

République Algérienne Populaire et Démocratique

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderahmane Mira de Béjaïa

Faculté de Technologie



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique

Option : Commande des Systèmes Electriques

Thème

Maximisation de l'Energie d'un Système Photovoltaïque

Présenté par :

M^{lle} AOUMER Amel

M^{lle} HARFOUCHE Kenza

Encadré par :

M^{me} S. BELAID

M^{me} S.IDJDARENE



Année Universitaire 2014-2015

REMERCIEMENT

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Nous exprimons nos vifs remerciements en particulier à nos promotrices Mme S.BELAID et Mme S.IDJDARENE, qui ont accepté de nous encadrer et pour leurs orientations et soutiens.

Nous remercions profondément tous les enseignants du département électrotechnique, qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus.

Nous tenons à remercier le président et les membres de jury, qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail aux personnes auxquelles je dois tout après Allah, mes très chères parents, ils ont sacrifiés tout pour nous, juste pour nous voir réussir, qu'Allah vous bénisse, vous apporte de santé et vous garde pour nous.

A ma très chère grand-mère, mes oncles et mes tantes.

A mes très chères sœurs

A mes chères cousins et cousines

A mes petits et grands cousins et cousines

A toute la famille Aoumer et Kachebi

A mes très chères amies

Vanessa, Kahina et Déhia

A tous mes amis(es) de la fac

A mon amie et mon binôme, HARFOUCHE KENZA ainsi que toute sa famille.

A tous mes camarades et amis(es) de la promo d'électrotechnique 2015

Et à tous ceux que je connais

Amel

DEDICACE

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.
A ma grande mère. A mes chers sœurs : dounya, Sílía, Yassmine, Ikram.*

A mes oncles et mes tantes

A chaque cousins et cousines

A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.

A mon binôme et sa famille

A toute la famille Harfouche

A mes camarades de la promo d'électrotechnique 2015

Et à tous ceux que je connais

Kenza

A	Facteur de qualité de la diode
AG	Algorithme génétique
B_j	Besoin journalier
EDC_{min}	Etat de charge minimal des batteries
EDC_{max}	Etat de charge maximale des batteries
C	Célérité (m/s)
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
C_p	Coefficient de pertes
E_{ph}	Quantité d'énergie (KW)
E_j	Rayonnement moyen mensuel annuel (kWh/m ² /j)
G	Ensoleillement (W/m ²)
GPV	Générateur photovoltaïque
h	Constante de Planck
I	Courant (A)
I_{cc}	Courant de court circuit (A)
I_d	Courant de la diode
I_L	Courant de l'inductance
I_{mpp}	Courant du point de puissance maximal
I_o	Courant de saturation de la diode
I_{opt}	Courant optimale (A)
I_{ph}	Courant photon (A)
I_{pv}	Courant photovoltaïque (A)
I_s	Courant de sortie du convertisseur
K	Constante de Boltzman 1,38 ⁻²³ J/K
K_I	Coefficient de proportionnalité du courant
K_v	Coefficient de proportionnalité du courant de tension
MPPT	Maximum power point tracking
N_s	Nombre de cellules branchées en série
N_p	Nombre de cellules branchées en parallèle
P_d	Profondeur de décharge des batteries (%)
P_{max}	Puissance maximale (W)

P_{opt}	Puissance optimale (W)
P_{out}	Puissance de sortie du convertisseur (W)
P_{pv}	Puissance photovoltaïque (W)
P_{pv-opt}	Puissance photovoltaïque optimale (W)
P_{pv,tot}	Puissance photovoltaïque totale requise par l'installation (W)
P&O	Perturbation et observation
PPM	Point de puissance maximale
PWM	Pulse width modulation
PV	Photovoltaïque
R_s	Résistance série du générateur photovoltaïque
R_{pv}	Résistance à la sortie du panneau photovoltaïque
S_{eff}	Surface effective du panneau photovoltaïque (m ²)
S_T	Surface totale du panneau comprenant l'infrastructure.
T	Température
T_{stc}	Température dans les conditions standards
U	Tension (V)
U_{bat}	Tension de la batterie (V)
V_{co}	Tension de circuit ouvert (V)
V_d	Tension aux bornes de diode
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximale
V_s	Tension à la sortie du panneau photovoltaïque
V_{oc}	Tension de circuit ouvert
V_{opt}	Tension optimale
V_{pv}	Tension photovoltaïque (V)
V_{pv-opt}	Tension photovoltaïque optimale (V)
α_{cc}	Coefficient d'incrémentatation du courant I _{cc}
λ	Longueur d'onde (m)
η_{pv}	Rendement du panneau photovoltaïque
η_{pv max}	Rendement maximal du panneau photovoltaïque
η_{conv}	Rendement du convertisseur
η_{MPPT}	Rendement de la commande MPPT
η_{TOTAL}	Rendement total de la chaîne de conversion

ΔT_c	Variation de la température
ΔI_{pv}	variation du courant par rapport à l'insolation et à la température
ΔV_{pv}	Variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température

LISTE DES FIGURES

N°	Désignation	Page
Chapitre I		
I.1	Composants d'un système photovoltaïque autonome	6
I.2	Système photovoltaïque connecté au réseau	7
I.3	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
I.4	Association série des cellules photovoltaïques	10
I.5	Caractéristique résultante d'un groupement N_s cellules en série	11
I.6	Association parallèle des cellules photovoltaïques	11
I.7	Caractéristique résultante d'un groupement de N_p cellules en parallèle	11
I.8	Connexion directe GPV-charge via une diode anti-retour	12
I.9	Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque	13
I.10	Système photovoltaïque autonome avec convertisseur d'adaptation MPPT	13
I.11	Connexion GPV-charge via un hacheur central	15
I.12	Hacheur rangée	15
I.13	Hacheur modulaire parallèle	15
I.14	Hacheur modulaire série	16
Chapitre II		
II.1	Modèle électrique idéale d'un panneau photovoltaïque	20
II.2	Modèle électrique à une diode (simplifié)	21
II.3	Modèle électrique à deux diodes sans résistance shunt d'une cellule PV	22
II.4	Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt	22
II.5	Schéma de simulation global du panneau photovoltaïque avec variation de G et T	25
II.6	Courbes P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau pour divers ensoleillements à $T=25^\circ\text{C}$	26
II.7	Courbes I_{pv} (V_{pv}) d'un panneau pour divers ensoleillements à $T=25^\circ\text{C}$	26
II.8	Courbes P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau pour divers températures à $G=1000\text{W/m}^2$	27
II.9	Courbes I_{pv} (V_{pv}) d'un panneau pour divers ensoleillements à $G=1000\text{W/m}^2$	27
II.10	Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur	28
II.11	Schémas équivalents du hacheur dévolteur	29
II.12	Schéma de principe d'un convertisseur Boost	30
II.13	Schémas équivalents du hacheur survolteur	31
II.14	Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type Boost)	32
II.15	Modèle R-C de la batterie	34
Chapitre III		
III.1	Organigramme de la méthode P&O avec variation de la tension	36
III.2	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation à contrôle direct	37
III.3	Positionnement du point de fonctionnement	38
III.4	Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode incrément de conductance	39
III.5	Principe de la commande à logique floue	42
Chapitre IV		
IV.1	Profil de consommation de la charge	46
IV.2	Schéma bloc du système global	47
IV.3	Allure de la tension photovoltaïque	48
IV.3.a	Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom1)	48
IV.3.b	Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom2)	48
IV.4	Allure de la puissance photovoltaïque	49
IV.4.a	Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom1)	49
IV.4.b	Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom2)	49
IV.5	Allure du courant photovoltaïque	50
IV.5.a	Zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime transitoire (zoom1)	50
IV.5.b	Zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent (zoom2)	50
IV.6	Allure de la puissance photovoltaïque (G variable)	51
IV.6.a	Zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent.	51

IV.7	Allure de la tension photovoltaïque (G variable)	51
IV.8	Allure du courant photovoltaïque (G variable)	52
IV.8.a	Zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent	52
IV.9	Allure de la puissance photo voltaïque (T variable)	52
IV.9.a	Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent	53
IV.10	Allure du courant photovoltaïque (T variable)	53
IV.10.a	Zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent	53
IV.11	Allure de la tension photovoltaïque (T variable)	54
IV.11.a	Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent	54
IV.12	Système de supervision proposé pour la gestion d'énergie dans le système PV	56
IV.13	Ensoleillement pendant 24h	58
IV.14	Température pendant 24h	58
IV.15	Puissance demandée par la charge	58
IV.16	Puissance photovoltaïque	58
IV.17	Courant photovoltaïque	59
IV.18	Puissance de la batterie	59
IV.19	Tension de la batterie	60
IV.20	Courant de la batterie	60
IV.21	Etat de la charge de la batterie	61
IV.22	Tension du bus continu	61
IV.23	Puissance disponible	62
IV.24	P_{pv} , P_{batt} et P_{disp}	62

LISTE DES TABLEAUX

N°	Désignation	Page
I.1	Comparaison des différentes topologies	16
II.1	Schéma de simulation global du panneau photovoltaïque avec variation de G et T	25
IV.1	Estimation des consommations d'appareils disponible dans le cabanon	44
IV.2	Les consommations électriques du cabanon	45
IV.3	Tableau de comparaison entre les deux algorithmes P&O et IncCon	55

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1 Introduction	3
I.2 Ressource solaire	3
I.3 Gisement solaire	3
I.3.1 Les différents types du rayonnement solaire	4
I.3.1.1 Le rayonnement direct	4
I.3.1.2 Le rayonnement diffus	4
I.3.1.3 Le rayonnement global	4
I.4 Energie photovoltaïque	4
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	5
I.5.1 Avantages	5
I.5.2 Inconvénients	5
I.6 Les différents types de systèmes photovoltaïques	6
I.6.1 Installations électriques photovoltaïques autonomes	6
I.6.2 Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau	6
I.6.3 Installation électrique hybride	7
I.6.3.1 Système hybride à base d'énergies renouvelables primaire seulement	7
I.6.3.2 Système hybride à base d'une ou plusieurs énergies renouvelables avec unité de secours	7
I.6.3.3 Système hybride à base d'énergie renouvelable avec un système de stockage	8
I.7 Description du générateur photovoltaïque	8
I.7.1 Cellule photovoltaïque	8
I.7.2 Le module (panneau) photovoltaïque	10
I.7.2.1 Groupement en série	10
I.7.2.2 Groupement en parallèle	11
I.8 Système de stockage	12
I.9 Etude de l'adaptation de l'énergie photovoltaïque	12
I.10 Les système de conversion	13
I.10.1 Le convertisseur continu-continu	14
I.10.2 Le convertisseur continu- alternatif	14
I.11 Les différentes connexions des GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu	14

I.11.1 Hacheur central	14
I.11.2 Hacheur rangée	15
I.11.3 Hacheur modulaire parallèle	15
I.11.4 Hacheur modulaire série	16
I.12 Recherche du point de puissance maximale	17
I.13 Rendement d'une chaîne de conversion photovoltaïque	17
I.14 Conclusion	19

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque et simulation du GPV

II.1 Introduction	20
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	20
II.2.1 Différents modèles de panneau photovoltaïque	20
II.2.1.1 Model idéal	20
II.2.1.2 Modèle à une diode (simplifié)	21
II.2.1.3 Modèle à deux diodes sans résistance shunt	21
II.2.1.4 Modèle à deux diodes avec résistance shunt	22
II.2.1.5 Modèle implicite	23
II.3 Simulation du panneau photovoltaïque	25
II.3.1 Influence de l'ensoleillement	25
II.3.2 Influence de la température	27
II.4 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	28
II.4.1 Hacheur dévolteur	28
II.4.2 Hacheur survolteur	30
II.4.3 Modélisation du hacheur survolteur	32
II.5 La charge	33
II.6 Modélisation du stockage	33
II.7 Conclusion	34

Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale du GPV

III.1 Introduction	35
III.2 Méthode de Perturbation et Observation (P&O)	35
III.3 La commande MPPT "Incrément de conductance" (IncCond)	37
III.4 Commandes MPPT basées sur les relations de proportionnalité	40
III.4.1 Référence en fonction de V_{oc}	40
III.4.2 Référence en fonction du courant de court-circuit I_{cc}	41
III.5 Méthode à base de la logique floue	41

III.6 Méthodes à base de réseau de neurones artificiels	42
III.7 Méthodes à base d'algorithme génétique (AG)	43
III.8 Conclusion	43
Chapitre IV : Application des différentes MPPT sur le système global	
IV.1 Introduction	44
IV.2 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque	44
IV.2.1 Consommation de la charge	44
IV.2.2 Synthèse des consommations	45
IV.2.3 Dimensionnement du module photovoltaïque	45
IV.2.4 Autonomie du système	45
IV.2.5 Profil de consommation	46
IV.3 Etude du système global avec les algorithmes MPPT	47
IV.3.1 Fonctionnement dans des conditions constantes (température et ensoleillement) ...	47
IV.3.2 Fonctionnement pour un ensoleillement variable et une température fixée à 25°C.	51
IV.3.3 Fonctionnement pour une température variable et un ensoleillement fixé à G=1000W/m ²	52
IV.4 Gestion et conversion de l'énergie au sein du système	55
IV.5 Simulation du système globale	57
IV.6 Conclusion	63
Conclusion générale	64

Introduction générale

Avec l'arrivée du nouveau millénaire, les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme. En effet, l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques, laissent présager une augmentation considérable de la consommation en énergie. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore [1].

Une première piste à cette crise annoncée étant la diminution de la consommation énergétique, c'est ainsi que sont apparus sur le marché, ces dernières années, des appareils de faible consommation de classe A ou A+ (réfrigérateurs, laves linge, ampoules basse consommation, ...). En parallèle, il faut développer de nouvelles sources d'énergie propres et renouvelables. A ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables [1]. Dans notre travail, on s'intéresse à l'énergie provenant du soleil, qui fera l'objet de ce mémoire.

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

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 ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières de courant et de tension. 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.

Dans ce présent travail, nous présenterons une description de la chaîne de conversion photovoltaïque étudiée ainsi que les différentes parties le constituant. Les différentes associations entre les panneaux photovoltaïques et les étages d'adaptations, ainsi que les différentes méthodes d'extraction du maximum de puissance.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre sera consacré pour l'étude des éléments du système photovoltaïque, la modélisation mathématique des éléments le constituant et les différentes caractéristiques du générateur PV après simulation.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de quelques MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

Pour finir, une étude comparative sera faite entre deux algorithmes, à savoir, l'algorithme P&O et l'algorithme IncCond, suivi par une gestion d'énergie afin d'assurer l'équilibre entre les puissances dans le système.

I.1 Introduction

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés. Cependant les inconvénients majeurs de cette énergie sont le coût de l'installation qui reste encore élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas du générateur photovoltaïque. Pour surmonter ces problèmes, deux voies sont souvent suivies :

- Augmenter le rendement énergétique en adoptant des technologies de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques.
- Maximiser la puissance délivrée par le générateur.

Le présent travail est basé sur cette dernière voie.

I.2 Ressource solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi : [2]

- 6.4% dans la bande des ultraviolets ($0.2 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$)
- 48% dans la bande visible ($0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$)
- 45.6% dans la bande infrarouge ($0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$)

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 KW/m², à plus au moins 3% selon l'éloignement ou le rapprochement du soleil. Toute fois l'atmosphère absorbe une partie de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1.2 KW/m² [2]. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné, varie selon l'altitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire.

I.3 Gisement solaire

Comme pour toutes applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire pour l'étude des systèmes photovoltaïque. Par gisement solaire on entend par ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné.

I.3.1 Les différents types du rayonnement solaire

I.3.1.1 Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est défini comme étant le rayonnement provenant au sol sous un angle solide limité au seul disque solaire sans aucun intermédiaire.

I.3.1.2 Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part de ce rayonnement peut atteindre 50% du rayonnement globale (selon la situation géographique du lieu).

I.3.1.3 Le rayonnement global

Le rayonnement global sur les surfaces d'inclinaison quelconque est la somme des rayonnements décrits précédemment.

I.4 Energie photovoltaïque

Découvert par le physicien Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité : des cellules photovoltaïques (photopiles) produisent un courant continu lorsqu'elles sont éclairées par la lumière du soleil.

Les cellules photovoltaïques sont réalisées à partir de matériaux semi-conducteurs et en particulier le silicium. L'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années quarante et a pris son essor avec la conquête spatiale. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leurs tailles mais ce n'est qu'aux années soixante dix que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque (PV) et ses applications terrestres. [3]

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante : [3]

$$E_{ph} = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où :

E_{ph} : quantité d'énergie,

λ : Longueur d'onde,

h : constante de Planck,

c : vitesse de la lumière.

D'après la relation (I.1), cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'ondes sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre.

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.5.1 Avantages

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque [4] [5]:

- Sa gratuité.
- Pas de pollution
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Un coût de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité (5% de la surface des déserts suffiront pour alimenter la planète entière).

I.5.2 Inconvénients

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont [4] [5] :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas des panneaux photovoltaïques.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation l'extraction des panneaux ont un impact sur l'environnement.

I.6 Les différents types de systèmes photovoltaïques

I.6.1 Installations électriques photovoltaïques autonomes

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et difficulté de mise en œuvre réduits.

Un système photovoltaïque (PV) autonome est composé dans son ensemble d'un [1] :

- générateur photovoltaïque (panneaux photovoltaïques),
- moyen de stockage : électrochimique (batteries) ou électrique (super capacités),
- convertisseur continu/continu (CC) permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum,
- convertisseur CC/CA permettant d'alimenter les charges alternatives,
- module de contrôle pour la charge des batteries et l'acquisition des différentes grandeurs physiques du système.

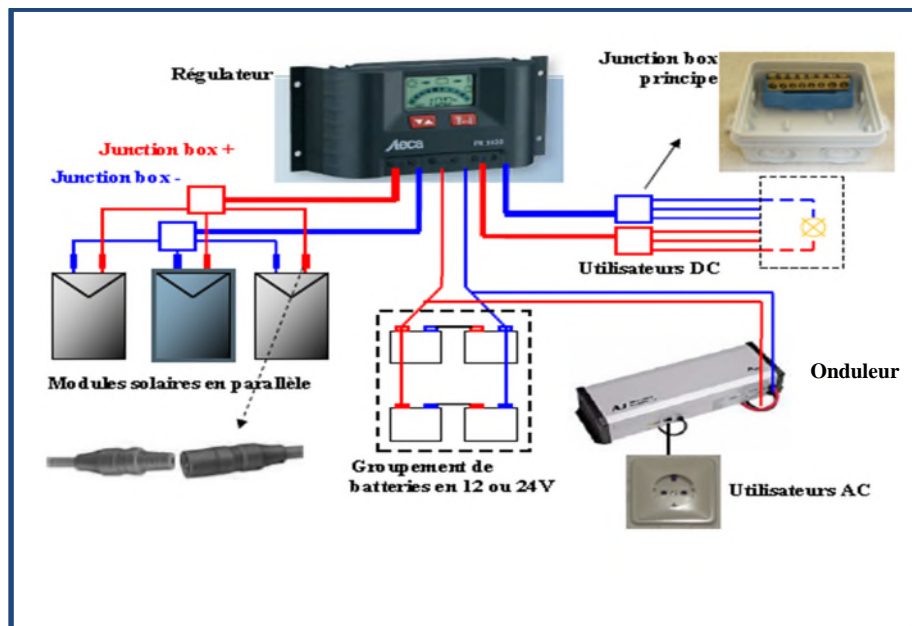


Figure (I.1) : Composants d'un système photovoltaïque autonome.

