

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

*UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE*

Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme de Master II en
électrotechnique*

Option : Machines électriques

Thème

**Modélisation et commande d'un système
photovoltaïque autonome pour
l'alimentation en énergie électrique d'un
site isolé**

Dirigé par :

M^r R. MANSOURI

Présenté par :

M^{elle} Farida ALLAM

M^{elle} Louiza BOUABBACHE

Promotion 2011

Remerciements

*Nous tenons à adresser nos remerciements à notre promoteur Monsieur Rachid
MANSOURI d'avoir accepté de diriger ce mémoire.*

*Nous remercions aussi les membres de la commission qui nous ont fait
l'honneur d'en faire partie et qui ont eu la patience de nous écouter.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont encouragés tout au long de notre
parcours universitaire et ceux qui ont contribué à notre formation de près ou de
loin...*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents

A mes adorables sœurs

Ainsi que mes amis

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1 : généralités sur les systèmes photovoltaïques

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 1 |
| 1. Energie solaire photovoltaïque..... | 1 |
| 1.1 Notions sur le rayonnement solaire..... | 1 |
| 1.2 L'énergie photovoltaïque..... | 4 |
| 1.2.1. Prix du photovoltaïque | 5 |
| 1.3. La cellule photovoltaïque | 6 |
| 1.3.1. Les matériaux semi- conducteurs..... | 6 |
| 1.3.2. Dopage d'un semi-conducteur..... | 7 |
| 1.3.3. La jonction P-N..... | 8 |
| 1.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... | 8 |
| 1.4.1. Photo génération..... | 8 |
| 1.4.2. Séparation des charges..... | 9 |
| 1.4.3. Collection des charges..... | 9 |
| 1.5. Caractéristique courant-tension..... | 9 |
| 1.6. Paramètres de la cellule solaire..... | 10 |
| 1.7. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques..... | 11 |
| 1.8. Applications du photovoltaïques..... | 12 |
| 1.9. Les systèmes photovoltaïques autonomes | |
| 1.9.1. Le champ photovoltaïque PV | 14 |
| 1.9.2. Régulateur de charge..... | 14 |
| 1.9.3. L'onduleur..... | 15 |
| 1.9.4. Système de stockage..... | 15 |
| 1.10. Principe général de fonctionnement d'une batterie..... | 16 |

Sommaire

| | |
|--------------------------|----|
| 1.11. Commande MPPT..... | 18 |
|--------------------------|----|

| | |
|-----------------|----|
| Conclusion..... | 18 |
|-----------------|----|

Chapitre 2 : modélisation et commande d'un système photovoltaïque

| | |
|--|----|
| 1. Modélisation du système photovoltaïque..... | 20 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 1.1 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque..... | 20 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 1.1.1. Modèle du courant de saturation..... | 21 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 1.1.2. Modèle du courant court circuit..... | 23 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 1.2. Modélisation des convertisseurs d'énergie..... | 23 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 1.2.1. Le convertisseur statique survolteur..... | 23 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 1.2.2. Convertisseur statique réversible en courant..... | 25 |
|--|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1.3. Modélisation de la batterie..... | 26 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| 2. Dimensionnement du système PV..... | 27 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| 2.1. Dimensionnement du champ PV..... | 28 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 2.2. Dimensionnement de la batterie..... | 29 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 2.3. Dimensionnement des composants des convertisseurs d'énergies..... | 30 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 3. Commande des convertisseurs statiques..... | 32 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 3.1. Commande du convertisseur Boost..... | 33 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 3.2. Commande du convertisseur Buck- Boost..... | 38 |
|---|----|

Chapitre 3 : simulation d'un système photovoltaïque

| | |
|---|----|
| 1. Simulation d'une cellule photovoltaïque..... | 39 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 2. Simulation du module photovoltaïque..... | 41 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 3. Simulation du système photovoltaïque..... | 42 |
|--|----|

Conclusion générale

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Les ressources énergétiques fossiles et fissiles, aisément exploitables mais épuisables, ne cessent de diminuer en conséquence. [26], [21]

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque, elle apporte une bonne réponse aux besoins énergétiques limités dans les sites isolés et dispersés. [21], [26]

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 micros turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. [1]

Le système photovoltaïque autonome nécessite un système de stockage électrique permettant de restituer l'énergie à la demande quelque soit les séquences d'ensoleillement. Un accumulateur électrochimique est un système capable de convertir de l'énergie électrique (toujours en courant continu) produite par les panneaux solaire PV en énergie chimique et réciproquement.

Introduction générale

Notre travail est divisé en trois chapitres :

Au premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de chaque élément constituant le système photovoltaïque.

Le second chapitre est très important, car il présente la modélisation de chaque élément du système ainsi que la commande des convertisseurs statiques.

Le troisième chapitre est la suite du second chapitre, il consiste à simuler le comportement du système et l'analyse et l'interprétation des différents résultats obtenus.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

Chapitre 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Introduction

Les systèmes photovoltaïques utilisent l'énergie la mieux répartie dans le monde : la lumière du soleil. C'est le seul moyen connu pour convertir directement l'énergie lumineuse produite par le soleil en électricité. Cette technique est parfaitement mature et permet d'alimenter des applications isolées tels que le traitement de l'eau, les télétransmissions l'immobilier urbain...

L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques. Les générateurs renouvelables sont couplés à un système de stockage assurant une disponibilité continu d'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un module photovoltaïque (PV). Généralement, le stockage est assuré par des batteries. Ces systèmes, appelés systèmes PV Batteries, sont actuellement une des solutions les plus utilisées. Les batteries ont de très bons rendements, de l'ordre de 80-85 %, et un prix très compétitif, si l'on considère la technologie plomb. [1]

1. Energie solaire photovoltaïque

L'expression « énergie solaire » est généralement associée aux méthodes qui permettent d'utiliser l'énergie produite par le soleil. Situé à 146 millions de kilomètres de la terre, le soleil est une source d'énergie extraordinairement puissante. Pour s'en faire une idée, il faut savoir que le soleil envoie 1,6 milliards de kilowatts à la terre chaque année. Toutefois, 40 % seulement de cette énergie atteint effectivement la surface terrestre, le reste étant réfléchi par les couches supérieures de l'atmosphère. Ce pourcentage relativement faible que l'homme peut récupérer et transformer en énergie utilisable est de plusieurs centaines de fois supérieur à la consommation d'énergie mondiale annuelle. L'énergie solaire peut être utilisée de deux manières : comme source de chaleur et comme source d'électricité. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé « photovoltaïque » (ou PV).

[2]

1.1. Notions sur le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. La surface de cet astre se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K. Ceci conduit à

un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0.5 pour une puissance d'environ 60MW/m².

Le rayonnement reçu par la Terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre à cause des divers facteurs liés à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et la saison. La couche d'ozone, par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène présente deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm. La vapeur d'eau enfin possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge. Le flux énergétique reçu au sol se réduit alors à 1000 W/m² avec un spectre décalé vers le rouge [3].

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.1 \quad)$$

Sur la figure (1.1) on remarque que lorsque le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$ alors $AM=1$: on utilise pour cela la notation AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, elle est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour des applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G défini par l'angle 48.2°, au dessus de l'horizon, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes (le rayonnement direct : reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux) et diffuses (le rayonnement diffus : constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. , par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes, AM1.5G fournit une irradiance de 970 W/m², mais il à été arrondi à 1kW/m².

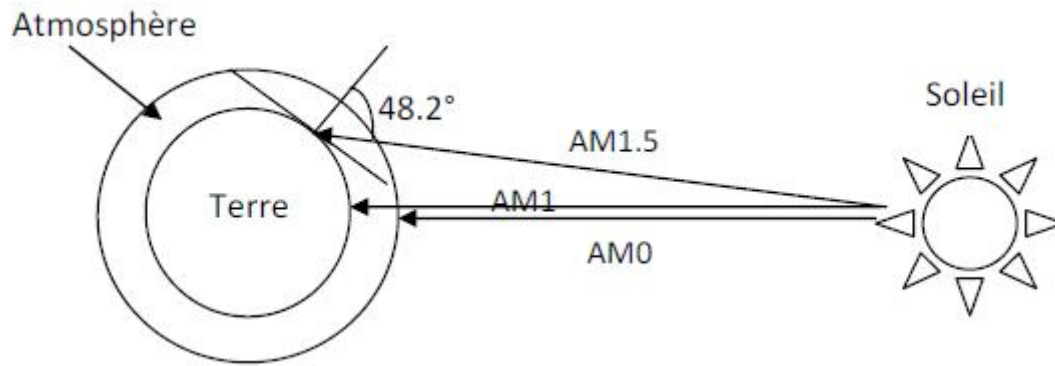


Figure 1.1 : Définition de l'Air Masse [4].

Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur (la figure 1.2).

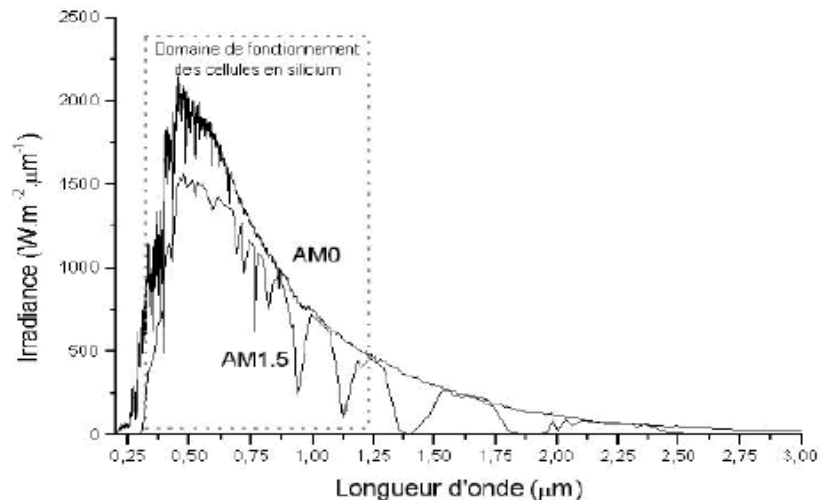


Figure 1.2 : représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [4]

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. Les courbes de la figure 1.2 représentent le spectre solaire pour différentes valeurs d'Air Mass. L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM0 est donc le spectre solaire hors atmosphère. Les modules photovoltaïques sont caractérisés sous une irradiation de 1000 W/m^2 avec un spectre solaire AM1.5, une température de 25°C . [4]

1.2. L'énergie photovoltaïque

Le photovoltaïque connaît une croissance exponentielle depuis quelques années dans le monde, le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 35 % par an depuis 1998.[5]

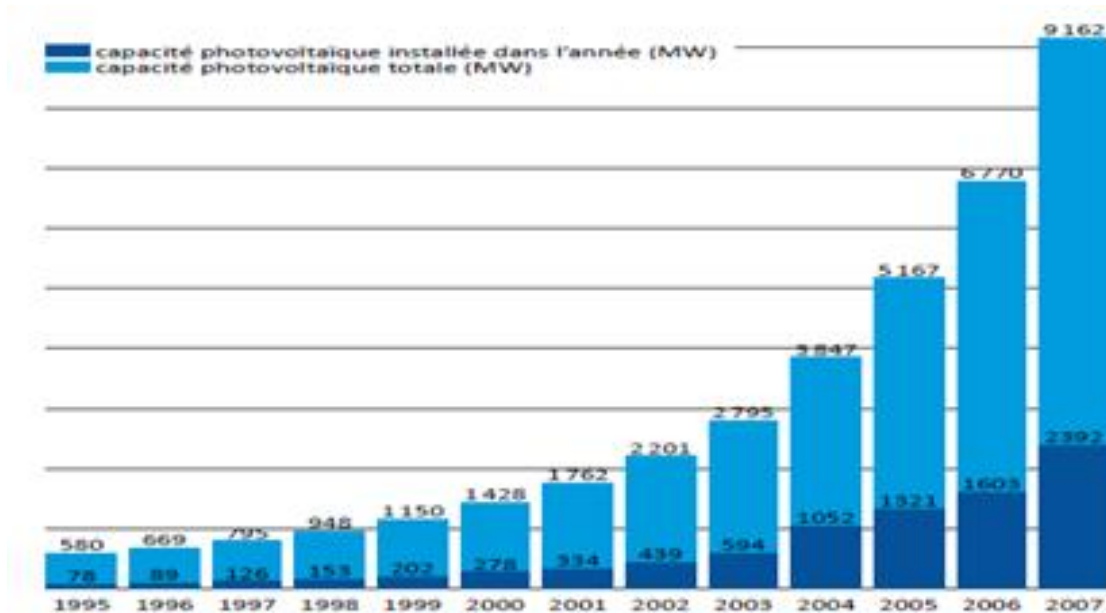


Figure 1.3: Croissance du marché du photovoltaïque (MW) [5].

