



Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies
Département de Génie Electrique

Filière : Génie Electrique et Electronique
Spécialité: Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de la préparation du diplôme:

MASTER ACADEMIQUE

Thème :

Etude de l'alimentation d'un site isolé à partir
d'énergies photovoltaïques.

Proposé et Dirigé Par **Benattouss Djilani**

Présenté par **Hada Mohamed Seghir Hada Mohamed**

Promotion:2011/2012

Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère,

Mes frères et mes sœurs

Tous mes proches

Tous mes amis

Toute la promotion 2012 d'Electrotechnique,

Tous ceux qui me sont chers

Et spécialement mon amis BOUZANNA adel

MOHAMED SEGHIR
MOHAMED SEGHIR

REMERCIEMENTS

Avant tout on remercie dieu le tout puissant qui nous a donné le courage la patience

l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur M :LABBI YACIN qui à ménagé

Un grand effort afin de nous permettre de mener à bien présent travail et à qui

Nous exprimons notre gratitude et notre respect.

Nous remercions les enseignants du département d'électrotechnique.

Nous remercions très vivement Dr :BEN ATOUS pour son aide.

Tout comme nous exprimons mes meilleures sentiments de gratitude aux honorables

membres du jury qui ont l'amabilité et la patience de supporter ma maladroite

Capacité à m'exprimer en public

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions de réglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production.

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Sans énergie, notre monde ne pourrait fonctionner. En effet, l'homme, les machines et la nature en ont tous besoin. La demande totale d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique, à la disponibilité limitée des sources d'énergie et aux coûts sociaux et environnementaux de l'approvisionnement d'énergie. Mais, en principe, nous disposons de suffisamment d'énergie. Le soleil fournit une énergie lumineuse colossale à la Terre (10.000 fois l'énergie nécessaire). Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole...) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, ... entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies renouvelables utilisables actuellement sont l'énergie hydraulique, le chauffage solaire actif, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie photovoltaïque, la biomasse ...etc.

Introduction générale

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque et aussi consiste au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de la puissance maximale (**Maximum Power Point Tracking MPPT**) d'un générateur photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, nous focalisons notre attention sur la production d'électricité.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons La cellule photovoltaïque et les caractéristiquement générateur PV, À partir des deux chapitres précédents, nous passerons au troisième chapitre qui traite La puissance maximale du générateur photovoltaïque MPPT par Un modele de PV a été développé a l'aide de Matlab/Simulink.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Énergie solaire

I. 1 Introduction.....	3
I. 2 La production d'énergie.....	3
I. 2. 1 Le principe de production	3
I. 2. 2 Les différents types d'énergie	3
I. 2. 2. 1 Énergies non renouvelables.....	4
I. 2. 3. 2 Énergies renouvelables	4
I. 3 Électricité photovoltaïque.....	8
I. 3. 1 Histoire	8
I. 3. 2 Le soleil et le rayonnement	9
I.3.2.1 Le soleil.....	9
I.3.2.2 Le rayonnement	9
I.3.2.3 Modèle simplifié de l'éclairement.....	9
I.4 Conclusion.....	11

Chapitre II : La cellule photovoltaïque et les caractéristiques de générateur PV

II. 1 Introductio.....	12
II.2 Les cellules solaires.....	12
II.3 Le principe de fonctionnement.....	12
II.4 Les différents types de cellules solaires.....	13
II.5 Les modules (ou panneaux).....	15
II.6 Le schéma équivalent d'une cellule solaire.....	15
II.7 Le générateur PV et ses performances.....	17
II.7.1 Caractéristique courant-tension.....	17
II.7.2 Caractéristique puissance-tension.....	19
II.7.3 Influence de l'éclaireme.....	20
II.7.4 Influence de la température.....	21
II.7.5 Influence de la résistance série et la résistance shunt.....	22

II.7.6 Rendement	23
II.7.7 Facteur de forme.....	24
II.7.8 Association de Cellules photovoltaïques en série.....	24
II-7-9 Association de cellules photovoltaïques en parallèle.....	24
II.8 Les système photovoltaïques.....	25
II-8-1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique	25
II-8-2 Les systèmes à couplage direct sans batterie	26
II.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	27
II-9-1 Avantages	27
II-9-2 Inconvénients	27
II.10 Conclusion.....	28

Chapitre III : Méthode MPPT Pour La Poursuite Du Point De Puissance

Maximale

III.1 Introduction.....	29
III.2 La connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance.....	29
III.3 La connexion direct GPV-charge via un étage d'adaptation.....	31
III.4 Principe de la recherche du point de puissance maximal.....	32
III.5 Critères d'évaluation d'une commande MPPT.....	34
III.6 Rendement de la chaine de puissance.....	35
III.7 Différents types de la commande MPPT.....	36
III.8 La commande MPPT perturbation puis observation.....	37
III.8.1 Principe des commandes "Perturbation et Observation" (P&O)	37
III.8.2 Structure de l'algorithme P&O.....	38
III.9 Conclusion.....	40

Chapitre IV : Testes et Applications

IV.1 Introduction.....	41
IV. 2. 1^{er} Teste la technique MPPT-P&O.....	43
IV. 2. 1 Effet de l'éclairement.....	43
VI. 2.2. Effet de la température.....	44
IV.2.3. Effet simultané de l'éclairement et de la température.....	46
IV.3 Modélisation de GPV avec convertisseur DC/DC	
Controlé par commande MPPT.....	47

IV.3.1 Simulation de l'ensemble Panneau– Hacheur– charge (Rapport cyclique fixe).....	48
IV.3 .2 Liaison à travers un hacheur commandé par une MPPT.....	50
IV.4 Conclusion.....	52
CONCLUSION GENERALE.....	53

Chapitre I

Énergie Solaire

I-1 INTRODUCTION:

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité. Son utilisation est si étendue, qu'aujourd'hui on pourrait difficilement concevoir une société techniquement avancée qui n'en fasse pas usage. Des milliers d'appareils sont dessinés pour fonctionner grâce à l'énergie électrique, soit sous forme de courant continu de faible tension, soit à partir d'un courant alternatif de tension plus élevée. Donc L'électricité est un bien de consommation qui est devenu indispensable au bien-être de la population et au développement économique de toute société. A ce titre, il est vital de savoir les différentes sources de cette énergie .

I-2 LA PRODUCTION DE L'ELECTRICITE:

I-2-1 Le principe de production :

Toutes les centrales électriques produisent de l'électricité grâce à des systèmes couplés turbine et alternateur. L'énergie utilisée dans les centrales électriques est destinée à la mise en mouvement des turbines. à la sortie de la centrale, une tension efficace de l'ordre de 220 KV et de fréquence 50 Hz est produite.

I-2-2 Les différents types d'énergie:

On distingue les énergies *non renouvelables* et les énergies *renouvelables* :
Les premières sont le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium (avec les technologies actuelles).

Les secondes couvrent l'hydraulique, la biomasse à les déchets, l'éolien, le solaire, le géothermique, les marées et les courants (marins ou des rivières). Toutes ces énergies ne sont pas utilisées de la même façon.

I-2-2-1 Énergies non renouvelables :

Le pétrole ou le gaz naturel ne sont pas des énergies renouvelables car il faudrait des millions d'années pour reformer la quantité d'énergie fossile que l'on consomme actuellement. De même, l'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable car la réserve d'uranium disponible sur Terre est limitée.

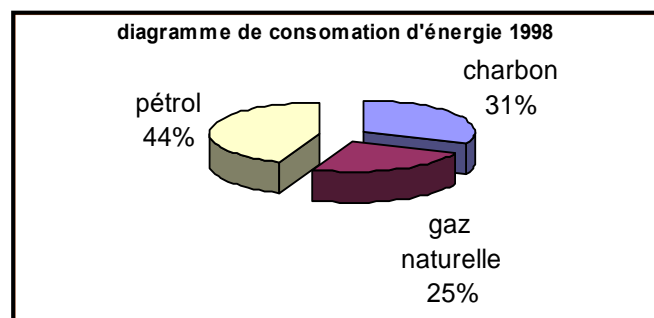


figure I.1: consommation d'énergie [1]

L'énergie non renouvelable présente certains inconvénients:

L'énergie non renouvelable est une énergie non propre avec déchets, et provoquent la pollution de l'environnement.

Leurs coûts de fonctionnement sont très grands vu les entretiens réduits, ils nécessitent le combustible, transport, personnel hautement spécialisé.

I-2-2-2 Énergies renouvelables:

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont de phénomènes naturels réguliers. principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à la quelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à la quelle elle est consommée. tous les énergies renouvelables ne sont pas nécessairement propres : par exemple, certains fluides frigorigènes

utilisés dans les circuits des pompes à chaleur géothermiques sont des gaz qui, en cas de fuite, contribuent à l'effet de serre, et peuvent aussi détruire la couche d'ozone.[2]

a) *Énergie Éolienne:*

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Elle peut être utilisée de deux manières : de manière directe et indirecte.

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin(*figureI.2*).
- Transformation en énergie électrique : l'éolienne (*figureI.3*) est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.



figureI.3: éolienne



figureI.2: moulins à vent

b) *Énergie hydraulique:*

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau (*figureI.4*), placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est

utilisée au niveau des barrages (*figureI.5*) et sert principalement à la production d'électricité.



figureI.4: moulins à eau



figureI.5: un barrag

c) Énergie de la biomasse:

La biomasse est la 2ème énergie renouvelable dans le monde. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques végétales ou animales.

Le terme de biomasse recouvre un champ très large de matières : bois(*figureI.6*), déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles (pailles, lisiers, etc.), fraction fermentescible des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz de décharge ou produits de méthanisation (lisiers, boues d'épuration, décharges, ...).

L'avenir du bois-énergie passe aussi par la réalisation de réseaux de chaleur. Alimentés par des chaudières, ils distribuent de l'eau chaude pour les logements individuels et collectifs, les mairies, les écoles, les piscines, etc...



Figure I.6 :le bois

d) Énergie géothermique:

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. La plus grande partie de la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, vent). Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.



Figure I.7: Champ d'essais géothermiques

e) Énergie solaire:Électricité ou chaleur :

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire thermique qui, quant à elle, produit de la *chaleur* à partir de rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas de capteur thermique qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe-eau solaire » ou des « capteurs à air chaud ».

Cet aspect de l'énergie solaire ne pas traité dans cet ouvrage. On évitera dans le terme « capteur solaire » car une maintient l'ambiguïté entre les deux techniques [3].

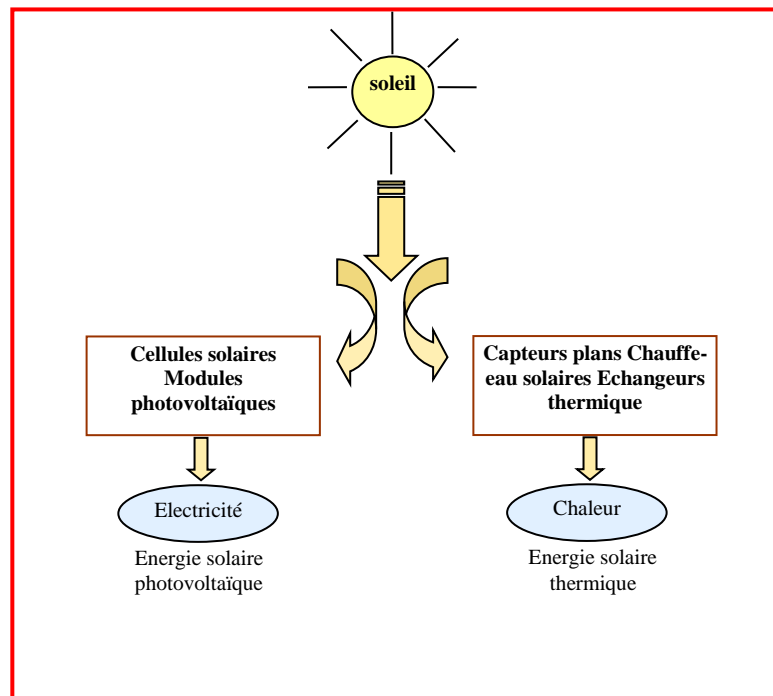


Figure I.8: les deux types d'énergie solaire.

Nous nous basons dans notre travail sur l'énergie solaire .

I-3 ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE:

I-3-1 Histoire:

L' hélioélectricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'à partir de 1954, avec la réalisation des premières cellules photoélectriques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Mais, pour des raisons à la fois techniques et économiques, cette nouvelle source d'énergie électrique a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires[4].

I-3-2 Le soleil et le rayonnement:

I-3-2-1 Le soleil:

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie, qui quitte sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre allant de 0,2 μm (ultra-violet) à 4 μm (infra-rouge). Cette énergie représente une source majeure d'énergie dans le futur. Malgré la distance considérable de la terre du soleil (150×10^6 km), la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie de 180×10^6 GW [5].

I-3-2-2 Le rayonnement:

Le soleil rayonne sur la Terre une puissance de 16.1015 kWh par an, dans toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière visible. L'énergie lumineuse issue du Soleil est à la base de la majeure partie des formes d'énergie disponibles : énergies chimique, thermique, hydraulique, électrique. Par exemple, les combustibles fossiles, tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ont été formés à la suite d'un stockage d'énergie solaire par des organismes, sur une longue période. En fait, l'énergie nucléaire est la seule à ne pas provenir de l'énergie solaire.

Cette dernière est indispensable pour maintenir sur Terre les conditions lumineuses et thermiques nécessaires à la vie. Par exemple, la photosynthèse utilise cette énergie pour fournir aux plantes chlorophylliennes de la matière organique. Soixante pour cent de l'énergie solaire qui atteint la Terre est réfléchiée par l'atmosphère ; 11% est réfléchiée par le sol et la végétation ; 16% entretient, par évaporation, le cycle de l'eau, qui produit la pluie, les eaux de montagne et de rivière [1].

I-3-2-3 Modèle simplifié de l'éclairement:

Une approche simplifiée a été élaboré selon, et qui servira comme une première approximation pour la quantification de l'éclairement incident. Ce modèle quantifie le flux

lumineux pour une journée claire, et qui fait simuler la forme en cloche de l'éclairement à une fonction <<Sinus>> du temps solaire vrai.

