

g60

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine: Sciences et Technologie
Filière: Electrotechnique
Spécialité: Réseaux électriques

Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de master Académique

Energie solaire photovoltaïque

Présenté par :

***Bendjeddou Mohamed Lamine**
***Bendjeddou Mehdi**

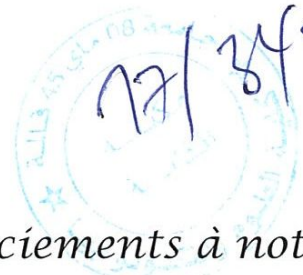
Sous la direction de :
***Mr Bouzit ALI**



Jun 2017

Remerciement

17/3482



Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. BOUZITE ALI notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, tout particulièrement pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de cette mémoire.

Et tous les professeurs de département de Génie électrique A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.

Dédicace

Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont soutenue durant la réalisation de ce mémoire.

Mes très chers parents : Père, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à toi que j'ai atteint mon but... Ma très chère maman, je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui m'ont guidés durant mon parcours. A mes frères A tous mes tantes, mes oncles et leurs familles A tous mes cousins et cousines A mes intimes et à toute personne qui me connaît Je ne manquerais pas de souligner l'assistance sans faille De mes amis : Housseem, Doudou, Zinou , Sedam

Bendjeddou Mehdi et Amine

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre01: Energie solaire et la conversion photovoltaïque

1.1. Introduction.....	4
1.2. Historique.....	4
1.3. L'énergie solaire	6
1.3.1. L'énergie solaire thermique	7
1.3.2.L'énergie solaire photovoltaïque	7
1.4.L'effet photovoltaïque	8
1.4.1.Semi-conducteur.....	8
1.4.2.Les principaux semi-conducteur utilisé en PV	9
1.4.3.Dopage semi-conducteur.....	10
1.4.3.A. Semi-conducteur type P	10
1.4.3.B. Semi-conducteur type N.....	11
1.5.Formation de la jonction PN	11
1.6.La cellule PV	13
1.6.1.Influence de l'éclairement.....	18
1.6.2.Influence de la température	19
1.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	22
1.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	22
1.7.2.Association des Cellules Photovoltaïques en Série	24

Sommaire

1.8. Protection classique du GPV.....	29
1.9. Avantages et inconvénient de l'énergie Photovoltaïque.....	31
1.9.1. Les avantages	31
1.9.2. Les inconvénients.....	32
1.10. Conclusion	32

chapitre02: Les convertisseurs statiques DC/DC et DC/AC

2.1. Introduction.....	34
2.2. Les onduleurs.....	34
2.2.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur	34
2.2.2 Onduleur monophasé.....	34
2.2.2.1. Onduleur monophasé en demi pont	35
2.2.2.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H)	35
2.2.3 Onduleur triphasé	36
2.3 Le convertisseurs DC-DC	37
2.3.1 Le convertisseurs DC/DC, élévateur de tension (boost)	37
2.3.2. Convertisseur abaisseur de tension (BUCK)	40
2.4 Avantage de convertisseur BOOST	42
2.5. Convertisseur Buck-Boost	42
2.6 Conclusion	44

chapitre03:Etude sur les régulateurs MPPT

3.1. Introduction	46
3.2. Connexion directe entre la source et la charge	46
3.3. Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque.....	48
3.4. Principe de la recherche du point de puissance maximal.....	50
3-4-1 Généralités.....	50
3.5. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance maximum.....	52
3.5.1 Les méthodes indirectes.....	52
3.5.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	53
3.5.1.2 La méthode de court-circuit.....	53
3.5.2 Les méthodes directes.....	53
3.5.2.1 La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	54
3.5.2.2 La méthode incrémentation de la conductance.....	56
3.5.2.3 Méthode à contre réaction de la tension.....	58
3.5.2.4 Méthode contre réaction de courants.....	59
3.6. Conclusion	60
Conclusion générale.....	61
Bibliographie	
Annexe	

Liste de figures

CHAPITRE01: Energie solaire et la conversion photovoltaïque

Fig.1:Des panneaux solaires photovoltaïques.....	8
Fig2: structure atomique du silicium.....	9
Fig.3: structure d'atome germanium.....	10
Fig.4:structure atomique d'un dopage semi-conducteur type P.....	11
Fig. 5:structure atomique d'un dopage semi-conducteur type N.....	11
Fig. 6: Génération de la paire électron-trou.....	12
Fig. 7: Structure atomique de La jonction PN.....	13
Fig. 8: symbole de cellule PV.....	13
Fig. 9:Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	14
Fig. 10: Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque.....	16
Fig. 11: Caractéristique I-V d'une cellule PV.....	17
Fig. 12: Caractéristique P-V d'une cellule PV.....	18
Fig. 13.caractéristique $I=f(v)$ et $P= f(v)$ d'une cellule photovoltaïque.....	18
Fig. 14: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	19
Fig. 15: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	20
Fig. 16: Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	20
Fig. 17: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.....	21
Fig. 18 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.....	22
Fig. 19 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température.....	22
Fig. 20. a: Association des modules en parallèle.....	23
fig.21: Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	24
fig. 22:Caractéristique I-V racordée des cellules en parallèle.....	24
fig. 23: Caractéristique P-v raccordée des cellules en parallèle.....	25
Fig. 24-b: Association des modules en série.....	26

Liste de figures

Fig. 25: Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	26
Fig. 26: Caractéristique P-V des cellules PV accorder en série	27
Fig. 27: Caractéristique P-V des cellules PV accorder en séries.....	27
Fig. 28: Block du module dans SIMULINK.....	28
Fig. 29: Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement.....	29
Fig. 30: Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.....	30
Fig. 31:Caractéristique P-I du module PV selon l'éclairement.....	30
Fig. 32: Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.....	31
Fig. 33: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	32

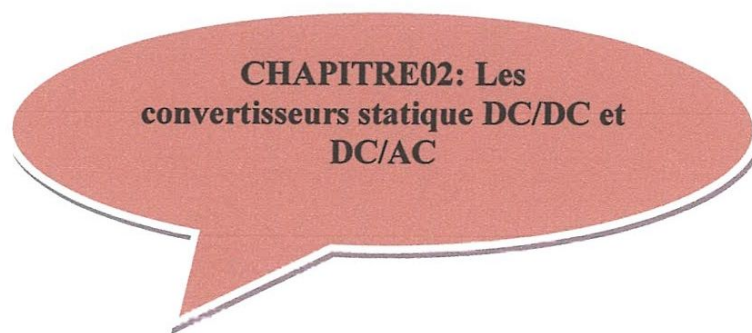


Fig.34: Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.....	36
Fig.35: : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont.....	37
Fig.36: Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.....	37
Fig.37 : Circuit équivalent du boost convertisseur boost.....	38
Figure 38 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....	39
Fig.39: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	39
fig.40: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.....	40
Fig.41: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.....	42
Fig.42: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.....	44

Liste de figures

CHAPITRE03: Etude sur les régulateurs MPPT

fig.43: caractéristique courant-tension d'une cellule PV.....	47
Fig.44: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.....	48
Fig. 45: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.....	49
Fig.46 : Etage d'adaptation d'un GPV-charge.....	50
fig.47 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	52
Fig.48: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	52
Fig.49: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.....	53
Fig.50: Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	56
Fig.51: Algorithme de MPP'I' a base de la méthode P&O.....	57
Fig.52 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance.....	59
Fig.53: Algorithme d'incrémentacion de la conductance.....	59
Fig.54: Méthode contre réaction de la tension.....	60
Fig.55: Méthode contre réaction de courants.....	61

Listes de tableaux

Tableau (1): Valeurs des paramètres de simulation.....	17
Tableau (2): Valeurs des paramètres de simulation.....	28

Notation

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

K : coefficient de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J / K). **T_c** : Température de la cellule (C°).

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie dans la nature se trouve en abondance sous plusieurs formes tel que l'énergie renouvelables; l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et des énergies épuisables; fossiles (charbon, gaz, ..).

La transformation de ces énergies fossiles devient de plus en plus rare, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers plus tard si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la et la consommation.[1]

A ce sujet, Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Soleil source de tous les énergies qui à une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides).[2]

L'abondance de l'énergie solaire en Algérie est la plus grande superficie de notre pays. Ce qui permet de l'intéressé à l'énergie solaire dans le futur pour économiser de pétrole.

Dans ce contexte l'énergie solaire apparaît comme une source importante telle que le rayonnement solaire qui tombe sur la surface de la terre est important pour notre vie, c'est pour ça on s'intéresse à l'énergie solaire PV peut produire de l'électricité.

Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes Photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, en plus ce dernier ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

Introduction générale

Notre mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre nous présentons une généralité sur l'énergie solaire PV. En commençant par des notions sur l'énergie solaire, Dans deuxième temps nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque et la définition de la cellule et leur caractéristique électrique, ensuite on va montrer l'influence de la température et l'éclairement et les regroupements des cellules. Et nous finissons ce chapitre par des avantages et des inconvénients de système PV.

Le deuxième chapitre présente les différents types des convertisseurs statiques utilisé dans le système photovoltaïque et leur principe du fonctionnement.

Dans le troisième chapitre nous montrons le problème de la connexion direct entre le générateur photovoltaïque et la charge et la solution de ce problème, ensuite nous présentons les différents techniques pour suivre et optimiser la puissance maximale.

Chapitre01:
Energie solaire et la conversion photovoltaïque

1.1 Introduction

L'énergie solaire est la seule énergie renouvelable dont le potentiel pourrait (sur la base d'un calcul théorique) couvrir tous les besoins énergétiques de la planète. L'énergie solaire est considérée comme inépuisable (encore 5 milliards d'année), propre et disponible partout sur la terre. La disponibilité de l'énergie solaire est variable dans le temps, c'est une énergie intermittente. Elle dépend des cycles jour/nuit et été/hiver ainsi que de la météorologie, ce dernier facteur rend sa disponibilité aléatoire à court terme. Dans ce chapitre on commence par une généralité de l'énergie solaire et en faire d'étude de fonctionnement d'une cellule PV, ensuite nous présentons les modèles caractéristique I-V.

1.2 Historique l'énergie solaire

L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité. Par exemple, les Grecs allumaient la flamme olympique grâce à un système de miroirs concentrant les rayons du Soleil. Cependant le début des applications pratiques est apparu au XVII^e siècle.

Le Français Salomon de Caus construit en 1615 une pompe solaire, grâce à l'utilisation d'air chauffé par le rayonnement solaire. Au XVII^e siècle, François Vilette, opticien au palais de Versailles, conçoit un miroir en bronze (*appelé miroir ardent*) d'un mètre de diamètre, grâce auquel il fait des démonstrations de fusion d'objets². En 1747, Georges-Louis de Buffon expérimente un miroir qui concentre la lumière du soleil en un point focal. Il arrive à faire fondre un morceau d'argent (soit plus de 1 044 °C). À la fin du XVIII^e siècle, grâce à une lentille à liquide qui concentre les rayons solaires, Antoine Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de 1 800 °C. Dans les années 1780, H. B. de Saussure invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme « hélio thermomètre » ; cet instrument utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi un capteur solaire thermique à basse température.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, est découverte par Edmond Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. En 1875, Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. En 1913, William Coblentz dépose le premier brevet pour une cellule solaire qui malheureusement ne pourra jamais fonctionner. En 1916, Robert Millikan sera le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire, mais pendant les quarante années

suivantes, personne ne fera beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques ont un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie. Le phénomène reste encore une découverte anecdotique. Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier panneau solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série. C'est la conquête spatiale qui fera réellement progresser l'énergie solaire ; le panneau solaire est le seul moyen non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie, de plus l'énergie solaire est une source d'énergie constante pour les satellites en orbite. En effet, c'est en 1958 qu'a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. C'est la première utilisation importante de la technologie solaire photovoltaïque. Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies naturelles. L'énergie solaire est de nouveau en plein essor car on prévoit une pénurie de pétrole prochaine, on se préoccupe du réchauffement de la planète et les prix de l'énergie n'ont jamais été aussi hauts. L'énergie solaire devient une priorité pour de plus en plus de pays. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises investissent également. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

De nouveaux types de panneaux solaires ont été développés ; panneaux solaires très fins (4 mm d'épaisseur) et flexibles, des peintures solaires. L'objectif est de réduire très fortement le coût de l'énergie solaire. En novembre 2015 une « Alliance internationale pour l'énergie solaire » (ou ISA pour « *International solar alliance* ») a été créée. Le projet en était porté par Narendra Modi (Premier ministre indien). Cette alliance doit réunir les États disposant d'importantes ressources solaires afin de mieux coordonner le développement de leur

exploitation (thermique et photovoltaïque) via des actions de formation, de standardisation de matériels, de partage d'expériences, co-entreprises...). La cérémonie de lancement a eu lieu lors de la COP21 à Paris, organisée par l'Inde et la France, avec le soutien du secteur privé selon Energie [3]

1.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et parvenant à la surface de la Terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde.

Les sources d'énergie issues indirectement de l'énergie solaire sont notamment : l'énergie hydraulique, dérivée de l'énergie cinétique de l'eau dont le cycle dépend du Soleil, l'énergie marémotrice issue principalement de l'effet des forces de gravitation de la Lune et plus faiblement de celle du Soleil et dépendant d'autres paramètres tels que la géographie des côtes. Il y a également l'énergie éolienne provenant de l'énergie cinétique du vent lié à l'échauffement, et à l'évaporation de l'eau, générés par le Soleil, la rotation de la Terre et l'effet Coriolis, l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues liées aux mouvements des océans et des cours d'eau, le bois énergie et l'énergie de la biomasse ainsi que la géothermie de très basse température, provenant des couches superficielles du sol réchauffées par le Soleil. On peut ajouter les énergies fossiles provenant de matières organiques créées par photosynthèse (charbon, pétrole, gaz naturel...) auxquelles s'ajoute l'énergie biochimique de la matière organique vivante.

L'énergie produite par l'homme en captant le rayonnement émis par le Soleil, principalement sous forme électrique ou thermique. C'est l'une des principales formes d'énergies renouvelables.

- deux familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui.

1.3.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire :

- en usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires ;
- en usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraichissement solaire, dessalement, etc.

De fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories, mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz qui la transporte (le gaz est alors dit « caloporteur ») vers un réservoir de stockage de chaleur.

✕ *1.3.2. L'énergie solaire photovoltaïque*

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839), ou la technique associée. L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du Soleil directement en électricité.

— L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement limitée ; on lui prédit néanmoins un grand avenir grâce aux progrès attendus, à la baisse des coûts, à sa simplicité et à sa polyvalence. Sans entretien et durable, pouvant fonctionner avec ou sans raccordement à un réseau, elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison (capteurs sur le toit) ou d'une industrie.

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le Soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24 heures sur 24, cette application nécessite

L'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement.



Fig.1:Des panneaux solaires photovoltaïques

✓ 1.4. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives .

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium.

1.4.1. Définition Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre . Dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La séparation entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée énergie de gap (en anglais band gap). Elle est exprimée en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 0.5 à 3 eV pour les applications photovoltaïques

1.4.2. Les principaux semi-conducteurs utilisés en PV

- *Le Silicium*

Le silicium est un élément semi-conducteur, qui se trouve en abondance dans la croûte terrestre, de nombre atomique 14. la figure2 ci-dessous représente la structure atomique d'un atome de silicium..

