

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electronique



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Electronique

Option : Microélectronique

Présenté par

Mr TARGANT Lyes & Mr KHALEF Sofiane

Thème :

**Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au
réseau électrique**

Devant le jury d'examen :

M ^{me} Hatem Djedjiga	M.C.A, UMMTO	Promotrice
M ^{me} Sidi Said Amel	M.C.B, UMMTO	Présidente
M ^r Si Brahim Madjid	M.C.B, UMMTO	Examineur

2017/2018

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour terminer ce modeste travail.

Il nous est agréable d'exprimer nos profondes reconnaissances ainsi que nous sincère gratitude à tous ceux qui nous ont encouragé et qui ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail et particulièrement à :

Notre promotrice, M^{me} HATEM Djedjiga pour sa disponibilité et ses précieux conseils répétés, d'être très serviable avec nous, et pour toute l'aide rapportée durant les étapes de réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier la présidente et les membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail

*L'ensemble des enseignants de l'**UMMTO**.*

A tous les enseignants qui nous ont enseigné durant toutes les étapes scolaires de notre vie,

UN GRAND MERCI.

Dédicaces

*J'ai toujours voulu offrir quelque chose à mes parents en
guise de reconnaissance pour avoir faits de moi l'homme que
je suis aujourd'hui, Et voilà, l'occasion est venue ;*

*À mes parents qui m'ont donné la vie, symbole de fierté, de
sagesse et de patience,*

*À mes parents qui sont la source de mon inspiration et de
mon courage,*

À qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

À mes très chers frères Ghiles, Ahmed ;

À mes chère tantes et oncles, cousins et cousines ;

À mes amis ; Hmimiz, Nounou, Omar, Mohand ;

À toutes l'équipe du bloc F spécialement F09 ;

À mon binôme Lyes ;

Et à tous ceux avec qui j'ai passé des moments

Alistar

Dédicaces

*J'ai toujours voulu offrir quelque chose à mes parents en
guise de reconnaissance pour avoir faits de moi l'homme que
je suis aujourd'hui, Et voilà, l'occasion est venue ;*

*À mes parents qui m'ont donné la vie, symbole de fierté, de
sagesse et de patience,*

*À mes parents qui sont la source de mon inspiration et de
mon courage,*

À qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

À mes très chers Grands Parents ;

À ma très chère sœur qui a toujours été présente pour moi,

À mon petit soleil, à mon très cher frère Nabil,

À mes très chers frères Yacine, Ghani,

À mon beau-frère Sofiane et à ma belle-sœur Amel,

À mes oncles, mes tentes, mes cousins et cousines ;

À mes amis Yacine, Zinou, Kariis, Oualid, Alister, Chérif,

Khaled, Nounou ;

À mon binôme KHALIF Sofiane

*Et à tous les Microniciens, c'était deux des meilleures années de
ma vie ;*

Lyes

C'est à elle que je dédicace ce travail.



Pour les constants encouragements répétés qu'elle m'a donnés, l'enthousiasme qu'elle a partagé avec moi pendant tout le temps que j'ai consacré au projet, et son doux sourire, dont elle m'entoure encore.

LK

Liste des figures :

Figure I.1: schéma d'une cellule élémentaire -----	5
Figure I.2: Association des modules en série -----	8
Figure I.3:Caractéristique résultante d'un groupement en série d'une cellule identique -----	8
Figure I.4: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques ----	9
Figure I.5: Association mixte des modules -----	10
Figure I.6: Caractéristique d'un groupement mixte-----	10
Figure I.7: schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle -----	11
Figure I.8: caractéristique courant-tension $I(v)$ -----	11
Figure I.9:caractéristique puissance-tension $P(v)$ -----	12
Figure I.10: Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire définitions les paramètres photovoltaïques-----	14
Figure I.11: Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000W/m^2$ ----	14
Figure I.12: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^\circ C$ -----	15
Figure I.13: Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique $I(V)$	15
Figure I.14: Influence de R_s sur la caractéristique $I(V)$ à $T=25^\circ C$ et $E=1000W/m^2$ -----	16
Figure I.15:Influence de facteur de qualité sur la caractéristique $I(V)$ -----	16
Figure I.16: installation PV connectée au réseau -----	17
Figure II.1: Symbole d'un convertisseur DC-DC -----	21
Figure II.2 : Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques. -----	22
Figure II.3: Symbole et signaux du convertisseur DC/DC-----	22
Figure II.4: Schéma de convertisseur élévateur « Boost » -----	23
Figure II.5: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost. -----	24
Figure II. 6: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.-----	24
Figure II.7: Schéma électrique boost ouvert.-----	25
Figure II.8:Schéma électrique d'un convertisseur boost-----	25
Figure II.9: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck -----	26
Figure II.10:Schéma électrique d'un hacheur buck fermé. -----	27
Figure II.11:Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert. -----	27
Figure II.12:schéma électrique d'un convertisseur buck-boost. -----	28
Figure II.13:Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.-----	29
Figure II.14:Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque -----	29
Figure II.15: Algorithme d'incrémentatation de la conductance -----	32
Figure II.16:Algorithme Perturb Observe (P&O) -----	33
Figure II.17: Schéma explicatif de MPPT-----	34
Figure III.1: principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau -----	36
Figure III.2:Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont. -----	37
Figure III.3:Schémas de principe d'un onduleur central -----	38
Figure III.4:Schémas de principe onduleur string-----	39
Figure III.5:Exemples d'installations photovoltaïques ayant besoin de plusieurs onduleurs. ----	39
Figure III.6:Onduleur intégré au PV -----	40
Figure IV.1: Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau.-----	47
Figure IV.2: GPV relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur-----	48
Figure IV.3: circuit équivalent d'un module PV -----	48
Figure IV.4: circuit électrique d'un hacheur survolteur (boost) -----	49
Figure IV.5: convertisseur DC/AC -----	49
Figure 6-----	49
Figure IV.7: Schéma block de la simulation sous Simulink -----	51

Figure IV.8 : Schéma de simulation du PV sous simulink.-----	54
Figure IV.9: Schéma block du hacheur survolteur.-----	54
Figure IV.10: Schéma block de la commande MPPT sous simulink. -----	55
Figure IV.11: Schéma block de l'onduleur triphasé. -----	55
Figure IV.12: Allure de la caractéristique (I-V) à ensoleillement variable-----	57
Figure IV.13: Allure de la caractéristique (P-V) à ensoleillement variable. -----	57
Figure IV.14: Allure de la caractéristique (I-V) à température variable. -----	58
Figure IV.15: Allure de la caractéristique (P-V) à température variable. -----	58
Figure IV.16: Variation de l'éclairement à une température fixe (25°C). -----	59
Figure IV.17: Allure de la puissance du panneau photovoltaïque Ppv -----	60
Figure IV.18: Allure de la tension du panneau photovoltaïque Vpv -----	60
Figure IV.19: Allure du courant panneau photovoltaïque Ipv. -----	60
Figure IV.20: caractéristique P(V) du panneau photovoltaïque -----	61
Figure IV.21: Variation de la température à une irradiance fixe (1000 W/m ²). -----	61
Figure IV.22:Allure de la puissance photovoltaïque Ppv à Irradiance fixe (1000 W/m ²).-----	62
Figure IV.23: Allure de la tension photovoltaïque Vpv.-----	62
Figure IV.24: Allure du courant photovoltaïque Ipv. -----	62
Figure IV.25: Allure de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension photovoltaïque Ppv(Vpv) -----	63
Figure IV.26: Variation de la température et de l'ensoleillement -----	64
Figure IV.27: Allure de la puissance du panneau Ppv -----	64
Figure IV.28: Allure de la tension du panneau Vpv.-----	65
Figure IV.29: Allure du courant photovoltaïque Ipv. -----	65
Figure IV.30:Allure du rapport cyclique la commande MPPT (D) -----	65
Figure IV.31: Allure de la tension du bus Vdc-----	66
Figure IV.32: Allure de la puissance active fournie au réseau. -----	66
Figure IV.33: Allure de la puissance réactive du réseau. -----	66
Figure IV.34: Allure de la tension extraite du réseau-----	67
Figure IV.35: Allure du courant extrait du réseau-----	67

Liste des tableaux

Tableau I.1:différent types des cellules inorganiques-----	6
Tableau I.2: tableau récapitulatif des cellules organiques -----	7
Tableau II.1:récapitulatif des méthodes utilisées -----	31
Tableau III.1:: Caractéristiques techniques des différents systèmes de configurations. -----	40
Tableau III.2: caractéristiques tension de la batterie -----	43
Tableau III.3:caractéristique des batteries solaires. -----	43
Tableau IV.1: Paramètres du panneau photovoltaïque -----	52



Liste des notations et symbole

- I_{ph} : photo- courant.
- I_d : Courant traversant la diode.
- n : Facteur de qualité.
- q : Charge d'électron.
- E : L'éclairement.
- K : La constante de Boltzmann.
- K_1 : Coefficient de la température du courant de court-circuit.
- V_T : Tension thermique.
- I_S : Courant de saturation.
- I_{RS} : Courant de saturation réversible.
- V : Tension aux bornes de la diode.
- T : Température absolue (en kelvin).
- T_{ref} : Température de référence de la cellule.
- E_g : Energie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule.
- R_S : La résistance séries.
- R_p : La résistance parallèle.
- N_S : Nombre de module en série.
- N_P : Nombre de module en parallèle.
- V_{pv} : tension à la sortie du générateur PV
- I_{pv} : Courant à la sortie du générateur PV
- P_{pv} : Puissance à la sortie du générateur PV
- V_m : L'amplitude de la porteuse
- F_{abc} : Fonctions de commutation des interrupteurs.
- V_{dc} : Tension continue appliquée à l'onduleur.
- $V_{ab,bc,ca}$: Tensions composées.
- m : L'indice de modulation.
- $V_{ref,bref,cref}$: Tensions de référence.
- $V_{a,b,c}$: Tensions de phase du réseau.
- $I_{a,b,c}$: Courants de phase du réseau.

Abréviations :

- MPPT: Poursuit du point de puissance maximale.
- PV: Photovoltaïque.
- GPV: Générateur Photovoltaïque.
- PPM: Point de Puissance Maximale.
- MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion.
- P&O: Perturbation et Observation.

- DC: Courant Continu (Direct Current).
- AC: Courant Alternatif (Alternative Current).



Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Définition des systèmes photovoltaïque :	5
I.2 L'effet photovoltaïque :	5
I.3 La cellule solaire :	6
3.1 Cellules inorganiques :	6
3.2 Cellules de Grätzel :	6
3.3 Cellules organiques:	7
I.4 Association des panneaux PV:	8
4.1 Association en série :	8
4.2 Association en parallèle :.....	9
4.3 Association mixte (série-parallèle) :.....	9
I.5 Caractéristiques électriques photovoltaïque :	11
5.1 Caractéristique courant-tension (V) :	11
5.2 Caractéristique puissance-tension P(V) :	12
I.6 Paramètres photovoltaïques :	12
6.1 Le courant de court-circuit (I_{cc}) :	12
6.2 Tension du circuit ouvert (V_{co}) :	13
6.3 Le facteur de forme	13
6.4 Le rendement:.....	13
I.7 Paramètres influençant sur le fonctionnement du module PV	14
7.1 Influence de et la température :.....	14
7.2 Influence de l'éclairement :	15
7.3 Influence du facteur de qualité :.....	16
I.8 L'installation photovoltaïque :	17
I.9 Protection des modules photovoltaïques :	17
I.10 Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque :	18
I.11 Avantages et inconvénients d'une installation PV	18
11.1 Avantage :	18
11.2 Inconvénient :	19
Conclusion	19

Chapitre II: Convertisseur DC-DC

Convertisseurs DC/DC -----	21
II.1 Introduction-----	21
II.2 Les convertisseurs statiques-----	21
2.1 Définition-----	21
2.2 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques -----	22
II.3 Les types des convertisseurs de tension DC/DC « HACHEUR » -----	22
3.1 Convertisseur élévateur « BOOST » -----	23
3.2 Convertisseur abaisseur « BUCK »-----	25
3.3 Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST » -----	28
Maximum Power Point tracking (MPPT) :-----	28
II.4 Introduction :-----	28
II.5 Principe de fonctionnement-----	28
II.6 Classification des MPPT :-----	30
6.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche-----	30
6.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée-----	30
II.7 Les algorithmes MPPT :-----	31
7.1 Méthode de conductance incrémentale (IncCond) :-----	31
7.2 Algorithme Perturbation & Observation (P&O) :-----	32
Conclusion :-----	34

Chapitre III Les onduleurs PV et la gestion d'énergie

LES ONDULEURS -----	36
III.1 Introduction :-----	36
III.2 Principe de fonctionnement :-----	36
2.1 Onduleur Monophasé :-----	36
2.2 Onduleur triphasé :-----	36
III.3 Différentes architectures des onduleurs :-----	37
3.1. L'onduleur central-----	37
3.2. Les onduleurs strings-----	38
3.3. Les onduleurs intégrés aux panneaux PV-----	40
III.4 Durée de vie des onduleurs :-----	41
LES BATTERIES-----	41
III.5 Introduction :-----	41
III.6 Structure de la batterie :-----	41
III.7 Principe de fonctionnement-----	42

III.8 Caractéristique de la batterie : -----	42
8.1. Tension (en volt) : -----	42
8.2. Capacité (en ampères heures Ah) :-----	43
8.3. Autodécharge:-----	43
8.4. Profondeur de décharge-----	43
III.9 Configuration des batteries-----	44
III.10 Description de l'installation PV connecté au réseau -----	44
Conclusion : -----	45

Chapitre IV: Simulation de l'installation PV

IV.1 Introduction : -----	47
IV.2 Description des centrales photovoltaïques connectées au réseau 2.1 Systèmes raccordés directement au réseau : -----	47
2.2 Systèmes avec hacheurs -----	47
IV.3 Description de la configuration étudiée : -----	48
3.1 Un générateur photovoltaïque: -----	48
3.2 Convertisseur Boost (Continu- Continu)-----	49
3.3 La commande MPPT :-----	49
3.4 Convertisseur DC/AC -----	49
3.5 La charge :-----	50
3.6 Le réseau électrique : -----	50
IV.4 Etape de la simulation : -----	52
4.1 Simulation du générateur GPV-----	52
4.2 Simulation du hacheur survolteur-----	54
4.3 La commande MPPT :-----	54
4.4 La commande de l'onduleur PML: -----	55
IV.5 Résultats de la simulation : -----	56
5.1 Caractéristiques du module photovoltaïque. -----	56
5.2 Résultats de la simulation de l'installation sous différentes conditions météorologique --	58
Conclusion -----	67

Conclusion générale

Référence bibliographiques





Introduction générale

Introduction Générale

Les sources d'énergie renouvelables jouent un rôle important dans la production d'électricité. Diverses sources renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie sont exploitées pour la production d'électricité. L'énergie solaire est une bonne alternative à la production d'électricité en raison de sa disponibilité et de sa propreté. L'énergie solaire est directement convertie en électricité par un module solaire photovoltaïque (PV). Les modules photovoltaïques ont des points de puissance maximum (MPP) correspondant aux conditions ambiantes telles que l'éclairement solaire, la température des modules PV, la surface de la cellule et la charge. Pour que le module PV puisse fournir sa puissance maximale, plusieurs méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été proposées dans les systèmes PV autonomes et connectés au réseau. Dans les systèmes autonomes, les algorithmes MPPT sont généralement mis en œuvre sur les convertisseurs DC-DC, les bancs de batteries sont nécessaires pour stocker le surplus d'énergie. Dans les systèmes connectés au réseau, l'énergie produite par le générateur photovoltaïque peut être transférée au réseau via un convertisseur continu-continu utilisé comme régulateur MPPT et un onduleur qui convertit la tension du bus continu en une tension alternative. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

Pour y aboutir nous allons suivre une logique que nous détaillerons dans les chapitres suivant :

Au chapitre I, nous présenterons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous commençons par définir un système PV, l'effet photovoltaïques, les composants et les différents types et control d'une installation PV.