Pour notre application, le modèle précité est adopté.

L'expression mathématique d'un tel modèle est la suivante [6] :

$$E = E_M \cdot \sin(h) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$t = t_{sr} + h/15 \quad (\text{I.2})$$

Où :

E_M : valeur maximale de l'éclairement sur site (obtenue à midi $E_M=1000\text{W/m}^2$).

t_{sr} : temps solaire correspondant au levé du soleil (en heures).

t et h désignent respectivement le temps solaire vrai et l'angle (en degrés) .

a) Temps solaire vrai (TSV) :

Le temps solaire vrai à un lieu et à un instant donné est l' angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C' est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et de son mouvement de translation.Par définition, le temps solaire vrai (TSV) est évalué

$$\text{par : } TSV = 12 + h/15 \quad (\text{I.3})$$

b) Angle horaire :

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour un lieu donné .Il est lié directement au temps solaire vrai par la

$$\text{relation : } h = \frac{360^0}{24} (TSV - 12) \quad (\text{I.4})$$

La figure(I.9) montre l'éclairement solaire à partir d'un modèle quantifie le flux lumineux pour une journée claire, et simule la forme en cloche de l'éclairement à une fonction

$$\text{suivant[7] : } E = E_M \cdot \sin(15t - 90^0) \quad (\text{I.5})$$

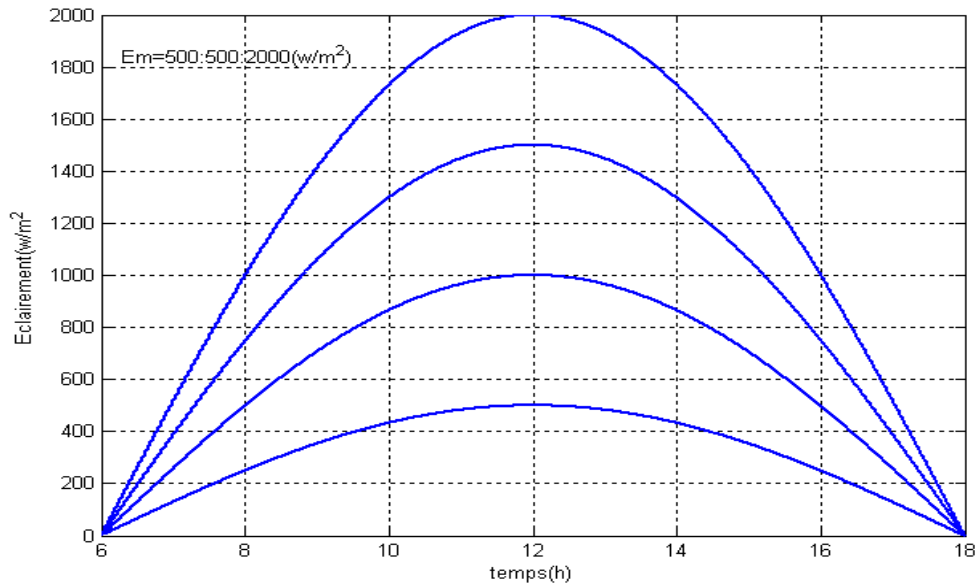


figure I.9 : modèle simplifié de l'éclaire

I-4 CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a représenté les différents types d'énergie (les énergies *non renouvelables* et les énergies *renouvelables*) pour produire l'électricité, puis nous avons traité le principe de l'électricité Photovoltaïque (historique et le rayonnement).

Le prochain chapitre sera donné une étude détaillée sur la cellule PV et les caractéristiques de générateur PV

Chapitre II

La cellule photovoltaïque et les caractéristiques de générateur PV

II-1 INTRODUCTION:

La production d'électricité par conversion de la lumière à l'aide de cellules photovoltaïques connaît un essor fulgurant à l'aube du 21ème siècle avec un taux de croissance record de plus de 40% en 2000. De nouvelles approches technologiques seront toujours nécessaires afin de réaliser des cellules à faible coût et à haut rendement de conversion énergétique afin de permettre au photovoltaïque de dépasser d'ici l'an 2010 le seuil de compétitivité par rapport aux autres sources de production d'électricité.

II-2 LES CELLULES SOLAIRES :

Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque.

Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0,6 V.

II-3 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo-sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Bequerelle 1889). Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteur. Ces deux couches sont dopées

différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi conducteur (figure II.1). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [1, 2, 3]

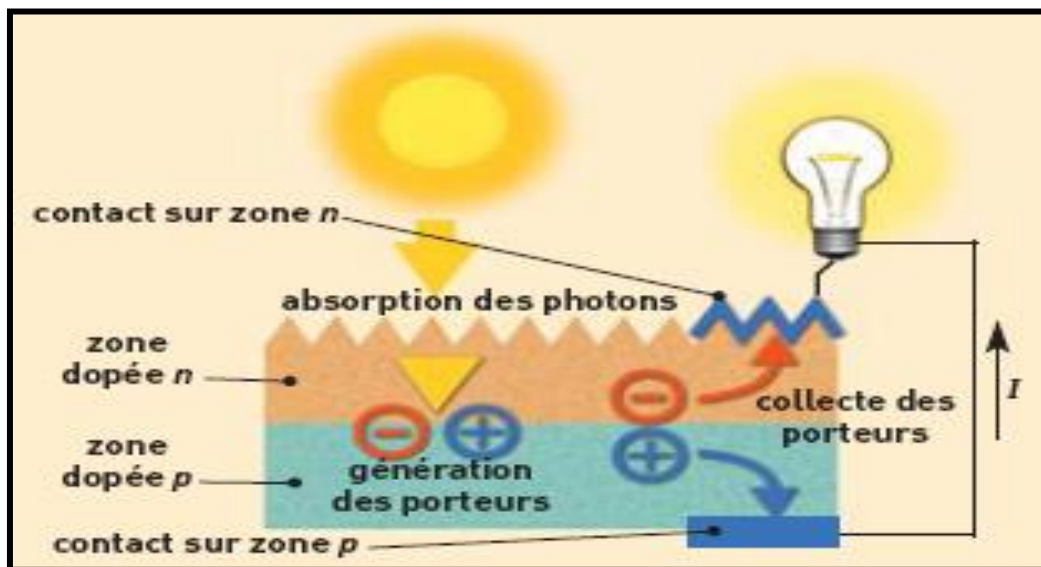


Figure II.1: Schéma d'une cellule élémentaire

II-4 LES DIFFÉRENTS TYPES DE CELLULES SOLAIRES:

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [13]:

- Les cellules monocristallines: Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12- 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- Les cellules polycristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible: 11% - 13% (18% en laboratoire).

- Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres.

Ainsi notre recherche de la performance maximale, nous a amenés à nous procurer des cellules monocristallines, qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation.

La caractéristique principale de la cellule solaire est la caractéristique $I-V$ qui montre comment une cellule solaire répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température figure.II.2. Il y a trois points importants dans cette courbe:

- Le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale (point 5).
- Le point où la tension est égale à zéro et le courant est en maximum (courant de court-circuit, point 4).
- Le point où le courant est égal à zéro et la tension est en maximum (tension de circuit ouvert, point 1).

Egalement la caractéristique $I-V$ peut être divisée en trois gammes:

- Une gamme où la cellule est considérée comme une source de tension (1-2).
- Une gamme où la cellule est considérée comme une source de courant (3-4).
- Une gamme où ni la tension ni le courant ne sont constants (2-3).

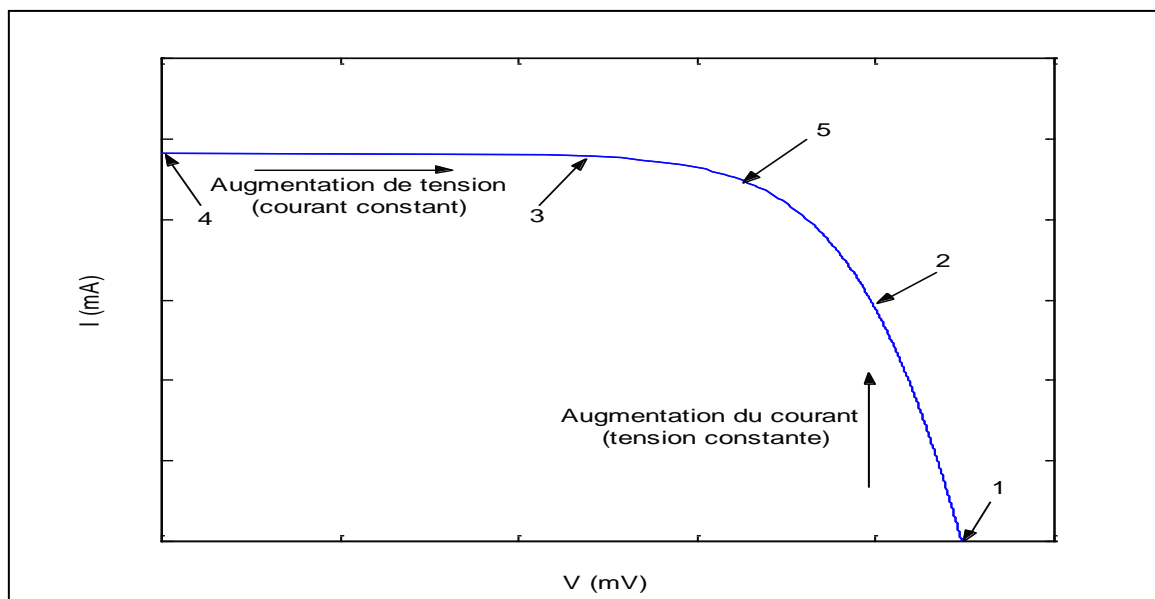


Figure II.2 : Caractéristique typique $I-V$ d'une cellule solaire

II-5 LES MODULES (OU PANNEAUX):

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.



Figure. II.3 : Le Module photovoltaïque

II-6 SCHÉMA ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE:

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et représentés sur le schéma équivalent (figII.3).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (G) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) et peut donc être placée indifféremment entre A et B ou entre C et D dans le schéma équivalent [9].

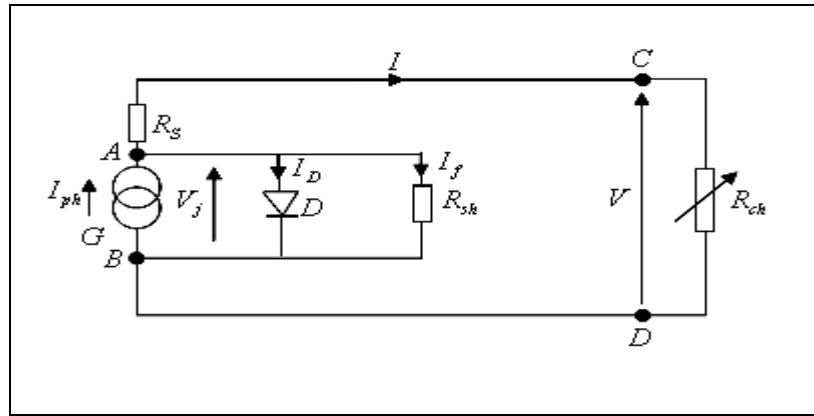


Figure II.4 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple, mais d'autres auteurs pour effectuer l'extraction des paramètres de cellule solaire tel que le courant photovoltaïque, la résistance série, la résistance parallèle, la tension thermique, et le courant de saturation ; ils ont basé ces calculs sur un modèle à double exponentiel qui est à la forme suivante [10,11] :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp\left[\frac{(V + R_s I)}{\alpha \cdot V_{th}}\right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp\left[\frac{(V + R_s I)}{\beta \cdot V_{th}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

On assume que les Coefficient des cellules sont $\alpha = 2$ et $\beta = 2$ selon [10].
En outre, les deux courants de saturation I_{01} et I_{02} ce sont exprimés par la formule suivant:

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{q \cdot Voc}{K \cdot T_c}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.2})$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{q \cdot Voc}{2 \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right]} \quad (\text{II.3})$$

Plusieurs travaux de recherche ont montré que les deux modèles possèdent un domaine de validité ; le modèle en double exponentielle se prête mieux aux mesures de la caractéristique courant-tension pour des tensions élevées tandis que celui à une exponentielle est plus précis pour de basses et moyennes tensions. Ces deux modèles sont implicites et non-linéaires, alors la recherche ou la détermination d'une solution analytique serait une tâche délicate [11].

II-7 LE GÉNÉRATEUR PV ET SES PERFORMANCES:

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

II-7-1 Caractéristique Courant-Tension:

La caractéristique courant-tension d'une photopile se met sous la forme mathématique :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Où le courant de diode (D) est donné par l'équation [9] :

$$I_D = I_0 \left(\exp\left[\frac{q(V + R_s I)}{akT}\right] - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

Où a est un facteur de dimension, k constant de Boltzmann ($k = 1.381 \cdot 10^{23} \text{ J / K}$) et q la charge de l'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

En substituant l'expression du courant I_D dans l'équation (II.4), le courant I devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left[\frac{q(V + R_s I)}{akT}\right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left[\frac{q(V + R_s I)}{akT}\right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Le courant de court circuit est pratiquement égal au photo-courant I_{ph} lui-même, d'après cette dernière équation, on peut déduire l'expression de la tension V :

$$V = -R_s I + \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} + 1\right)I - \frac{V}{R_{sh}}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

Si l'on suppose que R_{sh} est infinie et R_s nulle, l'équation précédente devient :

$$V = \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Si la charge est infinie (circuit ouvert), la cellule présentera à ces bornes une tension V_{oc} , dont son expression est comme suit :

$$V_{oc} = \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Comme l'ordre de grandeur de (I_{ph}/I_0) est d'environ $10^{10} : 10^{14}$ [9], l'équation précédente devient :

$$V_{oc} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Avec } V_{th} = \frac{akT}{q} \quad (\text{II.11})$$

Où V_{th} est la tension thermique.

La tension thermique V_{th} et le courant de saturation peuvent être données par [10]:

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{oc}}{\ln\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}}\right)} \quad (\text{II.12})$$

$$I_0 = (I_{sc} - I_{op}) \exp\left(-\frac{V_{op} + R_s I_{op}}{V_{th}}\right) \quad (\text{II.13})$$

Où

$I_{sc} = N_p \cdot I_{sc}$ 'module' : Le courant de court-circuit.