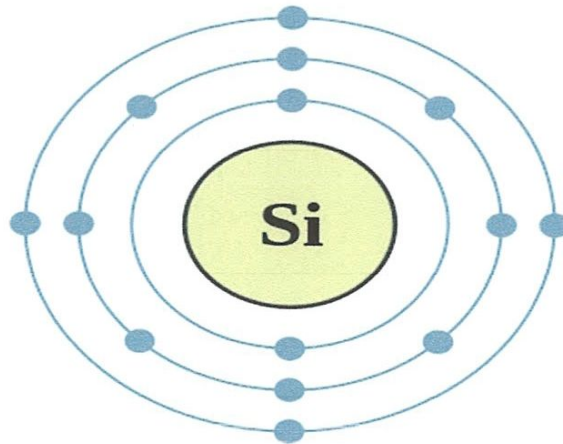


Fig.2: structure atomique du silicium

- *Le Germanium*

Le germanium est un élément semi-conducteur, de numéro atomique 32, se trouve en abondance dans la croûte terrestre, la figure3 ci-dessous représente la structure atomique d'un atome de germanium.

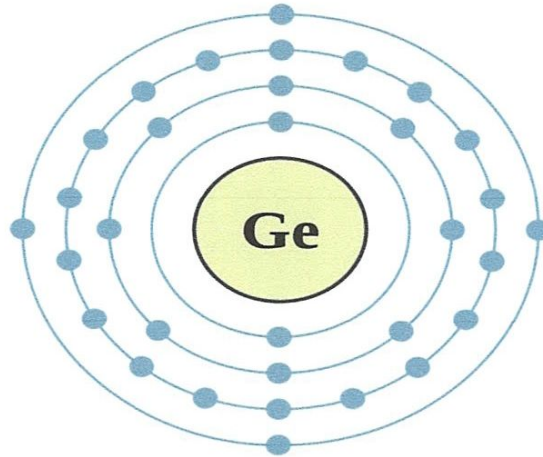


Fig.3: structure d'atome germanium

Remarque

La couche périphérique de silicium et d'un germanium contient quatre électrons, ils seront difficiles de perdre ou d'accepte 04 électrons pour cela on obtient d'autre éléments semi-conducteur qui a dans la couche périphérique 04 ou 05 électrons, ces derniers qui reliais avec les atomes de silicium et germanium cette relation appelé dopage.

1.4.3 Dopage des semi-conducteurs

Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre. Le dopage est un moyen d'augmenter la conductivité électrique du corps. Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux de l'hôte ont un nombre différent d'électrons périphériques. Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type P) ou négativement (type N).[4]

1.4.3. A. Semi-conducteur type P

Un semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex : Bohr B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

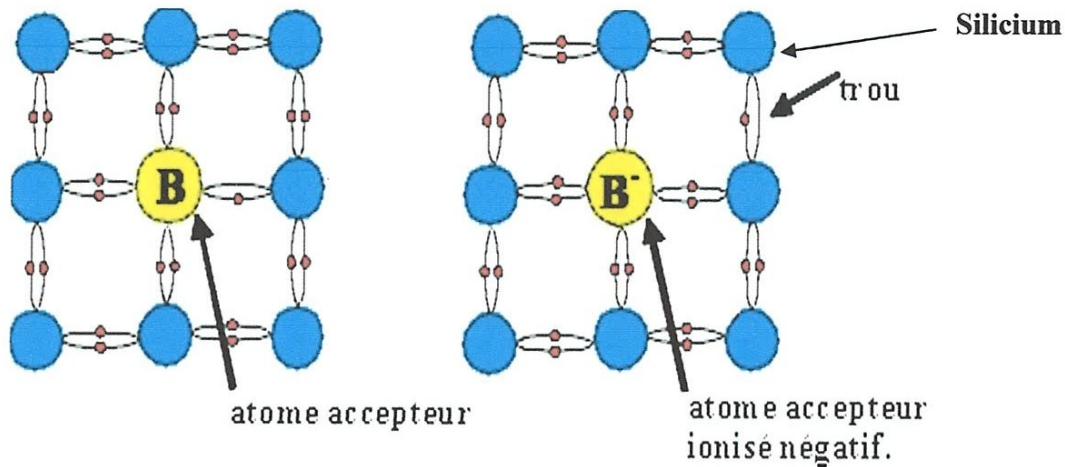


Fig.4: structure atomique d'un dopage semi-conducteur type P

1.4.3. B. Semi –conducteur type N

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : arsenic As). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur .

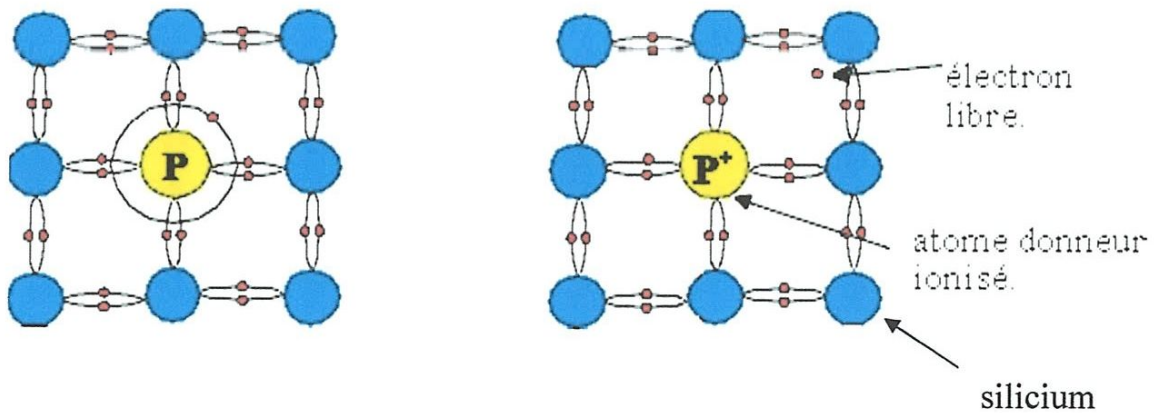


Fig.5: structure atomique d'un dopage semi-conducteur type N

1.5. Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure6

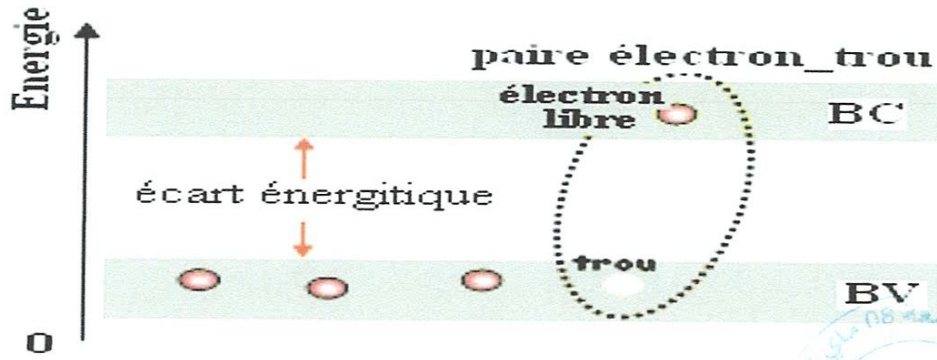


Fig.6: Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.[5]

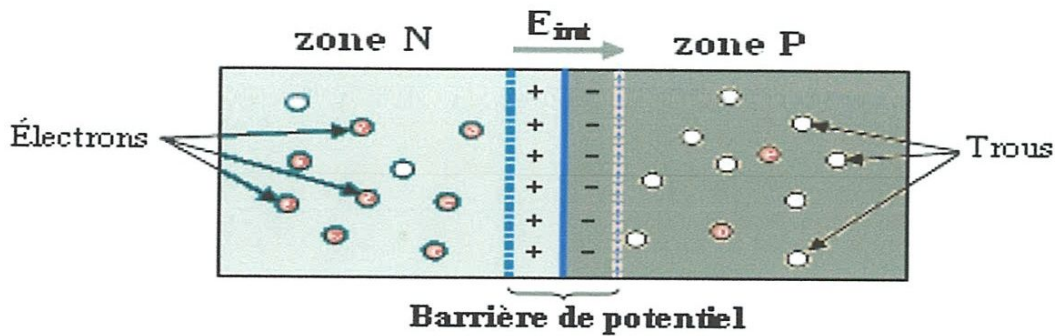


Fig.7: Structure atomique de La jonction PN.

✓ 1.6. La cellule PV

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui lorsqu'elle est exposée à la lumière génère une tension électrique. Elle est représentée par le symbole suivant :

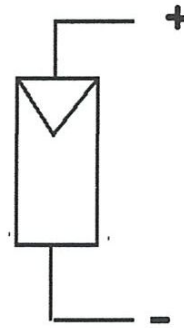


Fig.8: symbole de cellule PV

La cellule PV peut être représentée par un schéma électrique équivalent, comme il est montré ci-dessous figure. 9.

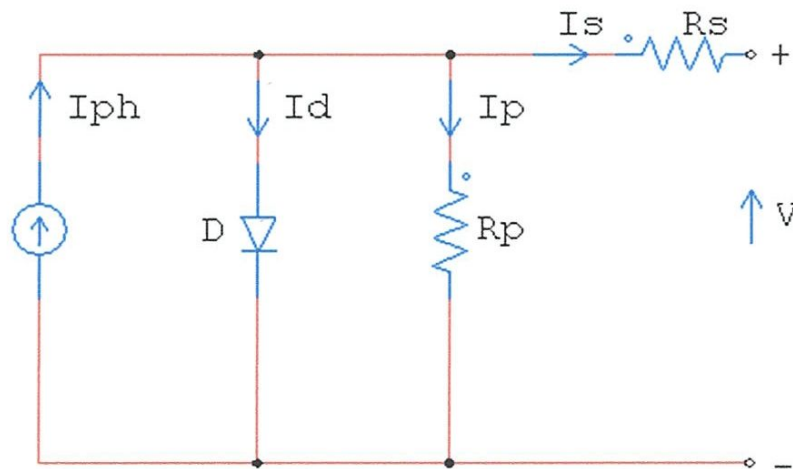


Fig.9:Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Tel que:

I_{ph} : courant du générateur PV.

I_D : courant de diode.

I_p : courant de fuite à travers la résistance parelle.

I_{ph} : courant fournit par la cellule PV.

V_{cel} : tension électrique continu aux bornes de la cellule .

Ce schéma équivalent représente un générateur de courant électrique appelé I_{ph} , et une tension de seuil; représentée par une diode. Les fuites de courants à l'intérieur de la cellule sont représentées par une grande résistance appelée R_p (résistance parallèle), alors que les pertes par l'effet joules sont représentées par une résistance en série R_s .

D' après le schéma électrique équivalent, en appliquant la loi de KIRCHOFF le courant électrique fournit par la cellule est égale:

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_p \dots \dots \dots (1)$$

$$I_p = \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \dots \dots \dots (2)$$

En remplaçant I_d par sa valeur

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t} \right) - 1 \right) \dots \dots \dots (3)$$

Avec:

I_{cell} : Le courant fourni par la cellule

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot \left(\frac{E}{1000}\right) \dots \dots \dots (4)$$

I_{ph} : Le courant pv dépend de l'éclairement E (w/m²).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann (1,381 .10⁻²³ joule/Kelvin).

q : charge d'électron est égale a 1,602 .10⁻¹⁹ C.

1,602 . 10⁻¹⁹ C

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

En remplaçons chaque courant par sa valeur, l'équation caractéristique de la cellule sera:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + 1 \cdot R_s}{V_t}\right) - 1\right) - \left(\frac{V + R_s \cdot 1}{R_p}\right) (5)$$

- Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Contraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

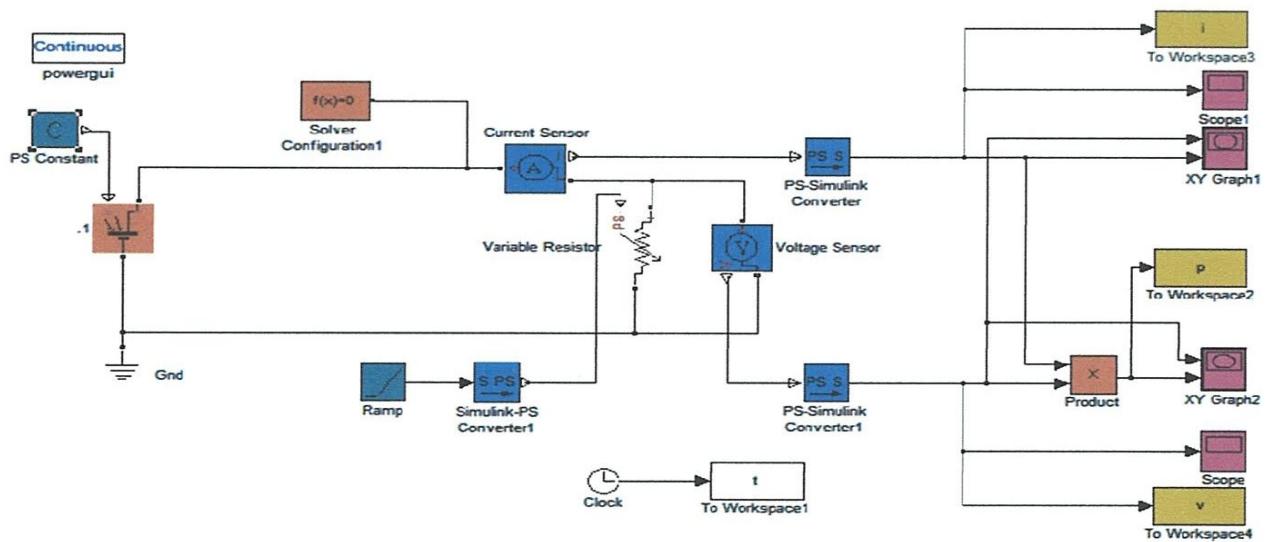


Fig.10: Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (1) et les autres paramètres sont reportés en détails:

Les paramètre de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en séries N_s	1
La tension maximale V_r à PPM (V)	0.4822
La tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	0.598
Le courant maximal I_r à PPM (A)	6.98
Le courant de court-circuit I_r (A)	7.2

Tableau (1): Valeurs des paramètres de simulation

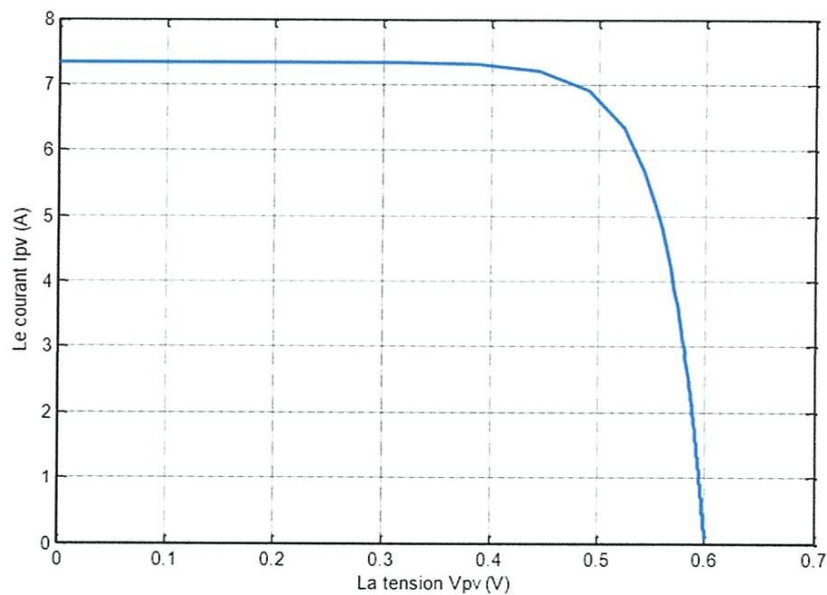


Fig.11: Caractéristique I-V d'une cellule PV.

