



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



UNIVERSITE D'EL-OUED

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de
LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Spécialité : Génie mécanique
Option : Électromécanique industriels

Thème

**Construbetions à l' etude
photovoltaïque de panneau solaire**

Devant le jury composé de : Présenté par :

.....	Président	- Zoubeidi Messaoud
.....	Examineur	
.....	Examineur	
Rhida Mnasser	Encadreur	

2013 - 2014

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.

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 et 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.

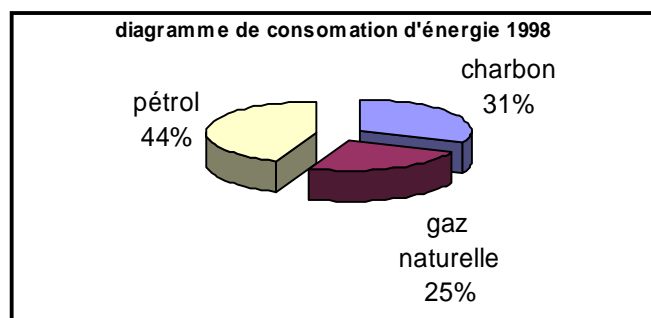


figure I.1: consommation d'énergie [1]

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 laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle 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 1.7: 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].

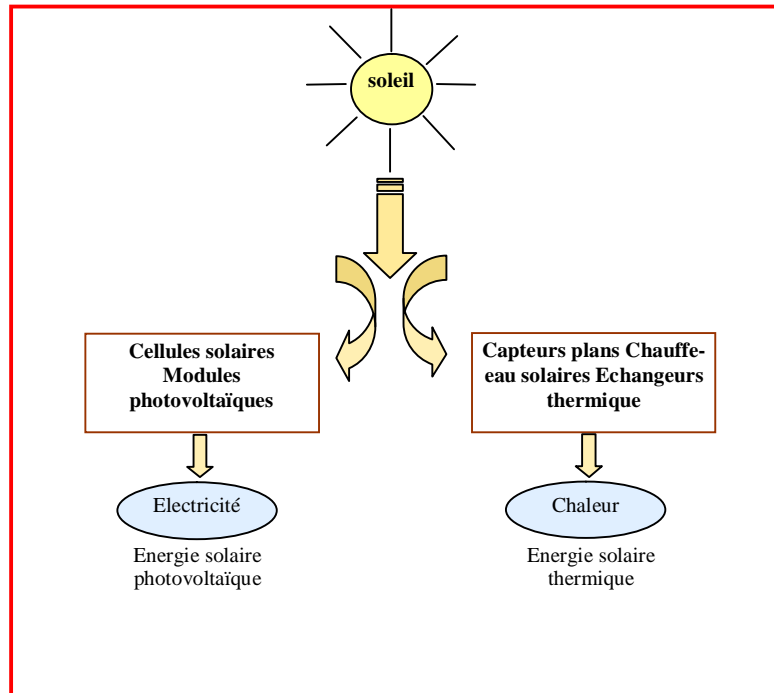


Figure I.8: les deux types d'énergie solaire.

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 réfléchi par l'atmosphère ; 11% est réfléchi 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) , et qui sont définis comme suit :

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 par : $TSV = 12 + h/15$ (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

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

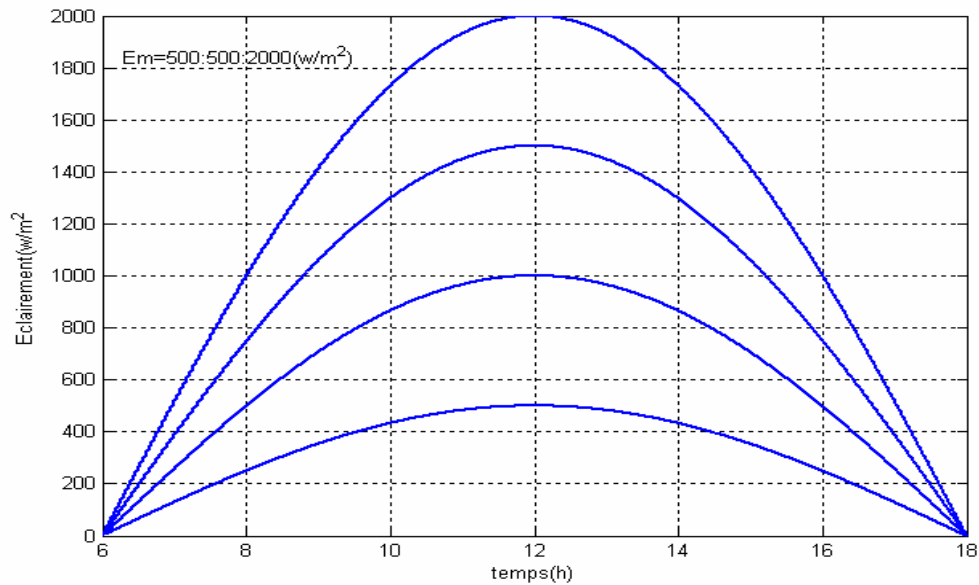


figure I.9 : modèle simplifié de l'éclairage

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 consacré à 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 21^{ème} 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]

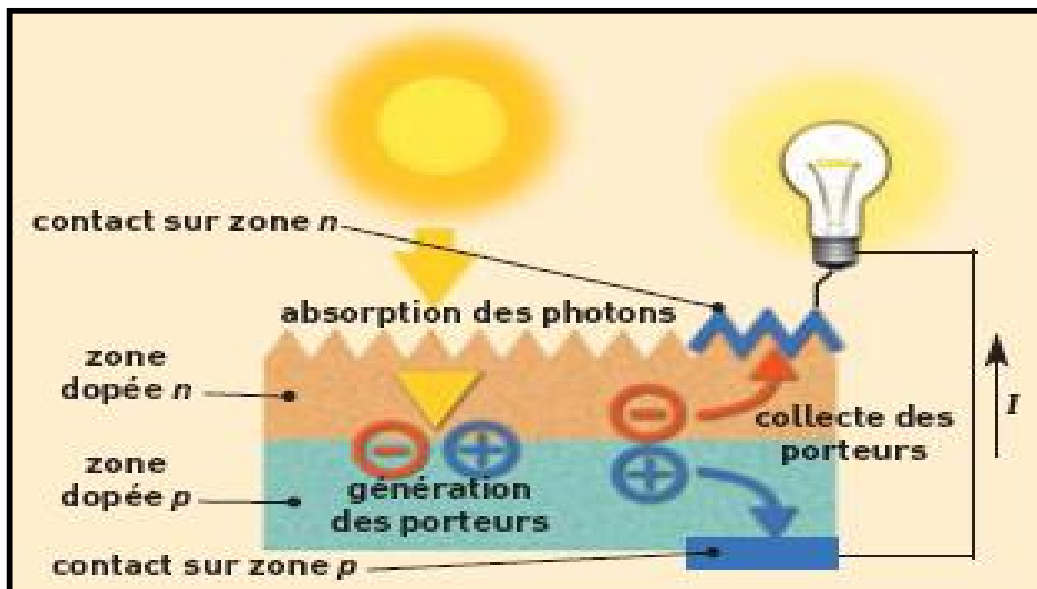


Figure II.1: Schéma d'une cellule élémentaire

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 coup 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).

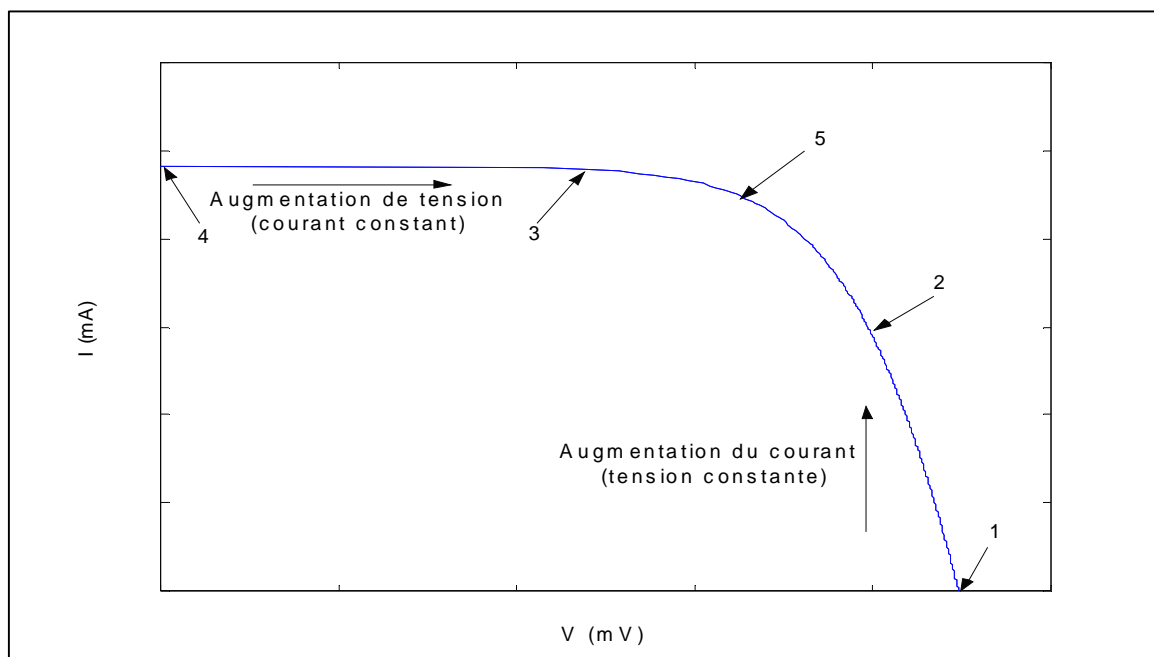


Figure II.2 : Caractéristique typique $I-V$ d'une cellule solaire

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].

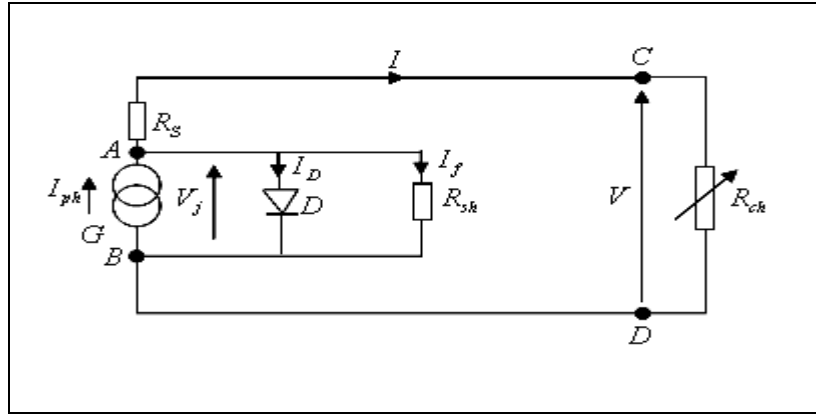


Figure II.4 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

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] :

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

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 PERFORMANCE:

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] :

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

Ou 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] :

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

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

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

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

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

Ici le suffixe 'ref' se rapporte à des conditions évaluées données par $E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ et

$T_{ref} = 25^\circ\text{C}$.