Sur la figure (1.3) on remarque qu'à la fin de l'année 2007, la capacité totale installée s'élevait à près de 9 200 MW, contre 1 500 MW en 2000. Le rythme d'installation de nouvelles capacités de production, en constante augmentation, a désormais dépassé les 2 500 MW par an. [5]

Les premières centrales solaires de grande capacité (plusieurs dizaines voire centaines de MW) voient le jour et leur nombre devrait se multiplier. En termes économiques, le marché mondial de l'industrie solaire photovoltaïque a représenté 13 milliards d'euros en 2007, et d'après l'association européenne du photovoltaïque, on prévoit que le parc installé pourrait atteindre environ 1 800 000 MW en 2030, pour une production représentant 14 % de la consommation mondiale d'électricité. [5]

1.2.1. Prix du photovoltaïque

Entre 1980 et 2007, le développement considérable de la filière, notamment en Allemagne et au Japon, a permis une diminution de coûts importante. En moyenne sur cette période, le prix des systèmes photovoltaïques a baissé de 7 % par an, cette diminution s'explique par les avancées technologiques réalisées chaque année sur le rendement des panneaux et sur l'industrialisation des procédés de fabrication, mais aussi par les gains d'échelles que réalisent les industriels grâce à la montée en puissance des marchés mondiaux. Depuis 1976, on observe que les prix baissent de 20 % chaque fois que la production cumulée double, ceci est représenté sur la figure (1.4). [6].

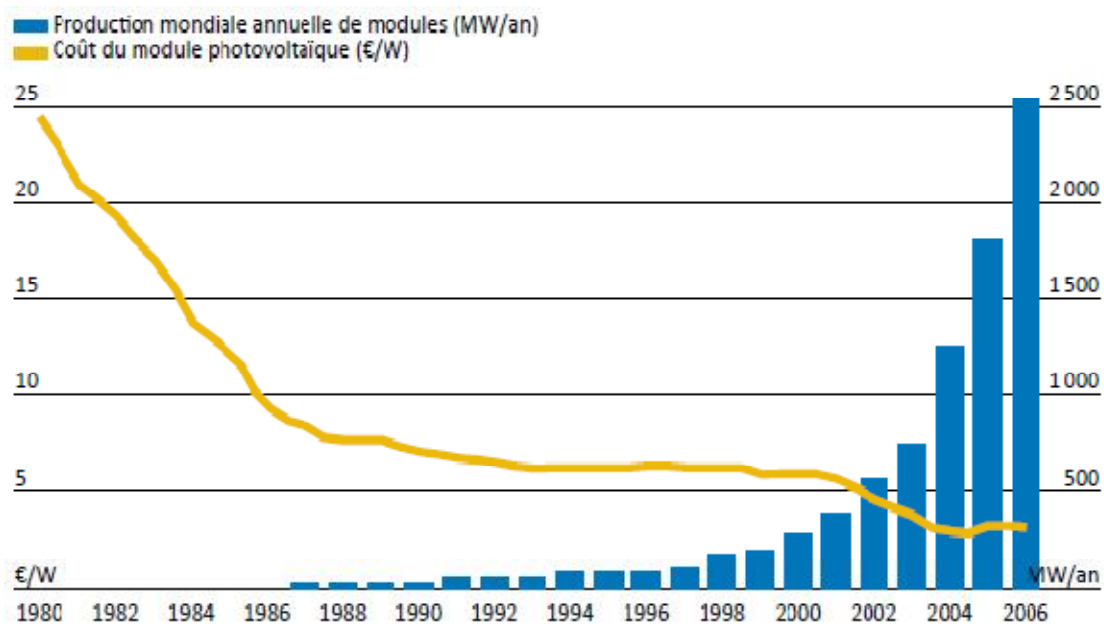


Figure 1.4 : cout du module photovoltaïque dans le monde [6].

Bien que depuis les premières installations PV, le prix a diminué fortement, le prix du kWh reste encore élevé. Dans ce contexte, encore aujourd'hui, la plupart des installations PV sont destinées à des sites isolés où la possibilité de raccordement au réseau est difficile voir impossible.

1.3. La cellule photovoltaïque

Une cellule solaire à conversion photovoltaïque est un dispositif électronique à semi-conducteur qui permet la transformation directe du rayonnement solaire en électricité. Elle est composée de fines tranches planes fabriquées à partir de matériaux appelés semi-conducteurs comme le montre la figure (1.5).

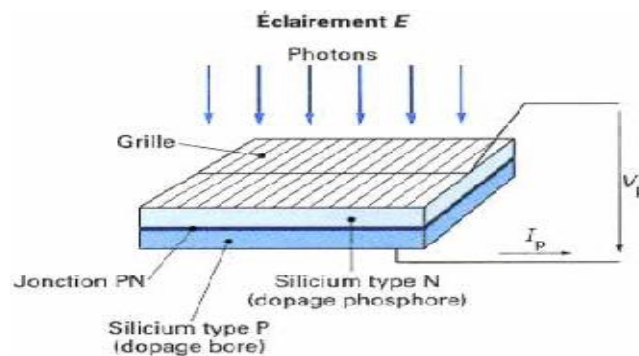


Figure (1.5) cellule solaire. [7]

1.3.1. Les matériaux semi- conducteurs

Dans un matériau conducteur, la bande de valence et la bande de conduction se confondent, ce qui fait que les électrons peuvent circuler facilement dans le réseau cristallin du matériau conducteur. Dans un matériau isolant, au contraire, la bande de valence et la bande de conduction sont séparées par ce qu'on appelle la bande interdite. Cette bande nécessite beaucoup d'énergie aux électrons pour qu'ils puissent passer dans la bande de conduction, de l'ordre d'une dizaine d'électronvolt (ou eV). Dans un semi conducteur, la largeur de la bande interdite est plus faible, de l'ordre de 0,5 à 2 eV, cette énergie de transition d'une bande à l'autre est l'énergie de gap notée E_g illustré sur la figure (1.6).

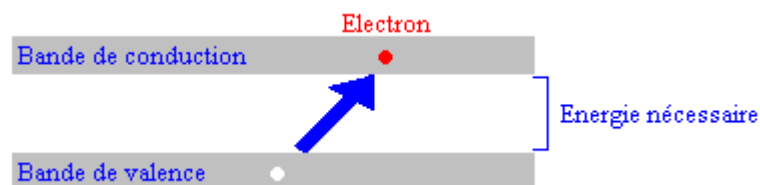


Figure1.6 : Bandes énergétiques au sein de l'atome [6].

Lorsqu'il y a apport d'énergie, comme c'est le cas avec un rayon lumineux incident, les électrons de la bande de valence sont susceptibles de traverser la bande interdite et de passer dans la bande de conduction. Dès lors, ces électrons deviennent libres et sont capables de se déplacer à l'intérieur du cristal.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage. En introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau pour produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact pour créer des jonctions, servant à contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse la totalité. Cette propriété est la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc ... Dans ce contexte le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés (présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique), et de son abondance naturelle ; il existe aussi d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

1.3.2. Dopage d'un semi-conducteur

La technique de dopage d'un cristal semi-conducteur consiste en l'appauvrissement ou l'enrichissement du nombre d'électrons au sein de ce cristal. Pour ce faire, on introduit au sein du cristal semi-conducteur un atome accepteur ou donneur d'électrons.

- **Le dopage de type N :** consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.
- **Le dopage de type P :** utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donne un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type P le plus couramment utilisé pour le silicium.

1.3.3. La jonction PN

La jonction PN est la base de la structure des cellules PV, elle ne permet le passage du courant que dans un sens. La jonction PN est obtenue en juxtaposant un semi-conducteur dopé P et un semi-conducteur dopé N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner. Comme le montre la figure (1.7). [8]

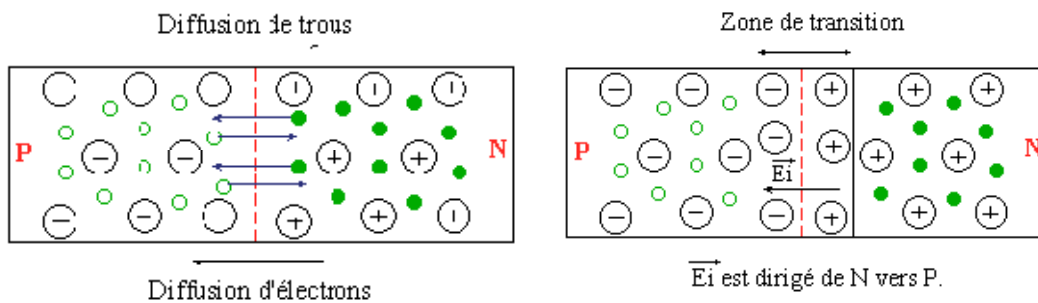


Figure 1.7 : Jonction PN. [8]

1.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La production de courant dans une cellule photovoltaïque se fait en trois étapes : la génération de porteurs, la séparation des charges et la collection aux contacts.

1.4.1. Photo génération

Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paires électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une ddp entre les faces extérieures de la jonction est créée

1.4.2. Séparation des charges

Considérons une cellule photovoltaïque à jonction PN sous une tension appliquée V , le champ interne élevé régnant dans la zone de charge d'espace entraîne la séparation des paires d'électron-trou photo générées. Les porteurs minoritaires (électrons dans la couche P et trous dans la couche N) diffusent dans la structure vers les contacts situés aux extrémités de la cellule, les électrons se dirigeant vers la zone dopée N et les trous vers la zone P. Cela crée donc un courant à travers la cellule. De plus, de part le dopage des couches P et N, il existe une différence de potentiel dans la cellule. Cela conduit donc à la production d'une puissance électrique.[9]

1.4.3 Collection des charges

La collection des porteurs minoritaires est assurée par deux couches conductrices dites contact avant et contact arrière. Le contact arrière est constitué d'une couche d'argent, d'or ou d'aluminium. Le contact avant demande lui certaines spécificités (pour collecter les porteurs électriques générés, il faut un matériau transparent et bon conducteur tel que l'oxyde de zinc dopé aluminium ZnO : Al). [9]

1.5. Caractéristique courant-tension

On a vu que la jonction servant de base à la cellule photovoltaïque est une diode. Lorsqu'elle est illuminée, il apparaît dans cette diode un photo-courant qui dépend de la quantité de lumière incidente d'où, le terme photodiode, également employé pour désigner une photopile. La figure suivante (1.8) représente les deux caractéristiques courant-tension de cette photodiode : dans l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein.[2]