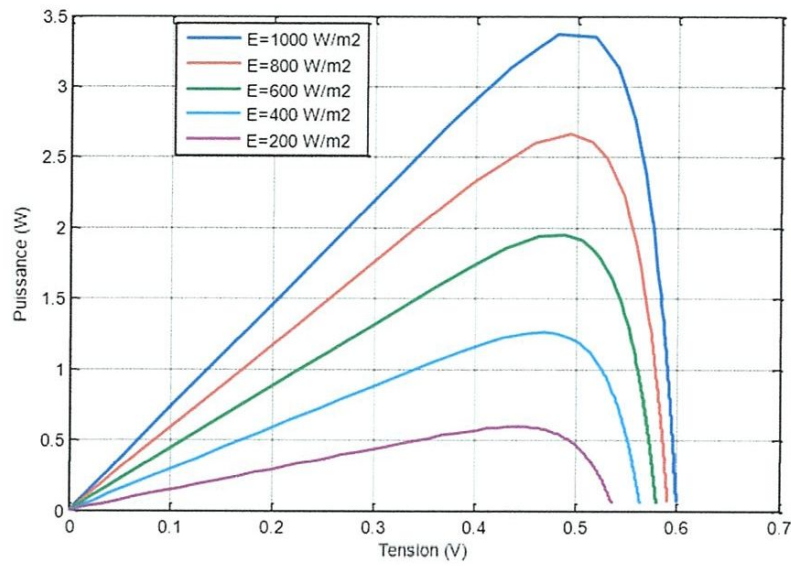


Fig. 15: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement

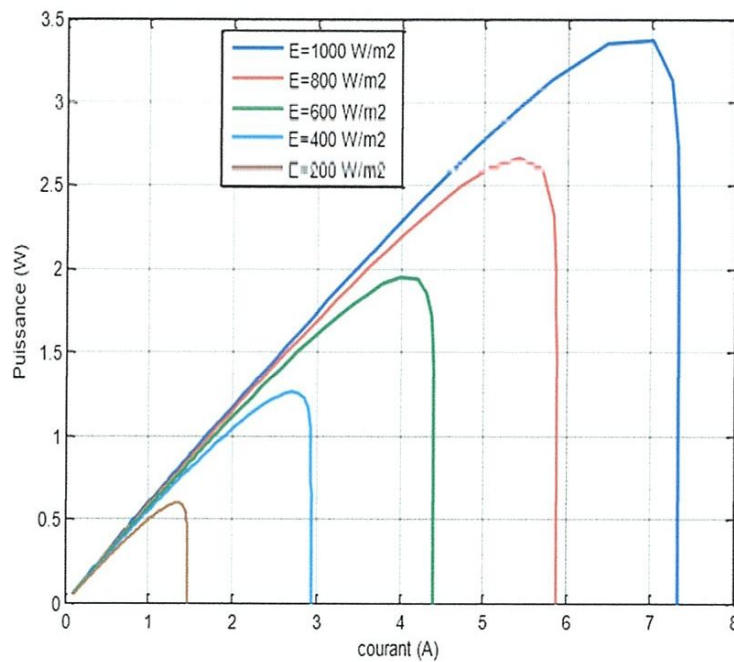


Fig. 16: Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement

1.6.2. Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées au rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température, de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_c = T_a + E_m / 800 (T_{UC} - 20) \dots \dots \dots (6)$$

f.6

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres Figures (17, 18, 19)

La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante

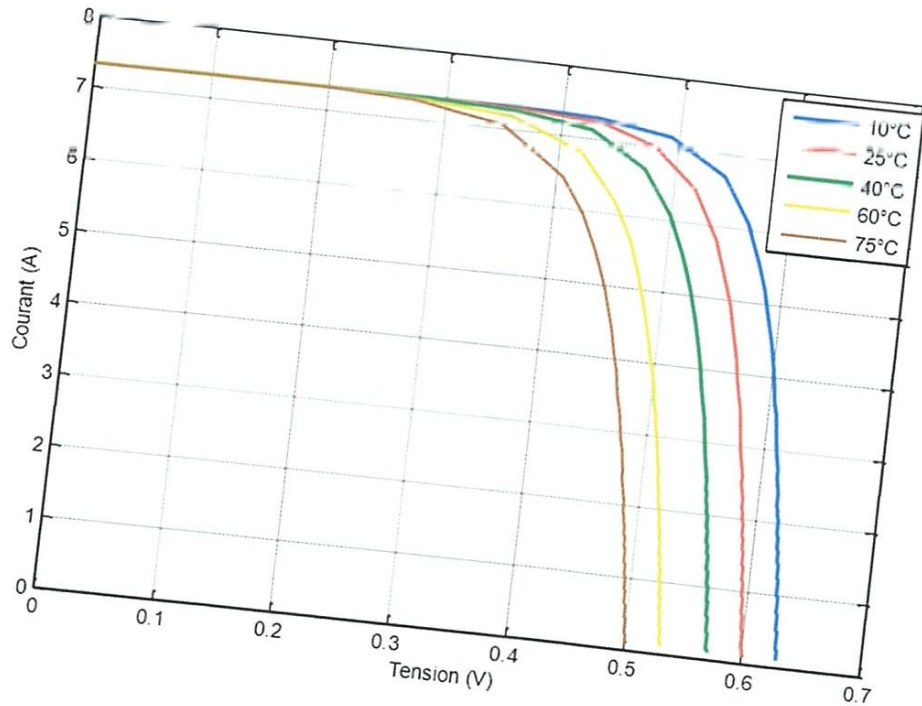


Fig. 17: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

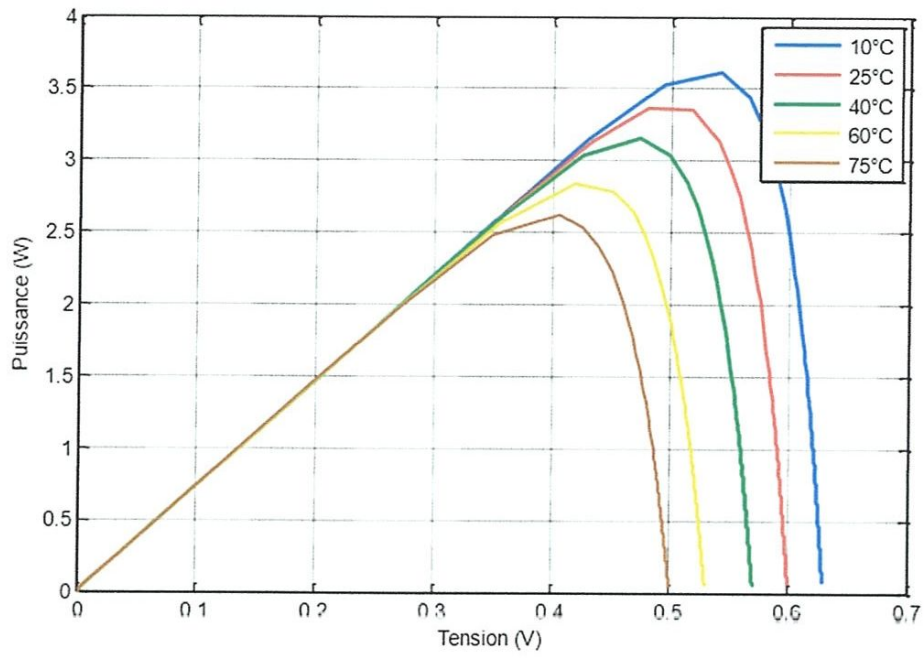


Fig.18 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.

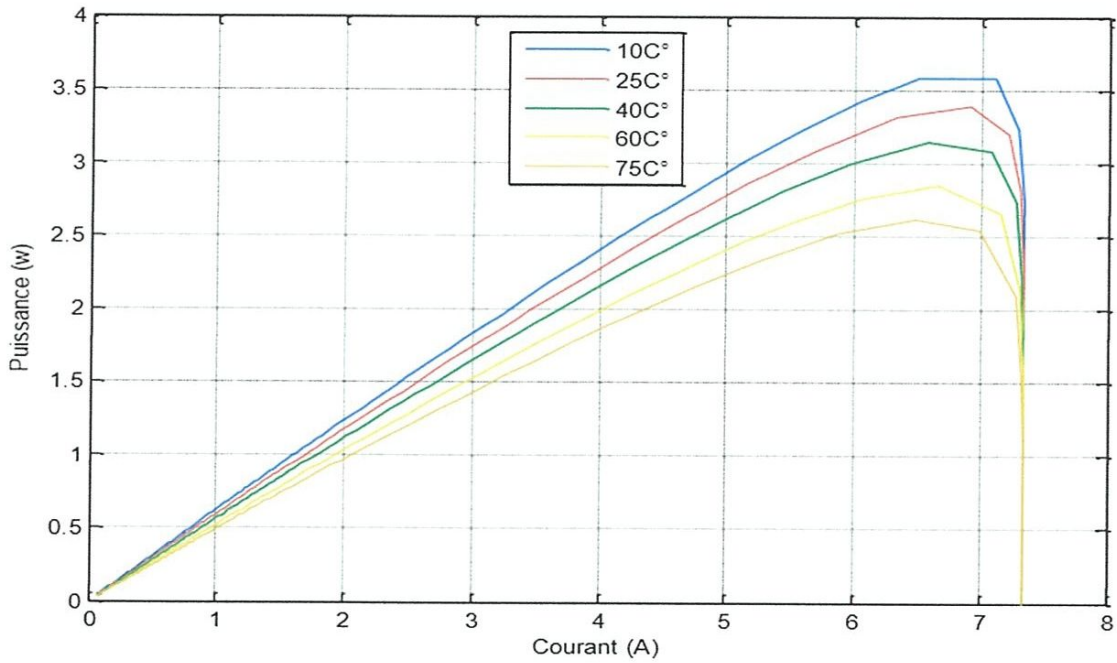


Fig.19 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température.

1.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. d'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures suivantes.

1.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. les figures. (22)- (23)) montrent les caractéristiques résultantes (I_{pcc}, V_{pco}) obtenues en parallèle (indice p) N_p cellules identiques:

$I_{pcc} = n p . I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

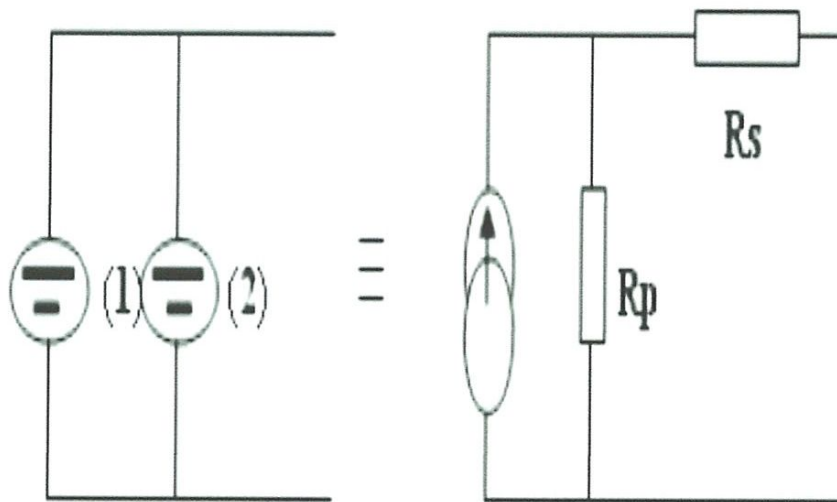


Fig.20. a: Association des modules en parallèle

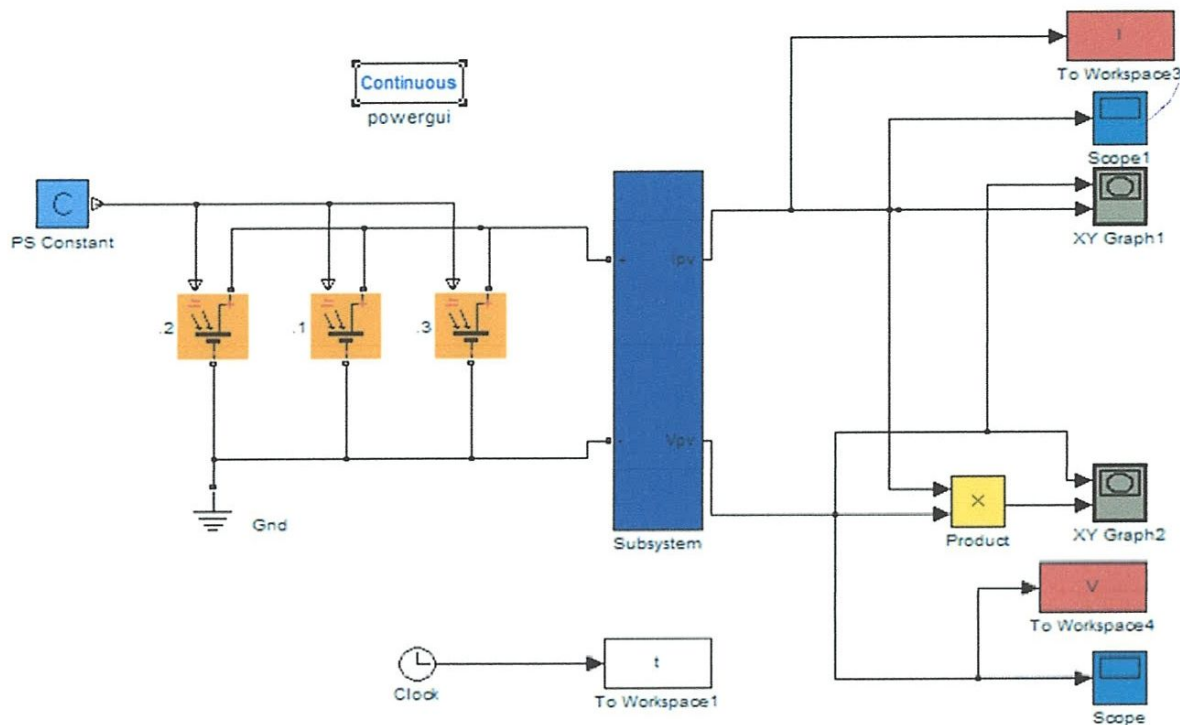


Fig.21: Schéma de simulation de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