Au chapitre II, nous abordons les convertisseurs DC/DC leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types. A la suite du chapitre nous parlerons des commandes du MPPT ; principe de fonctionnement, quelques algorithmes, et du choix de la commande MPPT.

Au chapitre III, nous étudions le control de l'onduleur PV et la gestion d'énergie ; les batteries leurs types, les différentes lois à suivre pour leurs gestions, les onduleurs, leurs principe de fonctionnement leurs types les différentes méthodes de contrôle. Nous finirons ce chapitre par la description de notre installation PV.

Au chapitre IV, nous procédant à la simulation et implémentation, puis nous étalerons les résultats obtenus et enfin nous procédons à l'implémentation.

Et nous terminerons ce travail avec une conclusion générale.



Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Définition des systèmes photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

I.2 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [1]. Ceci se fait en trois étapes :

- Absorption des photons de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique.
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent une différence de potentiel entre les deux couches. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (Fig.1). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux.

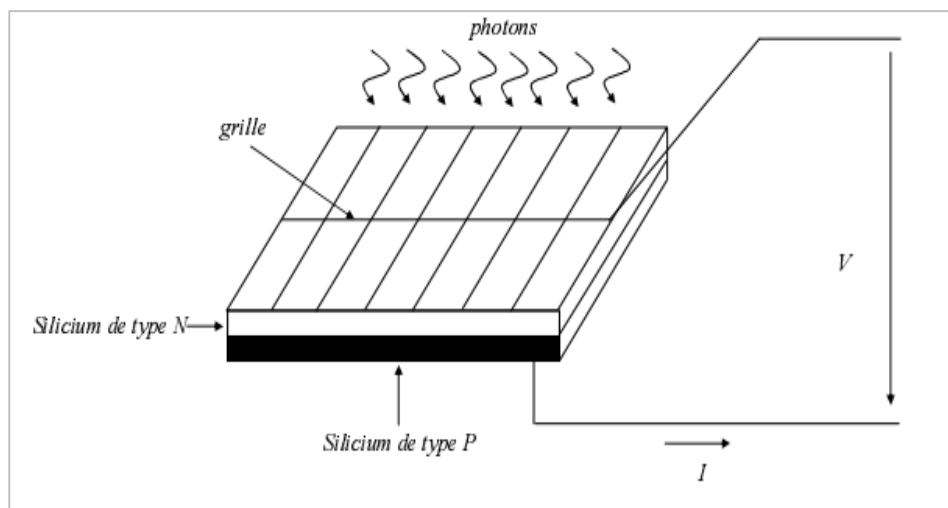


Figure I.1: schéma d'une cellule élémentaire

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, 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_{SC} et dépend fortement du niveau d'éclairement [1].

I.3 La cellule solaire :

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [2].

3.1 Cellules inorganiques :

Les cellules les plus répandues est à base de silicium (différence de potentiel de 0,6 V). Le rendement des modules en fonction des différentes technologies fait apparait des écarts importants :

Tableau I.1:différent types des cellules inorganiques

	Rendement typique	Rendement maximal obtenu en laboratoire
Monocristallin	12-15	24
Poly-cristallin	11-14	18.6
Amorphe	6-7	12.7

3.2 Cellules de Grätzel :

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de nano-cristallites d'oxyde métallique semi-conducteur (TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthénium ou de ditetrabutylammonium). En absorbant les photons le colorant va libérer un électron dans la bande de conduction de l'oxyde métallique. Le colorant oxydé va être ensuite réduit par l'électrolyte liquide qui est en général une solution d'iodure (I_2). Ces cellules ont un coût de production un peu plus élevé que les cellules photovoltaïques tout polymère mais les rendements de conversion photoélectriques avoisinent les 10% [2].

3.3 Cellules organiques:

Les cellules connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion ont franchi récemment la barre des 8%. Les matériaux les plus répondus dans le domaine du photovoltaïque organique à base de polymères [3].

Tableau I.2: tableau récapitulatif des cellules organiques [9]

Matériau	Rendement	Longévité	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 15% (24 % en laboratoire)	20 à 30 ans	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 14% (18.6% en laboratoire)	20 à 30 ans	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	6 à 7% (12.7% en laboratoire)	Rechercher	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Arséniure de Gallium (Ga-As)	18 à 20% (40% en laboratoire)		Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe₂, etc.)	9 à 17 % (19% en laboratoire)		Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Organique	1-11% en laboratoire	Quelques jours	Appareils électroniques

I.4 Association des panneaux PV:

4.1 Association en série :

Dans un groupement en série (Fig.2), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

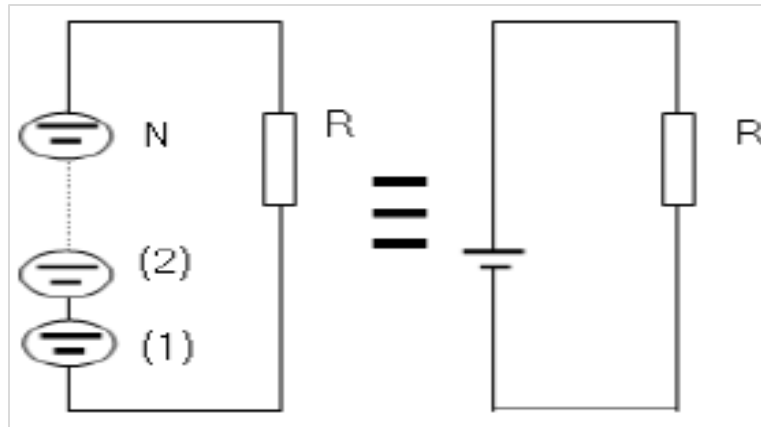


Figure I.2: Association des modules en série

La (Fig.3) montre la caractéristique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de n_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

Avec :

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

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

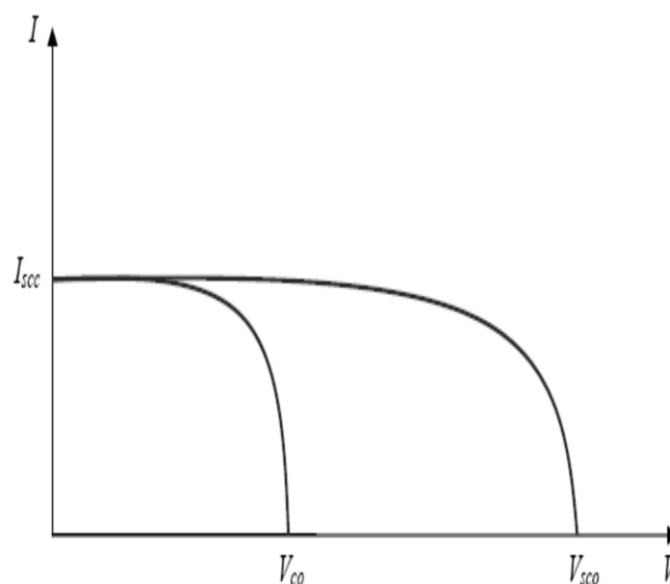


Figure I.3: Caractéristique résultante d'un groupement en série d'une cellule identique

4.2 Association en parallèle :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle (Fig.4), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

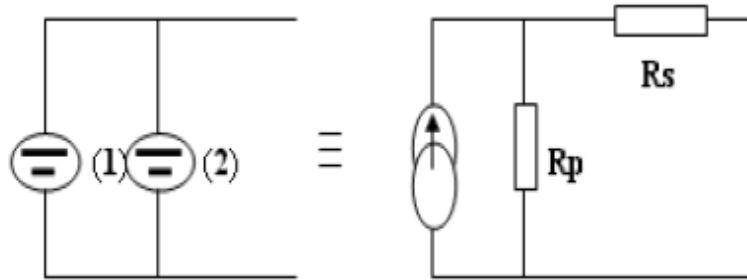


Figure I.4: Association des modules en parallèle

La (Fig.5) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

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

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

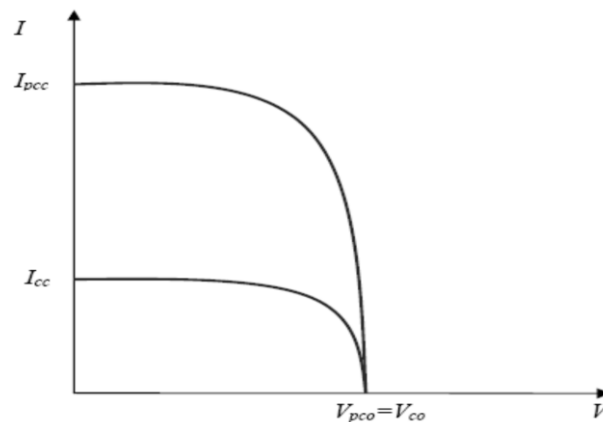


Figure I.5: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques

4.3 Association mixte (série-parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques (figure 6). La caractéristique électrique globale courant/tension du PV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants,

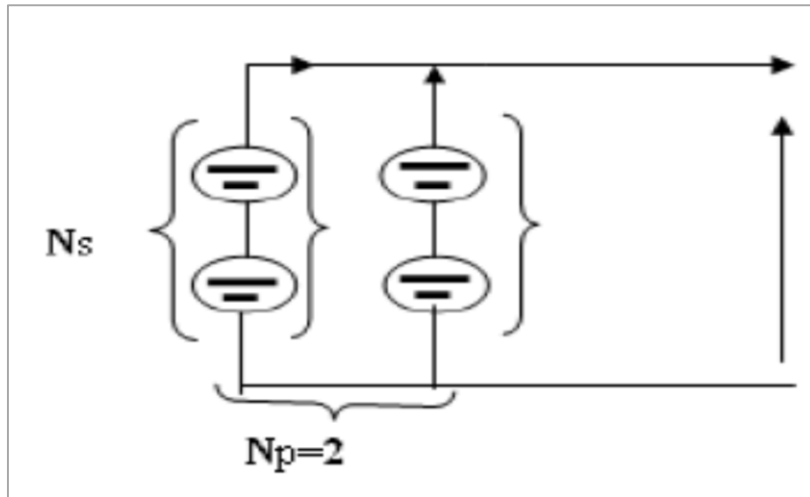


Figure I.6: Association mixte des modules

Ainsi que l'illustre la figure 7, n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{co} = n_s \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

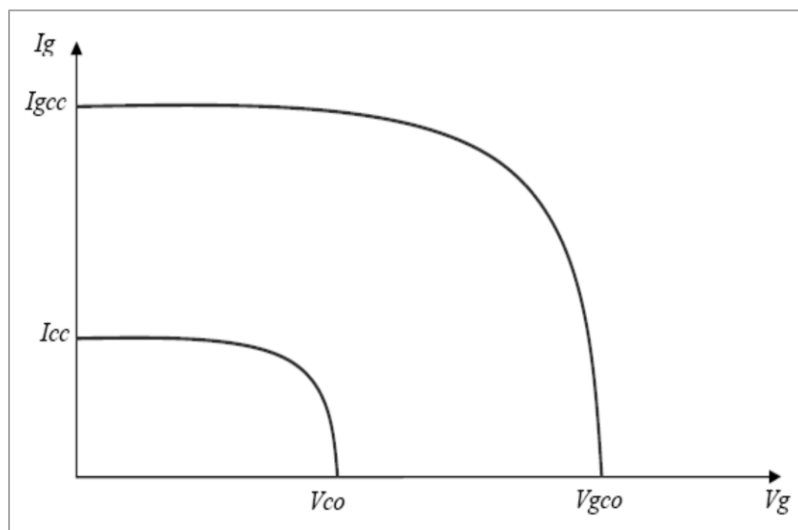


Figure I.7: Caractéristique d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (association en série) ou augmenter le courant (association en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants) [5].

I.5 Caractéristiques électriques photovoltaïque :

5.1 Caractéristique courant-tension (V) :

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la (Fig.8). La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction, lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule.

Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

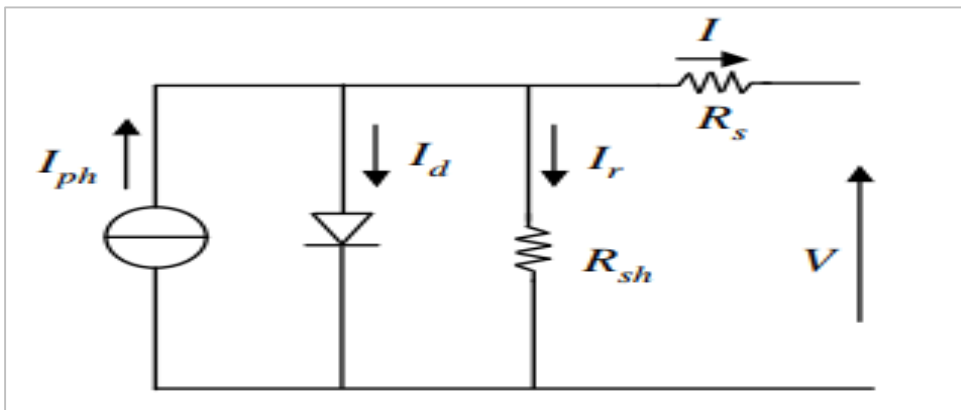


Figure I.8: schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Le courant photovoltaïque a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r$$

Avec

$-I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{\varphi}{1000} \right)$ Photocourant de cellule, proportionnel à l'éclairement φ . Ce courant correspond également au courant de court-circuit.