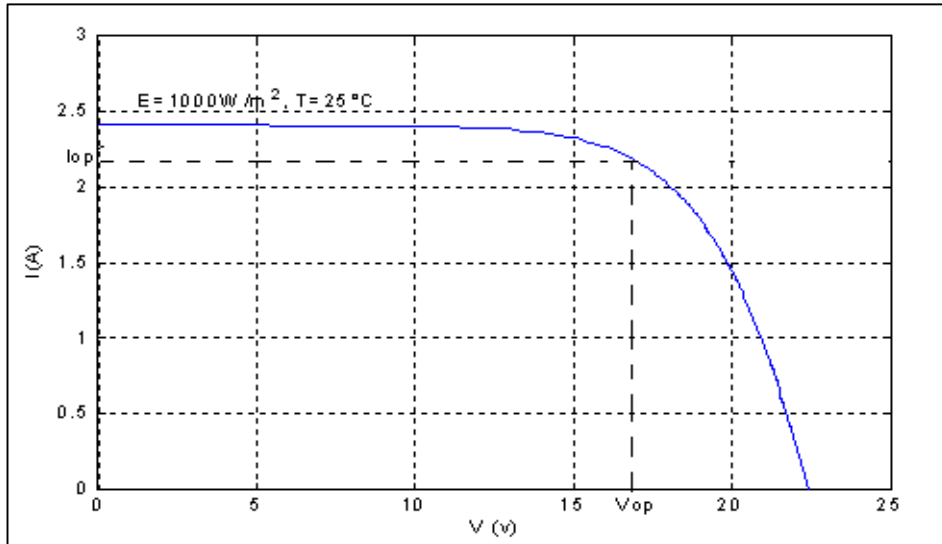


Figure II.5 : Caractéristique courant –tension d'un module solaire

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 $P_{max} = I_{op} \cdot V_{op}$.

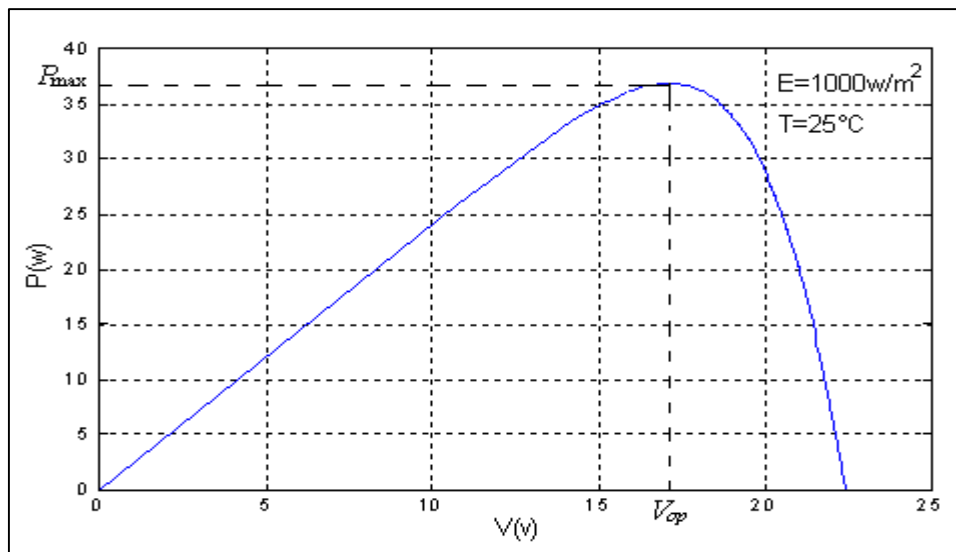


Figure II.6 Caractéristique puissance –tension d'un module solaire

II-7-3 Influence de l'Éclairement:

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

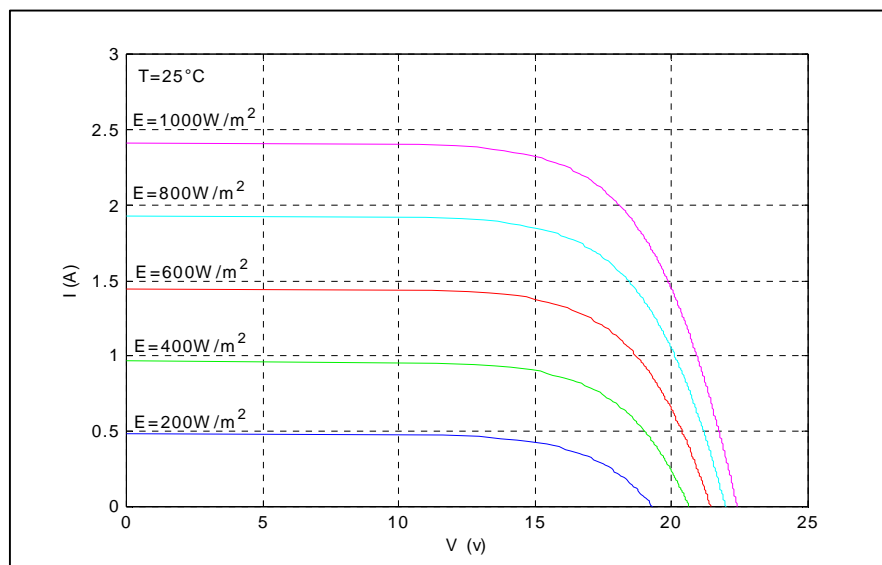


Figure II.7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique I - V

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.

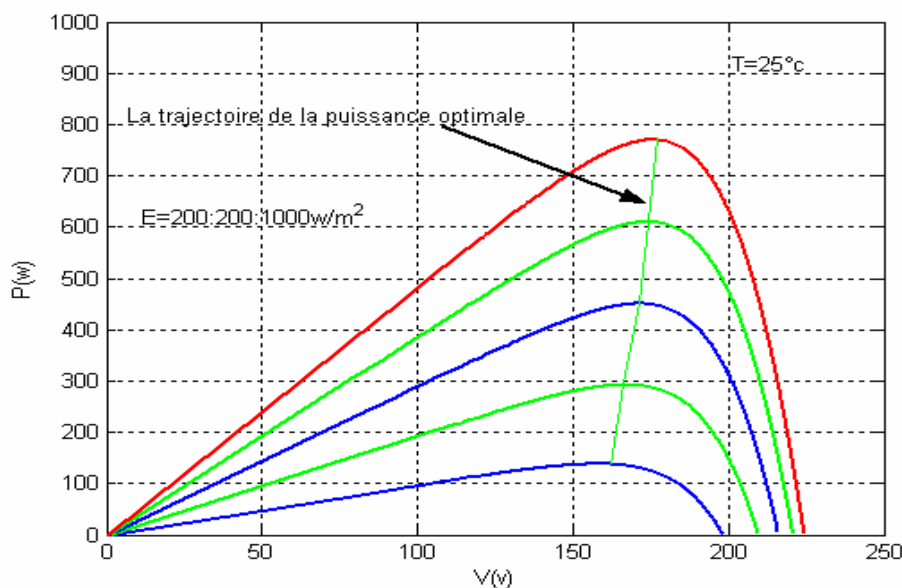


Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique P - V

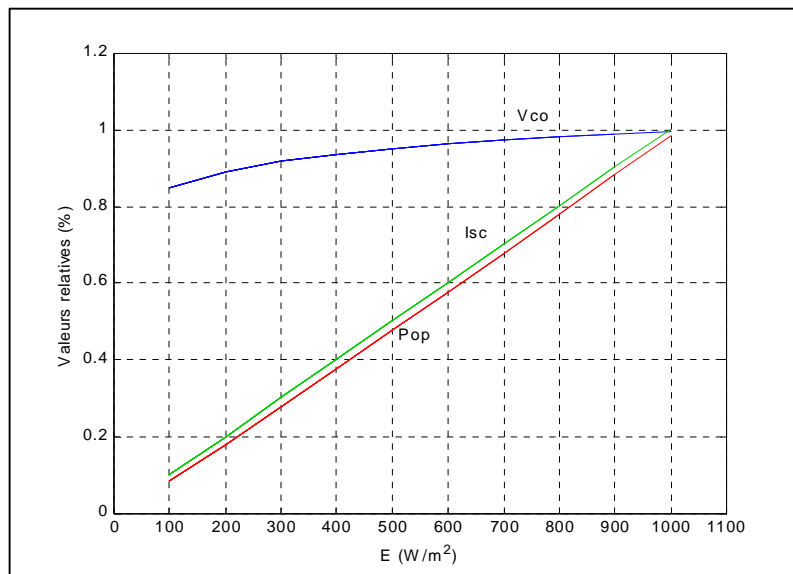


Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur V_{co} , I_{sc} et P_{op}

II-7-4 Influence de la Température:

La figure II.9 présente des courbes courant tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV:

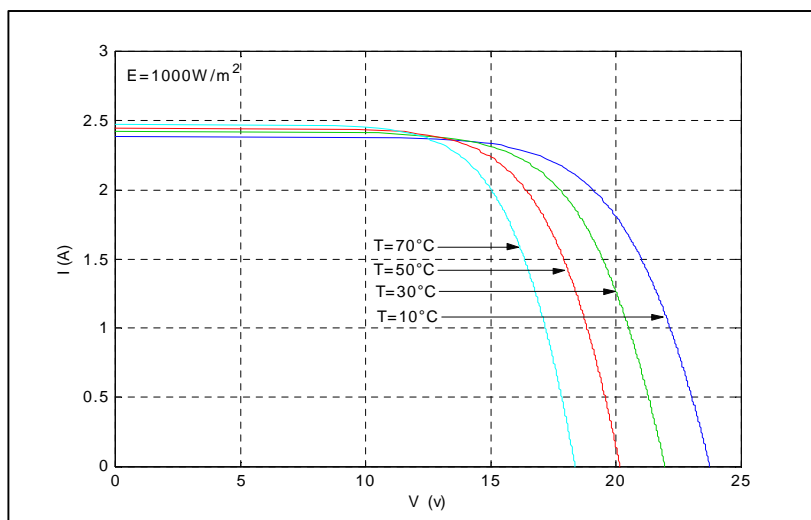


Figure II.10 : Influence de la température sur la caractéristique électrique I-V

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.

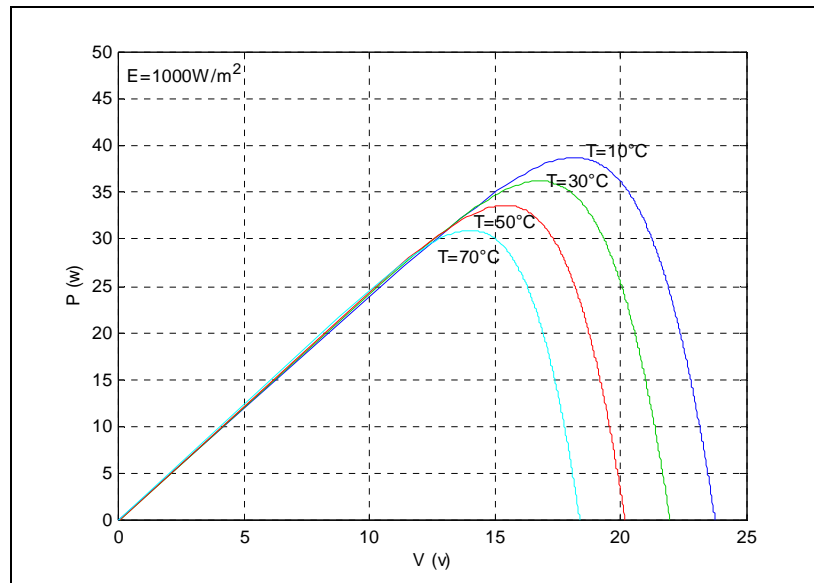


Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique électrique P-V

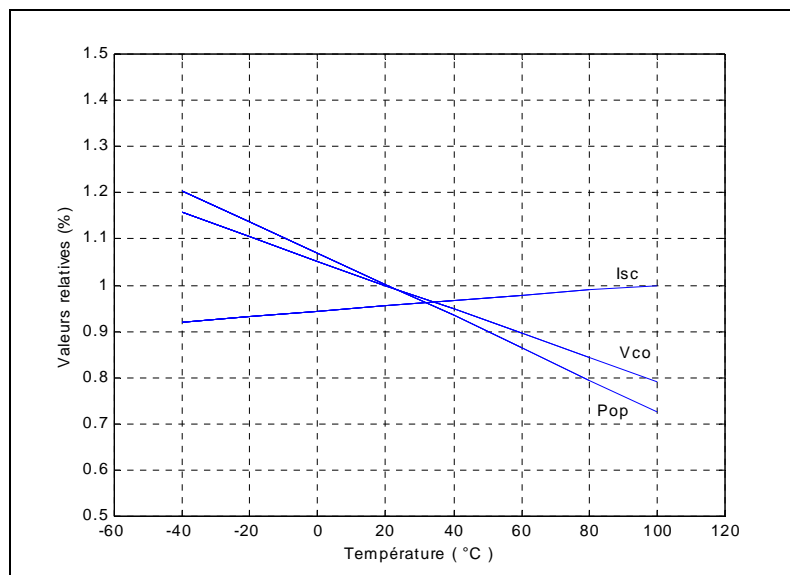


Figure II.12: Influence de la température sur I_{sc} , V_{co} , P_{op}

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].