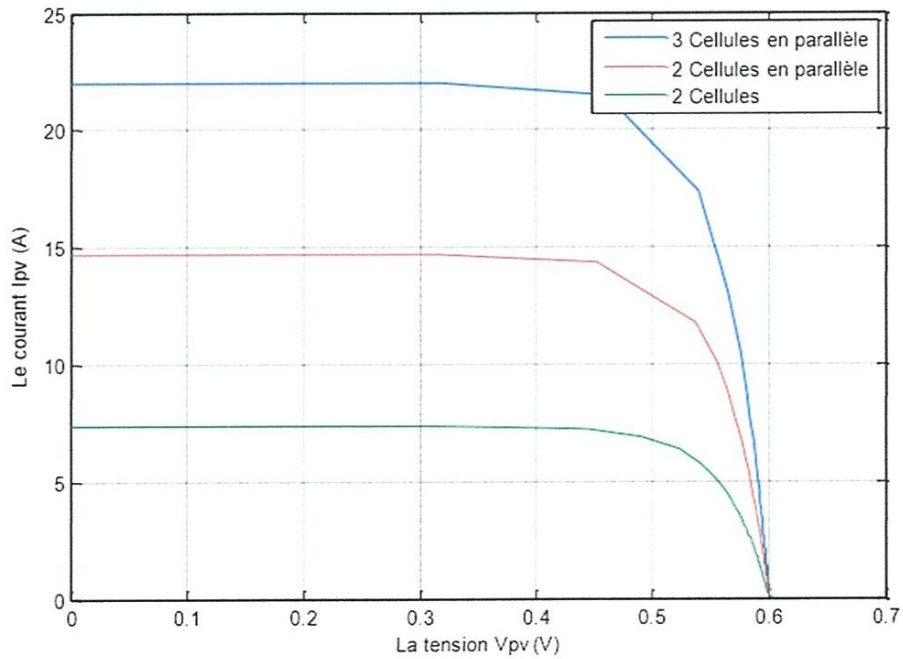


Fig.22:Caractéristique I-V des cellules raccordées en parallèle

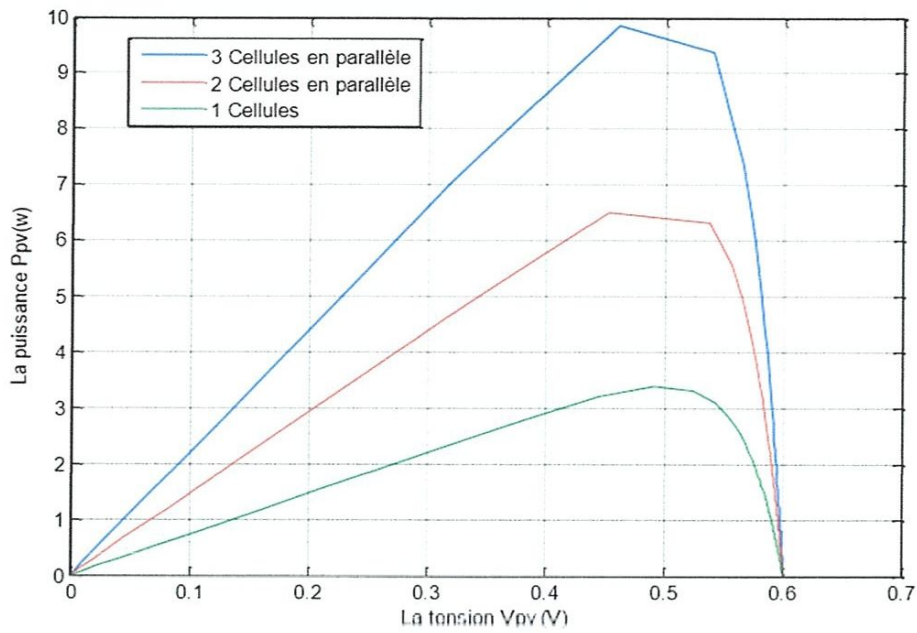


Fig.23: Caractéristique P-v des cellules raccordées en parallèle

1.7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Les figures (25 ; 26) montrent la caractéristique résultante (I_{SCC}, V_{SCO}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{CC}, V_{CO})

$I_{sc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = n s V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

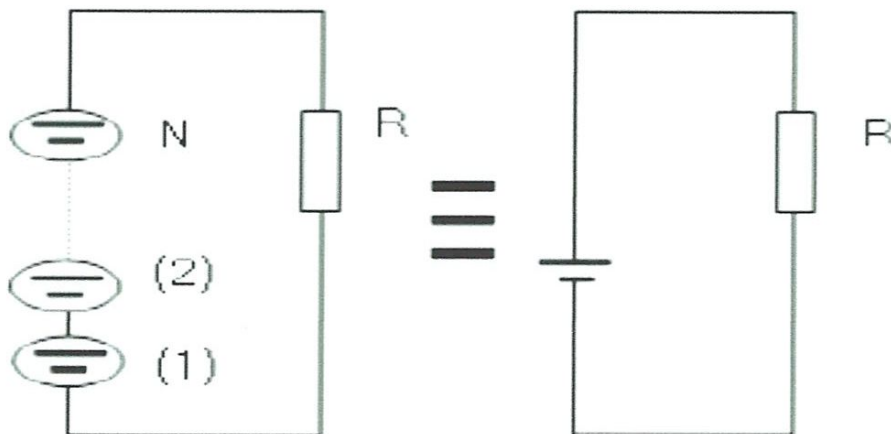


Fig.24-b: Association des modules en série.

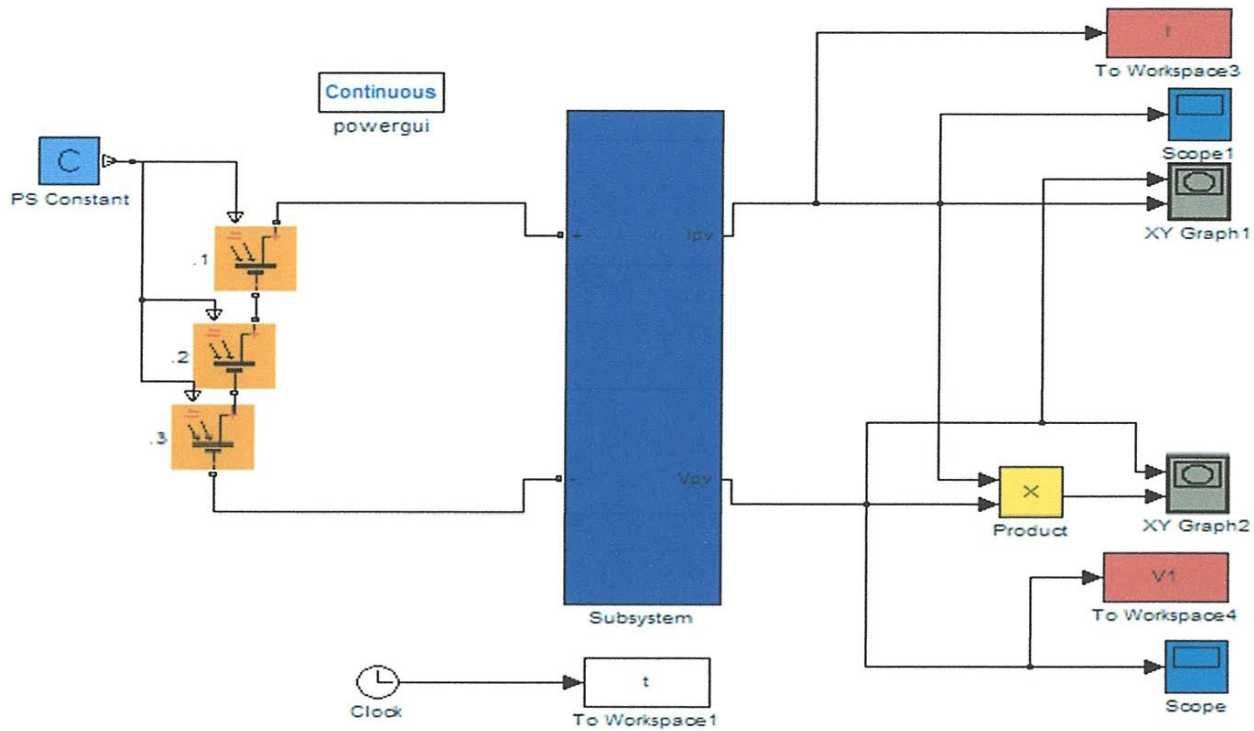


Fig.25: Schéma de simulation de 3 cellules photovoltaïques associées en série

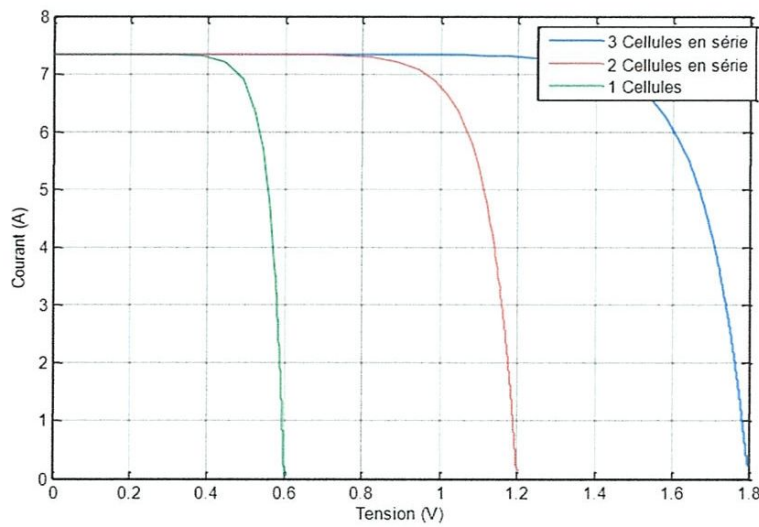


Fig.26: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série

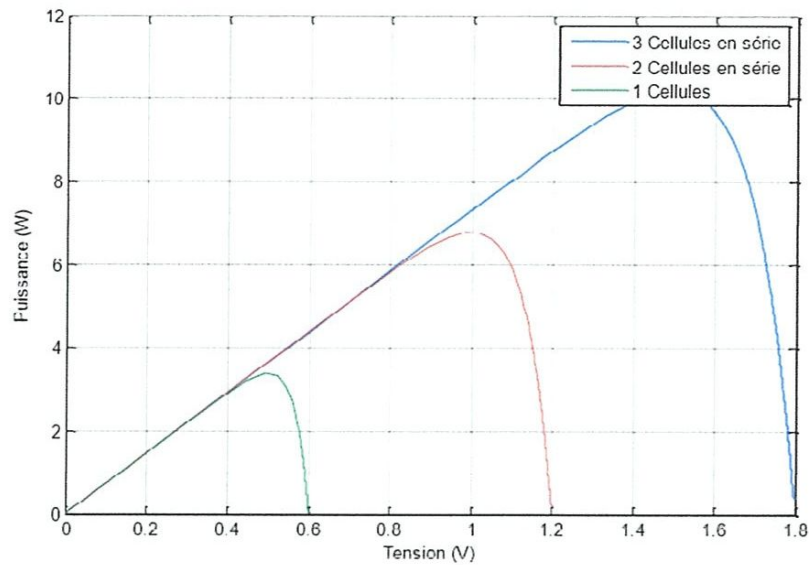


Fig.27: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en séries

Chaque module est caractérisé par des paramètres illustrés dans le tableau(1.2)

Les paramètres de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en série N_s	36
La tension maximale V_r à PPM (V)	17.58
La tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	21.5
Le courant maximal I_r à PPM (A)	6.98
Le courant de court-circuit I_r (A)	7.2

Tableau (2): Valeurs des paramètres de simulation

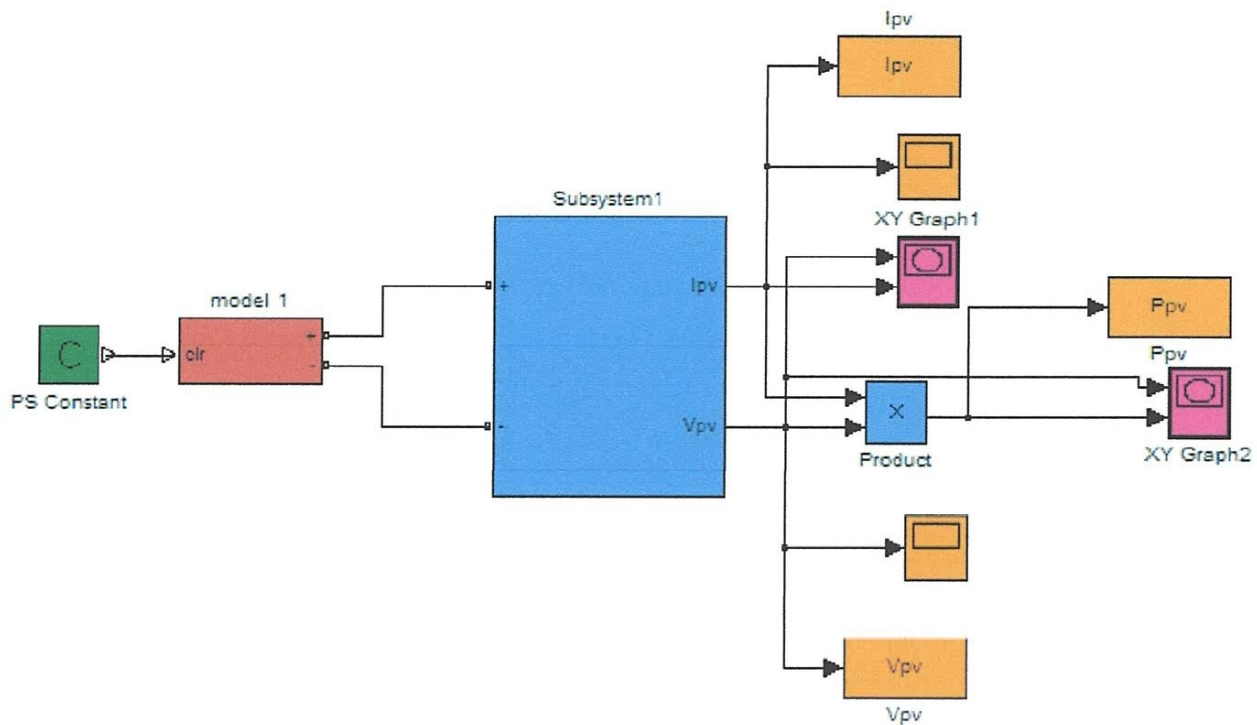


Fig.28: Block du module dans SIMULINK

• Influence de l'Éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m^2 et 1000 w/m^2 avec un pas de 200, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (29,30 et 31).