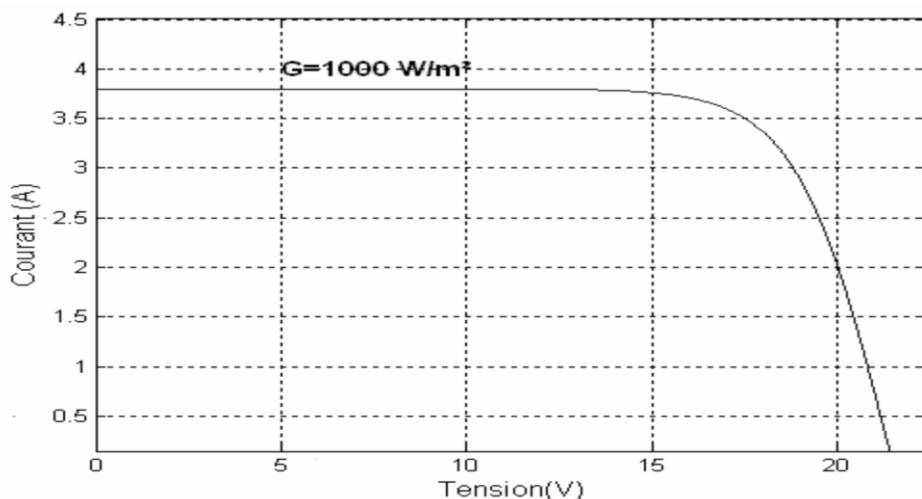


Figure I.9: caractéristique courant-tension $I(V)$

5.2 Caractéristique puissance-tension P(V) :

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Fig.10). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

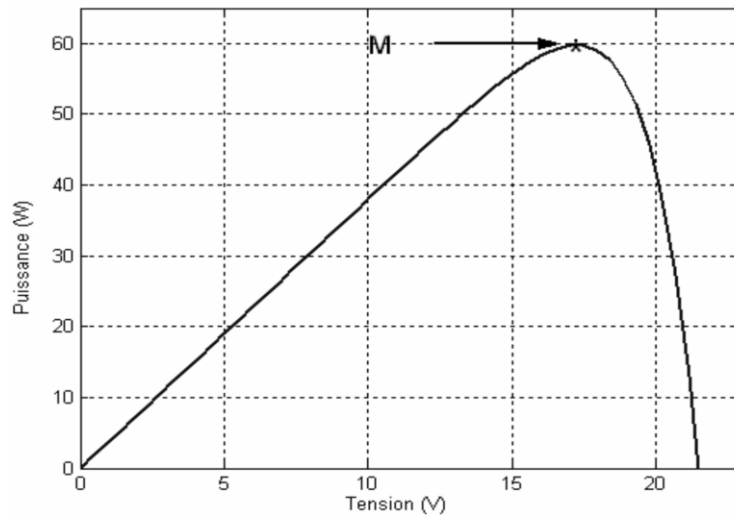


Figure I.10:caractéristique puissance-tension P(v)

I.6 Paramètres photovoltaïques :

6.1 Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

On définit par η_Q le rendement quantique ou réponse spectrale qui peut être exprimé par la relation suivante [6]:

$$\eta_Q = \frac{J_{ph}}{qF(\lambda) [1 - R(\lambda)]}$$

J_{ph} : Densité du photocourant fournie par la cellule

$F(\lambda)$: Le flux de photons reçu par la cellule

$F(\lambda)[1 - R(\lambda)]$: Le flux de photons qui participent à l'effet photovoltaïque

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface

On appelle courant de court-circuit le courant qui circule dans une cellule solaire soumise à un flux de photons $F(\lambda)$ sans application de tension. Il est donné par la relation suivante :

$$J_{sc} = q \int_0^{\infty} F(\lambda)[1 - R(\lambda)] \eta_Q \cdot d\lambda$$

On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

6.2 Tension du circuit ouvert (V_{co}) :

Elle est obtenue en mesurant la tension aux bornes de la photopile placée sous une source lumineuse sans aucun récepteur. Elle est de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour une cellule élémentaire et elle dépend des matériaux, des structures et des technologies d'élaboration de la cellule et varie avec l'éclairement et la température [6].

On obtient cette tension en annulant le courant I dans l'expression de la caractéristique $I(V)$, soit :

$$I = 0 \Rightarrow I_S - I_{ph} = 0 \Rightarrow V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} - 1 \right)$$

Pour

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} \right)$$

En dessinant la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique des cellules photovoltaïques :

La densité du courant de court-circuit J_{sc} , est obtenue sur la caractéristique pour une tension de 0V. Elle est proportionnelle à l'éclairement incident.

6.3 Le facteur de forme

Le Facteur de remplissage, ou facteur de forme (FF) est le rapport des aires de ces deux rectangles.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} I_{cc}}$$

I_{max} et V_{max} désignent les coordonnées du courant et de la tension qui maximisent la puissance délivrée par la cellule, soit $P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$ (rectangle gris foncé (Fig.11)).

Plus cette zone rectangulaire est grande, plus la caractéristique ressemble à un rectangle d'aire $V_{co} \times I_{cc}$

6.4 Le rendement:

Le rendement de conversion photovoltaïque η s'exprime par le rapport :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i} FF$$

Où P_i : est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2). Le rendement, souvent exprimé en pourcent, est un paramètre clef de productivité des cellules

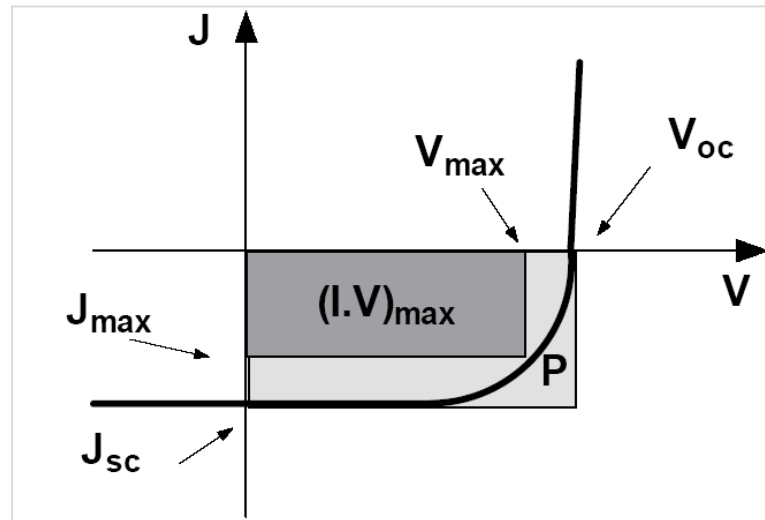


Figure I.11: Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire définitions les paramètres photovoltaïques

I.7 Paramètres influençant sur le fonctionnement du module PV

7.1 Influence de et la température :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures (Fig. I.12). La courbe caractéristique va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction.[7]

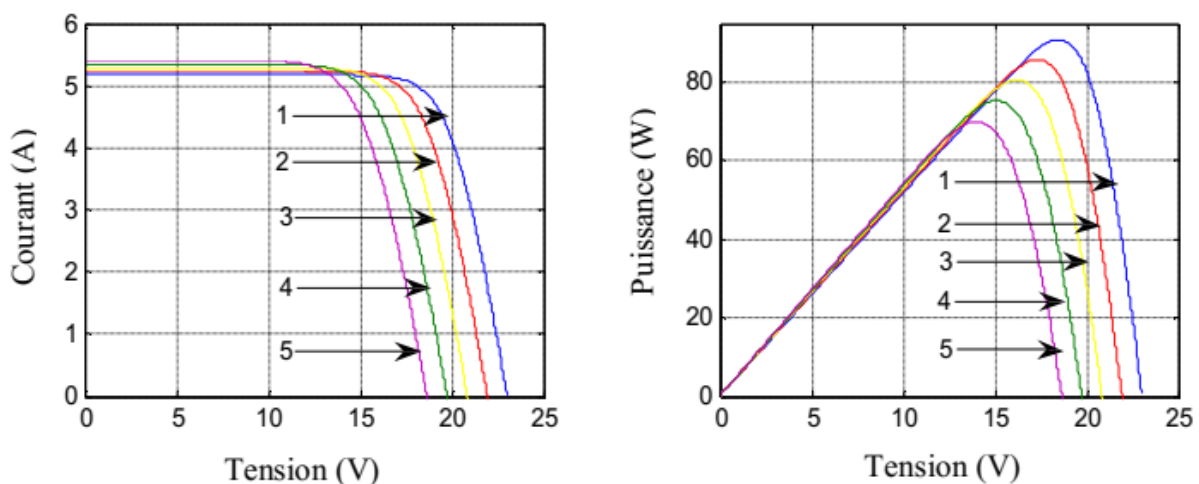


Figure I.12: Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000\text{W/m}^2$

(1): 0 °C ; (2): 15 °C ; (3) : 30 °C ; (4) : 45 °C ; (5) : 60 °C.

7.2 Influence de l'éclairement :

Nous avons maintenu une température constante à différents éclairements (Fig.I.13), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{co}) est une fonction logarithmique.

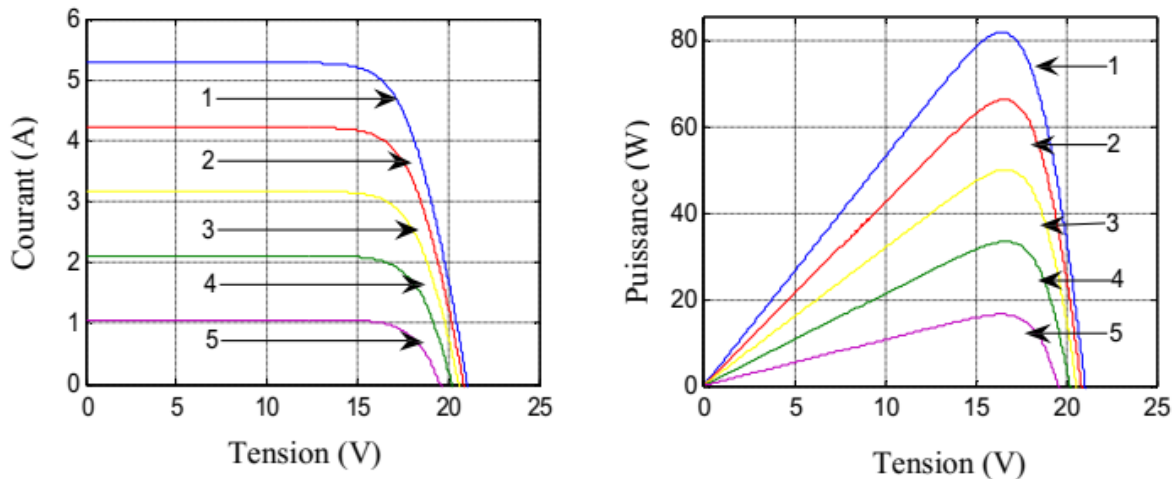


Figure I.13: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^{\circ}\text{C}$
 (1) : 1000W/m^2 ; (2) : 800W/m^2 ; (3) : 600W/m^2 ; (4) : 400W/m^2 ; (5) : 200W/m^2 .

La variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert V_{co} qui n'est pas remarquable, par contre il y a une grande variation du courant I_{cc} comme le montre (Fig.I.14).[7]

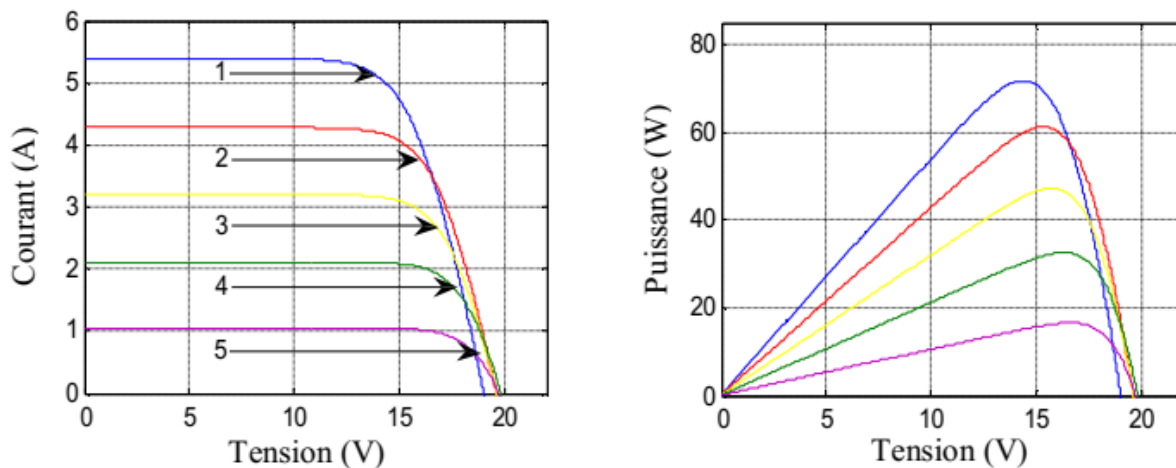


Figure I.14: Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique $I(V)$
 (1) : 1000W/m^2 , 55°C ; (2) : 800W/m^2 , 44°C ; (3) : 600W/m^2 , 40°C ; (4) : 400W/m^2 , 32°C ; (5) : 200W/m^2 , 25°C .

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsque elle augmente elle diminue la valeur de courant de court-circuit I_{cc} (Fig.15)

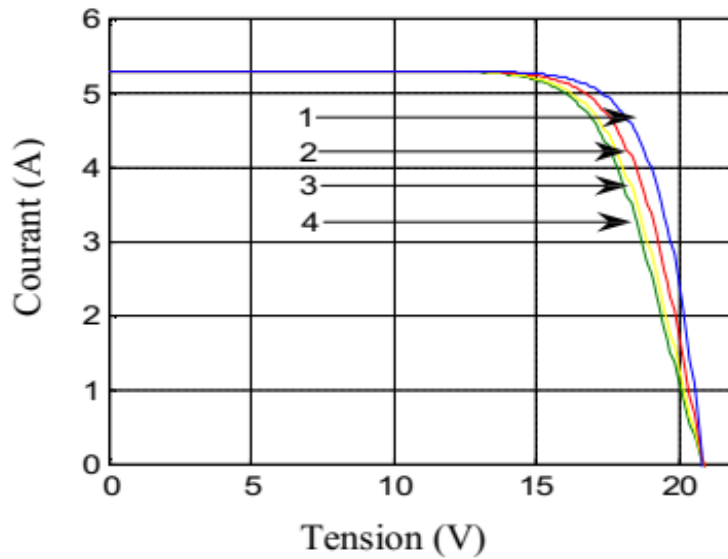


Figure I.15: Influence de R_s sur la caractéristique $I(V)$ à $T=25^\circ\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$
 (1) : 0.002Ω ; (2) : 0.008Ω ; (3) : 0.015Ω ; (4) : 0.02Ω .

7.3 Influence du facteur de qualité :

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et conduit à une perte de puissance au niveau de la zone de fonctionnement (Fig.16).

