧ ⒸⓂⓂⓄ

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

THÈME

ETUDE ET MODELISATION D'UN SYTEME
PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME

Dirigé par :

Pr : N.Benamrouche

Réalisé par :

M.LIMAM AMINE

M.SOUKANE SAMIR

PROMOTION :

2011/2012

REMERCIEMENTS

À MES PARENTS POUR L'AMOUR ET
L'ÉDUCATION QU'IL M'ONT OFFERT.

A MON FRÈRE ET MES DEUX SŒURS QUI
M'ONT TOUJOURS SOUTENUS ET CRU EN MOI.

A MON PETIT CŒUR POUR CE QU'ELLE EST.

MES ENSEIGNANTS DEPUIS LE PRIMAIRE ,QUI
ONT TOUJOURS CRUS EN MES CAPACITÉS.

MES AMIS QUI M'ONT SOUTENUS DANS LES
MOMENTS DE DOUTE.

LES AMIS DE LA SONATRACH CHEZ QUI ONT
A PASSÉ NOTRE STAGE ET QUI NOUS ONT
ADOPTÉ DANS LEUR ÉQUIPE.

A MON BINÔME POUR LES MOMENTS PASSÉS
ENSEMBLE

SOUKANE SAMIR

REMERCIEMENTS

A MES PARENTS POUR L'EXEMPLARITÉ DONT ILS ONT TOUJOURS FAIT PREUVE.

A MES SIX FRÈRES POUR L'AMBIANCE QU'ILS CRÉENT À LA MAISON.

MES ENSEIGNANTS DEPUIS LE PRIMAIRE, QUI ONT TOUJOURS CRUS EN MOI.

MES AMIS QUI M'ONT SOUTENU DANS LES MOMENTS DE DOUTE.

LES AMIS DE LA SONATRACH CHEZ QUI ONT PASSÉ NOTRE STAGE ET QUI NOUS ONT ADOPTÉ DANS LEUR ÉQUIPE.

UN GRAND MERCI À TOUS LES MILITANTS DE LA DÉMOCRATIE, SAID SADI EN TÊTE POUR LEUR ENGAGEMENT POUR UNE ALGÉRIE MEILLEURE.

A MON BINÔME POUR TOUS LES MOMENTS PASSÉS ENSEMBLE

LIMAM AMINE

Nomenclature

A : Le facteur d'idéalité de la jonction

I_{ph} : Le photo courant (A)

I_0 : Courant de saturation (A)

R_{sh} : Résistances shunt.(ohm)

R_S : Résistance série (ohm)

T_c : Température de jonction ($^{\circ}K$)

G_0 : L'éclairement de référence (1000 W/m²)

T_0 : La température de référence (298 $^{\circ}K$)

α : Le coefficient de courant en fonction de la température (A/ $^{\circ}C$)

β : Le coefficient de la tension en fonction de température (V/ $^{\circ}C$)

I_{cc} : Le courant de court circuit (A)

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V)

FF : Facteur de forme

N : Nombre de modules dans le panneau en série

M : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

P_m : La puissance maximale produite PV (W)

S : Surface de générateur (m²)

I_{mp} : Le courant maximal sous conditions standards (A)

V_{mp} : La tension maximale du module sous conditions standards (V)

SB: Flux direct pour un plan d'inclinaison (W/m²)

Nomenclature

S H: Flux direct horizontale

ω : Déclinaison du soleil

δ : Angle horaire du soleil

KT(i): Coefficient de sérénité

ϕ GH : Flux global horizontal

ξ : Albédo du sol

R b : Rapport du flux direct

LPS : Loss of Power Supply

LPSP : Loss of Power Supply probability

SOC : L'état de charge de batterie

C min Bat: La capacité minimale

C max Bat : La capacité maximale

C Bat : La capacité de stockage de la batterie (Ah)

N a : Le nombre de jours d'autonomie

V bat: La tension aux bornes de la batterie (V)

VF : La force électromotrice (V)

R bat : La résistance interne de batterie (ohm)

I bat: Courant de charge de batterie (A)

η bat : Le rendement de la batterie (%)

T a : La température ambiante (°K)

h : Constante de Planck

Nomenclature

c : Vitesse de la lumière

I_{pv} : Le courant fourni par la cellule PV

I_{sat} : Le courant de saturation

V_{pv} : La tension fournie par la cellule PV

K : La constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)

I_{sh} : Le courant traversant la résistance shunt

I_d : Le courant de la diode

V_e : La tension aux bornes de générateur

V_s : La tension de sortie du convertisseur

I_{Lmin} : Le courant minimal dans l'inductance (A)

I_{Lmax} : Le courant maximal dans l'inductance (A)

V_{smin} : La tension minimum aux bornes de condensateur (V)

V_{smax} : La tension maximum aux bornes de condensateur (V)

f_d : La fréquence de la modulante

f_0 : La fréquence de la batterie

E_0 : La tension fixe de la batterie

Q : La capacité de la batterie

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les l'énergie solaire photovoltaïques et les systèmes photovoltaïques	
I-1- Introduction.....	3
I- 2 -Rayonnement solaire.....	4
I-2-1-Spectre du rayonnement	4
I-2-2-Durée d'insolation.....	5
I-3- L'effet photovoltaïques	5
I-3-1- Rappels sur l'énergie solaire.....	5
I-3-2- Historique des cellules photovoltaïques.....	7
I-4-La jonction PN utilisée comme capteur PV	10
I-4-1- Principe de fonctionnement	10
I-4-2-Comportement de la jonction	11
I-4-3-Modélisation de la jonction	12
I-5-Le générateur photovoltaïques	13
I-5-1-Principe et constitution	13
I-5-2-Le Générateur photovoltaïque et ses Performances	14
I-5-3-Association de modules photovoltaïques	14
I-5-4- Propriétés électriques des modules photovoltaïques	16
I-5-5-Influence de l'éclairement sur les modules photovoltaïques	17
I-5-6-Influence de la température sur les modules photovoltaïques	18
Chapitre II : Système photovoltaïques autonome composition et fonctionnement	
II-Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque	19
II-1-Le module photovoltaïque	19
II-1-1-Caractéristiques d'un module	20
II-2-Le panneau solaire	21
II-3-Discription des différents dispositifs de stockage	22
II-3-1-Caractéristiques déterminant le choix d'une technologie de stockage	22
II-3-2- Types d'accumulateurs	24
II-3-2-1- Les Accumulateurs au plomb acide	24
II-3-2-1-1- Composition d'une batterie solaire plomb- Acide	24

II-3-2-1-2- Principe de fonctionnement	26
II-3-2-2- Les Accumulateurs au Nickel- cadmium	27
II-4-Régulation de décharge	27
II-5-Régulation de la charge	27
II-5-1-Régulations de charge série.....	28
II-5-2-Régulateur de charge de coupure	28
II-5-3-Régulateur de charge à découpage	28
II-5-4-Régulateur de charge série à coupure partielle.....	29
II-5-5-Régulateur de charge parallèle	29
II-6-Système de conversion	29
II-6-1- Le convertisseur continu –continu	30
II-7-La Charge	30
Chapitre III : Modélisation et Simulations	
III-1-Introduction	31
III-2-Modélisation du générateur photovoltaïque	31
III-2-1-Modèle a une seule diode	31
III-2-2- Le modèle simplifié	35
III-3-Modélisation du convertisseur BOOST	36
III-3-1-Modèle mathématique du convertisseur BOOST	36
III-3-2- Dimensionnement du convertisseur BOOST	37
III-3-2-1-Calcul de l'inductance (L)	37
III-3-2-2-Calcul de condensateur de (C)	39
III-4-Modélisation de la batterie	41
III-5-La commande MPPT	43
III-5-1-Concept MPPT	43
III-5-2-Algorithmes de la commande MPPT	44
III-5-3-Fonctionnement d'une commande MPPT	45
III-6- Dimensionnement des éléments du système de captage photovoltaïque	46
III-7- Conclusion.....	46
Chapitre IV : Interprétation des résultats	
IV-1-Introduction	47
IV-2- Caractéristiques courant-tension	48
IV-3- Caractéristique puissance-courant	49

IV-4- Influence de l'éclairement	50
IV-5- Influence de la température	51
IV-6- Association de panneau photovoltaïque en série	52
IV-7- Association de Panneaux photovoltaïque en parallèles	54
IV-8- Model de la courbe de l'ensoleillement en fonction du temps utilisée pour les simulations réalisées.....	55
IV-9 Courbes de P_{bus} et P_{pv}	56
IV-9-1- courbes de P_{bus} Alpha et G.....	57
IV-10- Simulation du bus continu sans batterie	58
IV- 10-1- Le courant débité par le générateur I_{pv}	58
IV-10-2- La tension générée par le générateur V_{pv}	59
IV-10-3- Courbes du courant du GPV (I_{pv}) et du bus continu (I_{bus}).....	60
IV-10-4- Courbes de la tension du bus continu (V_{bus}).....	61
IV- 10-5- La puissance délivrée par le générateur PV en fonction du temps.....	63
IV-11- Conclusion.....	64
 Conclusion Générale	 65

INTRODUCTION GENERALE :

De tous les temps les sociétés ont eu besoin d'utiliser de l'énergie sous ses différentes formes dans la vie de tous les jours. Depuis l'ère de l'industrialisation ces demandes en énergie dans les sociétés modernes ont considérablement augmentées.

Puisant dans les énergies fossiles, les sociétés humaines se sont rendues compte du caractère non durable de ces ressources mais aussi de la pollution qu'elles induisent, ce qui a conduit les chercheurs à se pencher sur la question de développer des énergies plus durables et moins polluantes.

Le concept d'énergie renouvelable est né de cette volonté de réduire la pollution qui est essentiellement due à l'activité industrielle de l'homme, et de pallier à l'épuisement des énergies fossiles dans une phase d'augmentation de la demande mondiale en énergie électrique, tirée par la croissance économique dans les pays émergents.

L'énergie solaire photovoltaïque qui fera l'objet de notre travail, fait partie de ces énergies dites renouvelable avec l'éolien, la géothermie et la biomasse entre autres qui sont des énergies à ressources illimitées et complètement propres.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue de l'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un générateur photovoltaïque (GPV) avec un système de stockage assuré par des batteries.

Le type de stockage utilisé dans ce système est la batterie au plomb, qui est choisie pour sa haute fiabilité et son faible coût.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire sera structuré en quatre chapitres. Dans le premier, nous rappellerons des notions de bases sur l'énergie solaire photovoltaïque et les systèmes photovoltaïques.

L'objectif du second chapitre est de donner des généralités des systèmes photovoltaïques autonomes ainsi que leurs compositions et fonctionnement. Le troisième chapitre est consacré à la simulation du système étudié, le but du quatrième chapitre est l'interprétation des résultats obtenus lors de la simulation. Nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

I-1- Introduction :

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations [13]:

Ø **Système Non autonomes ou « grid connected »** : rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés au réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur).

Le surplus d'énergie produite par le générateur photovoltaïque est injecté au réseau électrique public.

Ø **Système Autonomes ou « stand-alone »** : qu'on se propose d'étudier dans ce présent travail, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent répondre à la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de la charge, car la production de l'énergie est fluctuante alors l'autonomie du système est rendue possible grâce à un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent les éléments suivants [13].

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque « stand- alone », et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

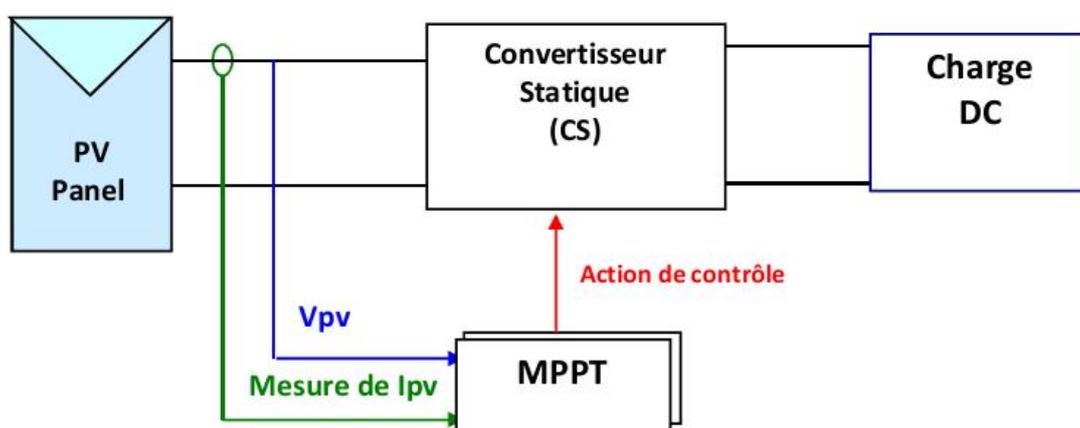


Figure I-1 : Schéma simplifié d'un système

I- 2 -Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1,390,000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée, il y a une soixantaine d'années, que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance. Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [1].

Sa lumière, à une vitesse de 300,000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale dans l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [32] :

- Diamètre de soleil $D_s=1.39*10^9\text{m}$
- Diamètre de la terre $D_t=1.27*10^7\text{m}$
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts}=1,5* 10^{11}\text{m}$

I-2-1-Spectre du rayonnement :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond au rayonnement électromagnétique qui est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde, correspondant 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 [32]:

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	46.6%

Longueurs d'ondes (µm)

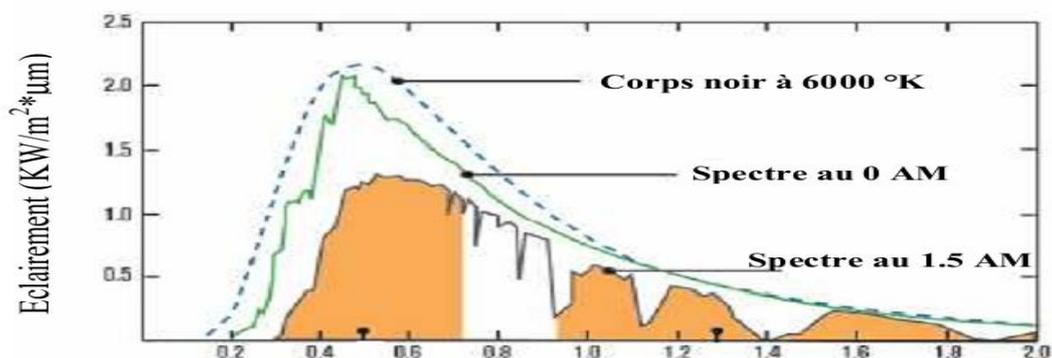


Figure I-2 : Spectre solaire hors atmosphère [32]

I-2-2-Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le levé et le couché du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'elle brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective qui dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

A défaut de l'héliographe, il est possible, qu'à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre pour évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cacheraient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui, elle même dépend de la période de l'année considérée.

I-3- L'effet photovoltaïque :

I-3-1- Rappels sur l'énergie solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} , qui s'écrit :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (I-1)$$

Dans laquelle ' λ ' représente la longueur d'onde, ' h ' la constante de Planck et ' c ' la vitesse de la lumière. D'après l'équation (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques, dont l'ensemble des longueurs d'ondes est assez proche de celui émis par le corps noir. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [2], comme le montre la figure I. 3

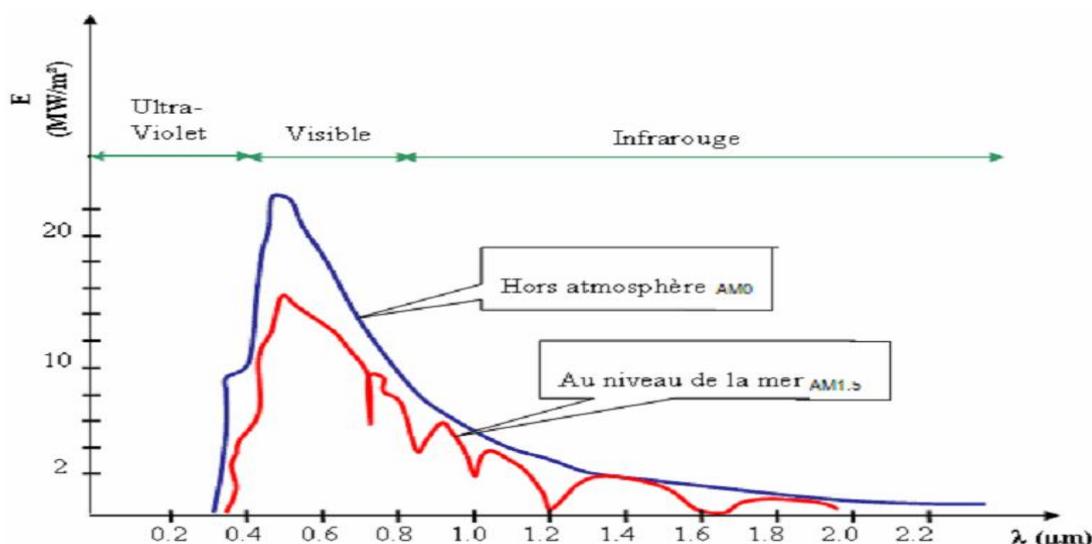


Figure I-3. Exemples de spectre solaire

AM0 : Conditions d'éclairement hors atmosphère ou en haute altitude.

AM1.5 : Conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2μm (ultra-violet) et 4μm (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5μm, 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2μm et 2,5μm. De 0,4μm à 0,78μm, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau suivant donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

Longueur d'onde (μm)	$E_{ph}(ev)$	Zone
0.2	6.2	Ultraviolet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Figure I- 4 : Valeurs énergétique des photons issus du spectre solaire [3]

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite les électrons du matériau, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

I-3-2- Historique des cellules photovoltaïques :

Plusieurs types de matériaux sont susceptibles d'être utilisés dans les capteurs PV, soit seuls, ou associés sous forme de multicouches afin de mieux couvrir la totalité du spectre solaire. C'est en 1930 que les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) ont été créées, suivies de cellules en sélénium (Se).

Pendant des années, l'effet photovoltaïque n'était en somme qu'une curiosité de laboratoire. En 1954, les premières cellules au silicium (Si) ont été réalisées dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone aux États-Unis. Depuis, les cellules PV ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle industrielle. Plusieurs raisons en sont à l'origine de cet essor lié principalement à l'épuisement des ressources fossiles et à la volonté de développer des énergies protectrices de l'environnement.

Pour les applications spatiales, répondant à des normes de poids et de durées de vie sévères, les cellules PV sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux, dont l'une des couches est souvent en GaAs. Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leurs caractéristiques au cours du temps (sur au moins 20 ans). Les plus récentes sont formées de quatre couches de matériaux différents. Certaines recherches tendent même vers cinq couches.

Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si, ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus élevé.

I-3-3-Synthèse des cellules photovoltaïques :

Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison essentiellement de sa disponibilité et de la connaissance acquise sur son comportement électrique. Il est utilisé, pour cela, sous de nombreuses formes (monocristallin, poly-cristallin, amorphe, en couche mince,...), en fonction des performances recherchées.

Ø Les cellules monocristallines :



Figure I-5. Cellules monocristallines [2]

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, (figure I-5). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Le Silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau, et lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, et la méthode de leur production est laborieuse.