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$

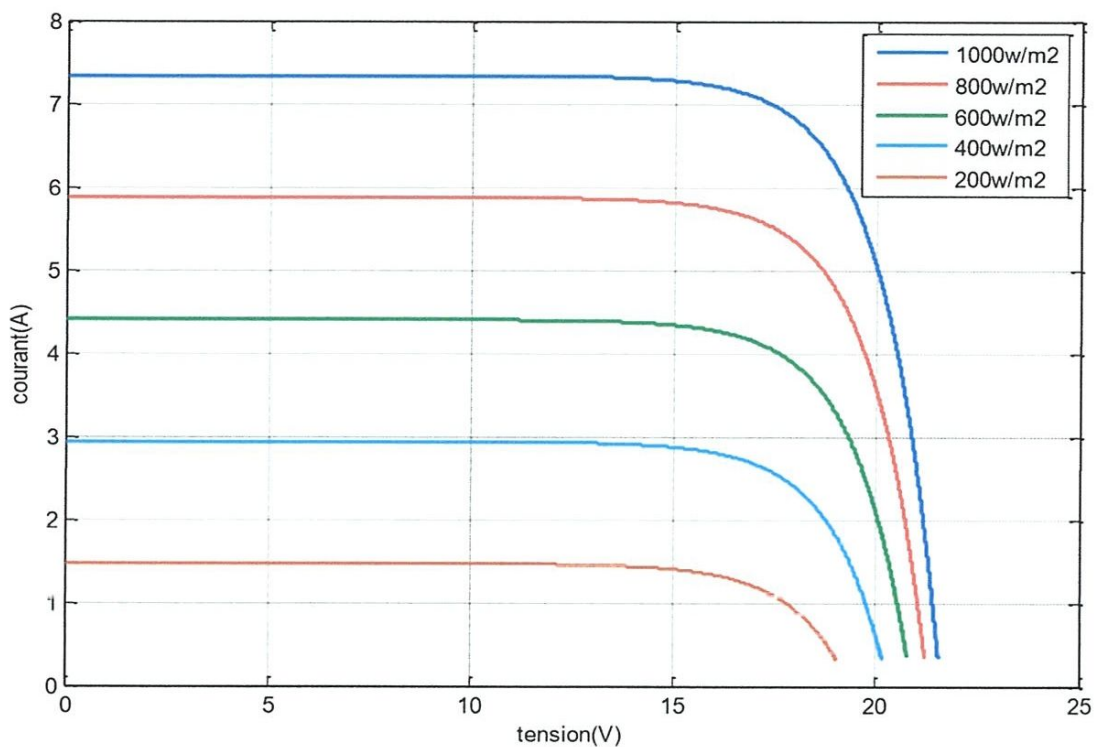


Fig.29: Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement

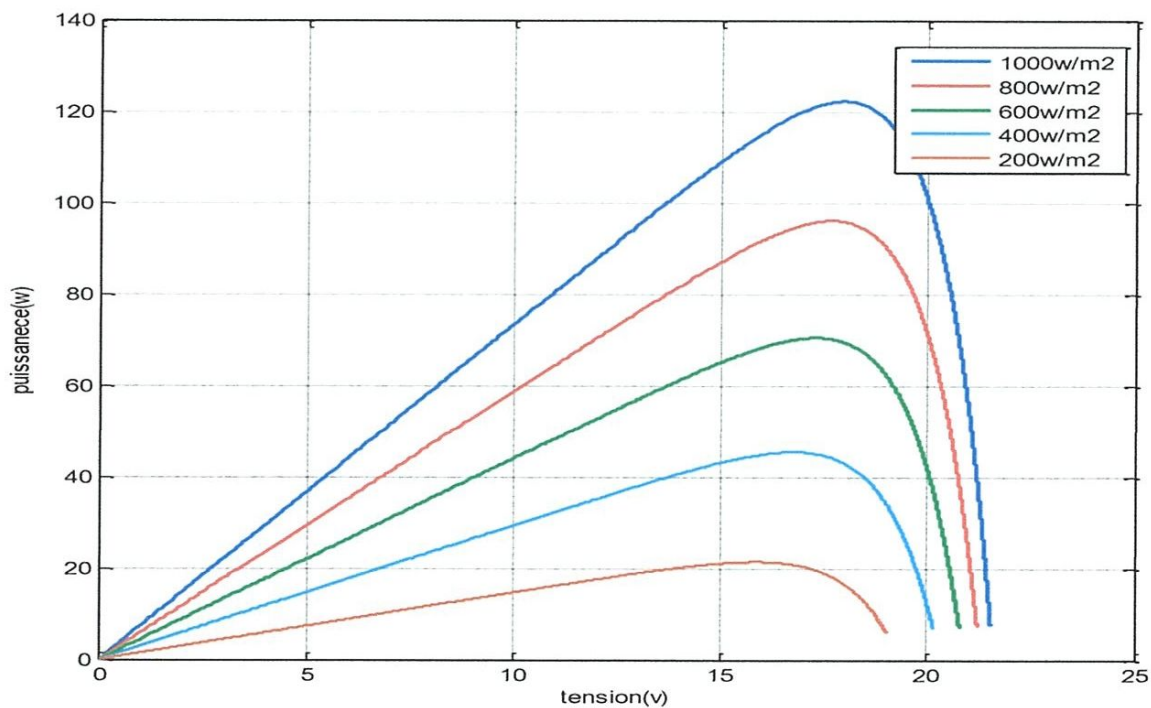


Fig.30: Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement

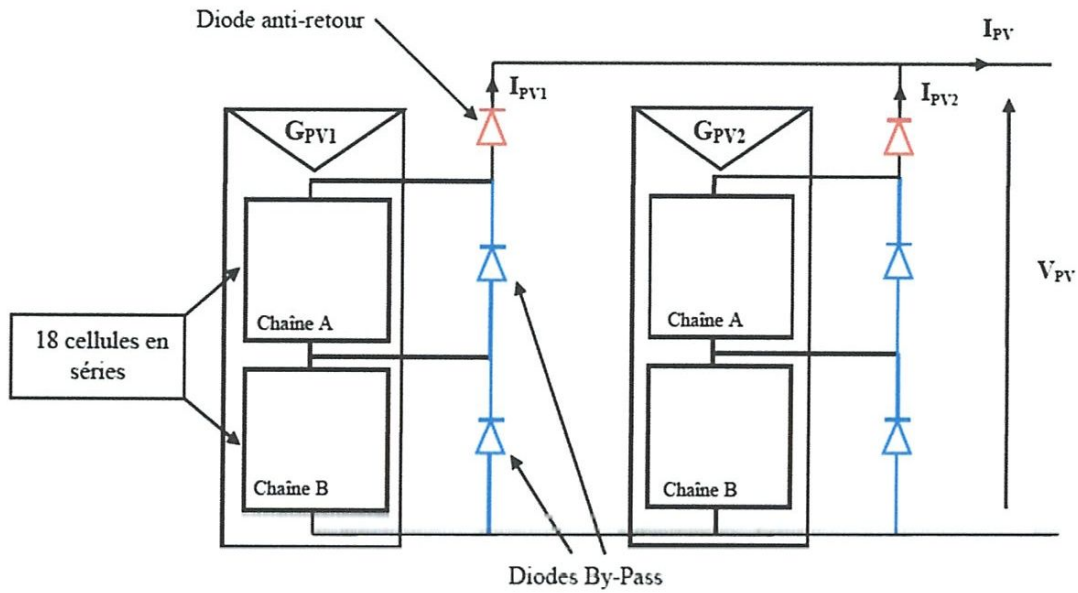


Fig.32: Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.

La diode anti retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (33) [7], par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

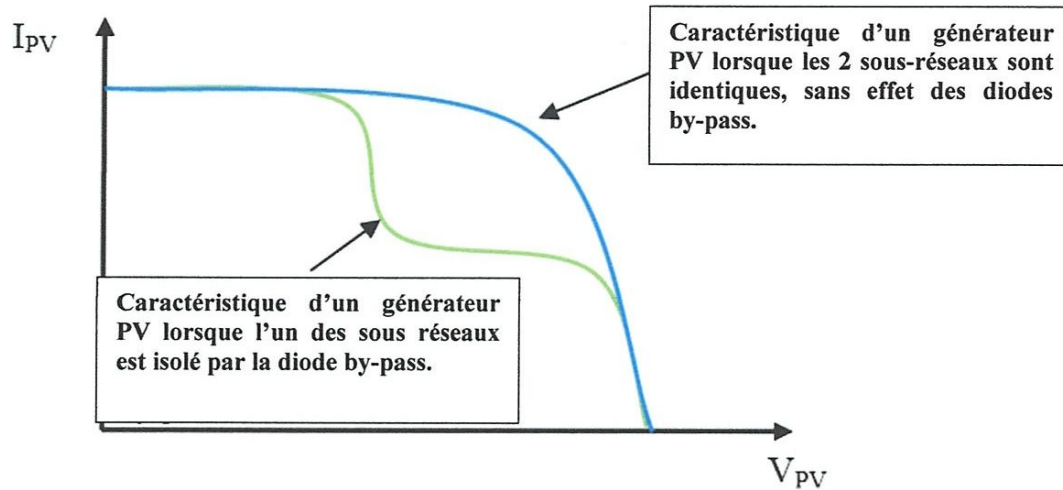


Fig.33: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque

1.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

1.9.1. Les avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.9.2. Les inconvénients :

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

1.10. Conclusion :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit Système photovoltaïque, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...).

Dans ce chapitre on a présentés des notions générales sur l'énergie solaire et le système photovoltaïque, comment fonctionne une cellule PV et on définit leur équation électrique. Ensuite en faire la caractéristique courant-tension d'une cellule PV et les influence de l'éclairement et de température et les regroupements série - parallèle, finalement parlons à les avantages et les inconvénients du système PV.

chapitre02:
les convertisseur statique DC/DC et DC/AC

2.1. Introduction

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...)

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement on commence par les convertisseurs (DC-AC) et sont différents type, et en termine par les convertisseurs (DC-DC) [8].

2.2 Les onduleurs

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires. La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit.



2.2.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.



2.2.2 Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est



généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie

2.2.2.1 Onduleur monophasé en demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure (34).

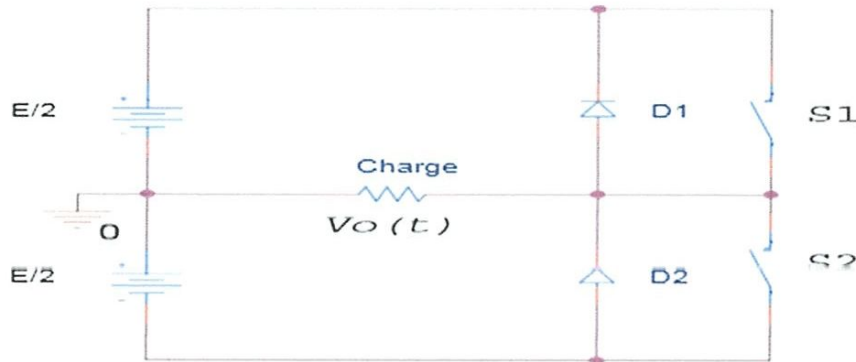


Fig.34: Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S_1 et S_2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis. Lors de la fermeture de l'interrupteur S_1 , la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, S_2 est fermé.

La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance (temps de montée t_r , temps de descente t_f et temps de stockage t_s).

Les diodes D_1 , D_2 , dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

2.2.2.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H)

L'onduleur en pont est représenté en figure (35) il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S_1 , S_2 , S_3 et S_4 quand les interrupteurs S_1 et S_2 , sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$, et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S_3 et S_4 .

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue.

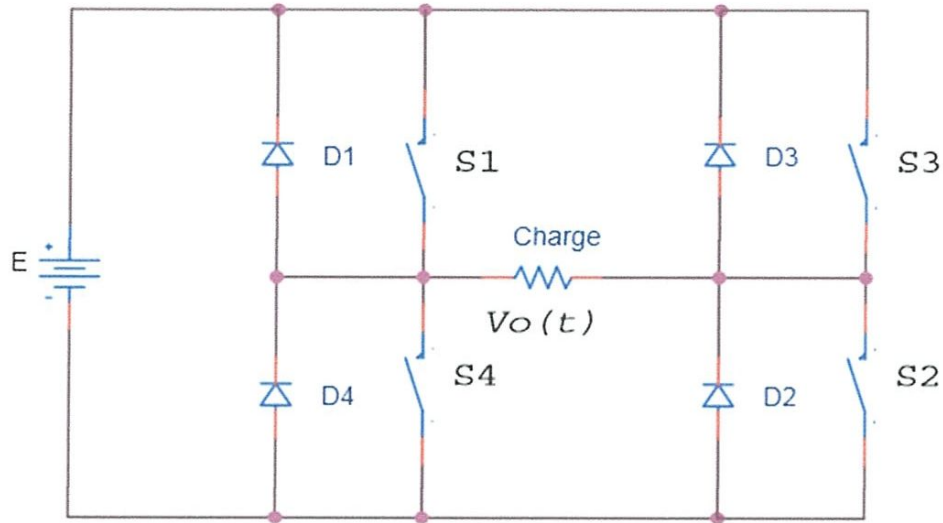


Fig.35 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont.

2.2.3 Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre.

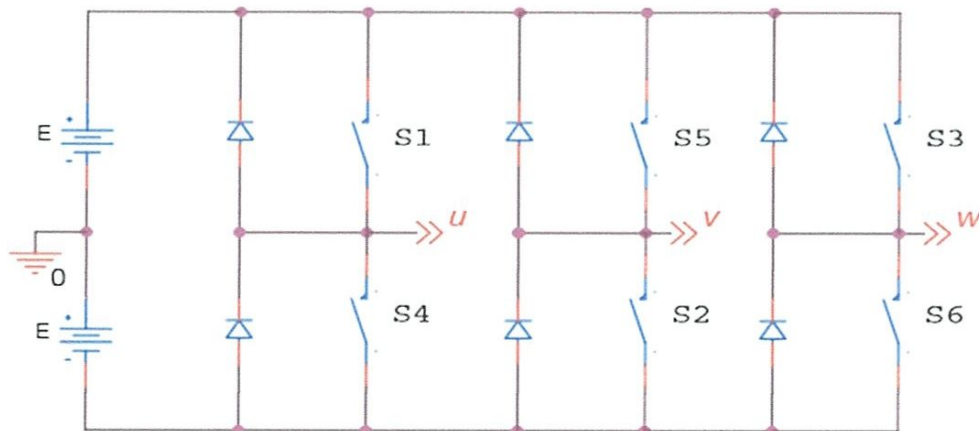


Fig.36: Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

Figure (36) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60° [9].

2.3 Le convertisseurs DC-DC

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue le schéma équivalent du hacheur se représente selon la figure ci-dessous : Deux topologies de basse de circuit de conversion (DC/DC) seront décrits dans le paragraphe suivant [10].

2.3.1 Le convertisseurs DC/DC, élévateur de tension (boost)

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit de la figure (37).

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

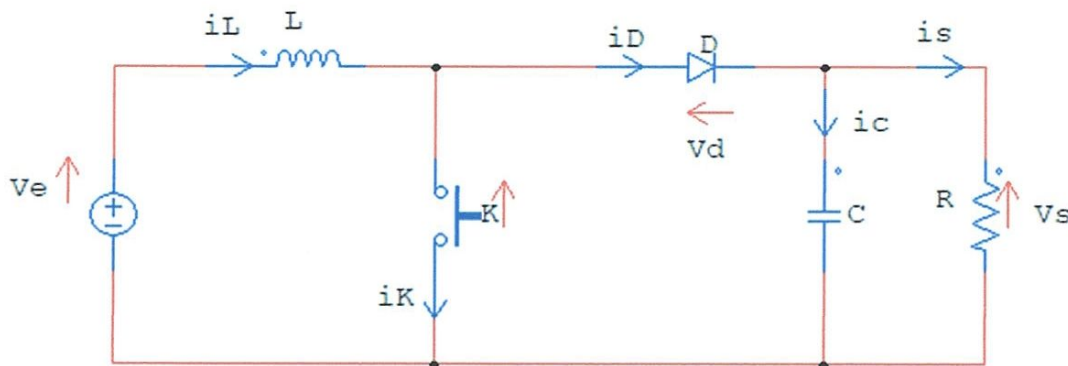


Fig.37 : Circuit équivalent du convertisseur boost

Tel que:

V_e : tension d'entrée.

L : inductance.

D : diode.

C : capacité.