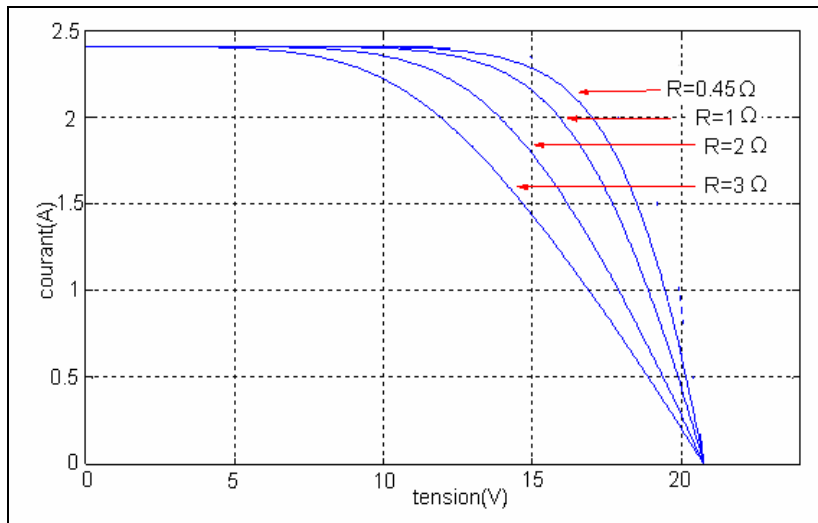


Figure II.13: Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V

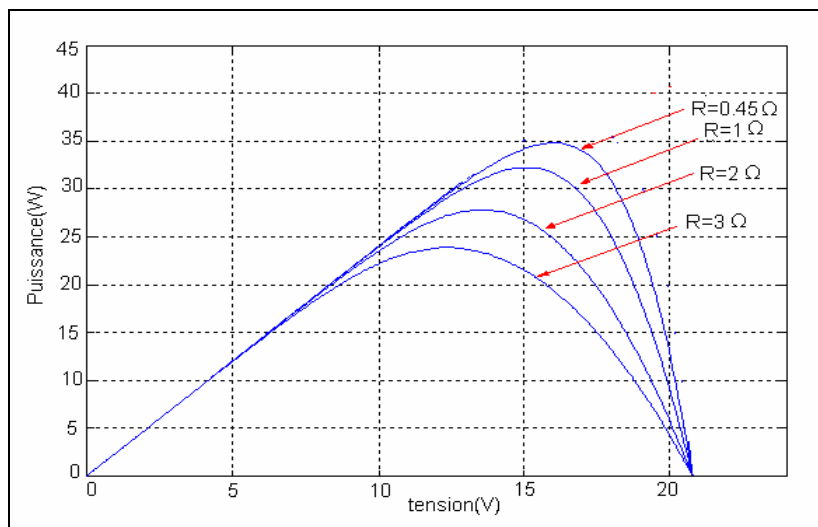


Figure II.14: Influence de la résistance série sur la caractéristique P-V

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) à la puissance du rayonnement d'incident: [10, 11,12] :

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

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_{sco}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) [8]:

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

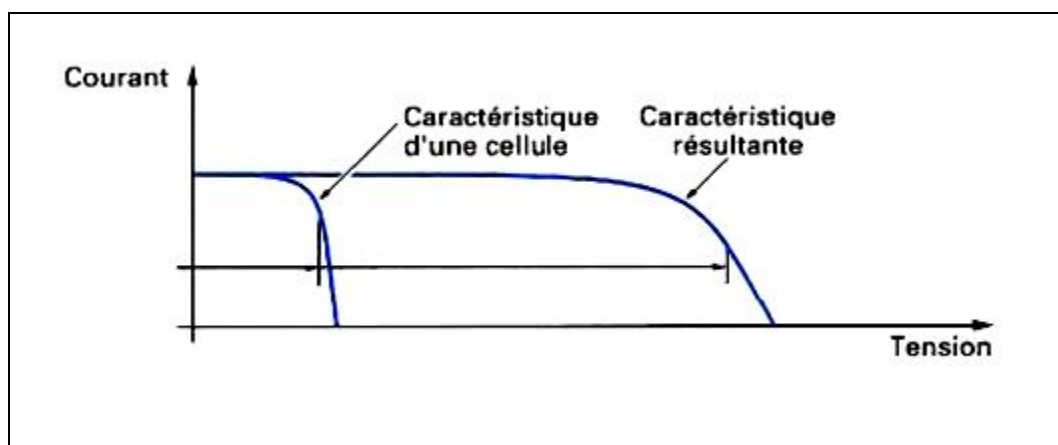


Figure II.15: Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques [8]

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 II15 montre la caractéristique résultante (I_{psc}, V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques [8]:

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

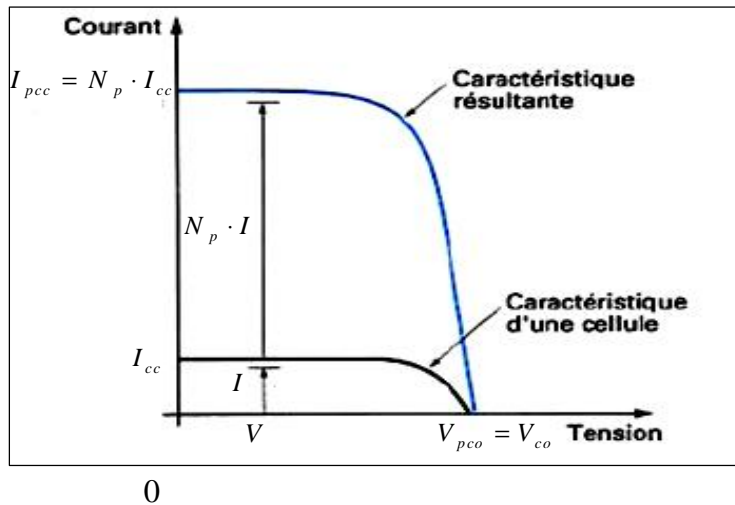


Figure II.16: Caractéristique résultante d'un groupement constitué de N_p cellules identiques en parallèle [8]

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).

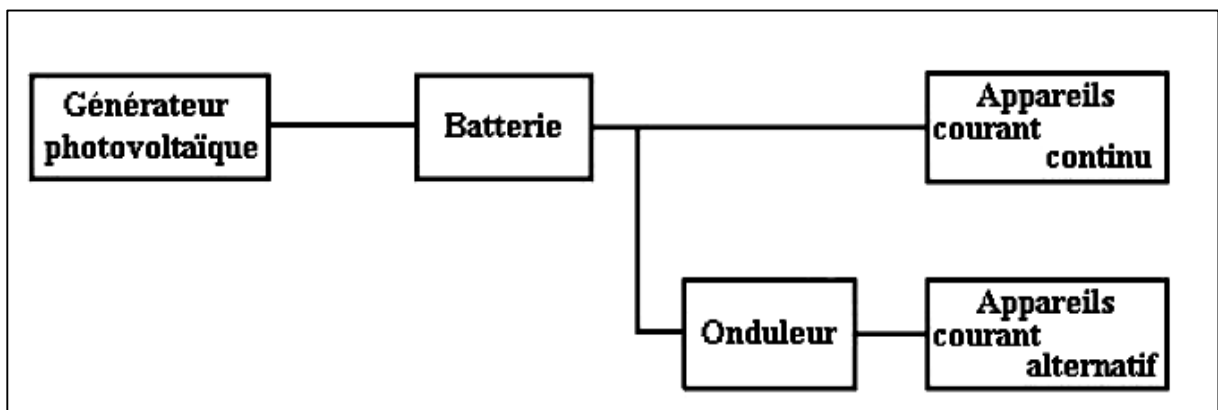


Figure II.18: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage

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).

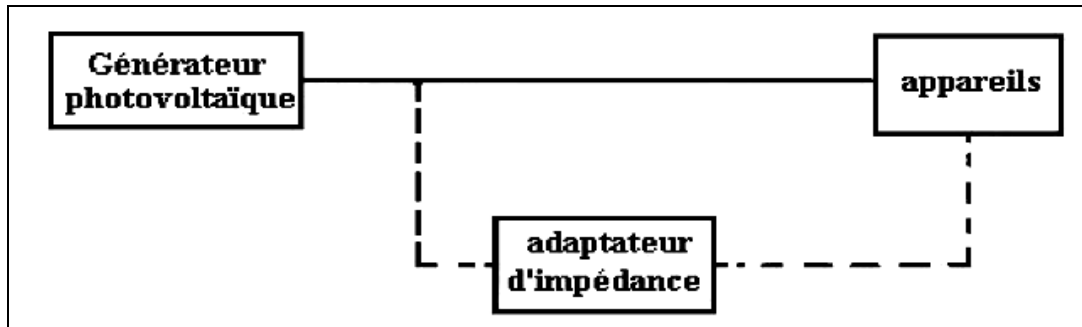


Figure II.19: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct

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.

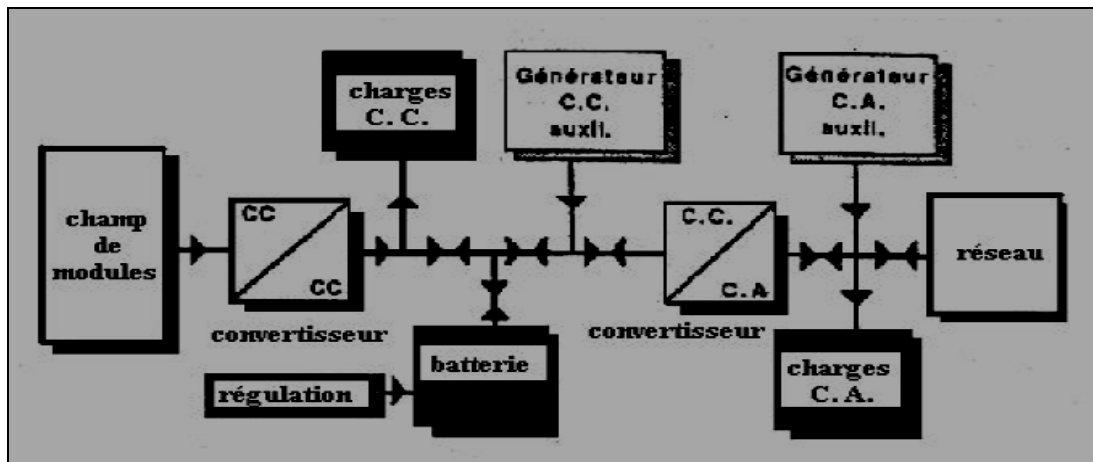


Figure II.20 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

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

II-9-1 Avantages :

- Ø 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.
- Ø 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.
- Ø Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Ø 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 :

- Ø La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

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

II-9-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, le chapitre suivant nous avons étudié la méthode pour l'optimisation de photovoltaïque MPPT.