Ø Les cellules poly cristallines :



Figure I-6: Cellules poly cristallines [2]

Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations (figure I-6) différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de

productivité, se sont aujourd'hui largement imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

Ø Couches minces (Amorphes) :



Figure I-7: Cellules Couches minces (Amorphes) [2]

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Bien que le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

- **Autres types de cellules :**

De par le monde, un certain nombre de recherches sont encore menées pour développer de nouvelles cellules de rendement plus élevé, possédant une grande stabilité de leurs caractéristiques dans le temps et présentant de faibles coûts de fabrication. Si ce type d'énergie doit être développé à très grande échelle comme «Générateur électrique», il faut résoudre le problème du prix des capteurs. Aussi, depuis plusieurs années, on parle de matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. Ceci suscite actuellement un regain de recherches dans divers laboratoires dans le monde, renouvelant d'autant les efforts portés sur la synthèse des matériaux [7]. Ces cellules, dites de troisième génération, bien qu'actuellement présentent de faibles rendements par rapport aux capteurs inorganiques [record mondial de 3,5% établi en 2001], sont intéressantes par leur très faible coût et sont donc prometteuses pour l'avenir.

I-4-La jonction PN utilisée comme capteur PV :

I-4-1- Principe de fonctionnement :

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 (SC) de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau de type N diffusent dans le matériau du type P. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction P-N a été formée.

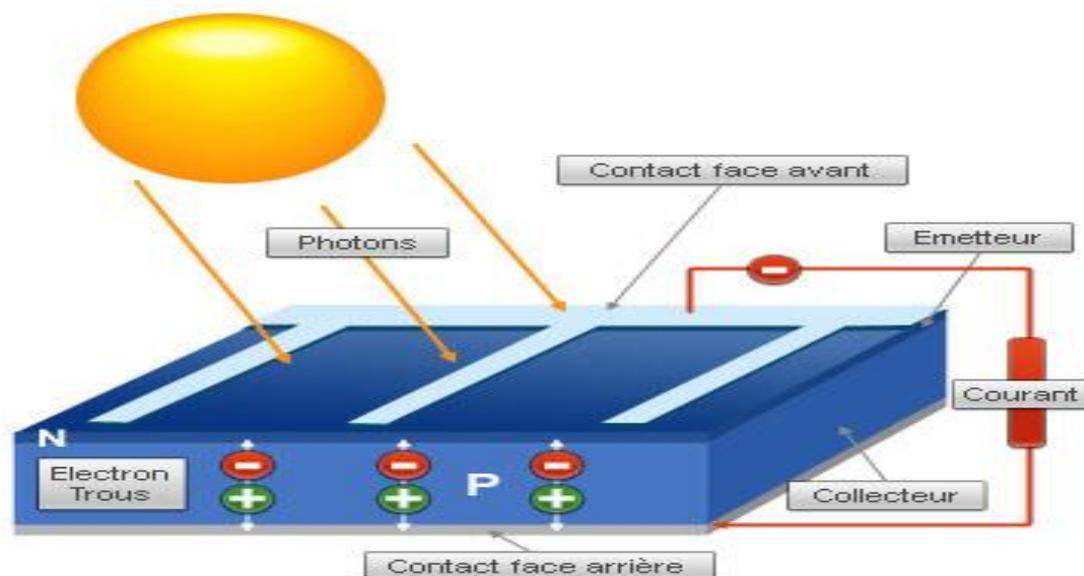


Figure I-8: Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil (figure I.8) les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. C'est l'énergie cinétique du photon qui est transformé en énergie thermique. Dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible: c'est l'effet photovoltaïque [6].

I-4-2-Comportement de la jonction :

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairement solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées en figure 1.9. Sans éclairement, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons- trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction, entre 0,3 et 0,7 V.

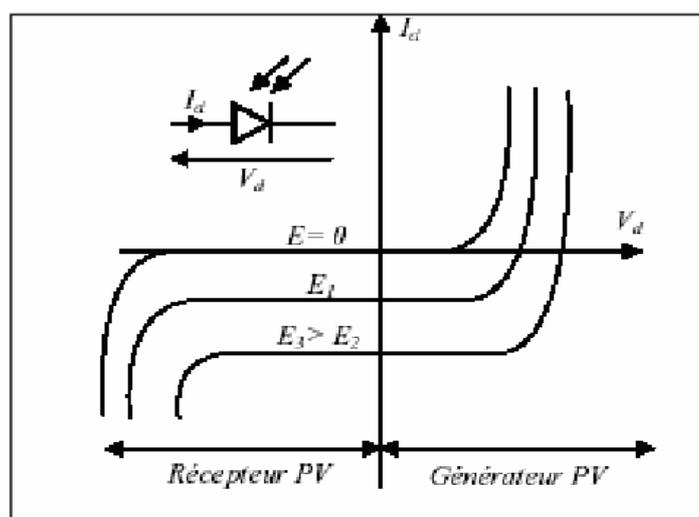


Figure I-9: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éléments (E)

I-5-Le générateur photovoltaïque :

I-5-1- Principe et constitution :

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de courant de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées.

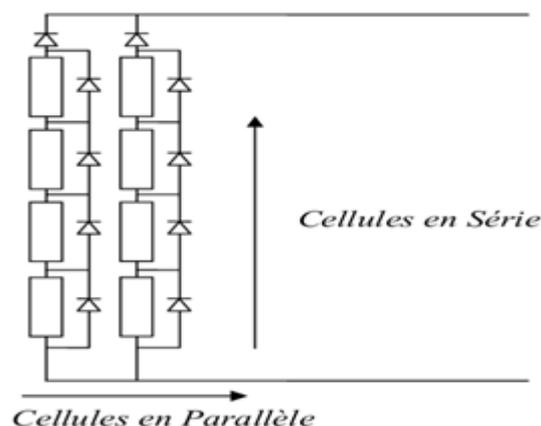


Figure I-11: Groupement de b cellules en série et a cellules en parallèle

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir à la sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, la puissance disponible à la sortie du générateur PV varie en fonction de N_s le nombre de cellules en série, et de (N_p) le nombre de branches en parallèle

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les $(N_s \cdot N_p)$ cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV serait optimale si chaque cellule fonctionnait à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur qui correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} du PV.

I-5-2-Le Générateur photovoltaïque et ses Performances :[5]

$$P_{PV} = N_S * V_{PV} * N_P * I_{PV} \quad (I-4)$$

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert. La figure (I-12) ci-dessous, représente la caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et température

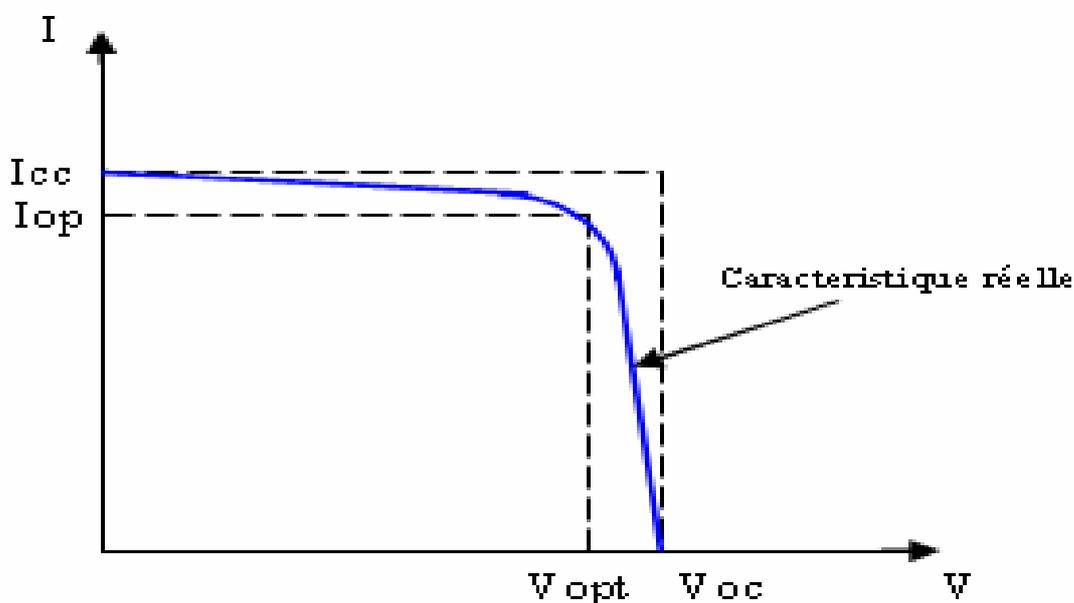


Figure I-12 : Courbe $I=f(V)$ d'un panneau photovoltaïque [5]

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance.

1-5-3-Association de modules photovoltaïques :

Dans un groupement de N_s module en série, tous sont traversés par un même courant. La Figure (I-13) montre la caractéristique résultante (I_{sc}, V_{sc0}) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour N_s module identiques (I_{cc}, V_{c0}) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant : $V_{sc0} = N_s * V_{c0}$. (figure I.13)

Pour un groupement de N_p modules identiques en parallèle (figure I.14) : $I_{pcc} = N_p * I_{cc}$

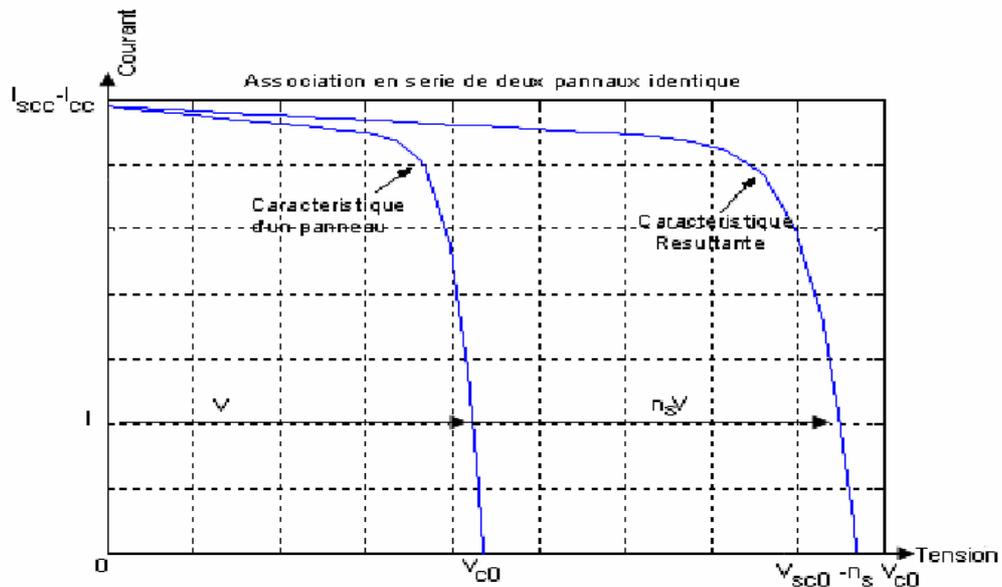


Figure I-13: Caractéristiques du groupement série des modules photovoltaïques

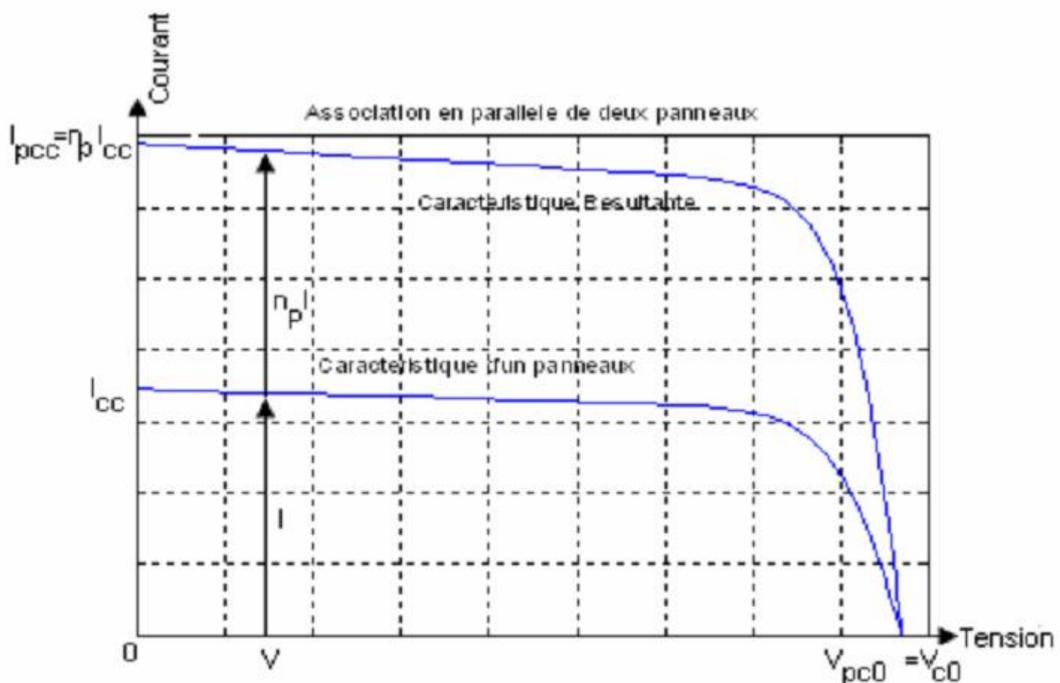


Figure I-14 : Caractéristiques du groupement parallèle des modules photovoltaïques

I-5-4- Propriétés électriques des modules photovoltaïques :

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et de façon générale des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Ces propriétés sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations.

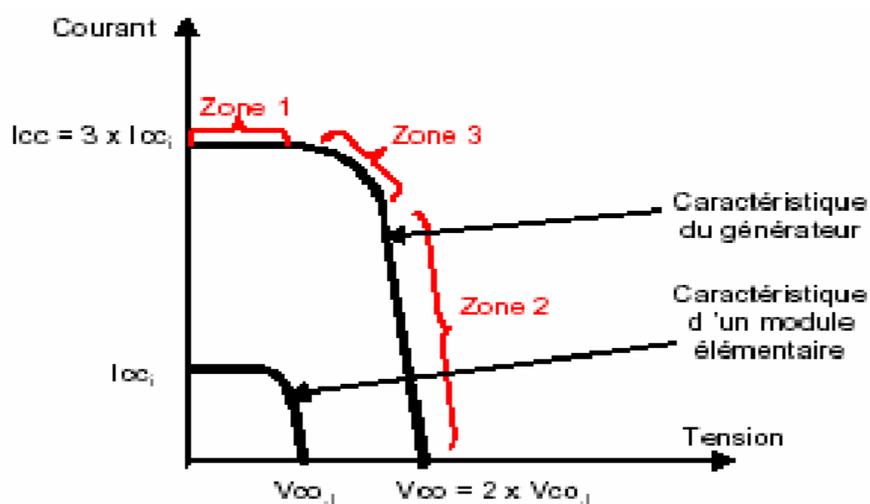


Figure I-15 : Caractéristiques I(V) d'un module photovoltaïque
NB: pour le générateur $N_S=2$, $N_P=3$.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces modules, les valeurs du courant de court-circuit I_{CC} et de la tension à vide V_{C0} sont plus ou moins importantes (figure I.15). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniforme). Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones, figure I-15.

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation d'admittance interne pouvant être modélisé par :

$$\frac{1}{R_{Sh}} \text{ (zone1)}$$

- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{C0} d'impédance interne équivalente à R_S (Zone2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_S à R_{SH} (Zone3).

Le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est

I-5-6-Influence de la température sur les modules photovoltaïques :

La figure (figure I-17) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement:

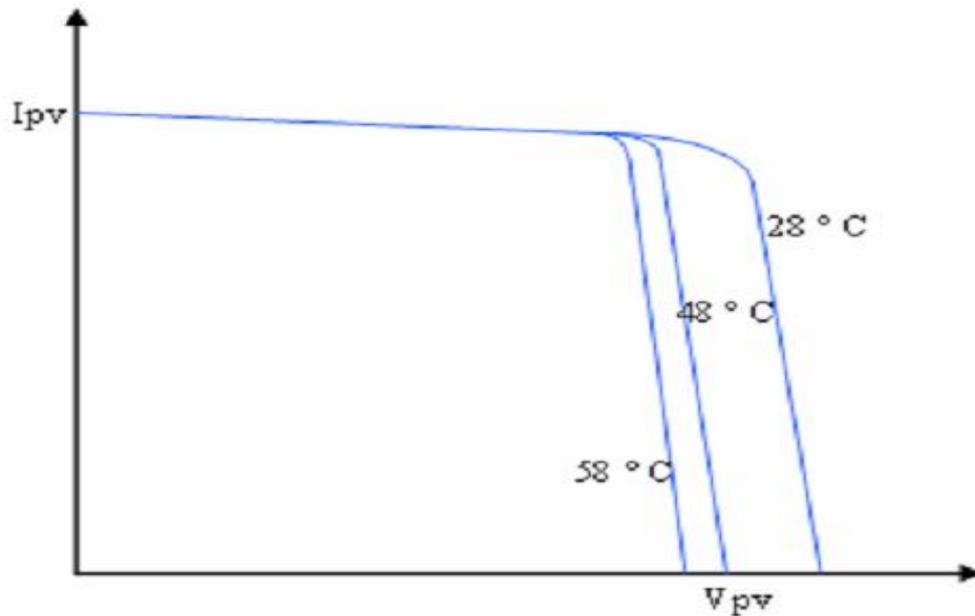


Figure I.17: Influence de la température sur la caractéristique électrique [1]

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 à prendre en compte.

II-Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque :

II-1- Le module photovoltaïque :

L'élément essentiel de captage de l'énergie solaire dans le système de production d'énergie électrique à partir de l'énergie photovoltaïque est la cellule photovoltaïque dont le principe de fonctionnement est déjà présenté dans le précédent chapitre.

Cependant, pour produire plus de puissance, ces éléments essentiels (cellules solaires) sont assemblés pour former un module figure (II-1-a). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Éthylène-Vinyl- Acétate) figure (II-1-b) et protégées sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière du polyéthylène [16]

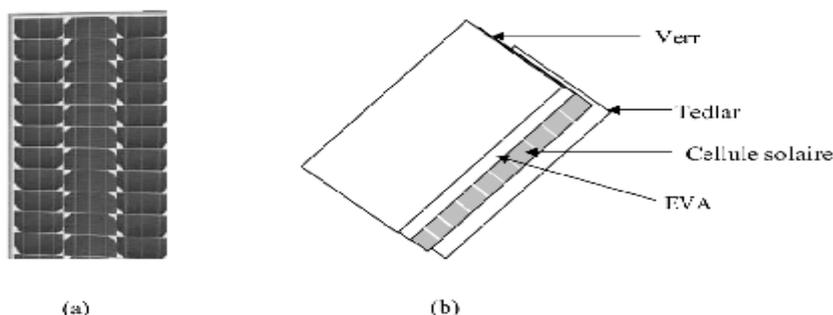


Figure (II-1) : Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles figure (II-2). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [17]

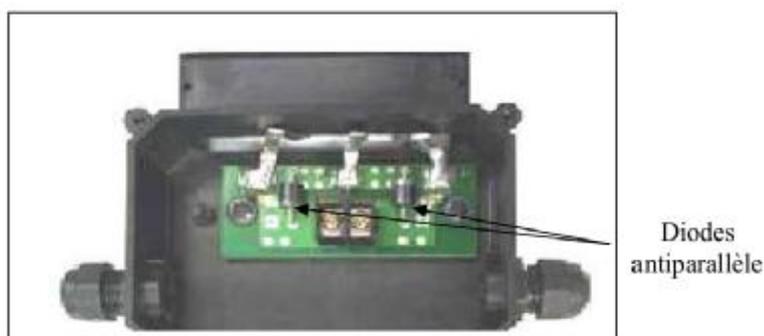


Figure (II-2) : Boîte de jonction [6].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium mono-cristallin (c-Si, 64% du marché), poly-cristallin ou multi-cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12V, 24V, 48V) et des puissances entre 10 et 100W_c(watt- crête) : puissance obtenue pour (l'ensoleillement maximal) [16]. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [18].

II-1-1- Caractéristiques d'un module [19] :

La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximal que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

La caractéristique $I = f(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide, V_{c0} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

Courant de court-circuit I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

Point de fonctionnement optimum, (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$

Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation

incidente.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{CO} * I_{CC}$.