I.6.2 Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.2) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Un système connecté à un réseau réduit la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excès d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

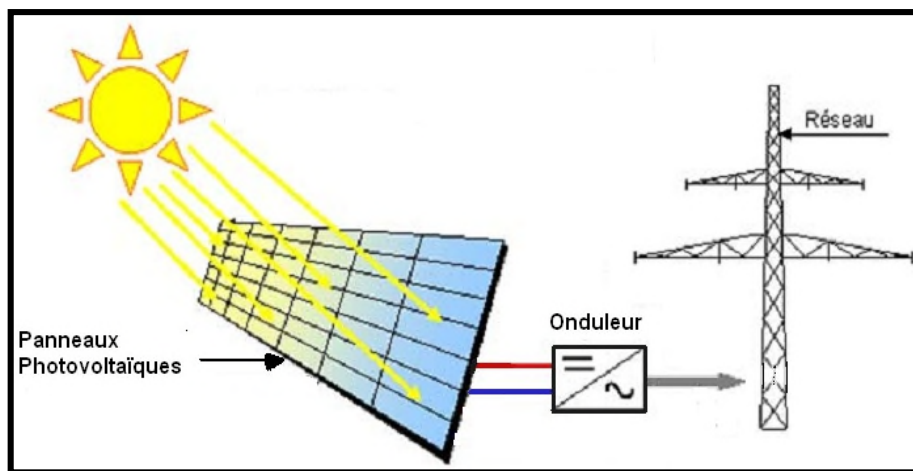


Figure (I.2) : Système photovoltaïque connecté au réseau

I.6.3 Installation électrique hybride

I.6.3.1 Système hybride à base d'énergies renouvelables primaire seulement

Dans ce type de structures deux ou plusieurs sources renouvelables peuvent être associées à des avantages complémentaires. Par exemple si on prend le système PV-Eolien qui est souvent utilisé, on remarque que les panneaux photovoltaïques fournissent de l'énergie la journée et les éoliennes la produisent à la force du vent dans la nuit.

I.6.3.2 Système hybride à base d'une ou plusieurs énergies renouvelables avec unité de secours

Dans ce cas et en raison de la disponibilité intermittente des énergies renouvelables, des unités d'alimentation de secours sont généralement intégrées comme le générateur diesel, la micro turbine à gaz et les piles à combustible pour avoir une alimentation sans interruption et permanente. Ce système peut associer plusieurs types de sources d'énergies à fin de construire

un système plus puissant plus fiable et plus sécurisé. Le fameux système inclut dans cette catégorie et le système hybride éolien photovoltaïque diesel.

I.6.3.3 Système hybride à base d'énergie renouvelable avec un système de stockage

L'association des batteries de stockage d'énergie avec des sources d'énergies renouvelables peuvent assurer la fiabilité et la sécurité du système de production d'énergie décentralisée, tout en maximisant les avantages provenant de sources renouvelables.

Au moment de choisir le système, on a tendance à favoriser le système autonome pour ses multiples avantages : [6]

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules =20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Sécurité absolue si l'installation est conforme.
- Le risque de choc électrique est réduit et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

I.7 Description du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué particulièrement par :

I.7.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électrique, exposé à la lumière (photon), génère une tension et un courant électriques (cet effet est appelé l'effet photovoltaïque). Le courant obtenu est un courant continu et la tension obtenue est de l'ordre de 0.5 V.

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si) de sulfure de cadmium (CdS) ou de Tellurure de cadmium (CdTe). Le matériau le plus utilisé pour les cellules solaires dites photovoltaïques, jusqu'à présent, notamment pour le terrestre reste le silicium (Si) sous de nombreuses formes (cristalin, multi-cristalin, amorphe, en couche mince, etc.) en raison de son faible coût.

Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrons métalliques et le tout est protégé par une vitre.

On peut distinguer plusieurs types de cellules en occurrence :

- Cellules en silicium monocristallin
- Cellules en silicium polycristallin
- Cellules en silicium amorphe
- Cellules Tandem
- Cellules multi-jonction

Les cellules de silicium monocristallin sont historiquement les plus largement utilisées et commercialisées pour leurs meilleures performances et leurs rendement qui peut atteindre les 15 à 18% [7].

- **Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque**

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au Phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une batterie de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs comme le montre la figure (I.3). La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul [8]. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

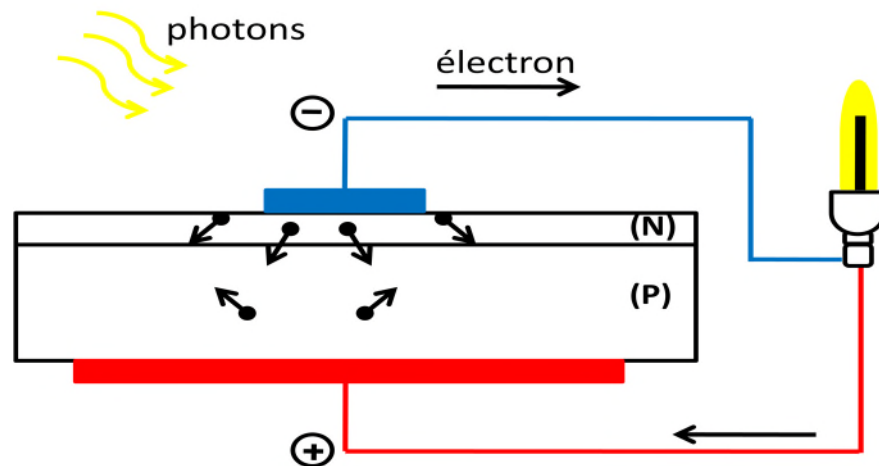


Figure (I.3) : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

I.7.2 Le module (panneau) photovoltaïque

Le module solaire photovoltaïque étant une association série ou parallèle de cellules solaires individuelles. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique [9].

I.7.2.1 Groupement en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant (figure (I.4)). La caractéristique résultante du groupement de la figure (I.5) est obtenue par addition des tensions à courant donné ($I_1=I_2=...=I_n=I$).

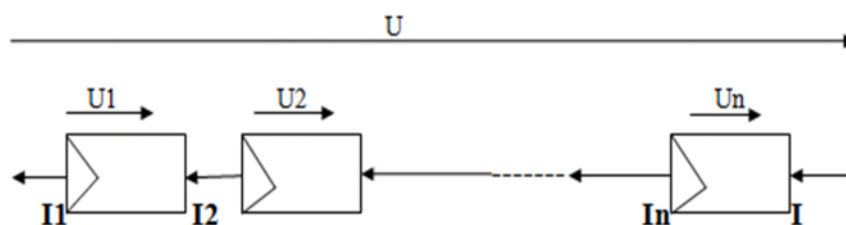


Figure (I.4): Association série des cellules photovoltaïques.

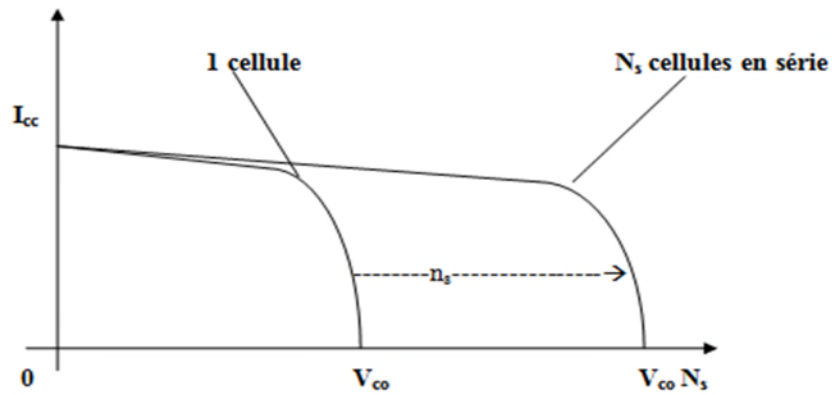


Figure (I.5): Caractéristique résultante d'un groupement de N_s cellules en série.

I.7.2.2 Groupement en parallèle :

Une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'acroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé (Figure (I.6)). La caractéristique résultante du groupement de N_p cellules identiques connectées en parallèle est représentée sur la figure (I.7), les cellules sont soumises à la même tension.

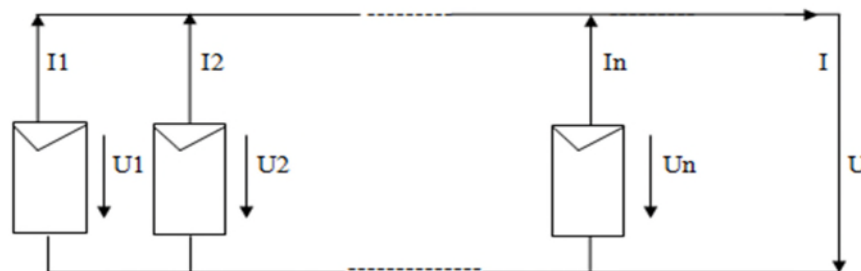


Figure (I.6): Association parallèle des cellules photovoltaïques

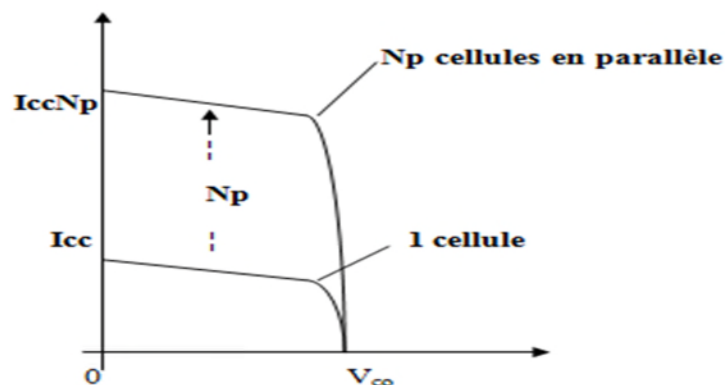


Figure (I.7): Caractéristique résultante d'un groupement de N_p cellules en parallèle

Un groupement parallèle pur des cellules pour la construction d'un module, n'est généralement pas convenable, car un grand courant nécessite une section de câblage plus grande. En plus, une tension basse occasionne des pertes relativement élevées. Pour ces raisons, un groupement en série est plus approprié.

I.8 Système de stockage

La puissance délivrée par un panneau est importante pendant les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conversion de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou mauvais temps)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

I.9 Etude de l'adaptation de l'énergie photovoltaïque

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu figure (I.8). Il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue qu'est le panneau photovoltaïque.

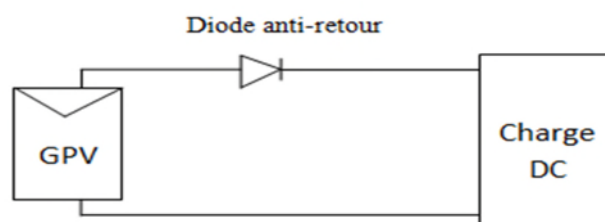


Figure (I.8) : Connexion directe GPV-charge via une diode anti-retour.

Le module photovoltaïque peut fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée est située en (M) voir figure

(I.9). La tension et le courant correspondant sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner un panneau photovoltaïque à sa tension optimale (puissance maximale). Cela nécessite une adaptation entre la source photovoltaïque et la charge figure (I.10). Les convertisseurs statiques adaptés à l'énergie photovoltaïque sont souvent appelés « convertisseurs solaires ». Ils ont comme objectif d'adapter l'énergie électrique qui provient des panneaux photovoltaïques pour pouvoir alimenter des charges continues ou alternatives ou bien alors de charger des batteries.

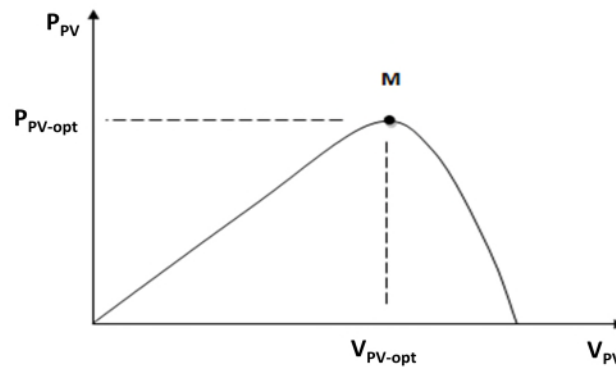


Figure (I.9) : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.

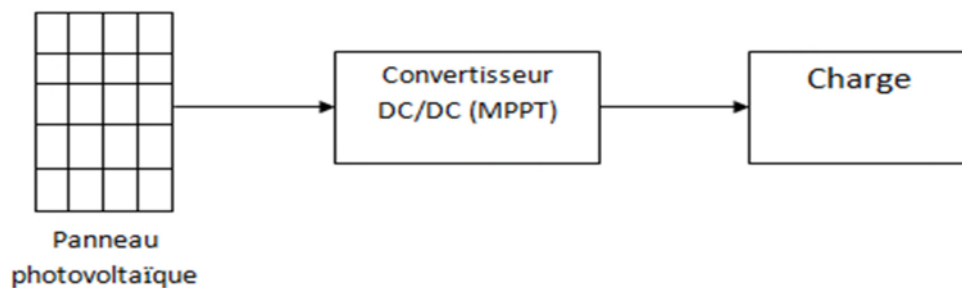


Figure (I.10) : Système photovoltaïque autonome avec convertisseur d'adaptation MPPT.

I.10 Les système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge alternative (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

I.10.1 Le convertisseur continu-continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du générateur photovoltaïque correspondante au point de puissance maximale. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [11].

I.10.2 Le convertisseur continu- alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs : [11]

- Rotatif

C'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances). [11]

- Statique

On le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient : [11]

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

I.11 Les différentes connexions des GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu

Il existe actuellement quatre architectures principales de hacheurs donnant de bonnes solutions : hacheur central, hacheur rangée, hacheur modulaire parallèle, hacheur modulaire série.

I.11.1 Hacheur central

C'est un seul hacheur inséré entre le GPV et la charge, caractérisé par sa simplicité et son faible coût.

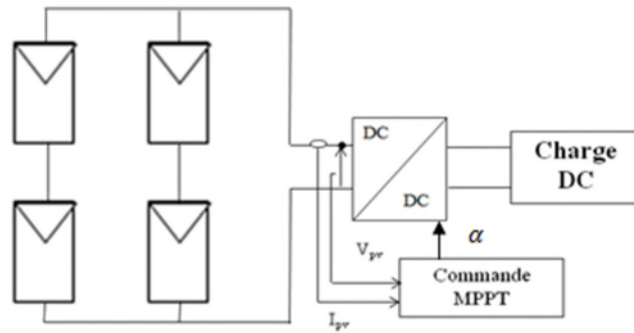


Figure I.11 : Connexion GPV-charge via un hacheur central.

I.11.2 Hacheur rangée

L'utilisation de plusieurs étages de conversion peut améliorer le rendement de conversion et la fiabilité du système en dissociant les fonctionnalités du hacheur.

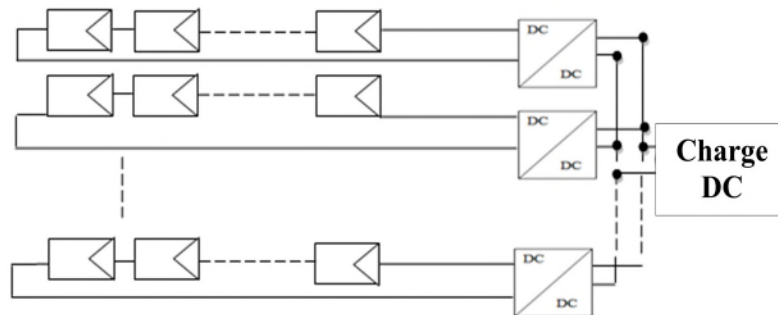


Figure I.12 : Hacheur rangée.

I.11.3 Hacheur modulaire parallèle

Une évolution de la topologie hacheur « rangée » est la topologie hacheur modulaire parallèle. Le hacheur n'est plus connecté à une chaîne de modules PV mais directement à la sortie du module PV. Cette évolution garde tous les avantages du hacheur « rangée », tout en augmentant le niveau de discrétisation du MPPT.

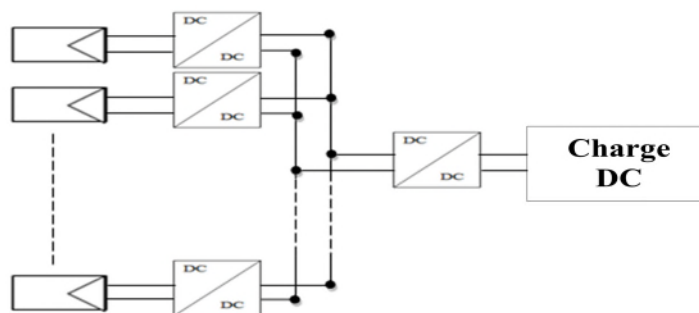


Figure I.13 : Hacheur modulaire parallèle.

I.11.4 Hacheur modulaire série

Une des solutions pour diminuer le rapport d'élévation des hacheur nécessaires à la topologie hacheur modulaire parallèle est de mettre la sortie des hacheurs en série.

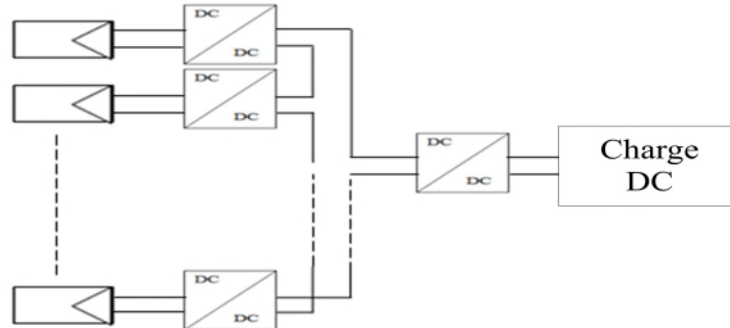


Figure I.14 : Hacheur modulaire série

- **Comparaison entre les différentes topologies**

Le tableau ci-après récapitule une comparaison des différentes topologies : [8]

Hacheur central	+Simplicité des lois de commande +Maintenance simplifiée. +Coût d'installation le plus faible.	-Arrêt de production en cas de panne.
Hacheur rangée	+Facilement intégrable à un élément de stockage. +Maintenance simplifiée. +Rendement de conversion élevé.	-Pertes de puissance par couplage série.
Hacheur modulaire parallèle	+Détection des défauts rapide. +Gain de productivité.	-Coût d'installation important. -Rapport d'élévation de la tension important. -Pertes importantes.
Hacheur modulaire série	+Rapport d'élévation diminue. +Rendement élevé.	-Coût d'installation important. -Complexité des lois de commande. -Dépendance des points de fonctionnement des uns par rapport aux autres.

Tableau (I.1) : Comparaison des différentes topologies

Le choix de la topologie du hacheur central paraît le plus favorable, vu sa simplicité de commande et son coût le plus faible.

I.12 Recherche du point de puissance maximale

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracking, 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. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique courant-tension est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

➤ Quelques commandes MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes

Plusieurs applications industrielles nécessitent l'utilisation des méthodes modernes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'optimisation d'un système photovoltaïque, on cite les suivantes :

- Méthode "perturbation et observation" (P&O).
- Méthode "conductance incrémentielle".
- Méthodes basées sur des relations de proportionnalité.
- Méthode à base de la logique floue.
- Méthodes à base de réseau de neurones artificiels.
- Méthodes à base d'algorithme génétique (AG).

I.13 Rendement d'une chaîne de conversion photovoltaïque

Le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liés à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule photovoltaïque. Parmi les matériaux les plus utilisés et en raison de son faible coût, on trouve le silicium sous ses différentes formes cristallines, les rendements les plus courants des modules PV actuellement commercialisés sont de l'ordre de : 12.7% pour le silicium amorphe hydrogéné, 15% pour le silicium multicristallin et 23% pour le silicium monocristallin [12].

- Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'un panneau solaire photovoltaïque, noté η_{pv} , est défini selon l'équation :

$$\eta_{pv} = \frac{P_{pv}}{G \times S_{eff}} \quad (I.2)$$

Où :

P_{PV} : correspond à la puissance délivrée par le panneau PV

S_{eff} : la surface effective du panneau PV représentant uniquement la partie active du capteur PV effectuant la conversion des photons en électrons.

Cette dernière grandeur ne doit pas être confondue avec la surface totale du panneau comprenant l'infrastructure et souvent notée S_T .

- Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté η_{PVmax} est défini selon l'équation (I.3) :

$$\eta_{pv \max} = \frac{P_{\max}}{G \times S_{eff}} \quad (I.3)$$

Dans laquelle :

P_{\max} : est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau PV.

- Nous définissons le rendement du convertisseur noté η_{conv} , généralement fourni par les documents constructeurs par la relation (I.4), en notant P_{out} la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{pv}} \quad (I.4)$$

- Le premier rendement que nous définissons en sortie du générateur PV est lié au point de fonctionnement réel du générateur PV et de son éloignement par rapport au point optimal. Nous le notons η_{MPPT} . Il permet de mesurer l'efficacité de la commande permettant de forcer le point de fonctionnement du générateur PV au plus près du point optimal, et peut être aussi appelé rendement de la commande MPPT :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{pv}}{P_{\max}} \quad (I.5)$$

Avec :

P_{\max} dépendant des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques.

P_{pv} la puissance effectivement délivrée par un générateur PV dépendant de la présence d'une commande utilisée dans le convertisseur (MPPT, asservissement de tension, etc...).

- Le rendement total de la chaîne de conversion η_{TOTAL} (I.6) est défini comme le produit des trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{\text{TOTAL}} = \frac{P_{\text{max}}}{E_s \times S_{\text{eff}}} \times \frac{P_{\text{pv}}}{P_{\text{max}}} \times \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{pv}}} = \eta_{\text{pv max}} \times \eta_{\text{MPPT}} \times \eta_{\text{conv}} \quad (\text{I.6})$$

I.14 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, des généralités sur la conversion photovoltaïque ainsi que ces avantages. Les différents types de système photovoltaïque sont décrits. Nous nous intéressons au système photovoltaïque autonome, en vu de son optimisation pour une extraction du maximum de puissance quelque soit les conditions météorologique et de la charge.

Pour optimiser un système photovoltaïque, plusieurs méthodes sont utilisées, on a cité quelques méthodes parmi les plus utilisées.

La connaissance du rendement de la chaîne de conversion de puissance, permet d'avoir une idée plus précise sur l'origine des pertes, par ailleurs, la nécessité d'intervention afin de l'améliorer.

La modélisation des différentes parties du système autonome retenu dans ce travail, sera présentée dans le prochain chapitre.

II.1 Introduction

Pour la réalisation d'un programme de simulation qui reproduit le fonctionnement du système photovoltaïque avec optimisation, il est indispensable de disposer d'un modèle qui reproduit la courbe caractéristique courant-tension (I-V) de manière exacte. Les différents modèles de générateur photovoltaïque existant, diffèrent par le nombre de paramètres utilisés pour reproduire leurs fonctionnements.

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques existent dans la littérature, ils seront présentés dans ce chapitre, ensuite, un modèle sera choisi et simulé pour divers températures et divers ensoleillements.

Par la suite, les convertisseurs DC/DC seront présentés ainsi que la modélisation du hacheur survolteur (Boost).

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

II.2.1 Les différents modèles de panneau photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles mathématiques de panneau photovoltaïque.

II.2.1.1 Model idéal

Un panneau photovoltaïque peut être décrit de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement incident, en parallèle avec une diode (figure II.1) qui correspond à la jonction. [13]

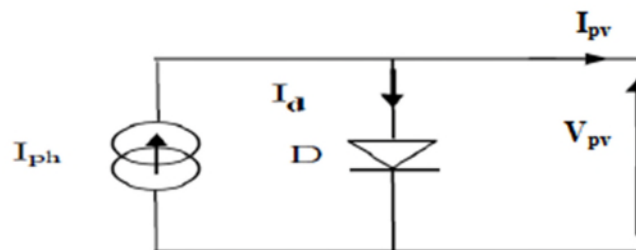


Figure (II.1) : Modèle électrique idéal d'un panneau photovoltaïque.

D'après la loi des nœuds, on obtient:

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

Pour un générateur PV idéal, la tension V_{pv} est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V_{pv} = V_d \tag{II.2}$$

V_d : la tension aux bornes de diode.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{q.V}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.3}$$

I_0 : est le courant de saturation de la diode.

II.2.1.2 Modèle à une diode (simplifié)

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode, simplifié. [13]

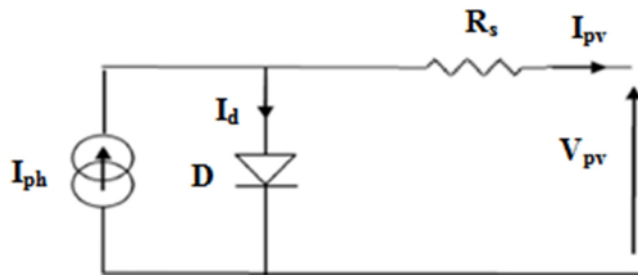


Figure (II.2) : Modèle électrique à une diode (simplifié).

Le courant généré par le panneau photovoltaïque est donné par la loi des mailles suivantes :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.4}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q.(V - R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.5}$$

II.2.1.3 Modèle à deux diodes sans résistance shunt

Le panneau photovoltaïque est représenté par le circuit électrique (figure II.3), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.

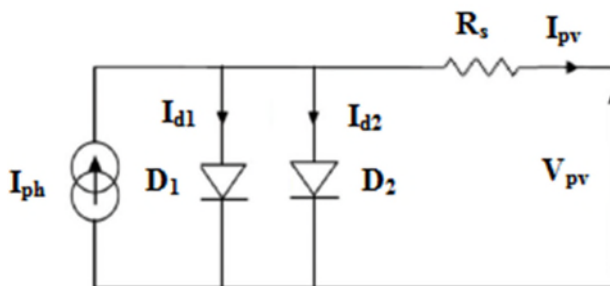


Figure (II.3) : Model électrique à deux diodes sans résistance shunt d’une cellule PV.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) \tag{II.6}$$

Le courant de la diode est donné comme suit :

$$I_{d1} = I_{01} \times \left[e^{\frac{q.(V+R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.7}$$

$$I_{d2} = I_{02} \times \left[e^{\frac{q.(V+R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.8}$$

I_{01} et I_{02} représente le courant de saturation des diodes D_1 , D_2 respectivement :

Donc on aura :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{\frac{q.(V+R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{\frac{q.(V+R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.9}$$

II.2.1.4 Modèle à deux diodes avec résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure II.4), qui se compose d’une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

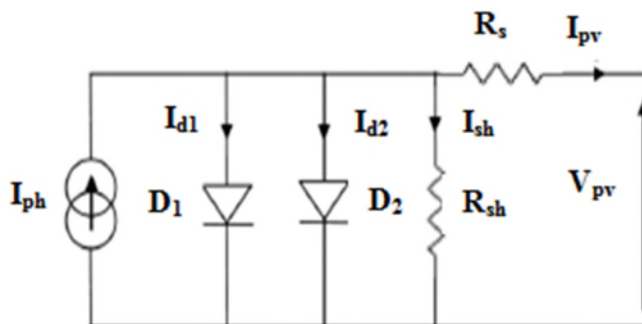


Figure (II.4) : Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt.

D'après la loi des mailles on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (II.10)$$

Où:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{\frac{q(V+R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{\frac{q(V+R_s \times I)}{A.K.T}} - 1 \right] - \left[\frac{V+(R_s \times I)}{R_{sh}} \right] \quad (II.11)$$

II.2.1.5 Modèle implicite

C'est un modèle à cinq paramètres (I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp} , R_s) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

L'expression du courant du module photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{cc} \{ 1 - K_1 [e^{K_2 V_{pv}^m} - 1] \} \quad (II.12)$$

Où les coefficients K_1 , K_2 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (II.13)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{cc}} \right] \quad (II.14)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (II.15)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.16)$$

Où

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V_{opt}).

I_{cc} : Courant en court-circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.12) est applicable que pour un niveau d'insolation G et de température particulière ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$), relatif aux conditions standards de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, les paramètres du tableau (II.1) changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.17)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc,stc} \quad (II.18)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{co} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (II.19)$$

Avec :

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔG : Représente la variation de l'insolation.

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

α_{cc} : Représente un coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

β_{co} : Représente un coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{nouv} = V_{stc} + \Delta V \quad (II.20)$$

$$I_{nouv} = I_{stc} + \Delta I \quad (II.21)$$

Pour notre étude, on a choisi le modèle à cinq paramètres, (I_{cc} , V_{co} , I_{mpp} , V_{mpp} et R_s).

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$). Le tableau (II.1) montre les paramètres du panneau photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24, qui seront utilisés pour la simulation.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{cc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant I_{cc} (α_{cc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{co} (β_{co})	-152 mV/°C

Tableau (II.1) : Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24.

II.3 Simulation du panneau photovoltaïque

Dans l'environnement Matlab-Simulink, on a réalisé le schéma bloc du générateur photovoltaïque de type SIEMENS SM 110-24, la figure (II.5) représente le schéma de simulation global du module photovoltaïque avec variation de G et T.

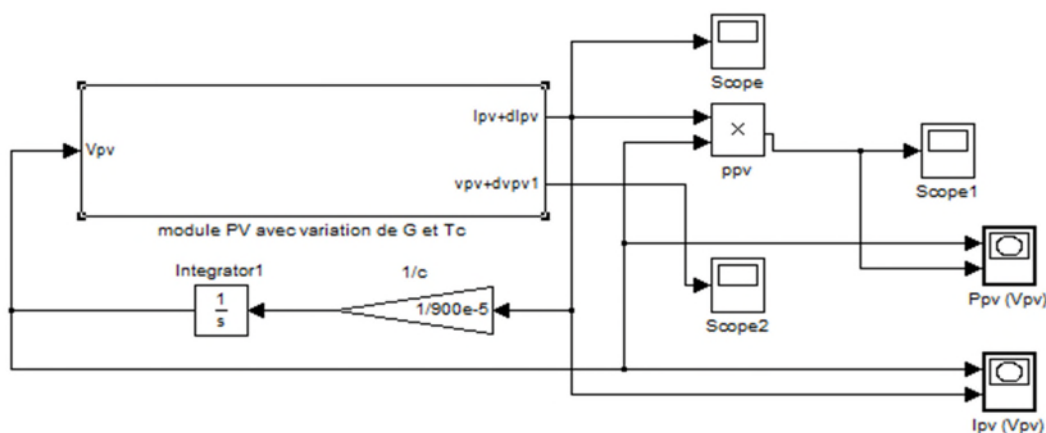


Figure (II.5) : Schéma de simulation global du panneau photovoltaïque avec variation de G et T.

II.3.1 Influence de l'ensoleillement

Après simulation pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$, les résultats obtenus sont représentés par les caractéristiques suivantes :

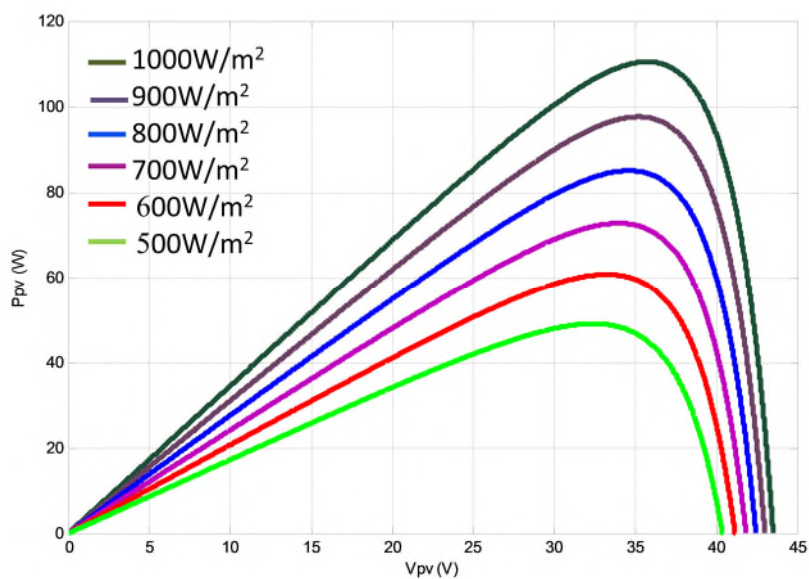


Figure (II.6) : Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

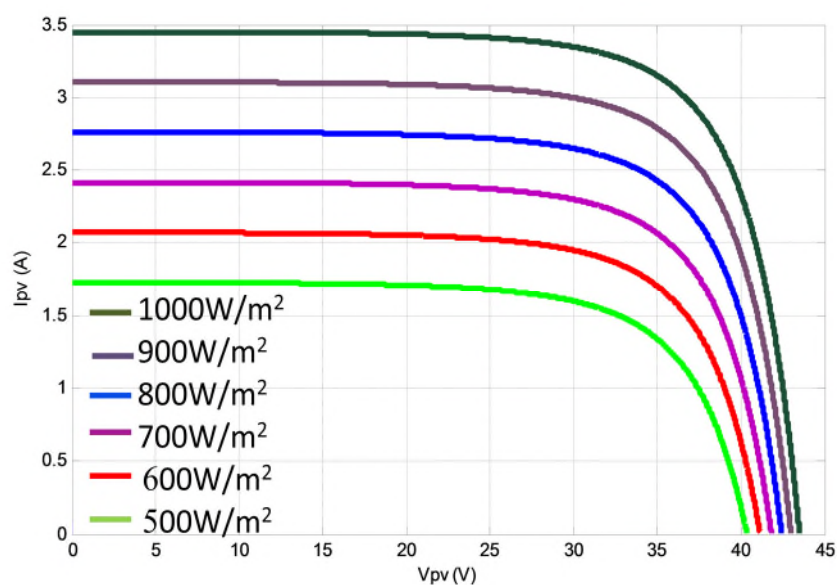


Figure (II.7) : Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

En faisant varier l'éclairement entre 400 w/m^2 et 1000 w/m^2 avec un pas de 200, les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$ et $I_{pv}=f(V_{pv})$ sont données par les figures (II.6, II.7). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre la tension de circuit ouvert n'a augmenté que légèrement avec l'ensoleillement, ceci implique que :

- La puissance optimale du panneau (P_{opt}) est proportionnelle à l'ensoleillement.

II.3.2 Influence de la température

Après simulation pour diverses températures à $G=1000\text{W/m}^2$, les résultats obtenus sont représentés par les caractéristiques suivantes :

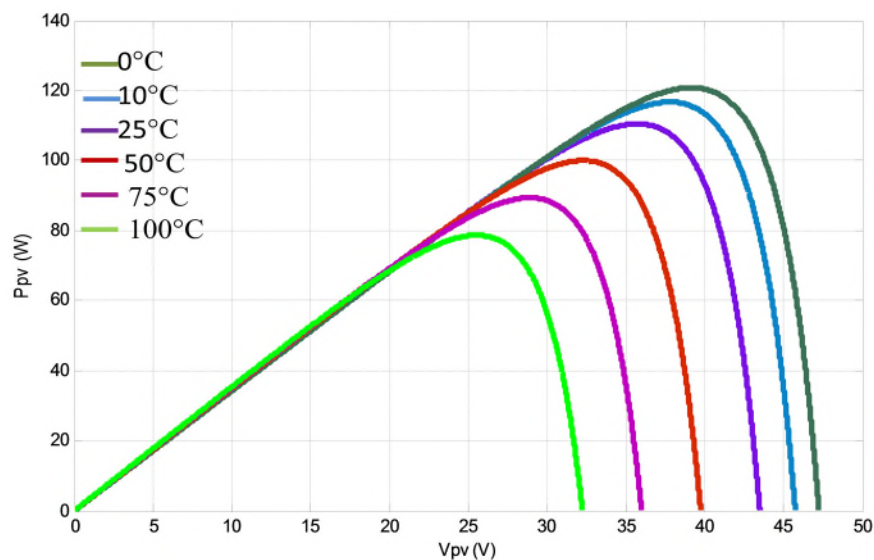


Figure (II.8) : Courbes $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour diverses températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

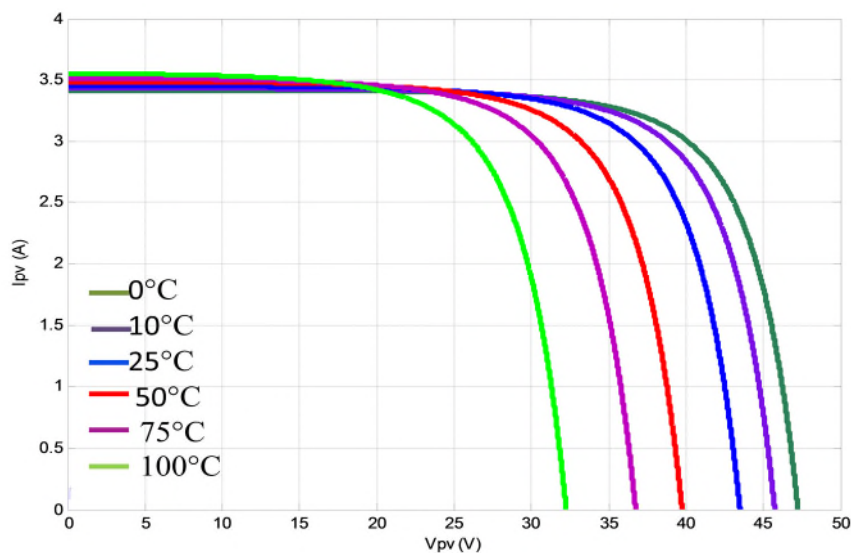


Figure (II.9) : Courbes $I_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau pour diverses températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

En faisant varier la température, les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$ et $I_{pv}=f(V_{pv})$ sont données par les figures (II.8, II.9). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre la tension de circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, de même pour la puissance optimale.

II.4 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

II.4.1 Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur (Buck) ou hacheur série. La figure (II.10) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = \frac{V_s}{V_{pv}}$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

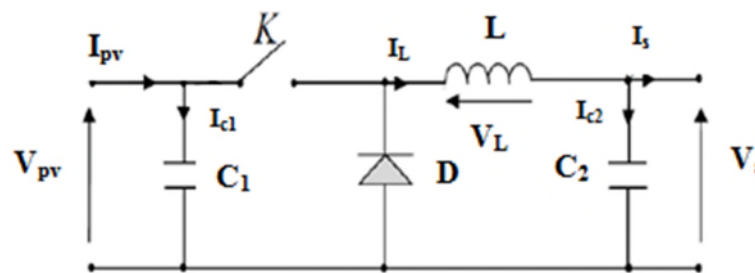


Figure (II.10) : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détails son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.11) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant la période ($0 \rightarrow \alpha T$) et l'interrupteur ouvert pendant la période ($\alpha T \rightarrow T$).