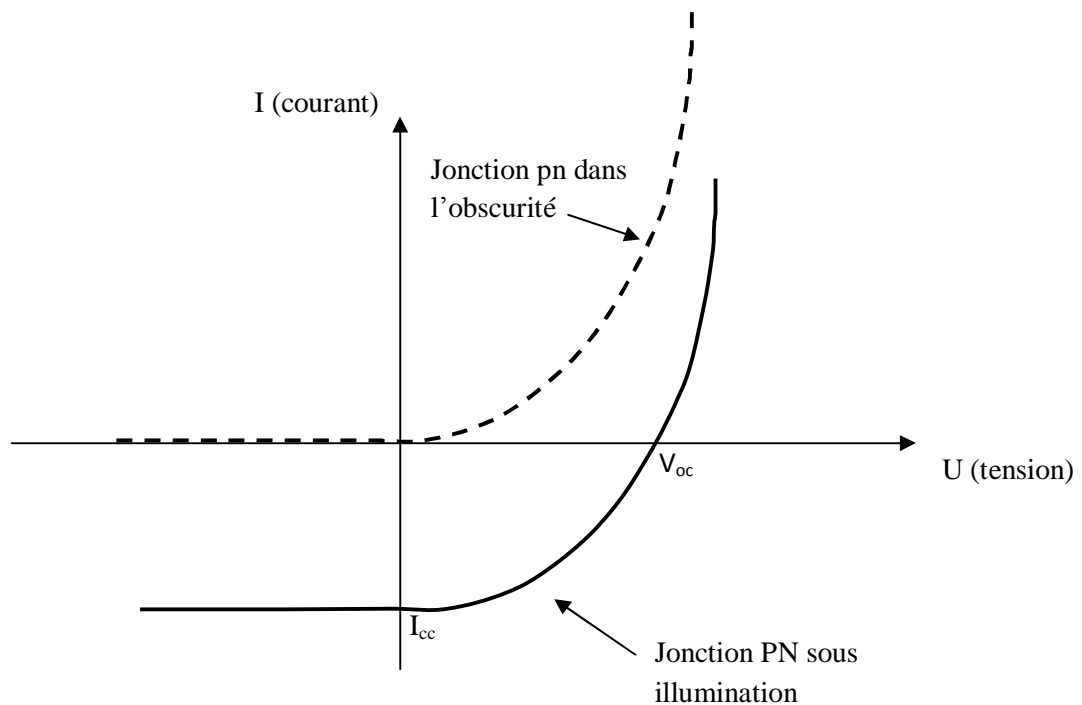


Figure 1.8 : Caractéristique courant tension d'une diode au silicium dans l'obscurité et sous illumination.[2]

Ou :

I_{cc} : le courant de court- circuit. , V_{oc} : la tension en circuit-ouvert de la cellule photovoltaïque.

On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la photopile sous lumière à tension nulle (en court-circuit). La valeur V_{oc} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert, tension de la photopile sous lumière à courant nul.

1.6. Paramètres de la cellule solaire

La cellule solaire est caractérisée par le rendement de conversion η , la tension à circuit ouvert V_{oc} , le courant à court-circuit I_{cc} et le facteur de forme FF. Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension.

Courant de court-circuit I_{cc} : est le courant obtenu quand les bornes de cellules sont court-circuitées ($V=0$). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et de la surface éclairée ainsi que la température.

Tension de circuit ouvert V_{oc} : est obtenue quand le courant de la cellule est nul, sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation.

Facteur de forme FF : est défini comme étant le rapport de la puissance produite par la cellule sur la puissance théorique calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit.

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{cc}}$$

Avec :

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$).

V_{oc} : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$).

I_m : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Le rendement d'une la cellule solaire : Le rendement n d'une cellule solaire est défini comme étant le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule sur la puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule.

$$n = \frac{V_m * I_m}{\phi_i * S} * FF \quad (1.1)$$

Avec :

ϕ_i : Flux d'éclairement reçu par unité de surface en W/m^2 .

S : surface de la cellule photovoltaïque en m^2 .

1.7. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Actuellement, il existe deux technologies de production des cellules photovoltaïques : la première à base de silicium cristallin comprenant le mono et le multi cristallin, couvre environ 85% de la production mondiale. La deuxième technologie utilise des couches minces, elle comprend les cellules au silicium amorphe, polycristallin ou microcristallin ; au tellure

de cadmium, au cuivre indium sélénium et à l'arséniure de gallium. En outre, d'autres technologies sont en cours d'expérimentation comme les cellules organiques, polymères ou à base de fullerènes.

Le Silicium mono cristallin : La technologie mono cristalline est coûteuse, car elle nécessite des barres de silicium pur. Son rendement est le plus élevé (14 à 16%). Ce qui a l'avantage de réduire la taille des modules pour une même puissance, chose utile lorsqu'un gain de place est nécessaire.

Le silicium poly cristallin : la technologie poly cristalline est obtenue par la refonte de chute de cristaux de silicium de l'industrie électronique et elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie que la technologie précédente. Son rendement est un peu moindre (12 à 14 %) mais son coût est plus avantageux, ce qui permet à cette technologie de dominer actuellement le marché.

Le silicium amorphe (en couche mince): Matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre. D'un rendement moins bon que le cristallin (5-7%), le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs).

1.8. Applications du photovoltaïques

Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque sont nombreuses et touchent beaucoup de domaines. En voici quelques exemples...

L'espace : L'exemple le plus célèbre est sûrement celui des stations spatiales et autres satellites qui utilisent des panneaux de grande envergure pour absorber le maximum d'énergie rayonnante solaire. C'est sans aucun doute dans le domaine spatial que la recherche sur la conversion photovoltaïque est la plus avancée.

Le petit appareillage : Les calculatrices, montres radios, chargeurs de batteries, lampes de poches peuvent être équipées de mini- générateurs photovoltaïques au silicium amorphe.

Le pompage de l'eau : Dans certains villages ou tout simplement pour irriguer les champs, on peut utiliser des stations solaires de pompage de l'eau en convertissant directement l'énergie électrique photovoltaïques en énergie mécanique au moyen de pompes ; l'eau est pompée le jour et stockée la nuit ,il n'y a pas de stockage du courant.

L'urbanisme : Le principe de redistribution du courant excédentaire dans le réseau national prend la forme de bâtiments à toits ou façades photovoltaïques. Les maisons qui produisent de l'électricité à partir du soleil utilisent ces technologies.

Le transport : Il existe des voitures qui utilisent l'énergie solaire pour se déplacer, comme le fameux prototype Honda. A l'échelle commerciale, cette solution ayant trop de contraintes ; notamment du fait de l'envergure des panneaux, on s'oriente plutôt vers des voitures pouvant fonctionner soit à l'essence soit au courant électrique ; dites hybrides, comme la Toyota Prius.

Les centrales photovoltaïques : En général, ces centrales sont de faible ou moyenne puissance, qui ne dépasse pas d'ordinaire les 0.5MW. Leur intérêt ne se trouve pas dans leur utilisation pour assurer seules la production de courant électrique, mais plutôt dans le soutien du réseau et des centrales principales. Elles peuvent être placées à l'extrémité d'une ligne et en cas de pointe apporter leur puissance pour rétablir la tension et redresser le courant qui a tendance à se dégrader ou tout simplement additionner leur puissance lors des pics d'ensoleillement au réseau pour parer à l'augmentation de la consommation.

L'électrification en milieu isolé : Dans certain endroits, la pose de générateurs photovoltaïques est une solution efficace pour l'électrification, comme dans les montagnes où le raccordement au réseau reviendrait plus cher, mais également pour des endroits du tiers-monde isolés des grandes villes et donc du réseau. La solution dans ce cas là est de concevoir un système photovoltaïque autonome qui sera d'ailleurs l'objet de notre étude.

1.9. Les systèmes photovoltaïques autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui produit de l'électricité grâce au soleil, mais qui fonctionne indépendamment du réseau électrique. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés où il serait beaucoup trop coûteux de raccorder l'habitation ou le local que l'on souhaite alimenter en électricité. La différence

majeure avec une installation photovoltaïque standard (raccordée au réseau), c'est la présence de batteries. Une installation photovoltaïque autonome doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a plus de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée. Cette installation se compose d'un ou plusieurs composants comme la montre la figure (1.9).[14]

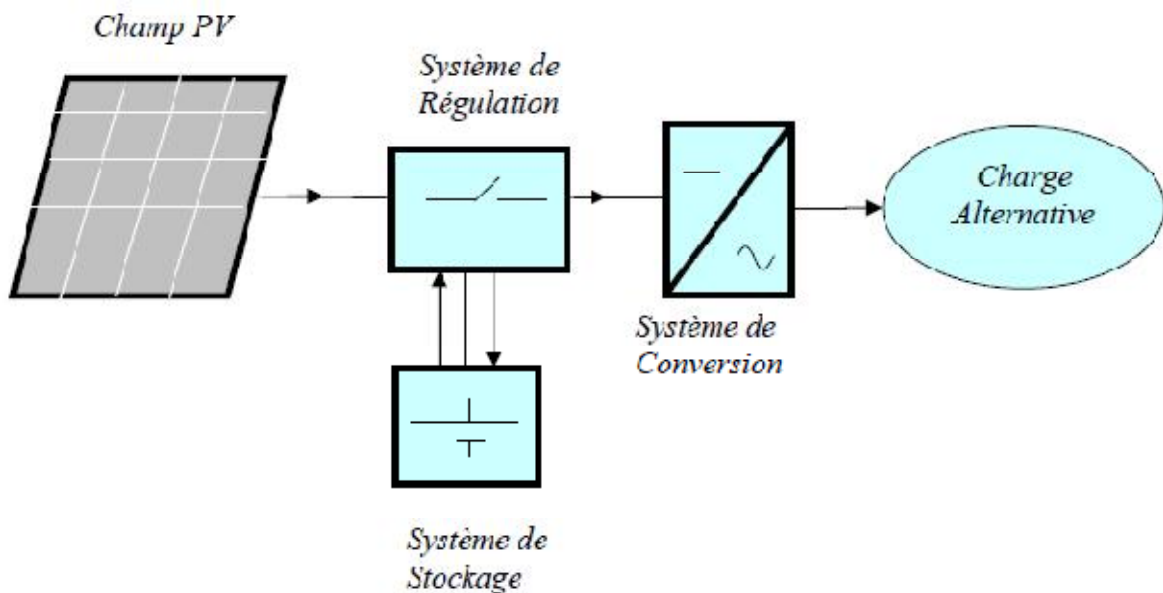


Figure (1.9) Principaux composants d'un système photovoltaïque.[14]

1.9.1. Le champ photovoltaïque PV

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques forme un module, et une multitude de modules forment un champ photovoltaïque.

1.9.2. Régulateur de charge

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments du système photovoltaïque qui permettent de contrôler la charge et la décharge de la batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. En effet lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi

afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur ce qui pourrait provoquer un court circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'applique le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension préétablis ; seuil haut lors de la charge et seuil bas lors de la décharge.

1.9.3. L'onduleur

Il y a présence de l'onduleur lorsque la charge est alternative ou lorsque le générateur photovoltaïque est connecté au réseau afin de convertir l'énergie continue du GPV en énergie alternative.

1.9.4. Système de stockage

On utilise le système de stockage dans les systèmes photovoltaïques afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours à court terme). Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce à des batteries. Les caractéristiques principales d'une batterie sont [10]:

La capacité en Ampère heure : l'ampère heure d'une batterie représente le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lequel circule ce courant. Par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

La durée de vie : un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [11].

Profondeur de décharge : la profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

La tension d'utilisation : c'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

Le rendement : c'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

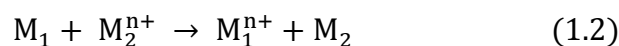
Le taux d'autodécharge : l'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

1.10. Principe général de fonctionnement d'une batterie

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques. A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante : $M_1 \rightarrow M_1^{n+} + n e^-$, M_1 étant l'espèce active de l'anode. [12]

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon $M_2^{n+} + n e^- \rightarrow M_2$, M_2 étant l'espèce active de la cathode schématisée sur la figure (1.10).

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :



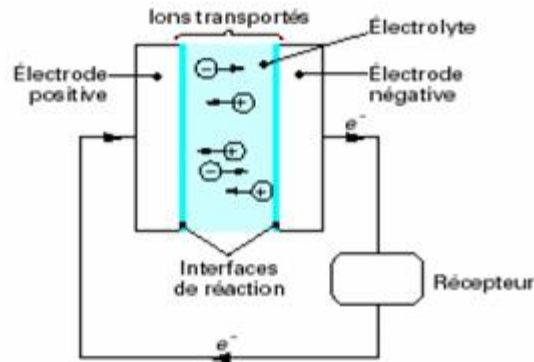


Figure 1.10 : Principe de production d'électricité dans la batterie. [12]

- **Les batteries Lithium-Ion**

Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité comme sur Figure (1.11). Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode.