II-2- Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure (II-3) : Champs DE Modules PV 'SP75'

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin d'une boîte de dérivation qui regrouperait toutes ces sorties, comme l'illustre la figure (II-4). Cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a pour rôle d'effectuer les connections entre les modules afin obtenir une puissance optimale en sortie.

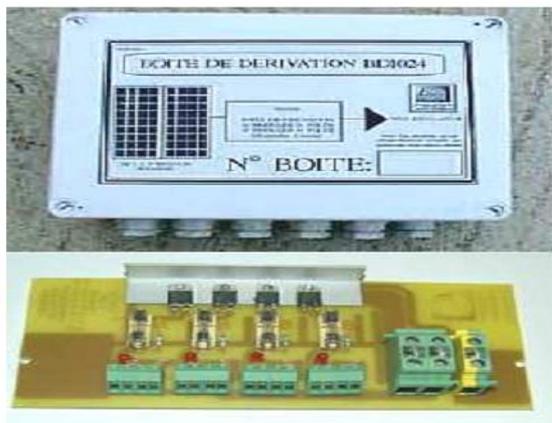


Figure (II-4) : Boîte de dérivation [17]

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur le quel se trouvent :

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent les batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront les batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12, 24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- Des besoins électricité.
- La taille du panneau
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal et quasiment nulle, la nuit ce qui nécessite un élément de stockage.

II-3- Description des différents dispositifs de stockage :

II-3-1- Caractéristiques déterminant le choix d'une technologie de stockage :

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super-condensateur. Leur choix se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont :
- W_{stoc} : la capacité énergétique en Wh, qui est une caractéristique très importante lors du dimensionnement. L'énergie exploitable dépend néanmoins du rendement de charge ou décharge et varie donc avec le temps de transfert. En charge ou décharge très rapide, le rendement se dégrade et l'énergie extractible peut être très inférieure à la capacité énergétique

de l'élément de stockage. A l'opposé, en régime lent, c'est l'auto-décharge qui va pénaliser le bilan. Enfin, les accumulateurs ne peuvent pas toujours être déchargés complètement.

L'énergie exploitable est donc inférieure à l'énergie totale stockée. Souvent, la capacité énergétique est définie sur la base d'une énergie totale stockée supérieure à celle réellement exploitable notée W_{util} .

- P_{max} : la puissance maximale de charge ou de décharge parfois différentes. En effet, si l'on prend pour exemple des accumulateurs électrochimiques, suivant le taux de charge (valeur du courant), la capacité en ampère-heure chargée ne sera pas la même. Une batterie de capacité nominale C chargée complètement à un taux $C20$ (courant de charge $I=C/20$) ne pourra fournir que la moitié de cette capacité si l'on la décharge à un taux égal à $C1$ ($I=C/1$). La puissance disponible est donc liée à la constante de temps

$$\tau = \frac{W_{util}}{P_{max}} \quad (II-1)$$

η : le rendement est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée. Sa définition est souvent simpliste car elle n'est fournie que pour un seul point de fonctionnement. Or, de façon caricaturale, il y a des « pertes à vide » ou d'autodécharge et des « pertes en charge ». Le rendement doit donc être défini sur un ou plusieurs cycles réalistes en rapport avec l'application. Ainsi un système optimisé pour une faible « constante de temps » aura un meilleur rendement lors de sollicitations rapides.

N_{cycl} : le nombre maximal de cycles de charge/décharge ou cyclabilité. Tout dispositif de stockage subit une fatigue ou usure lors des cycles. Cela constitue généralement la première cause de vieillissement devant la dégradation thermique classique. Les processus de fatigue sont souvent complexes et la cyclabilité n'est pas toujours bien définie. Dans tous les cas, elle est fortement liée à l'amplitude des cycles et/ou à l'état de charge moyen. Mais comme les cycles sont souvent très variables, la quantification de N_{cycl} est délicate. Les valeurs fournies constituent des ordres de grandeurs. Les coûts d'investissement (c'est la partie la plus marquante pour l'acheteur) et le coût du fonctionnement (maintenance, énergie perdue lors des cycles, vieillissement). Les systèmes les moins coûteux à l'investissement sont généralement ceux qui se dégradent le plus vite en cyclage et dont le rendement est le plus mauvais. Pour minimiser le coût, il est indispensable d'effectuer une analyse sur la durée de vie du système complet incluant le dispositif de stockage. Enfin, dans une démarche de développement durable, le coût global sur le cycle de vie, incluant les dépenses de matières premières, d'énergie et autres coûts environnementaux de la fabrication au recyclage, doit être considéré. Le coût d'investissement est généralement spécifié en DA/kWh pour les accumulateurs d'énergie et en DA/kW pour ceux plutôt

dimensionnés en puissance, à faible constante de temps. Mais en réalité, il serait logique de répartir le coût entre ceux de l'énergie stockée exploitable W_{util} et de la capacité en puissance maximale.

II-3-2-Types d'accumulateurs :

Il existe plusieurs types de stockage dans les systèmes PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont [15] :

II-3-2-1-Les Accumulateurs au plomb acide :

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [20].

II-3-2-1-1-Composition d'une batterie solaire plomb- Acide [21] :

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

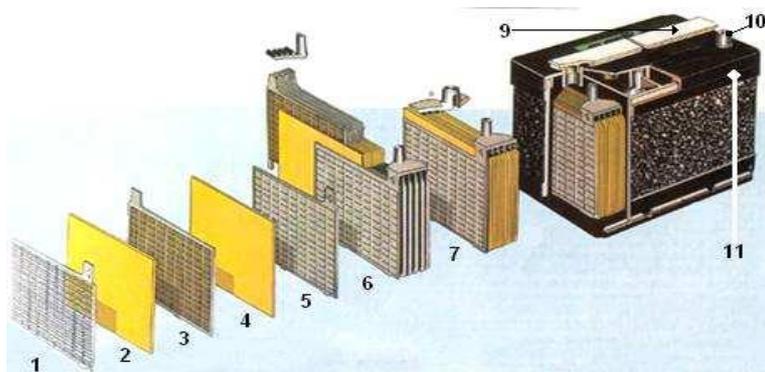


Figure (II-5) : Construction d'une batterie monobloc [21]

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne. |
| 5 : Barrette. | 11 : Bac. |
| 6 : Faisceau négatif. | |

Le matériel de la grille est en alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie.[21]

Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge. Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb- Antimoine sont de type de "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée. D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués avec matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées.

Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont des manchons, ouverts par en haut, qui sont uniquement placés sur les plaques positives.

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie.

Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir.

Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conductions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%. (pour plomb- Acide)

Une batterie est constituée de plusieurs cellules ou d'éléments reliés en série, internes ou externes, pour augmenter le voltage à des valeurs normales pour des applications électriques.

Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie. Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support en bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte.

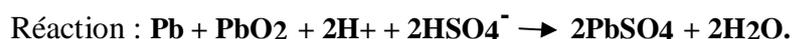
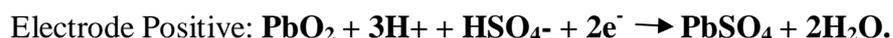
Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime [22].

II-3-2-1-2-Principe de fonctionnement :

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges

électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale:



II-3-2-2-Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [21]

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore exorbitant, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel.

II -4- Régulation de la décharge :

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-réglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil.

II-5-Régulation de la charge :

La régulation de la charge effectuée par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge. Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb.

II-5-1-Régulations de charge série :

Le principe consiste à intercaler entre le panneau PV et la batterie un dispositif qui module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante : Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_Z , le courant délivré par le panneau charge la batterie à travers un transistor. Se bloque lorsque la batterie est chargée alors le courant ne passe qu'à travers la résistance.

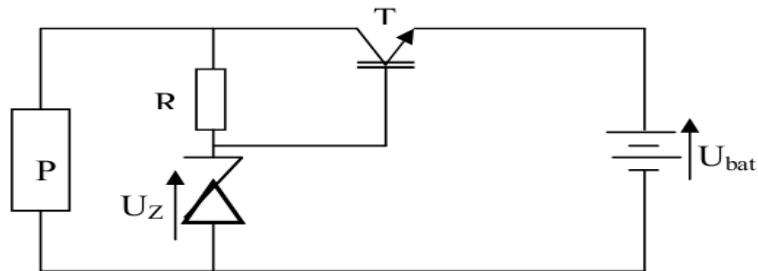


Figure (II-6) : Schéma de principe d'un régulateur de charge série[23]

II-5-2-Régulateur de charge de coupure :

Ce régulateur comporte un relais qui connecte et déconnecte le générateur PV à deux seuils différents et qui sont commandés par une unité de contrôle. Ils mesurent en permanence la tension aux bornes de la batterie.

II-5-3-Régulateur de charge à découpage :

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu - continu qui délivre à la batterie sa tension de floatant chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut.

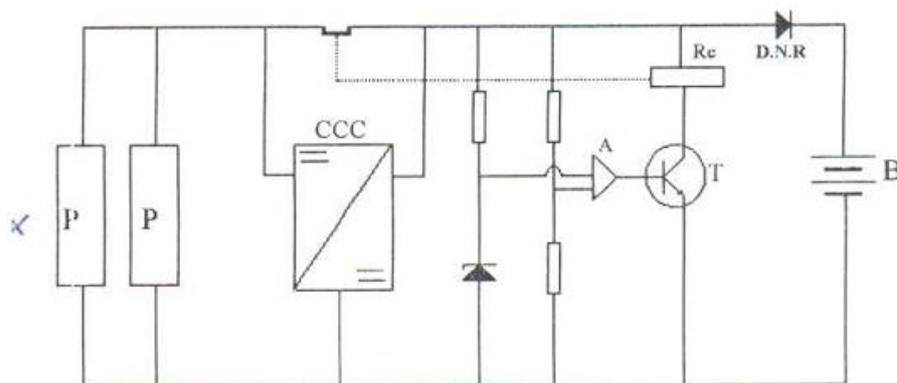


Figure (II-7) : Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage [23]

II-5-4-Régulateur de charge série à coupure partielle :

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau PV en deux parties. Chacune délivrer une même tension selon le principe suivant : une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure tant que l'autre partie est branchée directement pour la charge de la batterie en permanence.

II-5-5-Régulateur de charge parallèle :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant [23]:

Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge.

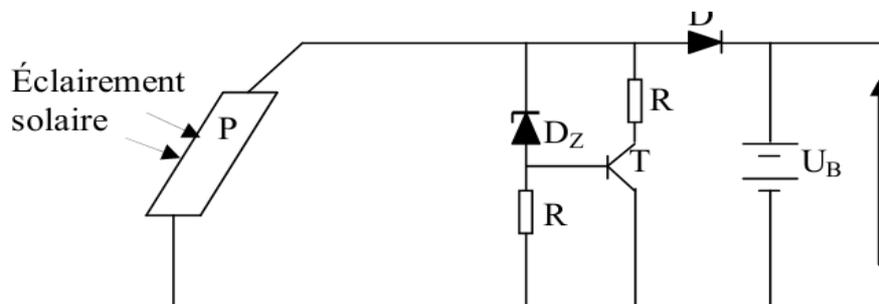


Figure (II-8) : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle [23].

II-6-Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil [20].

II-6-1- Le convertisseur continu -continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [20].

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95%. Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

II-7-La Charge :

La charge est un équipement électrique alimenté par le système qui est de type continu qui est dans notre cas un équipement de télécommunications.

III-1-Introduction :

La modélisation est une étape charnière avant la simulation de tout système. Celle-ci consiste en la mise en équation du dit système en se basant sur les relations physico-chimiques, électriques et mécaniques qui régissent le phénomène décrit, ce qui rend la modélisation impossible en cas d'ignorance du modèle ou de l'un de ses paramètres.

En vue de simuler notre système nous procéderons dans ce qui suit à la modélisation de tous les éléments afin de comprendre le comportement électrique de chacun et déduire ainsi les caractéristiques de notre système.

Notons au passage que la commande de notre système doit être aussi prise avec beaucoup d'intérêt vue son importance sur le fonctionnement de notre système.

III-2-Modélisation du générateur photovoltaïque :

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut d'abord trouver son circuit électrique équivalent. De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour représenter leur comportement non linéaire qui résulte des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque. La configuration la plus utilisée est le modèle à une diode qui représente le comportement électrique de la jonction P-N. Le modèle à deux diodes permet une description plus détaillée du processus de recombinaison des porteurs de charge à la fois sur la surface et dans le matériau en vrac. Le modèle empirique est un ajustement de la courbe $v(i)$ mesurée et présente un nombre de paramètres réduit par rapport aux autres modèles. Les paramètres de ce modèle (P_{Max} , I_{CC} , V_{CO}etc.) sont donnés dans la fiche technique du fabricant, ce qui permet de modéliser avec une précision acceptable. [31]

Dans notre travail, nous avons opté pour le modèle à une seule diode.

III-2-1-Modèle à une seule diode :

La cellule photovoltaïque est représentée par un circuit équivalent contenant une source de courant idéale qui modélise la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, branchée avec une diode qui représente les propriétés physiques des semi-conducteurs des cellules et deux résistances (shunt et série), la résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde) et la résistance série est due à la contribution des résistances de base et de la jonction et des contacts face avant et arrière.[32]

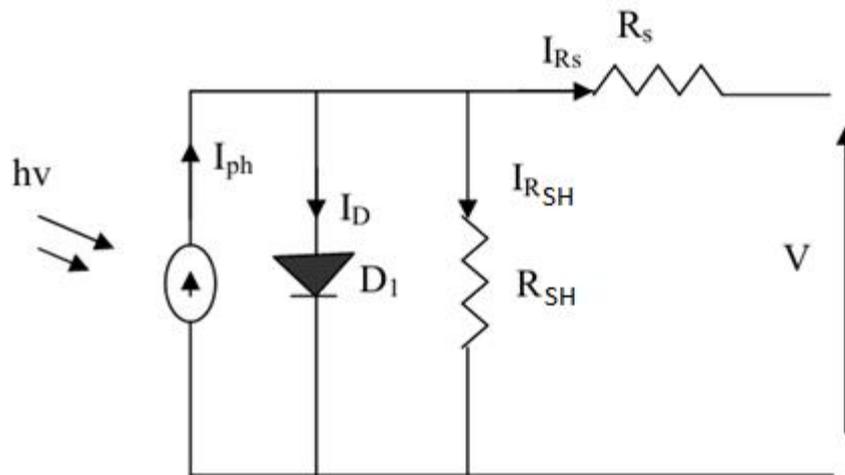


Figure (III-1): Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (modèle à une seule diode)

L'équation reliant le courant délivré par une cellule PV est donnée par la loi de Kirchhoff, tel que :

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

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_1(T_c - T_{ref})] \cdot G \quad (III.2)$$

Le photo-courant I_{ph} dépend de l'éclairement G et de la température ambiante de la cellule T_c , il est donné par [25]

I_{cc} : Le courant de court circuit à 25°C et kw/m^2

k_1 : Le coefficient de température de courant de court circuit de la cellule.

G : L'éclairement solaire, exprimé en kw/m^2

T_{ref} : La température de référence, c'est la température de fonctionnement nominal de la cellule, elle est donnée par le constructeur.

Le courant de la diode I_d est donné par la formule de SCHOCKLEY, tel que :

$$I_D = I_s \left[\exp \frac{q(V + I.R_s)}{K.T_c \cdot A} - 1 \right] \quad (III-3)$$

Enfin, le courant traversant la résistance shunt peut s'écrire sous la formule suivante :

$$I_{sh} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (III.4)$$

En remplaçant (III.2), (III-3) et (III-4) dans l'équation (III-1), le courant I devient :

$$I = [I_{cc} + k_1(T_c - T_{ref})].G - I_s \left[\exp \frac{q(V+I.R_s)}{K.T_c.A} - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (III.5)$$

Avec:

I_s : Le courant de saturation.

q : La charge d'un électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

k : constante de Boltzmann ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ j/k)

T_c : La température de la cellule

A : facteur d'idéalité qui dépend de la technologie des cellules PV

R_s : La résistance série.

R_{sh} : La résistance parallèle (shunt).

Le courant de saturation I_s varie avec la température de la cellule, ce qui est décrit par:

$$I_s = I_{si} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[- \frac{q.E_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{K.A} \right] \quad (III.6)$$

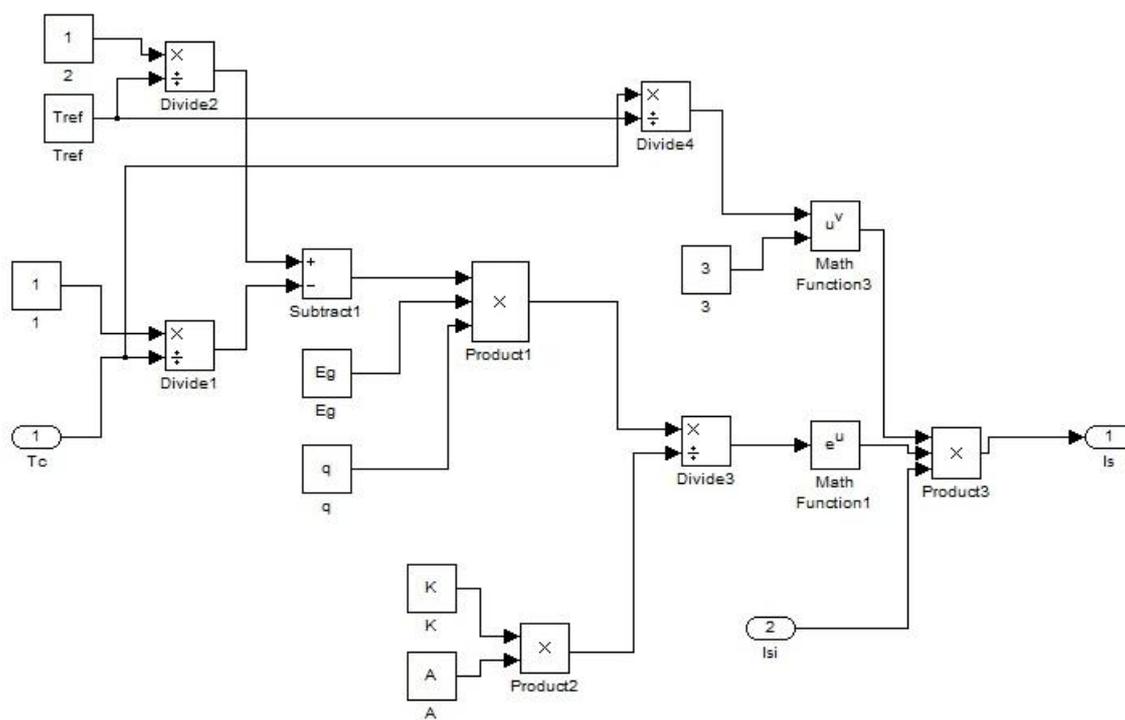


Figure (III-1-a) : Modèle de simulation de I_s

Où :

I_{si} : Le courant de saturation inverse, à la temperature et l'éclairement de référence.

E_G : Bande passante de semi-conducteur utilisé, elle est exprimée en eV.