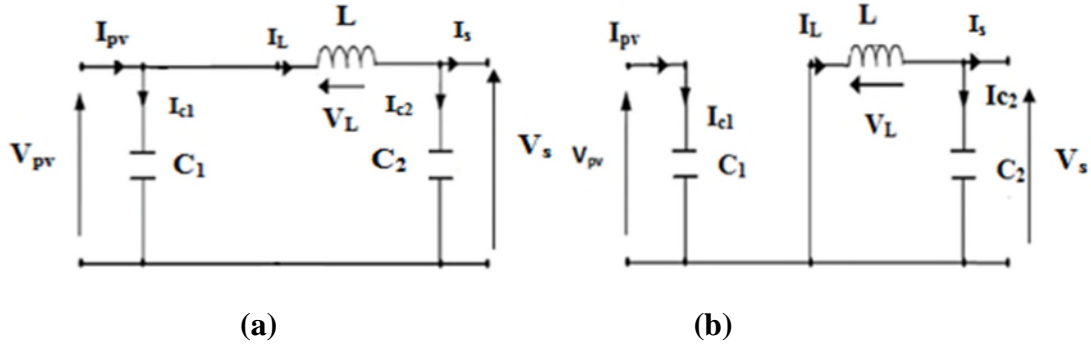


Figure (II.11) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur,

(a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.11), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période $0 \rightarrow \alpha T$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv}(t) - V_s(t) \end{cases} \quad (II.22)$$

Pour la deuxième période $\alpha T \rightarrow T$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) \\ I_{c2}(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = -V_s(t) \end{cases} \quad (II.23)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T = \frac{dx}{dt_{\alpha T}} \alpha T + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha)T}} (1 - \alpha) T \quad (II.24)$$

En appliquant la relation (II.25) sur les systèmes d'équations (II.23) et (II.24), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = \alpha(I_{pv} - I_L) + (1 - \alpha)I_{pv} \\ C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = \alpha(I_L - I_s) + (1 - \alpha)(I_L - I_s) \\ L \frac{dI_L}{dt} = \alpha T(V_{pv} - V_s) + (1 - \alpha)T(-V_s) \end{array} \right. \quad (II.25)$$

Après arrangement, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_s(t) = I_L(t) - C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} \\ I_L(t) = \frac{1}{\alpha} (I_{pv}(t) - C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt}) \\ V_{pv}(t) = \frac{1}{\alpha} (L \frac{dI_L(t)}{dt} + V_s(t)) \end{array} \right. \quad (II.26)$$

II.4.2 Hacheur survolteur

Ce type de convertisseur est connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe est celui de la figure (II.12). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

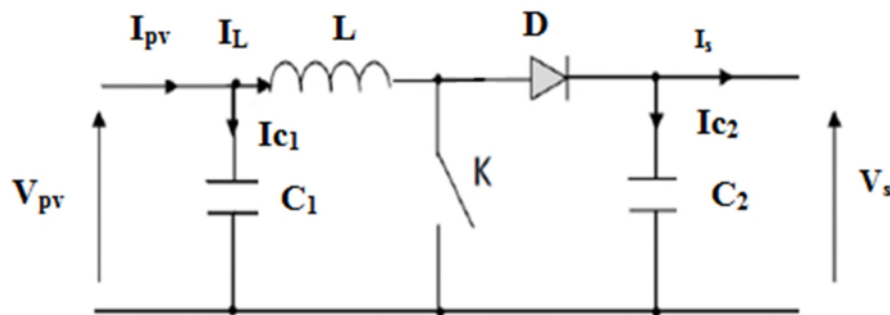


Figure (II.12) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur de la figure (II.13) des deux phases de fonctionnement donne :

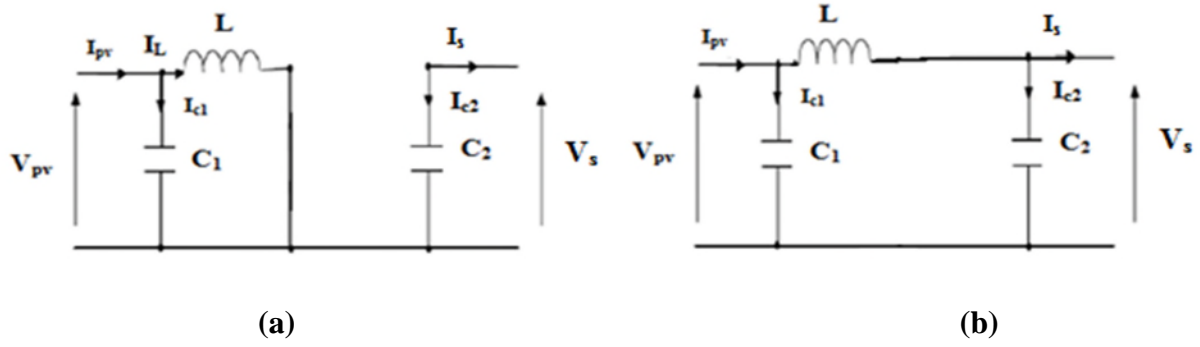


Figure (II.13) : Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a) : K fermé, (b) :K ouvert

Pour la première période $0 \rightarrow \alpha T$:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_s(t)}{dt} = -I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = -V_{pv}(t) \end{array} \right. \quad (II.27)$$

Pour la deuxième période $\alpha T \rightarrow T$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv}(t) - V_s(t) \end{array} \right. \quad (II.28)$$

En appliquant la relation (II.24) sur les systèmes d'équations (II.27) et (II.28), comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_L = I_{pv} - C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \\ I_s = (1 - \alpha)I_L - C_2 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \\ V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_s \end{array} \right. \quad (II.29)$$

Plus au rôle du convertisseur dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, qui est d'adapter à chaque instant l'impédance de la charge à celle du générateur PV, un autre

rôle y est approprié dans notre travail, c'est d'offrir une tension maximale, c'est pourquoi le convertisseur retenu dans ce travail est le hacheur survolteur (boost).

II.4.3 Modélisation du hacheur survolteur

C'est un convertisseur DC/DC de type parallèle qui est inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique α ($0 < \alpha < 1$) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure (II.14).

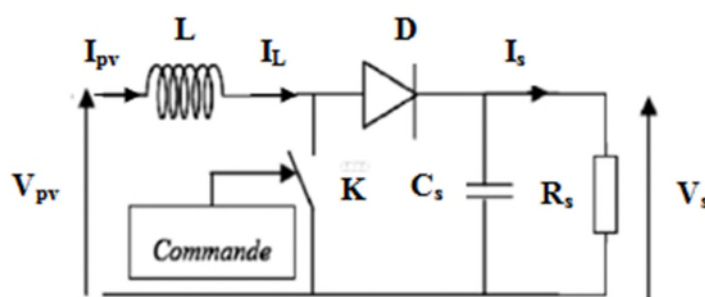


Figure (II.14) : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, dans le système d'équations (II.29), et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} I_L = I_{pv} \\ I_s = (1 - \alpha)I_L \\ V_{pv} = (1 - \alpha)V_s \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique α du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (figure II.14) par le système d'équations :

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_{pv}}{1 - \alpha} \\ I_s = (1 - \alpha)I_{pv} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

A partir du système d'équations (II.32), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_s :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-\alpha)V_s}{I_s/(1-\alpha)} = R_s(1 - \alpha)^2 \quad (\text{II.32})$$

Alors, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_s :

$$\frac{R_{pv}}{R_s} = (1 - \alpha)^2 \Rightarrow \alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \quad (\text{II.33})$$

Puisque le rapport α vérifie l'inégalité $0 < \alpha < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante : $R_s > R_{pv}$.

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv}=R_{opt}$) et le rapport cyclique ($\alpha = \alpha_{opt}$) obéissent donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1 - \alpha_{opt})^2 R_s \quad (\text{II.34})$$

La relation (II.35) montre que, pour une puissance incidente P_{pv} , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini α_{opt} (au point de puissance maximale).

II.5 La charge

La charge représente une maison de consommation journalière, (éclairage, recharge des appareils portables, un poste radio ainsi qu'un petit réfrigérateur).

II.6 Modélisation du stockage

Parmi les types de stockage existant, les batteries au plomb actuellement sont les mieux adaptées, on a choisi un modèle R-C dont le modèle électrique de la batterie est le suivant :

➤ Modèle électrique de la batterie

Ce modèle comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{bat}) et une résistance interne (R).

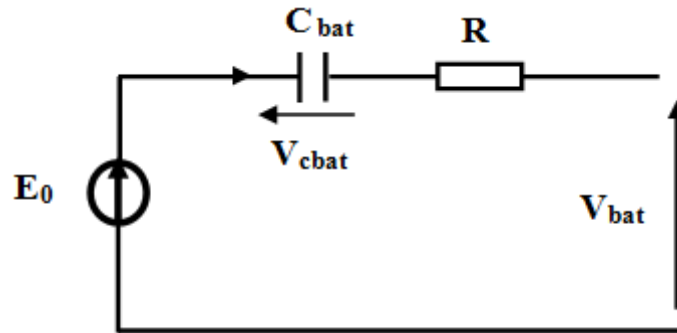


Figure IV.15 : Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{\text{bat}} = E_0 - R i_{\text{bat}} - V_{\text{cbat}} \quad (\text{II.35})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{\text{bat}}} \quad (\text{II.36})$$

C_{bat} : la capacité (Ah) nominale de la batterie

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

Q_{bat} : la quantité de charge électrique en Coulomb,

$$Q_{\text{bat}} = I \times t_{\text{bat}} \quad (\text{II.37})$$

II.7 Conclusion

Dans la littérature, on trouve plusieurs modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, Nous avons choisi un modèle implicite, qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

Le convertisseur DC/DC, est un élément indispensable dans la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, mais, on a besoin aussi d'un régulateur MPPT qui sert à contrôler ce convertisseur et à obliger le générateur photovoltaïque à fonctionner toujours à sa puissance optimale ce qui implique l'insertion d'une commande MPPT.

Il existe plusieurs types de commandes MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques, le prochain chapitre sera consacré à la présentation du principe de fonctionnement cette commande et les différents algorithmes d'optimisation, pour une extraction maximale de la puissance photovoltaïque.

III.1 Introduction

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, les caractéristiques obtenues après simulation du panneau photovoltaïque montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le panneau photovoltaïque ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine valeur de tension et du courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépend à son tour de l'ensoleillement et de la température. Pour que le panneau fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite du point de puissance maximale « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). Dans ce chapitre, on présentera quelques commandes MPPT utilisées dans le but d'optimisation du point de puissance maximale.

III.2 Méthode de Perturbation et Observation (P&O)

La P&O est la méthode la plus utilisée parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, l'algorithme Perturbation et Observation, est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension V_{pv} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P_{pv}(n)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P_{pv}(n-1)$ alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (III.1), donne l'organigramme de cet algorithme.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

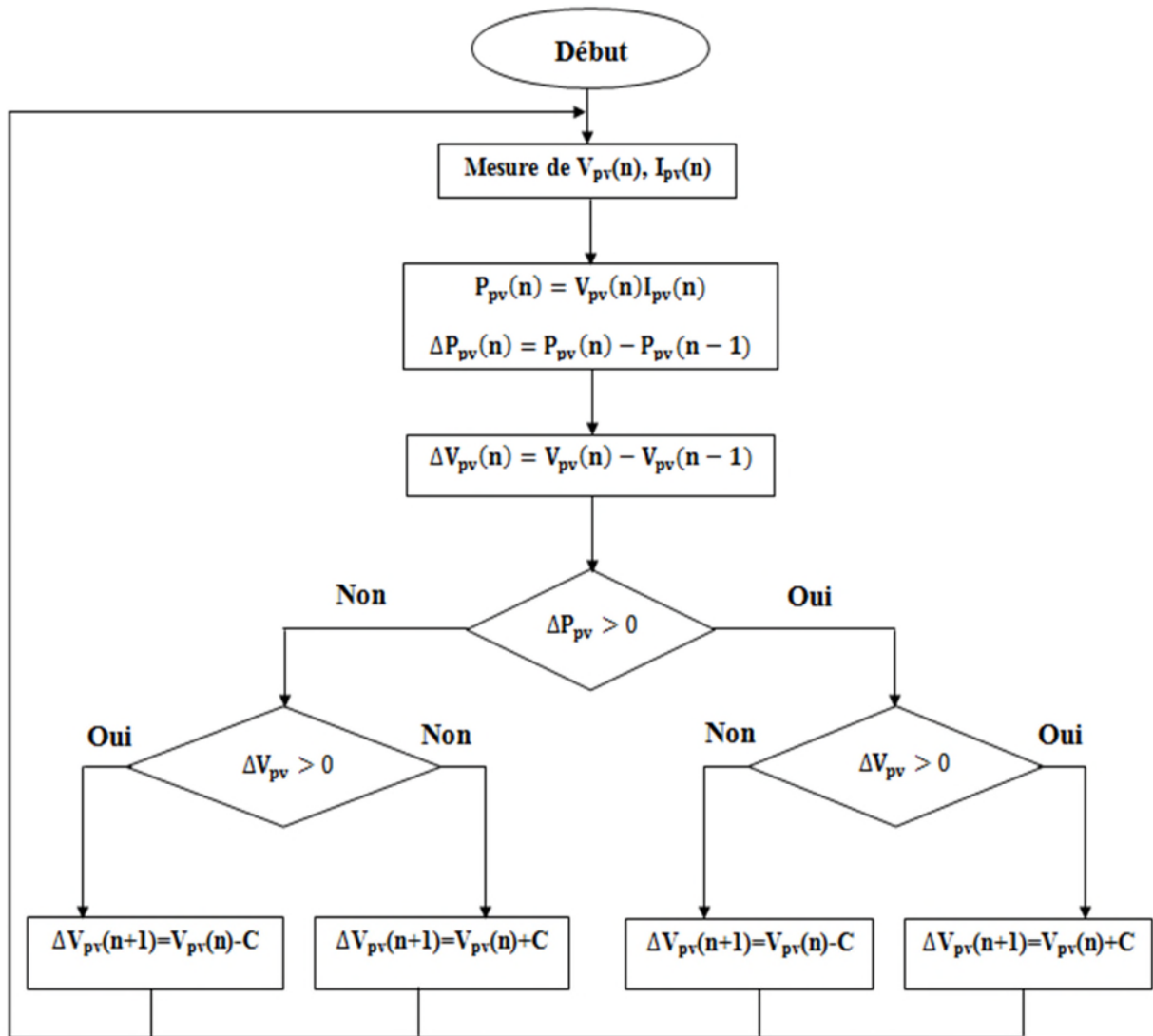


Figure (III.1) : Organigramme de la méthode P&O avec variation de la tension.

- **Commande directe**

La figure (III.2) montre l'organigramme de l'algorithme perturbation et observation à contrôle direct. Il perturbe le rapport cyclique et mesure la puissance de sortie du convertisseur. Si la puissance augmente, le rapport cyclique est encore perturbé dans la même direction; dans le cas contraire la direction sera renversée.

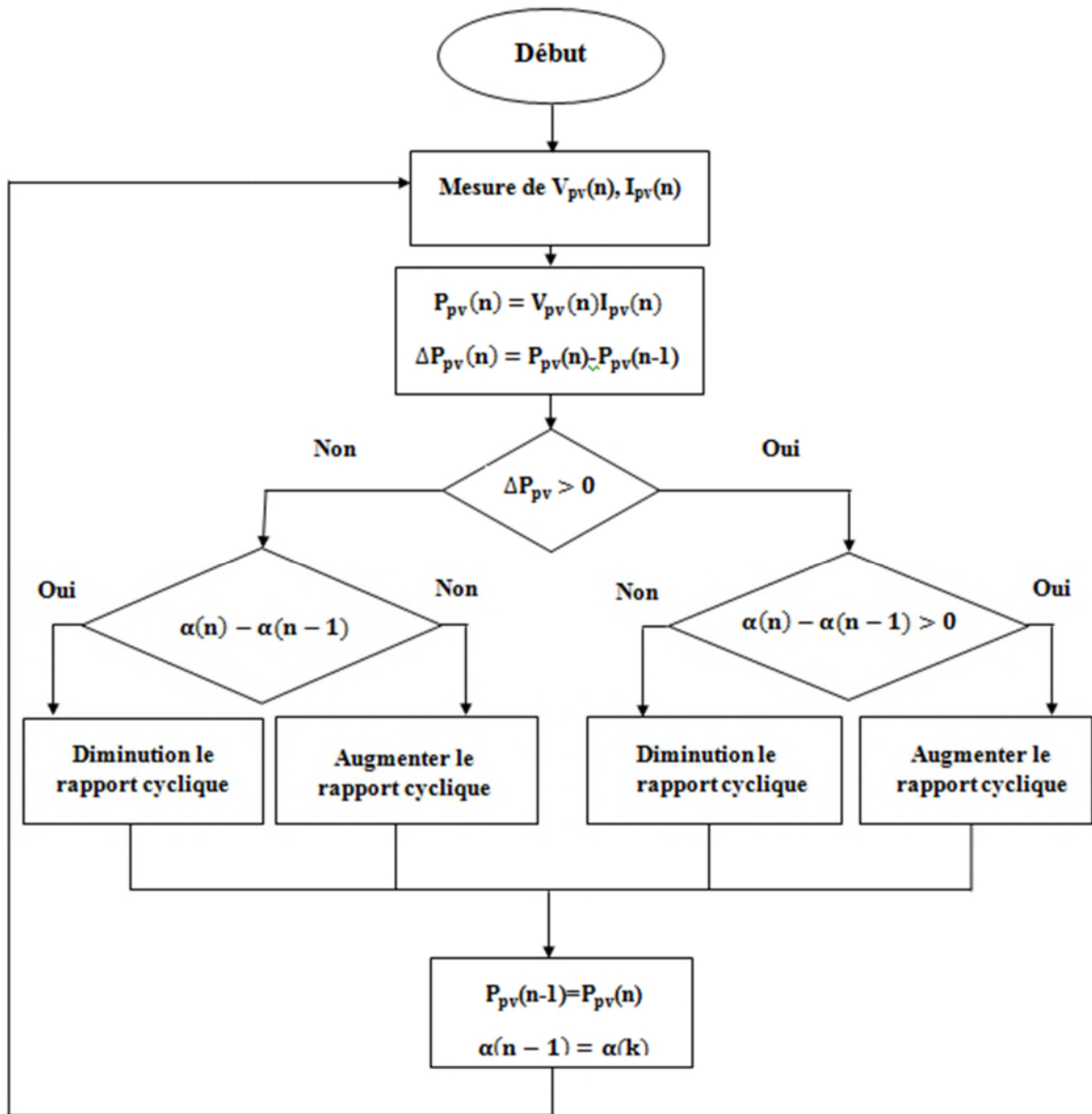


Figure III.2 : Organigramme de l’algorithme perturbation et observation à contrôle direct.

III.3 La commande MPPT “Incrément de conductance” (IncCond)

- Principe de la commande

Pour rechercher le PPM, cette technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du générateur photovoltaïque et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G_c = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{III.1}$$

La variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG_c = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (III.2)$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du panneau (P_{pv}) par rapport à la tension (V_{pv}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, il se situe à droite. La figure (III.3) permet d'écrire les conditions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM} \\ \text{Si } \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM} \\ \text{Si } \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0, \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM} \end{array} \right.$$

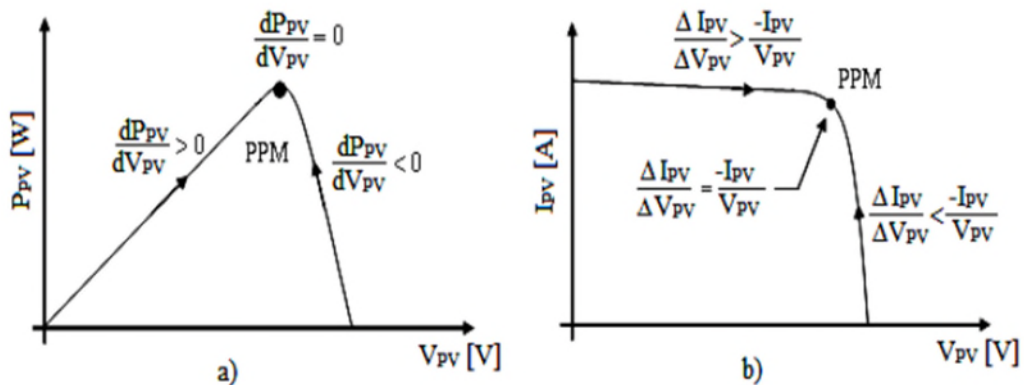


Figure (III.3) : Positionnement du point de fonctionnement.

Le lien entre la conductance et la dérivée de la puissance $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$ peut être décrit par l'équation suivante : [12]

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \times \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \approx I_{pv} + V_{pv} \times \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (III.3)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.} \\ \text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM.} \\ \text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM.} \end{array} \right.$$

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (I_{pv}/V_{pv}) avec celle de l'incrément de conductance ($\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$), comme l'illustre l'algorithme de la figure(III.4). V_{pv_ref} correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension V_{pv_ref} correspond bien à la tension optimale V_{pv_opt} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{pv} . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_{pv_ref} jusqu'à atteindre le PPM.

