

Université de Bouira
Akli Mohand Oulhadj



جامعة البويرة
أكلي محمد أولحاج

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en

ELECTROMECHANIQUE ET SYSTÈMES DE COMMANDE

Présenté Par

M. BACHI Mohamed

M. CHEBHI Hicham

Intitule

Maximisation de puissance d'un générateur

Photovoltaïque par les méthodes

Classique

Soutenu le 16/10/2017 devant le jury composé de :

M. MOUASSA Souhil	Maitre-Assistant université de Bouira	Président
M. LADJOZI Samir	Maitre-Assistant université de Bouira	Examineur
M. KHERCHI Mohamed	Maitre-Assistant université de Bouira	Examineur
M. MOHAMMEDI Ahmed	Enseignant à l'université de Bouira	Promoteur

REMERCIEMENT

*Avant tout, je remercie **ALLAH**, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

A la suite Nous tenons à remercier vivement le docteur Ahmed MOHAMMEDI notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations, ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, Nos vifs remerciements aussi tous nos enseignants, qui nous ont accompagné pendant notre cursus. Et tous les enseignants de département de Génie électrique. A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail. Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous ne pouvons terminer sans remercier nos parents et tous les membres de nos familles de nous avoir soutenir et encourager pour terminer le présent travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail avant tous à mes chères parents à mon père
qui a fait l'impossible pour notre réussite à ma mère que dieux me la
protège à mes sœurs à ses enfants marame et louay à tout ma famille*

Sans oublier mes grandes mere que dieux nous les garde

A tous mes amies, tous mes collègues

A tout qui m'a aidé de près ou de loin

Mohamed

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parent tout d'abord à ma mère à mon père
qui m'ont aidé pendant tout mon carrière d'étude*

A mes frères mes sœurs qui m'ont encouragé à réaliser cette recherche

A toute ma grande famille

A toute personne m'a aidé financièrement ou psychiquement

Hicham

الملخص:

في هذا العمل، قمنا بتصنيف مختلف الطاقات الشمسية وأهميتها الاقتصادية للبلدان وخاصة الجزائر، كما شرحنا كيفية استغلالها بمختلف الطرق التكنولوجية، وتطرقنا كذلك الى المولدات الكهروضوئية التي تستخدم خوارزميات مبرمجة من اجل تتبع القيمة القصوى للطاقة التي يوفرها المولد الكهروضوئي باستخدام MATLAB وذلك باستعمال الطريقتين التقليديتين الاضطراب والملاحظة وزيادة التكتيف.

Résumer :

Dans ce travail, nous avons classé les diverses énergie solaire et son importance économique pour les pays surtout l'Algérie, on a également expliqué comment les exploiter pour les différents méthodes technologique, et nous avons abordé les générateurs photovoltaïque qui utilisent des algorithmes programmés dans le but de suivre la valeur maximale de l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque à l'aide de MATLAB Simulink par les deux méthodes classiques P&O et INC.

Abstract :

In this work, we have classified the various solar energy and its economic importance for the countries especially Algeria, we also explained how to exploit them for the deferent technological methods, and we approached the photovoltaic generators which use algorithms programmed in the target to follow the maximum value of the energy supplied by the photovoltaic generator using MATLAB Simulink by the two conventional methods P & O and INC.

LISTE DES SYMBOLES

A:	facteur d'idéalité de la diode
C_p :	le pas d'incrémentation du rapport
E_s :	Eclairement (W/m ²).
E_g :	énergie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.
I_{0a} :	courant de saturation de la diode (A)
I_a :	courant de diode. (A)
I_{rp} :	Le courant dans la résistance parallèle (A)
I_m :	Le courant maximale du module (A)
I_{co} :	Le courant de circuit-ouvert(A)
I_{pv} :	le courant de module PV(A)
I_{cc} :	Le courant de court-circuit du module (A).
I_{ph} :	photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A)
I_s :	le courant de saturation il est fortement dépendant de la température (A)
I_{ppm} :	Courant au point de puissance max I _{ppm} (A)
INC :	Algorithme d'incrémentation de la conductance
K :	constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23}$) (J / K)
MPP :	le point de puissance maximale
N_s :	nombre de cellules en série dans un module.
P&O :	Méthode de perturbation et d'observation
q :	charge de l'électron $q = 1,602.10^{-19}$ (C)
R_s :	résistance série (Ω)
R_{sh}:	résistance shunt (Ω)
T :	la température de la cellule ($^{\circ}$ K)
T_{stc}:	la température aux conditions standards de fonctionnement ($^{\circ}$ K)

Liste des symboles

- V_{pv}** : la tension de module PV(V)
- V_{co}** : La tension de circuit ouvert du module (V).
- V_m** : La tension maximale du module (V).
- V_{ppm}** : Tension au point de puissance max V_{ppm}(V)

LISTE DES ABREVIATIONS

DC:	Courant Continu (Direct Current)
FCC :	Algorithme à base de la mesure d'une fraction de courant I_{cc}
FCO :	Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{oc}
GPV :	Générateur Photovoltaïque.
MPPT:	Maximum Power Point Tracking.
NFC :	Algorithme MPPT basées sur la logique floue
PV :	Photovoltaïque.

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

I. 1. L'énergie photovoltaïque	02
I. 1. 1. Généralités	02
I. 1. 2. Les énergies en Algérie	02
I. 1. 3. La cellule photovoltaïque (PV)	03
I. 1. 3. 1. Historique	03
I. 1. 3. 2. Définition	04
I. 1. 3. 3. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	04
I. 1. 3. 4. Technologies des cellules	05
I. 1. 3. 5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	07
I. 1. 3. 6. Caractéristique de la cellule photovoltaïque	08
I. 1. 3. 7. Association des cellules photovoltaïques identiques	10
I. 2. Les systèmes photovoltaïques	11
I. 2. 1. La fiabilité des systèmes photovoltaïques.....	12
I. 2. 2. Prés ou loin du réseau public.....	12
I. 2. 3. Les différents systèmes photovoltaïques	13
I. 2. 3. 1. Les systèmes autonomes.....	13
I. 2. 3. 2. Les systèmes raccordés au réseau.....	13
I. 2. 3. 3. Les systèmes hybrides	14
I. 2. 4. Les différentes applications des systèmes photovoltaïques.....	15

Sommaire

I. 2. 4. 1. Les systèmes photovoltaïques pour le chalet et le domicile	15
I. 2. 4. 2. Les systèmes photovoltaïques pour les applications mobiles et récréatives...	16
I. 2. 4. 3. Les systèmes photovoltaïques en agriculture	16
I. 2. 4. 4. Les systèmes photovoltaïques pour d'autres applications	17
I. 2. 5. Systèmes photovoltaïques avantages et limites	17
I. 3. Conclusion	18

Chapitre II : Modélisation d'un générateur photovoltaïque

II.1. Introduction	19
II.2. Description du système à étudier	19
II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque	20
II.3.1. Le modèle idéaliste.....	20
II.3.2. modèle explicite	20
II.3.3. Le modèle à une diode.....	22
II.4. Bloc Simulink du modèle à une diode.....	23
II.4.1. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC.....	24
A. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque...	25
B. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque ...	27
II.5. Modélisation du hacheur survolteur (BOOST)	28
II.6. Conclusion.....	29

Chapitre III : Maximisation de puissance d'un générateur photovoltaïque

I. Introduction.....	30
II. Adaptation de l'énergie photovoltaïque.....	30
III. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).....	31
IV. Les commandes MPPT des convertisseurs DC-DC.....	32
IV. 1.Méthode de perturbation et d'observation (PO).....	32
IV. 2.Méthode de l'Incrément de conductance (INC).....	33
V. Simulation et interprétation des résultats.....	35
V.1. Caractéristiques sous les conditions STC ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$)	36
V.2.Caractéristiques sous ensoleillement variable	37
V.3. Caractéristiques sous température variable	38
V.4. Comparaison entre les deux méthodes.....	39
V.4.1.Pour un faible ensoleillement.....	39
V.4.2.Pour un moyen ensoleillement.....	39
V.4.3.Pour un fort ensoleillement.....	40
V.5.Puissance en fonction du temps.....	40
V.5.1. Sous les conditions STC.....	40
V.5.2. Changement brusque d'ensoleillement.....	41
VI. Conclusion.....	41

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient 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. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1].

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil, ce dernier est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [2].

La problématique d'un générateur photovoltaïque est qu'il peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières de courant et de tension qui dépendent des conditions climatiques. Suite aux changements brusques et fréquents de ces conditions (la température et l'éclairement), le point de fonctionnement (intersection de la courbe de charge et celle du générateur photovoltaïque) change de manière conséquente, ce qui rend la poursuite du point de puissance maximale plus que nécessaire afin de minimiser les pertes en puissance du photo-générateur [3].

Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles de la technologie photovoltaïque.

Le second chapitre est consacré à la modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque.

Au troisième chapitre nous allons étudier deux techniques classiques de poursuite de point de puissance maximale à savoir la Perturb & Observ (P&O) et l'Incrément de Conductance (INC)



Chapitre I

I. 1. L'énergie photovoltaïque

I. 1. 1. Généralités :

Le terme « photovoltaïque » est associé à la production d'une tension à partir de la lumière ; on y réfère souvent par l'abréviation PV. Un terme plus courant pour les cellules photovoltaïques est piles solaires malgré que celles-ci fonctionnent à partir de n'importe quelle source de lumière, et non uniquement celle du soleil. Une pile solaire est un convertisseur : elle convertit l'énergie de la lumière en énergie électrique. Comme elle ne peut pas emmagasiner d'énergie, lorsque la source de lumière (typiquement le soleil) est enlevée, la pile ne produit plus de courant électrique. Si de l'électricité est requise durant la nuit, un moyen quelconque d'emmagasiner de l'énergie électrique (typiquement une batterie) doit faire partie du circuit.

Dans ce chapitre, nous vous présentons certains des principes de la technologie photovoltaïque ainsi qu'une description des différents constituants du système photovoltaïque.

I. 1. 2. Les énergies en Algérie

L'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99,2 %) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0,8 %) et leur production est partagée entre la filière hydraulique qui a généré cette année 389 GWh, soit 0,7 % du total, et les filières solaires photovoltaïque (11 GWh) et thermodynamique (58 GWh) qui représentent quant à elles 0,1 % du bilan. La production fossile a augmenté en moyenne de 6,7 % par an sur la période 2002-2012 [11].

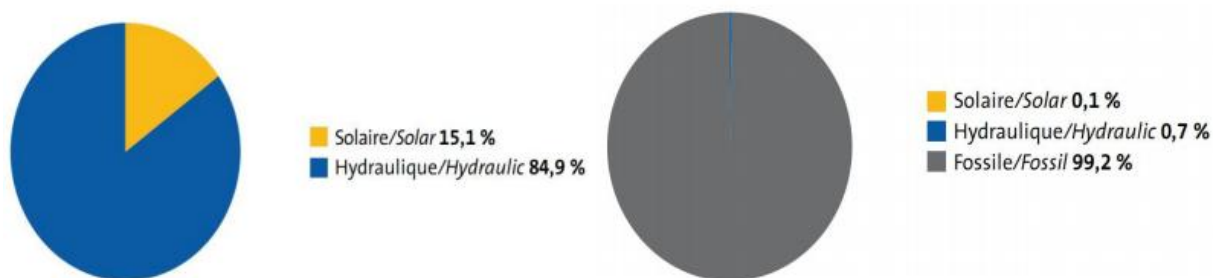


Figure I. 1 : Structure de production d'électricité en 2012 [14]

L'Algérie amorce cependant aujourd'hui une dynamique verte avec le lancement d'un programme prévoyant l'installation de plus de 22 000 MW de capacités renouvelables, 12 000 MW étant dédiés à couvrir la demande intérieure en électricité et 10 000 MW destinés à l'exportation. De plus, l'option du nucléaire est toujours d'actualité pour faire face à la

demande d'électricité galopante et une première centrale d'une puissance de 1 000 MW pourrait voir le jour en 2025. En parallèle, Sonelgaz, qui contrôle 75 % des capacités de production du pays, souhaite miser sur le développement des énergies renouvelables. Le nouveau programme pour le développement des énergies vertes s'appuiera en grande partie sur le secteur solaire pour lequel l'Algérie dispose d'un des meilleurs potentiels au monde. L'Algérie entend ainsi se positionner comme un acteur majeur de la production d'électricité solaire photovoltaïque, mais également thermodynamique. Le pays a inauguré en juillet 2011 sa première centrale hybride solaire-gaz d'une puissance de 150 MW, dont 30 MW solaires, dans la région saharienne de Hassi R'mel [11, 14].

Concernant l'hydraulique, la filière algérienne affiche une capacité installée de 245 MW qui permet de produire 389 GWh en 2012, la meilleure performance depuis 2006.

I. 1. 3. La cellule photovoltaïque (PV)

I. 1. 3. 1. Historique :

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium

pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.[1]

I. 1. 3. 2. Définition :

Une cellule photovoltaïque ou la photopile est l'élément de base de la conversion photovoltaïque, elle est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs qui ont pour rôle de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.[2]

I. 1. 3. 3. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- pour la couche P, déficit d'électrons

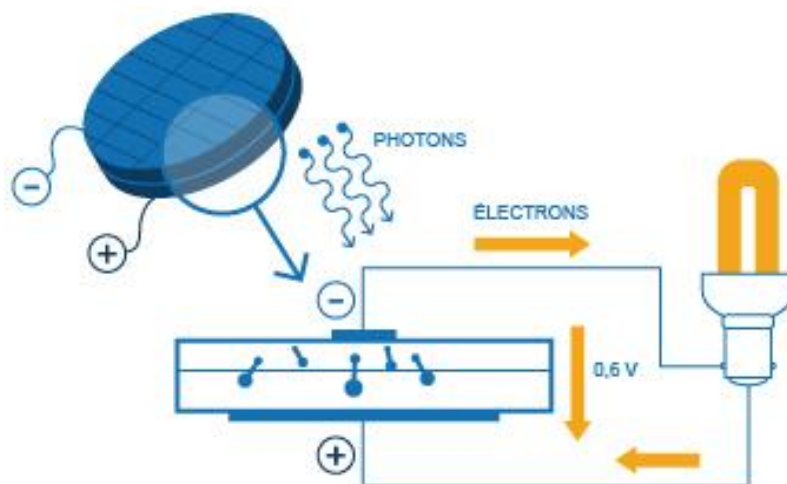


Figure I. 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Ces 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.[2]

On comprend qu'il existe un seuil d'énergie minimum nécessaire à la libération des électrons par les photons, on appelle ce seuil par gap optique du matériau, si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électron-trou, d'autre côté, si son énergie est supérieure ou égale au gap optique il y aura création de cette paire. [2]

I. 1. 3. 4. Technologies des cellules :

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. On utilise également des matériaux composites tel que l'arséniure de gallium et des couches minces comme de CdTe (tellure de cadmium) et le CIS (cuivre-indium-di sélénium) et encore le CIGS [8].

Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- les cellules monocristallines
- les cellules polycristallines
- les cellules amorphes
- les cellules CdTe, CIS, CIGS, CdS, GaAs.....etc.