Le courant de saturation I_{si} peut être obtenu avec la relation suivante:

$$I_{si} = I_{cc} / [\exp(\frac{q \cdot V_{c0}}{K \cdot A \cdot T_c}) - 1] \tag{III.7}$$

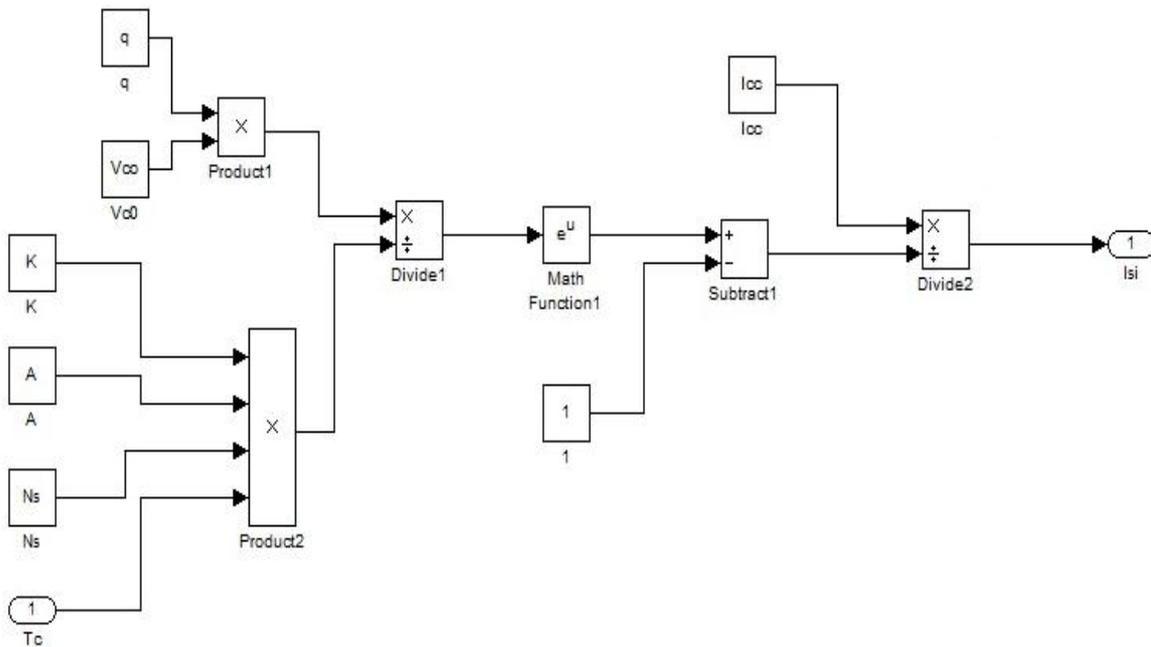


Figure (III-1-b) : Modèle de simulation de I_{si}

V_{c0} : La tension de la cellule à vide

Selon Huang-Liang Tsai [26], pour un module constituant N_s cellules branchées en série et N_p cellules reliées en parallèle, l'équation (III-5) devient comme suite:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{q(V_{Ns} + I R_{Ns})}{K A T_c} - 1\right) - \frac{N_p V + I R_s}{R_{sh}} \right] \tag{III.8}$$

III-2-2- Le modèle simplifié:

La résistance R_{sh} est inversement proportionnelle au courant qui la traverse (courant de fuite). En général, le rendement (efficacité) d'un module photovoltaïque est insensible à la variation de la résistance R_{sh} que l'on peut considérer comme infinie. En revanche, une légère variation de la résistance R_s affecte fortement la puissance délivrée par un module photovoltaïque.

L'équation (III-8) peut être écrite comme suite:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{q(V+I.R_s)}{K.T_c . A . N_s} \right) - 1 \right] \tag{III.9}$$

Avec:

$$I_s = I_{si} \left(\frac{T_c}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{q.E_G}{K.A} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \tag{III.10}$$

Et

$$I_{si} = I_{cc} / \left[\exp\left(\frac{q.V_{co}}{K.A.T_c.N_s} \right) - 1 \right] \tag{III.11}$$

Pour une cellule idéale ($R_s=0$ et $R_{sh}=\infty$), l'équation (III-8) devient :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{K A T_c N_s} \right) - 1 \right] \tag{III.12}$$

• **Expression de la tension V :**

A partir de l'équation (III-12), l'expression de la tension V s'écrit comme suit:

$$V = \frac{K.A.T_c.N_s}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} - \frac{I}{N_p I_s}\right) \tag{III.13}$$

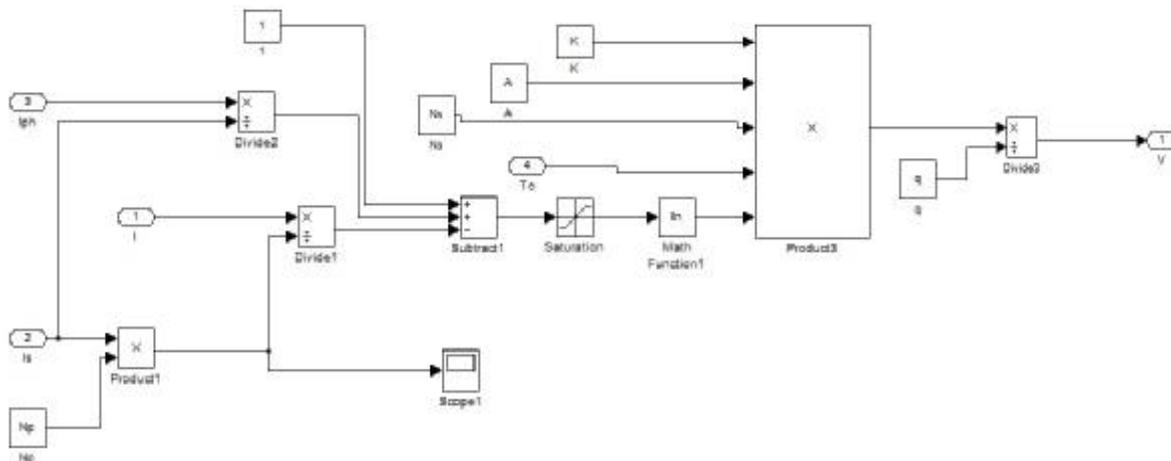


Figure (III-1-c) : Modèle de simulation du PV

III-3-Modélisation du convertisseur BOOST:

III-3-1-Modèle mathématique du convertisseur BOOST :

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse de différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande μ . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle. En effet, dans un premier temps αT , l'interrupteur Tr est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie. En suite, à l'ouverture de l'interrupteur Tr , l'inductance L s'oppose à la diminution du courant I_L , génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source, qui s'applique sur la charge à travers la diode D .

Le schéma électrique du survolteur est présenté dans la figure (III-2).

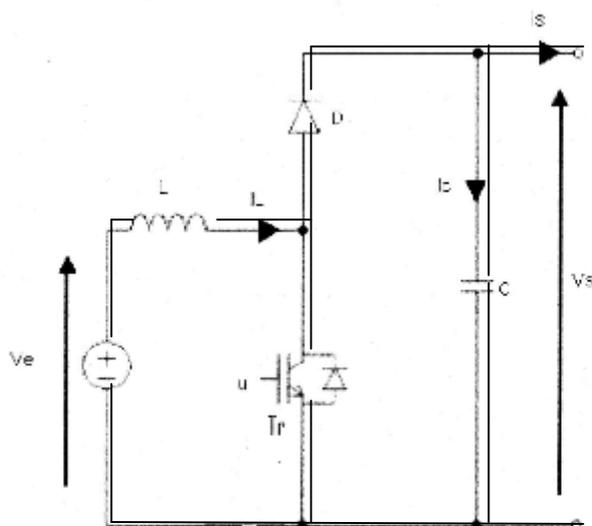


Figure (III-2): Schéma électrique d'un convertisseur DC/DC survolteur

Lorsque l'interrupteur est fermé :

$$\begin{cases} V_e = L \frac{dI_L}{dt} \\ 0 = C \frac{dV_s}{dt} + I_s \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Lorsque l'interrupteur est ouvert:

$$\begin{cases} V_e = L \frac{dI_L}{dt} + V_s \\ I_L = C \frac{dV_s}{dt} + I_S \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

En posant $u=1$ cas d'interrupteur fermé et $u=0$ cas d'interrupteur ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici des interrupteurs parfaits:

$$\begin{cases} V_e = L \frac{dI_L}{dt} + V_s(1 - u) \\ I_L(1 - u) = C \frac{dV_s}{dt} + I_S \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Où : u est le signal de commande de l'interrupteur statique.

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire de convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'état V_s et I_L . Par ailleurs, il convient de signaler qu'en remplaçant u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T = \frac{1}{fp}$, c'est-à-dire le rapport cyclique $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$, nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes. Soit :

$$\begin{cases} V_e = L \frac{dI_L}{dt} + V_s(1 - \alpha) \\ I_L(1 - \alpha) = C \frac{dV_s}{dt} + I_S \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Où $\alpha = \langle u \rangle$

t_{on} : est le temps de fermeture de l'interrupteur.

III-3-2- Dimensionnement du convertisseur BOOST :

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source V_e . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur. [25]

III-3-2-1-Calcul de l'inductance (L) :

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne. [25]

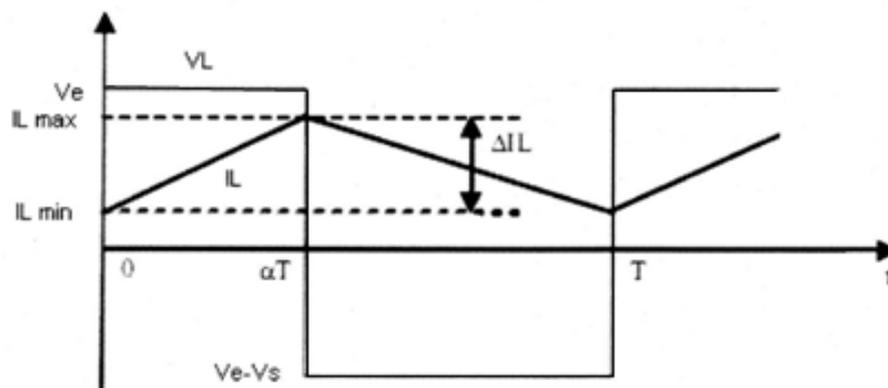


Figure (III-3): Ondulation du courant

- Calculons l'ondulation du courant :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$:

$$I_L(t) = \frac{V_e}{L} t + I_{Lmin} \quad (\text{III.18})$$

En $t = \alpha T$:

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{Lmin} = I_{Lmax} \quad (\text{III.19})$$

D'où

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_e}{L f_p} \alpha \quad (\text{III.20})$$

Or:

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (\text{III.21})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)}{L f_p} V_s \quad (\text{III.22})$$

Où :

- V_e : Tension aux bornes du générateur (V)

- V_s : Tension de sortie du convertisseur (V)

- T : Période de découpage du signal de commande de l'interrupteur $T = \frac{1}{f_p}$ en secondes (s)

- α : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$

- I_{Lmin} : Courant minimum dans l'inductance (A)
- I_{Lmax} : Courant maximum dans l'inductance (A)
- ΔI_L : Ondulation de courant dans l'inductance (A)
- L : Valeur de l'inductance de lissage (H)

L'inductance est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaité.

L'ondulation maximale de courant est obtenue pour un rapport cyclique

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{ (car } \frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0 \text{ pour } \alpha = \frac{1}{2}\text{)}$$

L'ondulation maximale du courant est donc donnée par :

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_s}{4Lf_p} \quad (\text{III.23})$$

$$L = \frac{V_s}{4f_p \Delta I_{Lmax}} \quad (\text{III.24})$$

III-3-2-2-Calcul du condensateur (C) :

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance .L'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur.

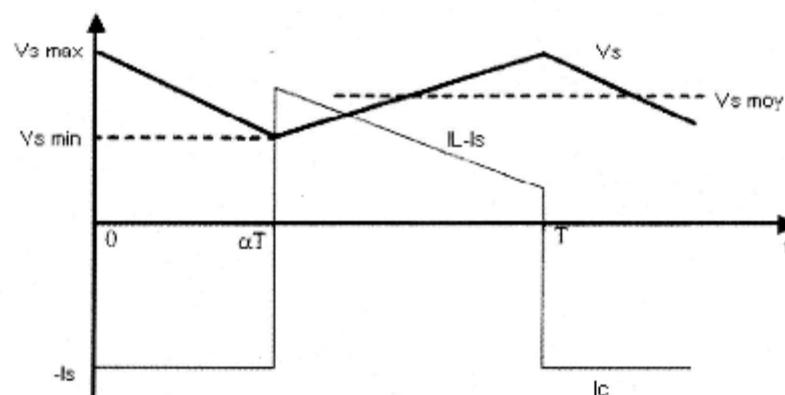


Figure (III-4) : Ondulation de tension

Calculons l'ondulation de tension :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$:

$$V_s(t) = V_{s \max} - \frac{I_s}{C} t \quad (\text{III.25})$$

à : $t = \alpha T$

$$V_s(\alpha T) = V_{s \max} - \frac{I_s}{C} \alpha T = V_{s \min} \quad (\text{III.26})$$

D'où :

$$\Delta V_s = V_{s \max} - V_{s \min} = \frac{I_s}{C f_p} \alpha \quad (\text{III.27})$$

Or :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{III.28})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha(1-\alpha)}{C f_p} I_L \quad (\text{III.29})$$

Où :

- C : Valeur du condensateur de filtrage (F)
- $V_{s \min}$: Tension minimal aux bornes du condensateur (V)
- $V_{s \max}$: Tension maximal aux bornes du condensateur (V)
- ΔV_s : Ondulation de tension aux bornes du condensateur (V)

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée. L'ondulation maximale de tension est obtenue pour un rapport cyclique de

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{ (car: } \frac{d\Delta V_s}{d\alpha} = 0 \text{ pour } \alpha = \frac{1}{2} \text{)}.$$

L'ondulation maximale de tension est donc donnée par :

$$\Delta V_{s \max} = \frac{I_L}{4L f_p} \quad (\text{III.30})$$

Ainsi la capacité minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation : [15]

$$C = \frac{I_L}{4f_p \Delta V_{s \max}} \quad (\text{III.31})$$

III-4-Modélisation de la batterie :

Notre choix s'est porté sur les batteries de technologie Plomb acide puisqu'elles sont actuellement les plus utilisées pour les applications photovoltaïques. Leur principal avantage est leurs faibles coûts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées [29]. Il y a plusieurs modèles mathématiques de la batterie dans la littérature qui sont très complexes. Dans notre projet, nous avons opté pour un modèle qui a été développé par Olivier Tremblay et Louis-A Dessaint [29]. Le principal avantage de ce modèle est la possibilité d'extraire les paramètres de la batterie à partir de sa courbe de décharge qui est généralement donnée par la fiche technique fournie par le constructeur.

Equation de charge :

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it-0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (III.41)$$

Equation de décharge :

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q-it} (it + i^*) + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (III.42)$$

Où :

- V_{batt} : La tension de la batterie (V)
- E_0 : La tension fixe de la batterie (V)
- K : la constante de la polarisation (V/(Ah)) ou de la résistance de polarisation (Ω)
- Q : La capacité de la batterie (Ah)
- $it = \int i dt$: la charge instantanée de la batterie
- A : L'amplitude de la zone exponentielle (V)
- B : La constante de temps inverse de la zone exponentielle $(Ah)^{-1}$
- R : La résistance interne de la batterie (Ω)
- i : Le courant de batterie (A)
- i^* : Le courant filtré (A)

Les fabricants de batteries fournissent les courbes de décharge où il est possible d'extraire la tension à pleine charge (V_{full}), à la fin de la zone exponentielle (Q_{exp}, V_{exp}), la fin de la zone nominale (Q_{nom}, V_{nom}) (Lorsque la tension commence à chuter brusquement) et la capacité maximale (Q). En outre, la résistance interne (R) est généralement donnée. Un exemple de la courbe de décharge est donné dans la figure (III-5)

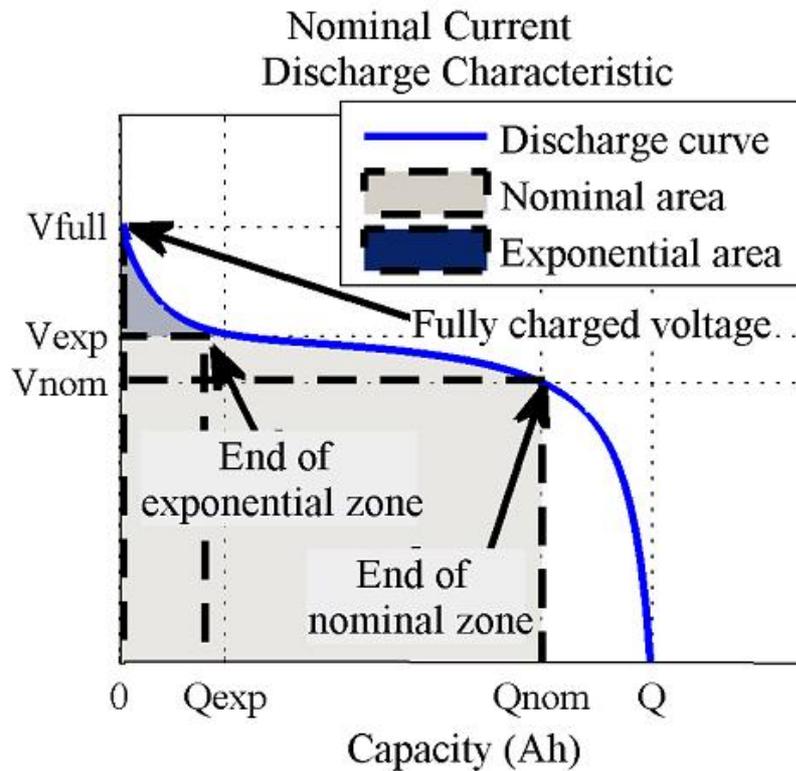


Figure (III-5) : La courbe de décharge de la batterie [29]

Pour la tension à pleine charge, la charge extraite est 0 ($it=0$) et le courant filtré initial (i^*) est nul.