La puissance maximale du générateur photovoltaïque MPPT

III-1 INTRODUCTION:

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique $I-V$ du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale ; il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. Dans ce qui suit, cette dernière possibilité est développée.

Exploitations optimales de l'énergie électrique disponibles aux bornes du générateur photovoltaïque peut être contribué à la réduction du coût globale du système. Il existe plusieurs technique pour satisfaire ce but, mais la question qui se pose est-ce que le coût supplémentaire à introduire pour obtenir ce surplus d'énergie. Dans ce chapitre, nous avons traité trois (3) techniques de recherche de point de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque.

III-2 SUIVI DE LA PUISSANCE MAXIMALE DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE:

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT), est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type ; adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV.

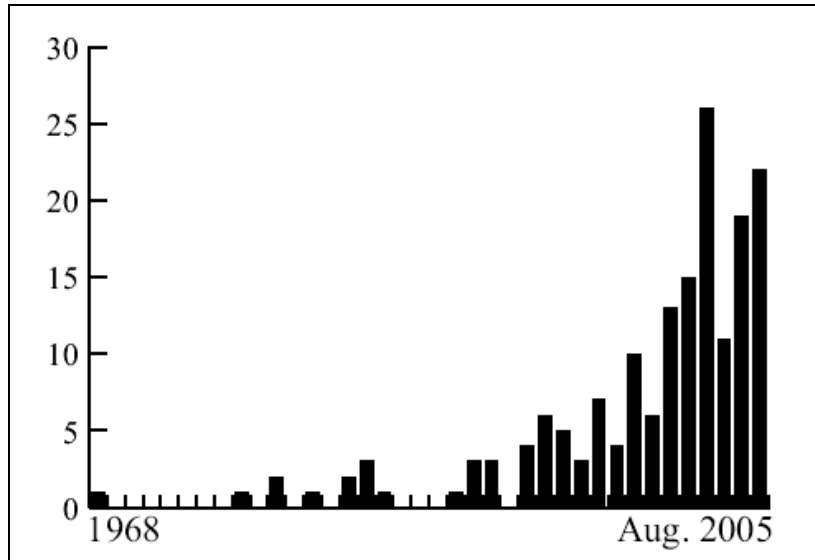


Figure III.1 : Nombre total des publications sur les MPPT par an depuis 1968

Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. Dans ce qui suit trois méthodes ont été étudiées :

1. Fraction de la tension du circuit ouvert.
2. Perturbation puis observation (P&O : Perturb-and-Observe).
3. L'incrémentation de la conductibilité (INC : INcremental Conductance).

III-3 PRINCIPE DU MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (*température et l'éclairement*), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{MPP} , I_{MPP}).

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure III.2.

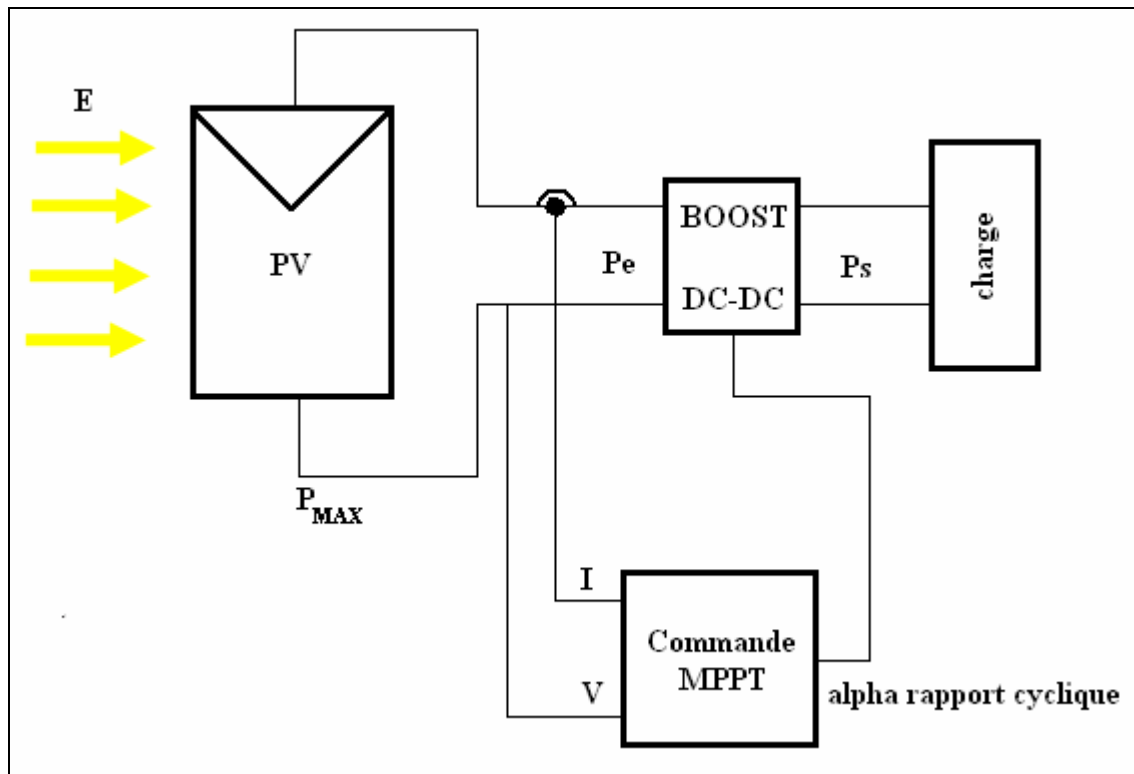


Figure III.2 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

III-4 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 h_{pv} est défini selon l'équation (II.18).

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 h_{MPPT} permet de mesurer l'efficacité de la commande. En fait on peut l'appeler aussi rendement de la commande.

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

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 h_{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.

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

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

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

III-5 TECHNIQUE DE FRACTION DE LA TENSION DU CIRCUIT OUVERT:

Elle est facile à mettre en œuvre, moins coûteuse pour les systèmes photovoltaïques. Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale (pour laquelle la puissance débitée est maximale) et celle en circuit ouvert est approximativement constant, pour un même module, sous des niveaux d'éclairement et températures différents.

Ceci est la base du fonctionnement à fraction de tension constante qui peut être interprété par l'expression suivante [11.14] :

$$\frac{V_{MPP}}{V_{oc}} \cong K \quad (III.4)$$

La tension de circuit ouvert est mesurée en isolant temporairement le générateur PV du système et alors le point maximum de fonctionnement de puissance est calculé en utilisant l'équation (III.4). La littérature [14] donne un intervalle de 73% et 80% comme bande de valeurs de la constante K. En réalité K n'est pas constant et est affecté par des niveaux de l'éclairement, la température et de type de module. De même pour la technique de fraction de courant de court-

circuit $\frac{I_{MPP}}{I_{sc}} \cong K$.

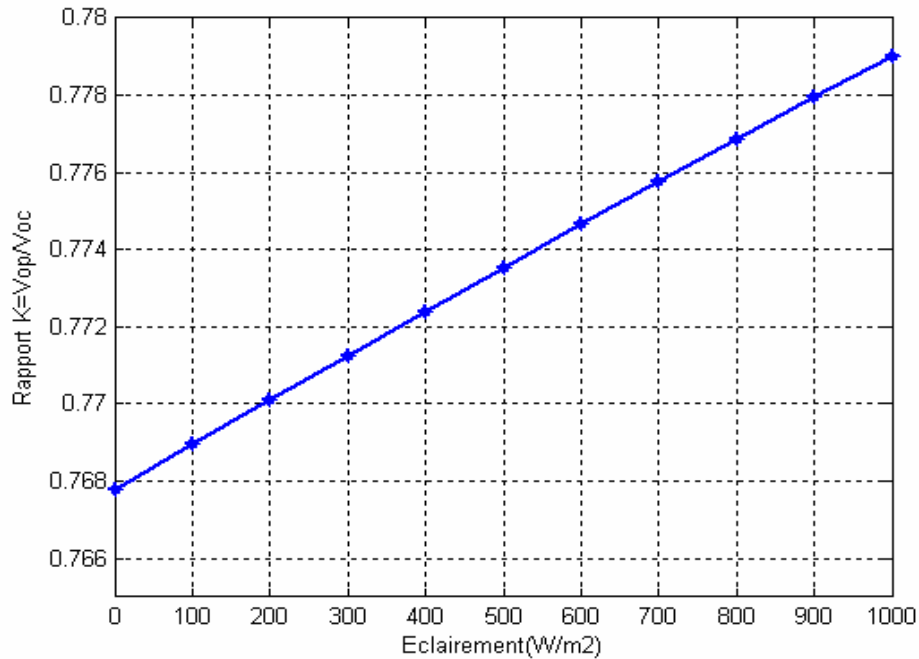


Figure III.3 : Rapport entre V_{op} et V_{oc} en fonction de l'éclairement

III-6 TECHNIQUE DE LA PERTURBATION PUIS OBSERVATION (P&O):

L'algorithme Perturbation puis observation "P&O" est souvent le plus utilisé dans la pratique en raison de sa facilité de mise en oeuvre [11]. Pour cette méthode, à partir de la caractéristique $P-V$, on considère que le panneau photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas forcément le MPP (voir figure III.4) ; on perturbe la tension de fonctionnement avec (ΔV) et on observe la variation (ΔP) de la puissance électrique. Si (ΔP) est positif, alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP. D'autres perturbations successives de la tension dans la même direction (c'est-à-dire avec le même signe algébrique) devraient déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP. Dans le cas où (ΔP) est négatif, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, et donc le signe algébrique de la perturbation de la tension devrait être inversé pour déplacer de nouveau le point de fonctionnement vers le MPP.