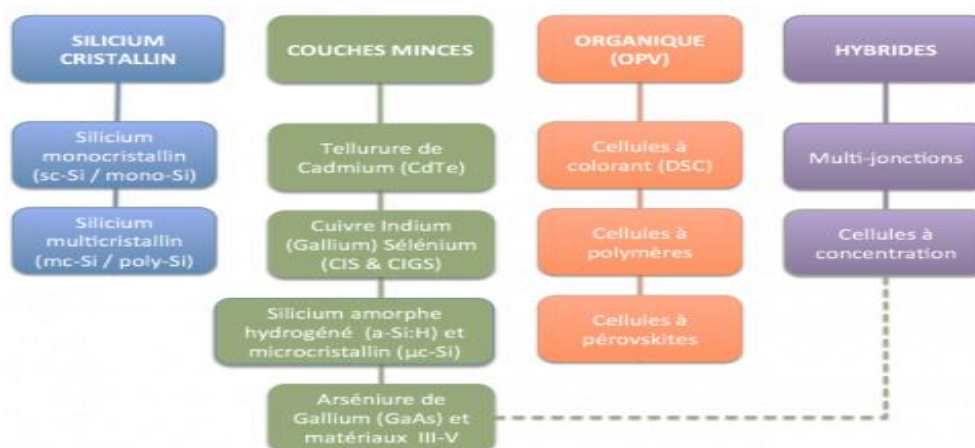


Figure I. 3 : les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

Le tableau suivant présente une comparaison entre les différentes technologies:

Tableau I. 1 : comparaison entre les différentes technologies des cellules PV

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)	—————	* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite monocristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)	—————	* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite polycristallin (CdS, CdTe.....)	8% (16% en laboratoire)	—————	Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

I. 1. 3. 5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [3] :

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (I. 1)$$

$$I_d = I_{0d} \left(e^{\frac{q(U + R_s I)}{KT}} - 1 \right) \quad (I. 2)$$

Avec:

- I_{ph} : photocourant, ou courant généré par l'éclairement (A)
- I_{0d} : courant de saturation de la diode (A)
- R_s : résistance série (Ω)
- R_{sh} : résistance shunt (Ω)
- k : constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$)
- q : charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C)
- T : température de la cellule ($^{\circ}\text{K}$)

On peut déduire de cette expression un schéma équivalent, comme le montre la figure I.4 :

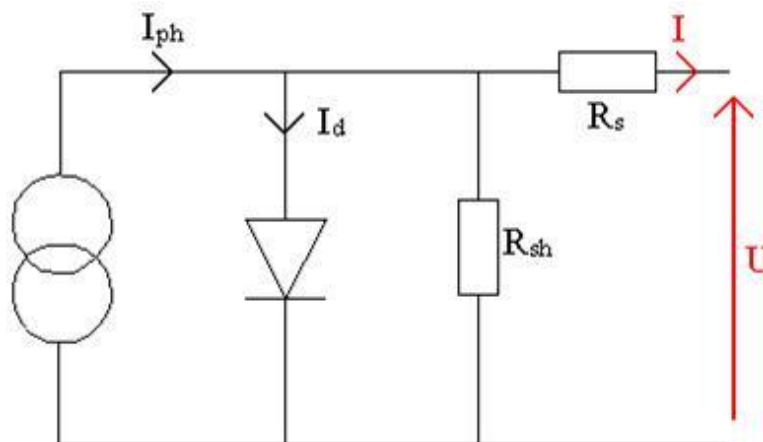


Figure I. 4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairement.

Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.

. Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger R_s et I devant U , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{0d} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}} \quad (\text{I. 3})$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} . On obtient :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{I. 4})$$

Le schéma équivalent de la figure I. 5 correspondant est celui de la cellule idéale :

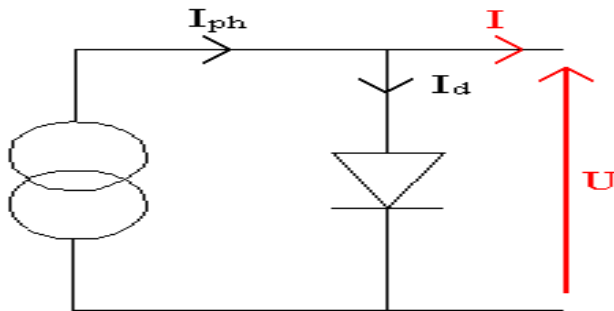


Figure I. 5: schéma équivalent simplifié

I. 1. 3. 6. Caractéristique de la cellule photovoltaïque :

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque.

La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairage, cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{sc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{oc} (tension maximale de circuit ouvert).[4]

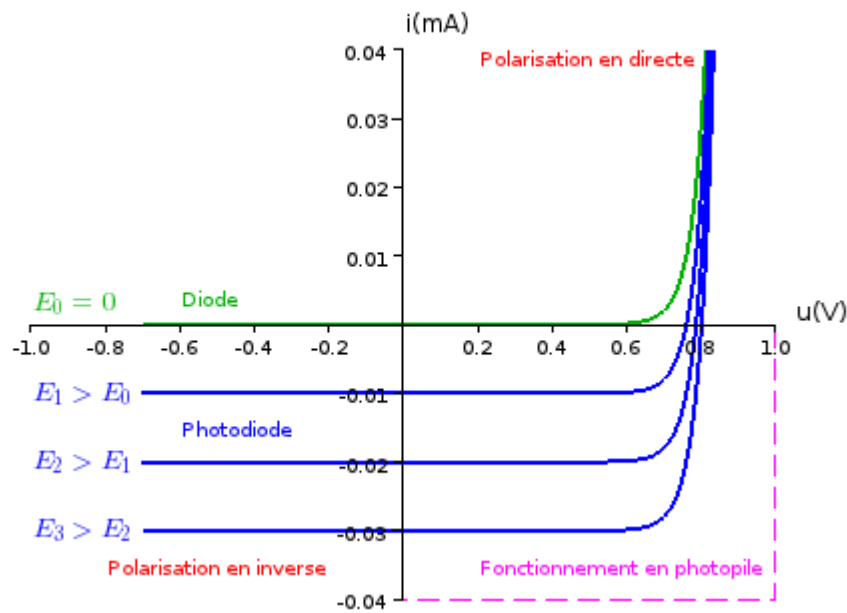


Figure I. 6 : Courbe de la polarisation du diode

➤ **Tension de circuit ouvert V_{oc} (pour $I = 0$) :**

Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. Pour une cellule donnée, elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, au moins pour des éclaircements supérieurs à 100 W / m^2 (ce qui correspond au rayonnement solaire sur terre d'une journée très couverte). On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule. [3]

➤ **Courant de court-circuit I_{sc} (pour $V = 0$) :**

Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclairement E_s , à la température ambiante, à la vitesse de circulation de l'air ambiant. Il est également directement fonction de la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule. [7]

➤ **La puissance caractéristique d'une cellule PV :**

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), la puissance électrique P (W) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V : [3]

$$P = V \cdot I \tag{I. 5}$$

➤ Point de puissance max :

Est le point (V_{mp}, I_{mp}) où la puissance dissipée dans la charge est maximale :

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (\text{I. 6})$$

I. 1. 3. 7. Association des cellules photovoltaïques identiques :

➤ En série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure I.7 montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série :

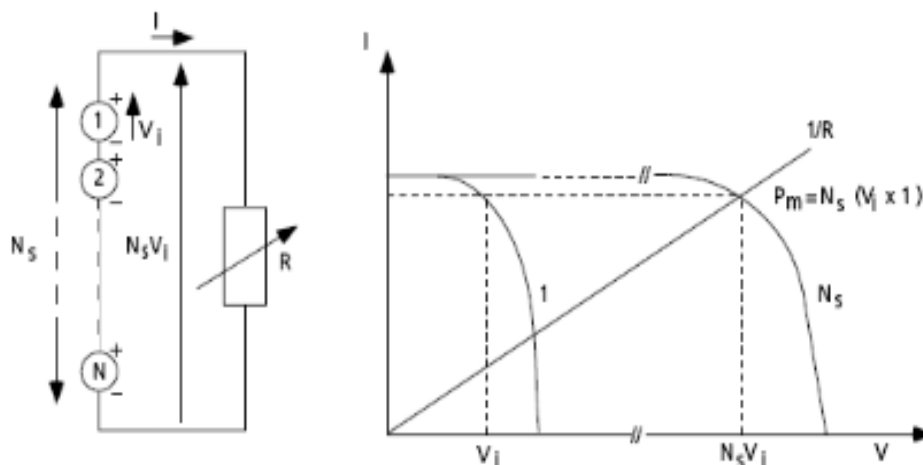


Figure I. 7 : cellules ou modules photovoltaïques en série

➤ En parallèle :

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. La figure I.8 montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle :

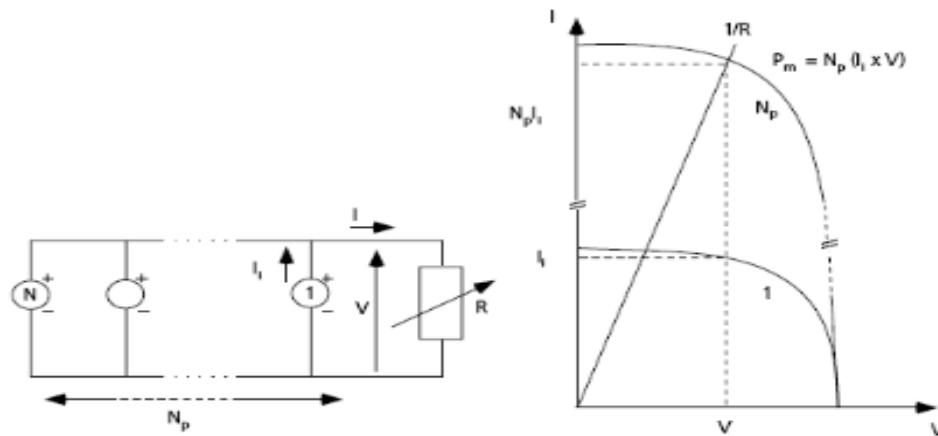


Figure I. 8 : cellules ou modules photovoltaïques en parallèle

I. 2. Les systèmes photovoltaïques :

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. L'humanité peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité. Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.



Figure I. 9 : Installations photovoltaïques

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

I. 2. 1. La fiabilité des systèmes photovoltaïques:

Malgré que les modules photovoltaïques, utilisent l'énergie solaire cela ne veut pas dire que les charges doivent fonctionner durant le jour. Ça ne veut également pas dire que l'on ne puisse pas faire fonctionner de charges durant les tempêtes. En effet, l'utilisation de batteries pour l'exploitation nocturne, et de génératrices de secours de type diesel, éolienne ou hydroélectrique, permet de concevoir un système qui pourra fonctionner dans les conditions les plus extrêmes [4, 6].

Toutefois, les systèmes PV offre une chance unique d'éviter les coûts et la complexité de ces équipements si l'énergie n'est requise que durant le jour. Le pompage d'eau est un exemple parfait illustrant comment un système photovoltaïque peut rencontrer les besoins d'une charge à des coûts minimes et sans complications. Une pompe (c.c) peut être raccordée directement au panneau solaire et fonctionnera automatiquement tant que l'ensoleillement est suffisant. Durant l'été, lorsque les besoins en eau sont plus élevés, le système pompe automatiquement plus d'eau puisqu'il y a plus d'ensoleillement. Un ventilateur de grenier ou de plafond est un autre type d'application dont le raccordement direct à des modules solaires permet une exploitation très fiable et à peu de frais durant le jour seulement.

I. 2. 2. Prés ou loin du réseau public:

Le marché des systèmes photovoltaïques s'adressait initialement aux applications éloignées, là où les coûts pour étendre le réseau de transport d'énergie publique s'avéraient prohibitifs. Même si la distance n'est pas si grande et que les coûts sont modérés, pour une demande en énergie peu élevée, il est encore plus économique d'installer un système photovoltaïque sur place que d'étendre le réseau public.

Toutefois, il est faux de croire que les systèmes photovoltaïques ne sont appropriés que dans les applications éloignées. Les coûts de branchement au réseau public, même lorsque la distance est courte, peuvent s'avérer plus élevés que d'installer un système d'énergie photovoltaïque autonome. L'éclairage de rues, d'abribus et de panneaux publicitaires en milieu urbain, de même que d'autres utilisations commerciales peuvent requérir des branchements relativement courts. De plus, les transformateurs et autres équipements, la main d'œuvre requise pour creuser les tranchés ou installer les poteaux requis pour les lignes, de même que les coûts associés au branchement au réseau public peuvent rendre les coûts d'un branchement rapproché très élevés [6].

I. 2. 3. Les différents systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types: autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type choisit dépendra des besoins, de l'emplacement et de budget.

I. 2. 3. 1. Les systèmes autonomes :

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie.

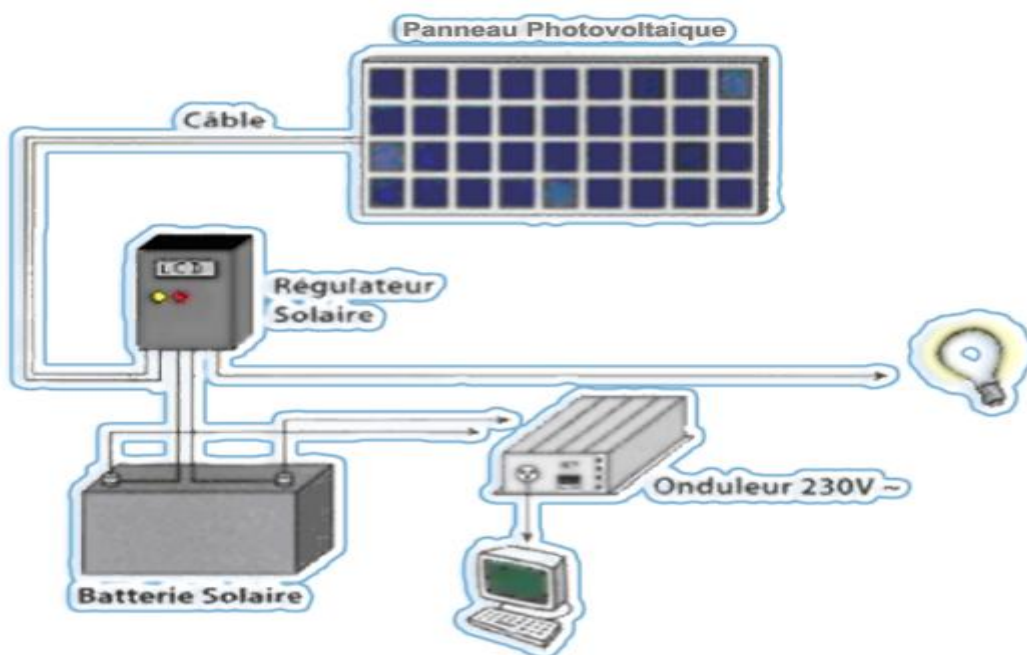


Figure I. 10 : système photovoltaïque autonome avec batterie

De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

I. 2. 3. 2. Les systèmes raccordés au réseau :

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans certains cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont

pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

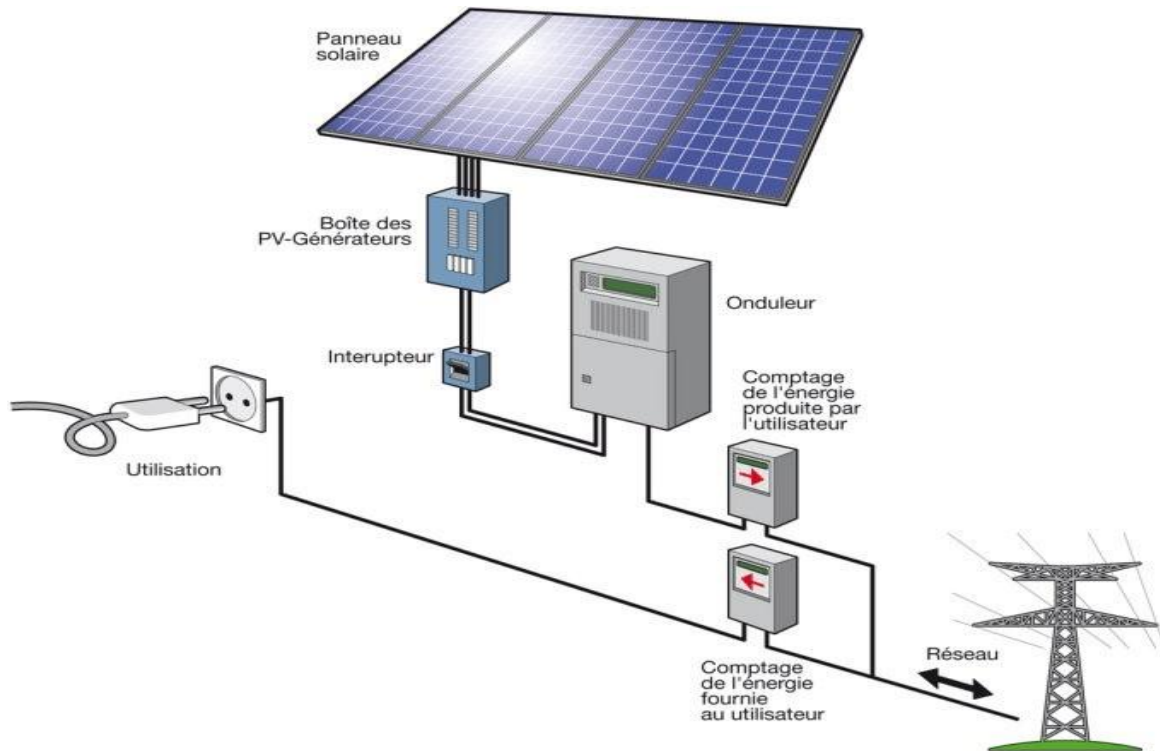


Figure I. 11 : système photovoltaïque relié au réseau

I. 2. 3. 3. Les systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si le budget est limité.

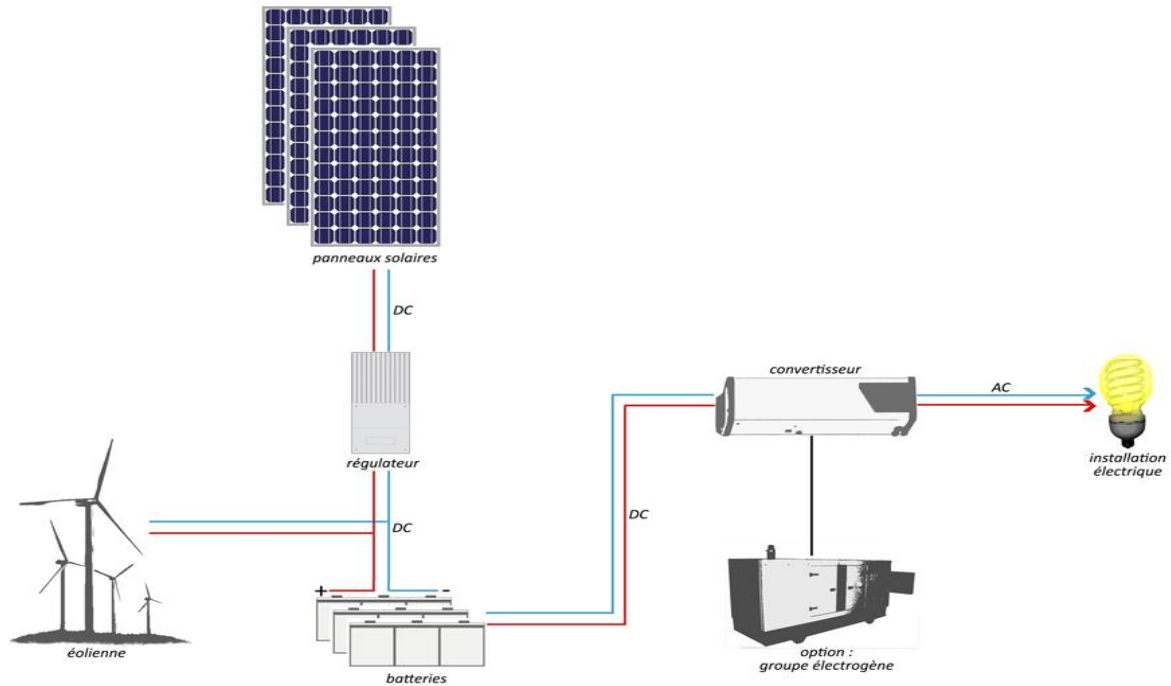


Figure I. 12 : système hybride (3 sources)

I. 2. 4. Les différentes applications des systèmes photovoltaïques:

Des milliers de systèmes PV sont utilisés dans le monde aujourd'hui dans diverses applications. En voici quelques exemples [5]:

I. 2. 4. 1. Les systèmes photovoltaïques pour le chalet et le domicile :

En général, les systèmes photovoltaïques sont une option économique pour les chalets et les domiciles situés dans des régions éloignées. Dans la plupart de ces régions, il est impossible de se relier au réseau électrique et, dans de nombreux cas, du combustible fossile coûteux est utilisé afin de produire de l'électricité. Si un domicile est relié au réseau, les systèmes photovoltaïques lui donneront la source autonome d'électricité dont il pourrait avoir besoin pendant une panne d'électricité.



Figure I. 13 : Systèmes photovoltaïques pour le chalet

I. 2. 4. 2. Les systèmes photovoltaïques pour les applications mobiles et récréatives :

Les utilisateurs de véhicules et de bateaux de plaisance ainsi que les membres d'expéditions peuvent aussi profiter du fonctionnement silencieux et sans pollution des systèmes photovoltaïques portatifs pour recharger des batteries et des piles.



Figure I. 14 : Systèmes photovoltaïques pour les applications mobiles

I. 2. 4. 3. Les systèmes photovoltaïques en agriculture :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés efficacement dans le monde entier afin de pomper de l'eau pour le bétail, les plantes ou les êtres humains. Étant donné que le besoin en eau est plus grand les jours chauds et ensoleillés, ces systèmes conviennent parfaitement aux applications de pompage. Ils fournissent également l'énergie de clôtures électriques dans les fermes.



Figure I. 15 : Systèmes photovoltaïques en agriculture

I. 2. 4. 4. Les systèmes photovoltaïques pour d'autres applications :

Les systèmes photovoltaïques peuvent être adaptés pour répondre à tout besoin, petit ou grand. Par exemple, les cellules photovoltaïques sont utilisées dans les calculatrices et les montres. Aussi, le matériel de télécommunication, les panneaux de construction routière, les feux de stationnement et les signaux d'avis aux navigateurs sont d'excellentes applications pour les systèmes photovoltaïques.



Figure I. 16 : Systèmes photovoltaïques pour d'autres applications

I. 2. 5. Systèmes photovoltaïques avantages et limites [5], [6]:

➤ Avantages :

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- ils sont de fonctionnement sûr, non polluants et silencieux;
- ils sont très fiables;
- ils n'exigent presque aucun entretien;
- ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales;
- ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité;
- ils vous donnent une autonomie accrue (fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité).

➤ Inconvénients :

Parmi les inconvénients et les limites pratiques des systèmes photovoltaïques on peut citer les suivantes :

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage. Si vous souhaitez utiliser l'énergie solaire à cette fin, considérez d'autres

solutions de recharge comme un chauffe-eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement.

- Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie photovoltaïque est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle. Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux, le choix d'un système photovoltaïque dépend souvent d'une décision personnelle axée sur le style de vie (tout comme le type de maison.....).

I. 3. Conclusion :

Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications.

L'usage à des fins divers de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution présentant un bon rapport coût-efficacité, réclamant peu d'entretien et digne de foi dans des régions où le réseau électrique n'est pas facilement accessible ou toujours fiable. La modélisation des différents composants d'un tel système fera l'objet du chapitre suivant.



Chapitre II

II.1. Introduction :

Après avoir étudié et cité les différents composants de notre système, nous procédons à la modélisation de ce dernier, ce qui nécessite un ensemble d'équations caractérisant chaque élément de notre système.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord une modélisation des différents composants de notre système (à commencer par le modèle du générateur photovoltaïque). Cette modélisation sera faite utilisant l'environnement (Matlab/Simulink).

II.2. Description du système à étudier

Le système à étudier est constitué de modules photovoltaïques, un convertisseur DC/DC (de type survolteur), ce dernier est commandé par un signal provenant du bloc MPPT, une batterie et un bloc de gestion reliée à une charge continue.

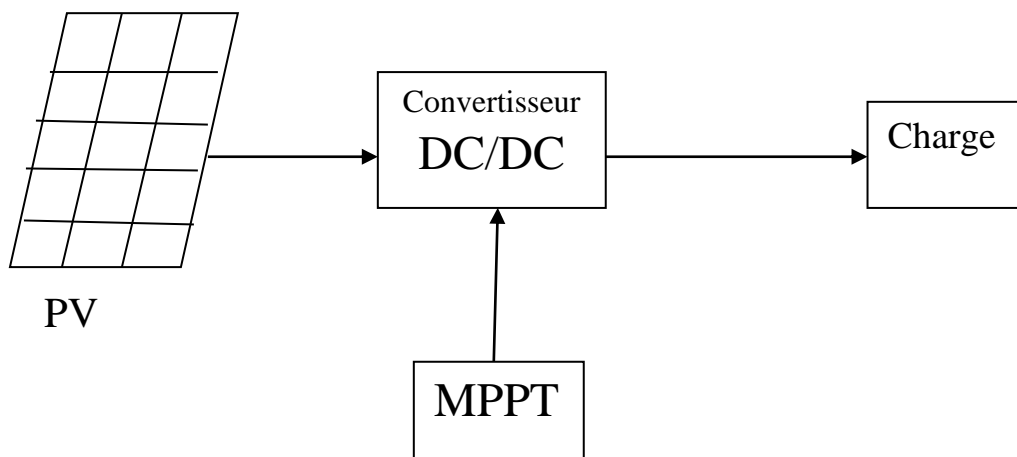


Figure.II.I. Schéma de système à étudier

- Les panneaux photovoltaïques : permettent l'alimentation de la charge
- Le convertisseur DC/DC : permet d'obtenir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par les modules photovoltaïques.

II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque :

Il existe de nombreux modèles mathématiques de générateur photovoltaïque, que l'on trouve dans la littérature qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque, parmi ces modèles nous citons : [16]

II.3.1. Le modèle idéaliste :

La photopile est un composant semi-conducteur (jonction p-n) qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode.

C'est le modèle le plus simplifié, dont le circuit équivalent est le suivant :

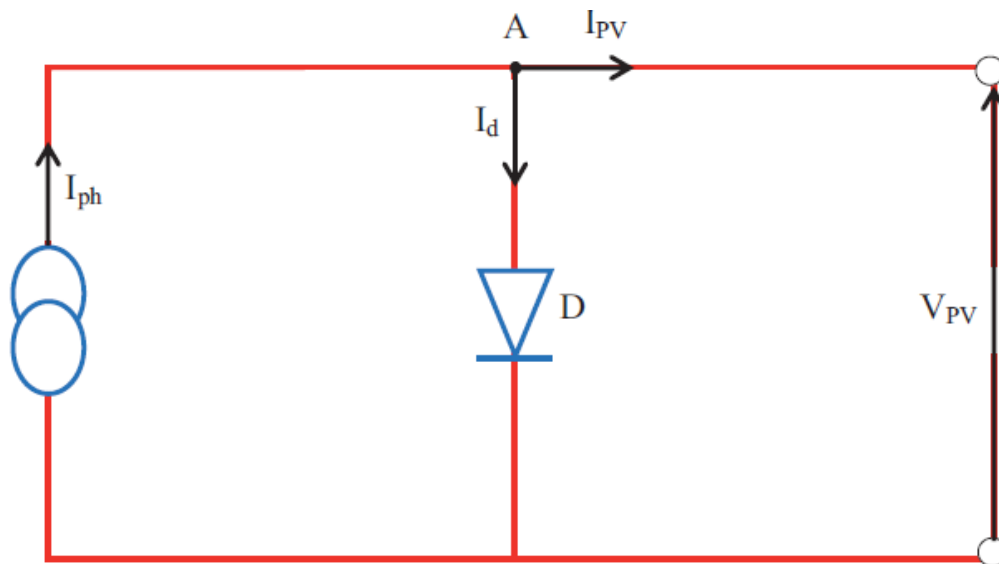


Figure II.2. Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire

L'équation caractéristique résultant de ce modèle idéaliste est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- I_{pv} : photo courant.
- I_d : courant de diode.
- I_0 : courant inverse de saturation de la diode.

- A : facteur d'idéalité de la diode, $A \in [1, 5]$.
- $K = 1,38. 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$: constante de Boltzmann.
- T : température absolue, $[T]=\text{K}$ (kelvin).
- I_{ph} : courant fournis par la cellule.
- V : tension fournis par la cellule.

II.3.2. modèle explicite :

Le modèle suivant est développé par Borowy et Salameh en (1996). Les formules pour calculer le point optimum de la tension et du courant sous conditions arbitraires sont montrées comme suit [25] :

$$I_m = I_{cc} \left[C_1 \exp\left(\frac{V_m}{C_2 \cdot V_{co}}\right) - 1 \right] + \Delta I \quad (\text{II.3})$$

I_{cc} : Le courant de court-circuit du module (A).

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

C_1 et C_2 sont des paramètres qui peuvent être calculés par l'équation (II.4) et (II.5) respectivement.

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}}\right) \exp\left(\frac{-V_{mpp}}{C_2 V_{co}}\right) \quad (\text{II.4})$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mpp}}{V_{co} - 1}}{\ln\left(\frac{1 - I_{mpp}}{I_{cc}}\right)} \quad (\text{II.5})$$

ΔI : est déterminé par la différence de température et l'irradiation solaire, avec l'équation suivante :

$$\Delta I = \alpha_{cc} \left(\frac{E}{E_{stc}}\right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{stc}} - 1\right) I_{cc, stc} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta T = T - T_{stc} \quad (\text{II.7})$$

T_{stc} : est la température aux conditions standards de fonctionnement.