L'électrode positive est constituée d'un oxyde du type LiMO_2 . Actuellement, trois de ces oxydes sont utilisés dans ces batteries : LiCoO_2 , LiNiO_2 et LiMn_2O_4 . Le séparateur est constitué d'une membrane polymère microporeuse et l'électrolyte est une solution de LiPF_6 dans un mélange de solvants organiques.

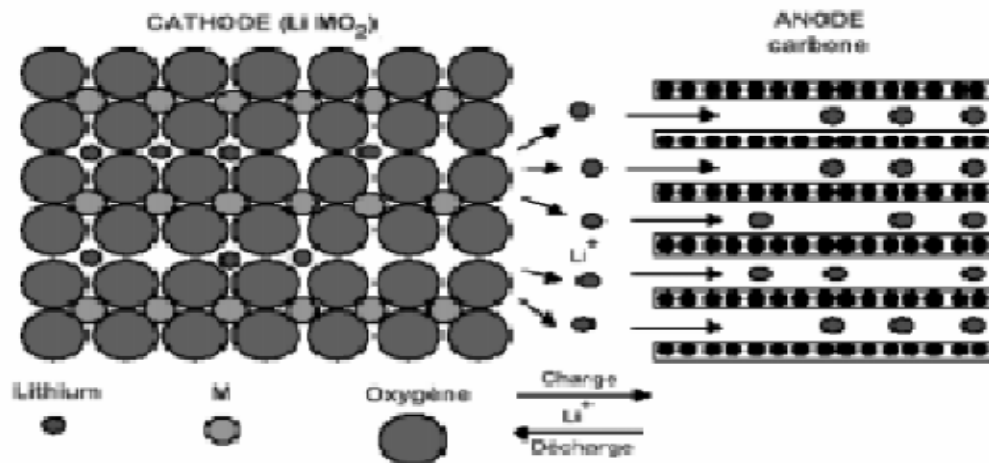


Figure 1.11 : schéma de principe de la batterie Li-Ion. [12]

Leur énergie massique et volumique est très élevée, elle est de l'ordre de respectivement 120Wh/kg et 200 W/kg . La tension varie quant à elle de manière assez linéaire avec la profondeur de décharge, et est relativement peu influencée par la température ainsi

que par la puissance de décharge. Cette caractéristique peut être mise à profit pour l'estimation de l'état de charge.

Le respect des tensions de fin de charge est primordial pour préserver la durée de vie de la batterie et pour éviter tout problème de sécurité. En effet, en cas de surcharge, la structure des électrodes peut être modifiée de manière irréversible et l'on peut assister à la création d'un dépôt de lithium métallique, ce qui conduit à la détérioration de l'accumulateur voire à son inflammation si le lithium entre en contact avec l'air.

1.11. Commande MPPT

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques. Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température.

L'extraction de la puissance maximale d'un ensemble de ces cellules dite 'Stratégie MPPT' (Maximum Power Point Tracking) permet d'une manière efficace de résoudre ce problème d'optimisation en agissant sur le rapport cyclique D du convertisseur statique à chaque fois que la puissance s'éloigne de son point de puissance maximale. Parmi les stratégies MPPT les plus utilisées, on cite par exemple : la méthode de la conductance incrémentale (I.C.), celle de la logique floue (F.L.), et la méthode perturbation et observation (P&O) traditionnelle.[1]

La figure 1.12 représente un générateur photovoltaïque associé à une commande MPPT

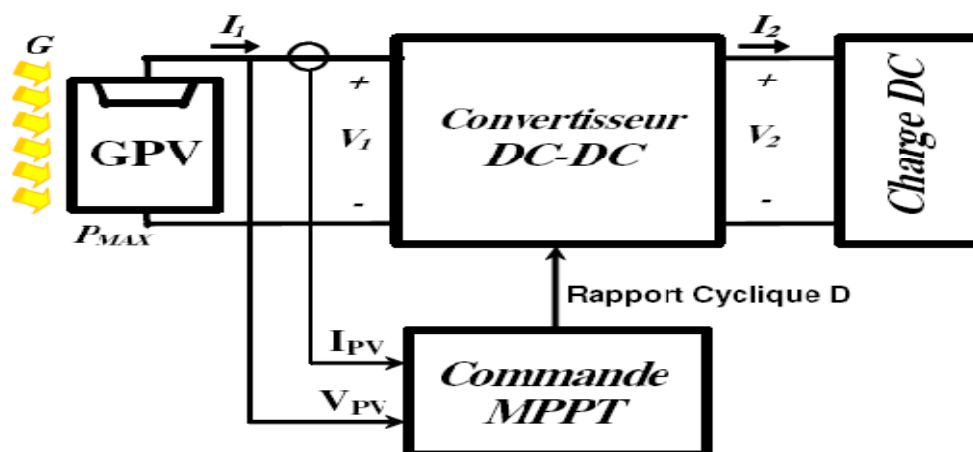


Figure 1.12 commande MPPT.[1]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables de la production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons parlé aussi de la croissance du marché du photovoltaïque ainsi que le développement de cette filière et l'évolution du cout de la production du module dans le monde. Ensuite nous avons expliqué l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leur caractéristique principale. Aussi nous avons cité les différentes applications du photovoltaïques ainsi que le principe de fonctionnement des principaux composants d'un système photovoltaïque autonome et nous avons démontré l'importance de l'emploi des systèmes de stockage dans ces systèmes de génération photovoltaïque.

Dans le chapitre suivant on va s'intéresser à la modélisation et la commande de ce système.

CHPITRE2

MODELISATION ET COMMANDE DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la modélisation de chaque élément de notre système photovoltaïque. Dans la deuxième partie nous dimensionnons le système puis nous présentons le modèle complet de notre système.

1. Modélisation du système photovoltaïque

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque avec stockage, nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink. Dans le chapitre précédent, nous avons énuméré les différents composants d'un tel système. Nous présentons sur la figure (2.1) le schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec un élément de stockage énergétique. [14]

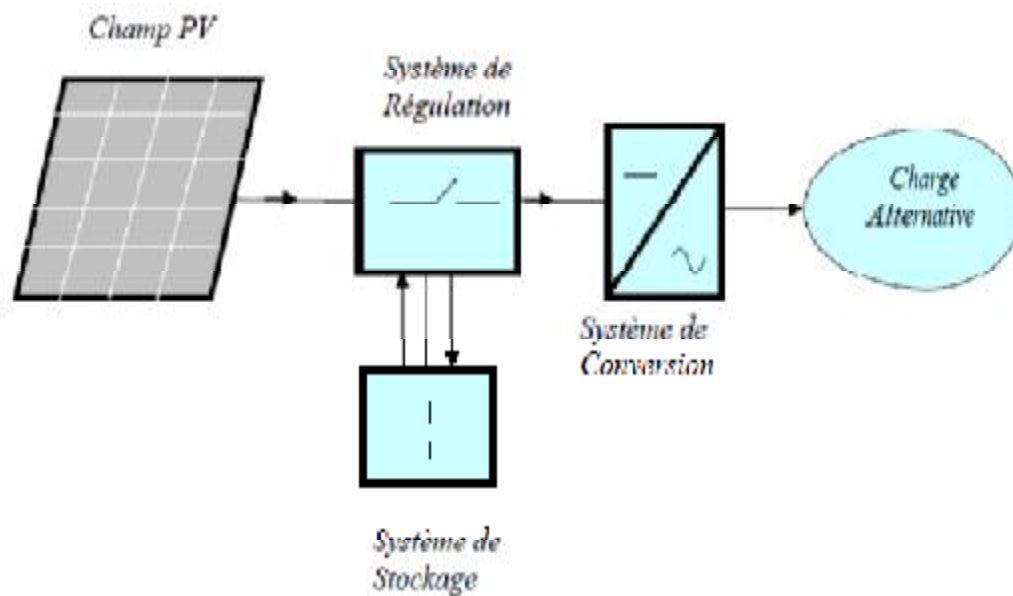


Figure 2.1 : Composants du système photovoltaïque [14].

1.1. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Nous avons utilisé le modèle électrique de Kaiser et Reise [11]. La figure (2.2) représente le modèle électrique d'une cellule solaire.

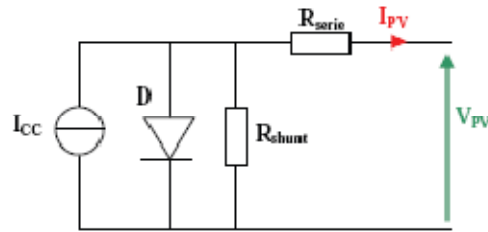


Figure 2.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. [11]

Le comportement de la cellule photovoltaïque peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivant [16]:

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{cc}} - I_{\text{SAT}} \left[\exp \left(\frac{V_{\text{cell}} + (I_{\text{cell}} \times R_{\text{serie}})}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{\text{cell}} + (I_{\text{cell}} \times R_{\text{serie}})}{R_{\text{shunt}}} \quad (2.1)$$

Où :

V_T : représente le potentiel thermodynamique.

I_{sat} : le courant de saturation de la jonction.

n , le facteur d'idéalité de la jonction.

I_{cell} : le courant fourni par la cellule.

V_{cell} : la tension aux bornes de la cellule.

I_{cc} : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit.

R_{shunt} : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction.

R_{serie} : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

1.1.1. Modèle du courant de saturation

Le courant de saturation I_{sat} dépend de la température de jonction et peut être exprimé par la relation suivant [17].

$$I_{\text{sat}} = A_0 \cdot T^3 \exp \left(\frac{-E_g}{K \cdot T} \right) \quad (2.2)$$

Pour le silicium monocristallin $A_0 = 2 \cdot 110 \cdot 10^3$ A/Kelvin .

K : la constante de Boltzman ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

1.1.2. Modèle du courant de court circuit

La variation du courant de court-circuit I_{cc} dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante [17].

$$I_{cc} = K_1 \cdot G \cdot [1 + K_2(G - G_0) * K_3(T - T_0)] \quad (2.3)$$

Avec :

G_0 : l'éclairement de référence (1000 w/m^2)

T_0 : la température de référence (298 K)

K_1 , K_2 et K_3 sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

1.2. Modélisation des convertisseurs d'énergie

1.2.1. Le convertisseur statique survolteur

Le schéma de principe du hacheur survolteur est montré par la figure (2.3). Dans cette application le mode de fonctionnement est la conduction continue. Il est utilisé premièrement pour adapter les niveaux de tension et deuxièmement pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale [18].

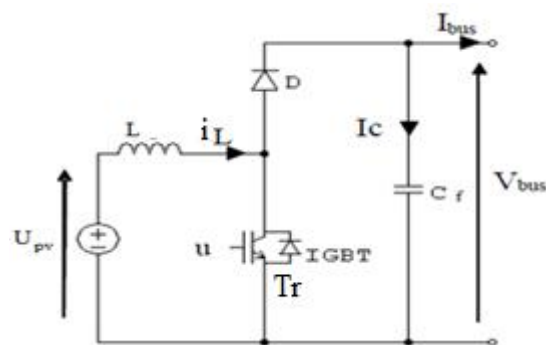


Figure 2.3 : Schéma électrique du convertisseur boost. [18]

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande u qui présente la

tension d'alimentation de la base du semi- conducteur. Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur Tr. Nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle. [19].

$$\text{Lorsque Tr est fermé : } \begin{cases} U_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \\ 0 = C_f * \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{Lorsque Tr est ouvert : } \begin{cases} U_{pv} = L_1 \frac{di_L}{dt} + V_{bus} \\ i_L = C_f * \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.5)$$

En posant $u=1$ lorsque l'interrupteur est fermé et $u=0$ pour Tr ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané.

$$\begin{cases} U_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - u)V_{bus} \\ i_L(1 - u) = C_f * \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.6)$$

Paramètre :

U_{pv} : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (V)

V_{bus} : Tension du bus continu (V).

i_L : Courant dans l'inductance et dans la pile (A)

I_{bus} : Courant du bus continu demandé aux convertisseurs (A).