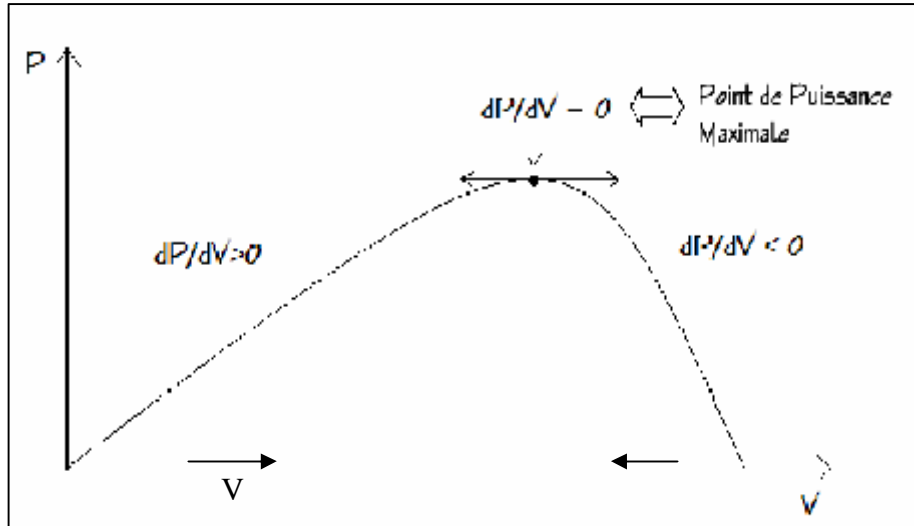


Figure III.4: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de Perturbation puis observation

La figure III.5 montre l'organigramme de la méthode de P&O qui est récapitulé dans le Tableau suivant :

Perturbation de la tension	Observation de la puissance	Prochaine Perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

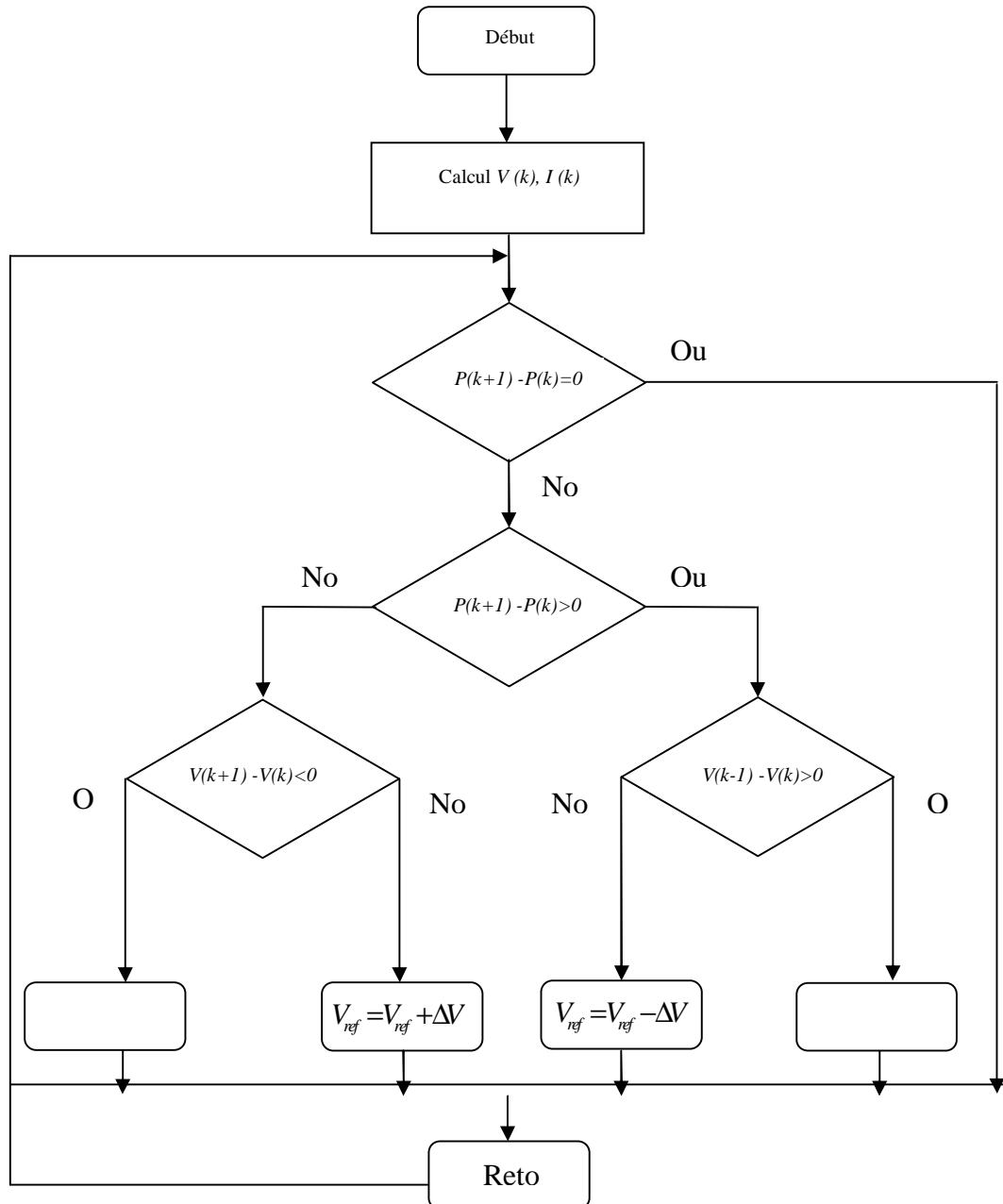


Figure III.5 : L'organigramme de la méthode de P&O

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité. Quand l'intensité de lumière solaire diminue, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du MPP. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" quand il atteint le point MPP, le point de fonctionnement oscille autour de ce dernier. En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement. Sur la figure III.5, nous considérons que le point de fonctionnement est sur la courbe 1. Le MPPT oscille autour du MPP du point B vers le point A, puis vers le point C et vice-versa. Au cours du changement rapide de l'éclairement le MPPT au lieu de déplacer le point de fonctionnement du point A vers le

point B, il le déplace du point de fonctionnement de A vers D (puisque le point D et B ont la même tension). Donc, ceci conduit à un (ΔP) positif et le MPPT continuera de perturber la tension dans la même direction ; donc, vers le point F. Si l'ensoleillement augmente toujours rapidement, le point de fonctionnement se déplace vers le point G sur la courbe 3 au lieu du point F sur la courbe 2.

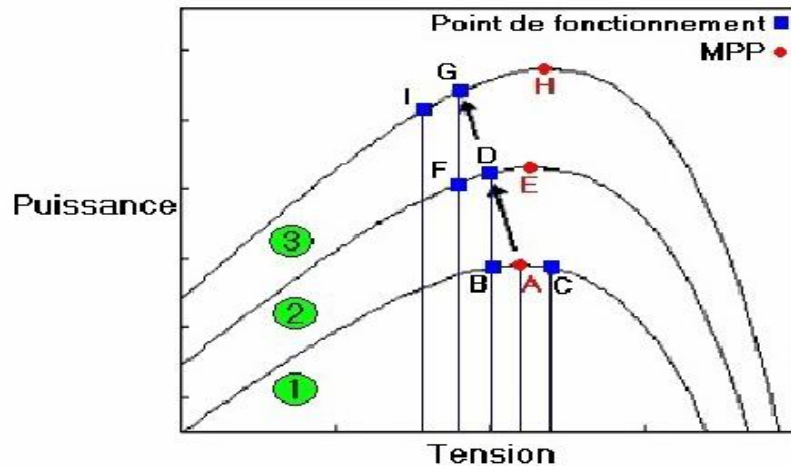


Figure III.6 : Illustration du comportement de l'algorithme "P&O" sous un changement rapide de l'éclairement

Alors, le MPPT voit toujours un (ΔP) positif ce qui entraîne une divergence du point optimal et diminution du rendement du panneau solaire. Cette situation peut se produire lors des jours partiellement nuageux quand la poursuite du MPP est plus difficile à cause de son déplacement. De la même façon la technique Hill-Climbing utilise comme perturbation $\Delta\alpha$ du rapport cyclique du convertisseur DC-DC ; ces deux techniques précédentes présentent deux chemins différents vers la même méthode.

III-7 TECHNIQUE DE L'INCREMENTATION DE LA CONDUCTIBILITÉ :

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ($G=I/V$) La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ($G = dI / dV$).

En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous allons chercher le maximum de la courbe (figure III.7) en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance.

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire :

$$P = V \cdot I \quad (\text{III.5})$$

D'ou en écrivant la dérivée :

$$\frac{dP}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \cdot \frac{dV}{dV}$$

$$\frac{dP}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \tag{III.6}$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} + I$$

Donc

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{Au point MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} \neq 0 \quad \text{À gauche du MPP} \tag{III.7}$$

$$\frac{dP}{dV} \neq 0 \quad \text{À droite du MPP}$$

Peut être écrit :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{(a)} \quad \text{au point MPP}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \neq -\frac{I}{V} \quad \text{(b)} \quad \text{à gauche du MPP} \tag{III.8}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \neq -\frac{I}{V} \quad \text{(c)} \quad \text{à droite du MPP}$$

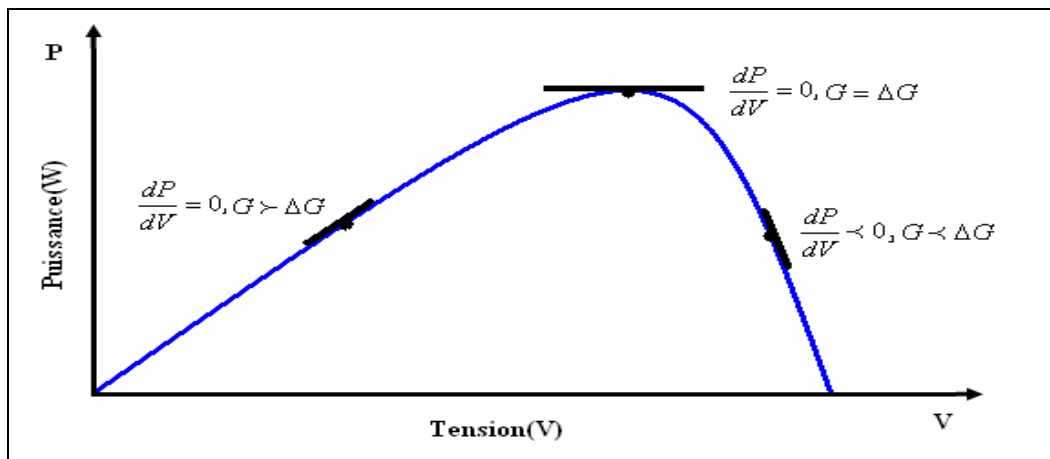


Figure III.7: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode par incrémentation de conductibilité

Les équations (III.8.b) et (III.8.c) sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (III.8.a) soit satisfaite. Une fois le MPP est

atteint, le MPPT continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté ; ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'éclairement. Quand l'éclairement augmente, le MPP se déplace vers la droite de la tension de fonctionnement. Pour compenser ce mouvement du MPP, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement. La même chose pour le cas contraire, quand l'éclairement diminue, le MPPT doit diminuer cette dernière.

Les valeurs actuelles et précédentes de la tension et du courant sont utilisées pour calculer (ΔV) et (ΔI) . Si $\Delta V=0$ et $\Delta I=0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au MPP. Si $\Delta V=0$ et $\Delta I>0$, alors l'éclairement a augmenté. Ceci exige au INC d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver de nouveau le MPP. Contrairement si $\Delta I<0$, l'éclairement a diminué tout en exigeant au INC-MPPT de diminuer la tension de fonctionnement. Si le changement de la tension n'est pas nul, les rapports dans les équations (III.8.b) et (III.8.c) peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le MPP.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} \mathbf{f} - \frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $(\Delta P/\Delta V)>0$), donc le point de fonctionnement est à gauche du MPP. Ainsi, la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP. De même, si $\frac{\Delta I}{\Delta V} \mathbf{p} - \frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $(\Delta P/\Delta V)<0$), le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le MPP[10]. Le schéma de la figure III.8 montre l'organigramme de l'algorithme INC.