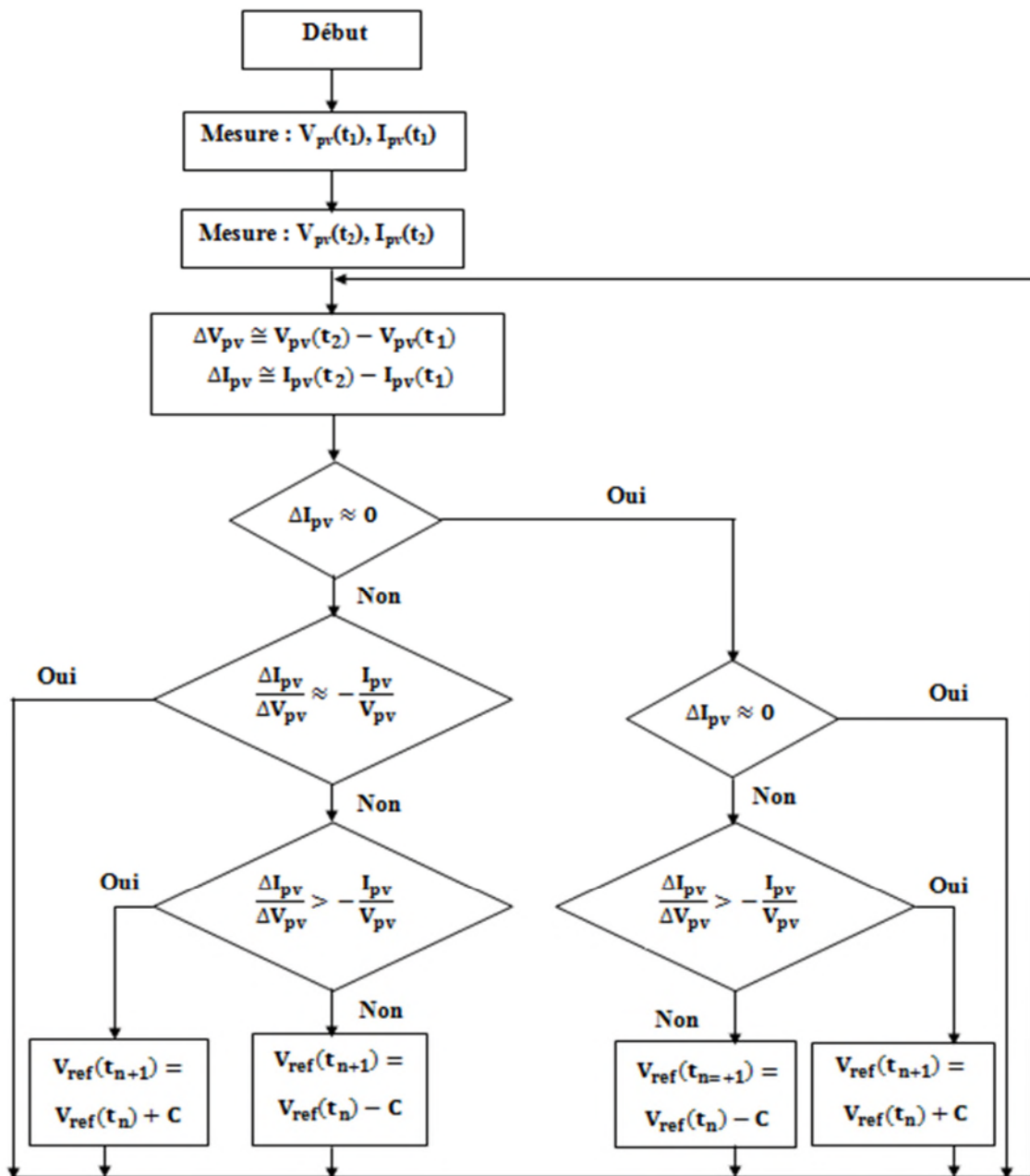


Figure (III.4) Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de conductance.

Théoriquement, avec la méthode de contrôle de type IncCond, il est possible de trouver un PPM et de s'y immobiliser en stoppant la perturbation. Dans ce cas-là, ΔV_{pv} est nul et c'est le contrôle de l'apparition de ΔI_{pv} qui permet de réactiver l'ajustement de la valeur de V_{pv_ref} pour atteindre un nouveau PPM., par exemple lors de variations d'ensoleillement. Ceci constitue en soit une propriété intéressante par rapport au type de MPPT précédent car en régime établi, il n'y a pas de pertes par rapport au PPM. De plus, cette méthode ne présente pas de risques de divergence par rapport au PPM.

III.4 Commandes MPPT basées sur les relations de proportionnalité

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{co} et I_{cc}).

Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

III.4.1 Référence en fonction de V_{oc}

Pour un ensoleillement et une température donnés, la tension qui correspond à la puissance maximale du panneau est exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert du panneau.

Cette technique de recherche du PPM est très simple. Elle consiste à comparer la tension du panneau (V_{pv}) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale (V_{opt}).

L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique, afin de faire coïncider les deux tensions.

La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre V_{opt} et V_{co} d'un module PV :

$$V_{opt} = k_v \times V_{oc} \quad (III.5)$$

Avec k_v correspond à un coefficient de proportionnalité dont sa valeur dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement. Généralement, pour des GPV en Silicium, il est compris entre 0.71 et 0.78. [14]

La tension en circuit ouvert du panneau est prélevée régulièrement par le débranchement du panneau pour une courte durée pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité.

L'avantage est que la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque prend en considération l'insolation et la température, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface des cellules. [14]

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{co} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du GPV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure. [14]

III.4.2 Référence en fonction du courant de court-circuit I_{cc}

Cette méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{opt} et I_{cc} comme le montre l'équation (III.6) :

$$I_{opt} = k_I \times I_{cc} \quad (III.6)$$

Avec K_I correspond à un coefficient de proportionnalité qui dépend là aussi du GPV utilisé et généralement compris entre 0.78 et 0.92 [14].

L'équation (III.6) montre que le courant I_{opt} peut être déterminé par une mesure de I_{cc} et que le PPM peut être atteint en appliquant un courant de référence égale à I_{opt} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure de I_{cc} implique une perte de transfert de puissance due à la mise en court-circuit du GPV. Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop sur ce coefficient.

Ces types de commande ayant besoin uniquement d'un seul capteur. Elles s'avéraient alors plus facile à mettre en œuvre et un peu moins coûteuse que les commandes extrémales citées précédemment. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module (I_{cc} et V_{co}) qui ne peuvent pas se faire trop souvent.

III.5 Méthode à base de la logique floue

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Figure III.5).

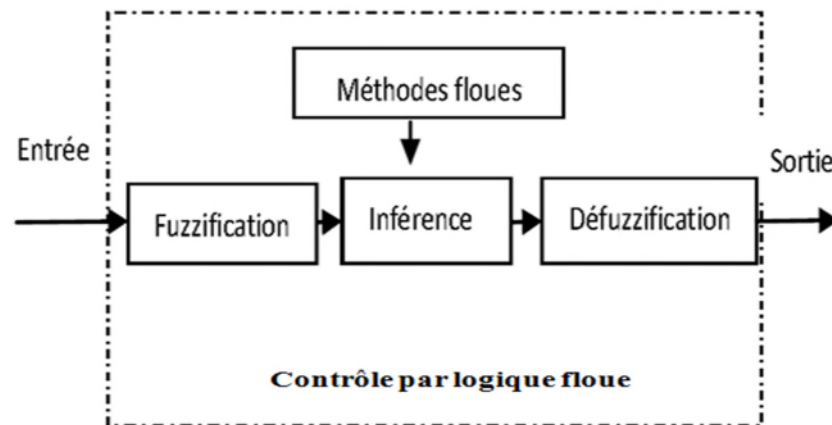


Figure III.5 : Principe de la commande à logique floue.

- **La fuzzification**

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues.

- **L'inférence**

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues avec des degrés différents, ainsi la sortie sera elle aussi définie par plusieurs fonctions.

- **La défuzzification**

La défuzzification est la réalisation de l'opération inverse de la fuzzification, c'est de calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue et c'est le but de la défuzzification.

III.6 Méthodes à base de réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurone et une implémentation artificielle des mécanismes de base observés dans le cerveau, entre neurone. Chaque réseau est constitué par un ensemble d'unités élémentaires interconnectées en parallèle. Chaque élément est capable de réaliser quelques calculs élémentaires selon l'information reçue.

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes, cette méthode fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système.

Elle établit des relations entre variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants. [14]

III.7 Méthodes à base d'algorithme génétique (AG)

Un algorithme génétique standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est extrêmement simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solution) de façon aléatoire. La taille de la population varie d'un problème à un autre, puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction évaluation appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs évolutionnaires simple (croisement et mutation) sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de génération que l'on désire effectuer.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a défini quelques méthodes d'optimisation utilisées pour accélérer la procédure de recherche du point précis de puissance maximale sous des variations des conditions atmosphériques.

D'après cette étude, on peut conclure que pour avoir une meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et pour produire le maximum de puissance, la méthode de poursuite du point de puissance maximale doit être utilisée.

IV.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, la simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink, avec laquelle la chaîne de conversion photovoltaïque a été entièrement modélisée et étudiée. L'application des méthodes MPPT au système global permettra d'optimiser l'énergie photovoltaïque à la sortie du GPV. Les méthodes MPPT étudiées sont: la méthode de la perturbation et d'observation 'P & O' et la méthode de l'incrémentation de la conductance 'Inc-cond'.

Une bonne gestion dans ce type de système est nécessaire, elle permet l'équilibre entre la puissance fournie et la puissance consommée.

IV.2 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque

On voudrait dimensionner un système photovoltaïque destiné pour l'alimentation électrique d'un cabanon, (exposition 45° Sud), la face sud du cabanon en question jouit d'une bonne exposition au soleil. Il peut être occupé par une famille de quatre personnes. Cette maison n'est habitée que ponctuellement, deux à trois mois au cours des vacances d'été.

IV.2.1 Consommation de la charge

L'installation photovoltaïque autonome permettra d'alimenter l'éclairage de la maison, la recharge des appareils portables, un poste radio ainsi qu'un petit réfrigérateur. La documentation technique de ces appareils nous renseigne sur leur consommation:

Appareil	Consommation	Temps de fonctionnement/jour
Ampoule basse consommation	13 W	3 h
Téléphone portable	150 Wh par semaine	/
Ordinateur portable	300 W	1 h
Poste radio	50 W	3 h
Réfrigérateur	300 Wh par jour	12 h
Pompe à eau	3 A sous 48 VDC	40 min
Télévision	90 W	4

Tableau IV.1. Estimation des consommations d'appareils disponible dans le cabanon [15].

$$B_j = \sum(P_i \times t) \quad (IV.1)$$

IV.2.2 Synthèse des consommations

Eclairage (Ah/j)	Eau (Ah/j)	Froid (Ah/j)	Télévision (Ah/j)	Ordinateur (Ah/j)	Poste- radio (Ah/j)	Téléphone portable (Ah/j)	Total (Ah/j) sous 48 V	Total (Wh/j)
3.25	2	6.25	8.33	6.25	3.12	0.45	29.66	1423.68

Tableau IV.2 : Les consommations électriques du cabanon.

IV.2.3 Dimensionnement des modules photovoltaïques

La connaissance de la quantité d'énergie nécessaire, nous permettra de calculer la quantité de modules PV que l'on devra posséder pour couvrir ces besoins. [13]

$$P_{pv\ tot} = \frac{B_j}{\frac{E_j * 1000}{1000} * C_p} \quad (IV.2)$$

Avec :

$P_{pv,tot}$: puissance photovoltaïque totale requise par l'installation (W),

E_j : rayonnement moyen mensuel annuel (kWh/m²/j), (l'énergie journalière de Béjaia, exposition 45° Sud, est de 4.6 kWh/m²/j) [16].

C_p : Coefficient de pertes, ($C_p=0.75$).

Donc la puissance photovoltaïque totale requise par l'installation est :

$$P_{pv\ tot} = \frac{1423.68}{4.6 * 0.75} = 412.66\ W \quad (IV.3)$$

D'où on peut calculer le nombre de panneaux nécessaires par la formule suivante :

$$n_{pv} = \frac{P_{pv\ tot}}{P_{pv,u}} \quad (IV.4)$$

Donc le nombre de panneaux nécessaire est : 4 panneaux.

IV.2.4 Autonomie du système

L'autonomie d'un système PV est la durée pendant laquelle peut fonctionner le système sans que les panneaux PV ne produisent de l'électricité.

La capacité nominale de la batterie est donnée par la relation suivante : [13]

$$C_{\text{bat,tot}} = \frac{B_j * \text{Aut}}{U_{\text{bat}} * \eta_{\text{bat}} * P_d} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$C_{\text{bat,tot}}$: la capacité nominale des batteries (Ah),

B_j : les besoins énergétiques journaliers (Wh),

Aut : le nombre de jour d'autonomie,

U_{bat} : la tension nominale des batteries (V) : ($U_{\text{bat}}=24\text{V}$),

η_b : le rendement énergétique des batteries : ($\eta_b=80\%$) ;

P_d : la profondeur de décharge des batteries : ($P_d=60\%$).

Et le nombre de batteries nécessaires pour le stockage est donné par la relation suivante :

$$n_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat,tot}}}{C_{\text{bat,u}}} \quad (\text{IV.6})$$

Le nombre de batteries nécessaire est calculé par la relation (IV.6), d'où, le nombre de batterie nécessaire est : 2 batteries de 12V branchées en série.

IV.2.5 Profil de consommation

Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil basé sur les habitudes de consommation d'une famille. Ce profil tient compte des périodes d'utilisation au cours de la journée des appareils comme le réfrigérateur basse consommation, la télévision...etc. Le profil de notre charge est représenté dans la figure (VI.1).

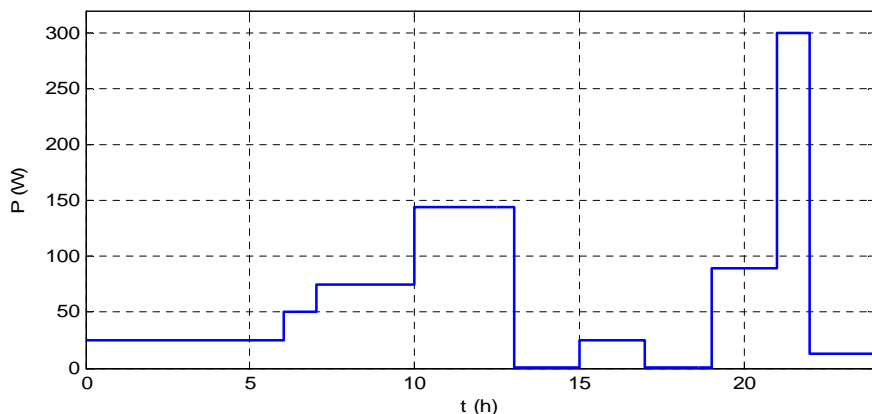


Figure IV.1 : Profil de consommation de la charge.

IV.3 Etude du système global avec les algorithmes MPPT

A l'aide de MATLAB-Simulink, on a réalisé le système global de la figure (IV.1), composé de quatre (4) panneaux photovoltaïques de 110 W chacun et un hacheur Boost contrôlé par une commande MPPT, le système est simulé pour deux méthodes d'optimisation, à savoir, la P&O et la méthode IncCond afin d'effectuer des comparaisons.

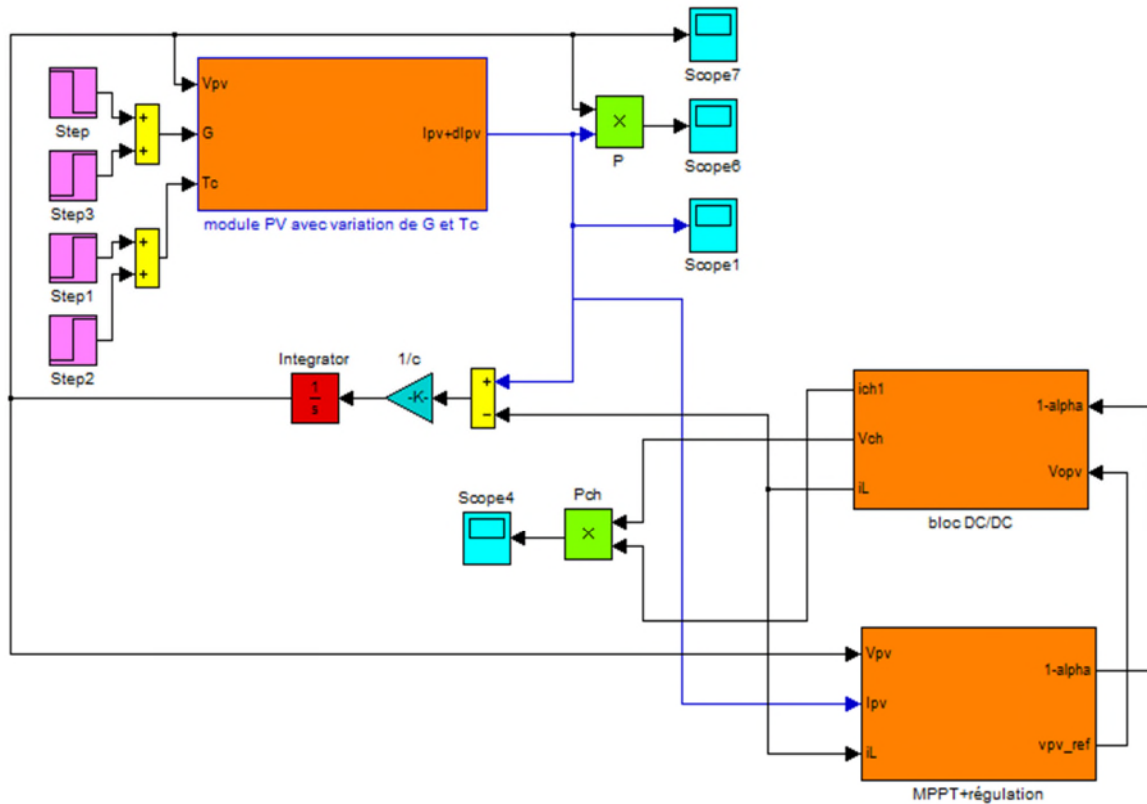


Figure IV.2 : Schéma bloc du système global.

IV.3.1 Fonctionnement dans des conditions constantes (température et ensoleillement)

La simulation est réalisée pour tester les deux méthodes MPPT (P&O et IncCond). Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants durant chaque simulation.

Le but de ces simulations est d'évaluer le temps de réponse de chaque MPPT ainsi de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, les résultats obtenus sont les suivants :

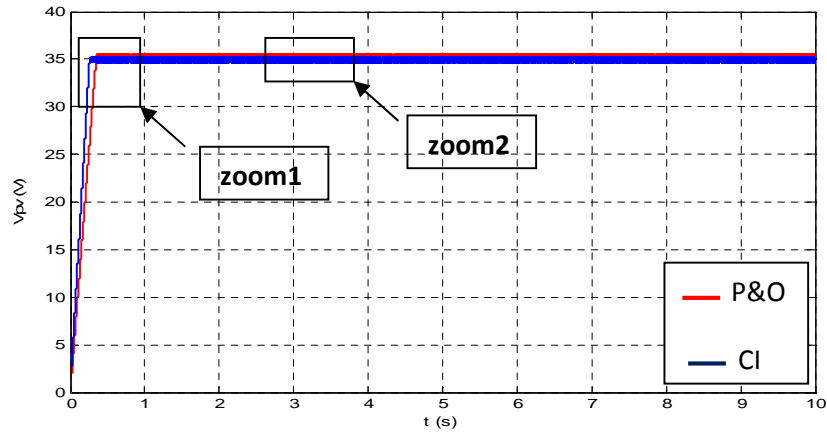


Figure IV.3 : Allure de la tension photovoltaïque.

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent sont présentés sur les figures (IV.3.a et IV.3.b).