$I_{op} = N_p \cdot I_{op}$ 'module' : Le courant optimal.

$V_{oc} = N_s \cdot V_{oc}$ 'module' : La tension de circuit ouvert.

$V_{op} = N_s \cdot V_{op}$ 'module' : La tension optimale.

$R_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s$ 'module' : La résistance série.

N_s et N_p sont respectivement le nombre de modules en séries et en parallèles (dans notre module $N_s=10, N_p=2$) .La courbe $I-V$ est essentiellement affectée par la variation de deux entrées : l'éclairement et la température de Générateur PV. L'adaptation de l'équation (II.1) pour différents niveaux de l'éclairement et la température solaires peut être manipulée par les équations suivantes [10] :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (\text{II.14})$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (\text{II.15})$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (\text{II.16})$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (\text{II.17})$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \tag{II.18}$$

Ici le suffixe ‘ref’ se rapporte à des conditions évaluées données par $E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$.

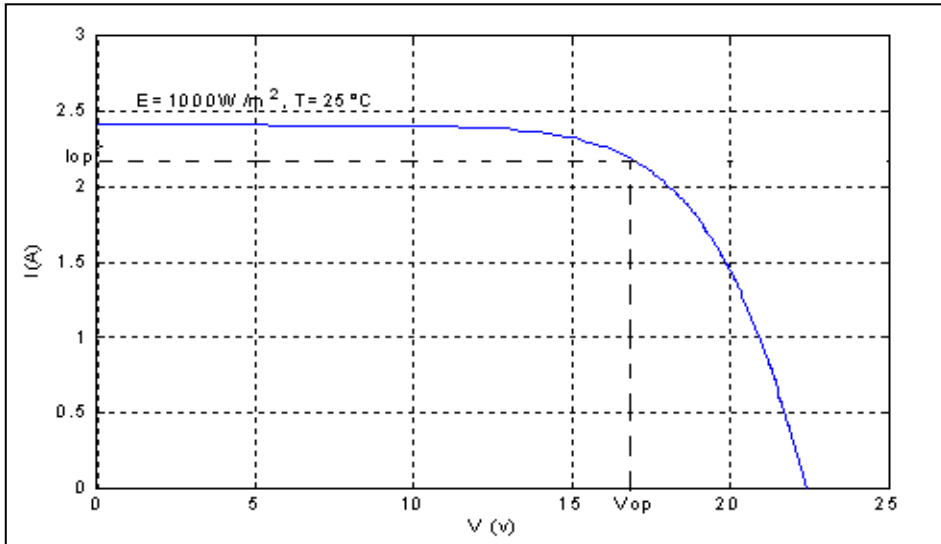


Figure II.5 : Caractéristique courant –tension d'un module solaire

II-7-2 Caractéristique Puissance-Tension:

La puissance maximale débitée par la cellule donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant comme représentée la formule $P_{max} = I_{op} \cdot V_{op}$.

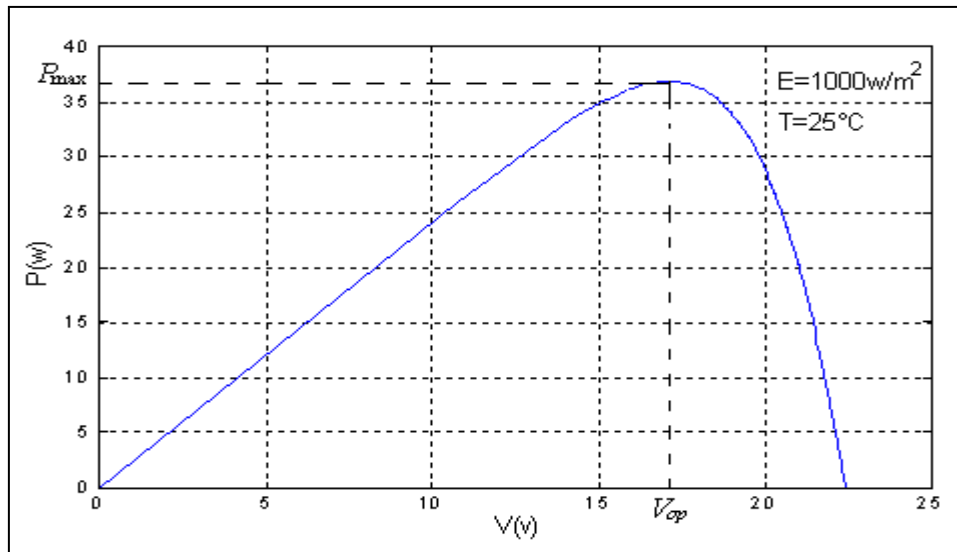


Figure II.6 Caractéristique puissance –tension d'un module solaire

II-7-3 Influence de l'Éclairement:

La figure II.6 présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

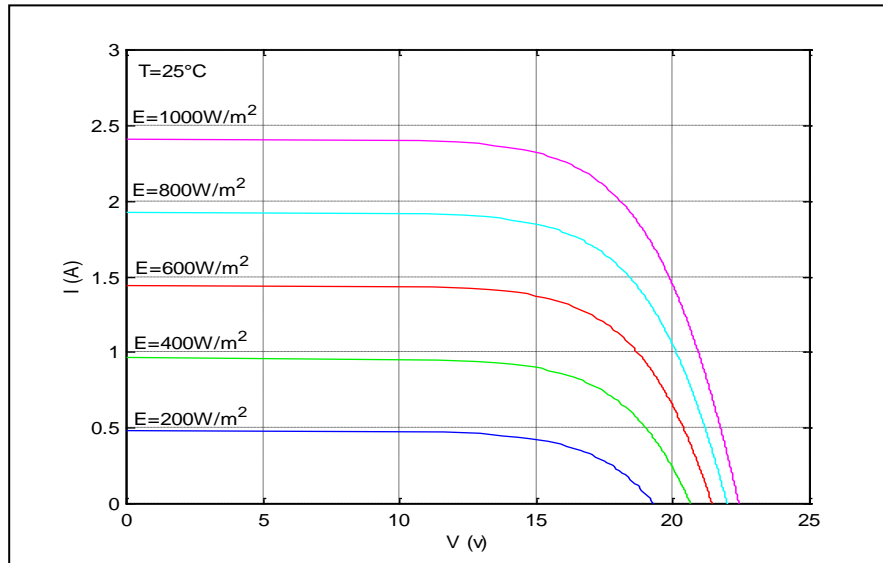


Figure II.7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique I - V

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [5]. 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/m² et une température de 25 °C.

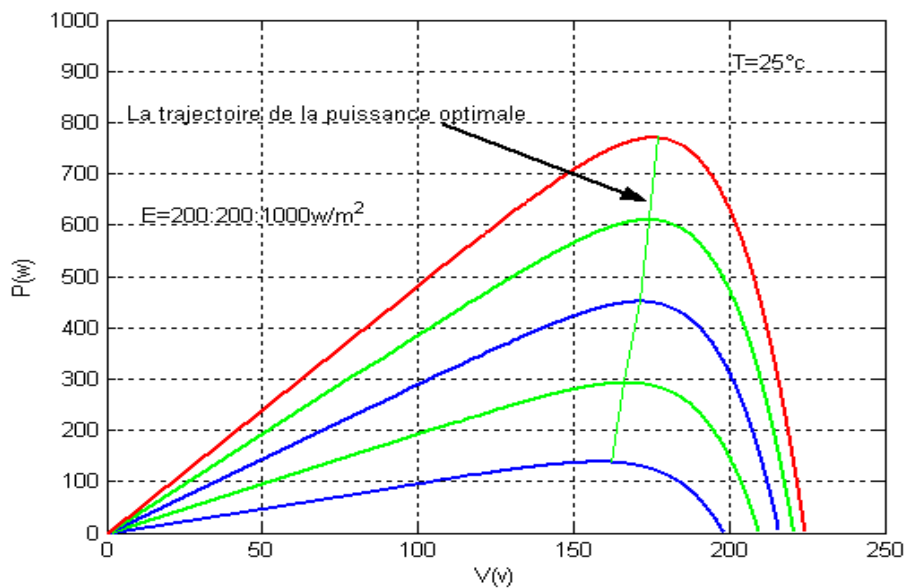


Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique P - V

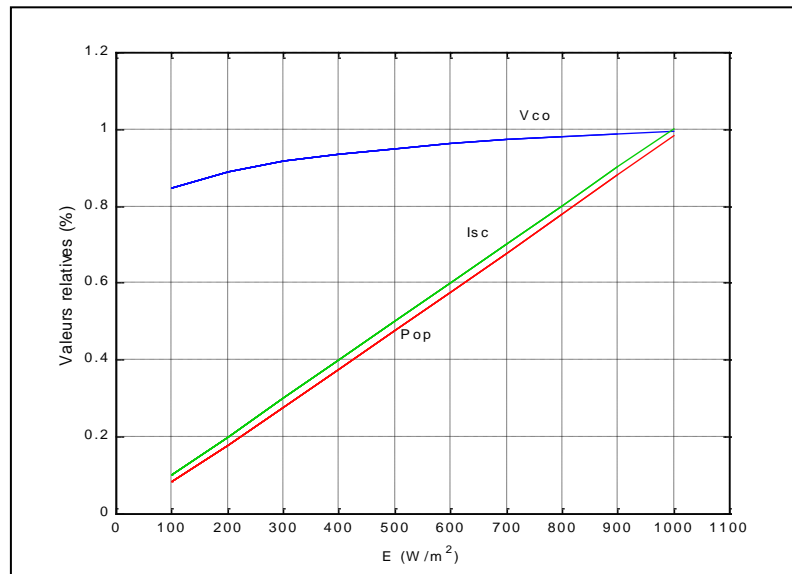


Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur V_{co} , I_{sc} et P_{op}

II-7-4 Influence de la Température:

La figure II.10 présente des courbes courant tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV:

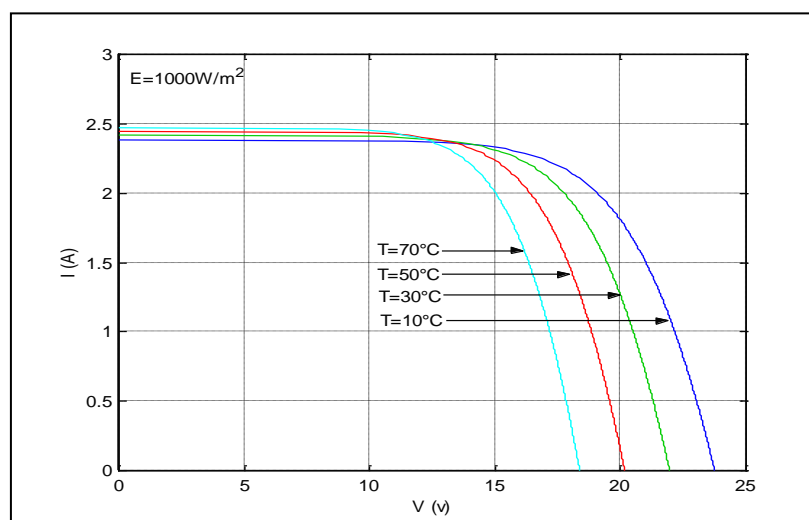


Figure II.10 : Influence de la température sur la caractéristique électrique I-V

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [5]. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

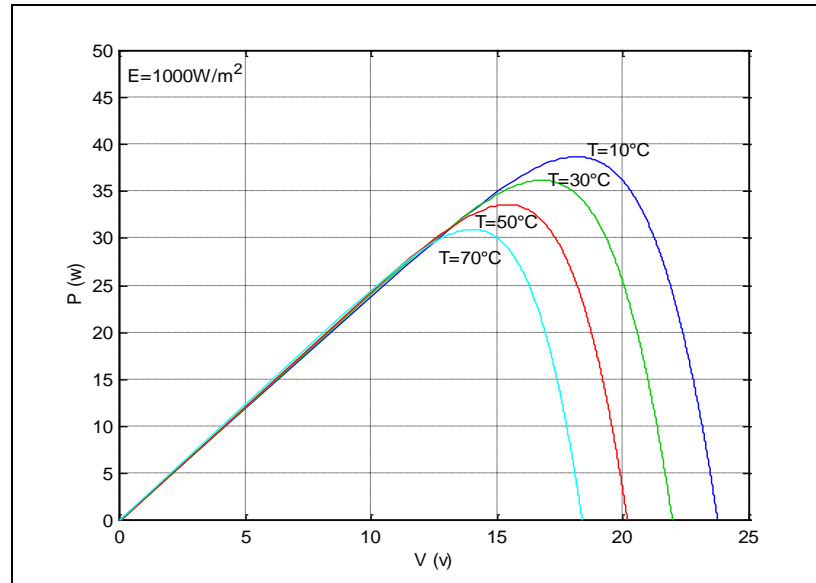


Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique électrique P-V

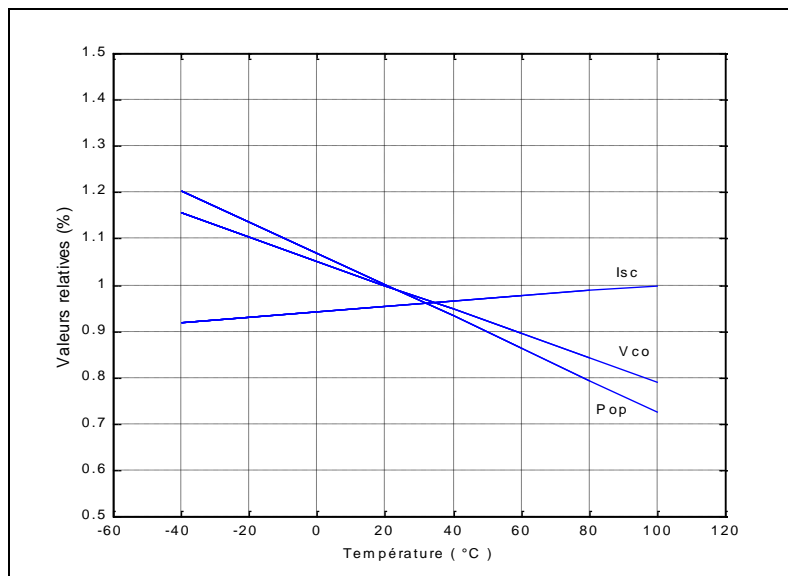


Figure II.12: Influence de la température sur I_{sc} , V_{co} , P_{op}

II-7-5 Influence de la résistance série et la résistance shunt:

La figure II.12 montre l'influence de la résistance série sur la courbe $I-V$ de la cellule qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance $P-V$ dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension constante [12].