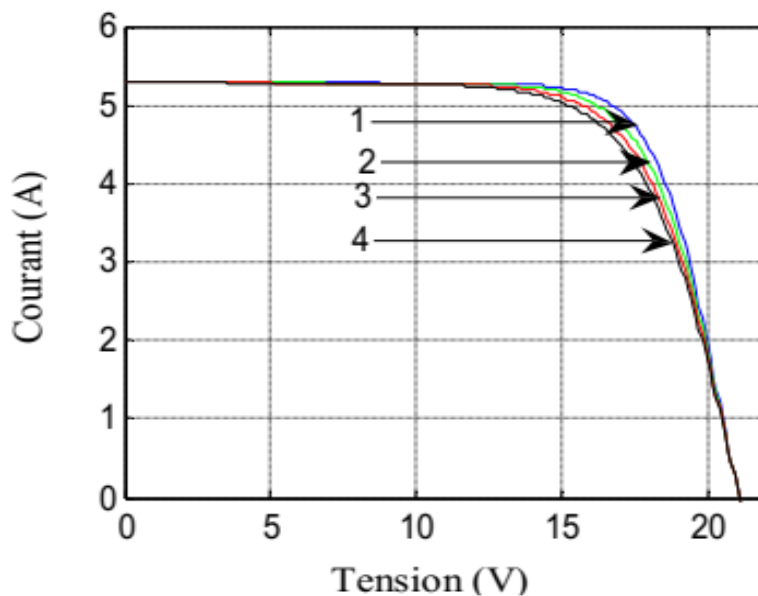


Figure I.16: Influence de facteur de qualité sur la caractéristique $I(V)$
 (1) : 1.2 ; (2) : 1.4 ; (3) : 1.6 ; (4) : 1.8.

I.8 L'installation photovoltaïque :

Une installation PV est essentiellement constituée d'un générateur (panneaux PV), d'un cadre de support pour monter les panneaux au sol, sur un bâtiment ou sur une structure de bâtiment, d'un système de contrôle de l'énergie et de climatisation, d'un éventuel système de stockage de l'énergie, de tableaux de distribution électriques et d'appareils de commutation abritant l'équipement de commutation et de protection et de câbles de raccordement.

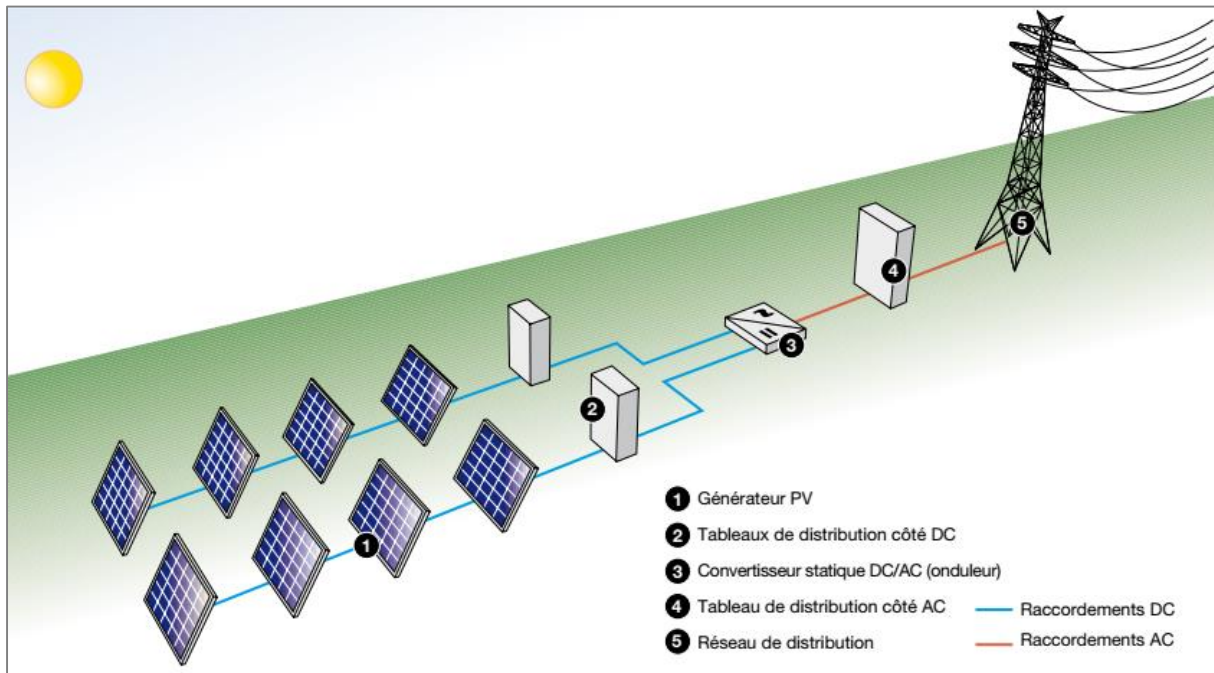


Figure I.17: installation PV connectée au réseau

I.9 Protection des modules photovoltaïques :

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques [8] :

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

- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode

parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension direct puisqu'elle devient passante.

I.10 Les critères de choix d'une centrale photovoltaïque :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

- Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale toute entière.
- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, ...etc.
- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.
- Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

I.11 Avantages et inconvénients d'une installation PV

11.1 Avantage :

- ✓ D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [9].

11.2 Inconvénient :

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

✖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

✖ Tributaire des conditions météorologiques.

✖ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

✖ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

✖ Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

Conclusion

Ce premier chapitre est une introduction de notre travail. Nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons brièvement décrit les cellules solaires les plus couramment utilisées; les avantages et les inconvénients de chaque type ont été mentionnés. La modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes caractéristiques de celle-ci ont été détaillées. Nous avons fait une description des différents composants d'une installation photovoltaïque connectée au réseau électrique, que nous allons détailler dans la suite de ce travail.



Chapitre II

Convertisseur DC/DC

Convertisseurs DC/DC

II.1 Introduction

Les systèmes utilisés en électrotechnique permettent de transformer la nature de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, chimique, lumineuse...etc.). L'électronique, l'automatique et l'informatique s'intéressent essentiellement au traitement du signal (ou de l'information).

Les systèmes de l'électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, éclairage, chauffage, climatisation,...) permettant la conversion de l'énergie électrique, ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique. Il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie) [10].

II.2 Les convertisseurs statiques

2.1 Définition

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge.

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.[11]

On distingue deux types de sources de tension :

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V_{eff} et de la fréquence f .

Ce fonctionnement de convertisseur est réalisé par des moyens purement électroniques (semi-conducteurs), et permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique.
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- Une réduction des masses et des volumes, mais aussi du bruit.

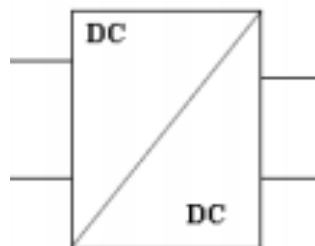


Figure II4: Symbole d'un convertisseur DC-DC

2.2 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques, pile à combustible, ...).

La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. Il existe donc quatre fonctions de base des convertisseurs statiques. Ces convertisseurs transforment directement l'énergie électrique, sont appelés mono-étages.

Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie, peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes. Un convertisseur non réversible transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice (Fig II.2). [12]

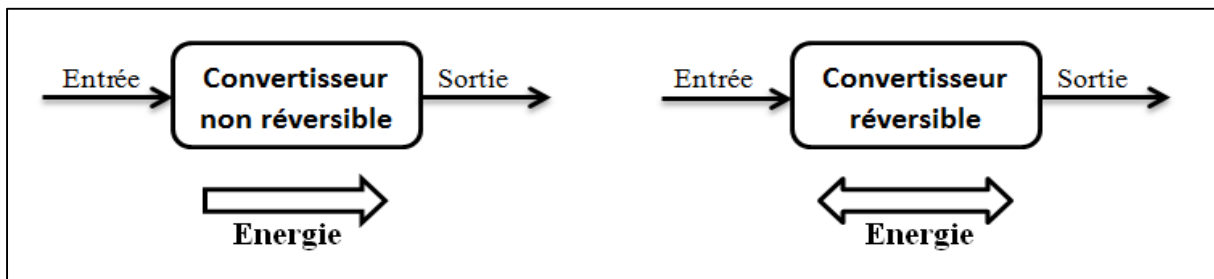


Figure II.5 : Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques.

II.3 Les types des convertisseurs de tension DC/DC « HACHEUR »

Elles permettent d'abaisser, élever et inverser une tension continue avec de très faibles pertes (Fig II.3). Par conséquent ils ont un très bon rendement, peu d'énergie à dissiper par le transistor. [13]

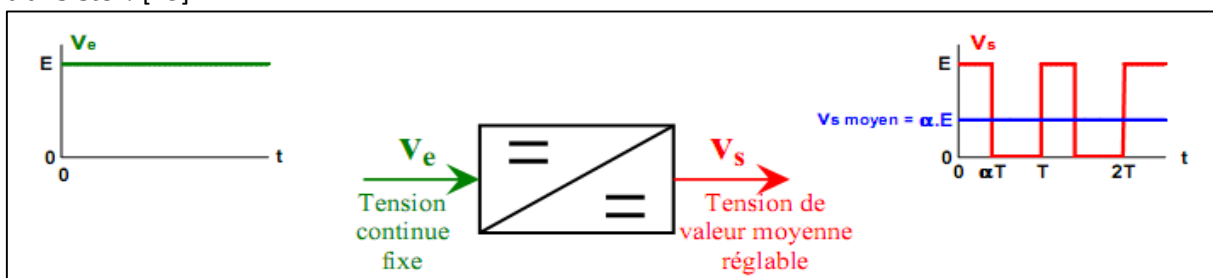


Figure II.6: Symbole et signaux du convertisseur

3.1 Convertisseur élévateur « BOOST »

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant-continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la (Fig. II.4).

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14]

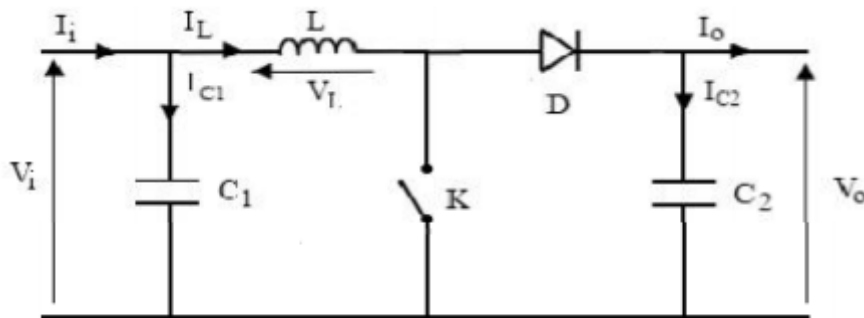


Figure II.7: Schéma de convertisseur élévateur « Boost »

a. Principe de fonctionnement

Lorsque l'interrupteur 'K' est fermé, l'inductance se charge et le courant $i(t)$, provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant $t \in [0, dT_s]$. Quand 'K' s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège K en empêchant le retour du courant.

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D durant $t \in [dT_s, T_s]$.

Le rapport de conversion $M(d)$ est donc écrit sous la forme suivante: [13, 14]

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{d'} = \frac{1}{1-d}$$

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_o(1-d) = V_i$$

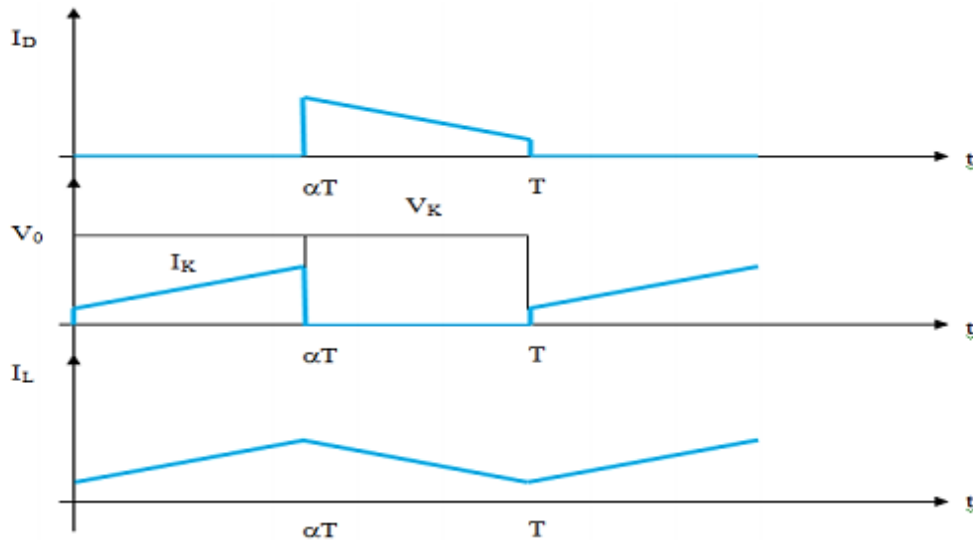


Figure II.8: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

b. Modèle mathématique équivalent:

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la (Fig.II.6) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d d'entre $[0, \alpha T_e]$. [15]

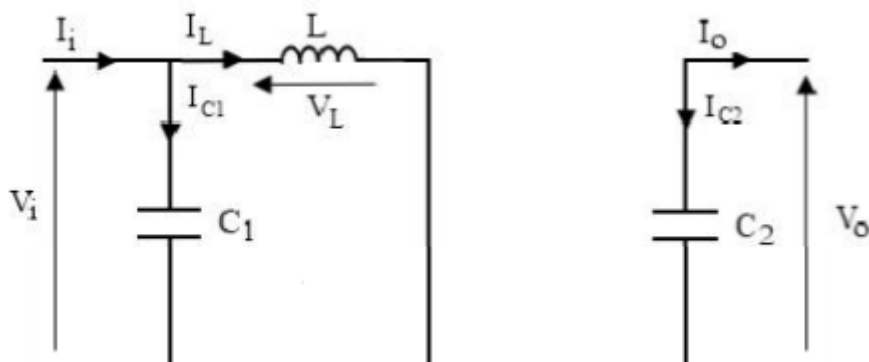


Figure II. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t)$$

$$V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

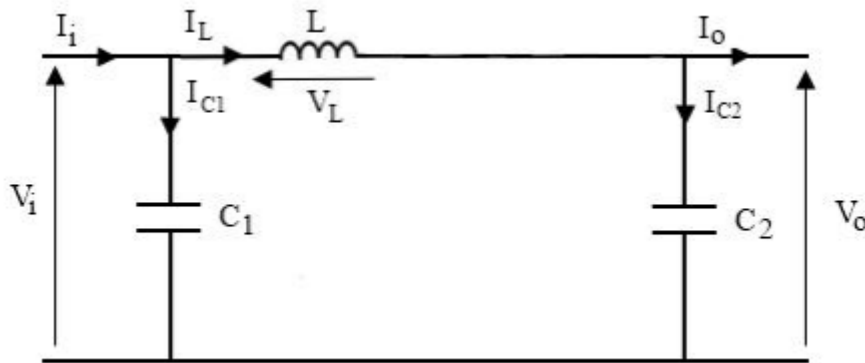


Figure II.10: Schéma électrique boost ouvert.