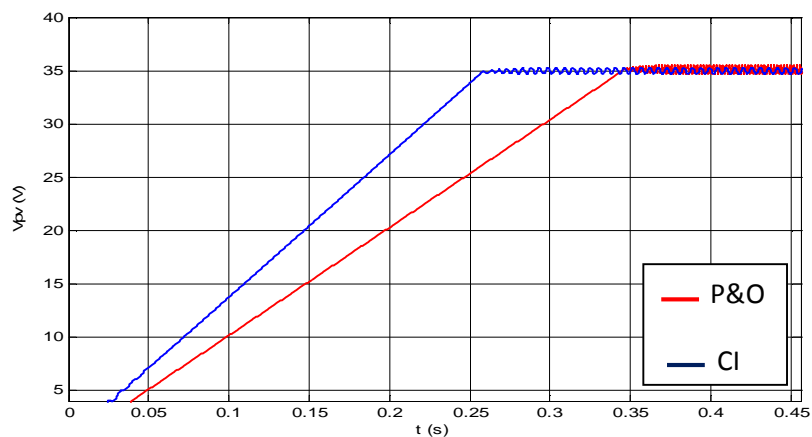


Figure IV.3.a : Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire (zoom1).

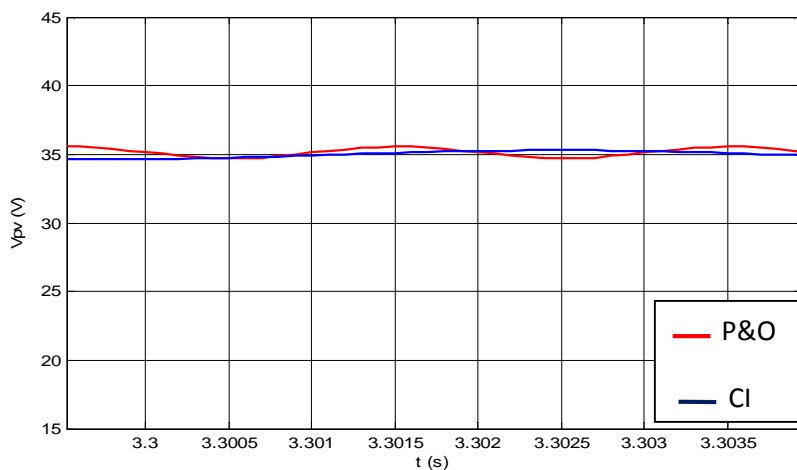


Figure IV.3.b : Zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent (zoom2).

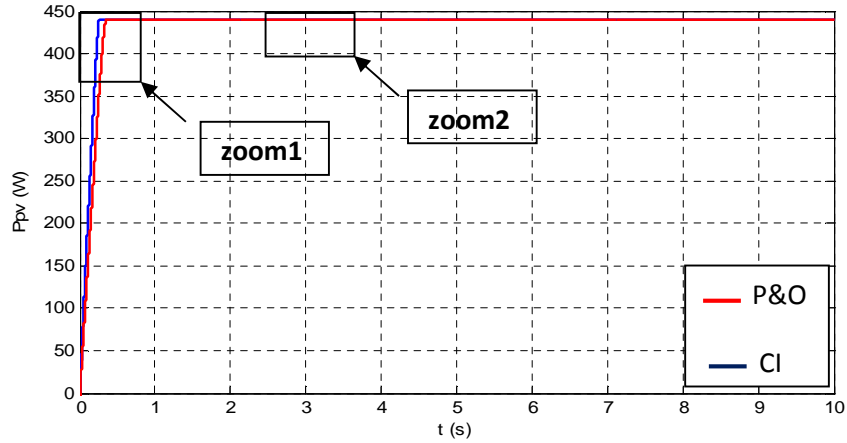


Figure VI.4 : Allure de la puissance photovoltaïque.

Un zoom sur le régime transitoire et le régime permanent sont présentés sur les figures (IV.5.a et IV.5.b)

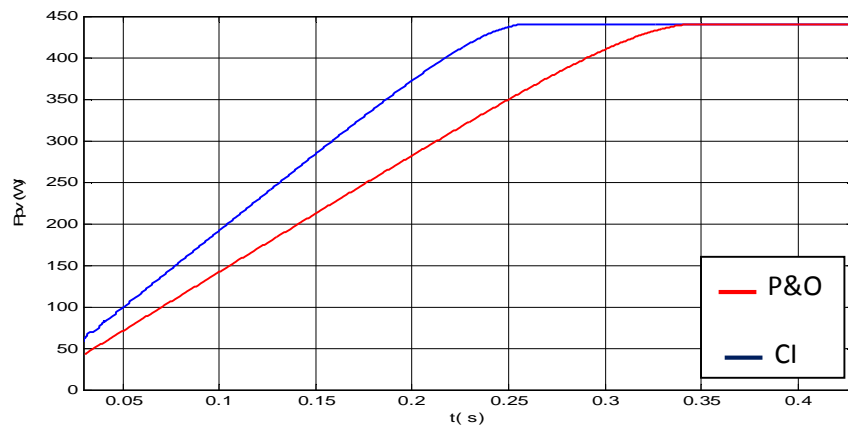


Figure VI.4.a : zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire (zoom1).

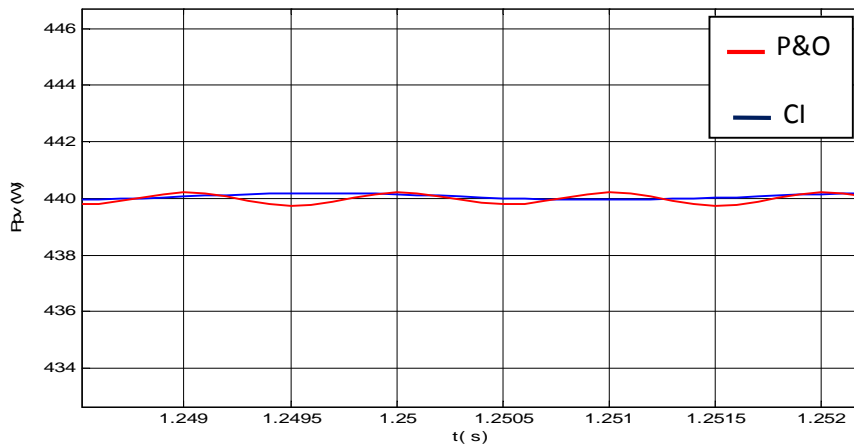


Figure VI.4.b : zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent (zoom2).

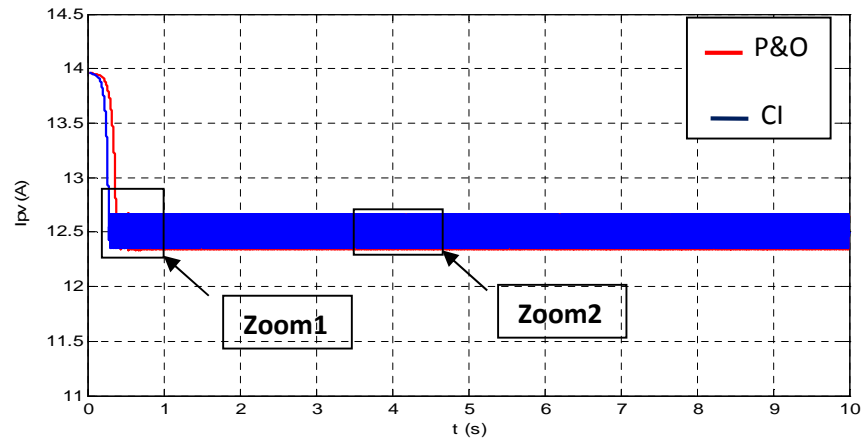


Figure VI.5 : Allure du courant photovoltaïque.

Un zoom sur le régime transitoire et sur le régime permanent sont présentés sur les figures (IV.5.a et IV.5.b)

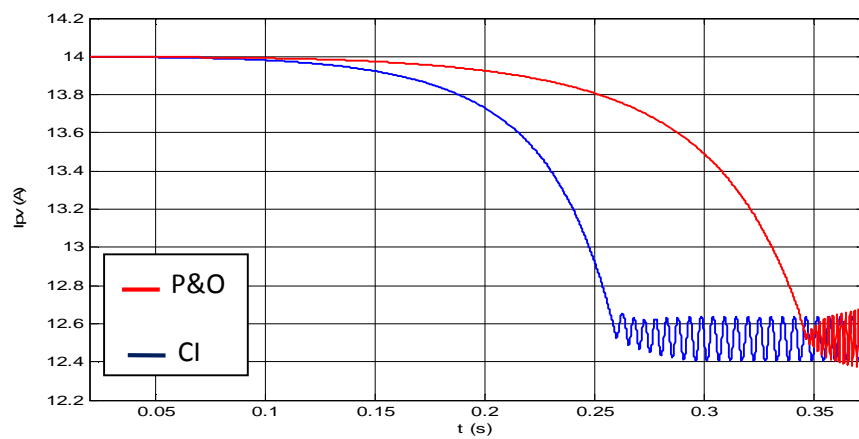


Figure VI.5.a : zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime transitoire (zoom1).

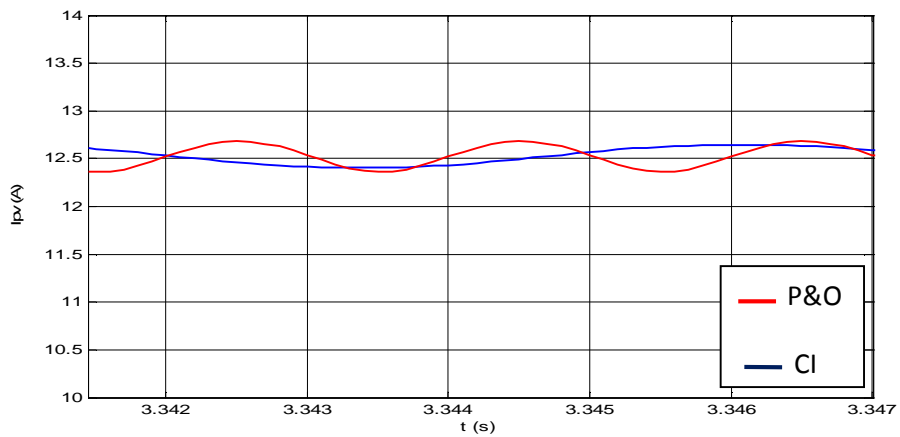


Figure VI.5.b : zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent (zoom2).

IV.3.2 Fonctionnement pour un ensoleillement variable et une température fixée à 25°C

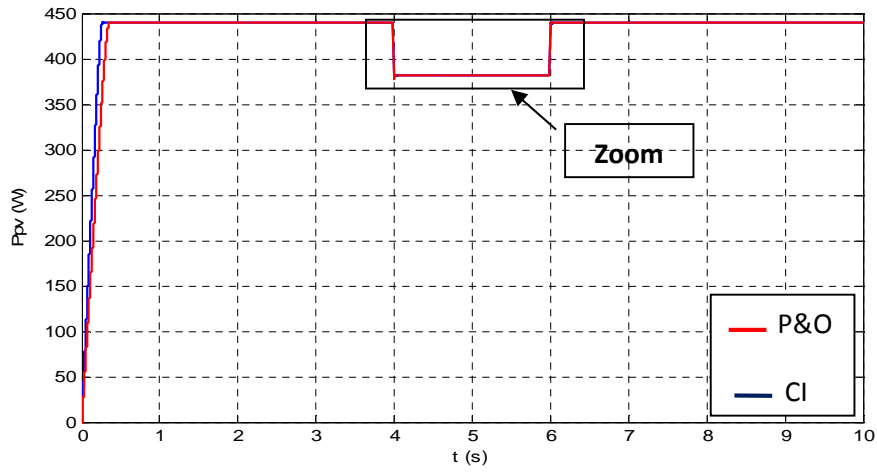


Figure IV.6 : Allure de la puissance photovoltaïque (G variable).

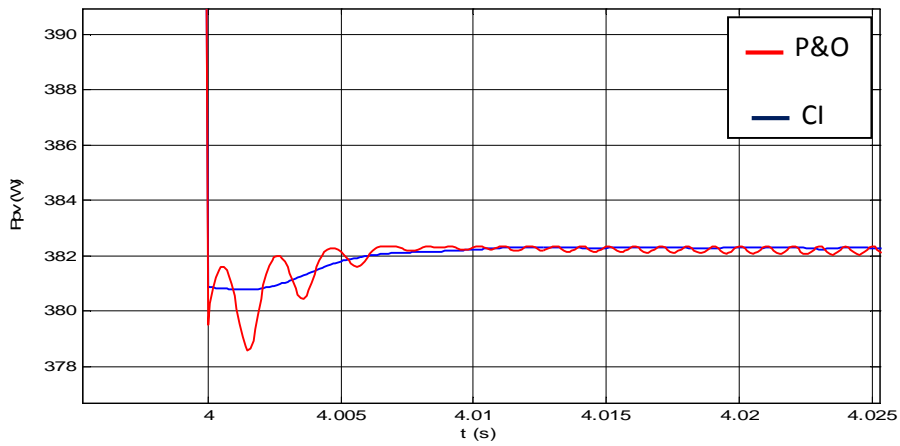


Figure IV.6.a : zoom sur la puissance photovoltaïque en régime permanent.

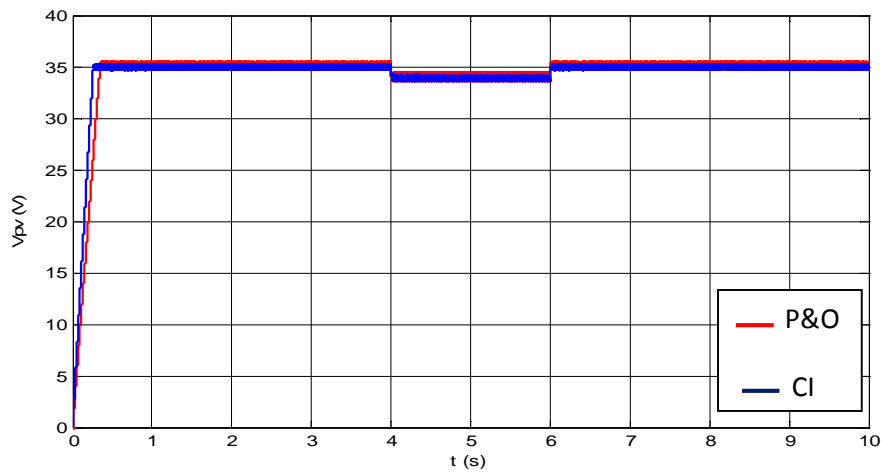


Figure IV.7 : Allure de la tension photovoltaïque (G variable).

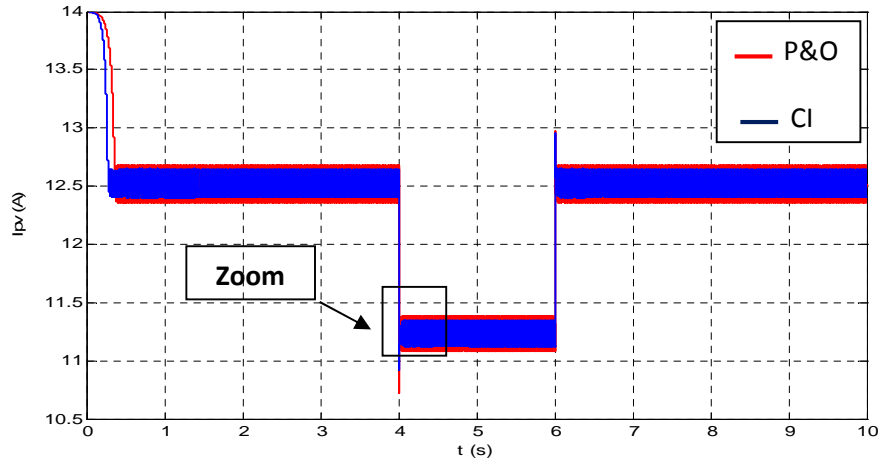


Figure IV.8 : Allure du courant photovoltaïque (G variable).

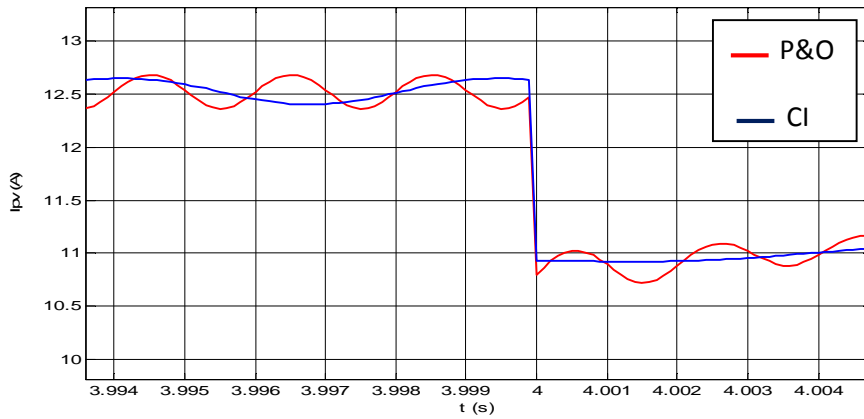


Figure VI.8.a : zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent.

IV.3.3 Fonctionnement pour une température variable et un ensoleillement fixé à $G=1000W/m^2$

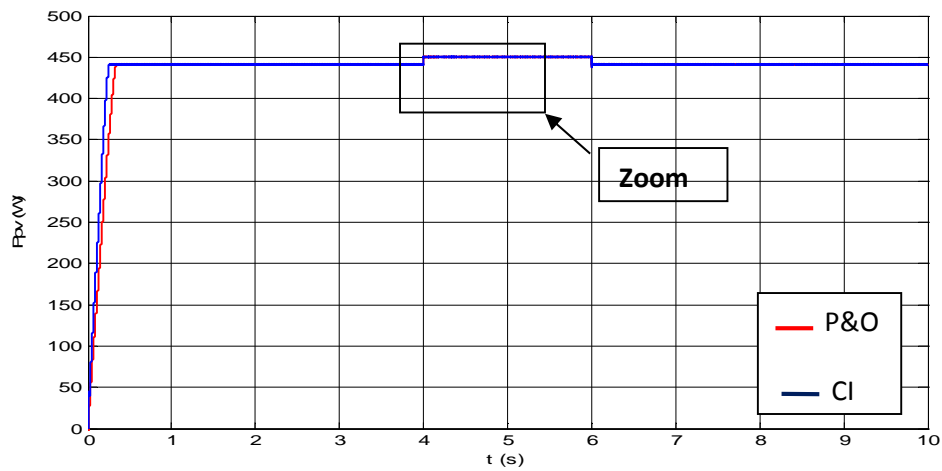


Figure IV.9 : Allure de la puissance photovoltaïque (T variable).

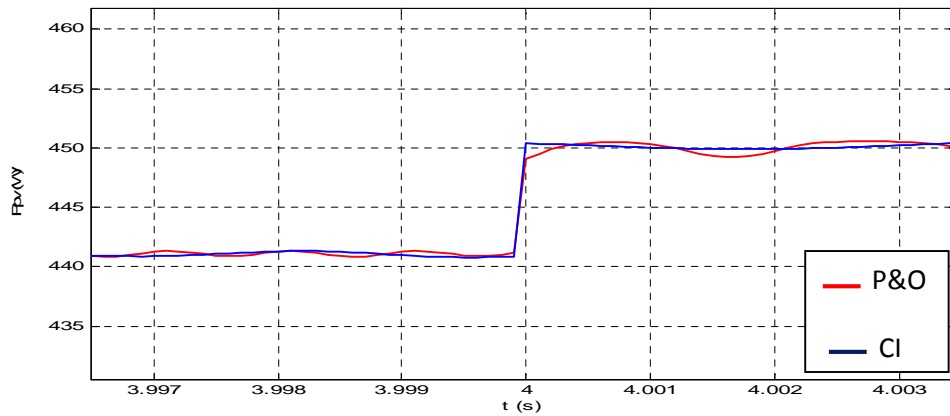


Figure IV.9.a : zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.