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme "P&O" puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le MPP, et il peut aussi déterminer l'atteinte du MPP. De plus, dans les conditions de changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction comme c'est le cas avec l'algorithme "P&O", et d'ailleurs, il n'oscille pas autour du MPP une fois qu'il l'atteint.[21]

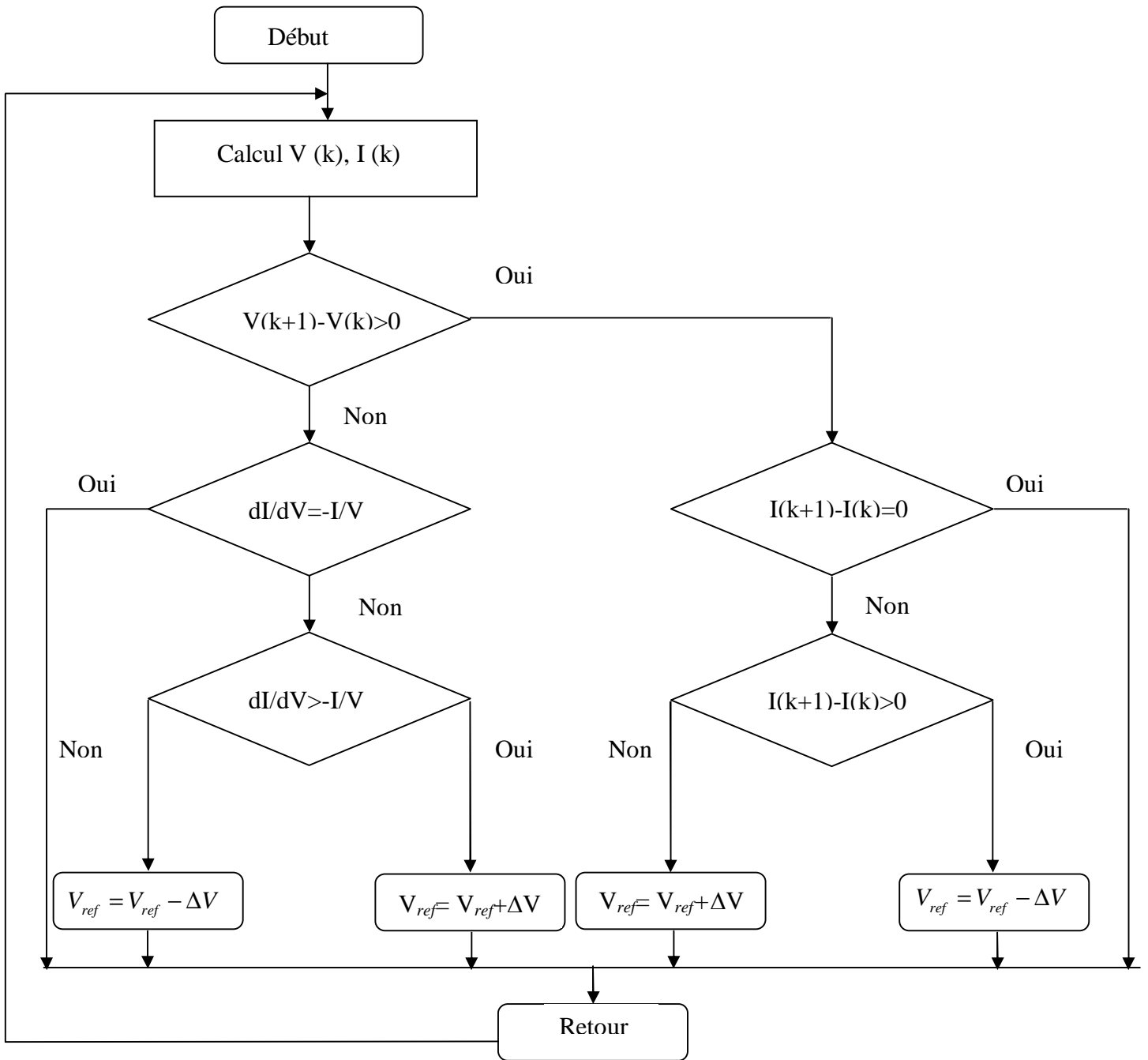


Figure III.8 : L'organigramme de l'algorithme INC

III-8 RESULTAT DE SIMULATION

III-8-1 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES TECHNIQUES DE MPPT: [20]

Technique de MPPT	Dépendant de GPV	Vrai MPPT	Analogique ou numérique	Vitesse convergence	Exécution complexité	Paramètres utilisé
Fraction de la tension du circuit ouvert	oui	Non	tous les deux	moyenne	bas	tension
Hill-climbing/P&O	non	Oui	tous les deux	Change	bas	tension et courant
L'incrémentation de la conductibilité	non	Oui	numérique	Change	moyenne	tension et courant

III-8-2 Résultats de méthode fraction de la tension du circuit ouvert:

Nous avons dit précédant que, la recherche du point de puissance maximale se fait, à partir d'une tension de référence calculé à partir de la tension du circuit ouvert (équation III.4), si la tension mesurée inférieure à la tension de référence, on augmente le rapport cyclique α , dans le cas contraire on diminue le rapport cyclique α , Le résultat de programmation est montré dans les figures suivantes :

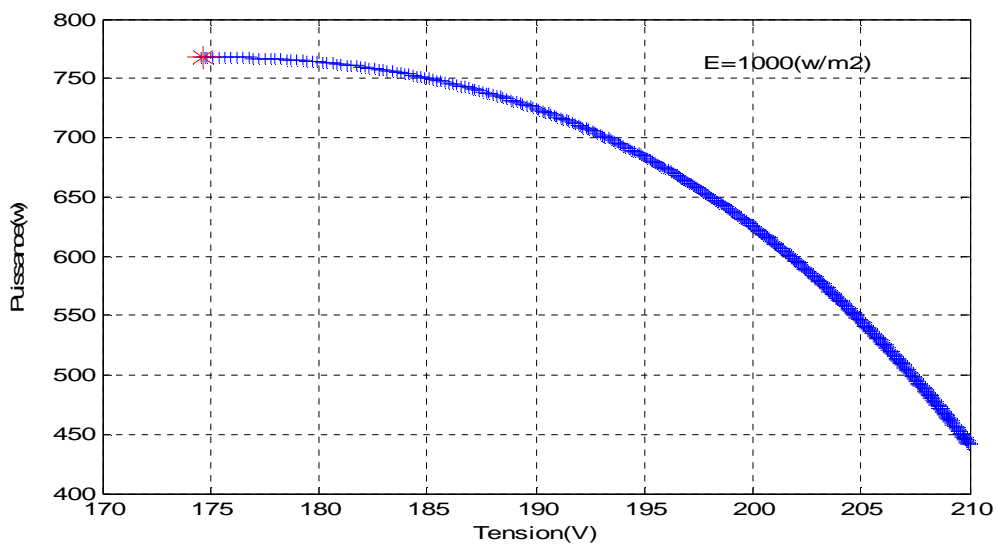


Figure III.9 : La variation de la puissance en fonction de la tension vers le MPP

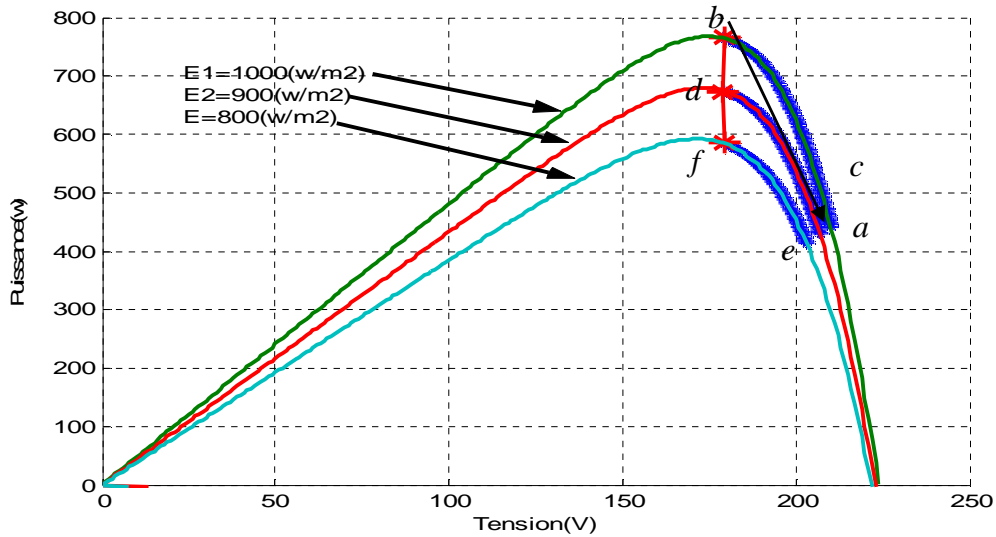


Figure III.10 : Poursuite du point de puissance maximale par un MPPT pour l'éclairement variable.

III-8-3 Interprétation :

On démarre avec $\alpha = 0$ (le point a), avec la condition climatique standard.

Pour une charge résistive $R=100\Omega$ connectée à un hacheur parallèle, le point de fonctionnement se trouve à droite du point optimale (MPP) ou $V_{MPP}=174.5V$, $P_{MPP}=776.8W$ ($E=1000\text{(w/m}^2\text{)}$), on se dirige vers ce point, on augmentant α se qui veut dire diminué la tension avec des pas $\Delta\alpha$ constantes (figureIV.10).ce qui permet de montrer une bonne adaptation de la charge : la résistance(R_g) vue par le panneau photovoltaïque est :

$R_g=R (1- \alpha)^2$, par suite pour diminuer R_g afin de se diriger vers le MPP on augmente α .

En variant l'éclairement à température constante ($T=25^\circ C$), les points suivent le chemin (b-c-d-e-f), à partir de l'éclairement($E=1000\text{w/m}^2$) jusqu'à l'éclairement($E=800\text{(w/m}^2\text{)}$) (figureIV.10).

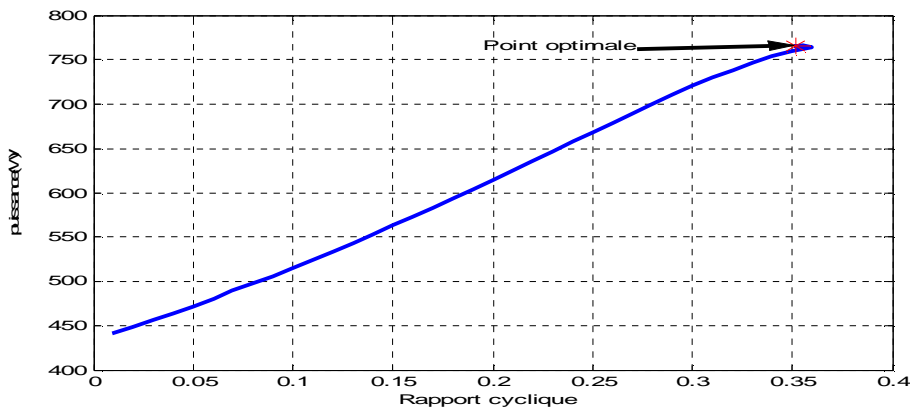


Figure III.11 : La variation de la puissance on fonction de le rapport cyclique

A partir de la figure III.11, il y a une relation proportionnelle entre la puissance et le rapport cyclique, α , P ($\alpha_{opt}=0.35$).