La tension maximale V_m du module est déterminée par l'équation suivante [1,2,3]:

$$V_m = V_{mpp} \left[1 + 0.0539 \cdot \log\left(\frac{E}{E_{stc}}\right) \right] + \beta_{co} \Delta T \quad (\text{II.8})$$

Alors la puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par l'équation suivante

$$P_m = I_m V_m \quad (\text{II.9})$$

II.3.3. Le modèle à une diode: [16]

Pour tenir compte des chutes de tension dans la zone P et N, on doit ajouter, au modèle idéaliste, une résistance série R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_p , comme illustrer sur le schéma suivant :

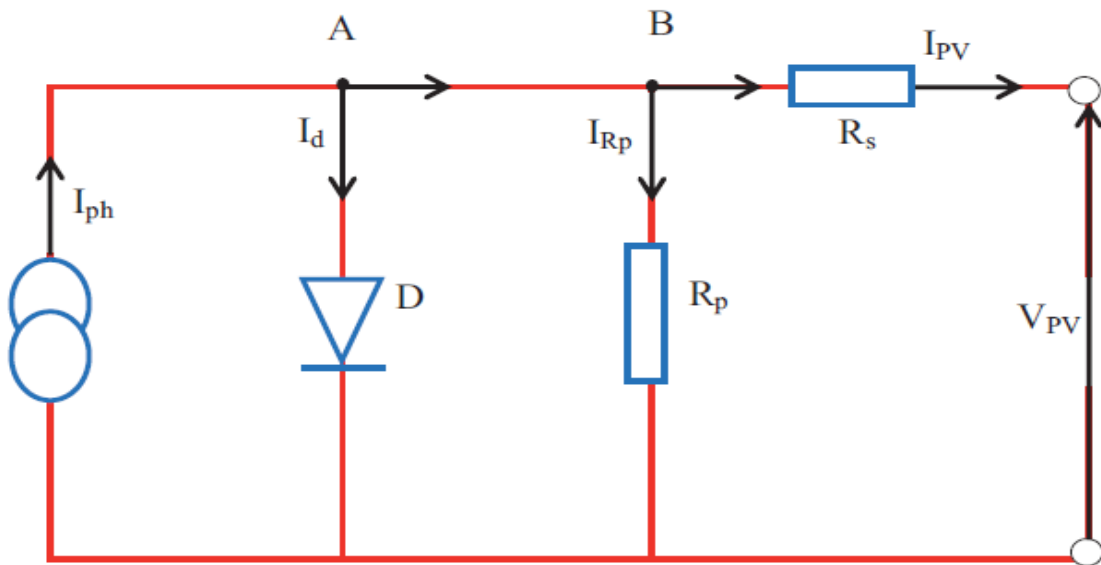


Figure II.3. Schéma équivalent du modèle à une diode.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$I_{ph} = P_1 E [1 + P_2 (E - E_{stc}) + P_3 (T - T_{stc})] \quad (\text{II.11})$$

P_1, P_2, P_3 : paramètres constants.

Le courant de la diode est donnée par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot N_s \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

I_s est le courant de saturation il est fortement dépendant de la température ; il est donné par :

$$I_s = P_4 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{KT}} \quad (\text{II.13})$$

Le courant dans la résistance parallèle est calculé par :

$$I_{rp} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II.14})$$

N_s : nombre de cellules en série dans un module.

q : la charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

E_g : énergie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

Le modèle à une diode est le modèle choisi pour le reste de nos simulations, vu qu'il est le plus utilisé. En raison de sa simplicité, il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).

II.4. Bloc Simulink du modèle à une diode

Le bloc réalisé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink est représenté sur figure (II.4). Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension ont été obtenues pour des conditions standards de fonctionnement (ensoleillement 1000W/m^2 et température 25°C). Les paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) sous les conditions standards de fonctionnement ($G_{stc}=1000 \text{W/m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$) sont fournis par le constructeur de panneaux photovoltaïque et énuméré dans le tableau II.1.

Puissance max du panneau P_{ppm}	80W
Courant au point de puissance max I_{mpp}	4.85A
Tension au point de puissance max V_{mpp}	17.5V
Courant de court-circuit I_{cc}	4.95A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	21.9V
Coefficient d'incrémentatation du courant	3.00mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension	-150mV/°C

Tableau II.1. Caractéristiques du panneau utilisé SUNTECH STPO80S-12/Bb

Afin de retrouver les caractéristiques principales de notre panneau photovoltaïque, nous avons créé le modèle mathématique cité précédemment (modèle à une diode) sous conditions STC avec l'environnement Matlab/Simulink.

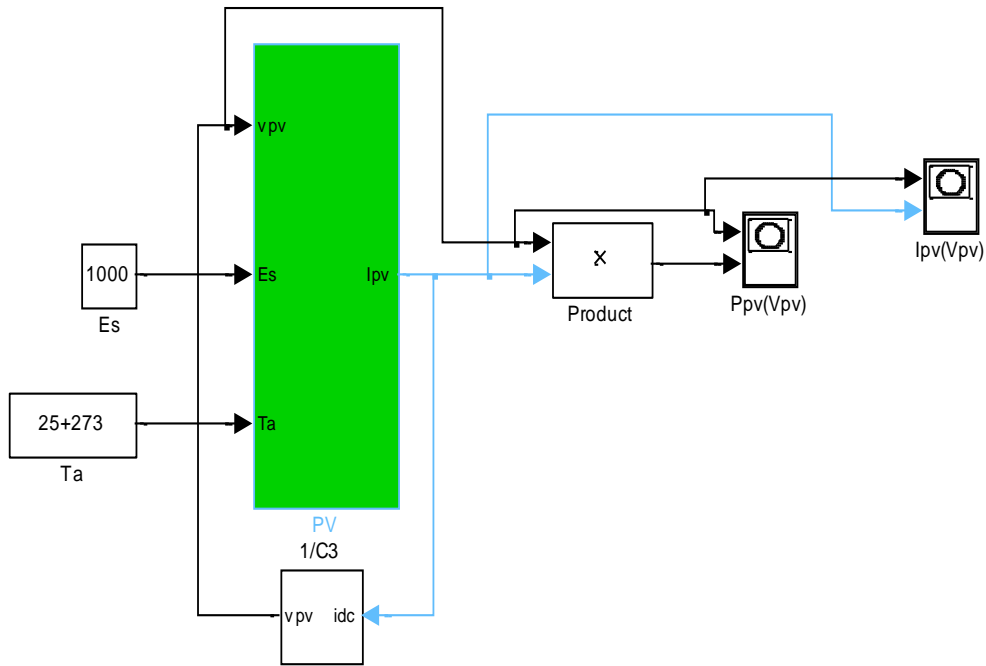


Figure II.4. Schéma bloc du modèle à une diode.

II.4.1. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC

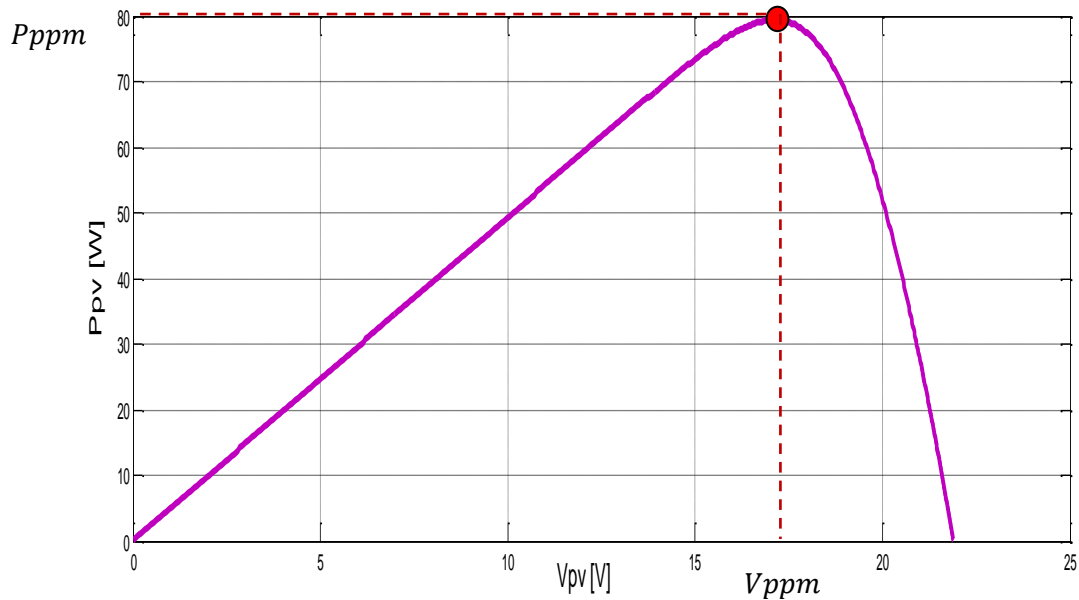


Figure II.5. Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $E_{stc}=1000w/m^2, T_{stc}=25^{\circ}C$

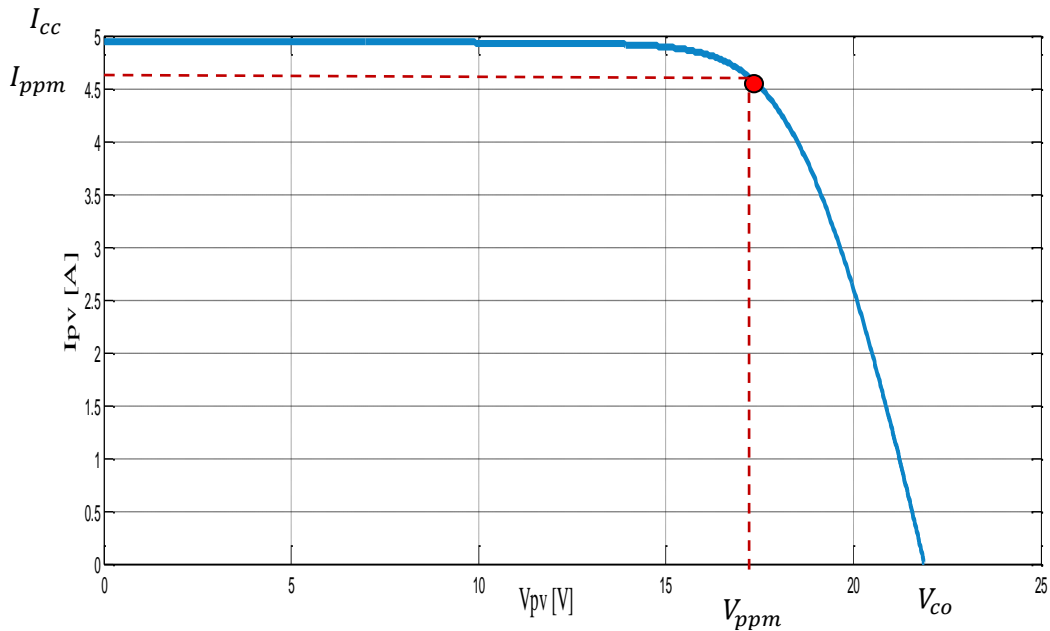


Figure II.6. Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $E_{stc}=1000\text{w/m}^2, T_{stc}=25^\circ\text{C}$

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode. Les résultats des caractéristiques Puissance-Tension et Courant- Tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Les valeurs I_{cc} , I_{ppm} , V_{co} , V_{ppm} ainsi que P_{ppm} sont les valeurs exactes du Tableau II.1 donné précédemment. Nous allons passer dans ce qui suit à l'étude de l'influence des paramètres d'entrées : Température et Ensoleillement.

A. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Dans ce qui suit, les simulations ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ($E_s=300, 500, 700, 1000\text{w/m}^2$) en maintenant la température constante $T_a=25^\circ\text{C}$. Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant/tension Figure II.7. ainsi que pour la caractéristique puissance/tension Figure II.8.

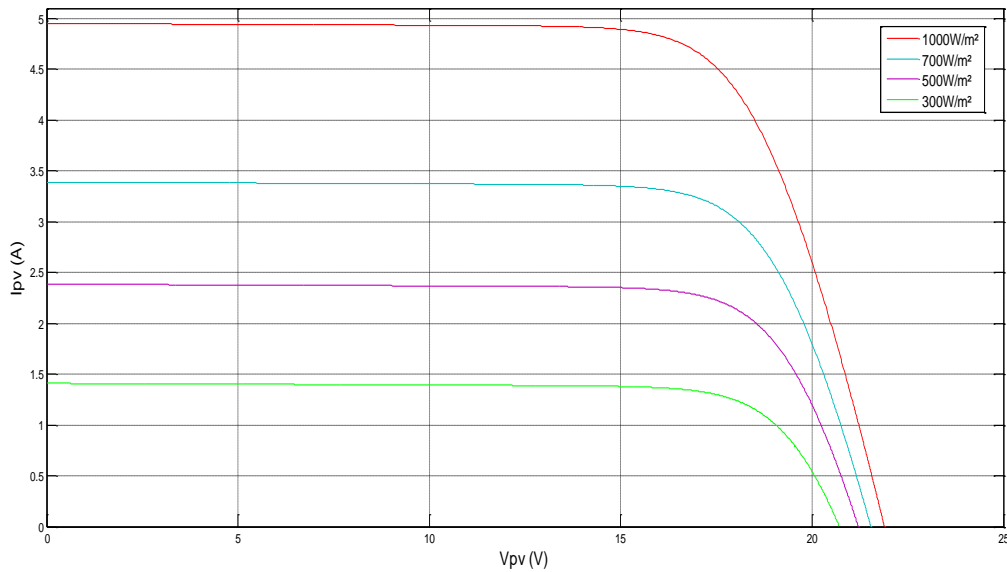


Figure II.7. Influence de l'insolation sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

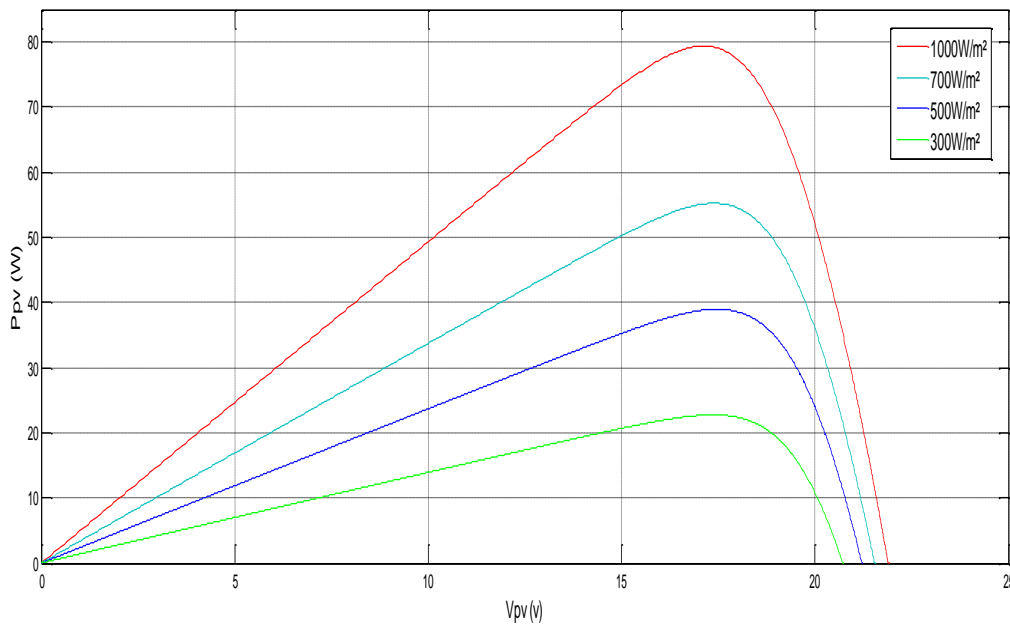


Figure II.8. Influence de l'insolation sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- Le courant de circuit-ouvert I_{co} et la puissance varie proportionnellement à l'insolation E_s .
- La tension à vide V_{oc} varie peu avec l'insolation pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

B. influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Nous allons effectuer d'autres test, mais cette fois ci en faisant varier la valeur de la température ambiante ($T_a=25, 40, 55, 70$). Nous obtenons les courbes suivantes (II.9 et II.10) :