La tension de pleine charge est donnée par l'équation suivante :

$$V_{full} = E_0 - R \cdot i + A \quad (III.43)$$

A la fin de la zone exponentielle, l'énergie du terme exponentiel est presque nulle (5%) après 3 constantes de temps. Le courant filtré i^* est égal au courant i car ce dernier est complètement lissé. La constante **B** peut être rapprochée à : Q_{exp} .

$$V_{exp} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - Q_{exp}} (Q_{exp} + i) + A \cdot \exp\left(-\frac{3}{Q_{exp}} \cdot Q_{exp}\right) \quad (III-44)$$

La zone de tension nominale est donnée par :

$$V_{nom} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - Q_{nom}} (Q_{nom} + i) + A \cdot \exp\left(-\frac{3}{Q_{nom}} \cdot Q_{nom}\right) \quad (III-45)$$

Avec les équations (III-43) (III-44) et (III-45) il est possible de résoudre les équations (III-42) et (III-41). Notons que la courbe donnée par le constructeur est obtenue à courant constant (généralement égal à $0.2Q$). [29]

III-5-La commande MPPT :

III-5-1-Concept MPPT :

Par définition une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation Figure (III-6), permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soient les conditions météorologiques (Température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{OPT} , I_{OPT}). Pour cela, plusieurs systèmes ont été publiés dans la littérature. [31]

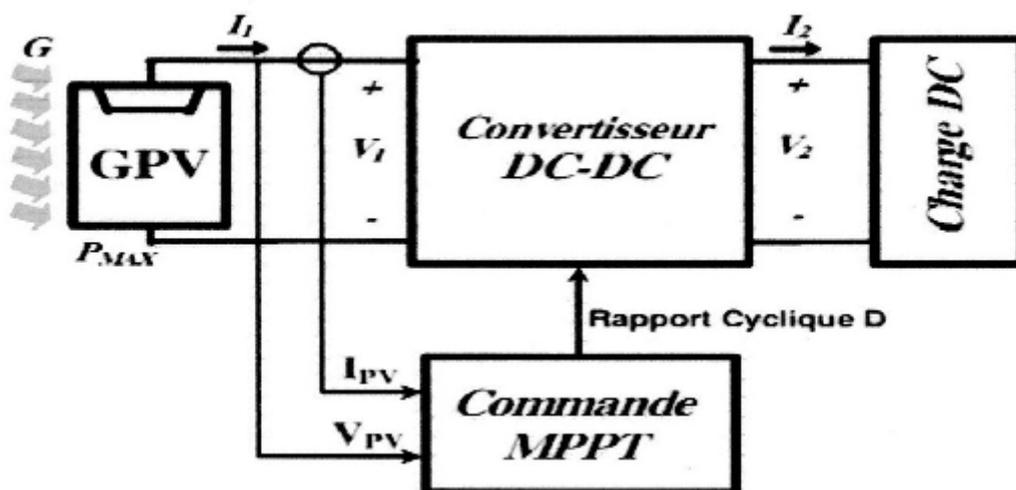


Figure (III-6) : Chaîne élémentaire de la conversion photovoltaïque avec un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT

III-5-2-Algorithme de la commande MPPT :

L'organigramme le plus simple de fonctionnement d'une commande MPPT est donné par la figure suivante :

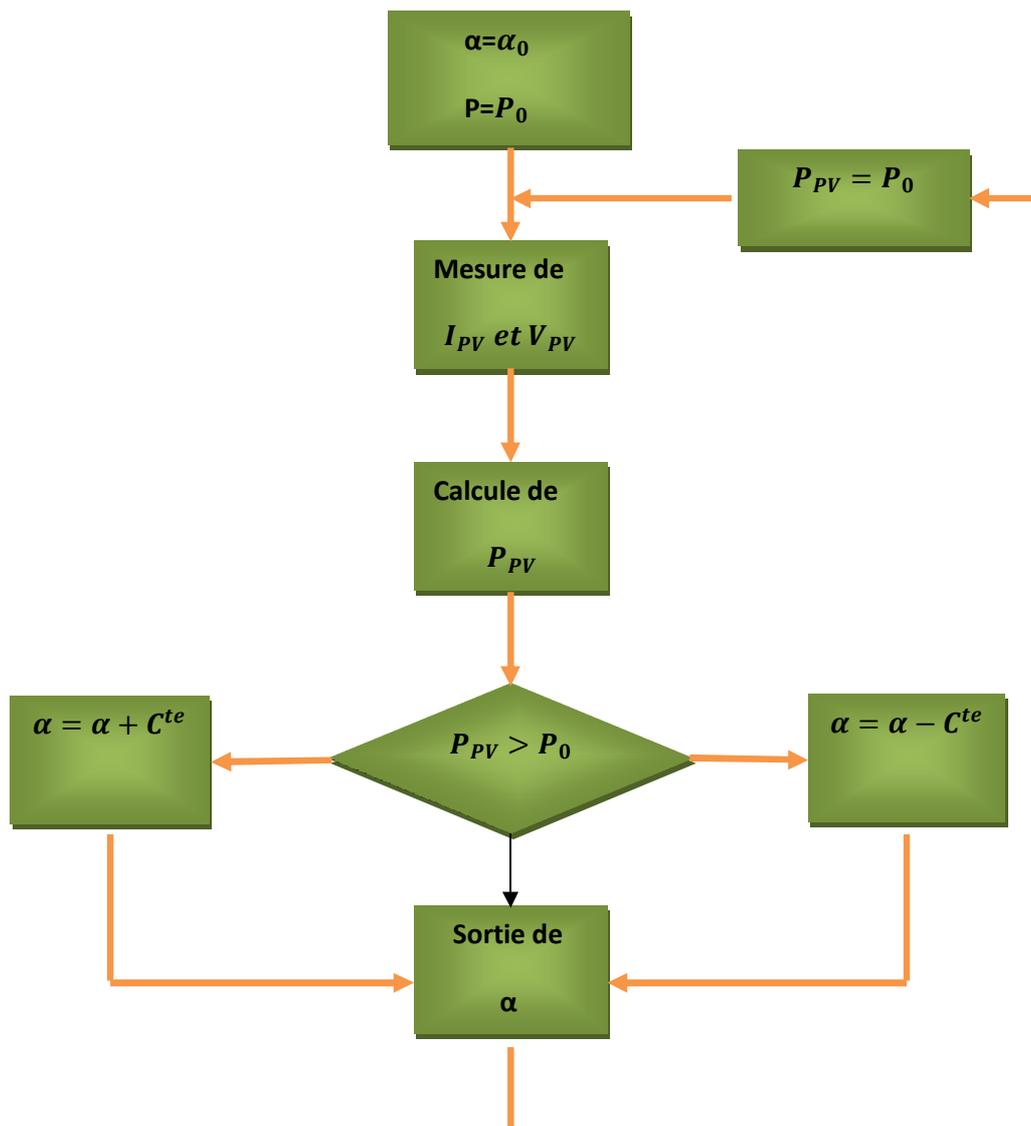


Figure (III-7) : Organigramme de fonctionnement d'une commande MPPT

III-5-3-Fonctionnement d'une commande MPPT :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela nous comparons un point de puissance (P_k) mesuré à l'instant (t) avec un autre point de puissance (P_{k-1}) mesuré à l'instant ($t-1$) figure (III-8).

- Si $P_k > P_{k-1}$: c'est-à-dire $\Delta P_k > 0$ cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale, alors on incrémente α .
- Si $\Delta P_k < 0$, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale, alors on décrémente α . Ainsi, au démarrage du système, la recherche du **PPM** se fait progressivement, en cherchant le premier point maximum. [24]

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basés sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent. [30]

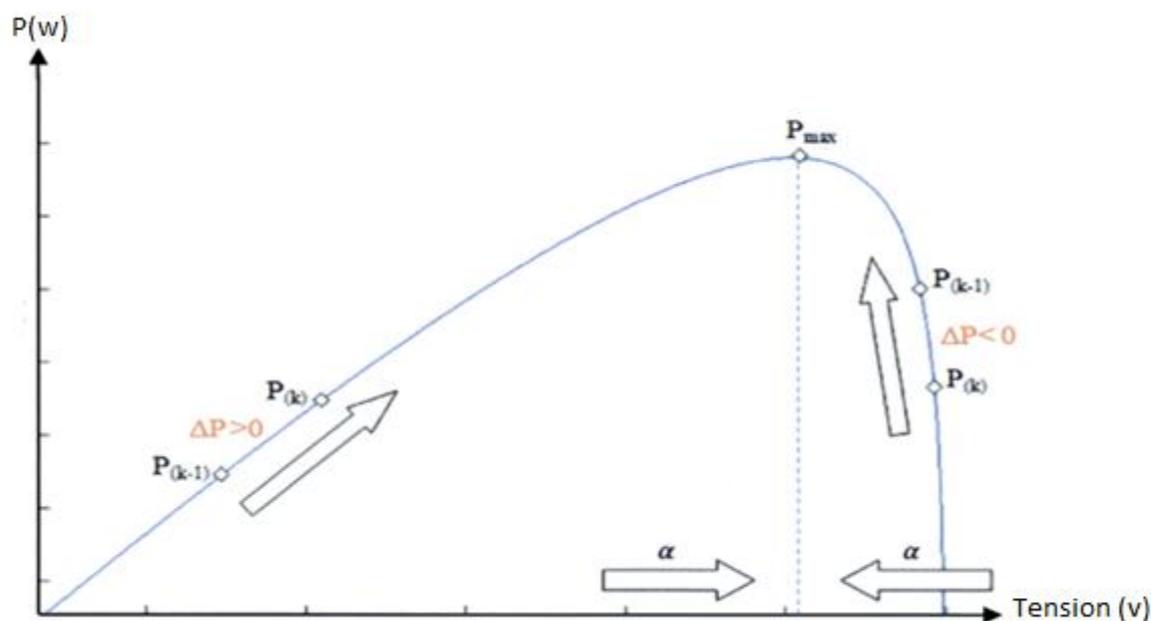


Figure (III-8) : Fonctionnement d'une commande MPPT

Cahier des charges:

Notre installation autonome alimentera en électricité des équipements de radio télécommunication et une lampe dont les caractéristiques sont les suivantes:

Radio VHF fixe

- $I=1 \pm 0.05$ A
- $U=60 \pm 5$ v

- durée de fonctionnement:20h.
- consommation=1*20=20Ah

Lampe:

- $I=0.4 \pm 0.05A$
- $U=60 \pm 5v$
- Durée de fonctionnement:10h
- consommation quotidienne=0.4*10=4Ah

Consommation quotidienne de l'installation=20+4=24Ah

III-6- Dimensionnement des éléments du système de captage photovoltaïque :**Ø Dimensionnement du GPV:**

- $N_p=1$
- $N_s=36$

Ø Dimensionnement du thyristor: [paragraphe (III-3-2)]

- $L=300e^{-3}H$
- $C=220e^{-6}F$

Ø Dimensionnement de la batterie:

pour une autonomie de 5jours sans chargement avec une décharge max de 80 pourcent:

$$C_{bat}=(24Ah*5jours)/0.8=150Ah.[capacité de la batterie]$$

Notre batterie aura les dimensions suivantes:

Nombre d'éléments =60v/12=5

- 5 éléments en série (12v chacun).

Nous avons $C_{bat} = 150Ah$.(chaque élément mis en série aura une capacité de 170Ah)

III-7- Conclusion :

Les travaux réalisés dans ce chapitre sont sans doute les plus importants de ce mémoire.

Après modélisation de la cellule photovoltaïque via son schéma équivalent à une seule diode , du convertisseur BOOST, et la réalisation de la commande MMPT , nous avons procédé a la simulation du système en commençant par la cellule photovoltaïque en y ajoutant un élément du système a chaque fois et ce a fin de constater le changement induit par le dit élément intégré.

Étant doté d'un système de stockage lui assurant sont autonomie, le choix de l'accumulateur pour notre générateur photovoltaïque s'est porté sur la batterie acide-plomb et ce vu sa simplicité et sa fiabilité.

IV-1-Introduction :

Grâce aux progrès scientifiques et technologiques réalisés dans les années précédentes, des environnements de simulation de plus en plus performants ont vu le jour. Rendus possible grâce à la fulgurante évolution réalisé notamment dans le domaine des processeurs, ces progrès réalisés ont permis l'apparition de machines très performantes ce qui permet la simulation de systèmes de plus en plus complexe.

Ces progrès enregistrés, ont permis aux chercheurs de reproduire très fidèlement sur machine le comportement de systèmes, qui auraient dans la réalité coutés beaucoup de temps et d'argent, rendant ainsi au passage la simulation comme étape incontournable dans l'étude et la réalisation de tout système.

Dans l'étude de notre système, nous avons réalisé la partie simulation dans un environnement Matlab-Simulink développé par la société américaine Mathworks, ce calculateur est un logiciel de calcul numérique et de visualisation très performant et précis.

Matlab est considéré comme un environnement des applications à part entière, car il permet à l'utilisateur d'élaborer ses propres fonctions, de fiables programmes et des interfaces graphiques très performantes.

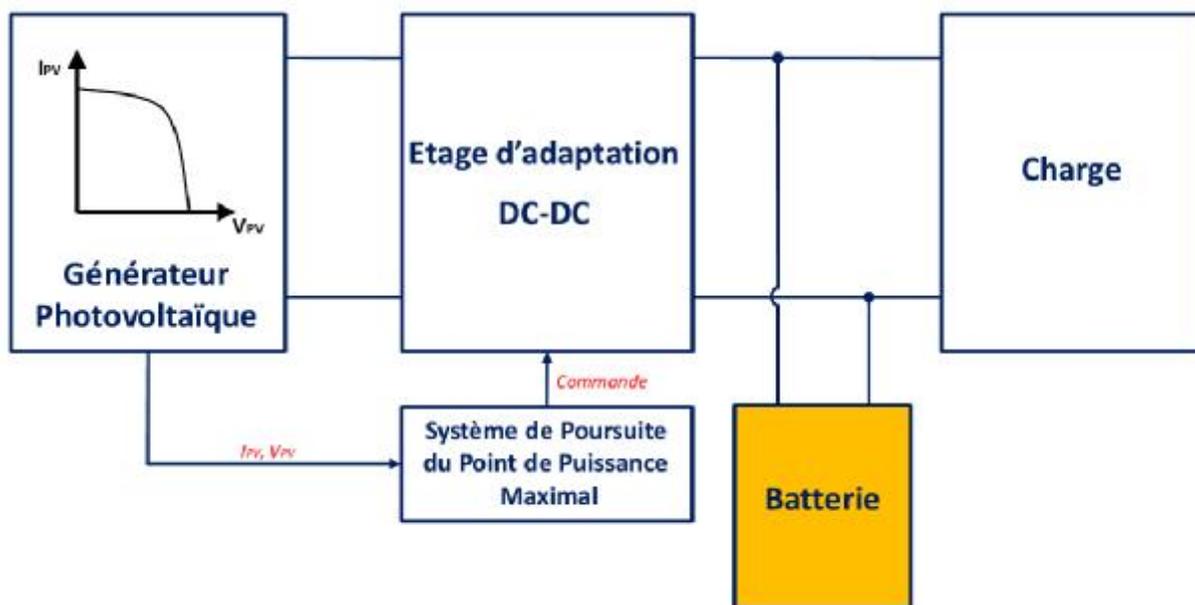


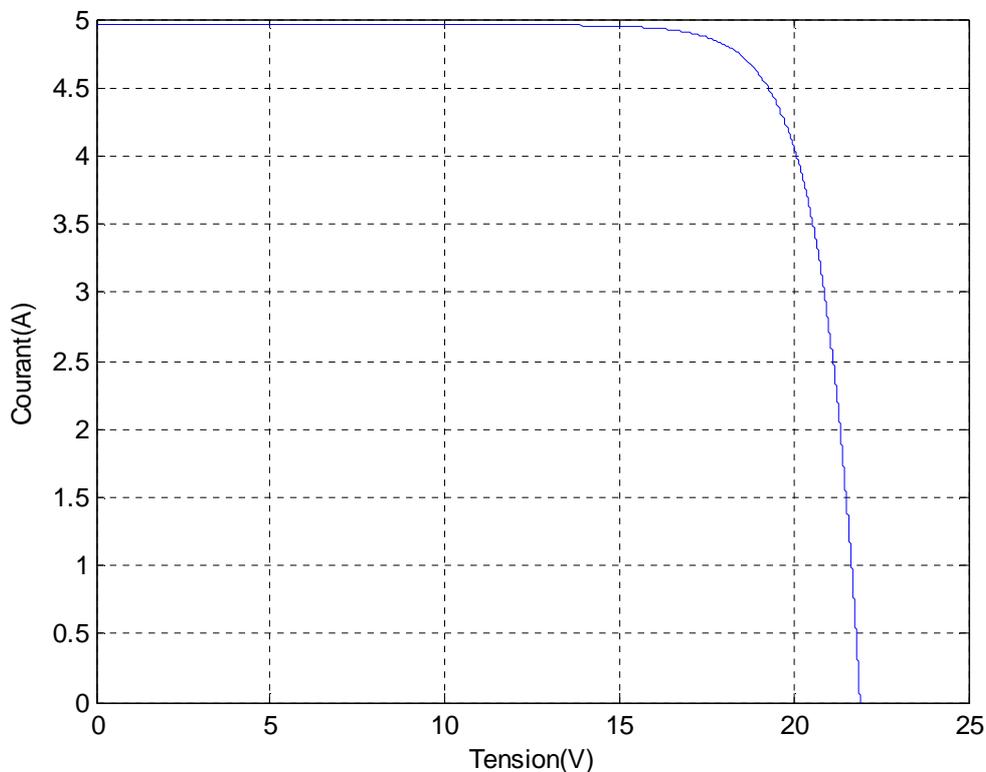
Figure (IV – 1): Schéma global du système réalisé

IV-2- Caractéristiques courant-tension :

NB/:les simulations du PV ont été réalisées avec les paramètres suivants:

- $G=1000\text{w/m}^2$
- $T_c=25\text{C}$
- $N_p=1$
- $N_s=36$

La figure ci-dessous représente la courbe $I = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque typique dans des conditions typiques d'irradiation et de température :

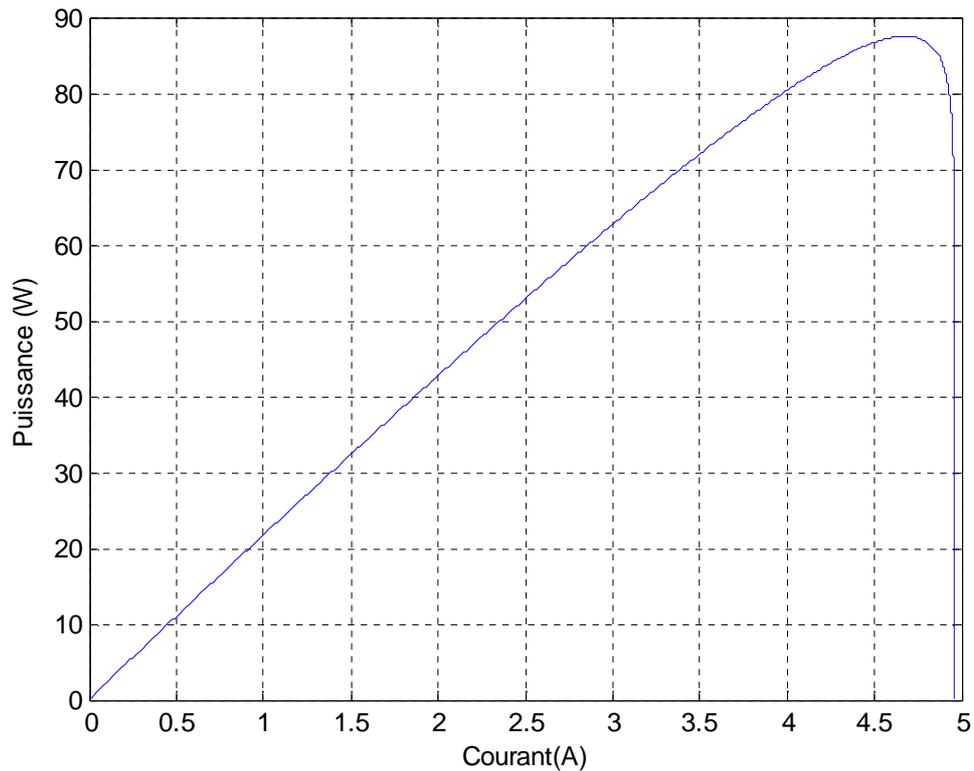


Figure(IV – 2) : Courbe $I = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance.

IV-3- Caractéristique puissance-courant :

La présente figure (IV – 3) illustre l'existence d'un point **PPM (Point de Puissance Maximal)** où la puissance est à son maximum. D'où la nécessité de se rapprocher au maximum de ce point afin d'extraire le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point **PPM** permettra d'extraire cette puissance maximale.



Figure(IV – 3) : Caractéristique P(I) d'un générateur photovoltaïque

IV-4- Influence de l'éclairement :

La suivante figure (IV – 4) présente un exemple de courbes courant-tension pour différents niveaux d'éclairement à la température de fonctionnement nominal $T = 25^{\circ}\text{C}$.