La résistance shunt est généralement très élevée, si elle est trop faible, elle aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la cellule ; en outre, une cellule ne donnera plus de tension sous faible éclairement si la résistance shunt est trop faible [9].

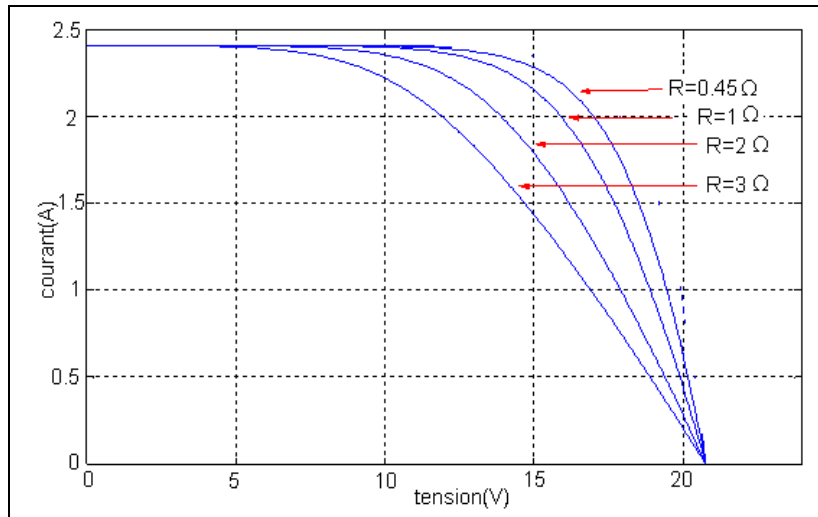


Figure II.13: Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V

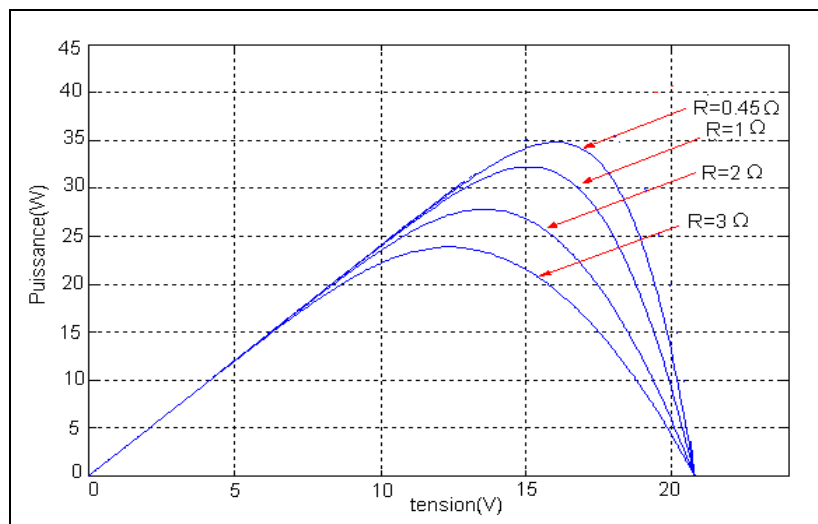


Figure II.14: Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V

II-7-6 Rendement:

Le rendement d'un générateur PV est défini comme étant le rapport entre la puissance électrique fournie (puissance que l'on peut extraire au point optimum) a la puissance du rayonnement d'incident: [10, 11,12] :

$$\eta_{PV} = \frac{I.V}{E.A} \quad , \quad \text{Où } A : \text{surface effective de générateur en } m^2 . \tag{II.19}$$

II-7-7 Facteur de forme:

On identifié le facteur de forme, par le rapport de la puissance maximum au produit de courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert [10, 11,12] :

$$FF = \frac{I_{op} V_{op}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (\text{II.20})$$

II-7-8 Association de 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.

La figure II.14 montre la caractéristique résultante (I_{scs}, V_{scs}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) [8]:

$$I_{scs} = I_{cc} \text{ et } V_{scs} = N_s \cdot V_{co}$$

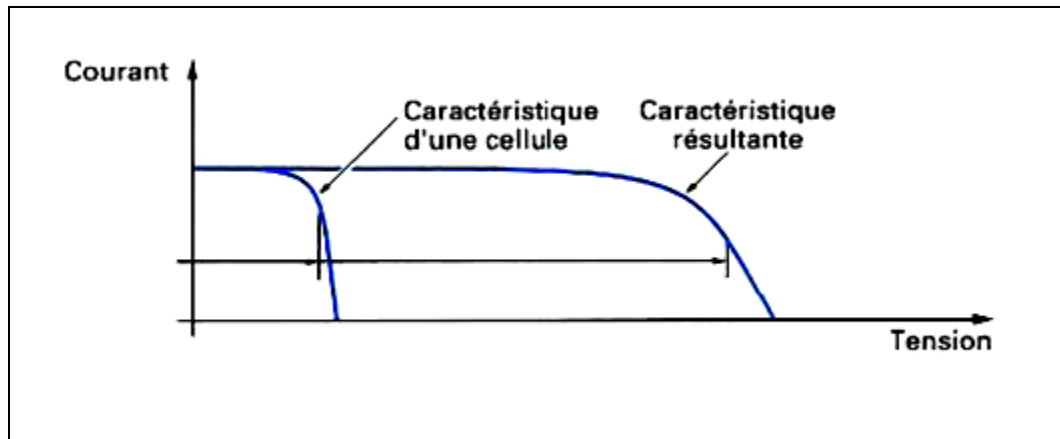


Figure II.15: Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques [8]

II-7-9 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle:

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de 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. La figure II.15 montre la caractéristique résultante (I_{pcc}, V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques [8]:

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co}$$

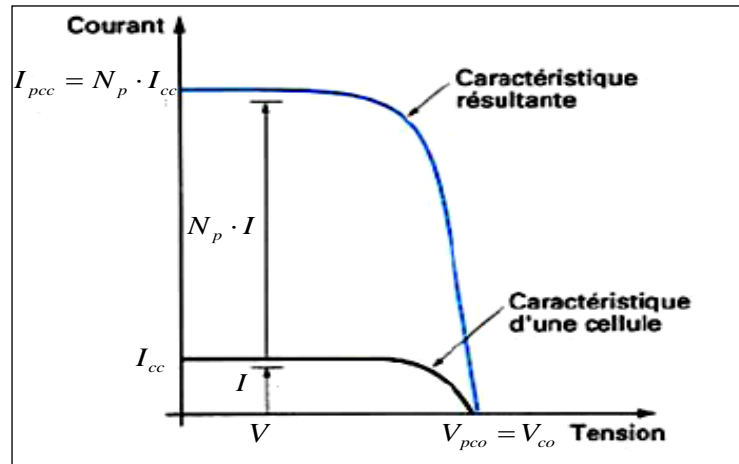


Figure II.16: Caractéristique résultante d'un groupement constitué de N_p cellules identiques en parallèle [8]

II-8 LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES:

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types :

II-8-1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :

(Batterie d'accumulateurs électrochimiques), ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation

- soit directement en courant continu

-soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu- alternatif (onduleur).

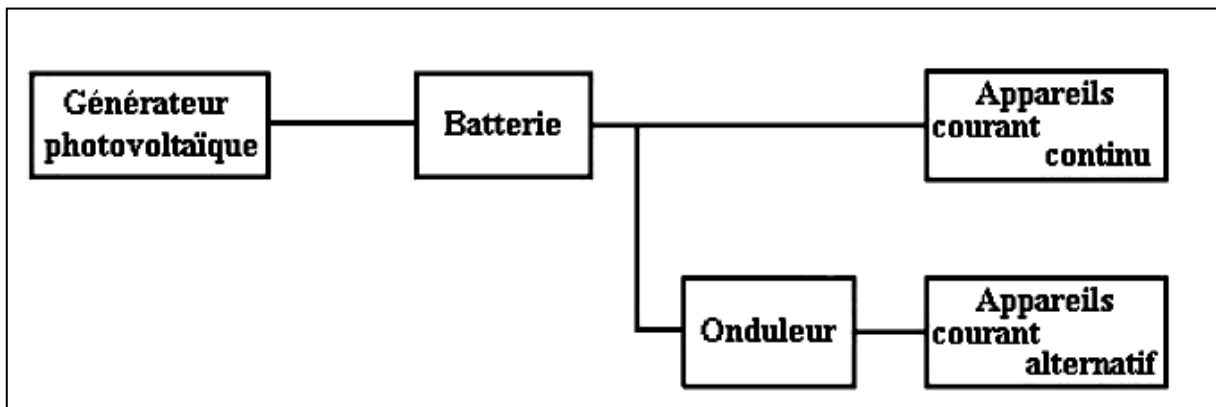


Figure II.17: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage

II-8-2 Les systèmes à couplage direct sans batterie :

(Fonctionnement dit aussi < au fil du soleil >).

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu (adaptateur d'impédance).

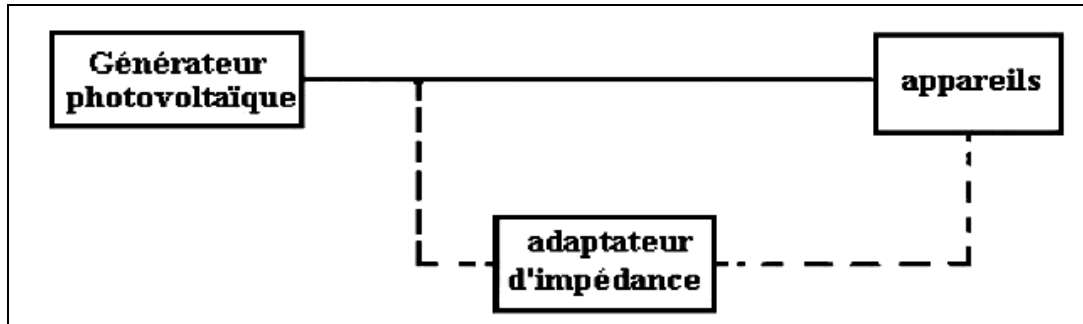


Figure II.18: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à un stockage mais qui ne sera pas sous forme électrochimique.

Exemple :

- pompage \Rightarrow stockage par réservoir d'eau.
- Réfrigération \Rightarrow stockage de froid.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères : simplicité, application, environnement, etc.

Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.

Comme il est vu précédemment, on recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif.

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé suivant (fig. II.19).

Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de figure II.18, mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici.

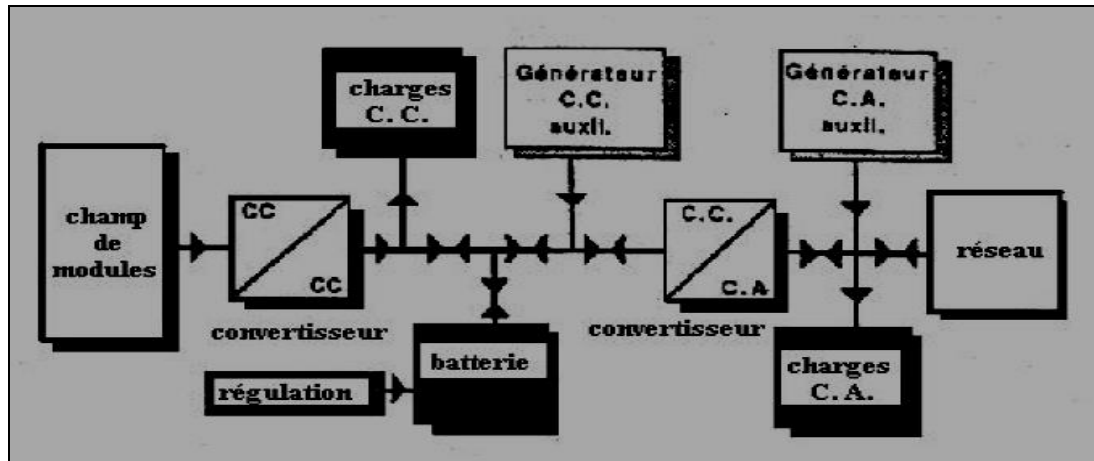


Figure II.19 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

II-9 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE:

II-9-1 Avantages :

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

II-9-2 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, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

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

II-10-CONCLUSION:

Dans ce chapitre on a représenté le principe de la cellule photovoltaïque et les caractéristiques de Générateur PV et ses Performances, les systèmes photovoltaïques, les avantages et les inconvénients, dans le chapitre suivant nous avons étudié la méthode pour l'optimisation de photovoltaïque MPPT.

Chapitre III

Méthode MPPT Pour La Poursuite Du Point De Puissance Maximale

III.1 INTRODUCTION :

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et du faible rendement des dispositifs de conversion photons-électrons mis en oeuvre (entre 12 et 17 %), le développement de cette énergie à grande échelle nécessite avant tout une amélioration de ces systèmes de telle sorte qu'ils puissent fonctionner, à tout instant, à leur puissance maximale.

En effet, les études en simulation dans le chapitre précédent ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

Pour remédier à cette dernière influence, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit les conditions climatiques. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT). [9]

Dans ce chapitre, nous allons exposer succinctement les différentes architectures de la chaîne de conversion PV, MPPTs, ainsi que le principe de la poursuite du PPM. Ensuite nous allons consacrer une partie de ce chapitre sur une méthode de commande plus couramment utilisée de nos jours dite Perturbation et observation (P&O).

III.2 LA CONNEXION DIRECT GPV-CHARGE COMME MODE DE TRANSFERT DE PUISSANCE : [13]

Les connexions direct du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, figure III.1. Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au

générateur de puissance. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

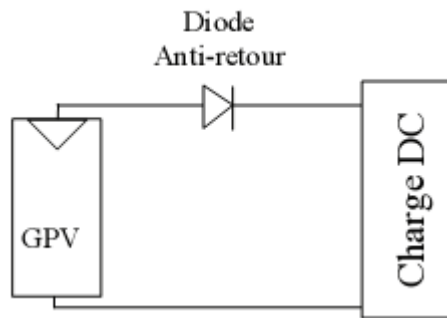


Figure.III.1 Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du GPV et celle de la charge. Comme la caractéristique de la figure montre, la puissance transmise directement à une batterie ou charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectué à la puissance maximale P_{MAX} que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . Autre application direct est le pompage d'eau « au fil du soleil ». dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge.