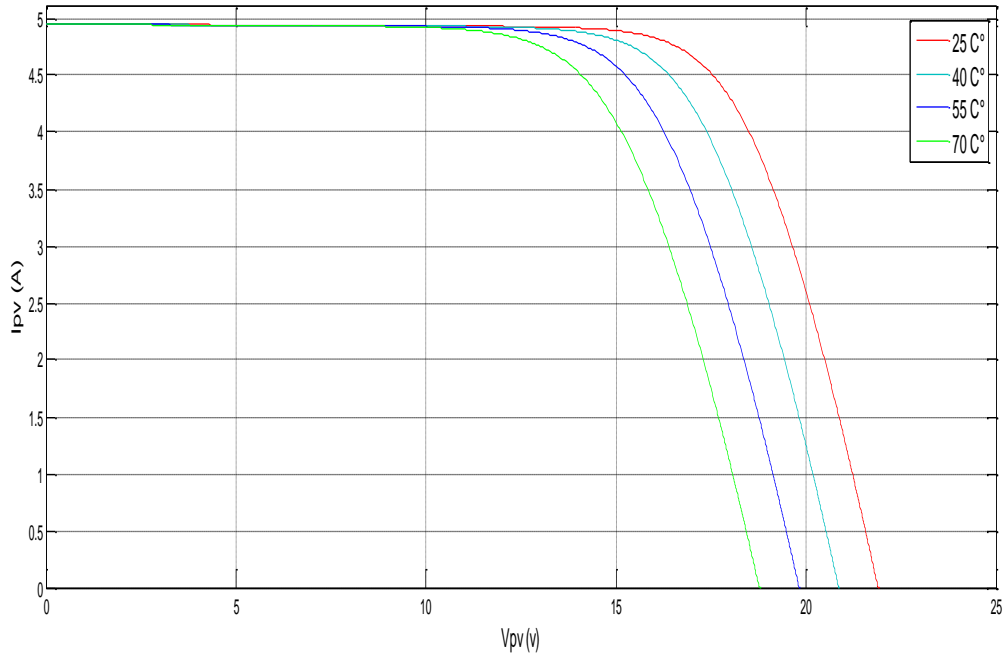


Figure.II.9. Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

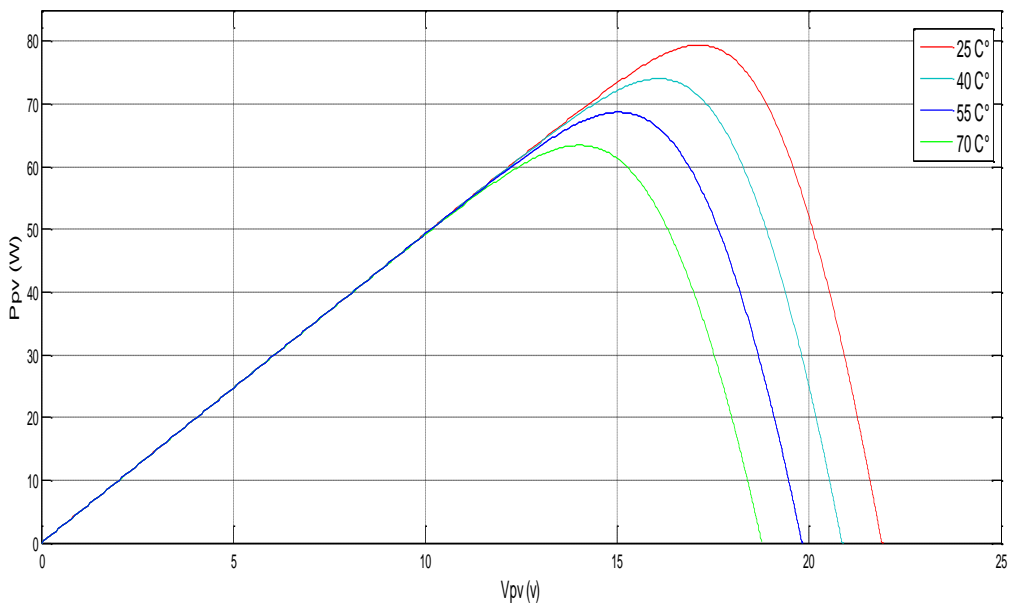


Figure.II.10. Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- En faisant varier la température de 25°C à 70°C, nous remarquons que le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance P_{pv} est légèrement dépendant de la température.
- En revanche, la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue lorsque la température augmente.

II.5. Modélisation du hacheur survolteur (BOOST) :

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure (II.11) [18]

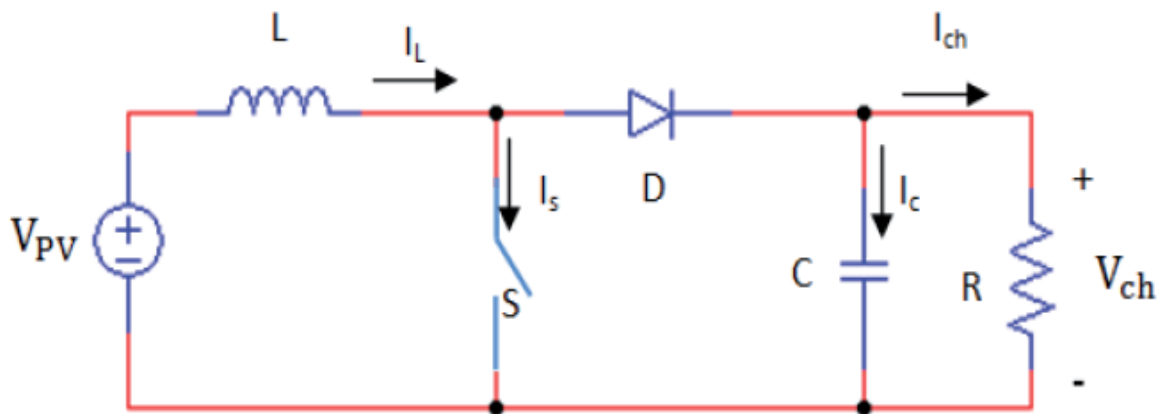


Figure II.11. circuit électrique du hacheur <<Boost>>[18]

Ce diapositive électronique de puissance qui est un convertisseur continue-continue nous permet d'adapter la tension au borne du panneau photovoltaïque a partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale [22].

D'après la figure (II.11) du hacheur survolteur :

Lorsque l'interrupteur (S) est fermé :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.16}$$

$$0 = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \tag{II.17}$$

Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert:

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{ch} \quad (\text{II.18})$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.19})$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $u = 0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique. En valeurs moyennes, la tension de sortie est on fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation (II.17). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α [18].

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1-u) V_{ch} \quad (\text{II.20})$$

$$(1-u) I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.21})$$

Pour le régime permanent on a :

$$\frac{dV_{ch}}{dt} = 0 \text{ Et } \frac{dI_L}{dt} = 0$$

Donc on a :

$$V_{ch} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad (\text{II.22})$$

$$I_{ch} = (1-\alpha) I_L \quad (\text{II.23})$$

Avec : $u = \alpha$

. II.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation du système étudié. Nous avons commencé par le module photovoltaïque, cité trois modèles mathématiques (modèle à une diode, modèle à deux diodes et le modèle explicite). Puis nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques. Pour finaliser nous avons enchainés par la modélisation du convertisseur DC/DC. Dans ce qui suit nous allons aborder les techniques classiques de maximisation de puissance d'un générateur photovoltaïque.



Chapitre III

I-Introduction

Lors de la conception des systèmes photovoltaïques, on essaie souvent d'obtenir le maximum d'énergie solaire afin de répondre aux besoins énergétiques des divers récepteurs utilisés, un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension, en effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température, ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximal. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale [17]. Ces techniques connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale

II-Adaptation de l'énergie photovoltaïque

Comme nous l'avons vu, un générateur PV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. La production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le générateur PV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge, la technique adoptée classiquement consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure 1. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible. [19]

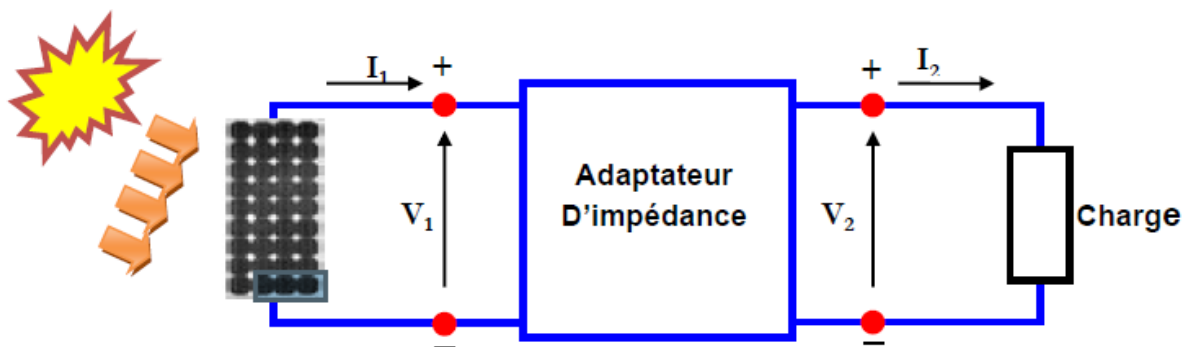


Figure III.1: Etage d'adaptation d'un générateur PV – charge

III-La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracker, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens.[20]

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [21]

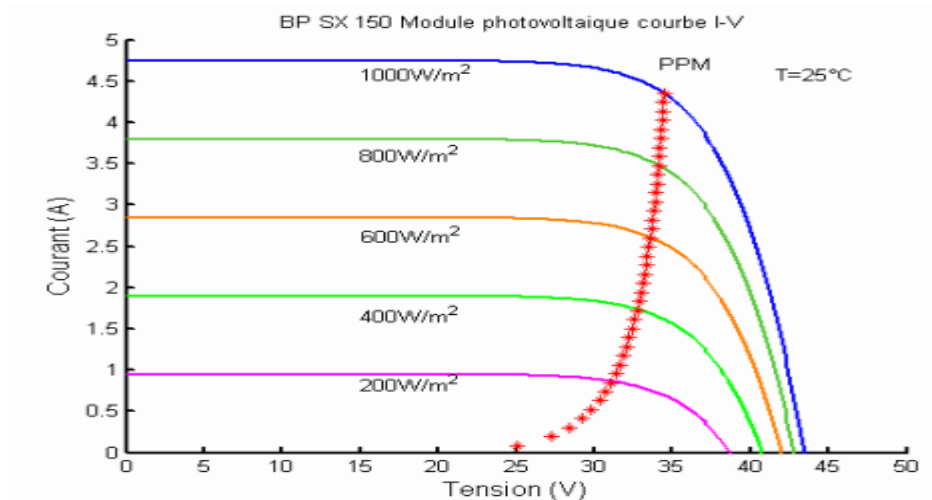


Figure III.2: La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM.

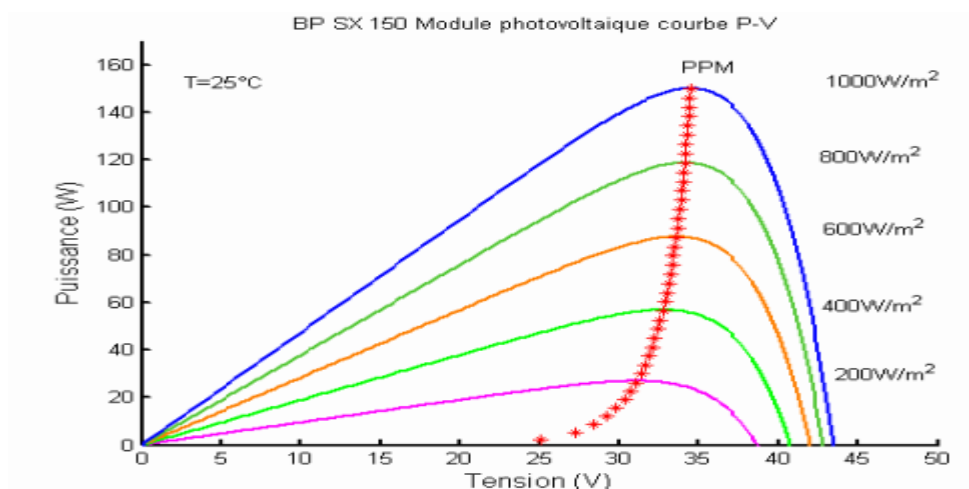


Figure III.3: La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM.

IV-Les commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [21, 23]

IV-1-Méthode de perturbation et d'observation (PO)

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 variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. [24]

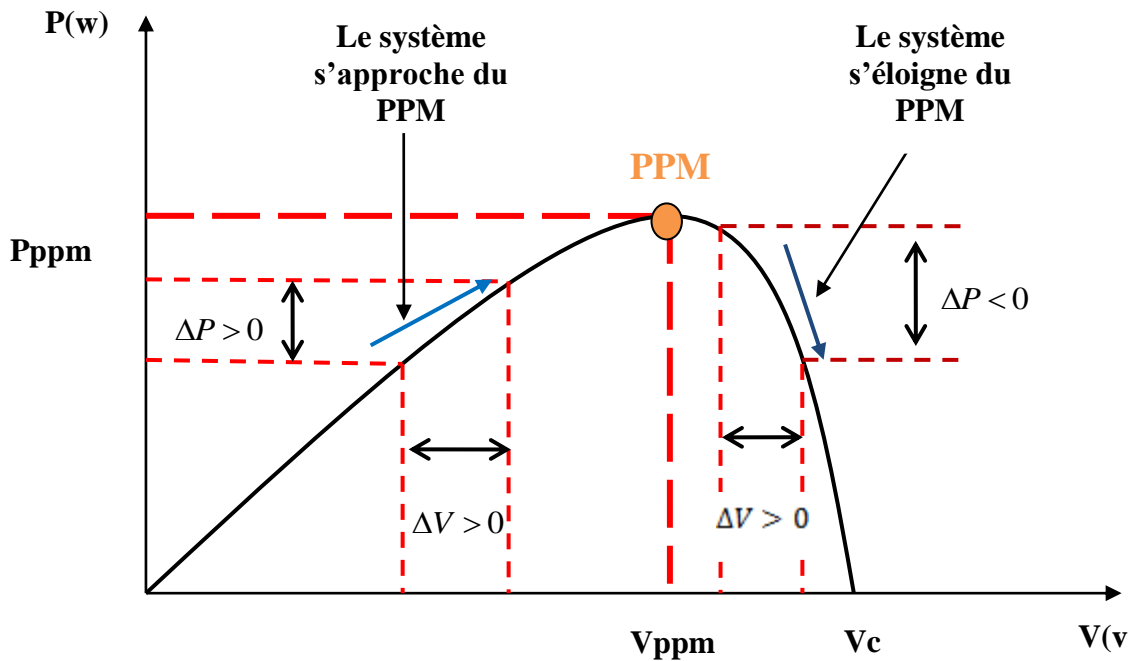


Figure III.4 : Principe de fonctionnement de la méthode P&O

La figure (III-5) représente l'algorithme de la méthode P&O.