L : Inductance de lissage (H) du hacheur boost

C_f : Condensateur de filtrage (F)

u : Signal de commande de l'interrupteur statique.

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'états V_{bus} et i_L . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T_d=1/f_d$, c'est-à-dire le rapport cyclique α ($\alpha=Ton/T_d$), nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes. Soit :

$$\begin{cases} U_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{bus} \\ i_L(1 - \alpha) = C_f * \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.7)$$

En analysant ces équations différentielles en vue d'effectuer une commande pour réguler la tension, nous nous rendons compte qu'il y a deux paramètres qui varient dans le système soit I_{bus} et U_{pv} . Ces deux variables sont donc considérées comme des perturbations qu'il faudra mesurer et prendre en compte dans la commande.

1.2.2. Convertisseur statique réversible en courant

La connexion des éléments de stockage sur le bus continu doit se faire par l'intermédiaire d'un convertisseur statique réversible en courant comme on peut le voir sur la figure (2.4), car la batterie peut être chargée ou déchargée. [18]

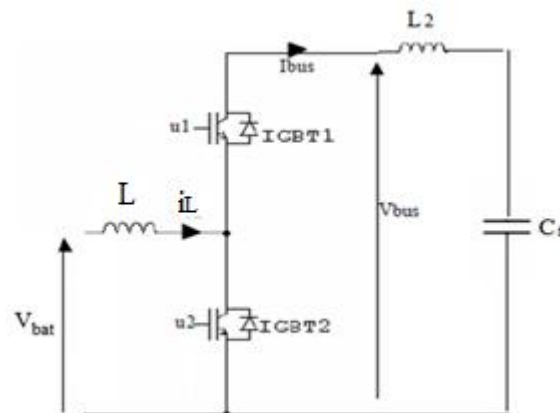


Figure 2.4 : hacheur Boost. [18]

La mise en équations de ce convertisseur fait apparaître deux types de fonctionnement : soit un fonctionnement dévolteur quand la batterie reçoit de l'énergie du bus continu soit un fonctionnement survolteur quand la batterie fournit de l'énergie au bus continu.

Dévolteur :
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{bat} - V_{bus}) \quad (2.8)$$

Survoluteur :
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{bat} \quad (2.9)$$

1.3. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batteries et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. On présente dans ce qui suit le modèle dit Li-ion (Lithium-ion).

- **Modèle Li-ion (Lithium-ion)**

Ce modèle est basé sur le schéma donné sur la figure (2.5) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

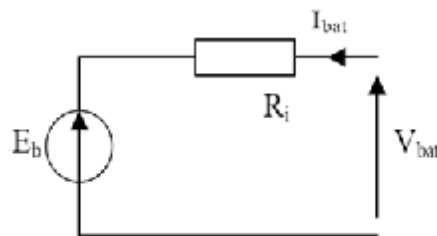


Figure 2.5 : Schéma équivalent de la batterie [20].

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat}(t) = E_b(t) + R_i \cdot I_{bat}(t) \quad (2.10)$$

Avec :

$$E_b(t) = E_0 - K \frac{C}{C-it} + Ae^{-Bit} \quad (2.11)$$

Et

C: la Capacité de la batterie(Ah).

2. Dimensionnement du système PV

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, il constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place du système. Il dépend :

des conditions environnementales du site.

du profil de consommation,

du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage.

Ainsi le dimensionnement d'un système pv requiert une campagne de mesure et une analyse préalables des spécificités du site qui ne pouvaient pas faire l'objet d'une étude complète dans le cadre de notre travail. Afin de créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter des données disponibles et accessibles pour tous [2].

● Profil de consommation

Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil donné par la figure (2.6) basé sur les habitudes de consommation d'une famille. Ce profil tient compte des périodes d'utilisation au cours de la journée des appareils comme le réfrigérateur basse consommation, le congélateur...

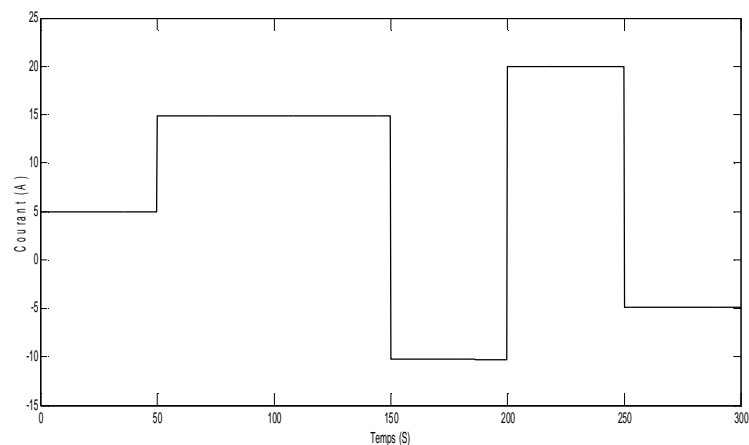


Figure 2.6: Profil de consommation [21].

2.1. Dimensionnement du champ PV

Le système a été dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation, évaluée à 2950Wh (hors chauffage, cuisson...) et comprenant l'éclairage, les appareils électroménagers de faible consommation (réfrigérateur, congélateur de classe A), l'audiovisuel...d'une habitation type d'une famille de 4 personnes. Les composants du système et l'évaluation de leurs consommations énergétiques sont les suivants :

- Eclairage basse consommation

4 lampes fluo compactes de 15W, 4h/jour,
1 lampe halogène 35W, 2h/jour.

- Electroménager

Réfrigérateur (+2°C) armoire de 229l classe A : 70W, 10h/jour,
Congélateur (-30°C) coffre de 200l classe A : 120W, 10h/jour,
Lave linge sans chauffage capacité 5kg : 300W, 1h/jour.

- Audio visuel

Chaine stéréo : 50W, 2h/jour,
Magnétoscope/lecteur DVD : 30W, 3h/jour,
TV 42cm: 50W, 3h/jour.

- Informatique

Pc portable : 30W, 3h/jour.

Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante [21] :

$$P_c = \frac{B_j}{E_j * \eta_b * \eta_i} \quad (2.12)$$

Avec :

P_c : puissance crête des panneaux PV [W],

E_j : rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable [kWh/m²/j],

η_b : rendement électrique des batteries,

η_i : rendement électrique de l'installation (tenant compte des différentes pertes et des convertisseurs).

2.2. Dimensionnement de la batterie

Le dimensionnement des batteries requiert une attention particulière afin d'augmenter la durée de vie de ces dernières, car un sous-dimensionnement sera moins coûteux mais expose les batteries à de profondes décharges et donc à une durée de vie plus courte tandis qu'un surdimensionnement est plus onéreux. Dans ce dernier cas, du fait de surdimensionnement les batteries seront rarement complètement chargées avec pour conséquence des phénomènes de sulfatation et au final une durée de vie plus courte [22]. Dans notre cas et afin de ne pas avoir un investissement trop coûteux en stockage, nous souhaitons obtenir une autonomie de 2 jours avec une profondeur de décharge de 60% pour des besoins journaliers de 3kWh. La capacité nominale des batteries est donnée par la relation suivante [2] :

$$C_b = \frac{B_j * Aut}{V_{bat} * \eta_b * D_b} \quad (2.13)$$

Avec :

C_b : la capacité nominale des batteries [Ah].

B_j : les besoins énergétiques journaliers [Wh].

Aut : le nombre de jours d'autonomie.

V_{bat} : la tension nominale des batteries [V].

η_b : le rendement énergétique des batteries.

D_b : la profondeur de décharge de la batterie.

- **Caractéristiques du système PV autonome**

Nous pouvons récapituler dans le tableau 1 suivant les caractéristiques de notre système photovoltaïque, en choisissant de fixer la tension de bus à 48 V et la tension des panneaux solaires à 35 V.

| | |
|---|-------|
| Besoin énergétique journalière : B_j (Wh) | 2950 |
| Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable : E_j (KWh/m ² /j) | 4 |
| Tension du bus continu : U_{bat} (V) | 48 |
| Nombre de jours d'autonomie : Aut | 2 |
| Rendement électrique des batteries : η_i | 80% |
| Rendement électrique de l'installation : η_b | 90% |
| Profondeur de décharge des batteries : D_b | 60% |
| Puissance crête des panneaux PV : P_{pv} (W) | 1020 |
| Capacité nominale des batteries : C_b (Ah) | 255.2 |

Tableau1 : Caractéristiques du système PV autonome [21].

Pour assurer la fourniture d'énergie électrique au système, les panneaux PV devront avoir une puissance crête de 1020Wc et une capacité nominale de stockage de 255,2Ah.

2.3. Dimensionnement des composants des convertisseurs d'énergies

- **Convertisseur élévateur (Boost)**

A partir d'une tension d'entrée de 35V, nous souhaitons avoir en sortie une tension de 48V avec une puissance nominale de 1000W. La fréquence de commutation du convertisseur est de 100Hz. Le calcul des composants L et C se fait grâce aux expressions suivantes [18] :

$$L = \frac{V_{dc}}{4 \cdot f_c \cdot \Delta I_{pv}} \quad (2.14)$$

Application numérique :

$V_{dc} = 48V$, $f_c = 100$ Hz, $\Delta I_{pv} = 1.47$ A, (5% de $I_{pv} = 29.5A$)
 D'où : $L = 0.081$ H.

$$C_f = \frac{I_{pv}}{4 \cdot f_c \cdot \Delta V_{dc}} \quad (2.15)$$

Application numérique :

$I_{pv}=29.5A$, $f_c=100$ Hz, $\Delta V_{dc}= 2.4V$, (5% de $V_{dc}=48V$)

D'où : $C_f=0.03F$.

Avec :

V_{dc} : tension aux bornes de la charge.

I_{pv} : courant du générateur photovoltaïque.

ΔI_{pv} : ondulation du courant photovoltaïque.

ΔV_{dc} : ondulation de la tension de charge.

F_c : fréquence de découpage.

Les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie sont autour de leurs valeurs moyennes.

Pour obtenir une tension de bus ($V_{bus}=V_{dc}=48$ V), la tension délivrée par le GPV étant égale à 35 V, le rapport cyclique α doit être égal à 28%.

Le tableau 2 récapitule les valeurs numériques des différentes grandeurs du système.

| F (HZ) | U_{PV} (V) | I_{PV} (A) | V_{BUS} (V) | I_{bus} (A) | P(W) | L(H) | $C_f(F)$ |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------|-------|----------|
| 100 | 35 | 29.4 | 48 | 20.83 | 1000 | 0.081 | 0.03 |

Tableau2 : Récapitulatif des paramètres du système.

Avec :

P : puissance du générateur photovoltaïque.

• **Convertisseur réversible en courant (Buck- Boost) :**

Le calcul de l'inductance de lissage est réalisé comme précédemment, à la seule différence que ce convertisseur possède deux modes de fonctionnement distincts, soit en dévolteur soit en survolteur [18].

$$L = \frac{V_{dc}}{4 \cdot f_c \cdot \Delta I_{pv}} \quad (2.16)$$

Application numérique :

$V_{dc} = 48V$, $f_c = 100 \text{ Hz}$, $\Delta I_{pv} = 1.47 \text{ A}$, (5% de $I_{pv} = 29.5A$)

D'où : $L = 0.081 \text{ H}$.

3. Commande des convertisseurs statiques

L'objectif de ce chapitre est de mettre en place une stratégie de commande des convertisseurs statiques qui composent notre système PV pour satisfaire les demandes énergétiques du foyer. La mise en place de la stratégie de commande passe par deux étapes :

Dans un premier temps, il faut calculer les lois de commande rapprochées de chacun des convertisseurs statiques pour contrôler certaines variables d'état du système (courant, tension).

Dans un deuxième temps, il faut mettre au point une stratégie de gestion l'énergie. Cette stratégie d'énergie permet d'exprimer les différentes consignes pour les convertisseurs statiques et la batterie. Le choix de la stratégie de commande correspond à la définition du type de commande (tension ou courant) qu'il faut appliquer au convertisseur statique survolteur liant le GPV au bus continu, et au convertisseur réversible en courant liant la batterie au bus continu. La figure (2.7) représente la structure de la stratégie d'énergie utilisée dans notre système PV.