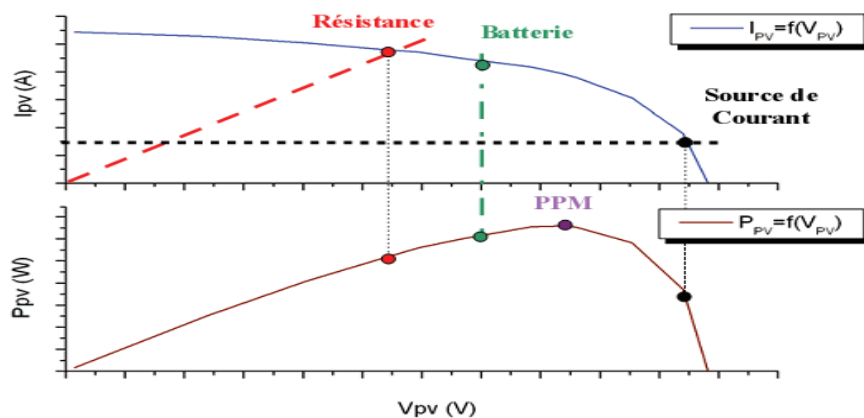


Figure III.2 caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe GPV-Charge.

III.3 LA CONNEXION GPV-CHARGE VIA UN ETAGE D'ADAPTATION : [1]

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque (V_{oc}). Alors, aucun transfert de puissance peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure III.3 est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge.

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire.
- Introduire une isolation galvanique.
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative.

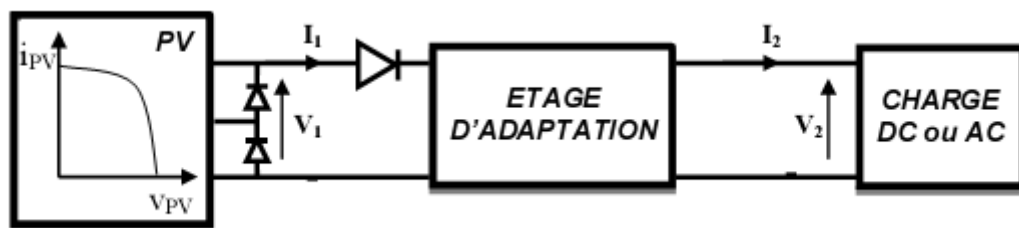


Figure.III.3 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées

classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT qui effectue une recherche permanente du PPM.

III.4 PRINCIPE DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL :

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure III.4 représente 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 correspond à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

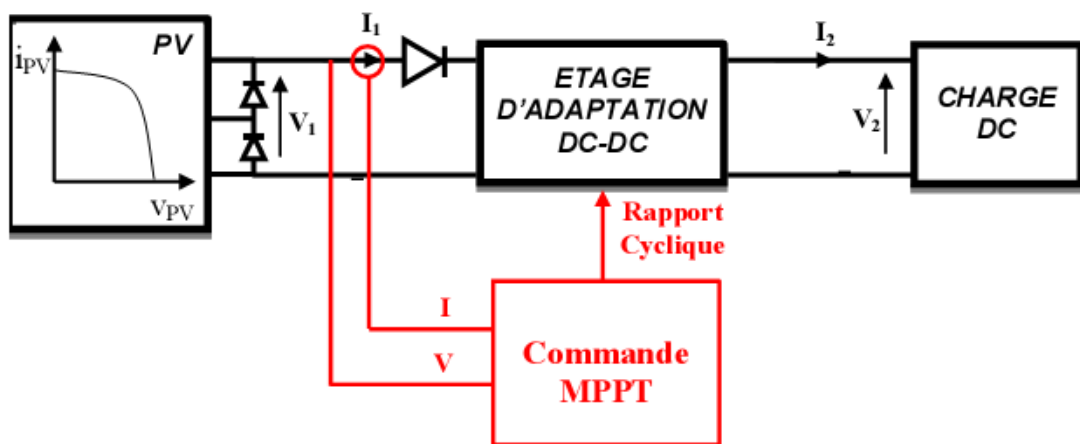


Figure III.4 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.

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 III.5 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau

point P_1 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 PPM_2 . Pour une variation de la 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. [1]

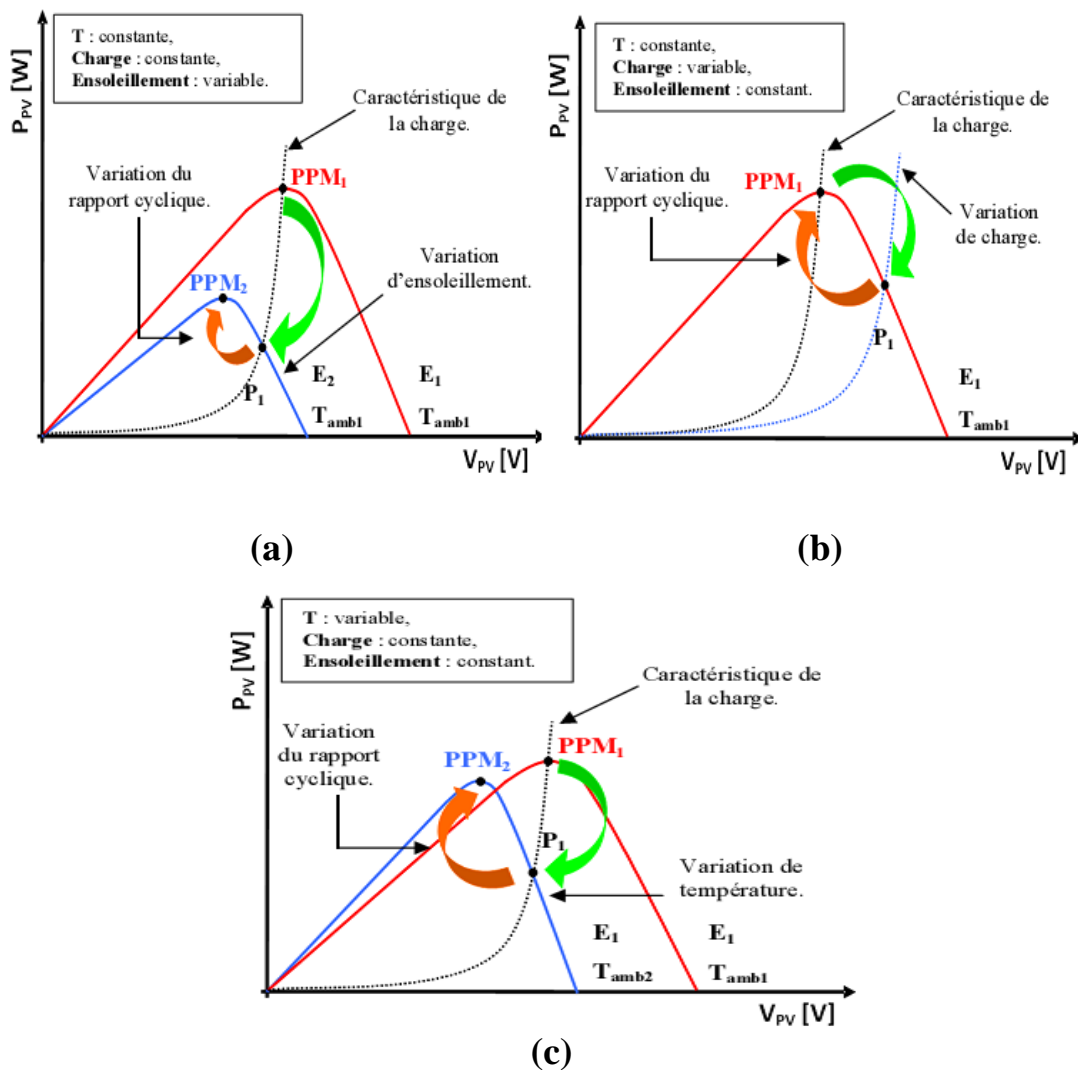


Figure III.5 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale
 a) suite à une variation d'ensoleillement,
 b) suite à une variation de charge,
 c) suite à une variation de température.

III.5 CRITERES D'EVALUATION D'UNE COMMANDE MPPT : [1]

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance effectivement P délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{MPPT} , permet de mesurer l'efficacité de la commande. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad \text{(III.1)}$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

- ***Simplicité et coût :***

Complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

- ***Réponse dynamique :***

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

- ***Flexibilité :***

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux des différentes

technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

- **Compétitive sur une large gamme de puissance :**

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quelque soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

III.6 RENDEMENT DE LA CHAÎNE DE PUISSANCE :

Pour avoir une idée plus précise sur les origines des pertes dans une chaîne de conversion solaire ; des rendements de chaque partie de la chaîne ont été définis. Pour cela, le rendement total de celle-ci a été décomposé en divers types de rendements reliés spécifiquement à chaque partie de la chaîne.

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté η_{PV} est défini.

La puissance P effectivement délivrée par un générateur PV va dépendre de la commande utilisée dans le convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle que nous notons η_{MPPT} permet de mesurer l'efficacité de la commande. En fait on peut l'appeler aussi rendement de la commande.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (\text{III.1})$$

Où P_{MAX} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie de panneau, il dépend des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques.

Enfin, le rendement du convertisseur noté η_{conv} généralement fourni par les documents constructeurs est défini par l'équation (III.2), en notant P_s la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

$$\eta_{CONV} = \frac{P_s}{P_e} \quad (\text{III.2})$$

Le rendement total de la chaîne de conversion (III.3) peut être défini le produit de ces trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV} \quad (III.3)$$

III.7 DIFFERENTS TYPES DE COMMANDES MPPT : [14]

Si l'on veut poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension V_{PV} à la sortie du panneau et le courant I_{PV} qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique ($P = V_{PV} \cdot I_{PV}$), on pourra utiliser différents algorithmes de contrôle pour poursuivre le PPM du module PV. Trois implantations de commande MPPT sont possibles :

- Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis-à-vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire.
- Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor).

- Commandes MPPTs à implantation numérique faisant intervenir que des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande. Ainsi, parmi les nouvelles MPPTs publiées récemment, on peut citer la commande MPPT de type numérique proposé par M. Matsui. Celle ci est basé sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction du son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source-charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement.

Ces commandes numériques se basent sur des algorithmes de contrôle adaptatifs, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale. Ainsi, nous pouvons distinguer entre plusieurs algorithmes :

III.8 LA COMMANDE MPPT PERTURBATION PUIS OBSERVATION : [1]

III.8.1 Principe des commandes "Perturbation et Observation" (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 III.6, 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 approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

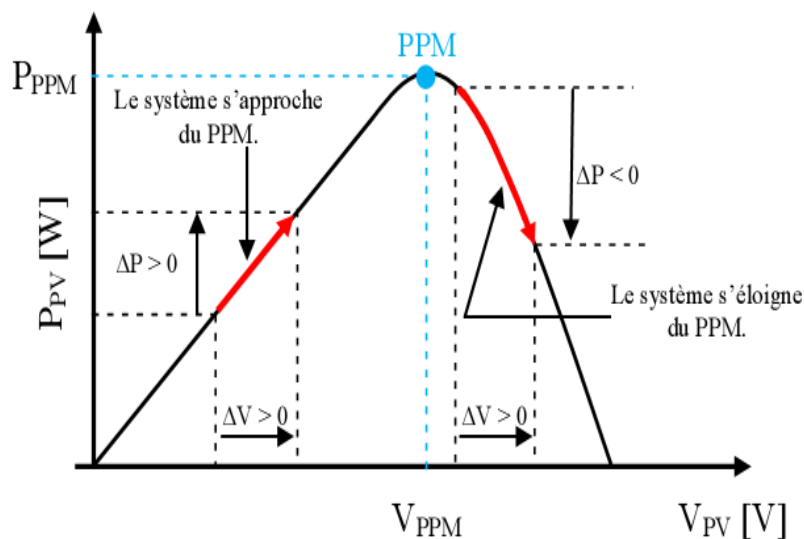


Figure.III.6 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.

III.8.2 Structure de l'algorithme P&O :

La figure III.7 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.