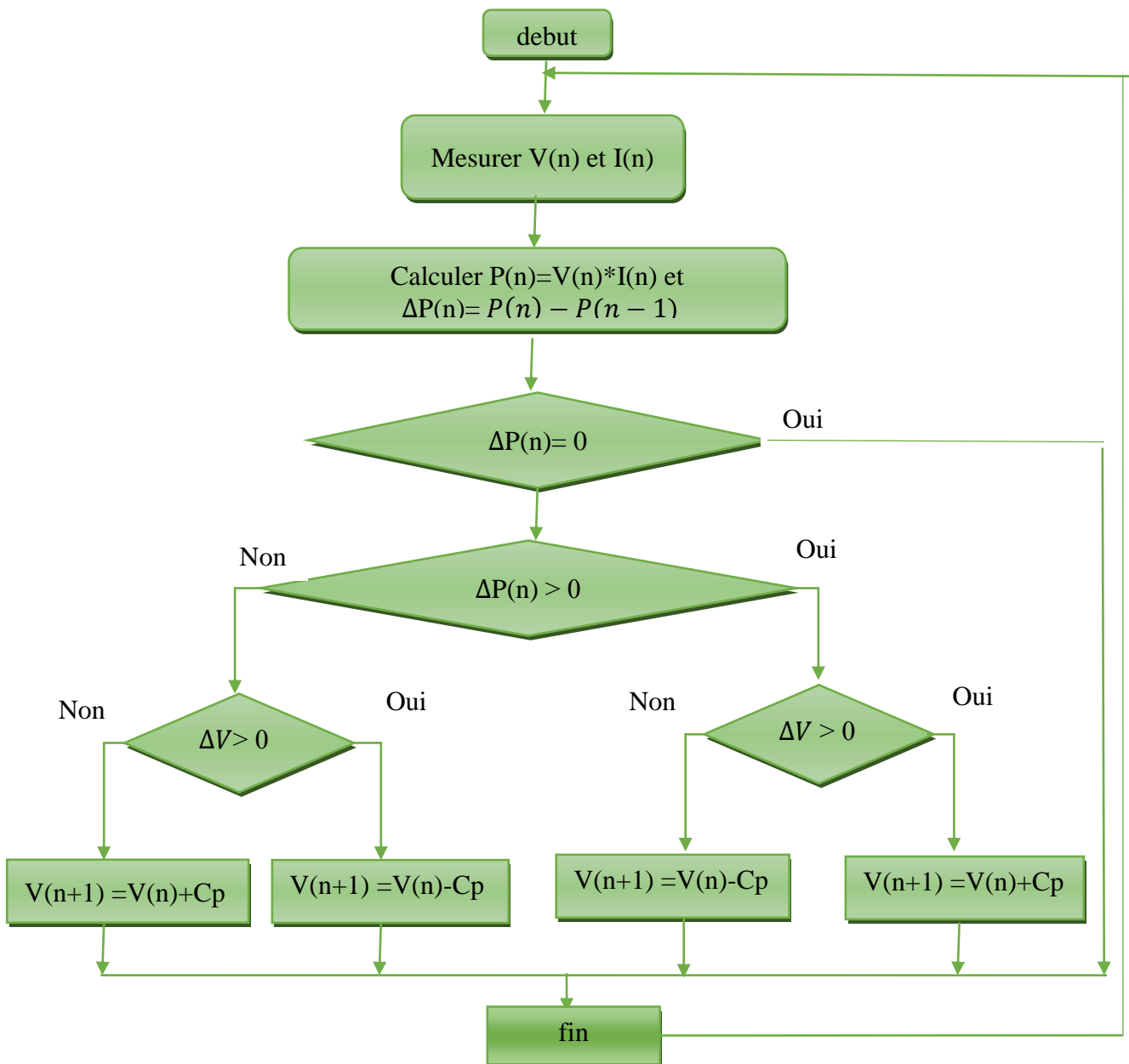


Figure III.5 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation

IV-2-Méthode de l'Incrément de conductance (INC)

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. [25]

La dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI

Chapitre III : Maximisation de puissance d'un générateur photovoltaïque

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite.[18]

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = IV \quad (III - 1)$$

La dérivé partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (III - 2)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (III - 3)$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{I}{V}$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

- ✓ Si $\frac{dP}{dV} > 0$, le point de fonctionnement est sur la gauche de PPM
- ✓ Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement est sur PPM
- ✓ Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

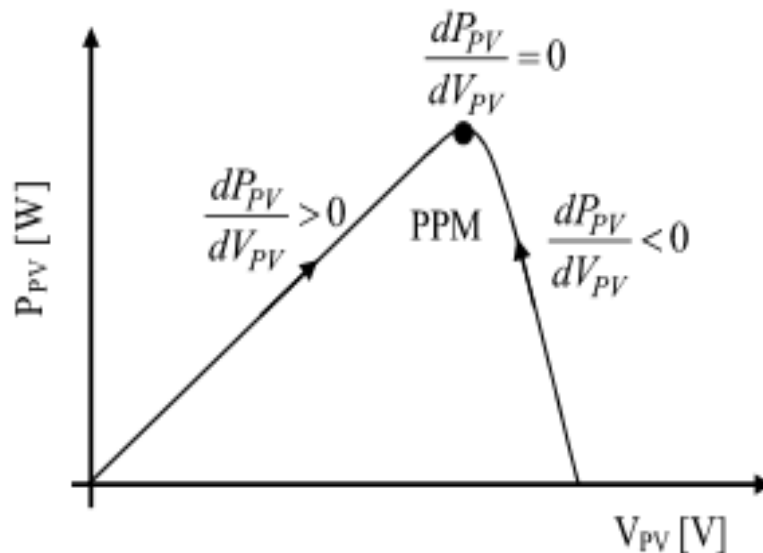


Figure III.6: Principe de fonctionnement de l'algorithme INC

L'organigramme de cette méthode est illustré sur la figure III-7

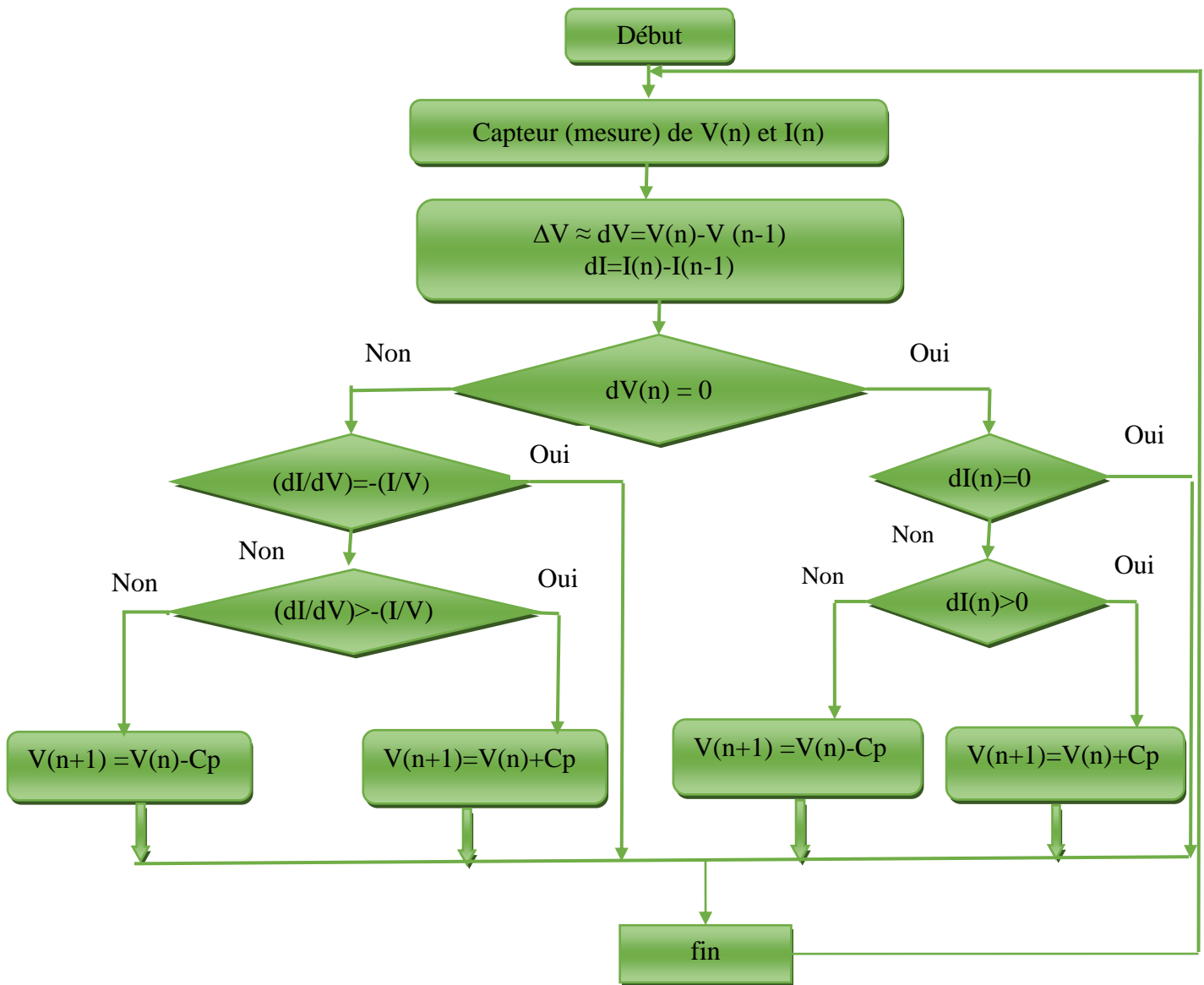


Figure III.7 : Organigramme de la méthode de l'incrément de conductance

V- Simulation et interprétation des résultats

Nous avons simulé le modèle mathématique du module photovoltaïque en intégrant un étage d'adaptation (convertisseur DC/DC) commandé par une technique MPPT (P&O et INC).

Les différents résultats de simulation sont représentés sur les figures suivantes :

V-1-Caractéristiques sous les conditions STC ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W/m}^2$) :

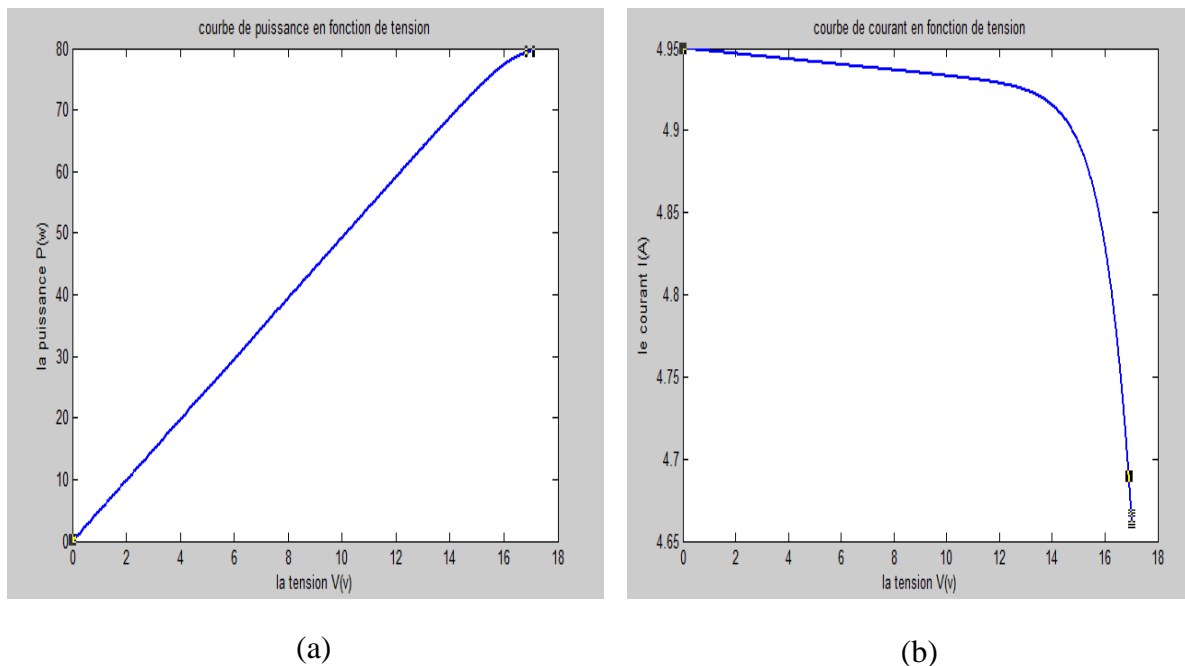


Figure III.8 : Caractéristiques du panneau pour les conditions STC par la méthode PO

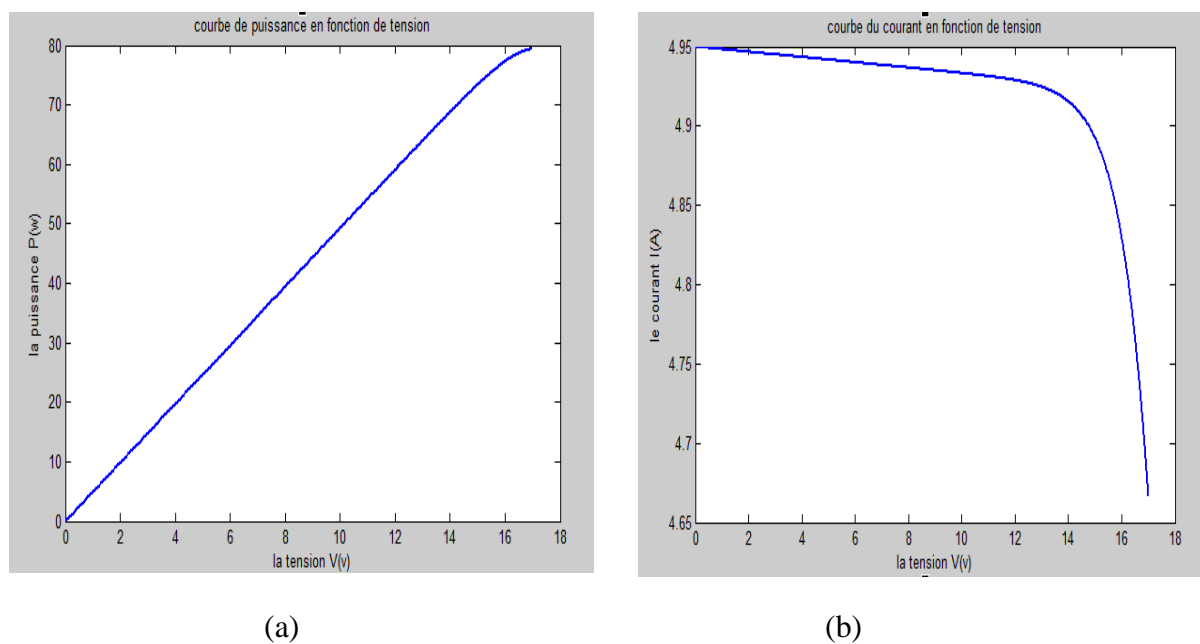


Figure III.9: Caractéristiques du panneau pour les conditions STC par la méthode INC

V-2-Caractéristiques sous ensoleillement variable

Nous proposons d'évaluer le comportement des deux algorithmes étudié précédemment lors du changement des paramètres météorologiques, en appliquant un ensoleillement variable à température constante.