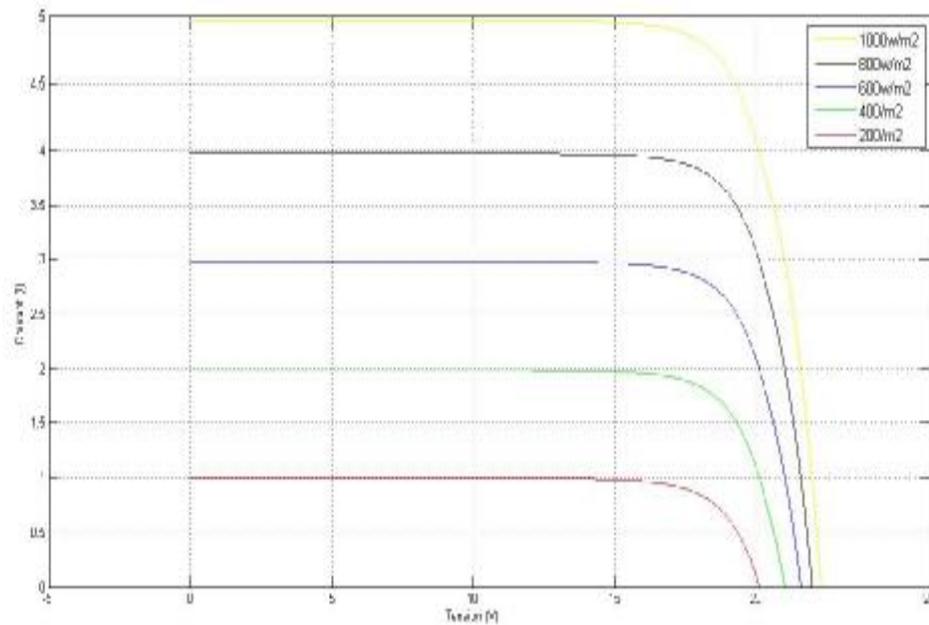


Figure IV – 4: Caractéristiques I(V) d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs d'éclairements

Il est remarquable que la valeur du courant de court-circuit a un lien direct et proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par ailleurs, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment constante même à faible éclairement

De même, pour la puissance optimale extraite d'un panneau photovoltaïque, elle est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ce qui est représenté dans la figure (IV – 5).

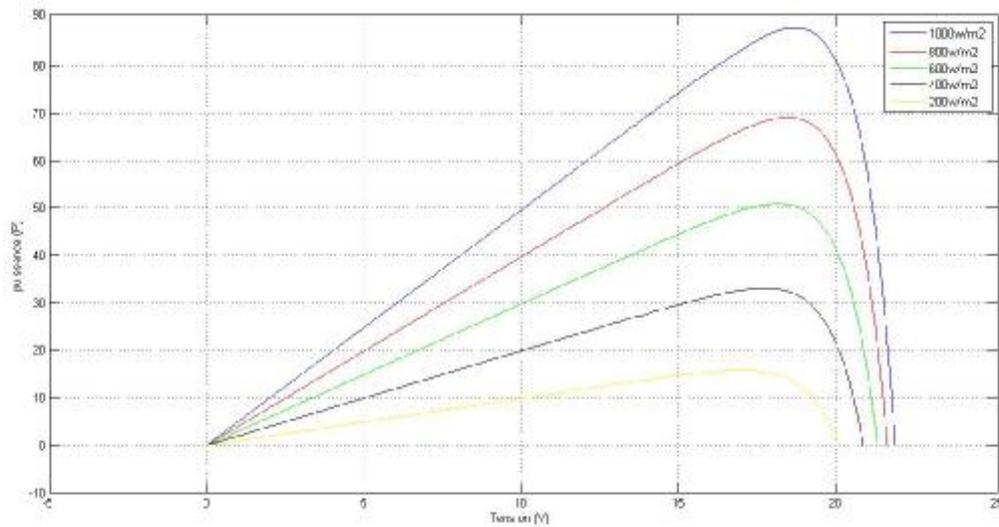
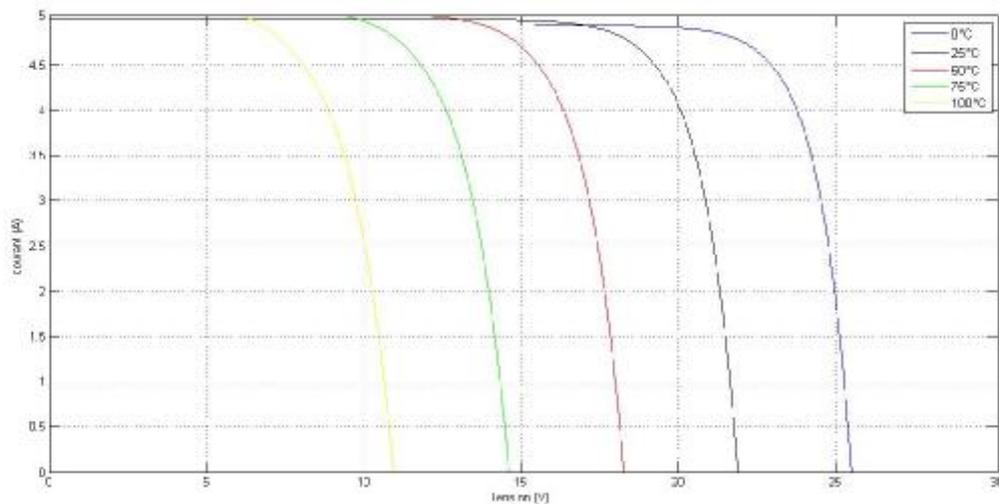


Figure (IV – 5): Caractéristique P(V) d'un generateur photovoltaïque pour différents éclairements

IV-5- Influence de la température :

La si présente figure (IV – 6) illustre les courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Ces relevés ont été effectués à un ensoleillement constant $G=1000 \text{ w/m}^2$.



Figure(IV – 6) : Caractéristiques I(V)d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures

On constate que la température a une légère influence même négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Contrairement à la tension en circuit ouvert, qui baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent, comme on le remarque sur la Figure(IV – 7), la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation PV, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en considération.

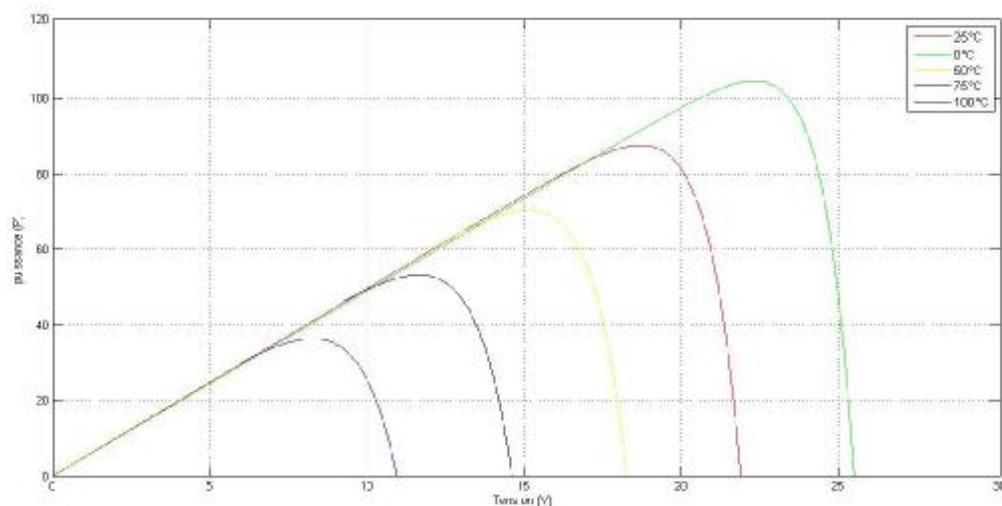


Figure (IV – 7) : Caractéristique $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures

IV-6- Association de panneau photovoltaïque en série :

La figure (IV – 8) représente la caractéristique résultante $I(V)$ obtenue en associant en série N_s panneaux photovoltaïques identiques.

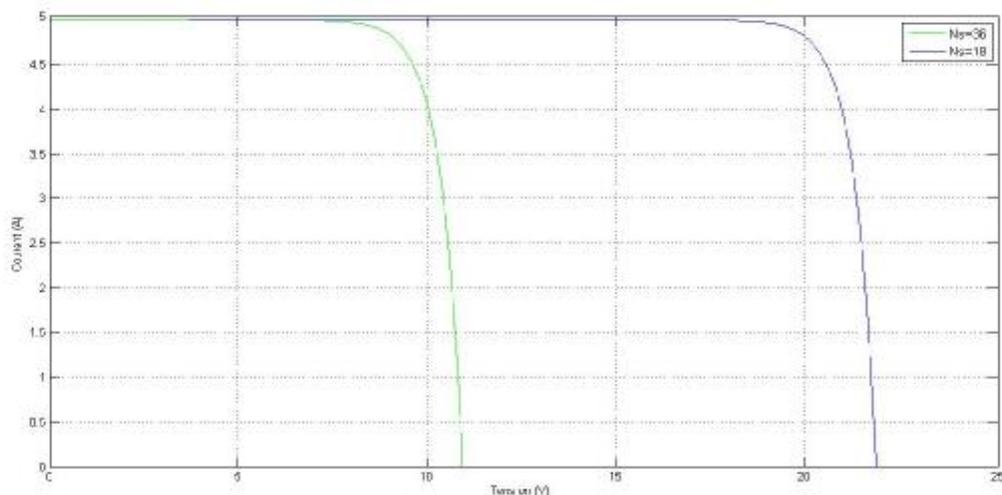


Figure (IV – 8) : Caractéristique $I(V)$ de mise en série N_s panneaux PV

Dans un tel groupement (série), les cellules sont traversées par le même courant. Par contre, la tension résultante est obtenue par addition des tensions de ces N_s panneaux élémentaires. En résumé :

$$V_{\text{résultante}} = N_s * V_{\text{pv}} \quad (\text{IV-1})$$

$$I_{\text{résultante}} = I_{\text{pv}} \quad (\text{IV-2})$$

En conséquent, la puissance résultante extractible devient N_s fois plus importantes que celle délivrée par un seul panneau photovoltaïque comme le montre la Figure (IV – 9) C'est-à-dire :

$$P_{\text{résultante}} = N_s * P_{\text{pv}} \quad (\text{IV-3})$$

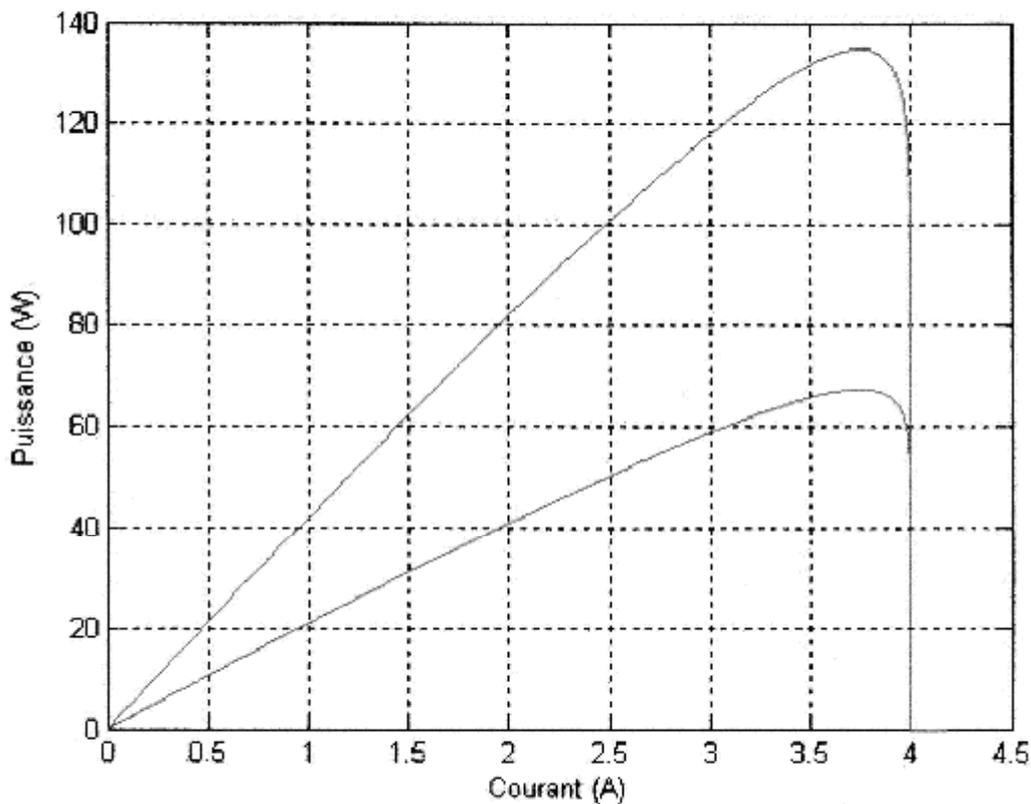


Figure (IV – 9) : Caractéristique P(I) de mise en série N_s panneaux PV

IV-7- Association de Panneaux photovoltaïque en parallèles :

La figure (IV – 10) illustre la caractéristique résultante $P(V)$ obtenue en associant en série N_p panneaux photovoltaïques identiques.

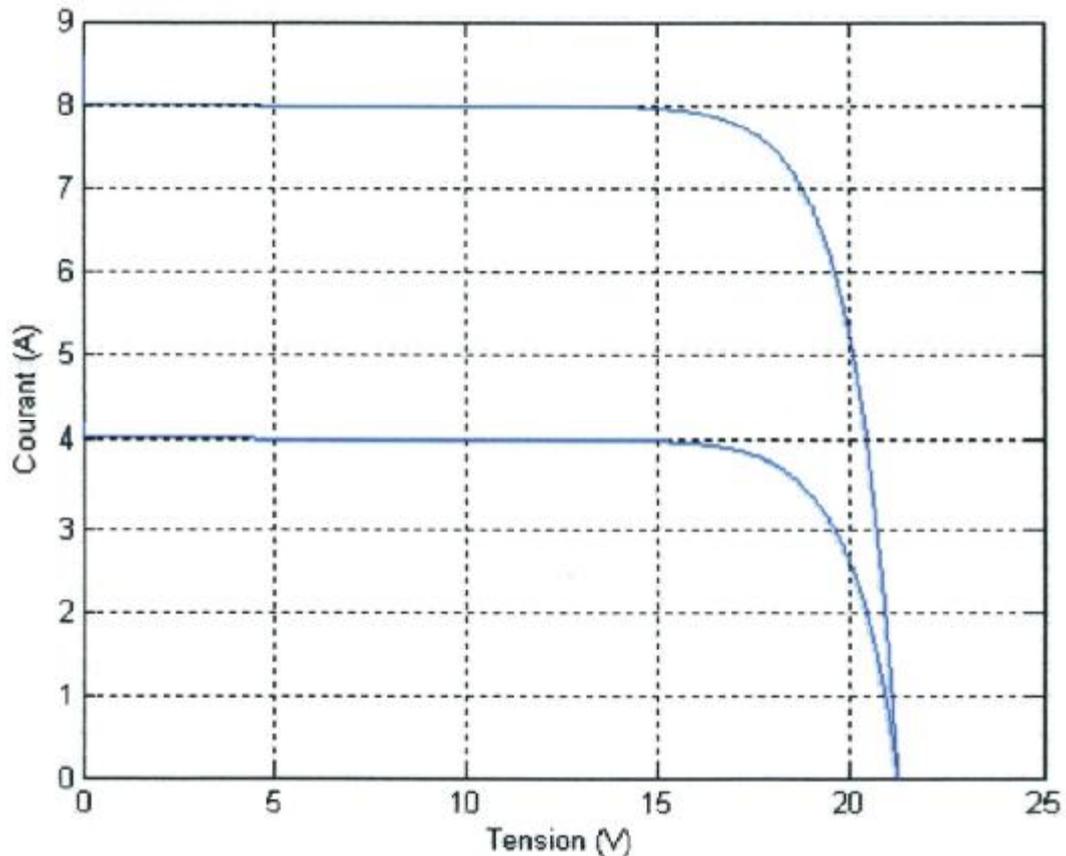


Figure (IV – 10) : Caractéristique $I(V)$ de mise en parallèle N_p panneaux PV

Dans un tel groupement (parallèle), les panneaux sont soumis à la même tension. Par contre, le courant résultant est obtenu par l'addition des courants de ces N_p panneaux élémentaires. En résumé :

$$V_{\text{résultante}} = V_{\text{pv}} \quad (\text{IV-4})$$

$$I_{\text{résultante}} = N_p * I_{\text{pv}} \quad (\text{IV-5})$$

En conséquence, la puissance résultante extractible devient N_p fois plus importante que celle délivrée par un seul panneau photovoltaïque comme le montre la figure (IV-11)

C'est-à-dire :

$$P_{\text{résultante}} = N_p * I_{\text{pv}} * V_{\text{pv}} = N_p * P_{\text{pv}} \quad (\text{IV-6})$$

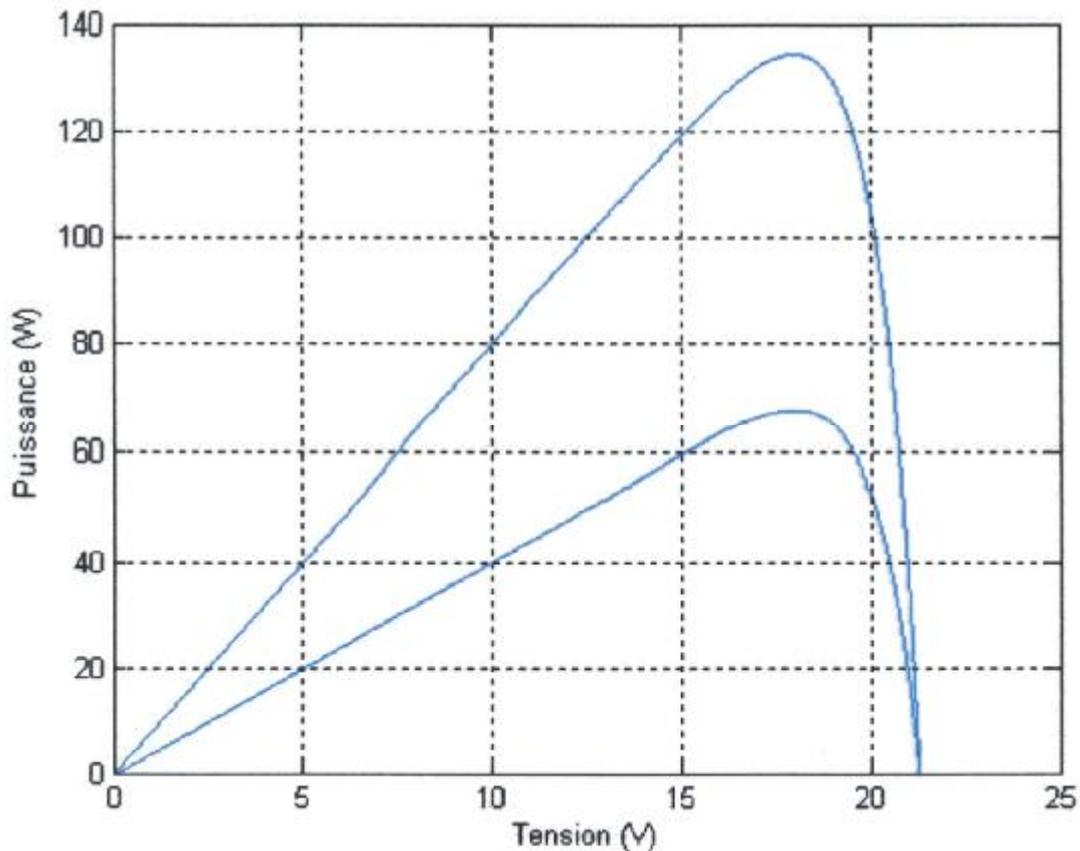
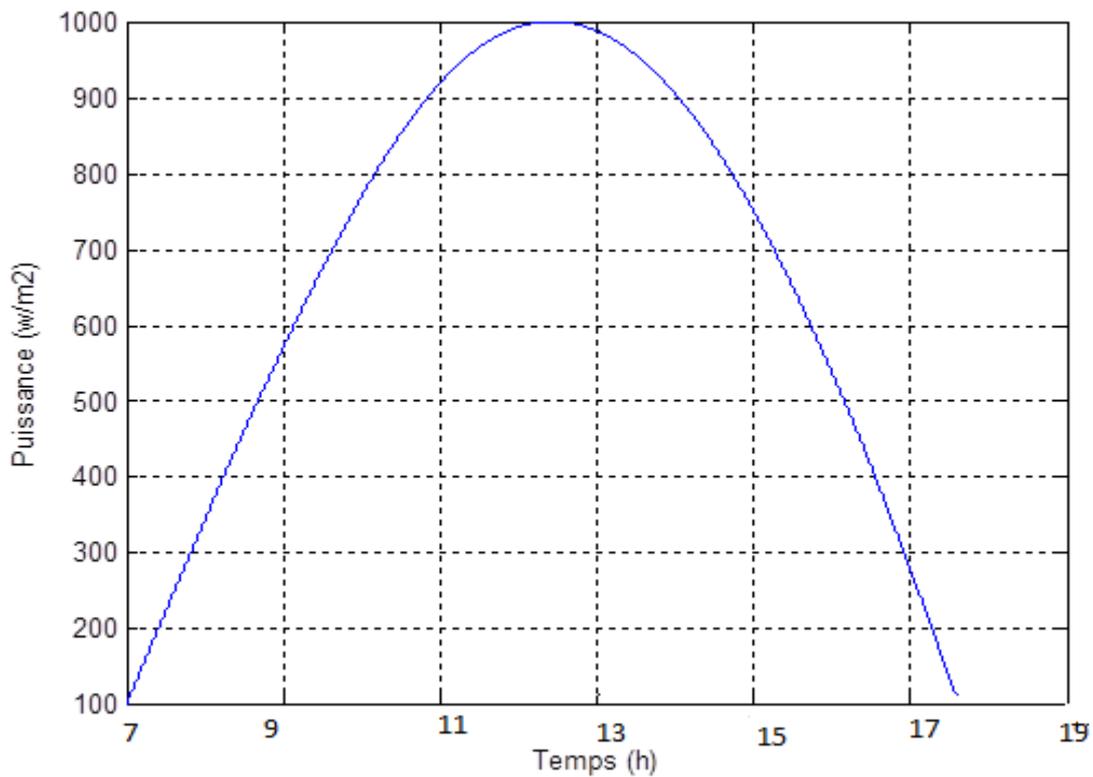