D'après la loi de Kirchhoff :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t)$$

$$I_L(t) = C_1 \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)$$

3.2 Convertisseur abaisseur « BUCK »

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K (Fig.II.8) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

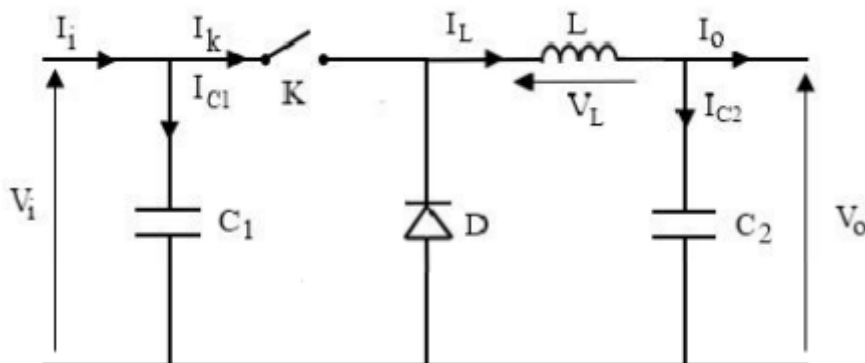


Figure II.11:Schéma électrique d'un convertisseur buck

a. Principe de fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps t_c $[\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [16].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la (Fig.II.9) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [17] :

$$V_0 = \alpha \cdot V_i$$

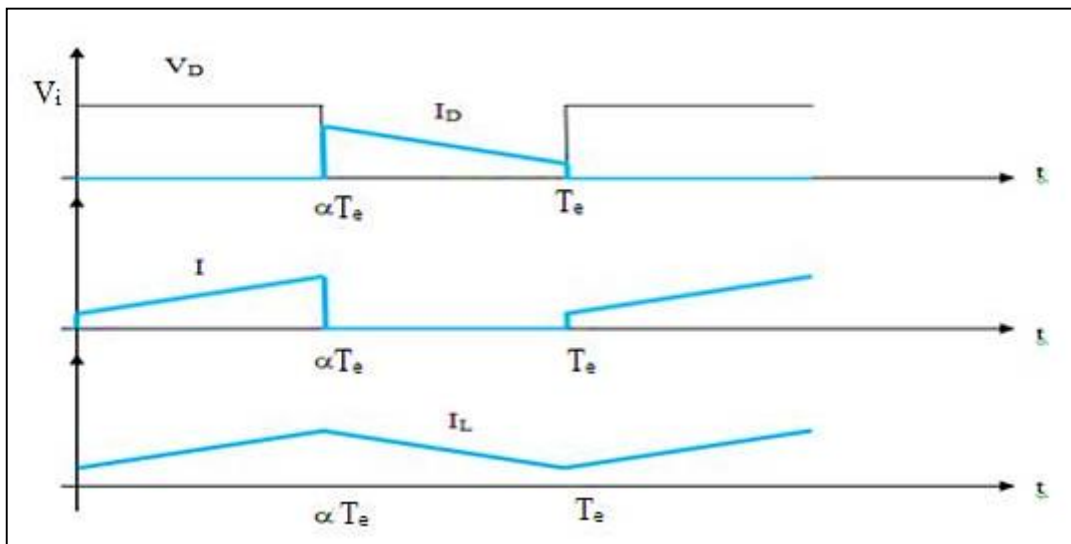


Figure II.12: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

b. Modèle mathématique équivalent :

Comme pour le hacheur boost nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (Fig.II.10) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que (Fig.II.11) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha) T_e$ [18].

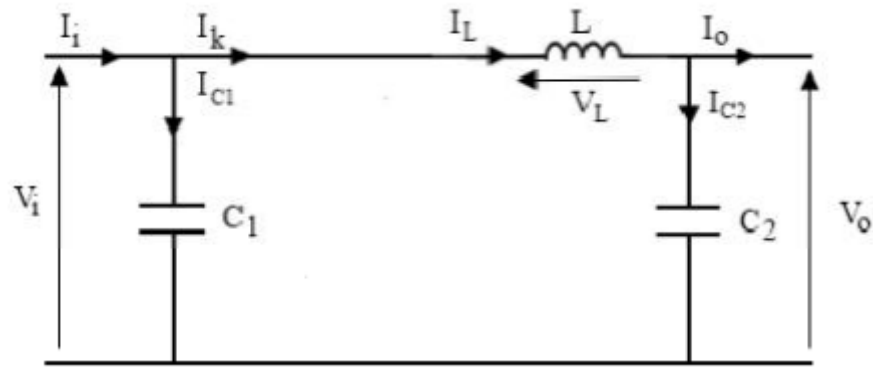


Figure II.13: Schéma électrique d'un hacheur buck fermé.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)$$

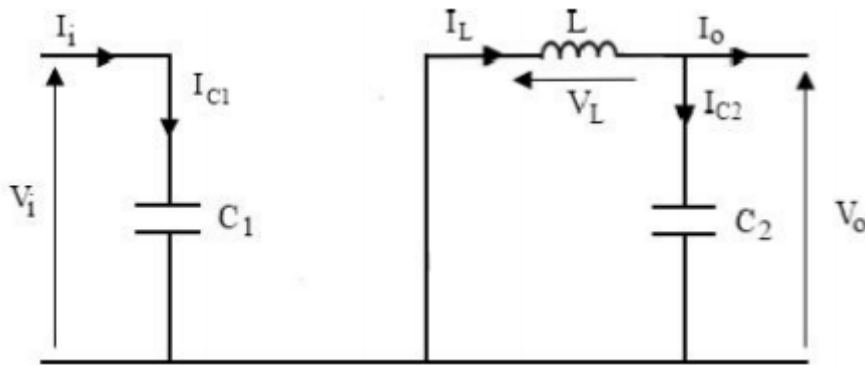


Figure II.142: Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t)$$

3.3 Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST »

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la (Fig.II.12). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (*on*) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (*off*), la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donné comme suit [19]:

$$V_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times V_i$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la (Fig.II.12).

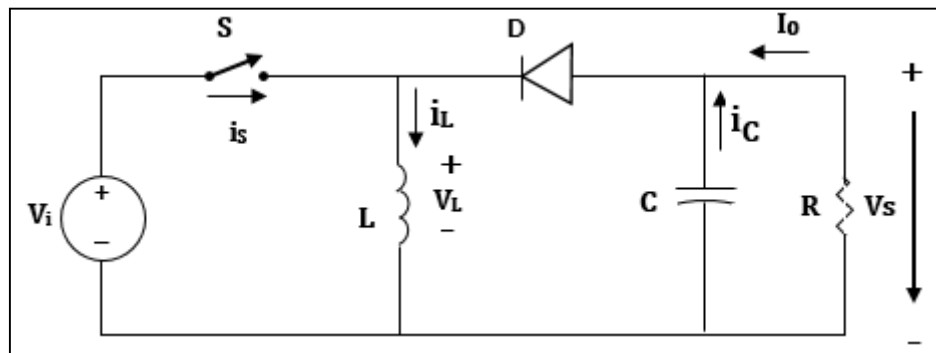


Figure II.13:schéma électrique d'un convertisseur buck-boost.

Maximum Power Point tracking (MPPT) :

II.4 Introduction :

Pour la meilleure exploitation de diverses ressources des énergies renouvelables, il est important d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques GPV. Le suivi de point de puissance maximale (MPPT) a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques GPV peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP).

II.5 Principe de fonctionnement

Le suiveur de point de puissance maximum (MPPT) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (MPPT) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau

solaire. Le point de puissance maximale (MPP) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale.

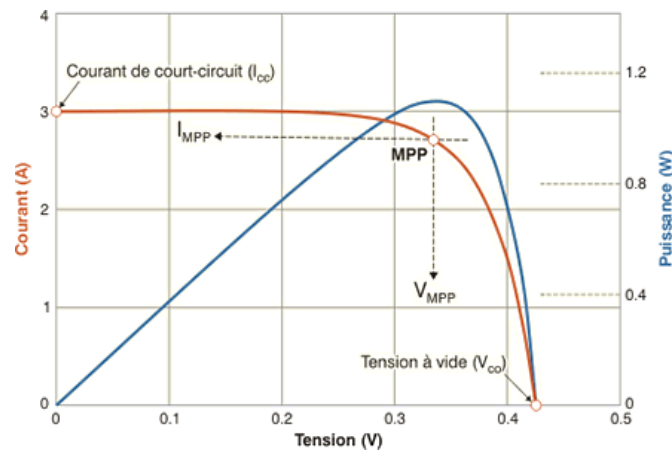


Figure II.14: Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.

L'association d'un convertisseur statique DC / DC, comme illustré à la (Fig.II.13), modifie le point de fonctionnement du panneau à l'aide d'une commande externe afin de maximiser l'énergie transférée de manière permanente. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé

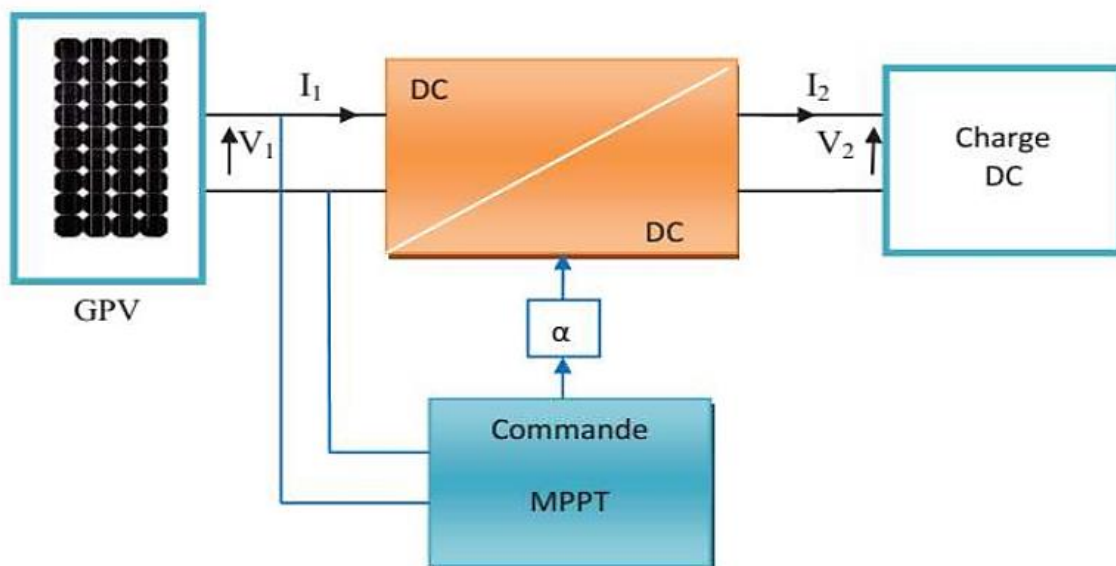


Figure II.15: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

II.6 Classification des MPPT :

Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [20].

6.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

a. Méthodes indirectes :

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes PV sont la méthode de tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que la méthode MPPT basée sur l'intelligence artificielle (IA).

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis, devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [20].

b. Méthode directe :

Les valeurs instantanées de la tension ou du courant de sortie PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de commande et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du PV. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

6.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

a. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Ce type de commandes MPPT exécute une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur [21]. D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

b. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du CS. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

On peut voir dans le tableau (1) les méthodes les plus utilisées [21] :

Tableau II.3:récapitulatif des méthodes utilisées

Méthode MPPT	type	complexité	Analogique/numérique	Vitesse de convergence	Paramètres détectés	Efficacité
Tension de circuit ouvert	Indirect	Faible	Mixte	Moyenne	Tension	Faible (=86%)
Courant de court-circuit	Indirect	Moyenne	Mixte	Moyenne	Courant	Faible (=89%)
(P&O)	Direct	Moyenne	Numérique	Rapide	Tension & courant	Haute (=96%)
ESC	Direct	Moyenne	Numérique	Rapide	Tension & courant	Haute (=97%)
IncCond	Direct	Moyenne	Mixte	dépond	Tension & courant	Haute

II.7 Les algorithmes MPPT :**7.1 Méthode de conductance incrémentale (IncCond) :**

La méthode de la conductance incrémentielle (IncCond) utilise la pente des caractéristiques de puissance du générateur PV pour suivre le MPP. Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle sur le point MPP, positive pour les valeurs de puissance de sortie inférieure à MPP et négative pour les valeurs de puissance supérieure à MPP.

Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

(opposée). Le rapport cyclique du hacheur est varié et le processus est répété jusqu'à ce que le point de puissance maximum soit atteint.

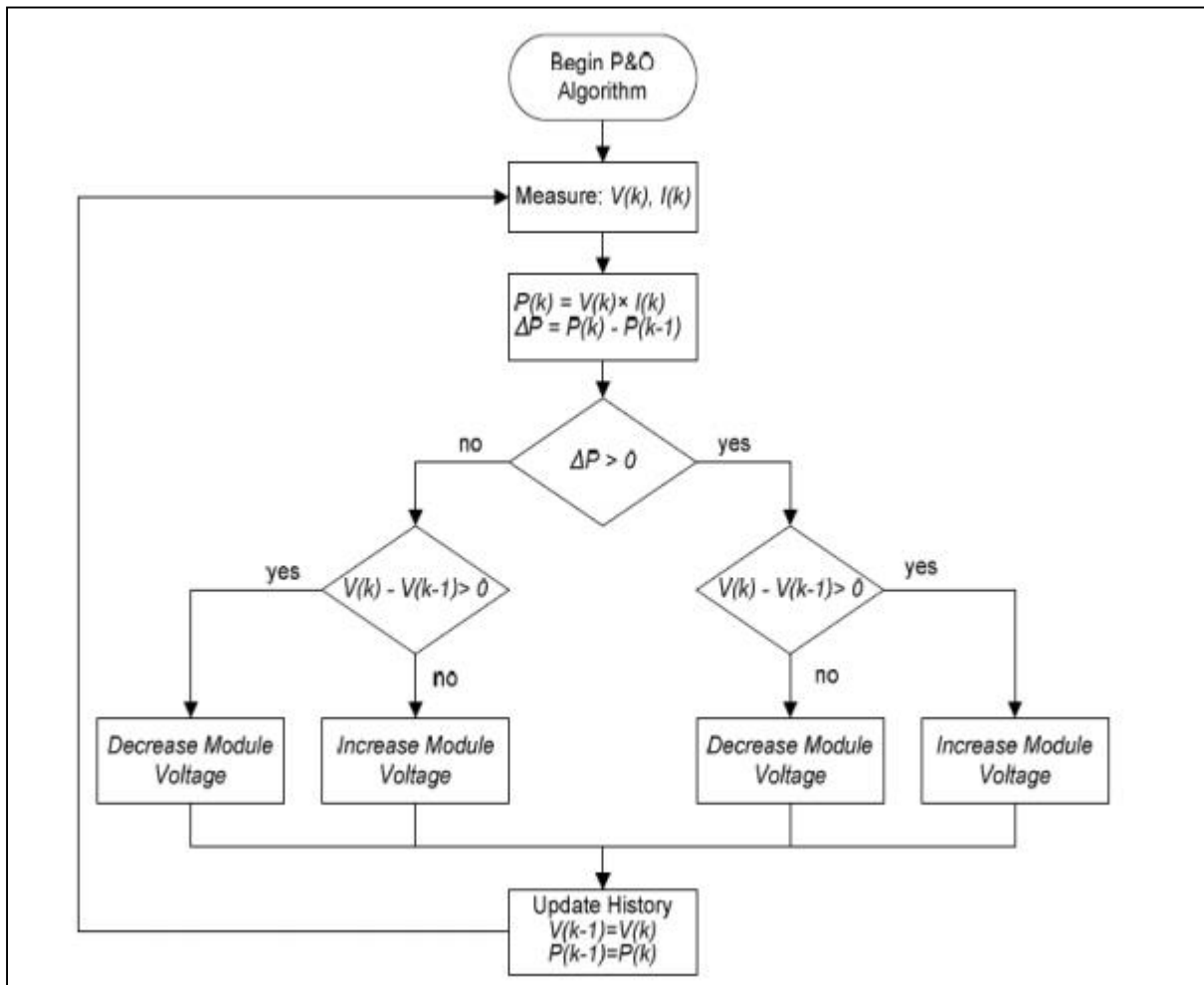


Figure II.17: Algorithme Perturb Observe (P&O)

D'après (Fig.II.16), la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

- Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{MP} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple C_p .