K :interepporteur

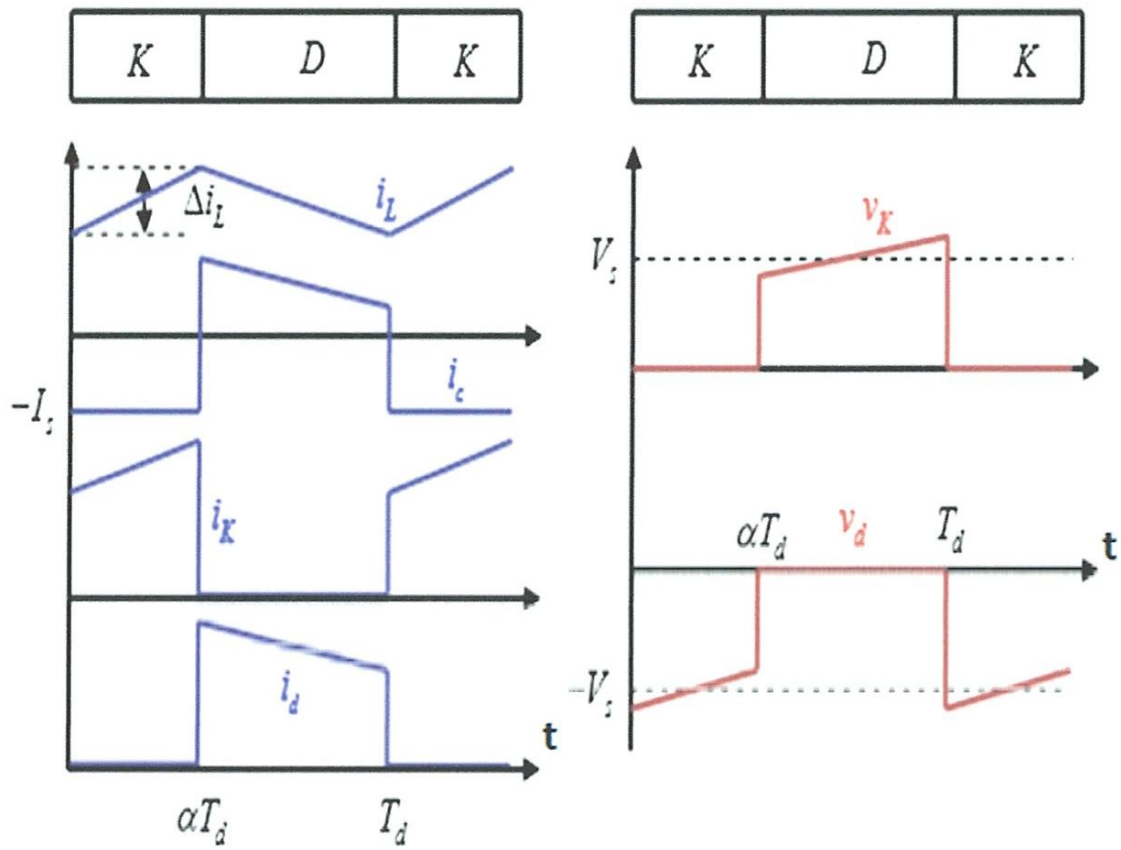


Fig.38: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), le circuit du convertisseur devient (Figure 39) :

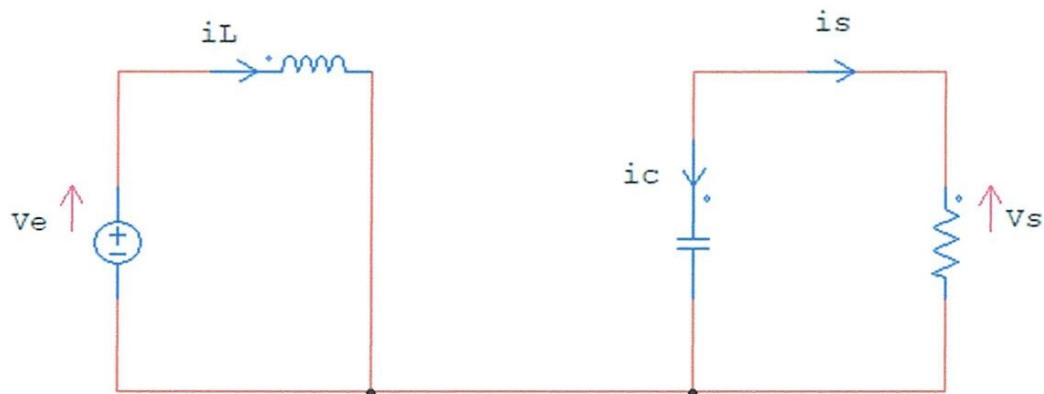


Fig.39: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (7)$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (8)$$

Avec I_{\min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{\max}

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (9)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$), le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (2.7)

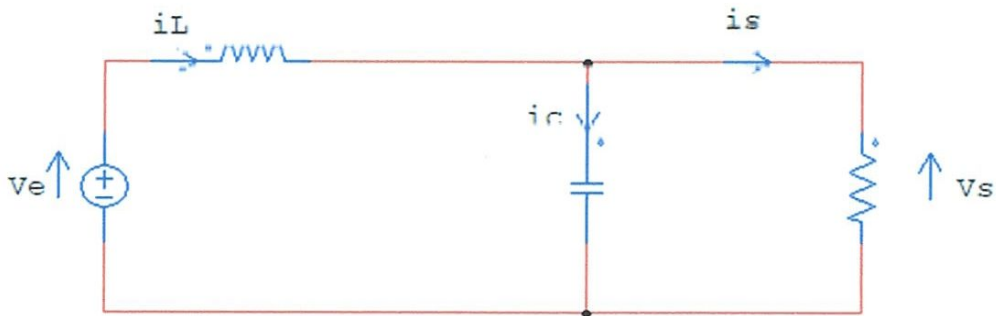


Fig.40: Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (10)$$

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (11)$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{\min} .

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (12)$$

Soit $\Delta i_L = I_{\max} - i_{\min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (9) et (12), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (13)$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad (14)$$

De l'expression (2.3), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (15)$$

Avec f la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement ($0 < t < \alpha T_d$), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (16)$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (17)$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension.

$$i_{K,max} = i_{d,max} = I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (18)$$

$$V_{K,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (19)$$

2.3.2. Convertisseur abaisseur de tension (BUCK)

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Buck . La figure (41) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par:

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (20)$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (21)$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8 C f} = \frac{\alpha(1 - \alpha)V_e}{8 C L f^2} \quad (22)$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_s \quad (23)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

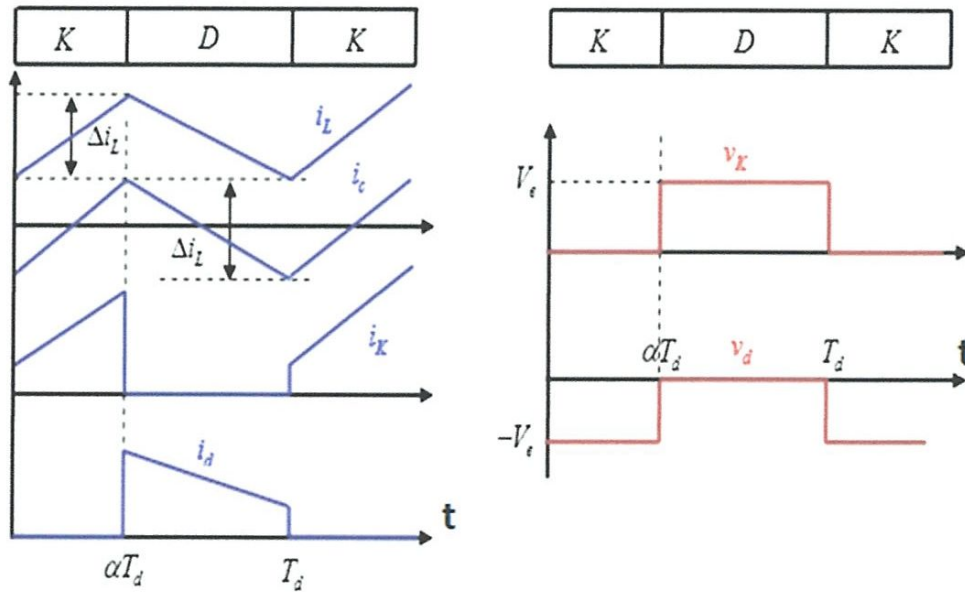
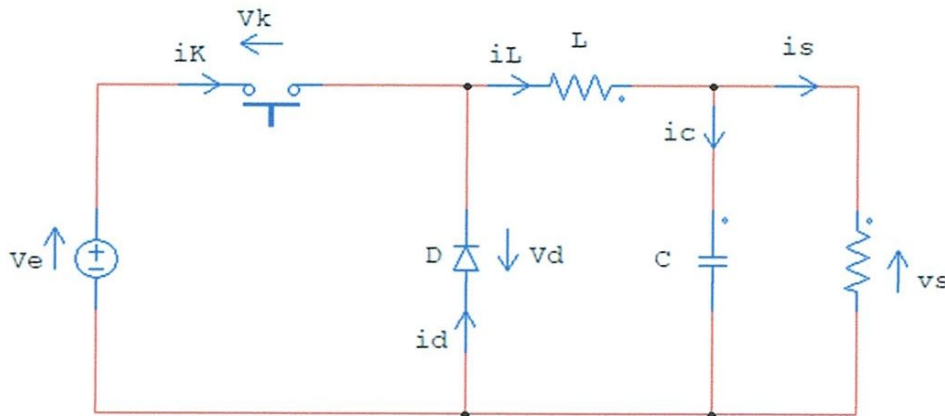


Fig.41: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck

En tension, on a :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_e \quad (24)$$

Et en courant :

$$i_{K,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (25)$$

2.4 Avantage de convertisseur Boost

Malgré le rendement élevé du convertisseur buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de sortie [11].

2.5. Convertisseur Buck-Boost

La topologie et les formes d'ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la figure 42. La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \quad (26)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (27)$$

et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) R C f} \quad (28)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1 - \alpha} \quad (29)$$

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (30)$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (31)$$

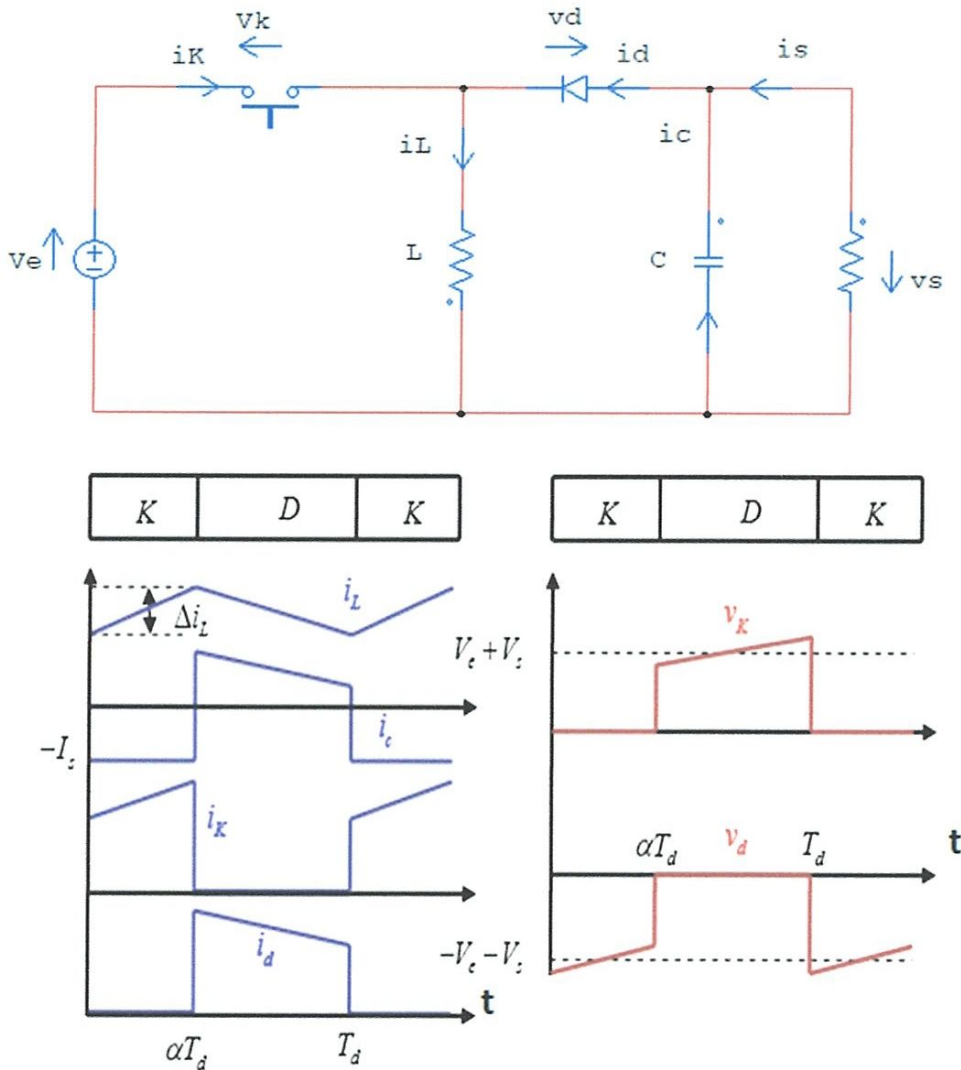


Fig.42: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC/DC-AC). et nous avons faire des formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseurs boost et buck.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les commandes MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre03:
Etude sur les régulateurs mppt

3.1. Introduction

La théorie relative à la maximisation de la puissance produite d'un panneau solaire grâce aux grandeurs physiques agissant sur la caractéristique électrique courant tension ($I-V$), nous permet de créer une technique d'utilisation plus performante, et plus efficace pour extraire un point de puissance maximale d'une manière permanente sans perte dans l'énergie transférée du générateur photovoltaïque vers la charge. Pour obtenir ce résultat on utilise un système d'adaptation basé sur la commande MPPT. Dans ce troisième chapitre on donnera une présentation et description du système MPPT.

Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développés. Elles varient en complexité, capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc.

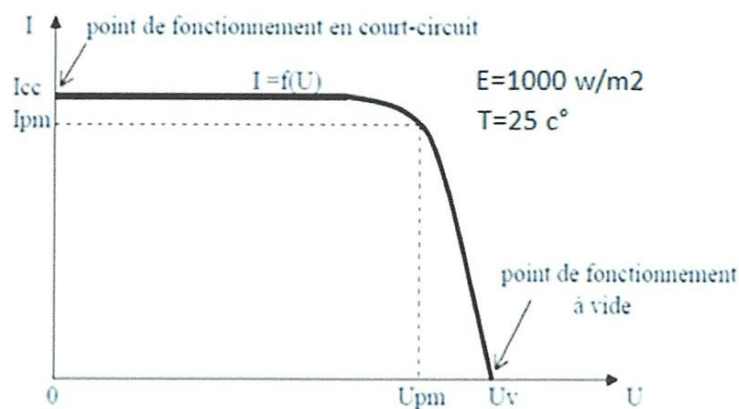


fig.43: caractéristique courant-tension d'une cellule PV

3.2. Connexion directe entre la source et la charge :

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

Actuellement, ce type d'application peut se résumer à un champ photovoltaïque ayant une tension V_{OPT} fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération figure (44).

La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.

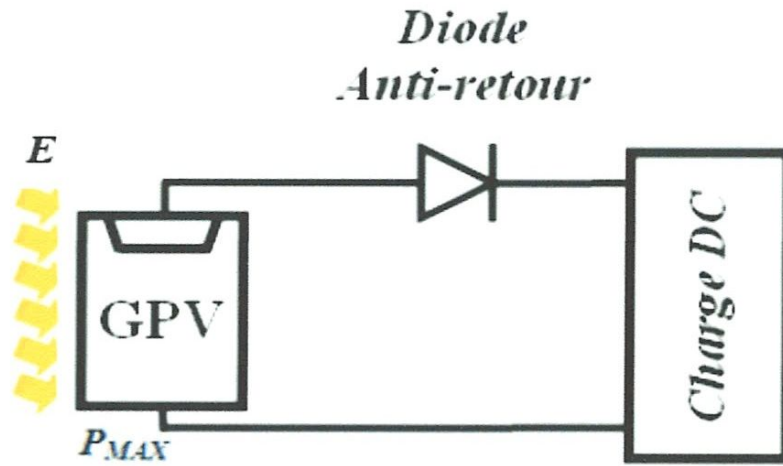


Fig.44: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

Cependant, cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. Par exemple, le cas de batteries de stockage dans les systèmes isolés.

Cependant, un examen plus approfondi de ces applications montre que même dans ce cas, le transfert d'énergie électrique disponible aux bornes du GPV vers la charge dépend fortement de l'état de la batterie ayant une tension à ses bornes variant d'un pourcentage non négligeable. Plus généralement, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, comme l'illustre la figure (45).