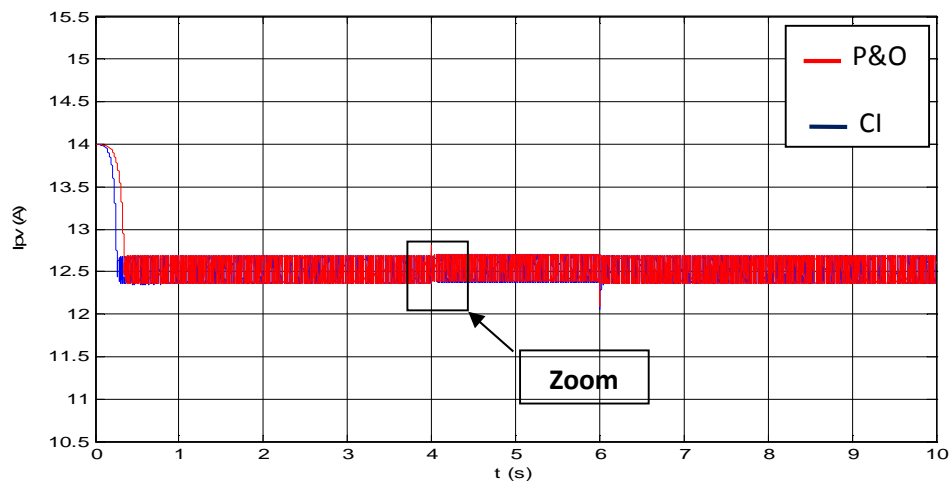


Figure IV.10 : Allure du courant photovoltaïque (T variable).

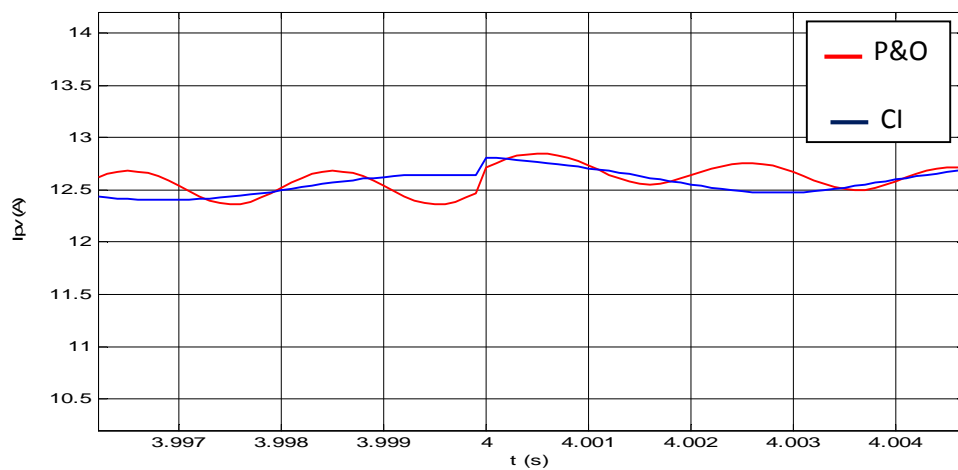


Figure IV.10.a : zoom sur l'allure du courant photovoltaïque en régime permanent.

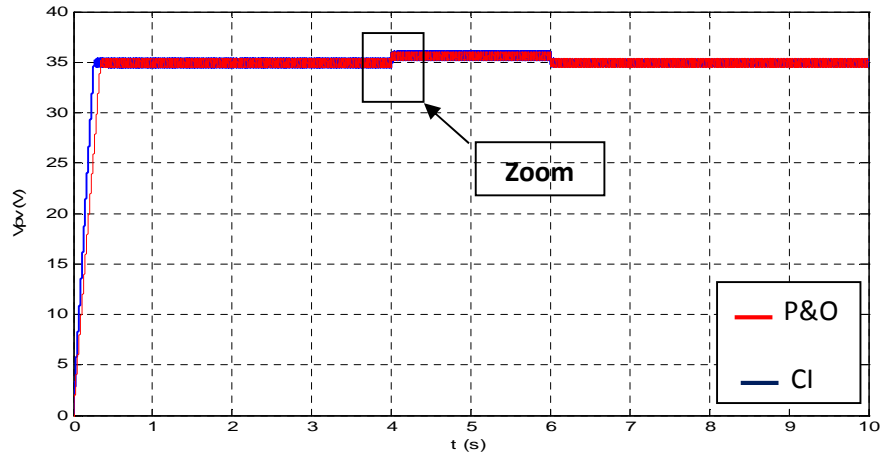


Figure IV.11 : Allure de la tension photovoltaïque (T variable).

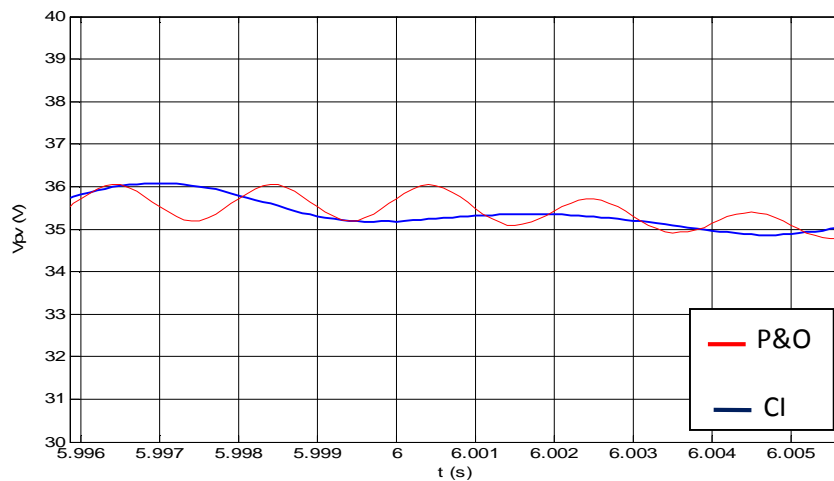


Figure IV.11.a : zoom sur l'allure de la tension photovoltaïque en régime permanent.

Les figures (IV.3-11), montrent la réponse du système pour les deux algorithmes MPPT (P&O et IncCond), pour :

- Les conditions standards de la température et de l'ensoleillement, ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).
- Une variation de l'ensoleillement avec une température constante, ($T=25^\circ\text{C}$).
- Une variation de la température avec un ensoleillement constant, ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

On remarque bien que les réponses du système avec l'algorithme P&O sont plus longues par rapport à l'algorithme IncCond. La perturbation de la tension de fonctionnement pour atteindre le PPM pour la méthode P&O, provoque une perte de puissance, cela à cause des oscillations au régime permanent.

	Algorithme perturbation et observation P&O	Algorithme conductance incrémentielle IncCond
Conditions standards : G=1000W/m² et T=25°C	*La réponse de système est plus lente.	*La réponse de système est plus rapide.
Variation de l'ensoleillement et température constante T	*Elle n'a pas pu suivre exactement la pente de la variation de G.	*Le système répond immédiatement à la variation rapide de l'ensoleillement *Pas de retard *Pas de chute de puissance
Variation de la température T et ensoleillement constante	*Retard de réponse. *Poursuite correcte lors de variation de T.	*Faible retard de réponse très élevé *Correcte poursuite lors de variation de T.

Tableau IV.3 : Tableau de comparaison entre les deux algorithmes P&O et IncCon.

IV.4 Gestion de l'énergie au sein du système

Dans les systèmes réels, la gestion de l'énergie produite et consommée par les différents composants au cours de leurs fonctionnements et généralement assurée par un composant central, auquel les appareils sont connectés via divers convertisseurs.

La figure (IV.12) ci dessous montre le schéma synoptique pour le système de supervision de l'énergie photovoltaïque. En utilisant :

- Un hacheur parallèle contrôlé pour un fonctionnement à puissance maximale.
- Un hacheur série-parallèle (buck /boost) pour contrôler l'énergie stockée ou extraite dans les batteries.
- Un onduleur pour alimenter la charge.
- Des batteries pour stoker ou extraire de l'énergie.

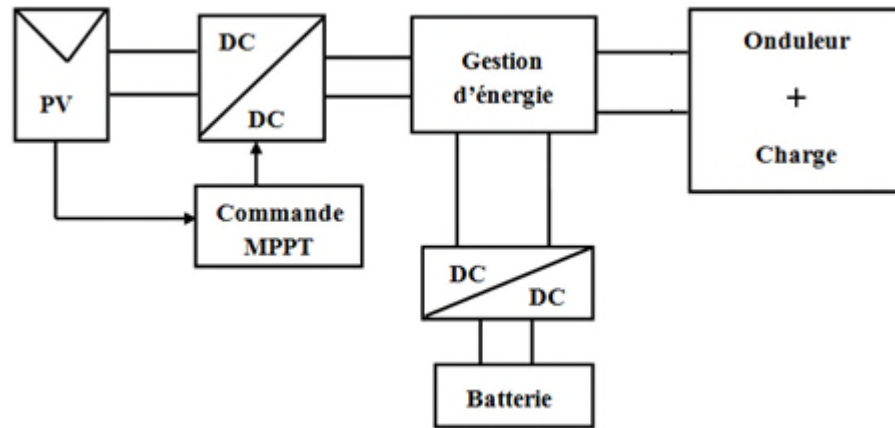


Figure (IV.12) : Système de supervision proposé pour la gestion d'énergie dans le système PV.

L'objectif de cette gestion est d'extraire l'énergie demandée tout en optimisant le transfert d'énergie vers la charge, en tenant compte du profil de charge, de l'état de charge et de décharge des batteries à chaque instant et de la disponibilité de l'énergie PV.

La puissance disponible P_{disp} est calculée selon l'équation (IV.7). On compare entre la puissance produite par les panneaux photovoltaïque (P_{pv}) et la puissance consommée par la charge (P_{ch}). Si la puissance disponible est positive, notre charge est alimentée et les batteries sont mises en état de charge jusqu'à ce qu'elles atteignent un état de charge maximal (EDC_{max}) puis elles se déconnectent. Si P_{disp} est négative, alors la charge est compensée par l'énergie de décharge des batteries jusqu'à ce qu'elles atteignent un état de charge minimal (EDC_{min}) puis elles se déconnectent. Dans le cas P_{disp} est nulle, alors la charge est alimentée directement par les PV.

$$P_{disp} = P_{pv} - P_{ch} \quad (IV.7)$$

Les batteries sont sollicitées dans une plage bornée d'états de charge (EDC) par rapport à toute l'énergie emmagasinée. En effet, on doit assurer leurs protections en évitant d'atteindre trop fréquemment des états de charge extrêmes, en partie responsables du vieillissement prématuré des batteries. Dans le cas d'un système réel la protection des batteries est généralement assurée par un contrôle de leur tension. Elles sont déconnectées si leurs tensions excèdent les bornes EDC_{min} et EDC_{max} fixées préalablement. Cette démarche nécessite un suivi de leur tension en chaque instant. Nous contrôlons donc la bonne marche des batteries en imposant des seuils d'état de charge à ne pas dépasser.

Ainsi :

- Un état de charge minimal EDC_{\min} a été fixé à 30% de la capacité totale des batteries. La tension correspondante est d'environ 10 V.
- Un état de charge maximal EDC_{\max} a été fixé à 90%. La tension correspondante est d'environ 14.6 V.

IV.5 Simulation du système globale

Le système photovoltaïque autonome est composé de 04 panneaux photovoltaïques de 110W, de 02 batteries de stockage de 12V, 150Ah et d'une charge représentant une maison de consommation journalière de 1423.68 Wh/j. Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC, les batteries et la charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliées entre eux d'une manière cohérente. Le point de puissance maximale est contrôlé par la méthode CI. La tension aux bornes du bus continu est maintenue constante avec un régulateur PI à une valeur de référence de 48V.

Les figures (IV.15-23), représentent les résultats de simulation pour une journée de fonctionnement (24h). Les figures (VI.13-15) représentent respectivement l'ensoleillement, la température et la puissance demandée par la charge.

Les figures (IV.16-17), montrent l'évolution de la puissance et du courant photovoltaïque. La puissance de batterie, sa tension, son courant ainsi que son état de charge sont représentées sur les figures (IV.18-21). Les batteries ont un état de charge initial de 50%. Pendant la nuit les batteries se décharge et elles se chargent le jour, l'état de charge de la batterie varie entre 45% et 82%. La tension de la batterie varie entre 21.4V et 25.7V.

Lorsque la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque est supérieure à la puissance de charge, les batteries se chargent. Durant les périodes de production insuffisante, les batteries interrompent leurs cycles de charge et fournissent le supplément d'énergie, elles complètent l'énergie exigée par la charge. La tension du bus continu est montrée sur la figure(IV.22), elle est bien régulée à sa valeur de référence qui est de 48V même lors de variation des conditions environnementales et de la charge.

La figure (IV.24) représente les différentes puissances misent en jeu (P_{pv} , P_{batt} et P_{dis}), les puissances : photovoltaïque, charge, et disponible qui correspond à la différence entre la puissance photovoltaïque et celle de la charge.

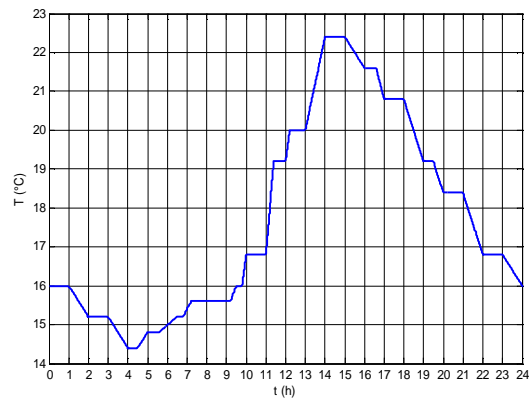
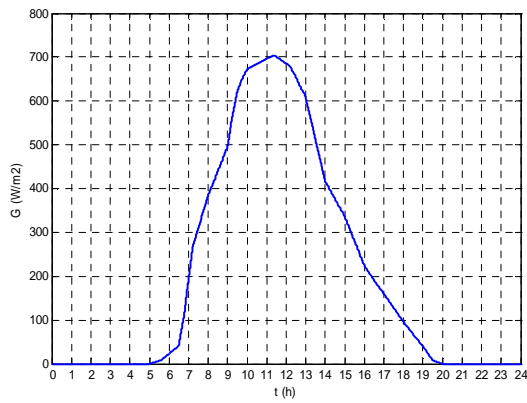


Figure IV.13 : Ensoleillement pendant 24h. **Figure IV.14 :** Température pendant 24h.

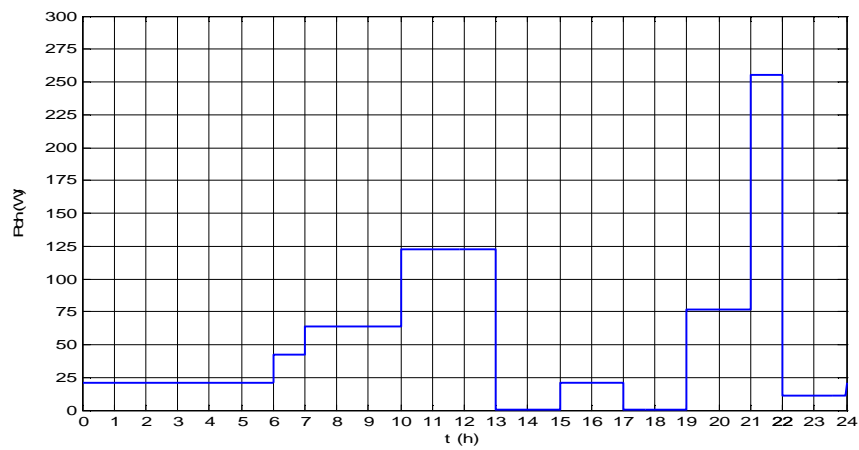


Figure IV.15 : Puissance demandée par la charge.

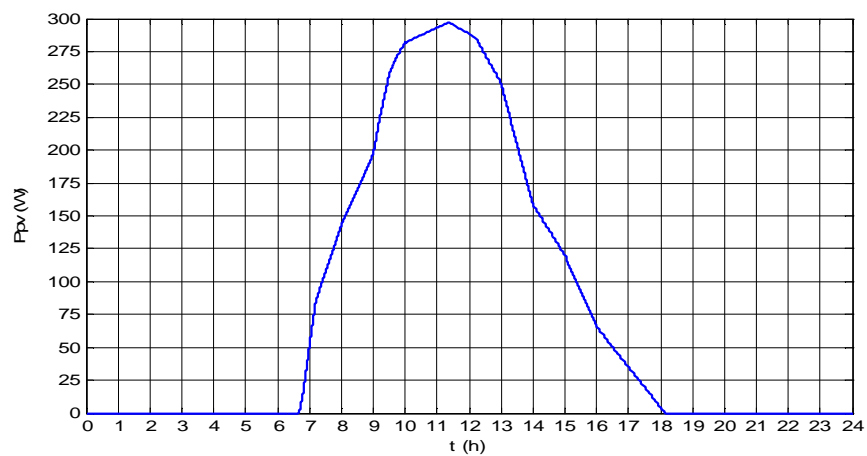


Figure IV.16 : Puissance photovoltaïque

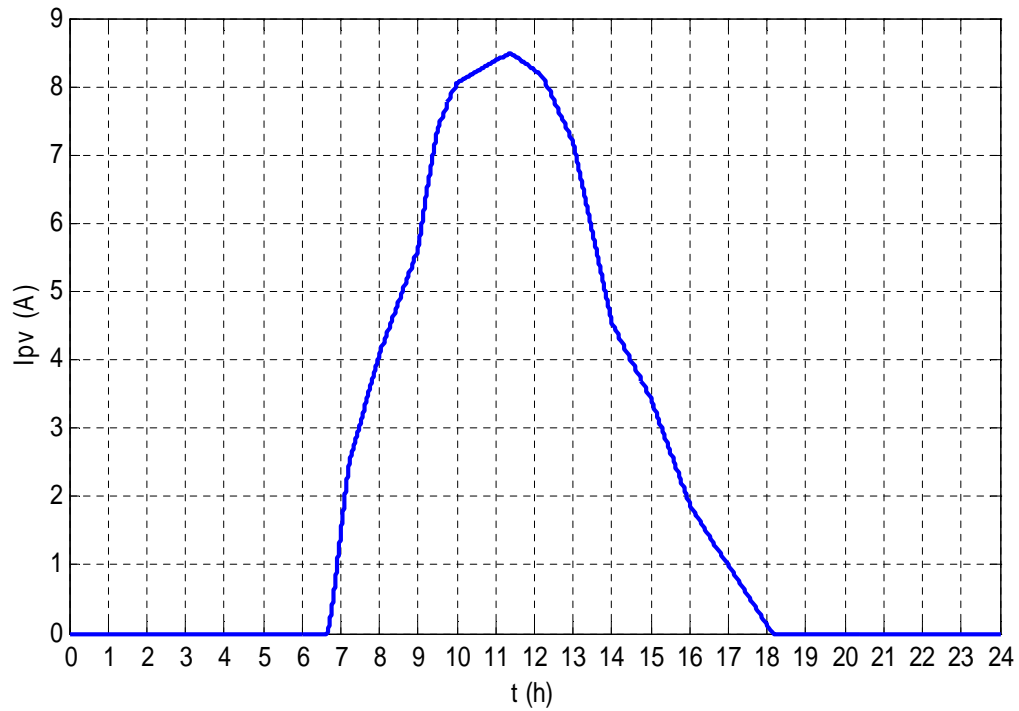


Figure IV.17 : Courant photovoltaïque.