Figure IV – 11 : Caractéristique $P(V)$ de mise en parallèle N_p panneaux PV

IV-8- Model de la courbe de l'ensoleillement en fonction du temps utilisée pour les simulations réalisées:

En vue de montrer l'influence de l'ensoleillement sur le fonctionnement d'une installation photovoltaïque nous avons adopté un model approché de la courbe d'ensoleillement durant une période journalière. Une fois connue, la courbe de l'ensoleillement sera désormais considérée comme étant une variable d'entrée durant notre simulation et ce afin de vérifier le bon fonctionnement de notre commande MPPT. Comme le montre la figure ci-dessous, l'ensoleillement augmente d'une manière progressive durant la période allant 0 heures jusqu'au zénith (environ $t=5h$), c'est l'instant correspondant à la valeur maximale de l'ensoleillement ($1000W/m^2$). Au-delà de cet instant, l'ensoleillement diminue jusqu'à atteindre la valeur minimale aux environs de $t=10$ (h).



Figure(IV – 12): Model de Courbe de l’ensoleillement en fonction de temps

IV-9 Courbes de P_{bus} et P_{pv} :

Nous constatons sur la figure (IV-13) que P_{bus} suit exactement la courbe de P_{pv} et ce afin d'extraire le maximum de puissance de notre GPV. Nous remarquons aussi de petites ondulations de P_{bus} qui sont essentiellement dues à la recherche du PPM par la commande MPPT.

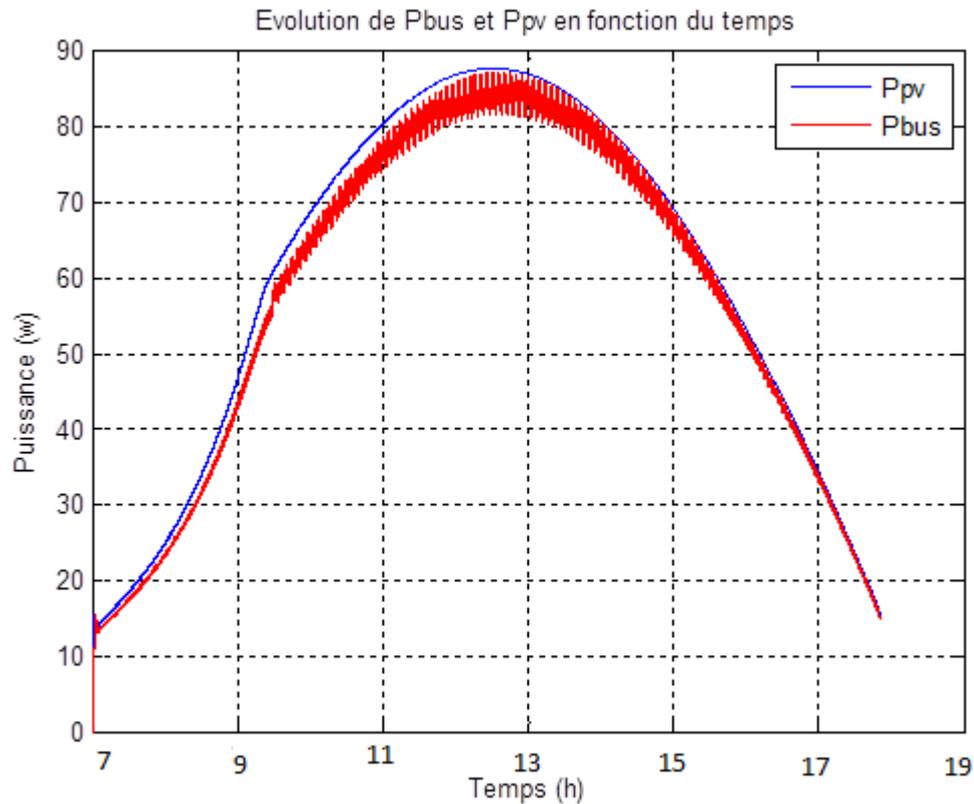


Figure IV-13 Evolution de P_{bus} et de P_{pv} en fonction du temps.

IV-9-1- courbes de P_{bus} Alpha et G:

Comme nous pouvons le constater sur la figure (IV-14) le rapport cyclique évolue d'une manière inversement proportionnelle à P_{bus} qui elle même évolue proportionnellement avec l'ensoleillement. Nous pouvons conclure alors que notre stratégie de commande de notre hacheur boost, qui est basée sur l'ajustement du rapport cyclique a réussie.

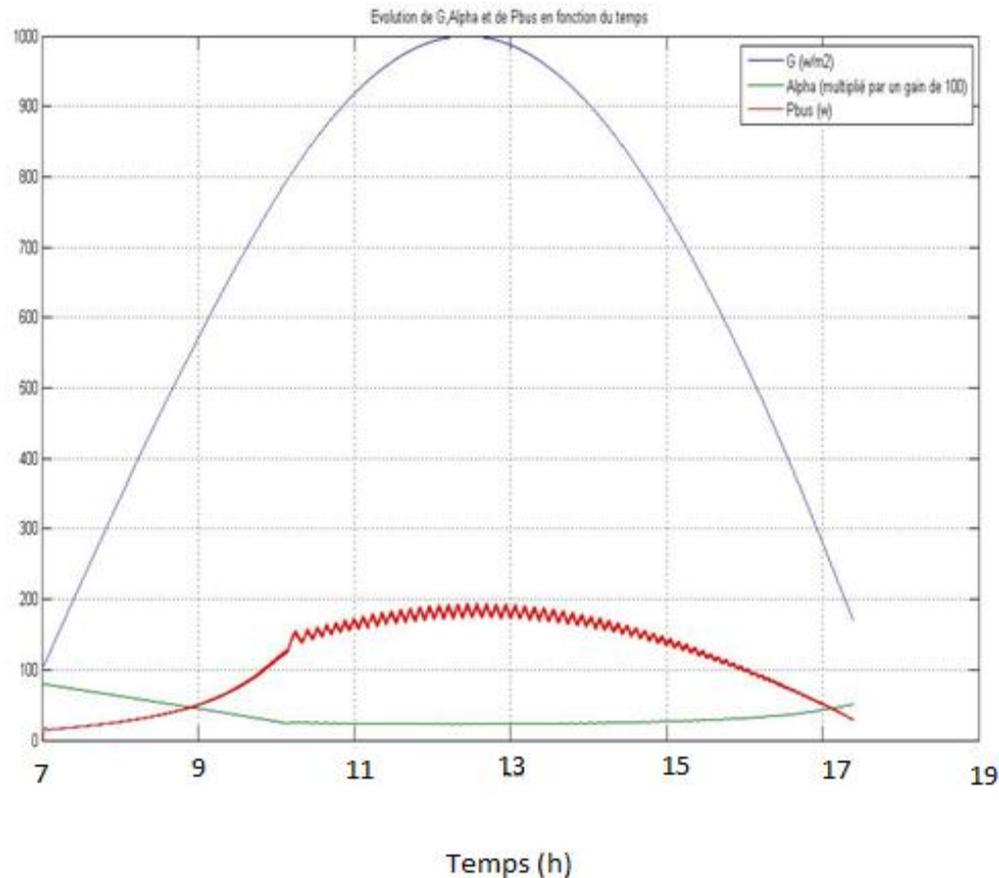


Figure IV-14 Evolution de P_{bus} , du rapport cyclique et de G en fonction du temps.

IV-10- Simulation du bus continu sans batterie :

IV- 10-1- Le courant débité par le générateur I_{pv} :

La présente figure (IV-15) illustre la courbe du courant débité par le générateur PV en fonction du temps $I_{pv} = f(t)$. On constate que la courbe du courant suit minutieusement l'allure de la courbe de l'ensoleillement en fonction du temps ($G=f(t)$). En effet, le courant croît progressivement jusqu'à atteindre son maximum ($I_{pv\ max} = 4.7\ A$ correspondant à $G= 1000\ W/m^2$ et $t=5h$) puis il décroît jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur minimale.

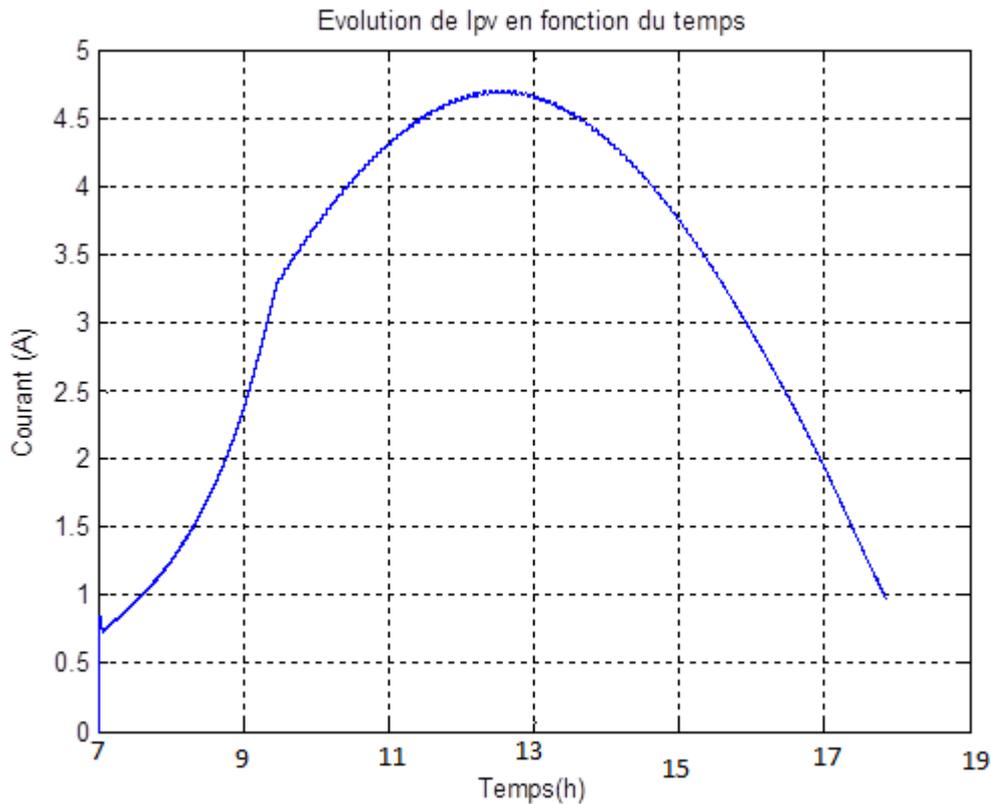


Figure (IV – 15) : Courbe du courant débité par le PV en f^{ct} du temps

IV-10-2- La tension générée par le générateur V_{pv} :

La figure ci-après, illustre la courbe de la tension générée par le PV en fonction du temps ($V_{pv} = f(t)$). Il est à constater que cette tension est pratiquement constante tout au long du temps. Elle est voisine de ($V_{pv} = 14.7 V$).

Par contre, on observe de légères chutes de tension aux extrémités de la courbe. Ce dernier a pour origine la faiblesse de l'ensoleillement durant les premières et les derniers heurs de la journée.

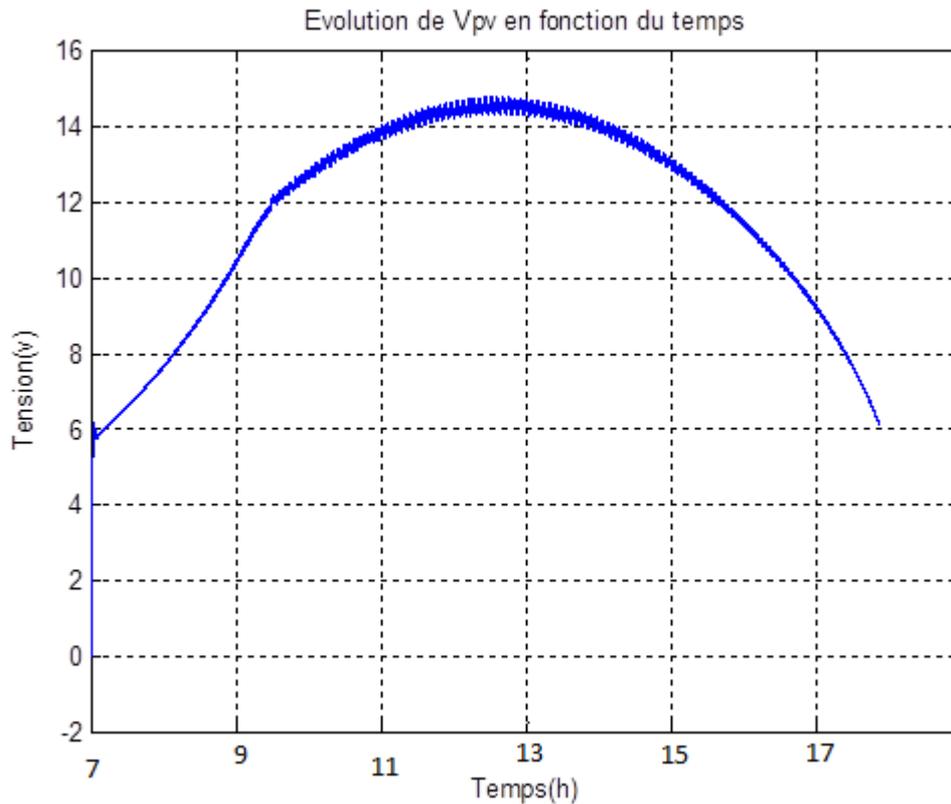


Figure (IV – 16) : Courbe de la tension générée par le PV en f^{ct} de temps

IV-10-3- Courbes du courant du GPV (I_{pv}) et du bus continu (I_{bus}) :

La figures (IV-17) illustre les courbes des courants débités par le GPV (I_{pv}) et celui du bus continu (I_{bus}). Il est à constater que ces deux courants ont la même allure. En d'autres termes, l'allure de la courbe du courant de bus (I_{bus}) suit exactement l'allure de la courbe de courant du GPV (I_{pv}) et par conséquent l'allure de la courbe de l'ensoleillement (G).

En termes de quantité, le courant (I_{bus}) est quatre fois moins important que le courant (I_{pv}) ce qui est en conformité avec la modélisation régissant le convertisseur DC/DC de type Boost.

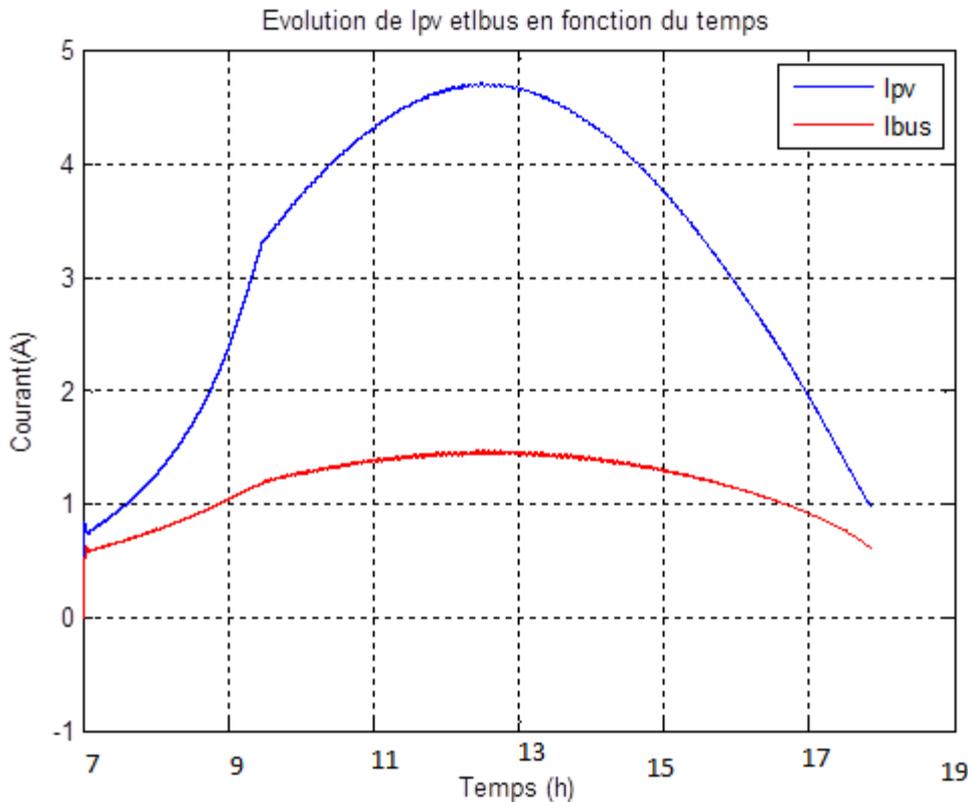
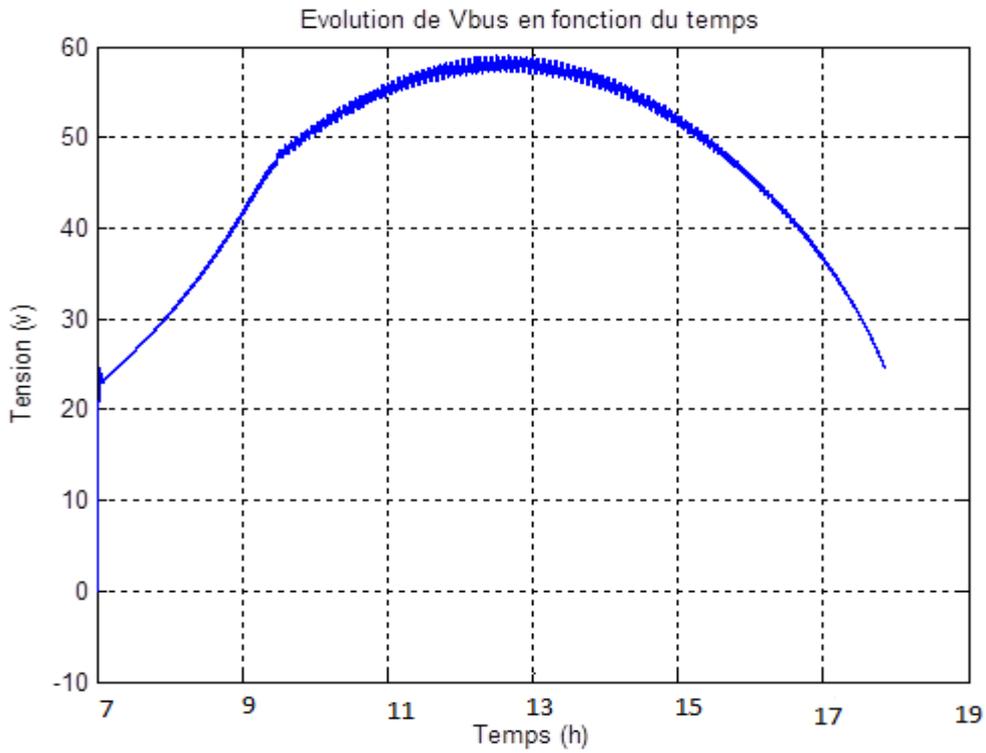