L'erreur absolue

Elle est donnée par la relation suivante :

$$err(\%) = \left(\frac{P_{optimale} - P_{calculé}}{P_{optimale}} \right) \cdot 100$$

E(w/m2)	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
err (%)	0.3436	0.5372	0.7379	1.02	1.3667	1.7035	1.8988	2.1648	2.8466	4.6681

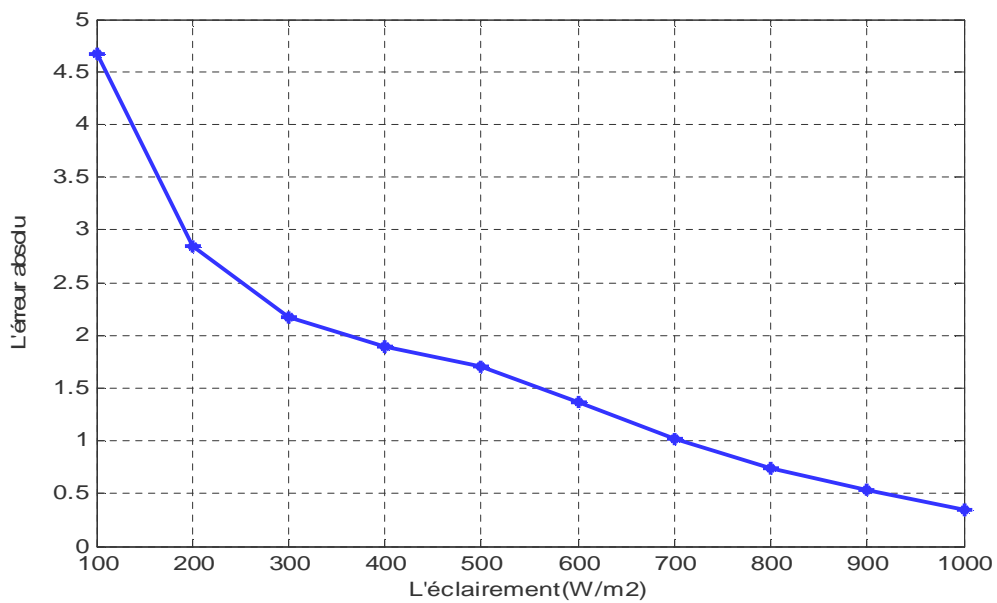


Figure III.12 : La variation de l'erreur absolue on fonction l'éclairement

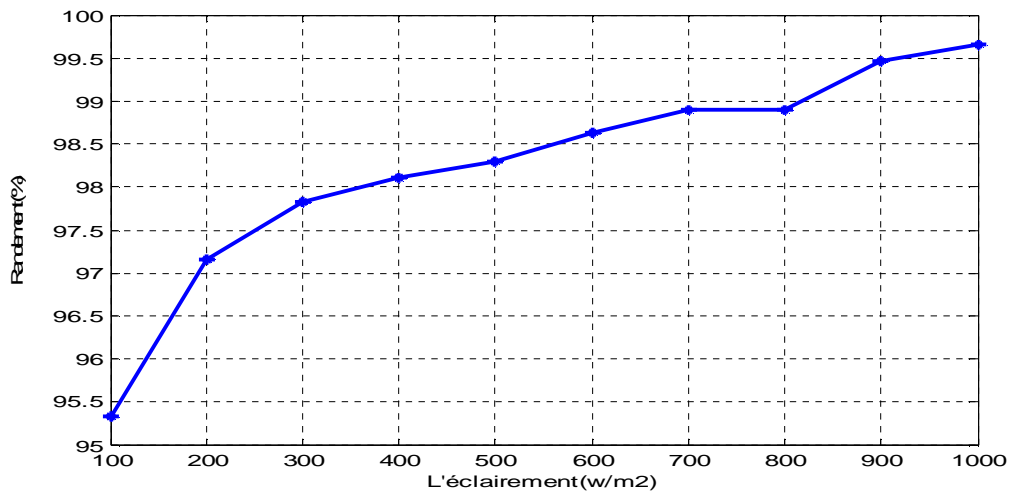


Figure III.13 : La variation de rendement en fonction de l'éclairement

Le tableau précédent récapitule l'erreur absolue en fonction de l'éclairement, elle est minimale pour les grandes valeurs de l'éclairement, puis elle augmente considérablement vers les petites valeurs ; ce qui permet de dire la même chose pour le rendement figure (III.13).

III-8-4 Résultats de la méthode de perturbation puis observation:

Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètres de mesure. Elle opère en perturbant périodiquement la tension du panneau, et en comparant l'énergie précédemment délivrée avec la nouvelle après perturbation, en suivant l'organigramme figure (III.5), les résultats de simulation sont les suivants :

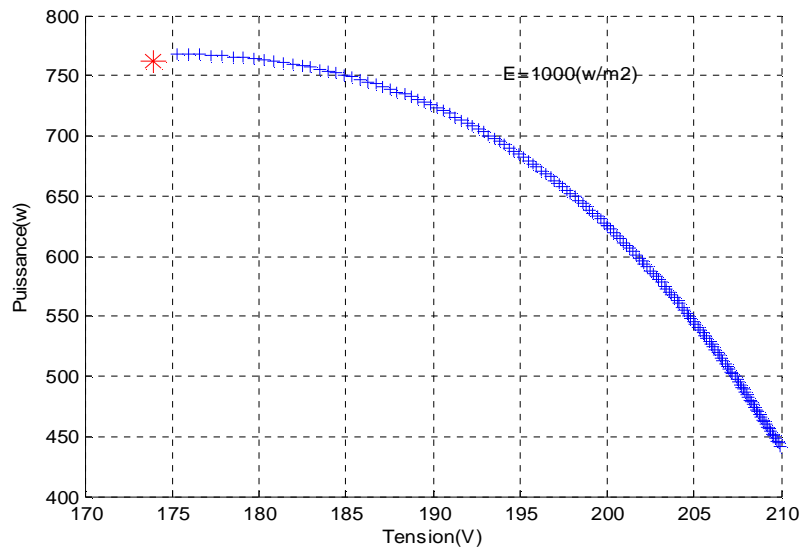


Figure III.14 : la variation de puissance en fonction de la tension

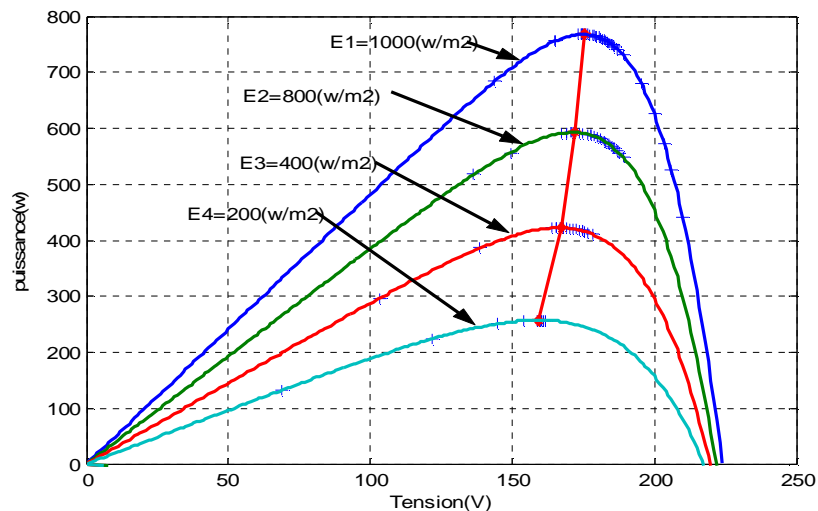


Figure III.14 : Poursuite du point de puissance maximale par (P&O) pour l'éclairement variable

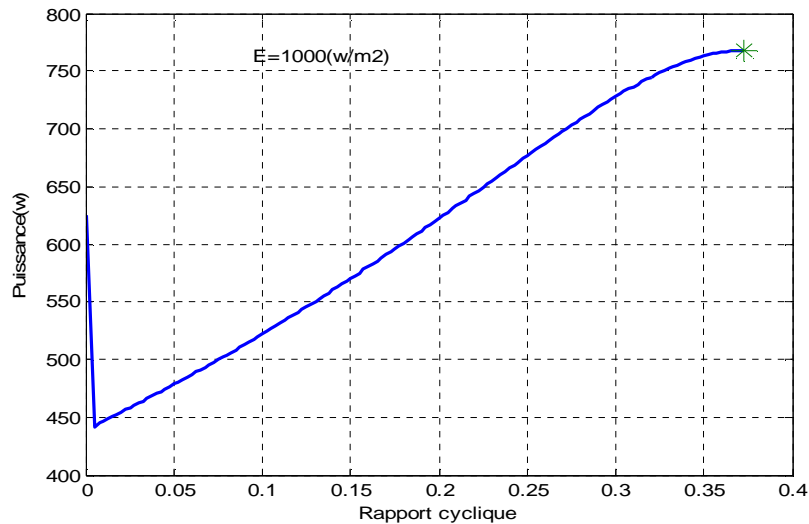


Figure III.15 : La variation de la puissance on fonction du rapport cyclique

III-8-5 Résultats de méthode de l'incrémentation de la conductibilité:

On a dit précédemment que cette méthode utilise l'incrémentation de la conductance vue par la source. Les tensions et courants du panneau sont lus par des capteurs, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décide sur la direction de l'incrémentation, jusqu'à leur égalité.

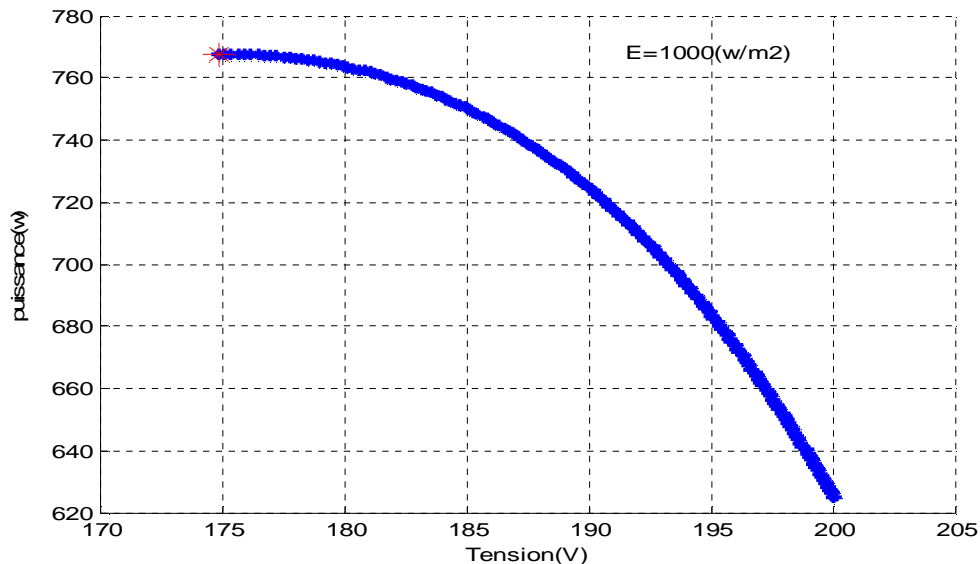


Figure III.18 : La variation de la puissance en fonction de tension vers le MPP

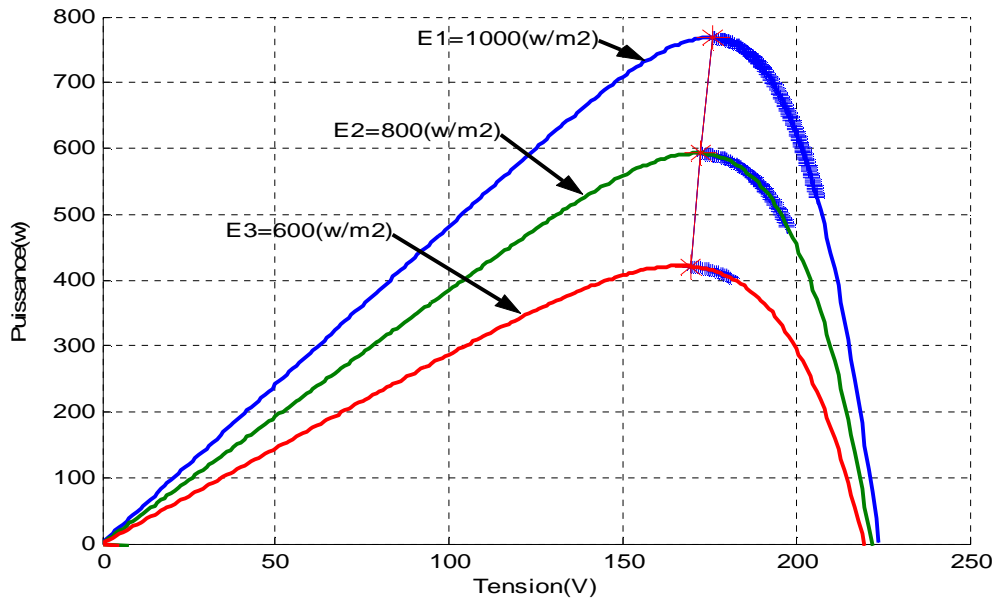


Figure III.19 : Poursuite du point de puissance maximale pour l'éclairement variable