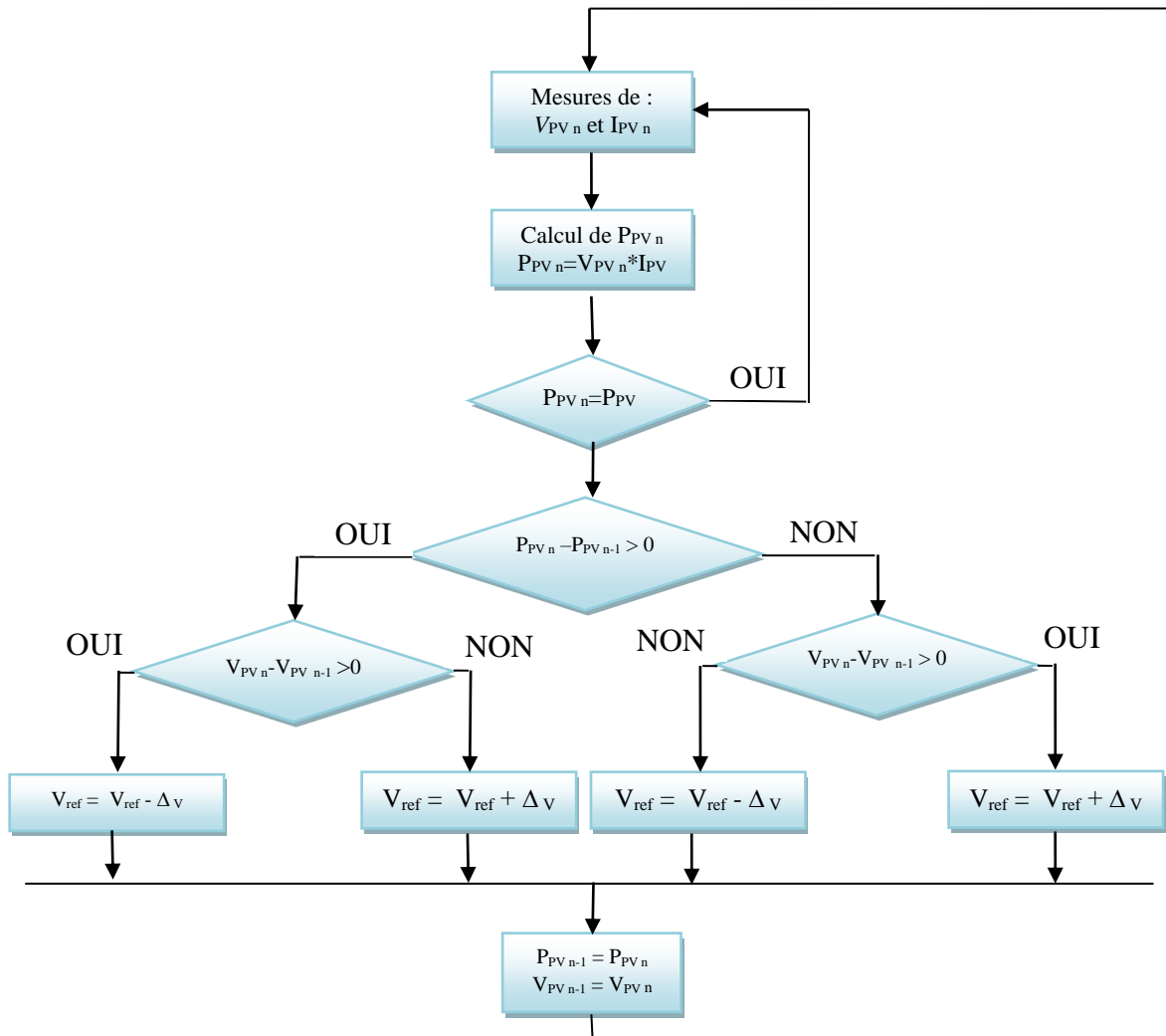


Figure.III.7 Algorithme de la méthode P&O.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par 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

valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure.III.8.

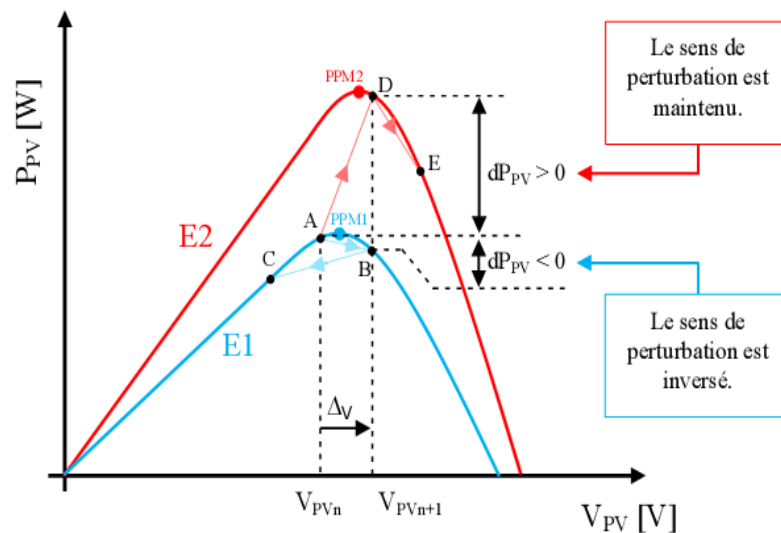


Figure.III.8 Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. suite à une perturbation de tension de valeur ΔV , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion

Du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. on peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques P(V) du module de E1 à E2), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance momentanée.

Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables de fortes lacunes au niveau de la commande.

III.9 CONCLUION :

Dans le présent chapitre nous avons abordé les bases de poursuite la puissance maximale. Après avoir donné un aperçu sur les différents modes de connexion du GPV- Charge et types de commandes MPPT. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'étude de l'algorithme P&O de types numérique.

Chapitre IV

Testes et Applications

IV. 1 INTRODUCTION

En raison de changement du point de puissance maximale de fonctionnement en fonction de l'éclairement et de la température (conditions climatiques) une grande importance est donnée au suiveur du point de puissance maximum. Ainsi, les techniques heuristiques basées sur le concept de l'optimisation sont de nos jours de grande importance en raison de leur adaptabilité avec les systèmes photovoltaïques.

L'objectif de ce chapitre est l'élaboration d'une structure de commande MPPT basé sur P&O (MPPT- P&O), afin d'atteindre le MPP quelques soient les conditions météorologiques. On donne les observations, les interprétations des résultats et on termine par les conclusions qu'on peut tirer à partir de ces résultats.

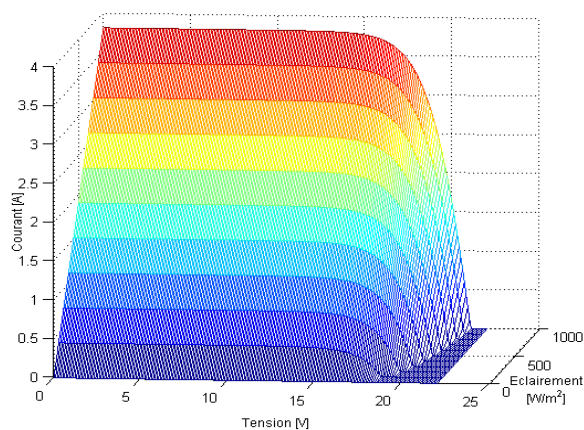
Les résultats de simulation en temps réel obtenus sous différentes conditions de fonctionnement montrent une nette amélioration des performances de contrôle par MPPT du système photovoltaïque.

Dans le deuxième partie le système photovoltaïque est constitué par un panneau photovoltaïque une interface de puissance et une charge. Un simple circuit convertisseur DC/DC (hacheur) est utilisé comme interface entre le panneau PV et la charge. Un modèle de PV a été développé à l'aide de Matlab/Simulink, interfacée par la simulation d'un DC/DC commande en un premier temps avec un contrôleur P&O (Perturbe and Observe), qui présente des oscillations autour du MPP (Maximum Power Point) lors de la recherche du point de puissance maximum.

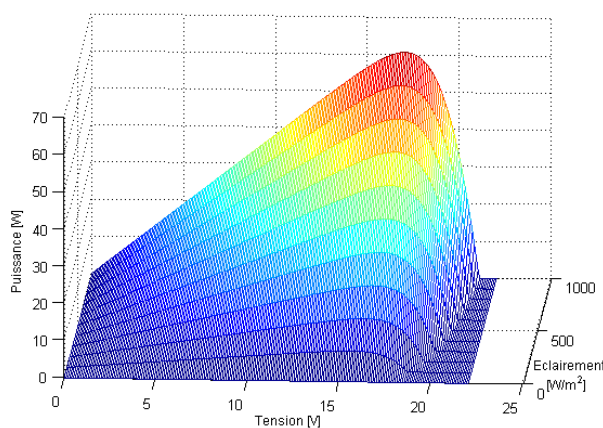
De nos jours, les techniques d'optimisation sont appliquées progressivement dans le domaine de l'engineering en raison de leur utilité. En jetant un regard rapide

sur les caractéristiques courant-tension I-V (figure 4.1-a) et puissance-tension P-V (figure 4.1-b) des rayons photovoltaïques d'un module solaire référencé MSX60 qui est fait l'objet de notre étude. Un module est constitué de 36 cellules en séries polycristallin dont les caractéristiques sont données dans l'annexe .

Nous constatons clairement la dépendance de la puissance générée d'un système photovoltaïque de l'éclairement et de la température.



(a)



(b)

Figure 4.1 Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements.

a) courant- tension b) tension-puissance.

Dans ce qui suit, nous présentons une application d'un algorithme P&O sur un système photovoltaïque, ce qui nous permettra de suivre instantanément le point de

puissance maximum. Ce dernier change instantanément avec l'éclairement et la température, ce qui implique un ajustement continu de la tension de sortie pour réaliser le transfert de la puissance maximum à la charge. La justification de cette application est due au fait que les caractéristiques courant-tension et puissance-tension (figure .4.1) sont non linéaires en raison d'un côté de la non linéarité des systèmes photovoltaïques, et en raison de la variation instantanée de la température et l'éclairement de l'autre côté, ce qui fait qu'en réalité les deux caractéristiques précédents possèdent beaucoup de fluctuations.

IV. 2. 1^{er} TEST : LA TECHNIQUE MPPT-P&O:

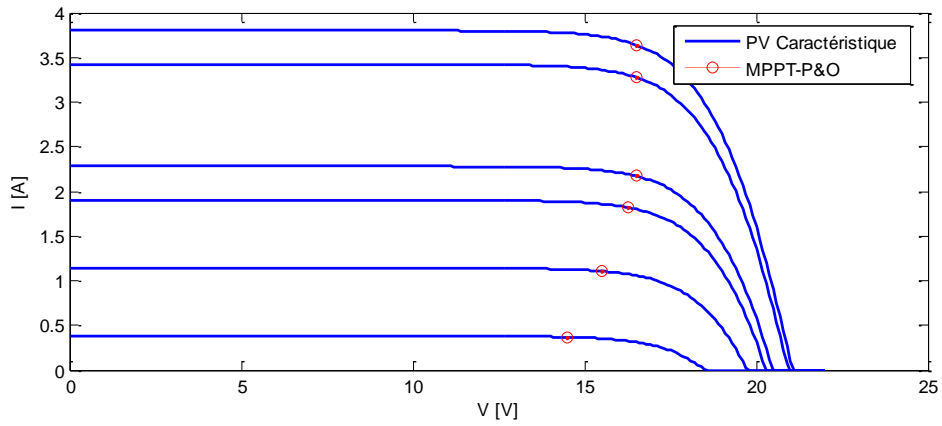
Dans cette section, notre objectif est de réaliser la technique de type MPPT-P&O sous différentes des conditions climatiques de l'éclairement et de la température. Les résultats d'optimisation de deux techniques sont reportés sur Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3. Nous voyons clairement la variation et changement du MPP avec l'ensoleillement et la température ou bien les deux simultanément (figure.4.2, 4.3 et 4.4). Dans chaque courbe le point de puissance maximale sera indiquée par le signe "o". Les résultats de ces problèmes d'optimisation montrent que la technique d'algorithme MPPT-P&O (perturbation et observation dans notre cas).

IV. 2. 1 Effet de l'éclairement :

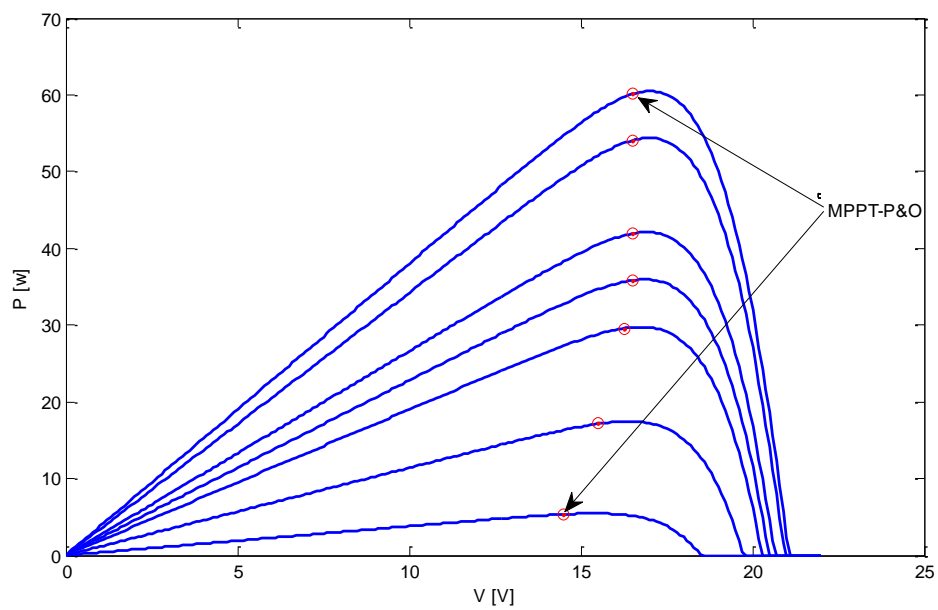
Nous allons tester les techniques pour un changement de l'ensoleillement de 100 w/m² à 1000 w/m² dont la température est maintenue constante 25°C .

Table. 4.1 Résultats de l'optimisation avec différents éclairement et température constante égale à 25°.

Eclairement [w/m ²]	V _{OPT} [V]	I _{OPT} [A]	P _{max} [w]
100	14.5000	0.3687	5.3455
300	15.5000	1.1063	17.1479
500	16.2500	1.8206	29.5848
600	16.5000	2.1713	35.8258
900	16.5000	3.2759	54.0528
1000	16.5000	3.6419	60.0906



(a)



(b)

Figure.4.2 Variation PPMT sous différents valeurs de l'éclairement:

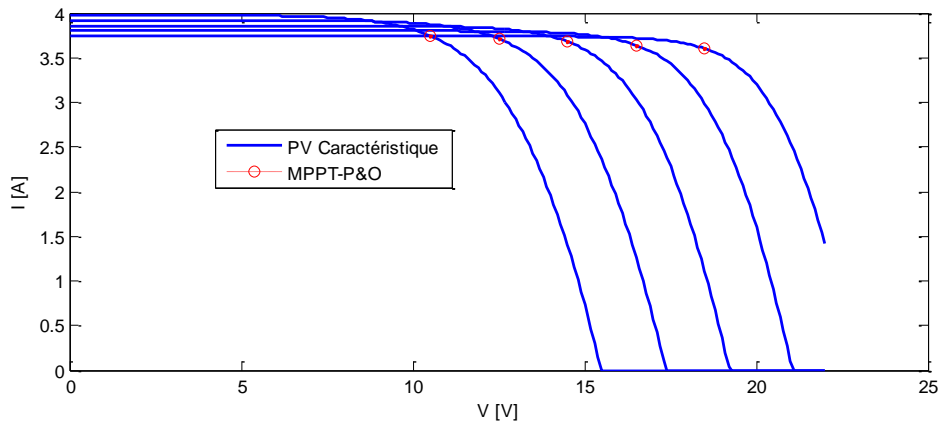
a) courant-tension b) puissance-tension.