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

▪ Si C_p 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.

La valeur C_p idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement.

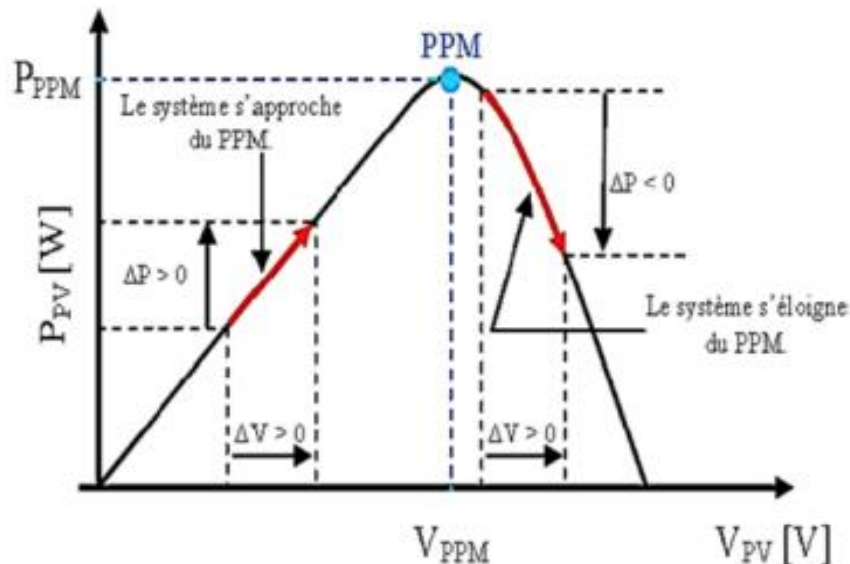


Figure II.18: Schéma explicatif de MPPT

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs Statiques (convertisseur *DC-DC*). Nous avons montré théoriquement que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique.

Pour produire une puissance maximale et obtenir une efficacité maximale, l'ensemble du panneau photovoltaïque doit fonctionner à ce point particulier. Le point de puissance maximum du panneau PV continue de changer en fonction des conditions environnementales changeantes telles que l'irradiance solaire et la température de la cellule. Ainsi, pour extraire la puissance maximale disponible d'un module PV, Des algorithmes MPPT sont mis en œuvre.



Chapitre III

Control de l'onduleur PV

Et la gestion d'énergie

LES ONDULEURS

III.1 Introduction :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [22].

III.2 Principe de fonctionnement :

- Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension courant/continu en tension courant/alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde.
- Les fonctions de l'onduleur sont de convertir et d'acheminer l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité vers le réseau électrique dans le cas du raccordé réseau ou à l'utilisateur dans le cas des sites isolés.
- Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [22].

Onduleur Monophasé.

Onduleur Triphasé.

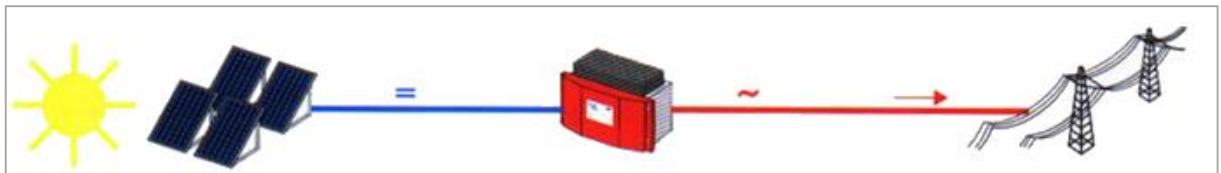


Figure III.1: principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

2.1 Onduleur Monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie :

- $\frac{3}{4}$ Onduleur monophasé en demi-point.
- $\frac{3}{4}$ Onduleur monophasé en pont (Pont H) [23].

2.2 Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre (Fig.III.2) [23].

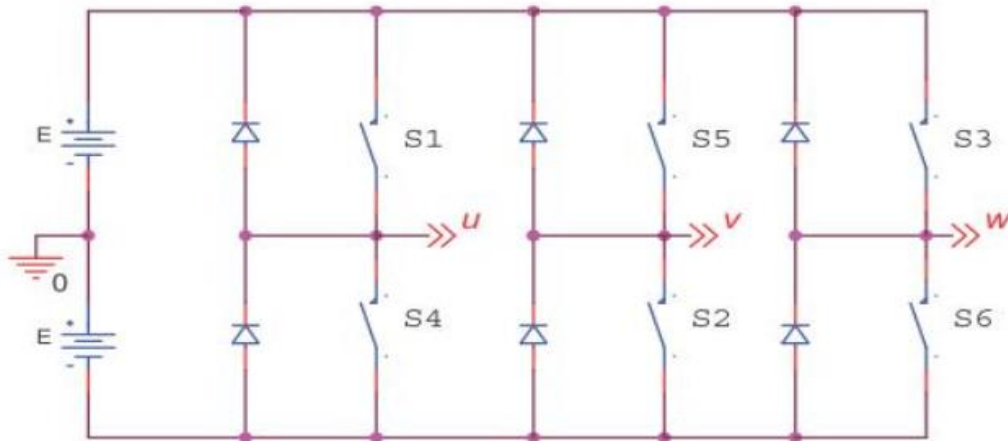


Figure III.2:Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.

III.3 Différentes architectures des onduleurs :

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques:

L'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Nous décrivons brièvement leur propriété ci-dessous.[24]

3.1. L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs entrées, (Fig.III.15). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits.

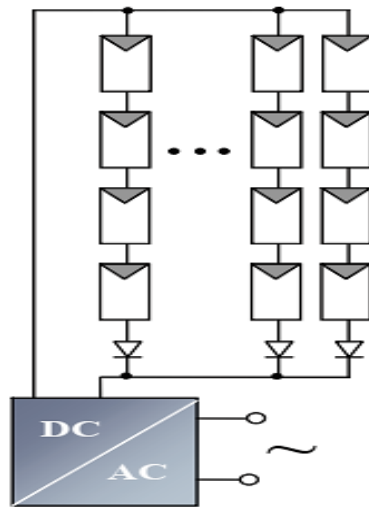


Figure III.3: Schémas de principe d'un onduleur central

La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant.

L'onduleur central possède au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de fonctionner à son PPM. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène. Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant qu'il le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production.

3.2. Les onduleurs chaines (strings) :

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de chaînes (strings). Chaque chaîne est toutefois reliée à un onduleur (Fig.III.4). Chaque chaîne peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente.

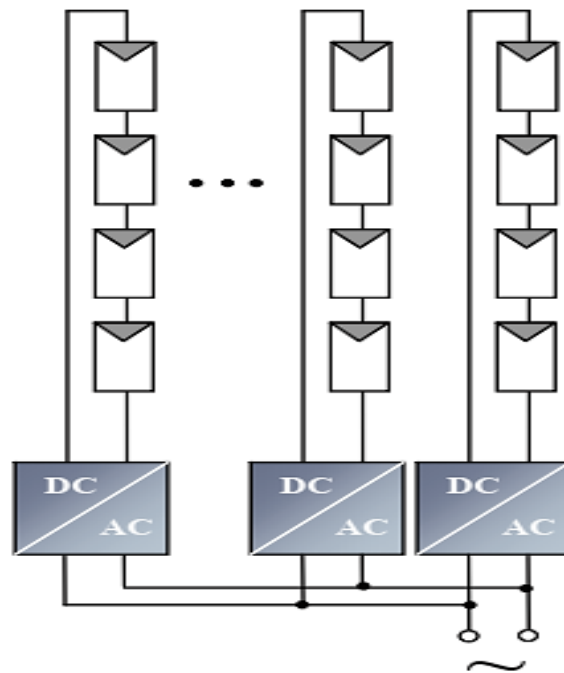


Figure III.4:Schémas de principe onduleur string

Cependant, un paramètre reste toujours incertain dans le contrôle MPPT lorsque la caractéristique de puissance du string possède plusieurs pics de puissance. Dans ce cas, l'onduleur peut fonctionner à un faux point de puissance maximum et par conséquent, la puissance délivrée ne sera pas la puissance maximale disponible. Cette configuration peut arriver lors de différentes configurations comme le montre la (Fig.III.5).



Figure III.5:Exemples d'installations photovoltaïques ayant besoin de plusieurs onduleurs.

Une partie des panneaux peut être sale ou cachée par des ombres ou de la neige ou bien l'orientation des panneaux d'un même string n'est pas identique pour tous les panneaux. Une disposition non optimale des panneaux implique donc qu'un string peut recevoir une irradiance inhomogène pouvant perturber la recherche du PPM. La solution en termes de gain énergétique

est d'aller vers une gestion plus individuelle des panneaux en intégrant par exemple un étage d'adaptation par GPV.

3.3. Les onduleurs intégrés aux panneaux PV

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Fig.III.6), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut.

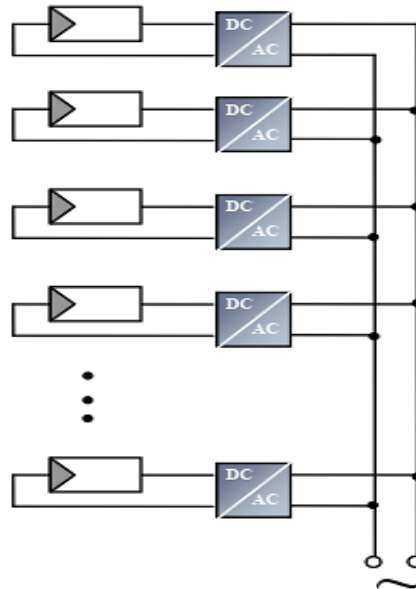


Figure III.6: Onduleur intégré

Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-dessous de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.

Tableau III.4.: Caractéristiques techniques des différents systèmes de configurations.

	Onduleur central	Onduleur string	Onduleur intégré
Tension PV	340-800 V	150-800 V	17-90 V
Pertes DC (ohm)	≈ 1-5% en fonction de la tension et de la distance	≈ 1% en fonction de la tension et de la distance	Négligeable
η conv	95-97%	92-96%	87-93%
Maintenance et réparation	Simple	Difficile (recherche disfonctionnement)	Difficile (recherche disfonctionnement)

III.4 Durée de vie des onduleurs :

En moyenne, l'onduleur a une durée de vie de 8 à 12 ans. Aujourd'hui, une garantie sur cinq ans est devenue la norme chez les constructeurs. Suivant les constructeurs, il est parfois possible d'étendre la garantie à 10 ans, voire à 20 ans. La durée de vie est appelée à augmenter avec l'utilisation de composants qui sont toujours de meilleure qualité et plus résistants aux hausses de température.[25]

LES BATTERIES

III.5 Introduction :

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques que les autres batteries, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes. [26]

III.6 Structure de la batterie :

Une batterie solaire comporte des électrodes positives et négatives composées d'alliages dissemblables plongées dans un électrolyte (acide). L'ensemble est encapsulé dans un bac scellé ou muni d'un bouchon de remplissage et d'un évent. Les réactions d'oxydoréduction, qui gouvernent le fonctionnement d'une batterie sont réversibles, dans la mesure où celle-ci n'a pas été longtemps ni complètement déchargée, ni trop surchargée. Un fonctionnement prolongé dans l'un ou l'autre de ces états aboutirait à la destruction des capacités de la batterie.[27]

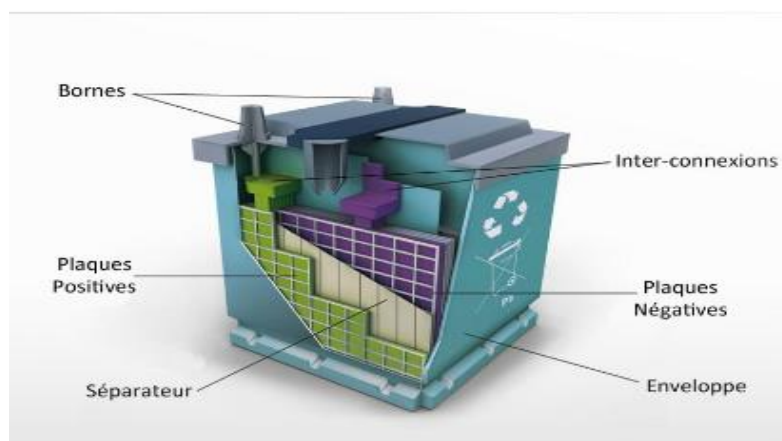


Figure III.7: Structure de la batterie.

III.7 Principe de fonctionnement

L'accumulateur est un système de stockage électrochimique. Les réactions internes assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique qui repose sur l'échange réversible des ions Li^+ entre les électrodes positive et négative tout au long des cycles de charge ou de décharge. Le couplage de ces deux électrodes est réalisé par le biais de l'électrolyte qui assure le transport des ions d'une électrode à l'autre. L'électrolyte doit être choisi de manière à assurer la compatibilité entre celui-ci et les matériaux des électrodes.