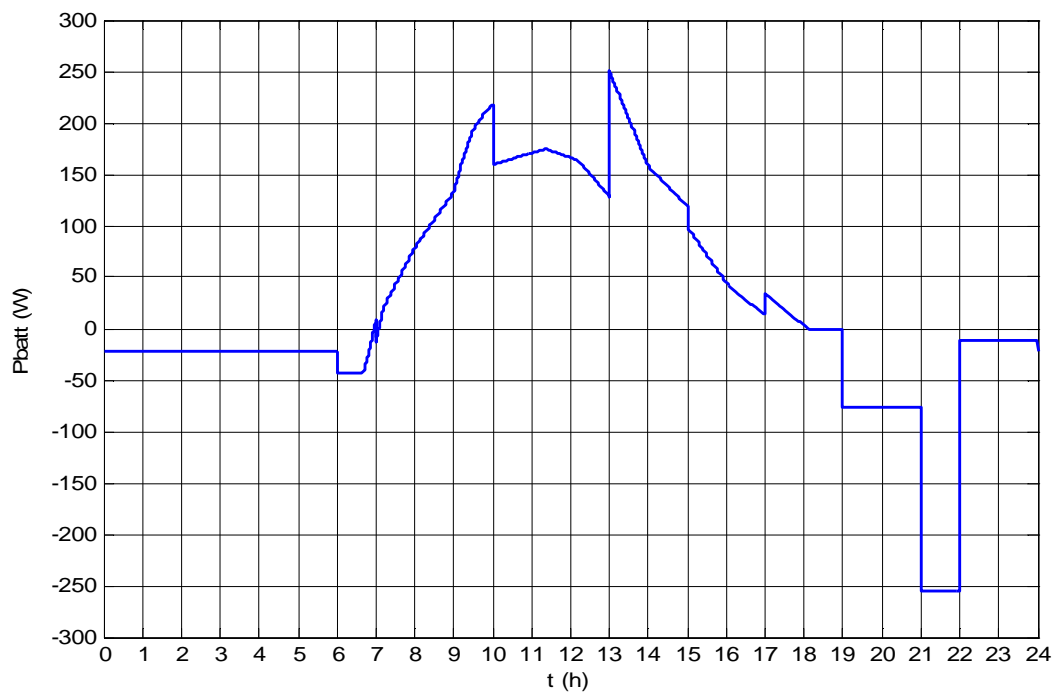


Figure IV.18 : Puissance de la batterie.

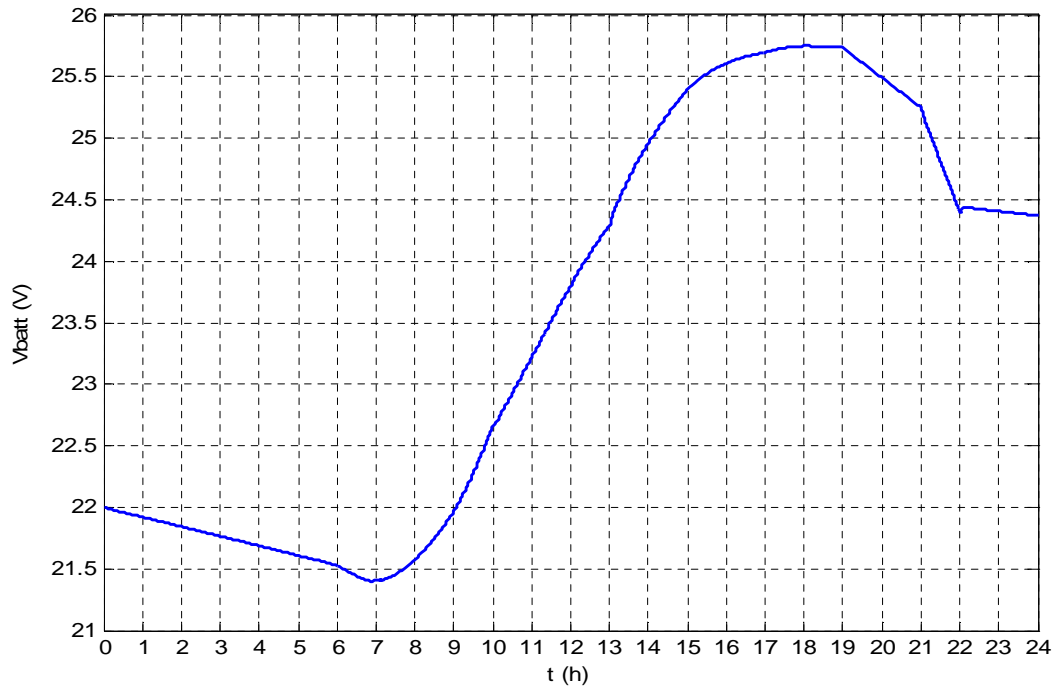


Figure IV.19 : Tension de la batterie.

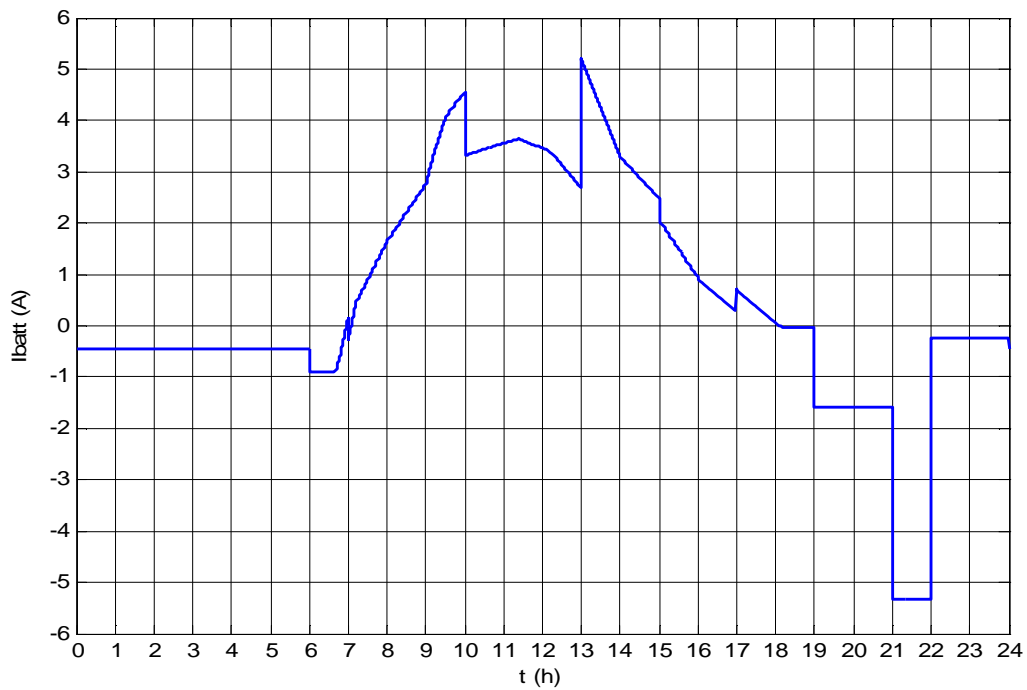


Figure IV.20 : Courant de la batterie.

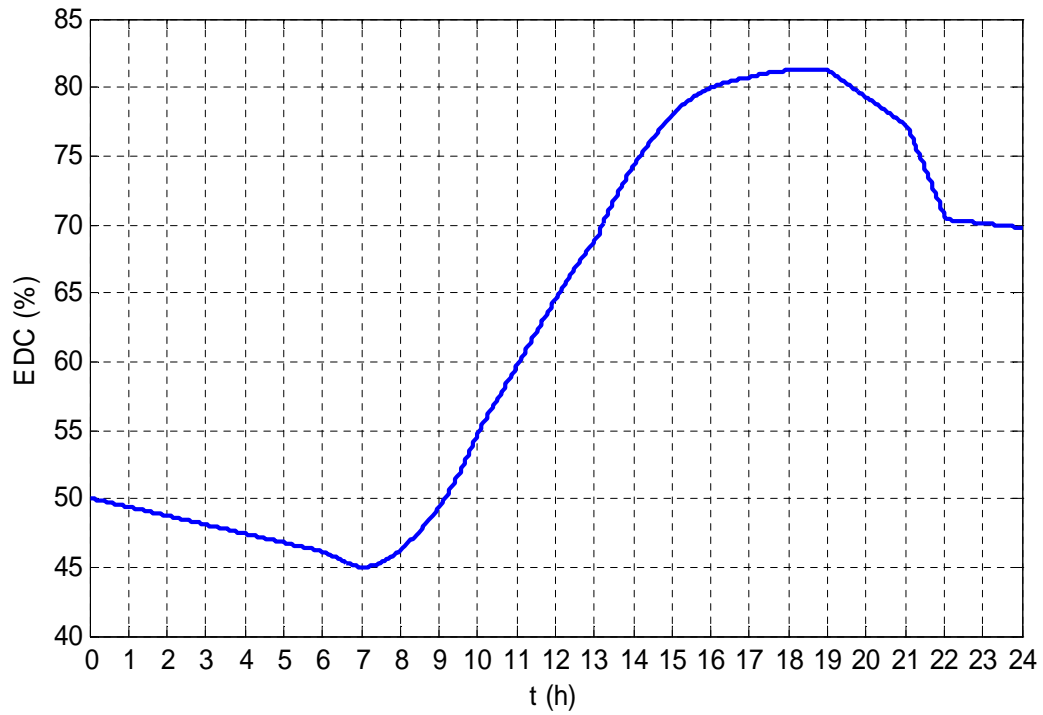


Figure IV.21 : Etat de charge de la batterie.

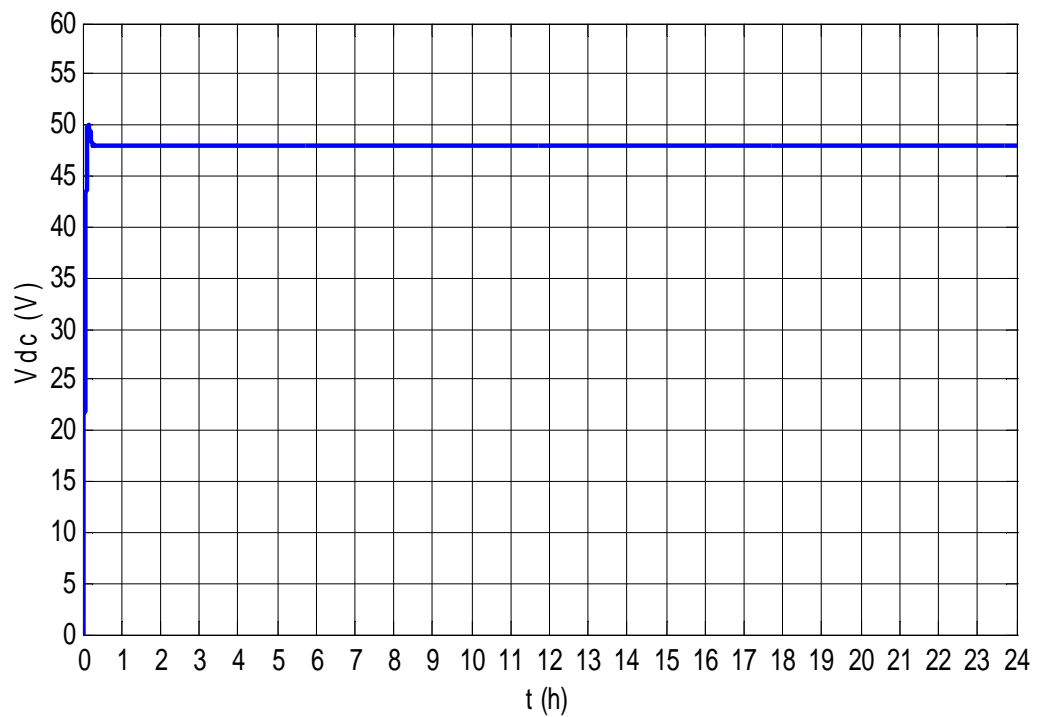


Figure IV.22 : Tension du bus continu.

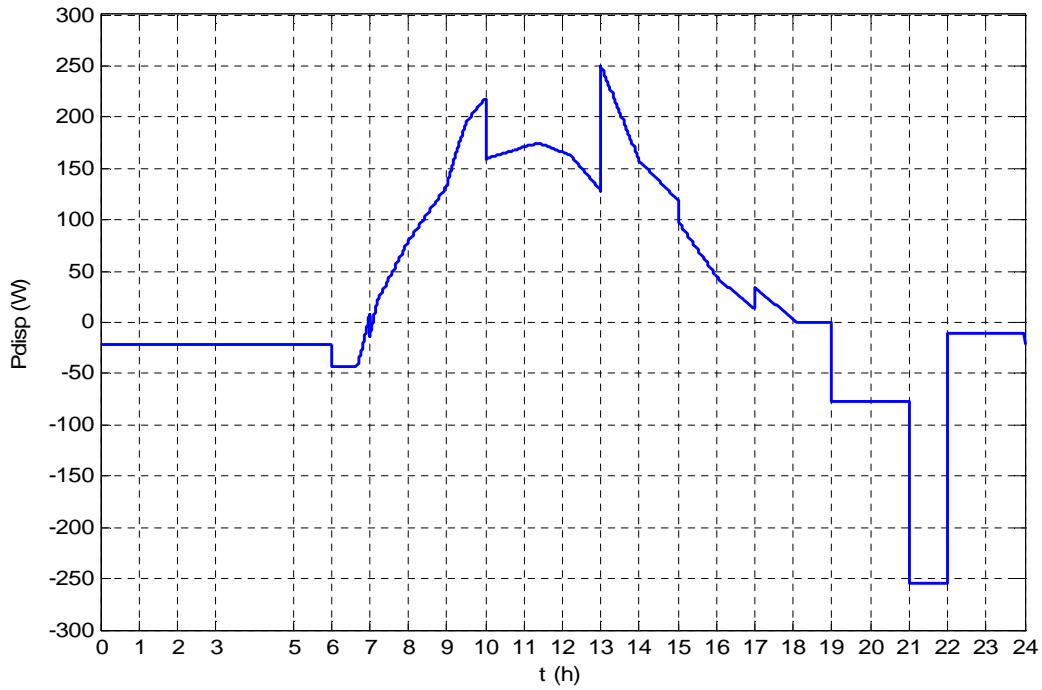


Figure IV.23 : Puissance disponible.

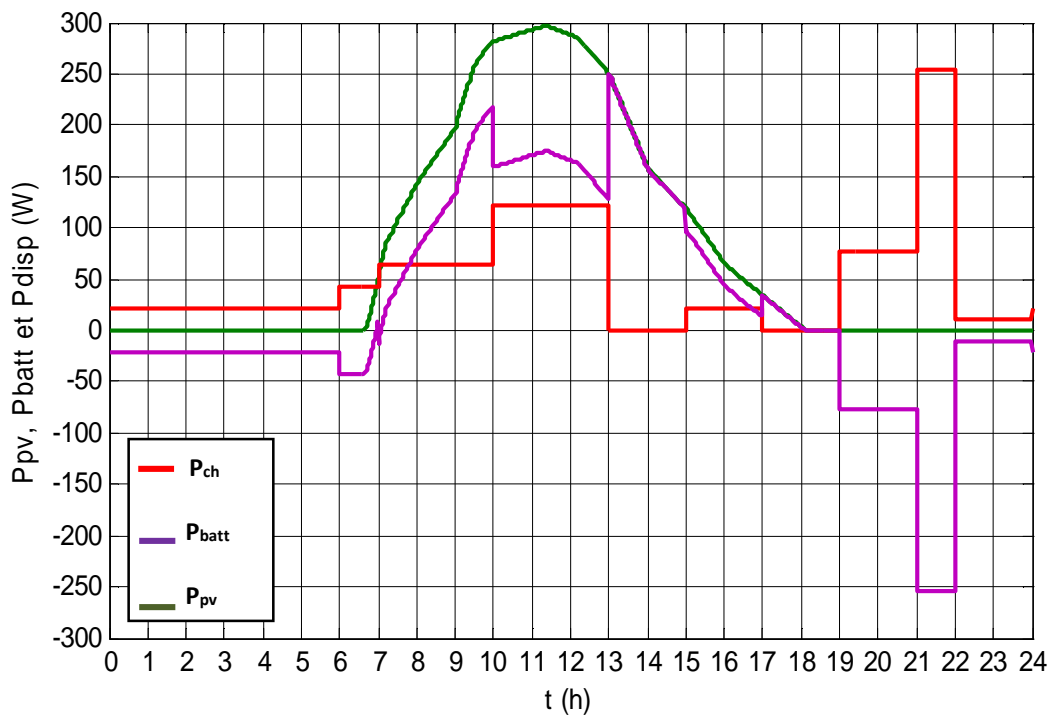


Figure IV.24 : P_{pv} , P_{batt} et P_{disp} (W).

On remarque bien que la commande MPPT mise en œuvre, permet de récupérer le maximum d'énergie quelque soit l'irradiation et la température. On peut donc l'utiliser pour

l'optimisation de notre système autonome. La méthode du MPPT permet ainsi d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

IV.6 Conclusion

Pour un bon fonctionnement du système photovoltaïque et pour avoir un rendement meilleur, l'optimisation devient indispensable.

Les comparaisons entre les algorithmes, P&O et IncCond, montrent que l'algorithme IncCond présente de meilleures performances statiques et dynamiques pour la poursuite du point de puissance maximale.

Pour avoir un équilibre entre la puissance fournie et la puissance consommée, nous devons chercher le meilleur compromis entre la production et la consommation en effectuant une bonne gestion d'énergie.

Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur l'optimisation d'un système photovoltaïque autonome, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, de batteries de stockage d'énergie et de convertisseurs d'énergies, destinés à l'alimentation d'une charge domestique (cabanon).

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques et une modélisation des différents composants du système autonome a été faite en chapitre II.

Nous avons décrit par la suite, le mécanisme de la poursuite pour l'extraction d'une puissance maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. Nous avons aussi présenté quelques algorithmes MPPT destinés à l'optimisation des systèmes photovoltaïques. Deux ont été sélectionnées les méthodes (P&O et IncCond) pour effectuer une étude comparative de point de vue performances statiques et dynamiques. Les résultats obtenus ont montrés la robustesse de la méthode IncCond vis-à-vis des variations des conditions climatiques.

Le dimensionnement de l'installation photovoltaïque est la recherche de l'équilibre entre la satisfaction de la demande énergétique et la puissance à installer, cependant une bonne gestion dans le système, permet l'extraction de l'énergie demandée tout en optimisant le transfert d'énergie vers la charge.

Suite à ce travail, nous avons acquis des connaissances concernant la maximisation d'énergie d'un système photovoltaïque, qui fait l'objet actuel des recherches.

Comme perspectives, il serait intéressant de faire l'optimisation de l'énergie photovoltaïque en utilisant d'autres techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones artificielles, les réseaux neuro-flous et les algorithmes génétiques, pour une extraction maximale de l'énergie photovoltaïque.

Références bibliographiques

- [1] A.T.Singo, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-1 2010.
- [2] A.Labouret, M.Villoz, «Energie solaire photovoltaïque (Le manuel professionnel)» édition DUNOD, Paris (France), août 2003.
- [3] D.Bellala, «Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie, application aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat de l'université de Batna, 2009.
- [4] R.P.Mukund, «Wind and Solar Power Systems», Ph.D, P.E U.S merchant Marine.
- [5] A.buyers, «Les systèmes photovoltaïques» guide, Canada 2002.
- [6] Mark Hankins, «Installations solaires photovoltaïques autonomes, conception et installation d'unités non raccordées au réseau». Édition DUNOD, 2012.
- [7] C.Bernard, C.Sebrão-Oliviera, B.Laval, «Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue ». Rapport rédigé dans le cadre de l'UV Ba04-énergies renouvelables, 2009.
- [8] A.Cid-Pastor, «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse III, 2006.
- [9] Tom Markvart & Luis Castaner, «Handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications» ELSEVIER, 2003.
- [10] M.Kerchi, M.Smaïli, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA » Mémoire de Magister, école nationale polytechnique, 2009.
- [11] I.Bendjamâa, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de Magister, Université ABOU-BAKR BELKAID -TLEMCEM-Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables-ECOLE DOCTORALE : énergies renouvelables, 2012.
- [12] Y.Ouadfel, L.Kerdouche, « Etude et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur de l'université de Béjaia, 2011.

- [13] M.Keciri, N.Benmessaoud, « Etude et modélisation de puissance d'un système photovoltaïque » Mémoire de Master de l'université de Béjaia, 2014.
- [14] K.Djermouni « Etude d'algorithmes MPPT appliqués aux systèmes de pompage Photovoltaïque », Mémoire de Master de l'université de Béjaia, 2010.
- [15] FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé » édition EDISUD, 1983.
- [16] S.Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de Doctorat de l'université de Béjaia, 2009.