VI. 2.2. Effet de la température :

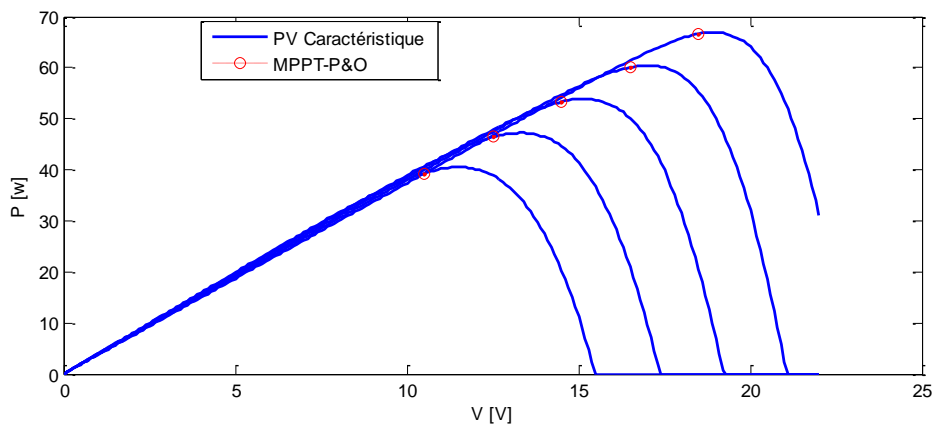
Il est important de tester les techniques sous différents valeurs de température à partir de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et l'éclairement est maintenu constant à 1000 w/m^2 .

Table. 4.2 Résultat de l'optimisation avec une température variable et un éclaircement constant égal à 1000 w/m

Température [°C]	V _{OPT} [V]	I _{OPT} [A]	P _{max} [w]
0	18.5000	3.6030	66.6549
25	16.5000	3.6419	60.0906
50	14.5000	3.6787	53.3406
75	12.5000	3.7134	46.4170
100	10.5000	3.7460	39.3325



(a)



(b)

Figure.4.3 Variation PPMT sous différents valeurs de la température:

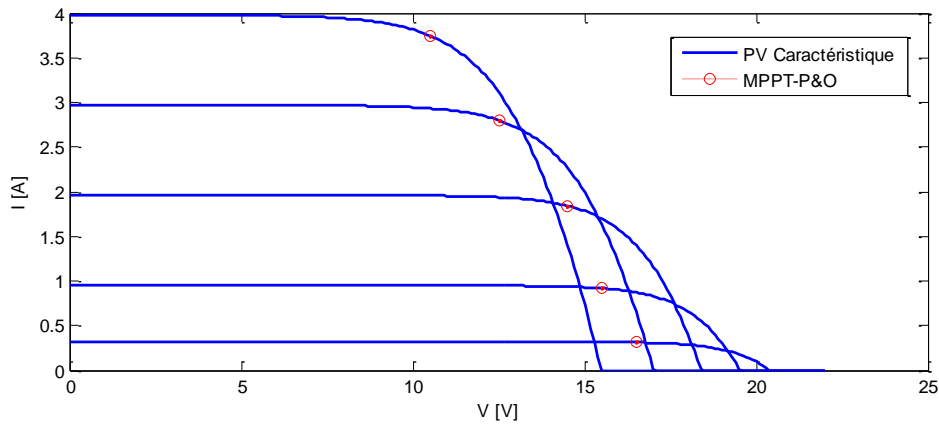
a) courant-tension b) puissance-tension

IV.2.3. Effet simultané de l'éclaircement et de la température

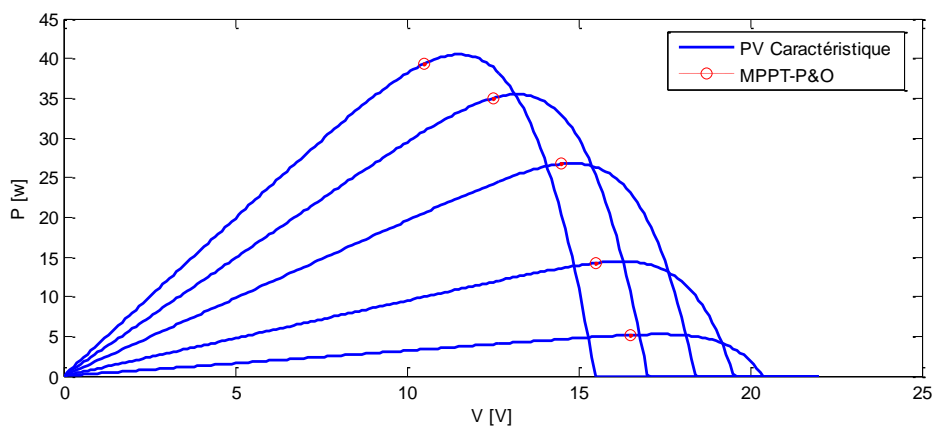
Nous allons varier simultanément les deux conditions météorologiques (G et T).

Table.4.3 Résultats de l'optimisation avec la température et l'éclaircement qui varient en même temps.

Température [°C]	Eclaircement [w/m ²]	V _{OPT} [V]	I _{OPT} [A]	P _{max} [w]
0	100	16.5000	0.3123	5.1532
25	250	15.5000	0.9179	14.2273
50	500	14.5000	1.8422	26.7122
75	750	12.5000	2.8007	35.0082
100	1000	10.5000	3.7460	39.3325



(a)



(b)

Figure. 4.4 PPM avec Variation dans la température et l'éclaircement au même temps : a) courant-tension b) puissance-tension.

La figure précédente indique la dépendance de la variation de puissance optimale instantanée avec la variation du courant optimal.

Dans ce partie on présente la technique d'optimisation MPPT-P&O, qui calcule instantanément le point de puissance maximum MPP d'un module photovoltaïque afin de maximiser le profit en termes de la puissance instantanément. A cause du changement instantané des caractéristiques I-V et P-V.

IV.3 MODELISATION DE GPV AVEC CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLE PAR COMMANDE MPPT :

Après avoir présenté l'essentiel sur le principe de la commande MPPT, nous allons passer à la simulation du système photovoltaïque sans et avec commande. Dans ce qui suit, nous étudierons deux cas possibles de liaison générateur PV – charge: liaison à travers un hacheur à rapport cyclique constant et à rapport cyclique commandé par une MPPT.

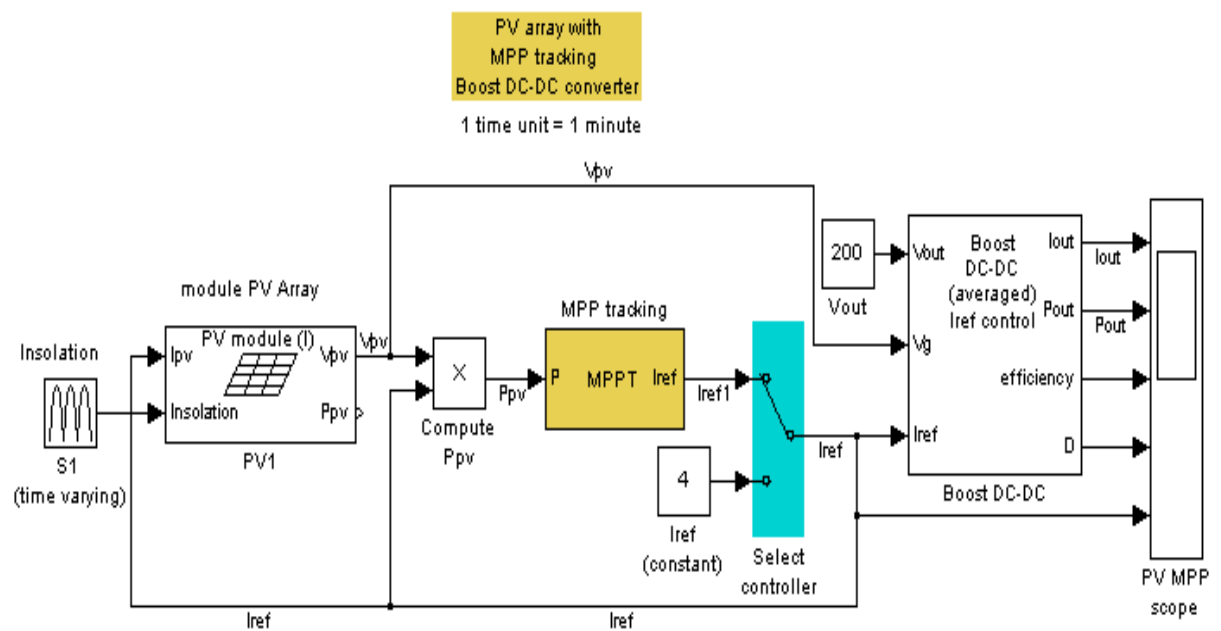


Figure 4.5 Modèle MATLAB/simulink du générateur liaison générateur PV –charge: liaison à travers un hacheur à rapport cyclique constant et à rapport cyclique commandé par une MPPT.

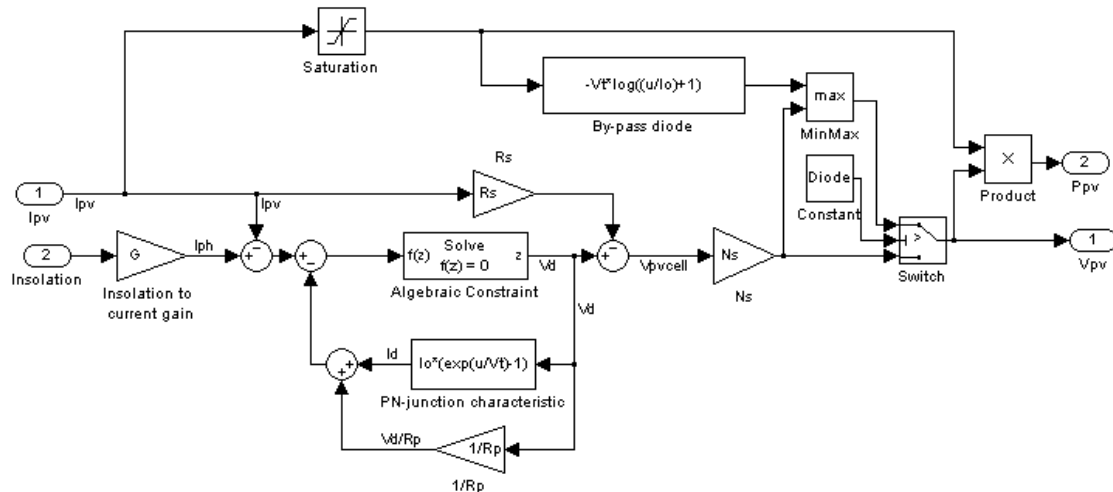


Figure 4.6 Modèle MATLAB/simulink du générateur PV

IV.3.1 Simulation de l'ensemble Panneau– Hacheur– charge (Rapport cyclique fixe)

Pour voir l'évolution des paramètres de sortie du générateur PV en présence d'un hacheur dévolteur placé entre source et charge, nous avons choisie une commande fixe. Les résultats obtenus sont les suivants :

Les différentes caractéristiques simulées sont données sur la figure IV.7

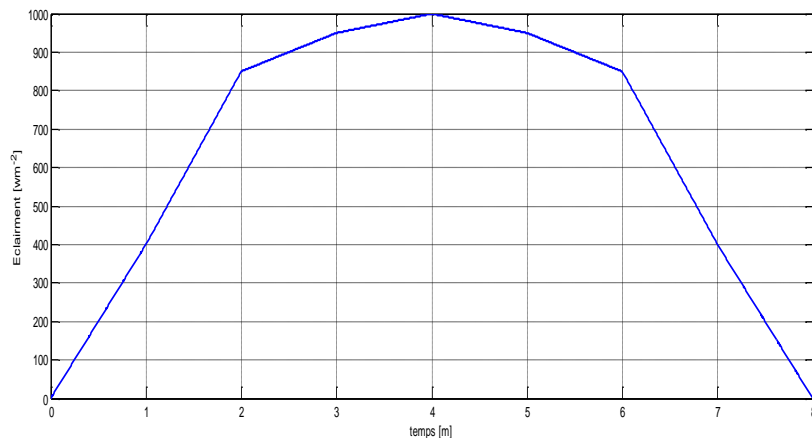


Figure IV.7 L'ensoleillement en fonction du temps

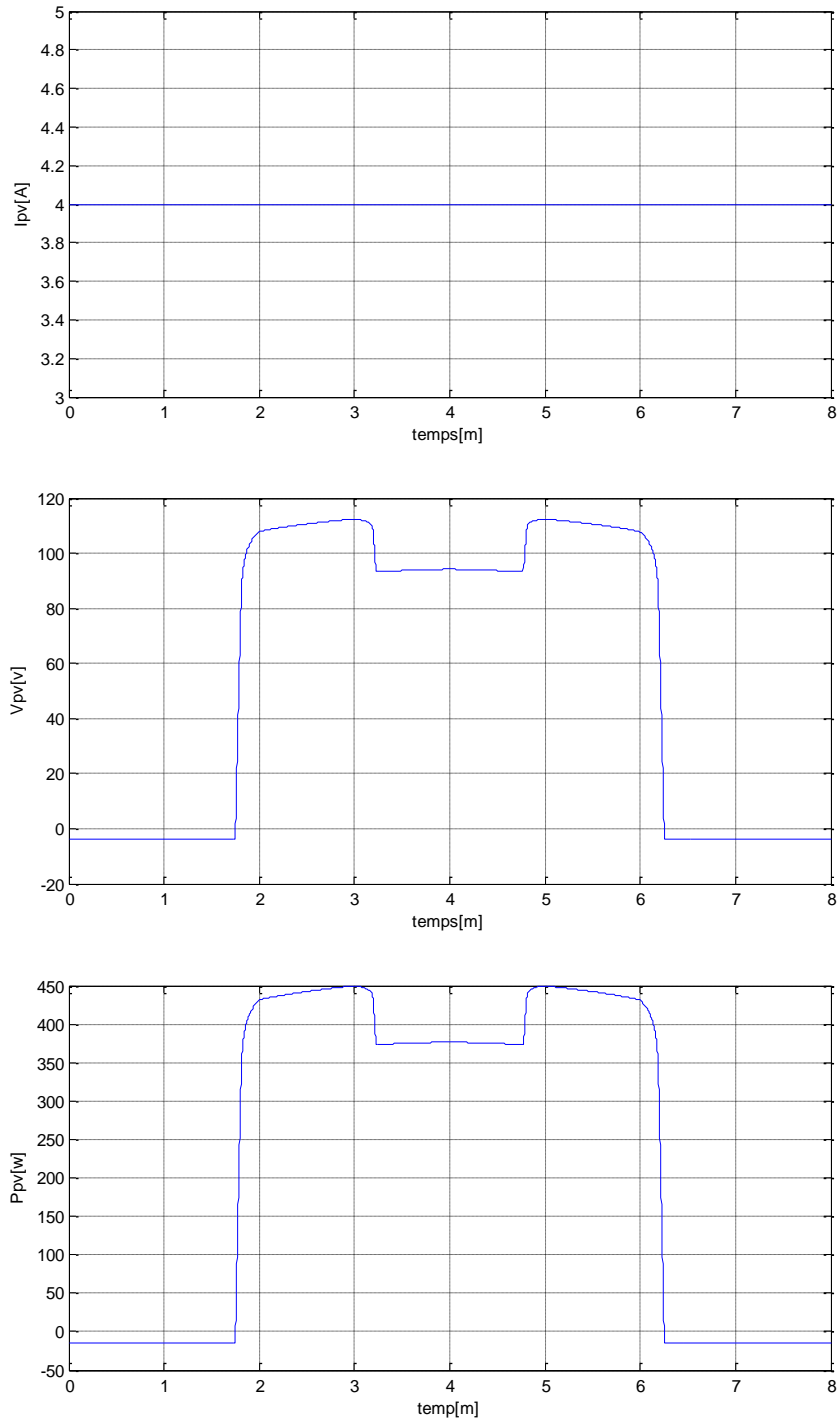


Figure IV.8 Evolution temporelle des paramètres courant, tension et puissance délivrée par le panneau pour un rapport cyclique fixe .