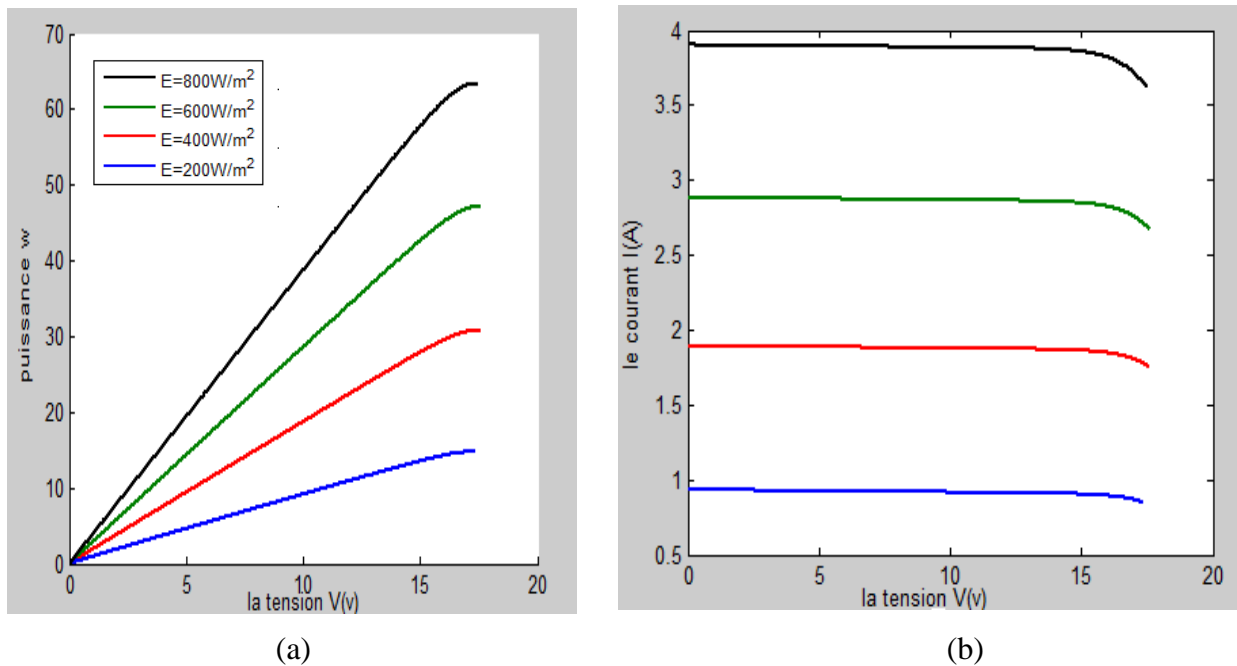


Figure III.10 : Influence de l'éclairement en utilisant la méthode P&O

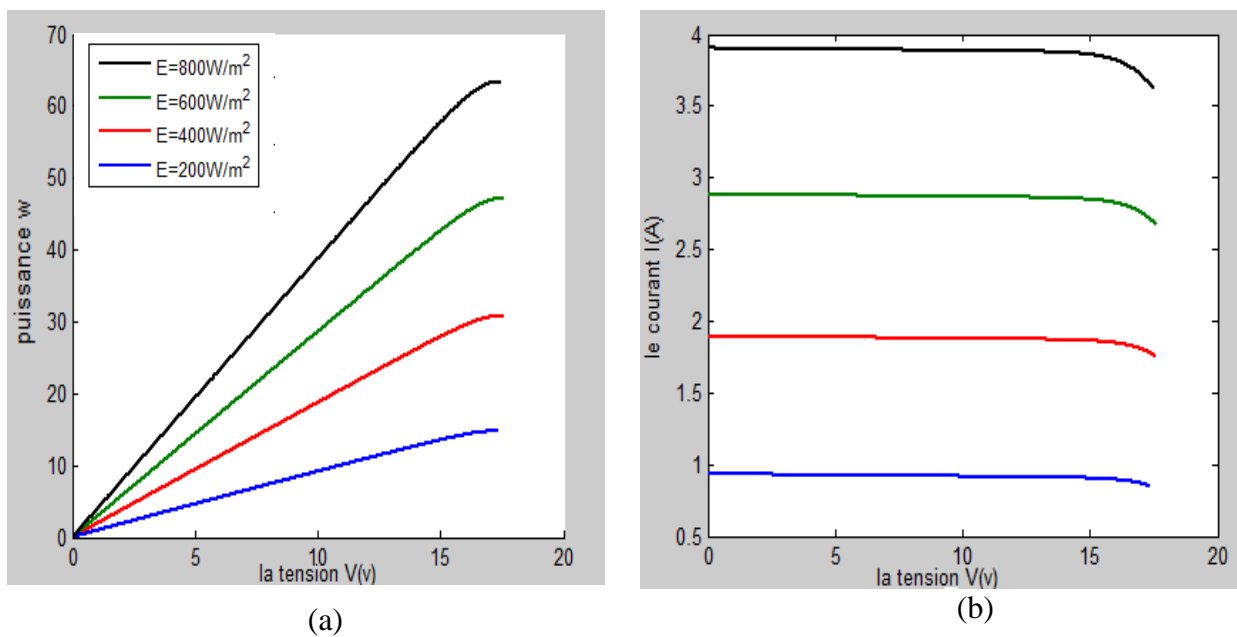


Figure III.11 : Influence de l'éclairement en utilisant la méthode INC

V-3-Caractéristiquessous température variable

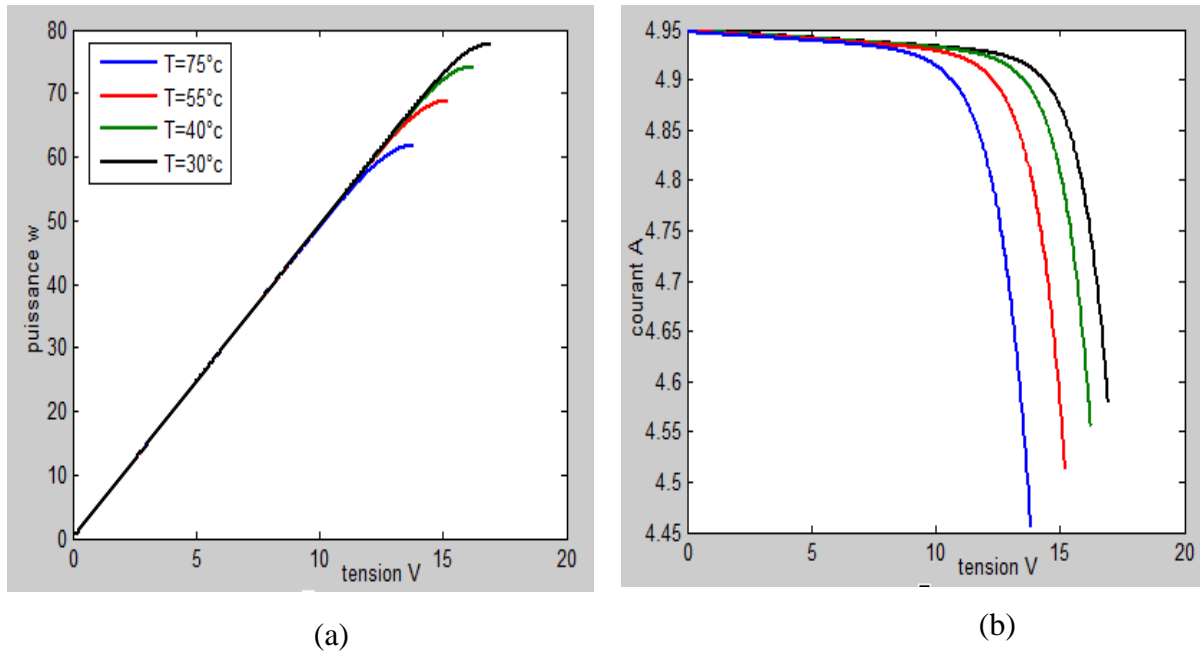


Figure III.12 : Influence de la température en utilisant la méthode P&O

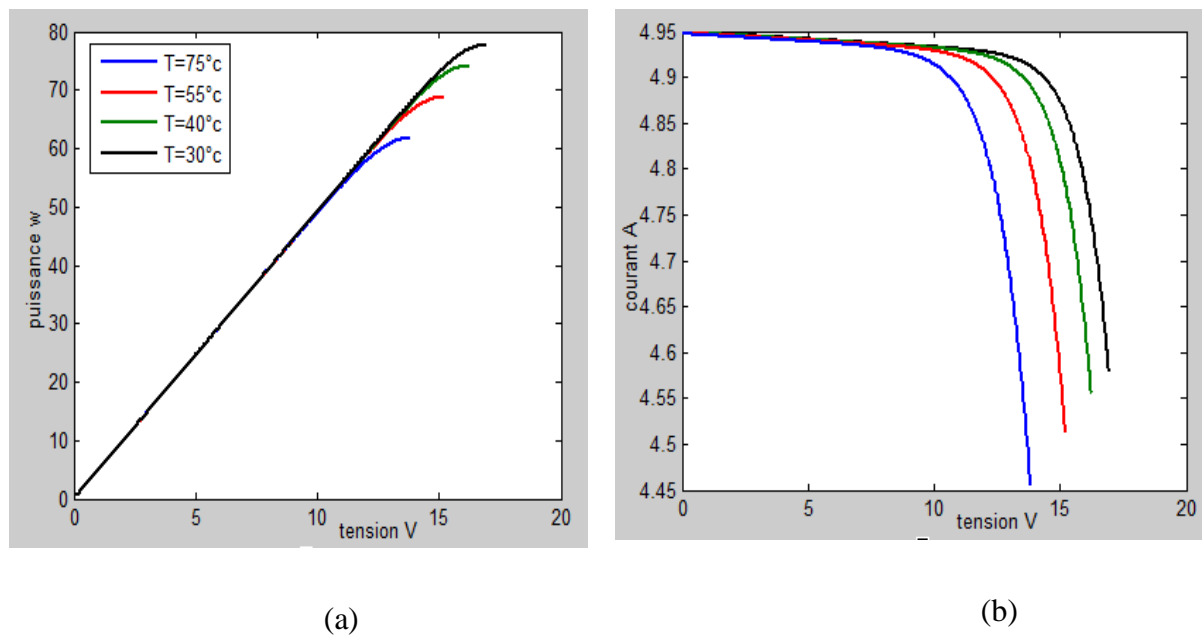


Figure III.13: Influence de la température en utilisant la méthode INC

Selon les figures précédentes en remarque que le PPM est atteint à chaque fois d'où l'efficacité des algorithmes.

V-4-Comparaison entre les deux méthodes :

V-4-1-Pour un faible ensoleillement

Dans cet essai on applique une température de $T=20\text{ °C}$ et $E=250\text{ W/m}^2$

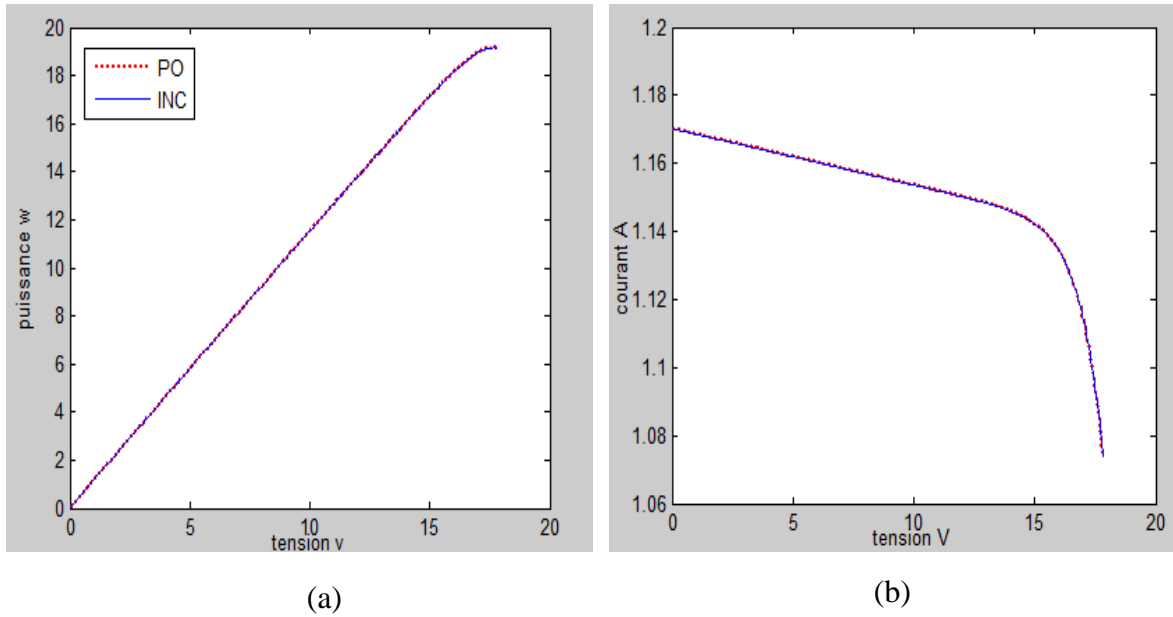


Figure III.14 : Performance pour un faible ensoleillement

V-4-2-Pour un moyen ensoleillement

Dans cet essai on applique une température de $T=26\text{ °C}$ et $E=550\text{ W/m}^2$

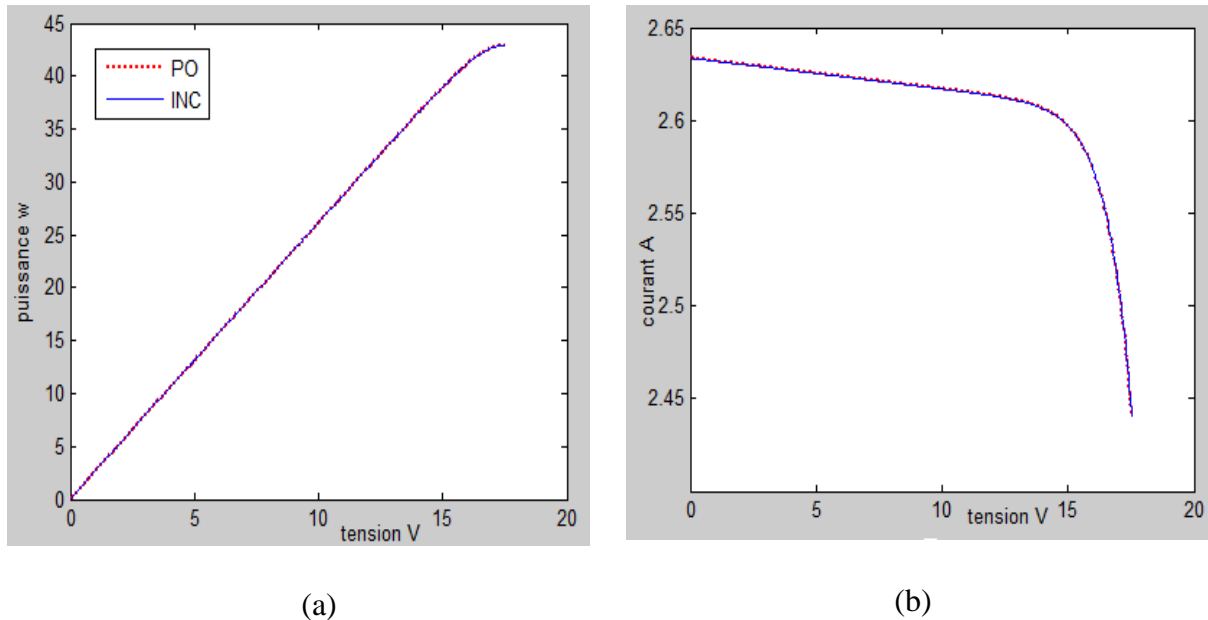


Figure III.15: Performance pour un moyen ensoleillement

V-4-3-Pour un fort ensoleillement

Dans cet essai on applique une température de $T=31\text{ °C}$ et $E=850\text{ W/m}^2$