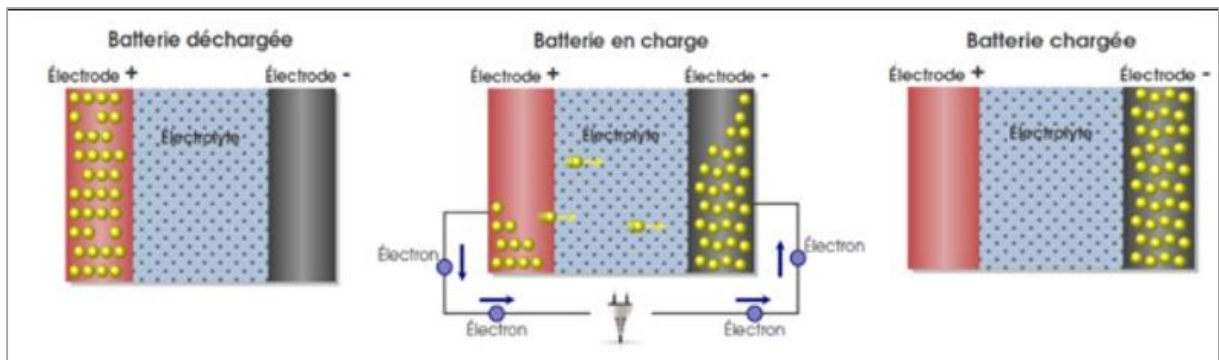


Figure III.8: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue en nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. On dit "estimer" car il s'agit d'une donnée basée sur un niveau de décharge et sur des conditions atmosphériques données. La durée de vie d'une batterie solaire dépend d'abord de la technologie utilisée. Ensuite les batteries solaires vieillissent en raison des charges et décharges : le nombre de cycles dépend principalement de la profondeur habituelle de décharge. Pour vous donner un ordre d'idée, pour des décharges de l'ordre de 40%, on peut estimer les durées de vie suivantes pour les différents types de batteries à décharge lente :

- Batterie solaire au plomb ouvert : 400 à 500 cycles
- Batterie solaire AGM : 600 à 700 cycles
- Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles
- Batterie solaire au lithium : jusqu'à 1500 cycles

III.8 Caractéristique de la batterie :

8.1. Tension (en volt) :

Lorsqu'un accumulateur est pleinement chargé sa tension est supérieure d'environ 20 % à sa tension de travail. Pour charger un accumulateur, une tension supérieure à la tension du système est nécessaire. Cette tension est appelée tension de charge. La tension de charge d'un accumulateur de 12 volts est égale à 14,4 V.[28]

Tableau III.5: caractéristiques tension de la batterie

Puissance de l'installation photovoltaïque	Tension recommandée
De 0 à 800 Wc	12V
De 800 à 1600 Wc	24V
Au-dessus de 1600 Wc	48V

8.2. Capacité (en ampères heures Ah) :

La capacité d'une batterie solaire est exprimée en Ampères Heure (Ah) ce qui désigne le débit totale d'énergie de la batterie dans des conditions données (10 heures, 20 heures, ...).

Une batterie 100 Ah – 12V, pourra se décharger au mieux de 60Ah (60% x 100Ah). Cela représente par rapport à votre besoin quotidien en énergie 60 Ah x 12V = 720 Wh.

Avec un régulateur solaire (qui se branche entre les panneaux solaires et la batterie), vous réglez la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 90%, ni ne doit descendre sous les 40%, car une surcharge comme une décharge trop profonde endommage ces batteries et diminue leur durée de vie.[28]

8.3. Autodécharge:

Même sans décharge, les accumulateurs perdent de l'énergie. Ce processus, appelé "autodécharge", doit être égal pour les accumulateurs solaires à environ 3% par mois. L'autodécharge augmente avec l'âge et avec la température. Une diode anti-retour évite que la batterie ne se décharge dans le module pendant la nuit.[28]

8.4. Profondeur de décharge

La vitesse de la décharge est également importante : le courant de décharge ne doit pas dépasser le dixième de la capacité. Pour une capacité de 100 Ah, c'est un courant de 10A, donc une consommation de $12 \times 10 = 120$ W. Si on « tire » des courants plus forts, la capacité réelle est inférieure.[28]

Tableau III.6:caractéristique des batteries solaires.

Type	Energie massique en Wh/kg	Tension d'un élément	Durée de vie nombre de recharges	Temps de charge	Auto décharge par mois
Plomb	30-50	2V	200 à 300	8-16h	5%
Ni-Cd	48-80	1.25V	1500	1h	20%
Ni-Mh	60-120	1.25V	300-500	2-4h	30%
Li-ion	110-160	3.7V	500-1000	2-4h	10%
Li-Po	100-130	3.7V	300-500	2-4h	10%

➤ **Caractéristiques souhaitées d'une batterie "solaire":**

- ✓ durée de vie très longue (plusieurs années)
- ✓ résistant à des cycles de vie nombreux et irréguliers
- ✓ rendement élevé
- ✓ autodécharge très faible
- ✓ pas de maintenance nécessaire

III.9 Configuration des batteries

Les batteries sont souvent câblées en série afin d'obtenir la tension de batterie souhaitée.

Pour augmenter le courant disponible, il est également possible de recourir à un montage en parallèle des cellules.

- ✓ Le montage en parallèle permet d'additionner les capacités de stockage (en Ah) tout en conservant la même tension (en Volts).
- ✓ Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries, en revanche la capacité en Ah reste celle d'une seule batterie.

III.10 Description de l'installation PV connecté au réseau

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink (Fig.III.8). La chaîne de conversion photovoltaïque a été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Elle est composée de blocs fonctionnels programmés et simulés :

- ✓ GPV, simulant le fonctionnement d'un module et/ou d'un panneau photovoltaïque.
- ✓ 'Boost', simulant le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost.
- ✓ 'Commande P&O', simulant la commande MPPT appliquée au convertisseur.
- ✓ La charge est égale à 100Ω .
- ✓ 'Paramètres météo', définissant les conditions d'ensoleillement et de température extérieure.

On applique les opérations suivantes:

- Le cas stable 1000 W/m^2 et 25°C .
- Le changement linéaire de la température.
- Le changement de l'ensoleillement (l'irradiance).

La méthode utilisée pour la modélisation est la méthode PerturbnObserve (P&O).

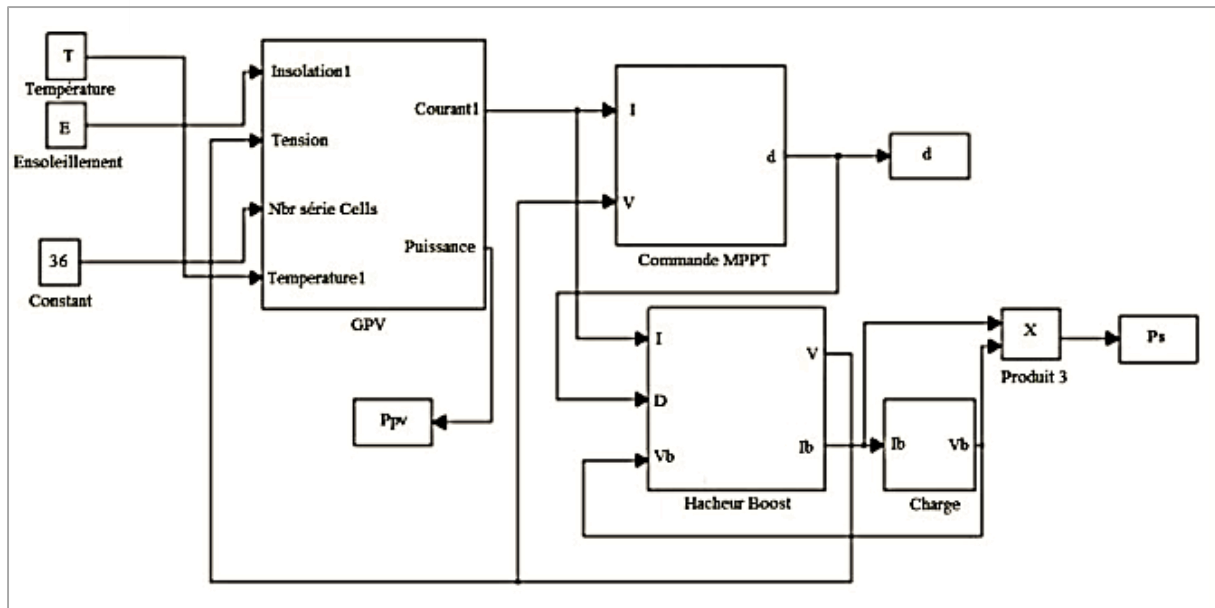


Figure III.9: Block diagramme du Block diagramme de modèle de système photovoltaïque.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini les caractéristiques électriques des onduleurs, les différents types qui existent, et les architectures de câblage. Nous avons abordé aussi les batteries solaires, leurs caractéristiques, et leur rôle dans une installation photovoltaïque.

A la fin du chapitre, nous avons décrit notre installation.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la simulation de notre installation, qui a été faite sous Matlab/simulink.



Chapitre IV

Simulation et implémentation De l'installation photovoltaïque



IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une étude descriptive détaillée d'un système photovoltaïque connecté au réseau est proposée et présentée. Après une présentation des généralités sur un système relié au réseau. On présente son modélisation mathématique et simulation, ainsi que la méthode de recherche du point de puissance maximale.

IV.2 Description des centrales photovoltaïques connectées au réseau

2.1 Systèmes raccordés directement au réseau :

Les centrales photovoltaïques connectées au réseau électrique conventionnel sont généralement installées à proximité du lieu de consommation et intégrées dans l'architecture en plus ou moins grande partie sur l'édifice de consommation. Elles fonctionnent « au fil du jour ». Leur fonctionnement est particulièrement optimisé du fait des exigences imposées par les caractéristiques techniques de la connexion au réseau de distribution électrique. [22]

On distingue deux types de structure des systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Systèmes à connexion directe au réseau

La (Fig.IV.1) montre un générateur photovoltaïque connecté directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur, :

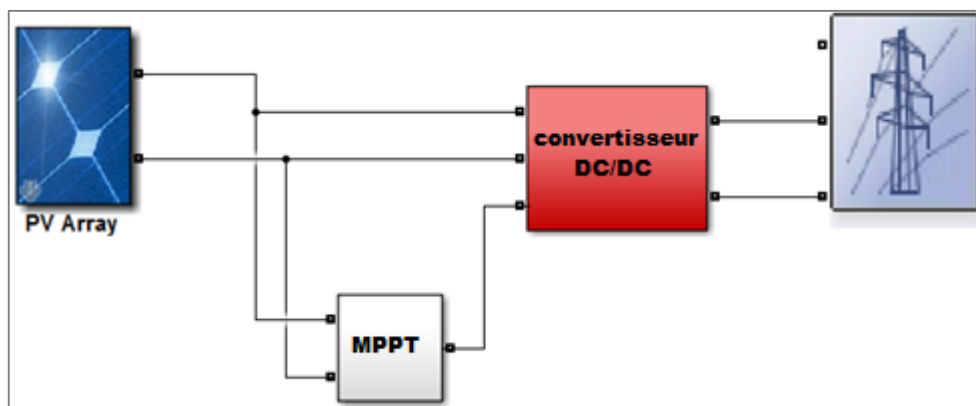


Figure IV.1: Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau.

2.2 Systèmes avec hacheurs

Ce type de systèmes est constitué essentiellement d'un hacheur à la sortie du panneau et un onduleur au côté réseau pour convertir la tension continu en alternatif (Fig.IV.2).

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Ils permettent aussi de contrôler le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques.

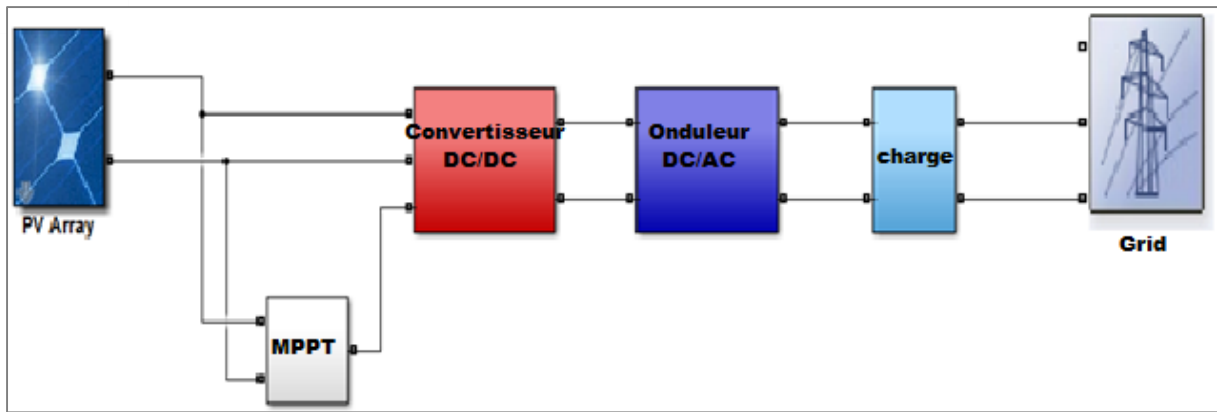


Figure IV.2: GPV relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur

C'est la structure que nous allons étudier dans ce travail.

IV.3 Description de la configuration étudiée :

La configuration étudiée se compose d'un générateur solaire PV connecté à un hacheur survolteur (boost), ce dernier est connecté sur le bus continu d'un onduleur de tension triphasé qui est connecté au réseau électrique (grid).

Le modèle global de la centrale photovoltaïque représenté par la (Fig.IV.2) est constitué de:

3.1 Un générateur photovoltaïque:

Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs ; l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension). Formé de 66 modules en parallèle et 5 modules en série, il peut délivrer dans les conditions standards une puissance de 305 W, un courant de 5.96 A sous une tension optimale de 54.7V. Le circuit équivalent du module est présenté sur la (Fig.IV.3)

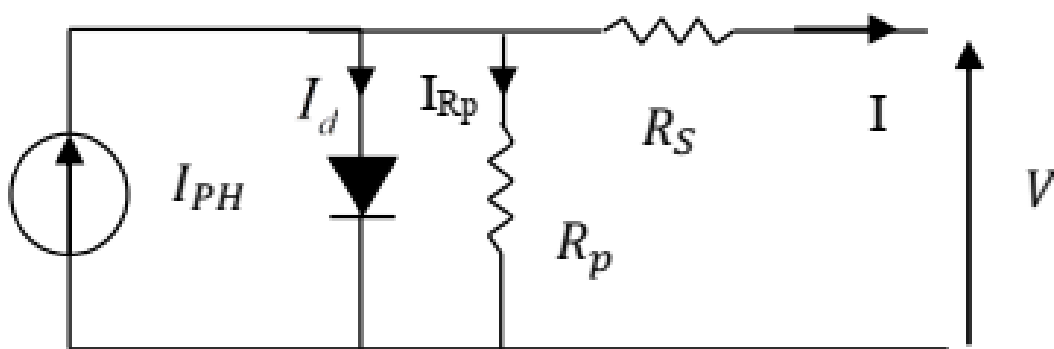


Figure IV.3: circuit équivalent d'un module PV

3.2 Convertisseur Boost (Continu- Continu)

Ce convertisseur est l'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie (Fig.IV.4). Il est adapté pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 54V.