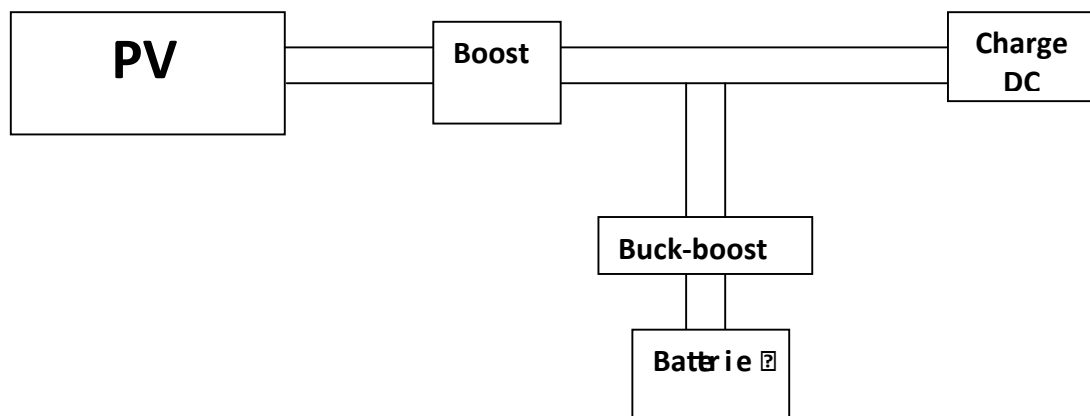


Figure 2.7 : La structure de la stratégie d'énergie utilisée dans notre système PV.

3.1. Commande du convertisseur Boost

La commande du convertisseur doit maintenir la tension de bus à sa référence malgré les demandes de puissance sur le bus continu et malgré les variations de tension de la batterie. La technique utilisée est la commande rapprochée (Modulation de Largeur d'Impulsion). Celle-ci sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de la façon suivante : (à partir des consignes imposées et des mesures prélevées sur le générateur et la charge comme le montre la figure (2.8), élabore la séquence de conduction et de blocage de l'interrupteur et élabore les signaux logiques nécessaires à sa commande en fonction du type de convertisseur utilisé [23]).

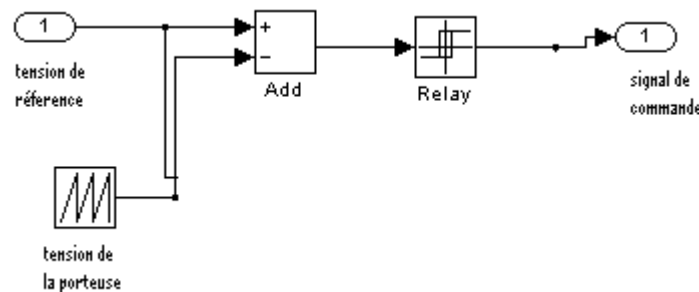


Figure 2.8: Signal à MLI [23].

- **Boucle de courant**

Pour le contrôle du courant i_L dans l'inductance, il faut considérer le schéma bloc de la figure (2.9) obtenu à partir des équations (2.7) suivantes :

$$\begin{cases} U_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{bus} \\ i_L(1 - \alpha) = C_f \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.7)$$

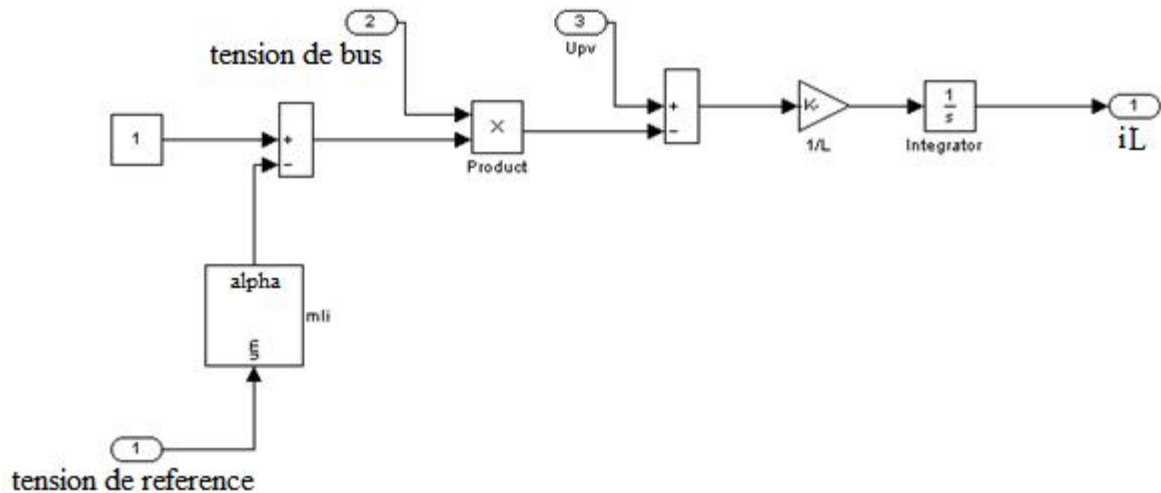


Figure 2.9 : Schéma bloc en courant du convertisseur boost.

Pour pouvoir définir un correcteur de manière simple, nous pouvons linéariser le comportement du système [24].

La linéarisation se fait en se basant sur les équations ci - dessous :

$$\begin{cases} U_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{bus} \\ i_L(1 - \alpha) = C_f \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.7)$$

On posant : $V_{L'} = L \frac{di_L}{dt}$ (2.17)

Nous obtenons alors :

$$\alpha = \frac{V_{L'} - U_{pv_mesuré}}{V_{bus_mesuré}} + 1 \quad (2.18)$$

Où : $V_{L'}$ est une nouvelle grandeur de commande représentant la référence de tension aux bornes de l'inductance.

Ainsi nous obtenons un transfert linéaire entre $V_{L'}(p)$ et $I_L(p)$:

$$T_1(p) = \frac{I_L(p)}{V_{L'}(p)} = \frac{1}{Lp} \quad (2.19)$$

Mise en place d'un régulateur :

Le régulateur utilisé dans notre commande est un régulateur PI (proportionnel intégrateur). Le schéma de commande le plus souvent utilisé pour la commande des systèmes linéaires est celui de la figure (2.10).

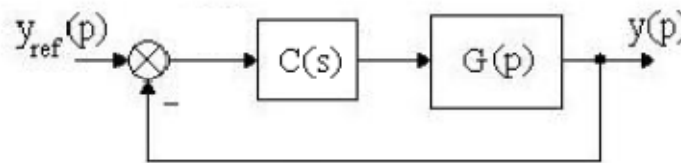


Figure 2.10 : Schéma général de commande.

Où : $G(p)$ représente la fonction de transfert du système à commander et $C(s)$ celle du régulateur qui est ajouté afin d'imposer au système en boucle fermée un fonctionnement donné. Les performances imposées sont généralement la stabilité, la rapidité et la précision.

Pour un système du 1^{er} ordre :

$$G(p) = \frac{G_0}{1+Tp}$$

Où : G_0 est le gain statique et T la constante de temps.

Dans notre cas :

$$G(p) = \frac{G_0}{p} = \frac{1}{Lp} \quad \text{car} \quad \frac{I_L(p)}{V_{L'}(p)} = \frac{1}{Lp}$$

Et

$$C(s) = \frac{pK_1+K_2}{p}$$

Ainsi nous obtenons une fonction de transfert en boucle fermée de second ordre sous la forme suivante :

$$G(p)_{BF} = \frac{G_{0BF}}{1+T_{BF}p} = \frac{\frac{(pK_1+K_2)G_0}{p^2}}{1+\frac{(PK_1+K_2)G_0}{p^2}} = \frac{pK_1G_0+K_2G_0}{p^2+K_1G_0p+K_2G_0} = \frac{W_n^2}{p^2+2ZW_n+W_n^2}$$

Où : Z est le coefficient d'amortissement , w_n est la pulsation non amortie

En imposant Z et W_n nous déterminons K_1 et K_2

De cette manière nous avons mis un correcteur dans notre boucle de régulation et le schéma de commande est représenté sur la figure (2.11).

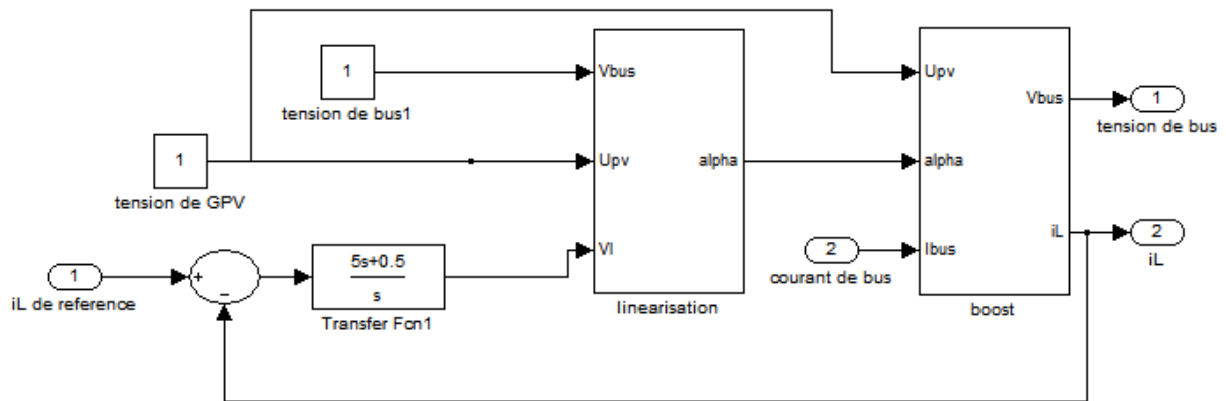


Figure 2.11 : Boucle de courant.

● Boucle de tension

Pour la définition du régulateur de tension, nous pouvons supposer que la boucle de courant est parfaite, ainsi le courant dans l'inductance vaut $I_L = I_{Lref}$ au sens des valeurs moyennes et sur une période de découpage, $I_d = (1-\alpha) I_{Lref}$. La tension moyenne aux bornes de l'inductance étant nulle, la tension aux bornes de l'interrupteur vaut $V_t = U_{PV}$ et nous savons par ailleurs que $V_t = (1-\alpha) V_{bus}$. Nous pouvons en déduire que $(1-\alpha) = U_{PV}/V_{bus}$.

Pour réaliser la linéarisation de cette boucle, nous utilisons la même méthode que celle utilisée pour la boucle de courant [24].

$$\text{En partant des équations : } \begin{cases} U_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{bus} \\ i_L(1 - \alpha) = C_f \frac{dV_{bus}}{dt} + I_{bus} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\text{Et en posant : } C_f \frac{dV_{bus}}{dt} = I_{c'} \quad \text{et} \quad i_L = i_{Lref}$$

nous deduisons
$$i_{Lref} = \frac{V_{bus_mesuré}}{U_{pv_mesuré}} (I_{C'} + I_{bus_mesuré}) \quad (2.20)$$

Ainsi nous obtenons une relation linéaire entre $I_{C'}(p)$ et $V_{bus}(p)$:

$$T_2(p) = \frac{V_{bus}(p)}{I_{C'}(p)} = \frac{1}{C_f p} \quad (2.21)$$

Le schéma de commande est de la tension de bus est représenté sur figure (2.12).