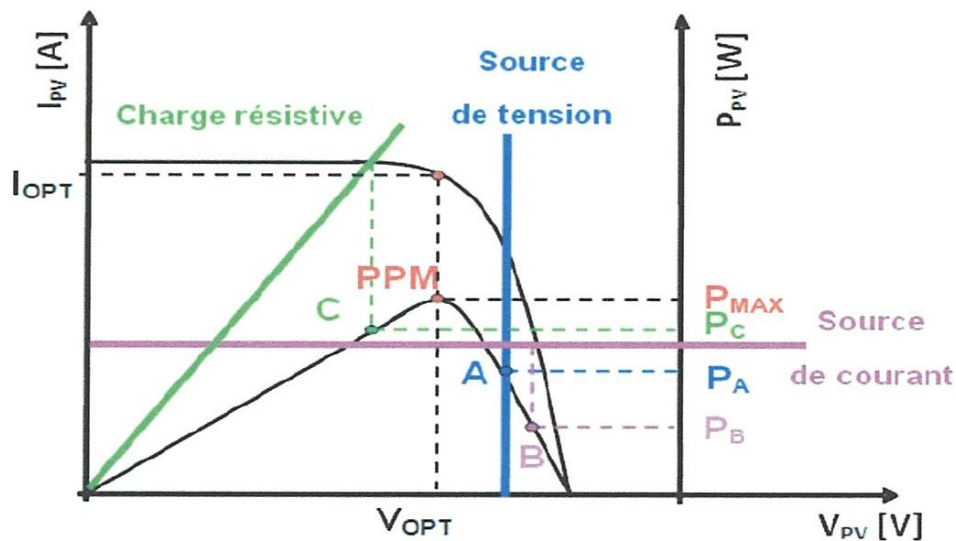


Fig.45: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

Comme le schématise la figure (3-3), un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continu,
- une charge purement résistive.

Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance P_A , P_B et P_C . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale potentielle, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur.

D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe n'est alors pas possible car le GPV fournit un courant continu.

A travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle [12].

3.3. Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

La conception de système PV optimiser est par nature difficile. en effet, coté source, pour générateur PV, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement de la température, mais aussi du vieillissement global du système .coté charge , que ce soit de nature continue (DC) ,ou bien alternative (AC), comme le réseau électrique ,chacune a son comportement propre qui peut être aléatoire .pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimale ,la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique figure (46) qui jouera le rôle d'adaptateur source –charge [13,14].

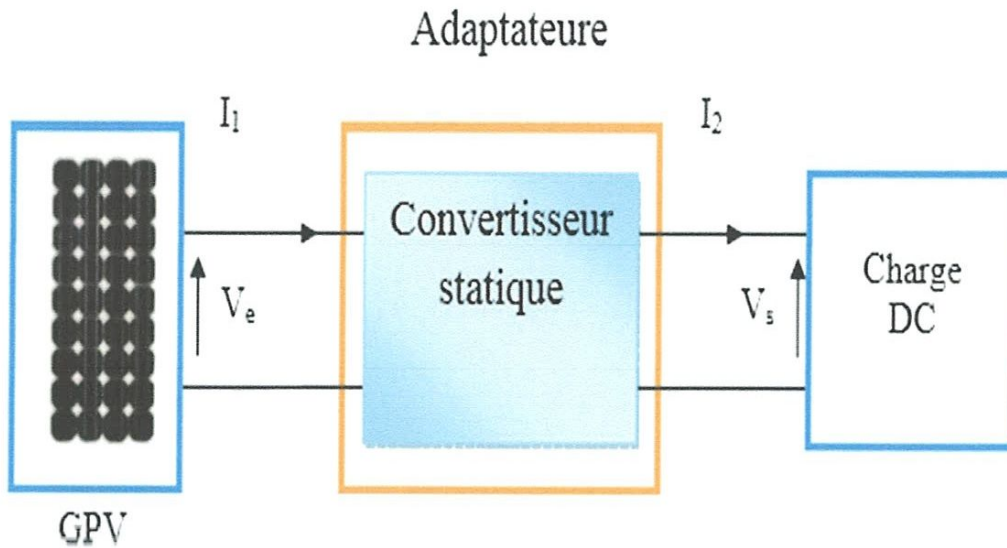


Fig.46: Etage d'adaptation d'un GPV-charge

Si on prend l'exemple du convertisseur DC-DC (élevateur), la tension et le courant de sortie de convertisseur en fonction du rapport cyclique de sortie écrire par les relations:

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \dots \dots \dots (32)$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \dots \dots \dots (33)$$

$$R_{pv} = R_s(1 - \alpha)^2 \dots \dots \dots (34)$$

Aussi, le rapport cyclique s'écrit en fonction des résistances Rpv et Rs:

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \dots \dots \dots (35)$$

Puisque le rapport α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante:

$$R_s = R_{pv} \dots \dots \dots (36)$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau

($R_{pv} = R_{opt}$) et le rapport cyclique ($\alpha = \alpha_{opt}$) obéissent à l'équation:

$$R_{opt} = R_s \cdot (1 - \alpha_{opt})^2 \dots \dots \dots (37)$$

3.4. Principe de la recherche du point de puissance maximal:

3-4-1 Généralités:

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

Les figures(47 et 48) représentent une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

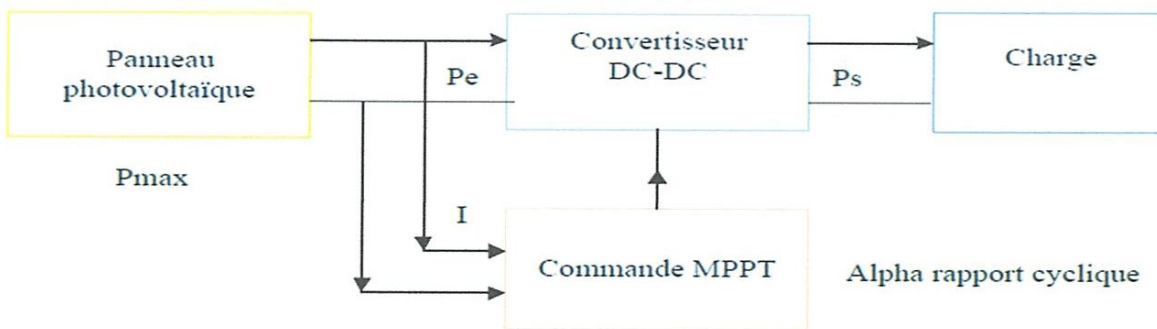


fig.47 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

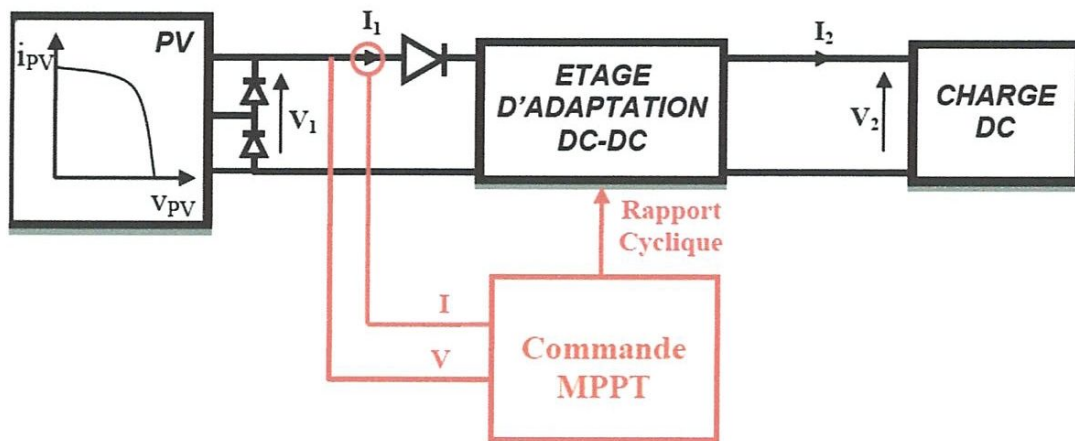


Fig 48: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (49) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV

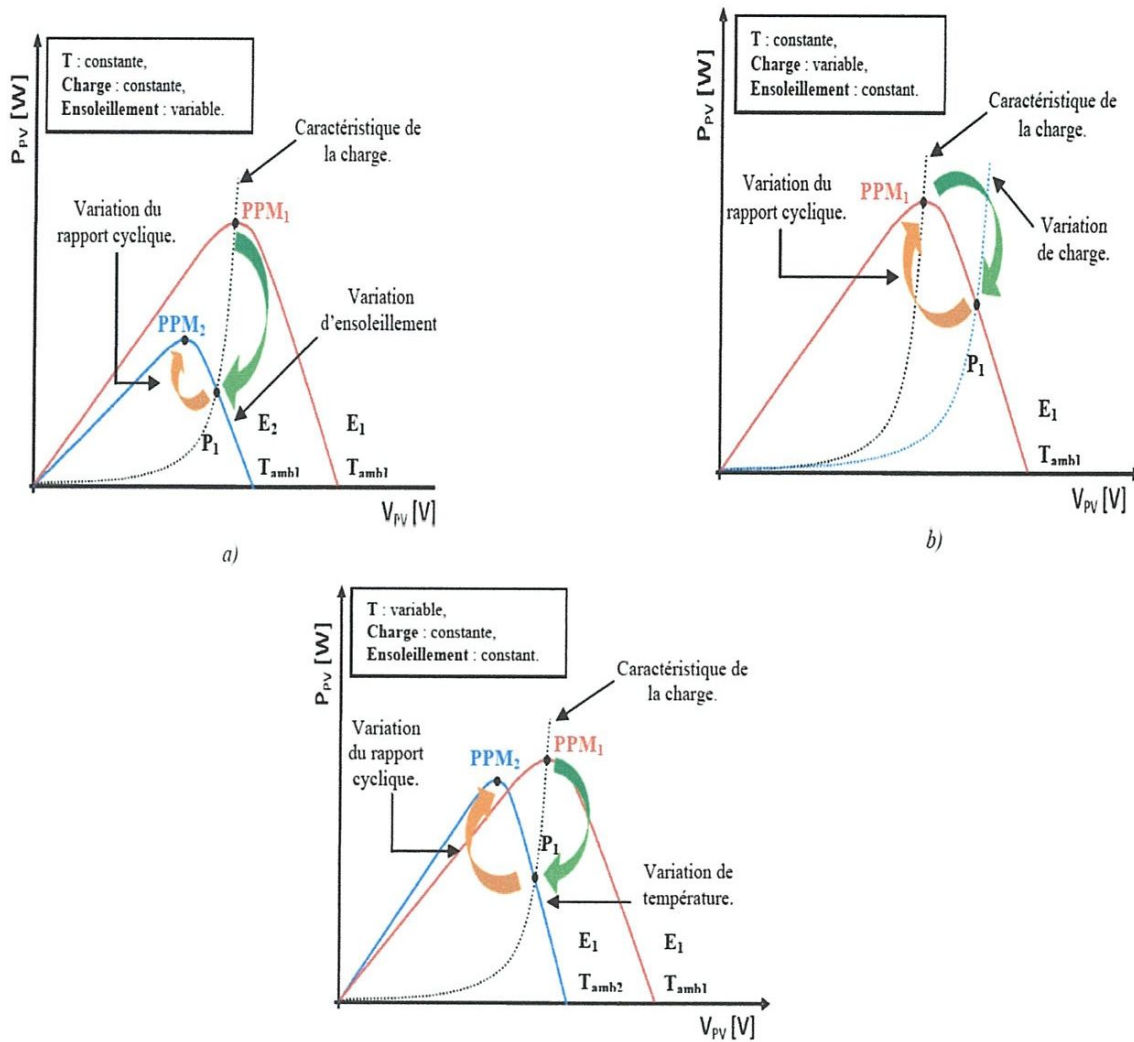


Fig.49: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

- a) suite à une variation d'ensoleillement.
- b) suite à une variation de charge.
- c) suite à une variation de température

3.5. Classification de l'algorithme de suivre la puissance maximum

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



3.5.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer

le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode «look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

3.5.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle k_1 , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{oc}} Cte < 1 \quad (38)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation $V_s = \frac{V_e}{1-u}$. et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k_1 .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

3.5.1.2 La méthode de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale (équation 39):

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{sc}} \cong Cte < 1 \quad (39)$$

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

3.5.2 Les méthodes directes

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

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

3.5.2.1 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (50), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

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

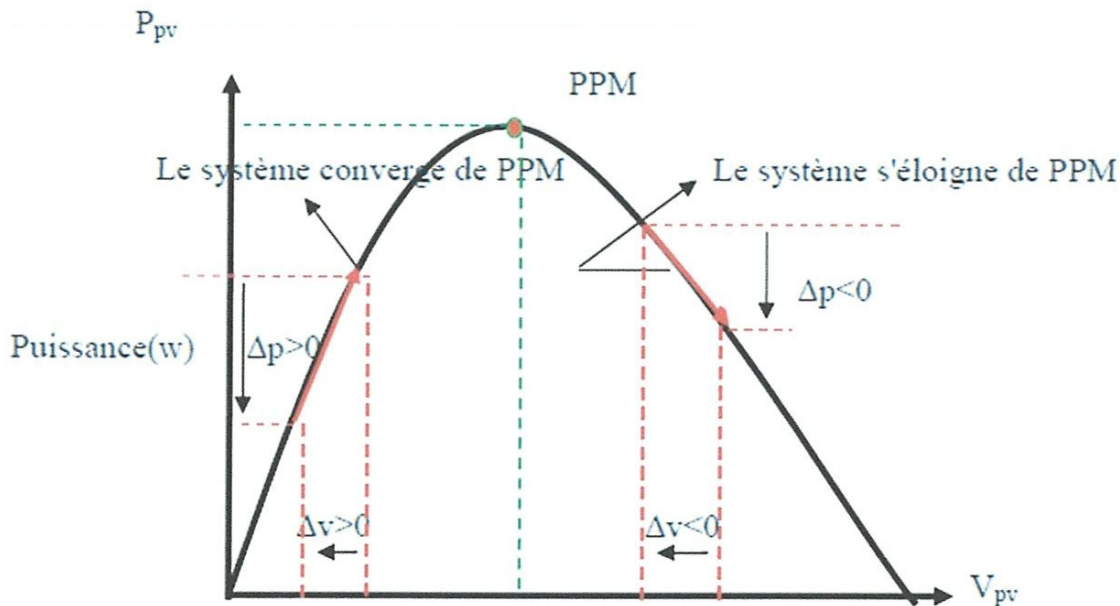


Fig.50: Schéma de convergence vers le PPM par P&O

La figure (51) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [24].

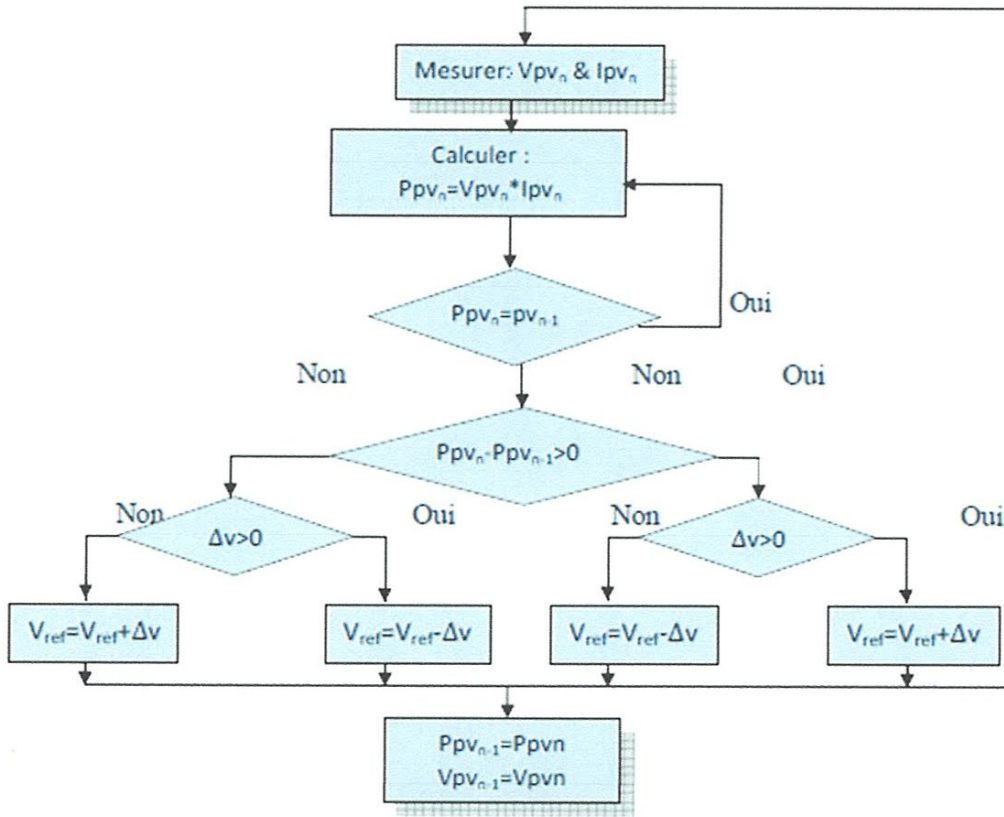


Fig.51: Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O

Telle que : P_{PVn} : la nouvelle puissance

P_{PVn-1} : l'enceint puissance dans le temps (t - 1)

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1} \quad (40)$$

$$\Delta V = P_{PVn} - V_{PVn-1}$$

$$(41)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du

PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [24].