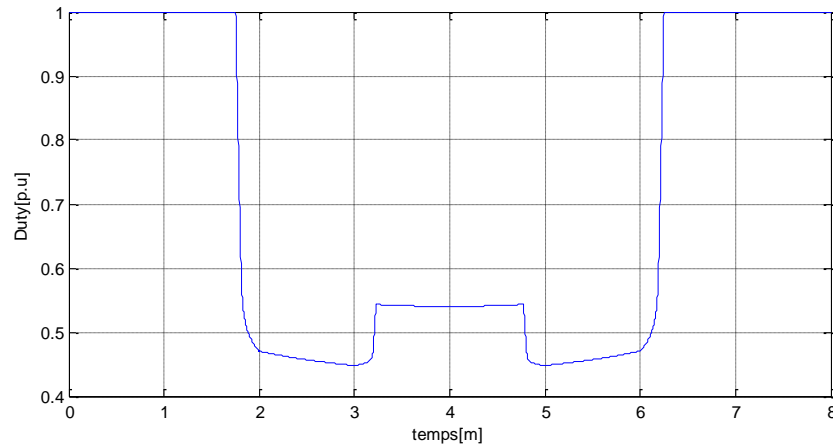
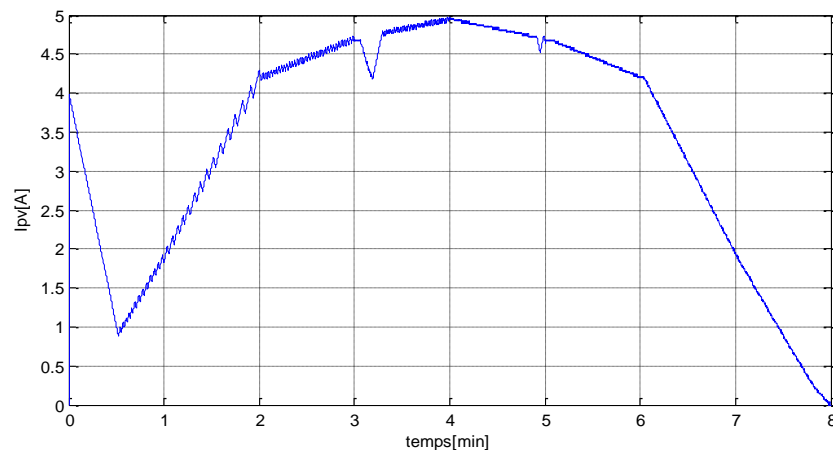


Figure 4.9 Le rapport cyclique du convertisseur DC DC

Remarquons que la tension V_{pv} a augmenté avec l'éclairement (en comparaison avec la figure 4.8) alors que la puissance est multipliée par un facteur de 4 (valeur de courant I_{pv}). Cependant, le courant I_{pv} est presque inchangée.

IV.3 .2 Liaison à travers un hacheur commandé par une MPPT

Avec présence de perturbation (eclairment), les différentes caractéristiques du générateur PV à liaison indirecte avec la charge (à travers un hacheur doté d'une commande MPPT analogique) sont données sur la figure 4.9 ci-dessous.



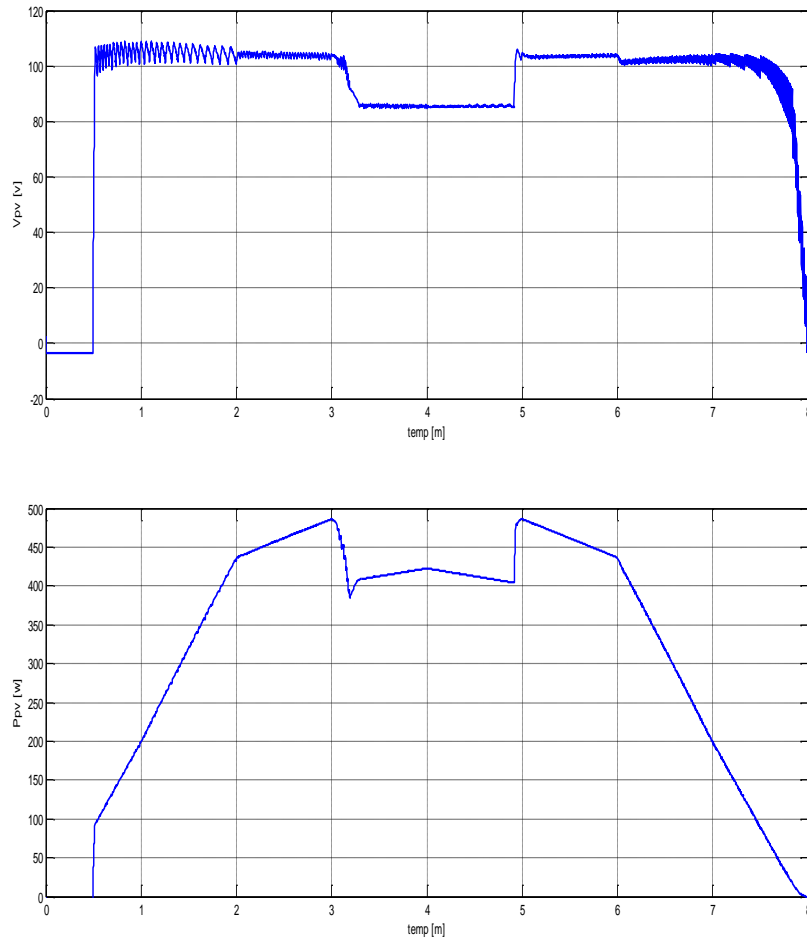


Figure 4.10 Evolution temporelle des paramètres courant, tension et puissance délivrée par le panneau.

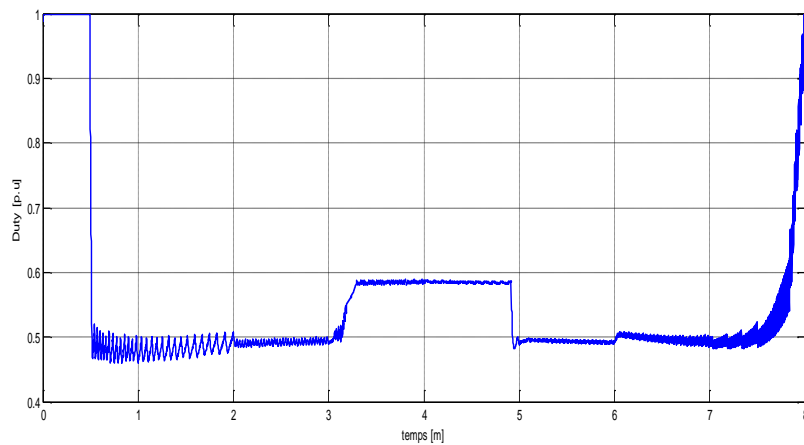


Figure 4.11 Le rapport cyclique du convertisseur DC/ DC

Remarquons d’abord l’effet de la présence du hacheur entre la source et la charge (présence des ondulations).

Une comparaison entre les figures (4.8) et (4.10) montre clairement qu'en présence de la commande MPPT, la puissance délivrée par le générateur PV a augmenté. De même, le courant I_{pv} a augmenté pour compenser la diminution de la tension V_{pv} et aboutir à une puissance plus élevée.

V.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement d'un générateur photovoltaïque pour deux types de liaisons avec la batterie de charge : liaison à travers un hacheur dévolteur à rapport cyclique fixe et celui à rapport cyclique commandé par une MPPT analogique. Cette dernière liaison offre non seulement une adaptation entre la source et la charge mais également un fonctionnement à puissance maximale. Les résultats obtenus sont en concordance avec ceux rencontrés dans la littérature

Bien que satisfaisante par rapport à une connexion GPV-charge, une amélioration de l'algorithme P&O peut s'avérer nécessaire dans le cas de brusques changements de des conditions climatiques.

CONCLUSION GENERALE

La caractéristique puissance - tension d'un panneau solaire présente un extremum qui varie avec la température, l'éclairement et le vieillissement du panneau. Une connexion directe entre un générateur PV et sa charge a peu de chance de placer le système PV à son point de fonctionnement maximum (noté MPP pour Maximum Power Point). Dans le cas d'une charge type batterie, il faut que la tension de la batterie (qui impose la tension du panneau) soit proche de la tension V_{OPT} pour laquelle la puissance délivrée est maximale. Ainsi, l'objectif de notre travail portait sur l'étude du comportement d'un générateur photovoltaïque sur charge du type batterie. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel matlab comme outil de simulation.

Nous nous sommes intéressés précisément au courant et tension du générateur PV mais principalement à la puissance délivrée par ce dernier.

En liaison directe, la puissance était imposée par la charge (la f.é.m de la batterie). Même en présence de perturbation liée à l'éclairement ou à la température, la tension de sortie du générateur était limitée par la charge.

De même, nous avons remplacé la commande fixe du hacheur par une commande MPPT. La puissance a augmenté encore plus, ce qui améliore le point de fonctionnement du système.

Sachant qu'une commande MPPT permet non seulement une adaptation d'impédance mais également un fonctionnement optimal de puissance, nous avons voulu voir si ceci est bien réalisé. Malheureusement, les limitations de la version démonstrative dont nous disposons ne nous ont pas permis de contrôler tous les paramètres en même temps. Nous nous sommes alors limité à ce que la puissance reçue soit très proche de la puissance délivrée tout en restant élevée par rapport à la liaison directe. Ceci est bien vérifié avant et après l'application d'une perturbation liée à une variation de l'éclairement. Nous ne nous sommes pas trop intéressés à l'effet de la température car son influence est minimale.

Nous proposons pour perspectives de refaire la simulation en utilisant des techniques avancées (intelligences artificielles) et de faire la conception à la commande MPPT.

ANNEXE:

Fiche technique d'un module MSX-60, sous ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$)

Spécification du module solaire (donnée du fabricant)	
Température des conditions standards ou de références (T_{ref})	25°C
Eclairement des conditions standards ou de références (G_{ref})	1000 W/m ²
Puissance crête maximale (P_m)	60W
Tension de crête maximale (V_m)	17.1V
Courant de crête maximale (I_m)	3.5A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8A
La tension de circuit ouvert	21.1V
Tolérance sur puissance de crête	-0.38W/°C
Température nominale de fonctionnement (NOCT)	49°C

Bibliographie

- [1] **Yannick Veschetti**, "Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles Structures photovoltaïque sur substrat de silicium mince", Thèse de Doctorat, Université Louis pastor, Strasbourg 2005.
- [2] **Alain Bibao Learreta**, "Réalisation de commandes MPPT numériques", Diplôme ingénieur technique Industriel toulouse 2004.
- [3] **Rezoug Mouhmed Redha**, "Etude et conception d'un positionneur automatique de panneau solaire Mémoire de Magister", Centre universitaire d'Oum El Bouaghi 2005.
- [4] **Corrine Alonso**, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement De l'énergie", Mémoire Université de Toulouse 2003.
- [5] **Mme Barkani Aicha**, "Simulation d'un système photovoltaïque à thyristor Couplage à un moteur à courant continu", Mémoire de fin d'étude ingénieur, Centre universitaire d'Oum El Bouaghi 2001.
- [6] **Valérie Pommier, Marc Budinger, Gilles pérusot**, "Les énergies renouvelables étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", Toulouse 2005.
- [7] **M. Angle Cid Pastor**, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques Electroniques", Thèse Doctorat, l'institut national des sciences Appliquées de Toulouse 2006.
- [8] **Yahiaoui Majda**, "Conception et réalisation d'un régulateur solaire a base d'un Micro contrôleur", Mémoire de Magister, Centre Universitaire Oum El Bouaghi 2004.
- [9] **V. Boitier, P. Maussion**, "Recherche du maximum de puissance sur Les générateurs photovoltaïques", Toulouse 2006.
- [10] **K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié**, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par un Commande MPPT analogique", Université de Toulouse, Décembre 2007.
- [11] **I.Vechiu**, " Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de Doctorat, Université de Havre 2005.
- [12] **A. Benmosbah et C.A. Mecheraoui**, " Implémentation sur FPGA des méthodes MPPT ' P&O' et 'Floue optimisée par les Algorithmes Génétiques'", Mémoire de

Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2006.

[13] **A. Aziz**, "Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse 2006.

[14] **O. Gergaud**, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.