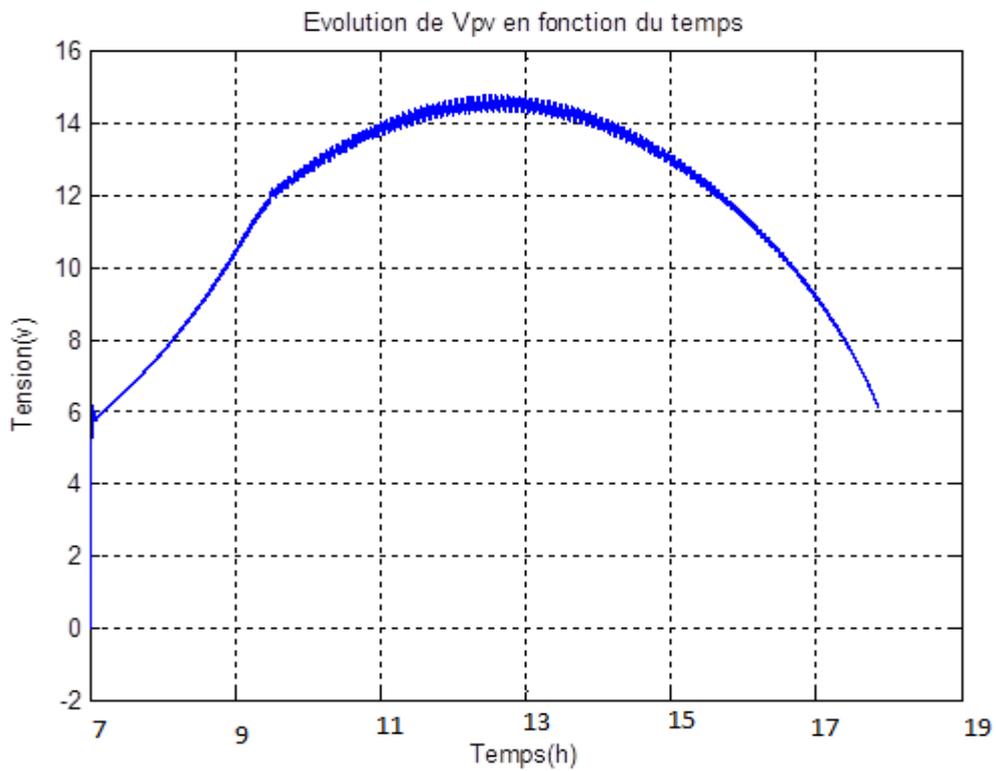
Figure (IV – 17): Courbes des courants I_{bus} et I_{pv} en fonction du temps

IV-10-4- Courbes de la tension du bus continu (V_{bus}) :

Les courbes de la tension délivrée par le GPV (V_{pv}) et celle du bus continu (V_{bus}) sont représentées dans la figure (IV-18) et (IV-19). Il est à constater que ces deux tensions ont la même allure. En effet, l'allure de la courbe de la tension du bus (V_{bus}). Suit exactement l'allure de la courbe de la tension du GPV (V_{pv}). Par contre, en terme de grandeur, la tension (V_{bus}) est quatre fois plus importante que la tension (V_{pv}), ce qui est en conformité avec la modélisation régissant le convertisseur DC/DC de type Boost. Par ailleurs, il est à conclure également que le taux d'ondulation maximale en tension n'excède pas la valeur critique tolérée par le cahier de charge. Le bon choix et le bon dimensionnement des éléments réactifs de convertisseur DC/DC à savoir l'inductance de lissage L et la capacité de filtrage C , justifie les résultats



Figure(IV – 18): Courbe de la tensions V_{bus} en fonction du temps



Figure(IV – 19): Courbes des tensions V_{pv} en fonction du temps

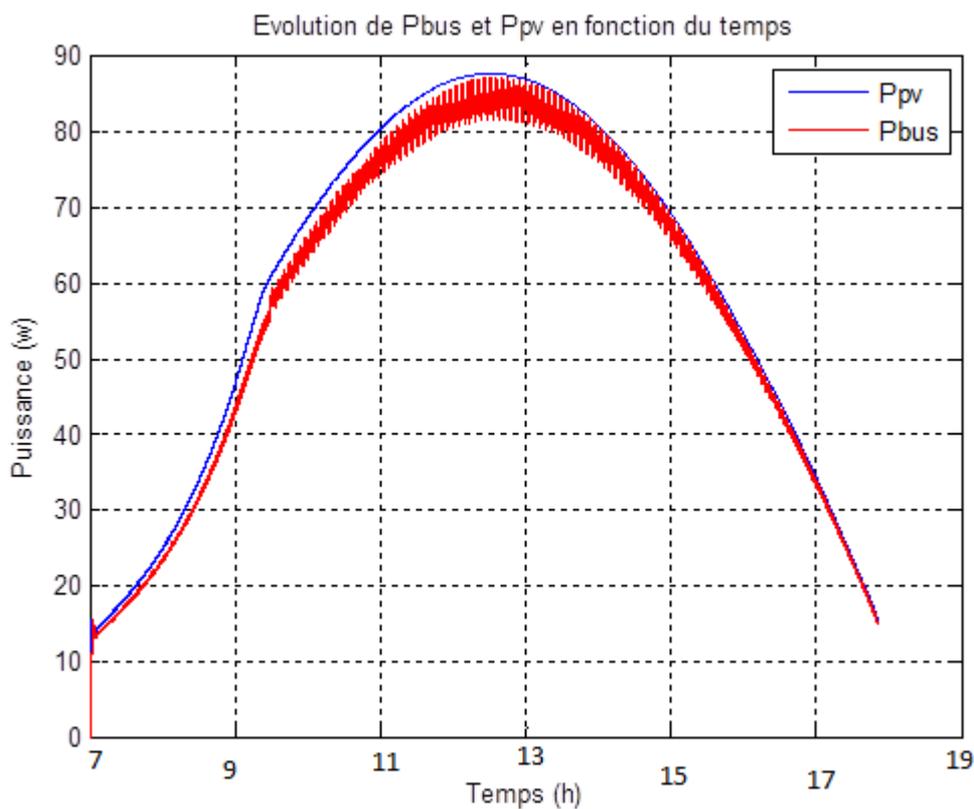
IV- 10-5- La puissance délivrée par le générateur PV en fonction du temps :

La figure ci-dessous, représente la courbe de la puissance injectée sur le bus continu P_{bus} suit d'une manière rigoureuse l'allure de la courbe du courant I_{bus} et par conséquent l'allure de l'ensoleillement $S = f(t)$. Ce résultat est justifié par la relation qui lie les différentes grandeurs du bus continu à savoir :

$$P_{bus} = I_{bus} * V_{bus} \quad (IV-7)$$

Il est à noter que la puissance du bus P_{bus} est identique à celle du générateur PV. Il s'agit là de l'une des propriétés les plus fondamentales des convertisseurs statiques que l'on peut formuler par :

$$P_{pv} \approx P_{bus}$$



Figure(IV – 20): Courbes des tensions P_{pv} et P_{bus} en fonction du temps

Remarque : les courbes ont été obtenues sans l'intégration du convertisseur réversible en courant, ce qui explique la forme non linéaire de ces dernières.

IV-11- Conclusion :

Dans le chapitre précédant nous avons modélisé les éléments de notre GPV après quoi nous avons procédé aux simulations des équations obtenues, sous matlab-simulink et présenter les résultats obtenus, dans ce chapitre.

La démarche adoptée lors de la simulation consiste en la simulation progressive des éléments du GPV afin de faire apparaître l'impact de chaque élément rajouté, sur l'installation jusqu'à obtention du système complet.

Ayant commencé par la simulation de la cellule photovoltaïque afin d'obtenir les caractéristiques [$I(V)$, $P(V)$ et $P(I)$] et de vérifier et valider son model nous avons ensuite soumis notre model à différentes variations de paramètres tels que l'ensoleillement et la température, dans le but de connaître le comportement du GPV dans des conditions climatiques variables.

Il a été aussi question dans ce chapitre de mettre en évidence l'effet des connexions série et parallèle sur le GPV afin de mieux dimensionner notre installation et ainsi répondre aux besoins de notre charge

Comme mentionné précédemment, le rôle de la batterie est primordial dans une installation de type autonome comme celle étudiée dans ce thème, car c'est à elle que revient le rôle d'alimenter continuellement notre installation quand les conditions climatiques ne sont pas favorables.

À travers ce travail effectué nous avons démontré la faisabilité de ce genre d'installations qui sont d'une grande utilité surtout dans les sites isolés.

Conclusion générale :

L'énergie solaire photovoltaïque est en plein essor et l'Algérie ne peut faire exception en la matière et relever ainsi le défi de développer d'autres sources d'énergies pour déminer la dépendance aux hydrocarbures.

Notre travail est l'émanation de cette volonté de développer des sources d'énergies dites « propres » en remplacement de celles dites « fossiles et polluantes ». Le solaire photovoltaïque pour lequel l'Algérie dispose d'atouts incontestables a pris toute notre attention.

Nous avons abordé dans ce travail l'une des applications possible du solaire photovoltaïque qui est pour notre cas de type autonome afin d'alimenter des systèmes pour lesquels l'acheminement de l'électricité via un réseau électrique conventionnel serait impossible ou trop onéreux.

Notre étude se décline sur quatre chapitres dans lesquels on s'est attelé sur la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque pour une application de type autonome ou l'alimentation continue ne pourrait être assurée sans l'intégration d'un élément de stockage vue le caractère intermittent de notre source.

Sachant que le GPV est l'association de plusieurs modules, nous avons étudié alors différentes configurations possibles afin de retenir celle qui serait le plus en adéquation avec notre système. Nous avons vu l'importance que revêt l'étage d'adaptation commandé par une MMPT sans laquelle l'extraction du maximum de puissance et l'optimisation du rendement du PV ne serait possible. Nous avons ainsi saisi l'importance de l'électronique de puissance dans ce domaine de la production de l'énergie.

S'agissant de la commande de notre convertisseur DC/DC, nous avons opté pour une MPPT de type P&O, qui est d'ailleurs la plus répandue, car elle offre un compromis entre simplicité et fiabilité très satisfaisant.

Doter notre GPV d'un élément de stockage est inévitable pour garantir l'autonomie de notre système et ainsi faire face au caractère intermittent de notre source d'énergie qu'est le soleil. Notre choix s'est porté sur des batteries de type Acide-plomb, qui sont d'ailleurs les plus utilisées dans ce genre d'installation pour la fiabilité de leur technologie et leurs moindre prix.

Au final nous pourrions dire que nous avons posé une pierre dans ce grand édifice qu'est le développement des énergies renouvelables dans notre pays qui nous espérons connaîtra un grand essor dans les prochaines années pour le bien de tous.

« Les hommes, même les scientifiques, ne peuvent s'empêcher d'espérer. Leurs attentes sont simplement plus précises. »

Karl A. Menninger

Bibliographie

- [1]: Aminata Sarr, «Simulation du système hybrides Photovoltaïque », thèse de Doctorat, école de technologie supérieure, université du Québec canada 1998.
- [2]: R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,CRC Press LLC 1999.
- [3]: M. Dahbi " Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-EolienneAutonome », mémoire de magister, option physique énergétique université de Bechar 2007.
- [4]: T. Fromherz, F. Padinger, D. Gebeyehu, C. Brabec, J. C. Hummelen, Sariciftci, "Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 63, Iss. 1, pp. 61-68, 2000.
- [5]: Nichiporuk Oleksiy, « simulation fabrication et analyse de cellule photovoltaïques à contacts arrières interdigités » thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 03 mai 2005.
- [6]: M. Angel Cid Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques" Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS).
- [7]: Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [8]: E. Van den Berg, M. Kroom, "Algorithms and performances of a space dedicated solar array modelling tool", 6th European Space Power Conference, Porto, Portugal, 6-10 May 2002, pp.527- 532, 2002.
- [9]K.Hyashi,H.koizumi,Y.ohashi and K.kurokawa , 'a single-phase grid-connected inverter by utilizing ready-made PWM power IC',IEEE ISIE 2006 ,Pp. 1138-1142,Montreal ,Quebec ,CANADA, july 9-12,2006
- [10]: D-L. King, S. Igari, W. Watrta, "Solar efficiency Tables, version 19", Progress in photovoltaics Research and applications, Vol. 10, pp. 55-61, 2002.
- [11]: R. Meseenger, J. Ventre, "Photovoltaic systems engineering", CRC Press, 1999.
- [12]: Caisheng Wang, " Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributedgeneration systems' thèse de doctorat', Montana state university, Bozeman, Montana, July 2006..
- [13] : « Les piles solaires, le composant et ces applications » Editions Masson paris (1985).
- [14] : A. buyers « les système photovoltaïques » guide, cat.no.M92-28/2001e , ISBN 0-662-31120-5

[15]: A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin » Rev. Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).

[16] : T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie,(AFME)

[17] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger ».2006

[18] :A. Guen, « contribution à l'étude des système de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire », thèse de magister, Université de Tlemcen, février 1992.

[19] : www.solarelectripower.org

[20]: D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003

[21]: Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004

[22] : N. Achaibou,A Malek , N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.

[23]: Z.Bachi, S.Elfodil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », université de Blida 2004.

[24]: M. PETIBON Stephane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïque », Thèse de doctorat à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2009.

[25]: Jérôme LACHAISE , « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des système énergétiques à Pile à combustible (P A C) destinés à la traction », Thèse de doctorat à l'Institut national polytechnique de Toulouse, 2004.

[26]: Huan-Liang Tsai , Developpement of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB-SIMULINK, Revue The World congress on engineering and computer science, USA, 2008

[27]: G.A.Haizea, « étude de structure d'intégration des système de génération décentralisée : application aux microréseaux », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble avec le «label européen», 2006

[28]: Yann RIFFOEAU, « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque »
Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2009

[29]: Olivier Tremblay et Luis-A. Dessaint. « Experimental Validation of a Battery Dynamic model for EV Application », Revue world electric vehicle journal volume 3, Norvège, 2009.

[30]: Corinne ALONSO, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Mémoire en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger la recherche, Université Paul SABATIER- TOULOUSE III, 12 décembre 2003.

[31]:A.Abd El-Aal, « Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System», These doctorat, Université d'Ain Shams Egypte,2006.

[32]: A. Ould Mohamed Yahya et al, «Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque», revue des énergies renouvelables vol. 11 N°3 (2008).

Table des figures	
Figure I-1 : Schéma simplifié d'un système.....	03
Figure I-2 : Spectre solaire hors atmosphère.....	05
Figure I-3. Exemples de spectre solaire	06
Figure I- 4 : Valeurs énergétique des photons issus du spectre solaire.....	06
Figure I-5. Cellules monocristallines.....	08
Figure I-6: Cellules poly cristallines	08
Figure I-7: Cellules Couches minces (Amorphes).....	09
Figure I-8: Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.....	10
Figure I-9: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éléments (E)...	11
Figure I-10: Schéma équivalent électrique de la cellule PV	12
Figure I-11: Groupement de b cellules en série et a cellules en parallèle.....	13
Figure I-12 : Courbe $I = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque	14
Figure I-13: Caractéristiques du groupement série des modules photovoltaïques.....	15
Figure I-14 : Caractéristiques du groupement parallèle des modules photovoltaïques...	15
Figure I-15 : Caractéristiques $I(V)$ d'un module photovoltaïque.....	16
Figure I-16: Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements	17
Figure I.17: Influence de la température sur la caractéristique électrique.....	18
Figure II-1 : Module photovoltaïque.....	19
Figure II-2 : Boite de jonction.....	20
Figure II-3 : Modules PV 'SP75'	21
Figure II-4 : Boite de dérivation.....	21
Figure II-5 : Construction d'une batterie monobloc	24
Figure II-6 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série.....	28
Figure II-7 : Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage	28
Figure II-8 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle.....	29
Figure III-1: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (model à une seule diode).....	32
Figure III-1-a : Modèle de simulation de I_s	33
Figure III-1-b : Modèle de simulation de I_{si}	34
Figure III-1-c : Modèle de simulation du PV.....	35
Figure III-2 : Schéma électrique d'un convertisseur DC/DC survolteur.....	36

Figure III-3: Ondulation du courant.....	38
Figure III-4 : Ondulation de tension	39
Figure III-5 : La courbe de décharge de la batterie.....	42
Figure III-6 : Chaîne élémentaire de la conversion photovoltaïque avec un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT.....	43
Figure III-7 : Organigramme de fonctionnement d'une commande MPPT.....	44
Figure III-8 : Fonctionnement d'une commande MPPT.....	45
Figure IV – 1: Schéma global du système réalisé.....	47
Figure IV – 2 : Courbe $I = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque	48
Figure IV – 3 : Caractéristique $P(I)$ d'un générateur photovoltaïque	49
Figure IV – 4: Caractéristiques $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs d'éclairements	50
Figure IV – 5: Caractéristique $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairements	51
Figure IV – 6 : Caractéristiques $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures	51
Figure IV – 7 : Caractéristique $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures	52
Figure IV – 8 : Caractéristique $I(V)$ de mise en série N_s panneaux PV	52
Figure IV – 9 : Caractéristique $P(I)$ de mise en série N_s panneaux PV	53
Figure IV – 10 : Caractéristique $I(V)$ de mise en parallèle N_p panneaux PV.....	54
Figure IV – 11 : Caractéristique $P(V)$ de mise en parallèle N_p panneaux PV	55
Figure IV – 12: Model de Courbe de l'ensoleillement en fonction de temps	56
Figure IV-13 Evolution de P_{bus} et de P_{pv} en fonction du temps.....	57
Figure IV-14 Evolution de P_{bus} , du rapport cyclique et de G en fonction du temps.....	58
Figure (IV – 15) : Courbe du courant débité par le PV en f^{ct} du temps.....	59
Figure (IV – 16) : Courbe de la tension générée par le PV en f^{ct} de temps	60
Figure (IV – 17): Courbes des courants I_{bus} et I_{pv} en fonction du temps	61
Figure(IV – 18): Courbe de la tensions V_{bus} en fonction du temps	62
Figure(IV – 19): Courbes des tensions V_{pv} en fonction du temps	62
Figure(IV – 20): Courbes des tensions P_{pv} et P_{pbus} en fonction du temps	63