3.5.2.2 La méthode incrémentation de la conductance

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [15].

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

$$P_{PV} = I_{PV} \cdot V_{PV} \tag{42}$$

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

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{pv}}{dV_{PV}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{43}$$

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

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{44}$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{45}$$

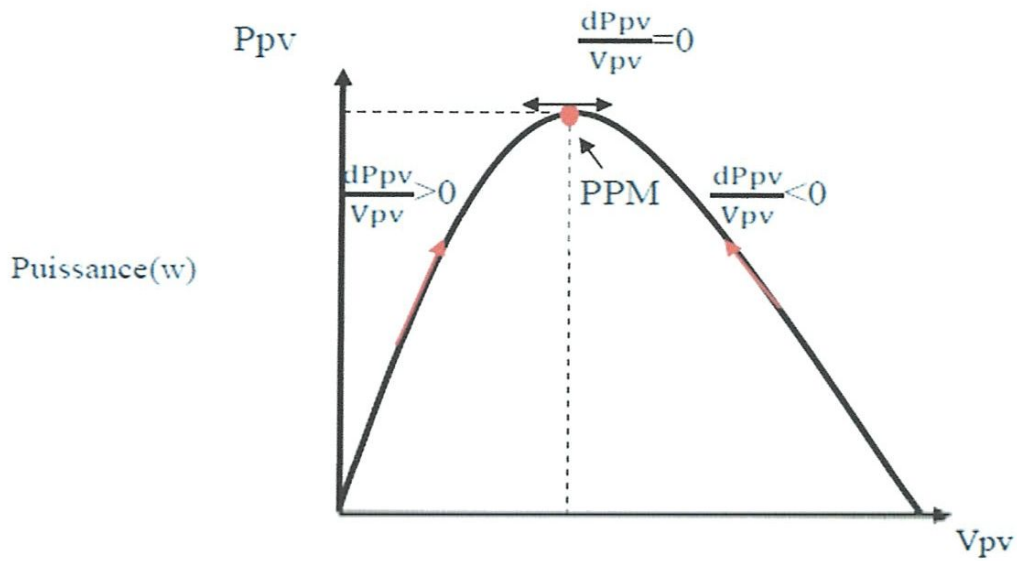


Fig.52: : Trajectoire par Incrémentation de Conductance

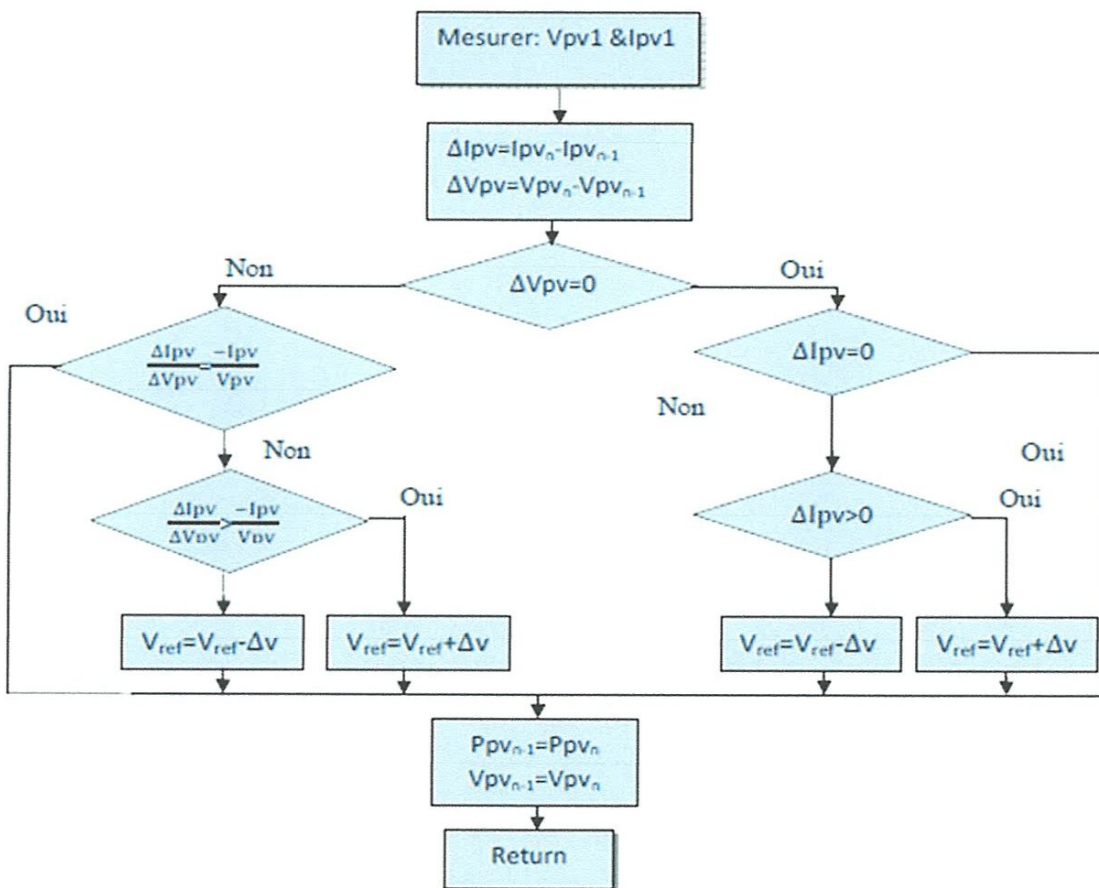


Fig.53: Algorithme d'incrémentation de la conductance

On peut écrire aussi:

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$: Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$: Le point de fonctionnement sur le PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$: Le point de fonctionnement est droit de PPM.

3.5.2.3 Méthode à contre réaction de la tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence [18]. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure (54):

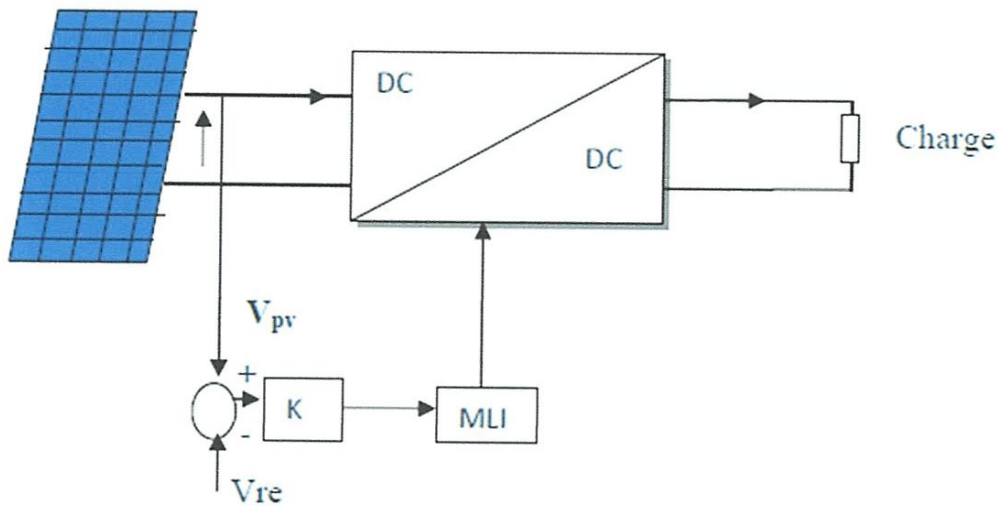


Fig.54: Méthode contre réaction de la tension

Les inconvénients de cette configuration sont les mêmes que pour la méthode de connexion directe (générateur PV + charge de profil). C'est-à-dire, le système ne peut pas s'adapter aux conditions variables d'environnement, telles que l'irradiance et la température.

Les avantages de cette technique c'est une technique simple, économique et emploie seulement une commande de boucle de feedback [19].

3.5.2.4 Méthode contre réaction de courants

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de I_{pv} et V_{pva} été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système figure (55).

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment [20].

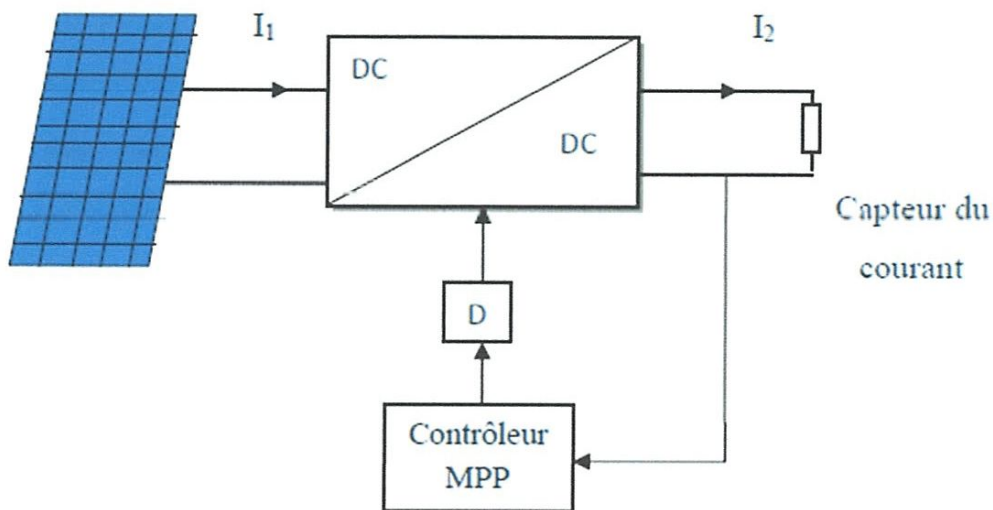


Fig.55: Méthode contre réaction de courants

Conclusion générale

Conclusion générale :

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

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittente selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients. Ce travail s'agit d'une contribution à l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque.

Les travaux présentés concernent plus particulièrement la problématique du couplage entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du générateur photovoltaïque à la charge qui est souvent très loin des possibilités du générateur.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avère nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab 7.10.0(R2010a) permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairages et températures solaires. Nous rappelons dans le deuxième chapitre les principales caractéristiques des convertisseurs statiques dont il faut tenir

compte pour dimensionner les étages d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge. Pour mieux analyser dans le dernier chapitre les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons étudié plusieurs méthodes d'optimisation. ?

Références bibliographiques

- [1] K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivié 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de maroc ,revue des énergies renouvelables ,pp 451 – 462, 2007.
- [2] A. T.SINGO ' Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome' Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [3]<http://www.wikipédia.com>.
- [4] <http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/phys/sc530.htm>.
- [5]<http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/cducation/pn/pnformation2/pnformation2.html>
- [6] Y. Pankow, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de recherche technologique de lille, 2004
- [7] B. Fléche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [8] L.P.Lachauvinnière ,ficher 'Convertisseur statique'communication technique
- [9] O. BELABBASSI , M. REZMA 'Contribution a l'étude et dimensionnement d'un systeme hybride photovoltaïque / réseau sone gaz' mémoire d'ingénieur d'état université de Laghouat , 2011
- [10] C.BERNARD, C. SEBRAO , O.Bernard LAVAL, C.VAUDOUER'Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques' université de sfax école nationale d'ingénieurs de sfax,2008-2009.
- [11] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005

[12] S.BELAKEHAL « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables » thèse de doctorats, université de Constantine, 2010.

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

[14] Y. PANKOW 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque', thèse de doctorats de l'école nationale,2004.

[15] M.ARROUF 'Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur

un générateur photovoltaïque', thèse doctorats université de Constantine,2007.

[16] V.Boitier , P. Maussion , C. CABAL 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.

[17] F. Ansari ,A. K. Jha' Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm' international journal of research in engineering & applied sciences, issn: 2294-3905, PP 19-30,2011.

[18] B.Multon,O.Gergaud,H.ben ahmed, X.Roboam, S.Aster, B.Dakyo, C.Nikita, 'Etat de l'art des aérogénérateur',l'électronique de puissance ,vecteur d'optimisation pour les énergies rerenouvelables,Ed.novelect-ecrin,2002.

[19] A. Brahmi et A. Abounada et M. Ramzi Revue 'Application de la commande 'Perturb and Observe' pour l'extraction de la puissance maximale des cellules photovoltaïques' des Energies Renouvelables CER'07 Oujda 2007.

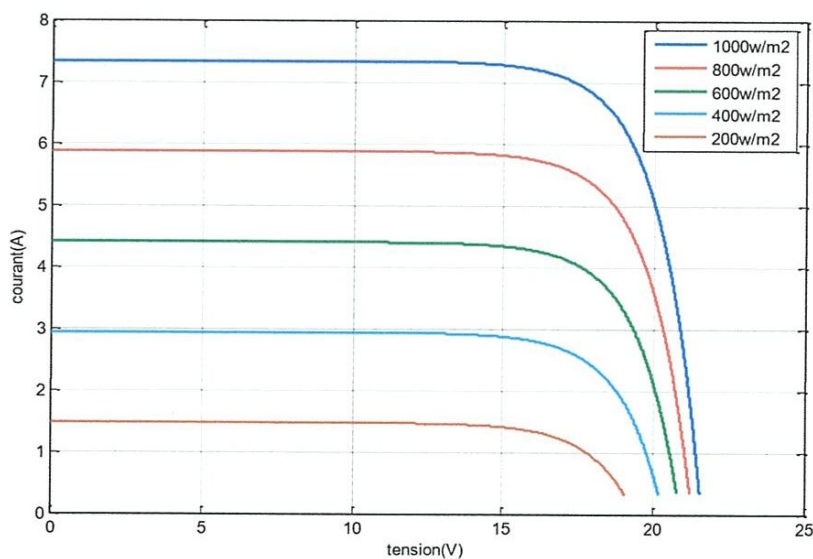
[20] K. GUESMI 'Contribution a la commande floue d'un convertisseur statique', université de remis champagne ardenne, thèse de doctorats ,2006.

ANNEXE A : Paramètres caractéristiques du générateur PV model KC200GT

1-Module photovoltaïque :

Température de la cellule à la condition standard,	1000W/m ²
Eclairement aux conditions standard,	25°C
Tension de circuit ouvert,	32.9 V
Courant de court-circuit,	8.21 A
Rendement	16%
Nombre de cellule	54
Puissance maximale	200W
Tension au point de la puissance maximale	26.3V
Courant au point de la puissance maximale	7.61A
Coefficient de variation du courant en fonction de Température	$(53,18 \times 10^{-3}) \text{ A}/^\circ\text{C}$
Coefficient de variation de la tension en fonction de Température	$(-1,23 \times 10^{-1}) \text{ V}/^\circ\text{C}$

2-Caractéristiques Courant-Tension pour différents Eclairement et une température T=25°



ANNEXE

3- Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures et un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$