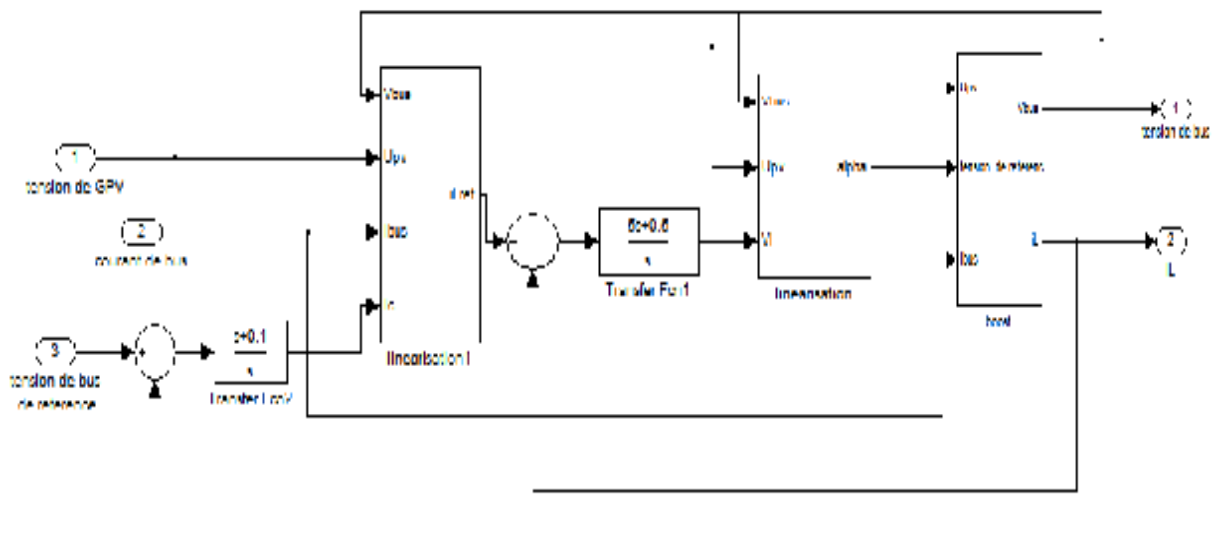


Figure 2.12: boucle de tension.

Mise en place du correcteur

La structure du correcteur est la même que pour une boucle de courant, la différence réside dans la fonction de transfert:

$$G(p) = \frac{G_0}{p} = \frac{1}{C_f p} \quad \text{car} \quad \frac{V_{bus}(p)}{I_{C'}(p)} = \frac{1}{C_f p}$$

3.2. Commande du convertisseur Buck- Boost

Ce convertisseur est commandé pour contrôler les échanges d'énergie entre le bus continu et les éléments de stockage. Pour cela, le calcul de la référence du courant est réalisé à

partir de la puissance demandée sur le bus continu et la tension aux bornes de la batterie. La régulation réalisée est une boucle de courant pour pouvoir garantir le contrôle de la puissance dans le convertisseur.

Les signaux de commandes u_1 et u_2 du convertisseur statique sont générés à l'aide d'un régulateur à hystérésis.

La commande par hystérésis illustrée sur la figure (2.13), appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre le courant de référence et le courant produit par le hacheur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, est le principal atout de cette technique [25].

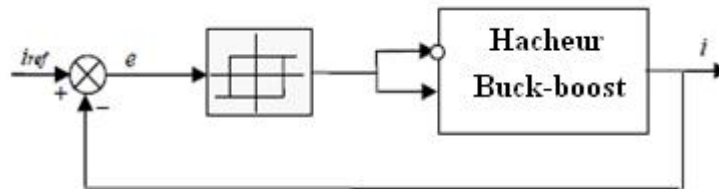


Figure 2.13: Schéma de commande par hystérésis [25].

Boucle de courant du convertisseur (buck- boost)

Afin de contrôler le courant i_L dans le hacheur buck-boost nous avons implanté le schéma bloc 2.14:

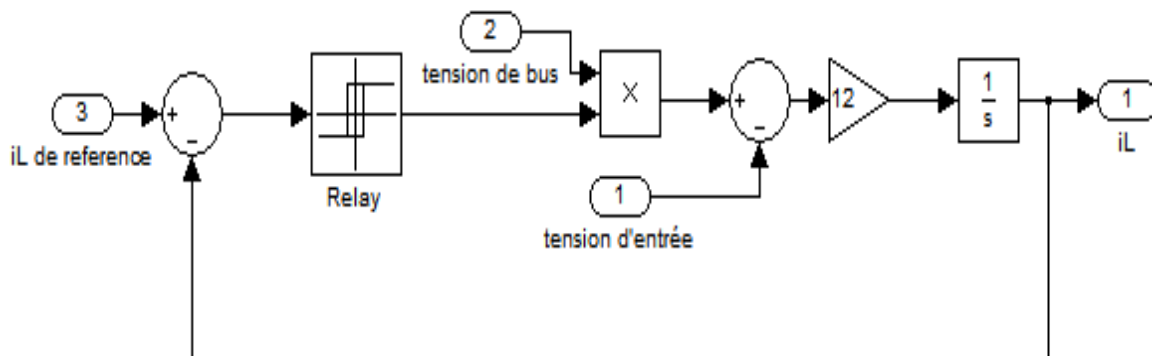


Figure 2.14: Hacheur Buck- Boost et sa commande.

• **Boucle de commande de la batterie**

Le schéma global de la commande d'une batterie est représenté ci-dessous

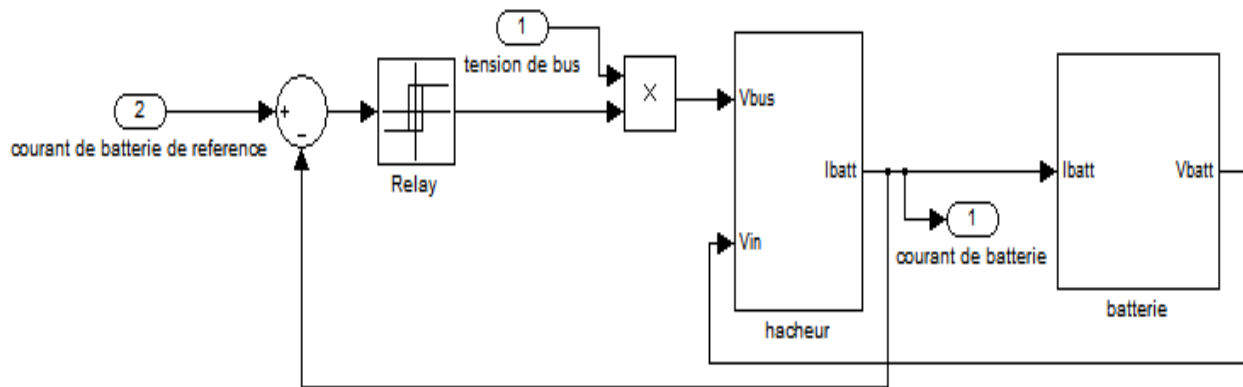


Figure 2.15 : Commande de la batterie avec un hacheur Buck-Boost.

Les résultats de simulations seront donnés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE3
SIMULATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les modèles de simulation de tous les éléments constituant le système photovoltaïque, on se consacre à présenter les résultats de simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV). Dans notre analyse, nous avons conçu un système PV où le générateur est obtenu à partir de 10 modules (5 en parallèle et 2 en série de 100Wc au point de puissance maximum), ainsi que les convertisseurs statiques et le système de stockage de capacité 255.2Ah. Les résultats sont les suivants :

1. Simulation d'une cellule photovoltaïque

Pour visualiser la caractéristique courant-tension ainsi que la caractéristique puissance-tension d'une cellule PV et de l'influence de l'ensoleillement(G), et la température sur cette dernière, nous avons implémenté un modèle d'une cellule PV sous matlab- simulink donné par la figure (3.1); il a comme paramètres d'entrée : la tension aux bornes de la cellule PV (U_{pv}), l'ensoleillement(G) et la température (T).

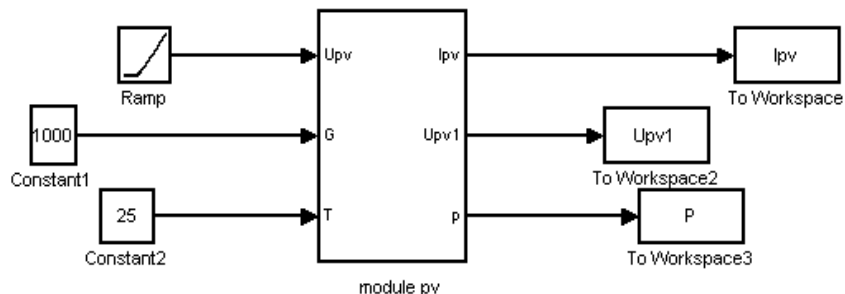


Figure3.1 :Cellule PV sous matlab-simulink.

Pour différents éclairagements et températures les résultats sont représentés sur figure (3.2).

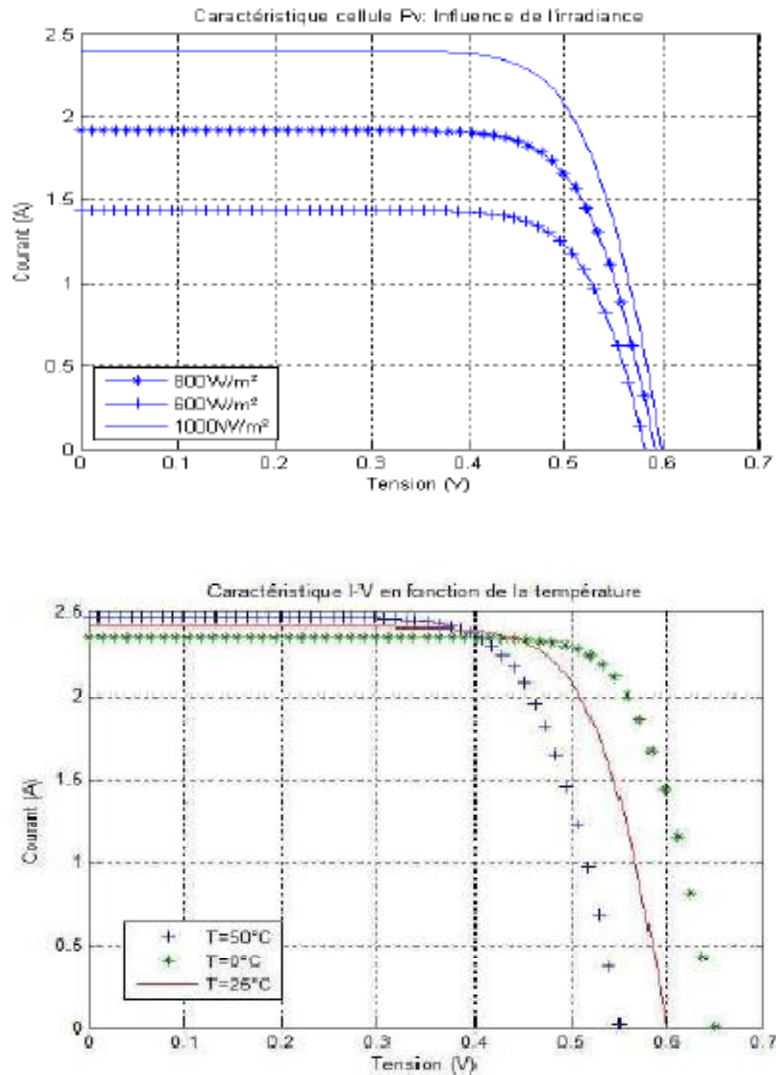


Figure 3.2 : Influence de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV

Nous remarquons que la tension à vide V_{oc} et le courant de court-circuit (I_{cc}) pour un éclairement de $1000W$ et une température $T=25^{\circ}C$ ont pour valeur de $0.6V$ et de $2.4A$ respectivement.

Nous remarquons aussi que le courant débité par la cellule est proportionnel à l'ensoleillement et varie peu avec la température tandis que la tension V_{oc} est proportionnelle à la température et reste insensible à l'éclairement.

L'énergie électrique produite par la cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Sans éclairement, il n'y a pas de photon et donc pas de création de paires électron-trou photo générée et donc pas de courant.