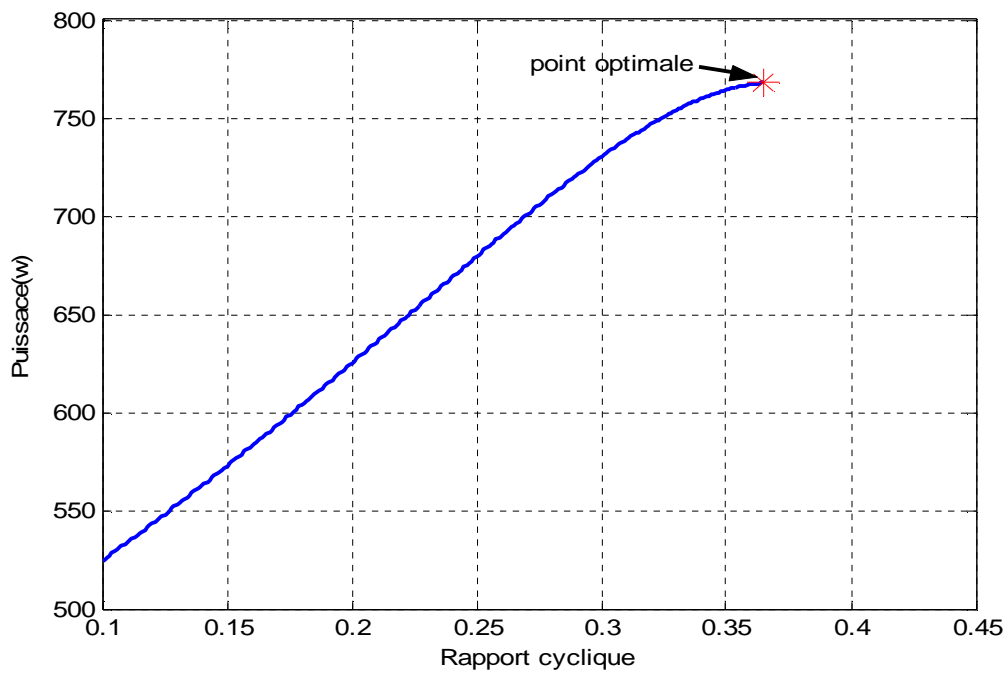


Figure III.20 : La variation de la puissance on fonction de le rapport cyclique

D'après la figure (III.20) on vu que a , P ($\alpha_{opt}=0.3700$).

E(w/m2)	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
err (%)	0.0144	0.023	0.0369	0.0457	0.1003	0.1216	0.2713	0.3302	0.3963	0.6638

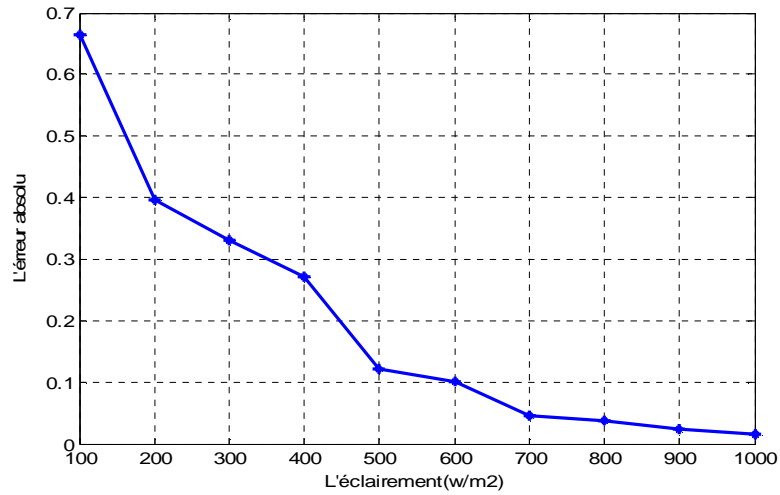


Figure III.21 : La variation de l'erreur absolue on fonction l'éclairement

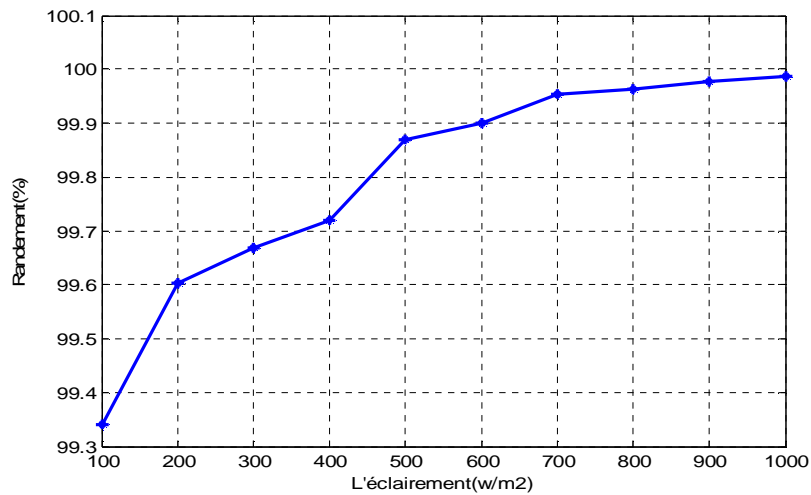


Figure III.22 : La variation de rendement on fonction l'éclairement

La figure (III.21) E_{err} et pour la figure (III.22) E_h . L'erreur est meilleur par rapport aux autres méthodes.

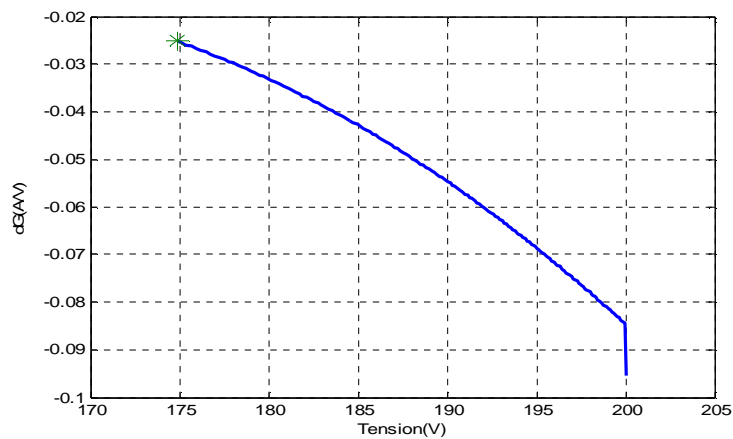


Figure III.23 : La variation la conductance incrémentale on fonction de la tension

Suivant la nature de la charge et le convertisseur utilisé (hacheur parallèle), les points de poursuite se trouve à droite du point optimal, c'est-à-dire $dP/dV < 0 \Rightarrow dI/dV < -I/V$ donc on diminue la tension vers MPP, par suite l'augmentation de α jusqu'à

$|dG| = |G| = 0.0251$.on définit (G_s) l'inductance statique, le point correspondant au point MPP.

On définit ($G_d = dG$) l'inductance dynamique les points de poursuite du point MPP.

III-10 CONCLUSION:

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques méthodes de poursuite de la puissance maximale et nous avons retenu l'algorithme de l'incrément de la conductibilité qui se caractérise par un rendement supérieur relativement à ceux des algorithmes, Perturbation puis observation et fraction de la tension de circuit ouvert.

Notons que l'algorithme est trop lent à retrouver le nouveau point de fonctionnement optimal.

CONCLUSION GÉNÉRALE

D'après l'étude faite précédemment ; une étude bibliographique à permet de faire connaissance à certaines énergies renouvelables, parmi les quelles l'énergie photovoltaïque, qui occupe ces dernières années, un pourcentage de production d'énergie mondiale, malgré sont coût, qui à son tour voit une décroissance avec la développement des technique de d'avancement du semi-conducteur.

Par suite due comparaison de quelques techniques de poursuite du point maximum de la puissance augmentent environnement le rendement des panneaux solaires, ces technique se différant entre eux par le domaine d'applications , le coût, le type d'implémentation, la vitesse de convergence ; dans notre étude , on comparant les trois technique (technique de fraction de la tension du circuit ouvert , technique de la perturbation puis observation (P&O) et technique de l'incrémentation de la conductibilité),malgré qu'il existe d'autre technique (la commande courant linéaire , la commande brouillée , le réseau neurologique , des cellules pilotes , le champ courant , la commande de limite cycle).Comme on la signalés précédemment, afin d'adapter le panneau avec la charge, il est nécessaire de introduit un convertisseur DC-DC d'adaptation, pour déplacé le point de fonctionnement au points optimums.

Une étude théorique sur les deux principaux types de ces convertisseurs à été présenté avec les pertes existantes en fonction de l'angle d'amorçage et la fréquence de commutation, cette étude peut être nécessaire prochainement pour l'étude pratique.

Sommaire

Introduction générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre -I -	l'énergie solaire
----------------------	--------------------------

I.1.Introduction	03
I.2. La production de l'électricité	03
I.2.1. Le principe de production.....	03
I.2.2. Les différents types d'énergie	03
I.2.2.1. Énergies non renouvelables	04
I.2.2.2 Énergies renouvelables	04
I.3. Electricité photovoltaïque	08
I.3.1 Histoire	08
I.3.2 le soleil et le rayonnement	09
I.3.2.1 le soleil.....	09
I.3.2.2 le rayonnement	09
I.3.2.3 Modèle simplifié de L'éclairement.....	09
I.4Conclusion.....	11

Chapitre -II - la cellule photovoltaïque et les caractéristiques de générateur PV
--

II.1Introduction.....	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.6Schéma équivalent d'une cellule solaire	15
II.7Le 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'Éclairement	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 systèmes 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	28
II.10 Conclusion.....	28

Chapitre -III - *la puissance maximale du générateur photovoltaïque*

III.1 Introduction.....	29
III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	29
III.3 Principe du MPPT.....	30
III.4 Rendement de la Chaîne de Puissance	31
III.5 Technique de fraction de la tension du circuit ouvert	32
III.6 Technique de la perturbation puis observation (P&O)	33
III.7 Technique de l'incrémentation de la conductibilité	36
III.8 Caractéristiques principales des techniques de MPPT	40
III.8.1 Résultats de méthode fraction de la tension du circuit ouvert	40
III.8.2 Interprétation	41
III.8.3 Résultats de la méthode de Perturbation puis observation	43
III.8.4 Résultats de méthode de l'incrémentation de la conductibilité	44
III.9 Conclusion.....	44

Conclusion générale.....	45
---------------------------------	-----------

Bibliographie