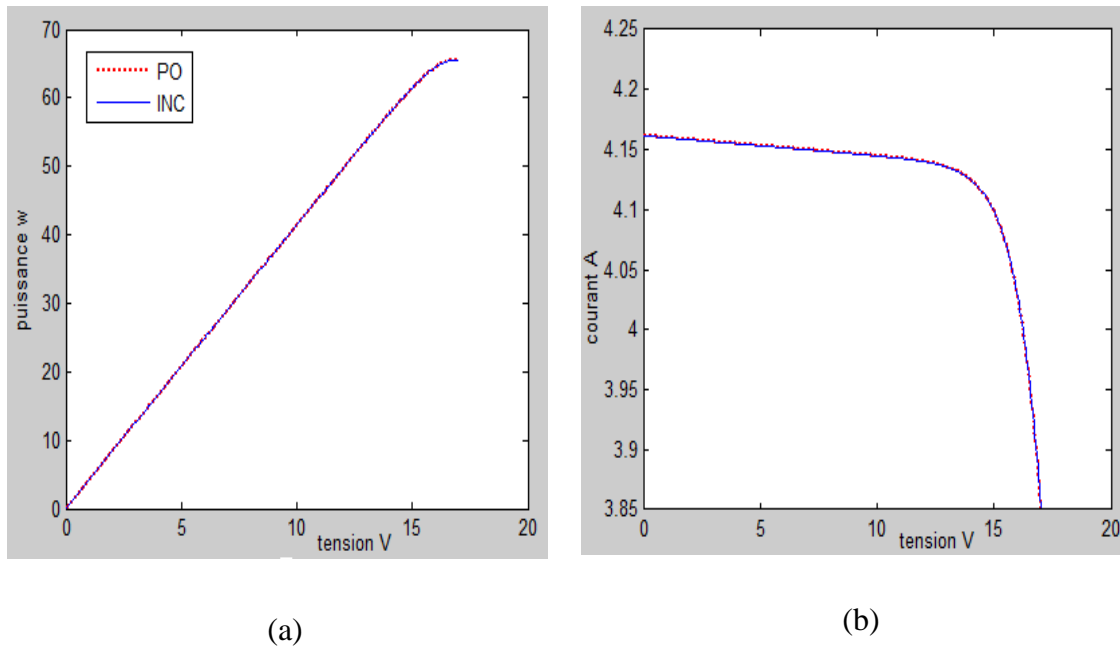


Figure III.16 : Performance pour un fort ensoleillement

V-4- Puissance en fonction du temps

V-4-1- Sous les conditions STC

Sous les conditions STC on a obtenu les résultats de simulation représentée sur la figure (III-17):

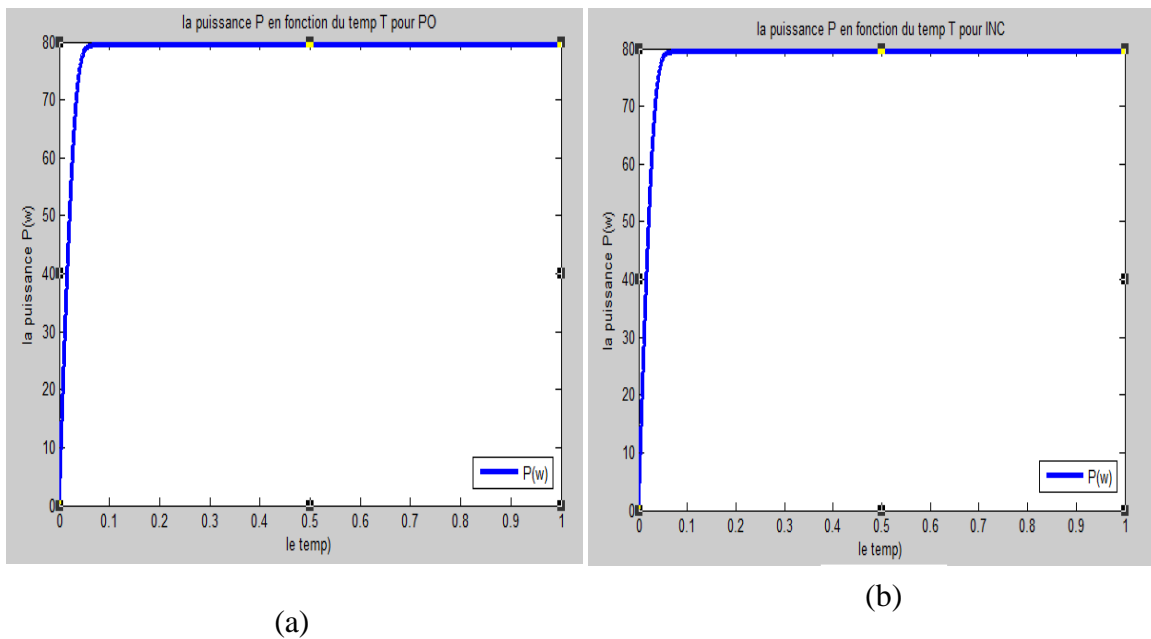


Figure III.17: La puissance en fonction du temps sous les conditions STC

V-4-2- Changement brusque d'ensoleillement

On applique un changement brusque d'ensoleillement à $t=3s$ de $1000W/m^2$ à $400 W/m^2$ on aura :

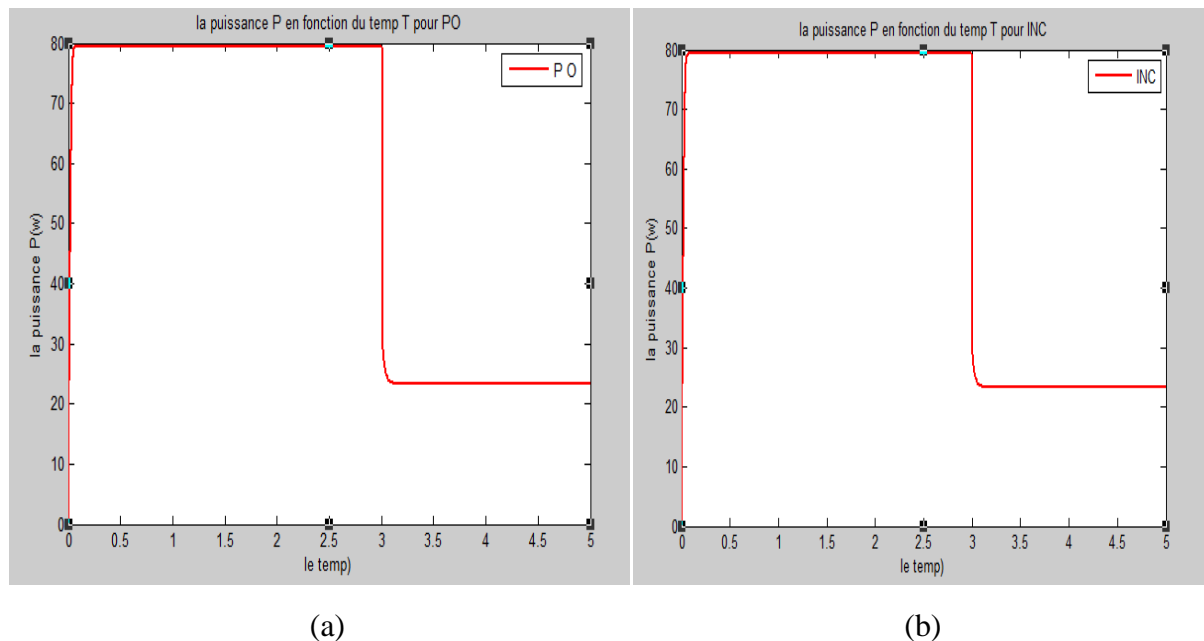


Figure III.18 : La puissance en fonction du temps sous un changement brusque

Les figures précédentes démontrent que la méthode perturbation & observation est largement utilisée dans la recherche du point de puissance maximale parce que sa structure est simple, elle ne requiert que quelques mesures de paramètres, et elle est efficace dans le cas où l'éclairement est faible, ou dans le cas où les conditions atmosphériques sont constantes ou lentement variables.

En outre, la méthode de l'incrément de conductance, est plus complexe mais elle est plus efficace comparée à la méthode perturbation & observation pour un fort éclairement, ou pour un changement brusque des conditions atmosphériques.

VI- Conclusion :

Dans ce chapitre, qui est réservé à la maximisation de puissance d'un générateur photovoltaïque nous avons présenté les principales caractéristiques d'un générateur PV ainsi que la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale sous les différentes conditions de fonctionnement.

On a étudié quelques méthodes MPPT comme la méthode de perturbation et observation et la méthode d'incrément de conductance. Les méthodes étudiées donnent des résultats presque similaires avec un avantage de la INC dans les moments bien ensoleillés.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation. L'objectif de ce travail est l'étude de quelques techniques classiques de poursuite de point de puissance maximale. vail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV (SUNTECH STPO80S-12/Bb).

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes photovoltaïques (principes et fonctionnement).

Dans un deuxième temps, on a présenté les différents modèles électriques caractérisant les cellules photovoltaïques, comme tous les systèmes physiques, la modélisation d'un système photovoltaïque conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système. L'objectif de cette étape est consisté donc à obtenir par simulation, les caractéristiques électriques et le comportement d'un système photovoltaïque sur une interface de simulation utilisant le MATLAB Simulink.

Finalement, On a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations reliant les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur. Par la suite, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « P&O et INC ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances

Conclusion générale

du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m².

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

L'inconvénient de l'algorithme de la méthode INC est la complexité accrue une fois comparée à l'algorithme P&O. Ceci augmente le temps de calcul de l'algorithme malgré que les résultats obtenus montrent que cette méthode n'oscille autour du point de puissance maximale une fois qu'il l'atteint. Une étude comparative basée sur l'efficacité de la poursuite du point de puissance entre les deux méthodes montre quelles sont presque équivalentes avec un léger avantage de INC pendant les forts ensoleillements.

Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspective nous proposons le développement de notre système pour des puissances assez élevée en utilisant les deux méthodes « P&O et INC » Ainsi, l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous pour la commande du convertisseur.

Listes des figures

Figure I. 1 : Structure de production d'électricité en 2012	03
Figure I. 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV	05
Figure I. 3 : les différentes technologies des cellules photovoltaïques	06
Figure I. 4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	08
Figure I. 5: schéma équivalent simplifié	09
Figure I. 6 : la courbe caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule solaire photovoltaïque	10
Figure I. 7 : cellules ou modules photovoltaïques en série.....	11
Figure I. 8 : cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.....	12
Figure I. 9 : Installations photovoltaïques	12
Figure I. 10 : système photovoltaïque autonome avec batterie	14
Figure I. 11 : système photovoltaïque relié au réseau.....	15
Figure I. 12 : système hybride (3 sources)	16
Figure I. 13 : Systèmes photovoltaïques pour le chalet	16
Figure I. 14 : Systèmes photovoltaïques pour les applications mobiles	17
Figure I. 15 : Systèmes photovoltaïques en agriculture	17
Figure I. 16 : Systèmes photovoltaïques pour d'autres applications	18
Figure.II.I. Shéma de système	19
Figure II.2. Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire	20
Figure II.3. Schéma équivalent du modèle à une diode	22
Figure II.4. Schéma bloc du modèle à une diode	24
Figure II.5. Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{stc}=1000w/m^2$, $T_{stc}=25^{\circ}C$	24
Figure II.6. Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{stc}=1000w/m^2$, $T_{stc}=25^{\circ}C$	25

Liste des figures

Figure II.7. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	26
Figure II.8. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	26
Figure.II.9. Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	27
Figure.II.10. Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	27
Figure II.11. Circuit électrique du hacheur <<Boost>>	28
Figure III.1. Etage d'adaptation d'un générateur PV – charge.....	30
Figure III.2. La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM.....	31
Figure III.3. La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM.....	31
Figure III.4. Principe de fonctionnement de la méthode P&O.....	32
Figure III.5. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation.....	33
Figure III.6. Principe de fonctionnement de l'algorithme INC.....	34
Figure III.7. Organigramme de la méthode de l'incrément de conductance.....	35
Figure III.8. Caractéristiques du panneau pour les conditions STC par la méthode PO.....	39
Figure III.9. Caractéristiques du panneau pour les conditions STC par la méthode INC.....	39
Figure III.10. Influence de l'éclairement en utilisant la méthode P&O.....	37
Figure III.11. Influence de l'éclairement en utilisant la méthode INC.....	37
Figure III.12. Influence de la température en utilisant la méthode P&O.....	38
Figure III.13. Influence de la température en utilisant la méthode INC.....	38
Figure III.14. Performance pour un faible ensoleillement.....	39
Figure III.15. Performance pour un moyen ensoleillement.....	39
Figure III.16. Performance pour un fort ensoleillement.....	40
Figure III.17. La puissance en fonction du temps sous les conditions STC.....	40
Figure III.18. La puissance en fonction du temps sous un changement brusque.....	41

Bibliographie

- [1] : P.R.Bauquis ; Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050. Ecole doctorale, Fréjus, Mars 2003.
- [2] : H. Reeves ; Mal de Terre, science ouverte, éditions de seuil, mars 2003.
- [3] : M. Ouled Salem, « Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2010.
- [4] : A. Labouret-Michel Villosz, "Energie solaire photovoltaïque", édition Dunod, Paris, 2006.
- [5] : S. Gustav, énergie renouvelable, Ndangane, 2007.
- [6] : P. Cumunel, Braun.J-P, Labouret. A, 'cellules solaires', édition dunod Paris 2001.
- [7] : C. Lerouge, Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis, Science physique, 2006.
- [8] : J. Labbe « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolés », thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 21 décembre 2006.
- [9] : J. Bernard, énergie solaire, calculs et optimisation, édition 2004.
- [10] : R. Issad. « Etude de contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque ». "Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2007-2008.
- [11] : F. Djaloud «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, université d'Ourgla, promotion 2012.
- [12] : www.greenpeace.ca
- [13] : J. Royar, T. Djiako, Eric Schiller Bocar sada Sy, Le pompage photovoltaïque, Direction de Eric Schiller.
- [14]: S. Aissou, M. Zinet « Identification et Caractérisation d'un système photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2012
- [15] : M. Aline, « Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intègre » Thèse institut polytechnique de Grenoble, 2009.
- [16] : L. Bun, Etude, Détection et localisation de Défauts pour un système photovoltaïque, thèse Doctorat, Université de Grenoble, Décembre 2011.
- [17]: M. Zehner. Virtual assistants - market survey of PV design and simulation software. Photon International 4(1). 31-40, (2001).
- [18] : B. Djamil «optimisation d'un système d'énergie PV application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.

Bibliographie

[19] : A. Maroun Msaed, « Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intègre » Thèse institut polytechnique de Grenoble, 2009.

[20]: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/14128>.

[21] : ADEME, "Guide de spécifications techniques relatives à la protection des personnes et biens - Générateurs photovoltaïques raccordés au réseau," ADEME, 2006.

[22]: "BP solar module," Available:

<http://www.bpsolar.fr/solaire/panneau/panneau%20solaire.php>

[23]: H. E. Suryanto, S. R. Wenham and M. A. Green, "Shadow tolerance of modules incorporating integral bypass diode solar cells," Solar Cells, vol. 19, pp. 109- 122, 1986.

[24]: N. D. Kaushika and N. K. Gautam, "Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 18, pp. 127- 134, 2003.

[25]: D. Picault, "Reduction of Mismatch Losses in Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Alternative Topologies," Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELAB), Université de Grenoble, 2010.