2. Simulation du module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est obtenu à partir de la mise en parallèle et/ou série de plusieurs cellules PV. Il existe sur le marché des puissances normalisées de modules PV, on peut ainsi retrouver des modules de puissance nominale 50W, 100W ou encore 165W. Suivant le profil de consommation que nous avons défini dans le chapitre 2, nous avons choisi un module PV de 100W qui est modélisé avec un seul bloc Simulink comme pour une cellule. Le résultat obtenu est donné par la figure (3.3)

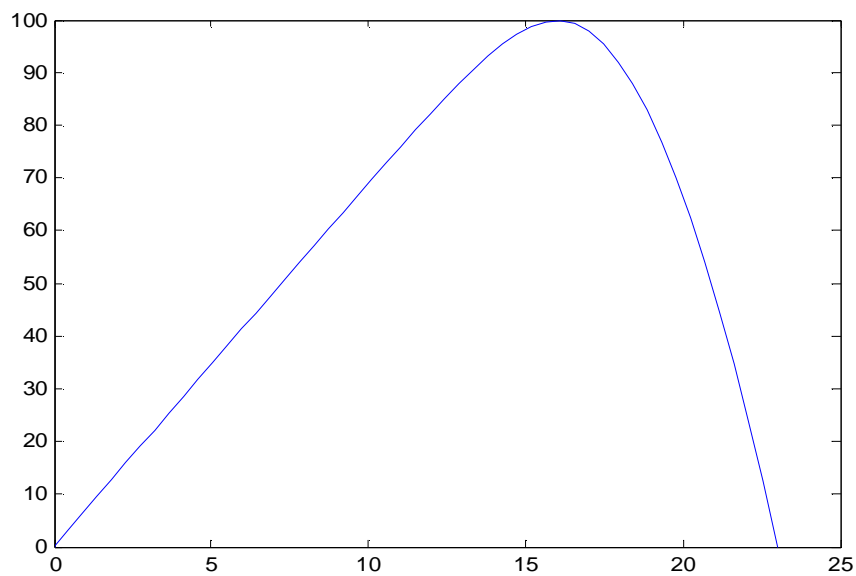


Figure 3.3: Caractéristique puissance-tension $P=f(V)$

La tension correspondant à la puissance maximale de 100Wc est de 17.32V.

Pour obtenir les 1000Wc correspondant à notre profil de consommation (source PV), nous disposerons de 10 modules (5 en parallèle et 2 en série) comme illustré sur la figure (3.4).

Les résultats obtenus dans les figures 3.6 et 3.10 montrent que le système PV ainsi conçu converge au bout d'un temps de l'ordre de 200 ms pour la tension du bus et le courant de batterie.

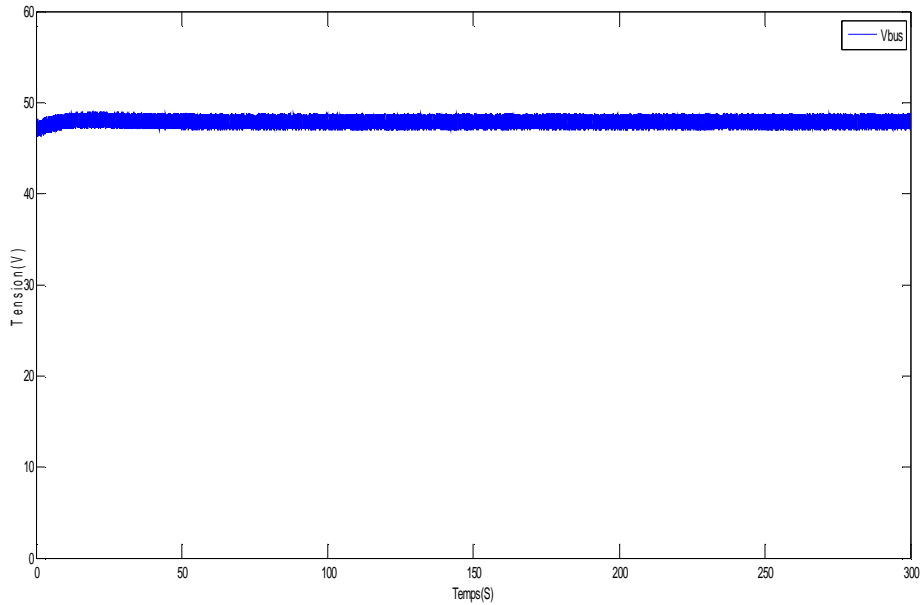


Figure 3.6 : visualisation de la tension sur le bus continu.

Cette courbe représente l'évolution de la tension du bus continu pour un temps de simulation de 300s.

Nous constatons que la tension du bus continu est bien maintenue constante à 48V malgré les demandes de puissance sur le bus.

L'enveloppe des oscillations sur la figure (3.6) est autour des 2.5V ce qui est bien conforme au dimensionnement fait au Chapitre 2 par la relation (2.4) suivante $C_f = \frac{I_{pv}}{4.f_c.\Delta V_{dc}}$ car l'ondulation devait être limitée à 2.4V

La courbe de la figure (3.9) montre le régime transitoire de la tension du bus continu.

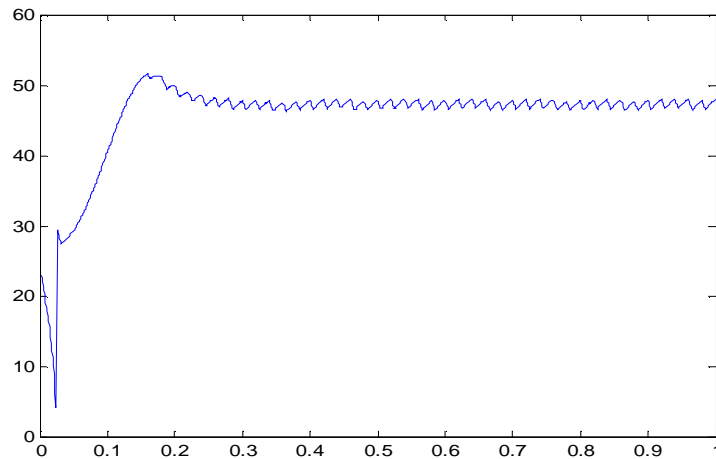


Figure 3.9 : Régime transitoire de la tension du bus continu.

Aussi nous constatons sur la figure (3.10) que le courant dans la batterie suit bien le profil de puissance (I_{batref}).

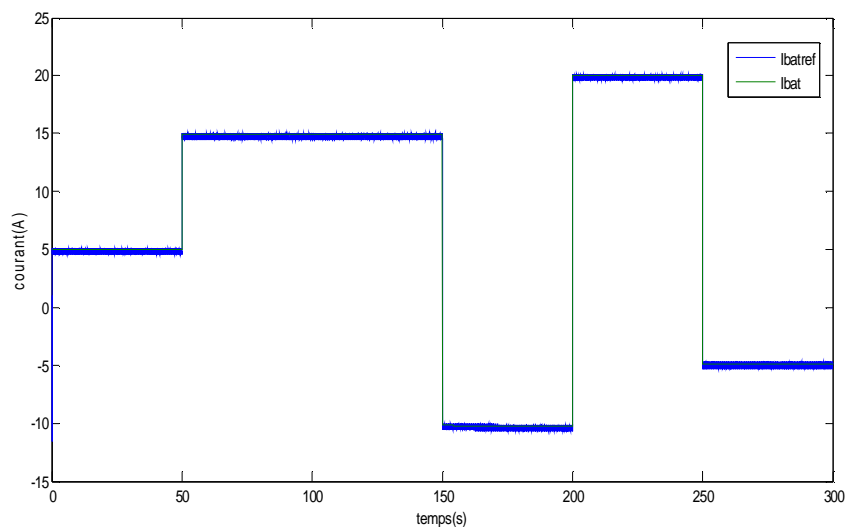


Figure 3.10 : courant de batterie et sa référence.

L'ondulation maximale de courant dans la batterie est de 1.5A (5% de $I_{pv}=29.5$), ce qui est conforme à l'ondulation désirée de 1.47A utilisée pour dimensionner l'inductance de lissage dans le Chapitre2.

Conclusion

D'après les résultats obtenus lors de notre simulation on voit bien que la valeur de la tension imposée au bus continu est bien respectée, car la tension est bien contrôlée par le convertisseur statique malgré les contraintes liées aux demandes de puissances. Ainsi nous remarquons aussi que le courant dans la batterie suit bien la référence avec une légère ondulation de 1.5A.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but l'étude de stratégies et structures de commande pour le pilotage du système photovoltaïque. Le système PV étudié est très souvent utilisé pour l'alimentation en énergie électrique d'un site isolé. Celui-ci consiste en une habitation individuelle utilisant en particulier de l'électroménager fonctionnant en courant continu. Le système PV étudié comporte :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique élévateur de tension et un convertisseur réversible en courant.
- une batterie pour stockage.

Pour construire les stratégies de commande, il a fallu mettre en place les lois de commande spécifiques pour les convertisseurs statiques, permettant le pilotage de courant du système.

Après avoir présenté les modèles des éléments du système PV, nous avons mis en œuvre un modèle de simulation du système global, des régulateurs ont également été ajoutés au modèle de simulation. Ceci permet de valider la stratégie de commande et de visualiser l'ensemble des variables.

Plusieurs perspectives peuvent être évoquées autour des travaux de ce mémoire, car on n'a pas pris en considération tous les paramètres perturbateurs de ce système comme la variation des conditions météorologiques qui ont une influence sur la puissance générée par le générateur et de ce fait l'étude de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Il convient en outre, de préciser que l'alimentation convenable d'un site isolé nécessite un apport en énergie continu (de jour comme de nuit, de beau ou mauvais temps). Pour ce faire, actuellement on développe plutôt des solutions hybrides qui permettent de répondre à un besoin énergétique allant d'une simple alimentation comme c'était le cas dans notre étude jusqu'à l'électrification complète de villages.

Références bibliographiques

- [1]: Belhadj Mohammed, (Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome), thèse de Magister UNIVERSITE De BECHAR, 2008.
- [2] : Akassewa Tchapo SINGO, (Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome), thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010
- [3] : Rémi de BETTIGNIES, (Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués). Thèse de doctorat. Université d'Angers. 2003.
- [4] : BENAÏCHA Mouna. (Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque). Thèse de magister en physique. Université Colonel Hadj Lakhdar Batna (Algérie).2007.
- [5]: EPIA, european photovoltaic industry association.
- [6] : ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, <http://www.ademe.fr>
- [7] : <http://www.energieplus-lesite.be>.
- [8] : bp solar (Effet Photovoltaïque, Présentation, 2000)
- [9] : Inès Massiot, Rapport de stage de Master 2, 2010
- [10] : N. Achaïbou, A Malek , N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [11]: I. Tsuda, K. Kurokawa ,K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 –508,1994.
- [12] :A. Marquet, “Stockage d'électricité dans les systèmes électriques”, Techniques de l'Ingénieur, traité D4030, 1998.
- [13] : Cédric CABAL, (Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque), thèse de doctorat à l'UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2008

[14] : Aminata. Sarr, «Simulation du système hybrides Photovoltaïque », thèse de doctorat 1998, canada.

[16]: R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.

[17]. F.Benyarou, « Conception Assistée Par Ordinateur des Système PV Modélisation, dimensionnement et simulation », thèse de doctoral en physique énergétique, Tlemcen,2004.

[18]: J.Lachaize, M.Fadel, S.Caux, P.Shott, L.Nico Modeling and Control of a fuel cell system for electrical rail transport EPE 2003 – Toulouse, France .

[19] Jean-Paul Ferrieux, Francois Forest

Alimentations à découpage, Convertisseurs à résonance. Principes-composants -modélisation. Dunod 3e édition – 2001 – ISBN 2-10-004137-1

[20] Chaurey, C and S Deambi« Battery storage Power systems».Renewable Energy 2 (3):227-235,1992

[22]: Julia Schiffer, Dirk Uwe Sauer, Henrik Bindner , Tom Cronin, Per Lundsager, Rudi Kaiser “Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems” Journal of Power Sources n°168 (2007), pp. 66–78

[23] :Michel Pinard, « Convertisseurs et Electronique de Puissance », Dunod, 2007.

[24] :M. Fadel Lois de commande pour une alimentation AC/DC à absorption de courant sinusoïdal,2000.

[25] : D. Ould Abdeslam, Jean-Philippe Urban «Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques» conférence internationale (ICEEA 2008), Sidi Bel-Abbes 2008.

[26] : Quoilin Sylvain, Centrales solaires à concentration, 2010