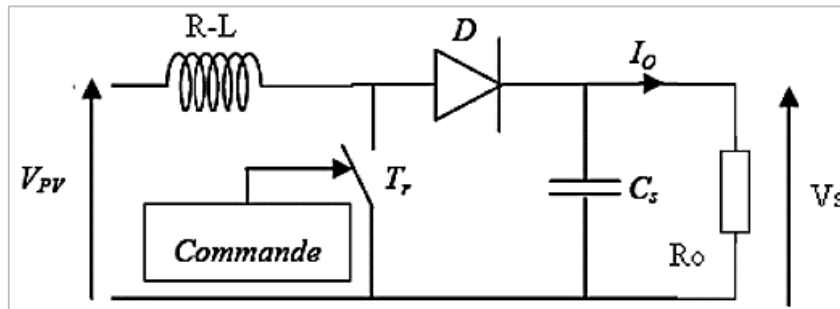


Figure IV.4: circuit électrique d'un hacheur survolteur (boost)

3.3 La commande MPPT :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques, de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

3.4 Convertisseur DC/AC

Ces convertisseurs continu-alternatif sont des convertisseurs directs, ils ne sont composés que d'interrupteurs semi-conducteurs, et la nature de la source continue impose la nature de la source alternative :

- Les commutateurs de courant sont connectés à une source de tension alternative (Figure IV.5.a).
- Les onduleurs de tension sont connectés à une source de courant alternative (Figure IV.5.b)

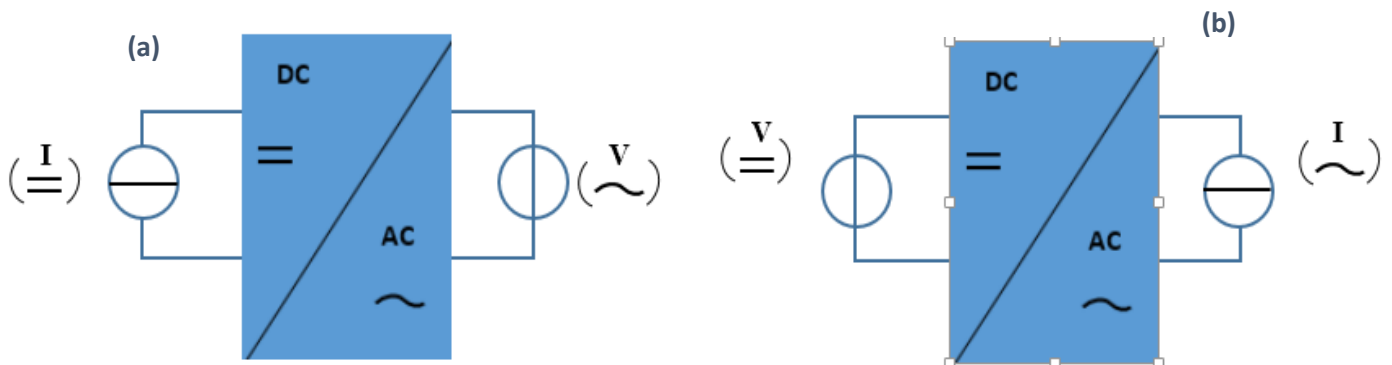


Figure IV.5: convertisseur DC/AC

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases, mais dans les applications de grande puissance, le nombre de phases peut être plus élevé (12, 24) par transformation [26].

3.5 La charge :

La charge sur le côté (AC) est une choisi une charge équilibrée (RL).

3.6 Le réseau électrique :

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 22\text{kV}$ et de fréquence $f = 50\text{Hz}$.

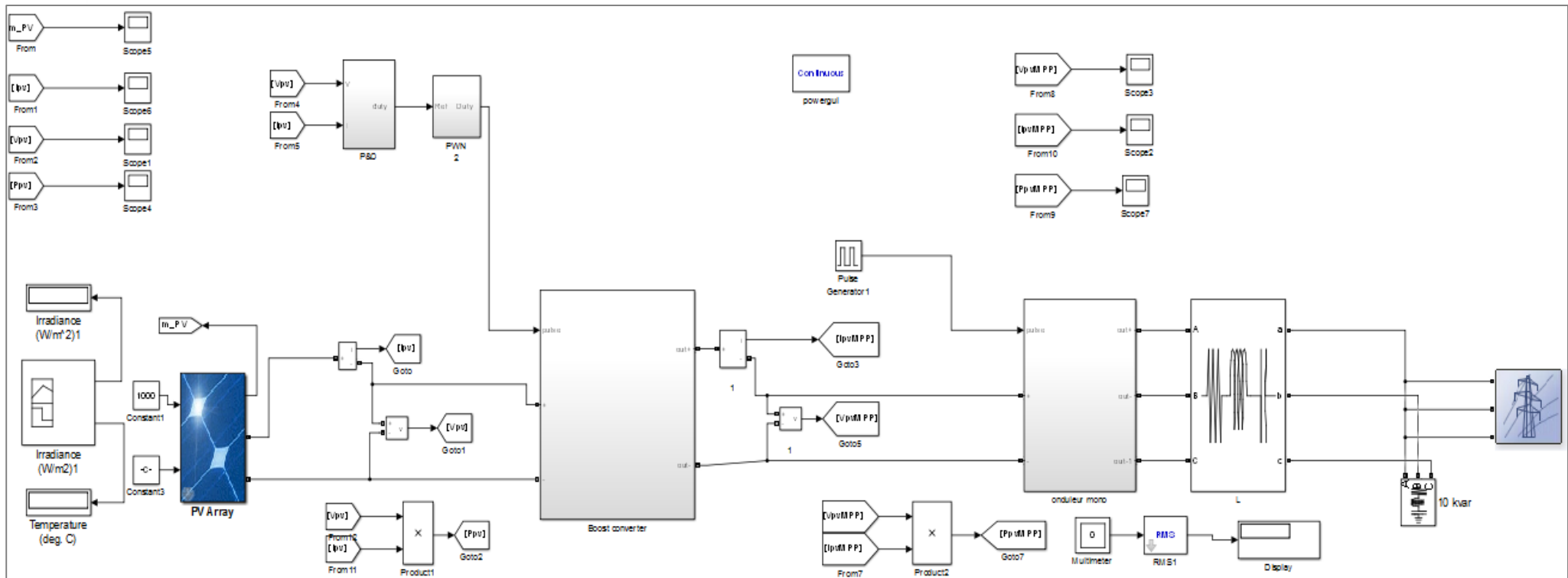


Figure IV.6: Schéma block de la simulation sous Simulink

IV.4 Etape de la simulation :

La structure complète du générateur photovoltaïque connecté au réseau que nous proposons pour l'étude et la simulation est présentée sur la (Fig.IV.6).

4.1 Simulation du générateur GPV

Le module photovoltaïque (Sunpower SPR-305-WHT), est choisi pour la simulation. Il contient (96) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 106W [30].

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Tableau IV.7: Paramètres du panneau photovoltaïque

Ensoleillement standard G	1000 W
Température standard, T	25°C
Puissance maximale Pmax	305 W
Tension à Pmax ou tension optimale (Vop)	54.7 V
Courant à Pmax ou courant optimal (Iop)	5.58 A
Tension de circuit ouvert Vco	64.2 V
Courant de court-circuit Icc	5.96 A
Nombre de cellule en série	96
Courant photonique Iph	5.96 A
Courant de saturation Isat	5.26 μ A

La caractéristique I-V de ce modèle est donnée par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{nK_T} \right) - 1 \right)$$

Avec :

I_{pv} : Courant du panneau photovoltaïque.

I_{ph} : Courant photonique.

I_{sat} : courant de saturation

V_{pv} : Tension aux bornes du PV.

R_s : résistance série

n : facteur d'idéalité

K : constante de Boltzmann

L'équation du courant photo-généré I_{ph} ramenée aux conditions standard ($G = 100W /m^2$ et $T_a = 250 C$) est donnée par [30]:

$$I_{ph} = \left[I_{cc} \frac{G}{G_r} + I_t \cdot (T_c - T_r) \right] \cdot N_p$$

Avec :

I_{ph} : Le courant photonique (A).

G_r : Eclairement ou flux de référence 1000W /m².

I_t : Coefficient de température du courant de court-circuit ($I_t = 3.516e-3$)

I_{cc} : Courant de court-circuit.

T_c : Température de la cellule (kelvin).

T_r : Température de référence (300 K).

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle.

Le courant de conduction de la diode dans le cas d'un module est donné par l'équation suivante [30] :

$$I_d \approx -I_{sat}(T) \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot \left(V + \frac{R_s \cdot I}{N_s} \right)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \cdot N_p$$

Le courant de saturation de la diode est donné par l'équation suivante [30] :

$$I_{sat} = I_0 \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right]$$

Avec:

q : La charge de l'électron (1.6e-19).

V : Tension aux bornes de la charge.

k : Constante de Boltzmann (1.38e-23).

n : Coefficient adimensionnel du matériau semi-conducteur.

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode à la température de référence.

E_g : Le gap d'énergie du semi-conducteur, $E_g = 1.1$ eV pour le silicium cristallin.

Le schéma représentatif du modèle mathématique du module photovoltaïque sous Matlab-simulink est donné par la (Fig.IV.7):

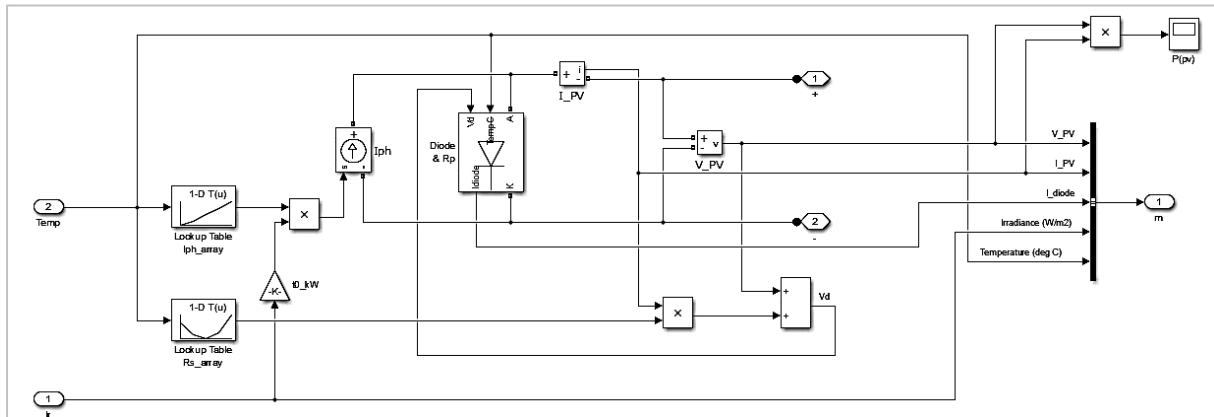


Figure IV.7 : Schéma de simulation du PV sous simulink.

4.2 Simulation du hacheur survolteur

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 nous avons de bons rendements dans les hacheurs. Le rapport cyclique (d) est commandé à partir de la valeur $V_{pv} = V_h$. La (Fig.IV.8) représente le schéma block du hacheur survolteur utilisé pour la simulation sous simulink.

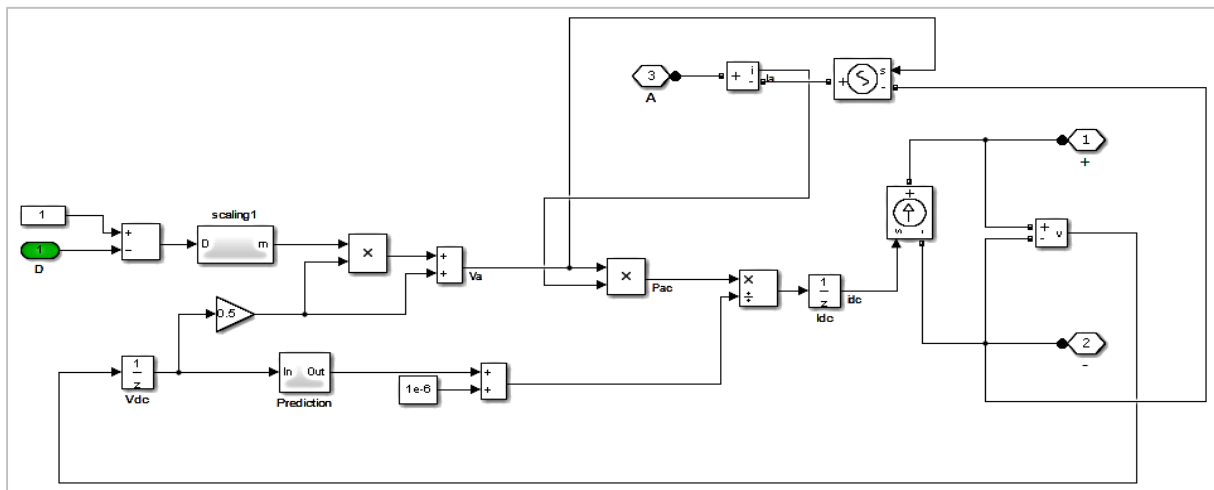


Figure IV.8: Schéma block du hacheur survolteur.

4.3 La commande MPPT :

La commande MPPT « P&O » est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

Dans ce travail, on analyse la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.

La (Fig.IV.9) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande MPPT :

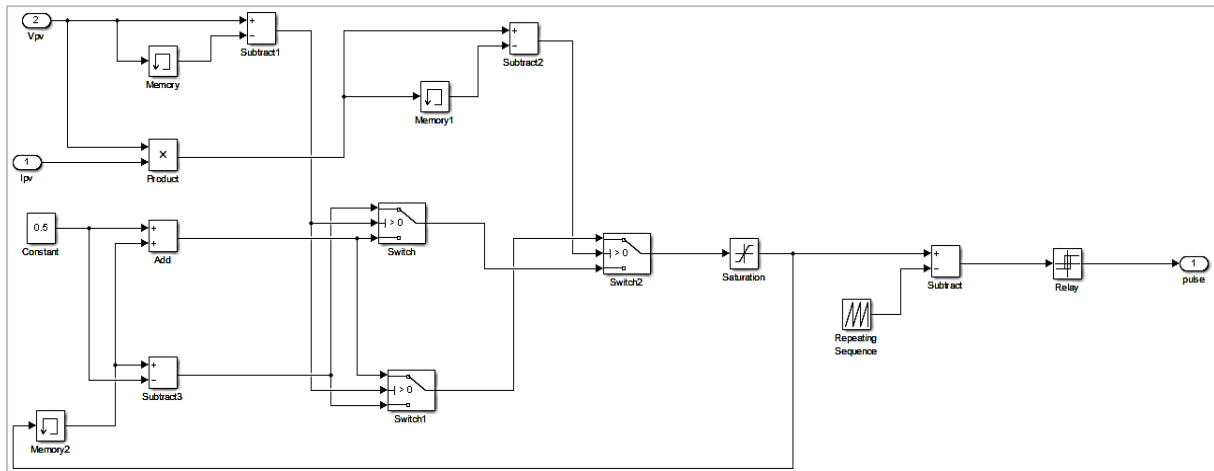


Figure IV.9: Schéma block de la commande MPPT sous simulink.

4.4 La commande de l'onduleur MLI:

L'onduleur triphasé a pour but de convertir la tension continue à la sortie des panneaux en tension alternative afin d'alimenter le réseau triphasé. Cet onduleur est commandé en modulation de largeur d'impulsions (Fig.IV.10) ; Le circuit d'alimentation est généralement constitué de commutateurs IGBT contenant un pont de six transistors de puissance avec des diodes antiparallèles. Il donne la possibilité de mesurer aux bornes des condensateurs une tension continue (V_{dc}) sans fluctuations. Afin d'assurer que l'onduleur dispose d'une tension maximale à sa sortie, il faut que la tension continue (V_{dc}) soit maintenue dans une plage bien spécifiée. En effet, la valeur minimale des tensions continues détermine directement l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur.[31]

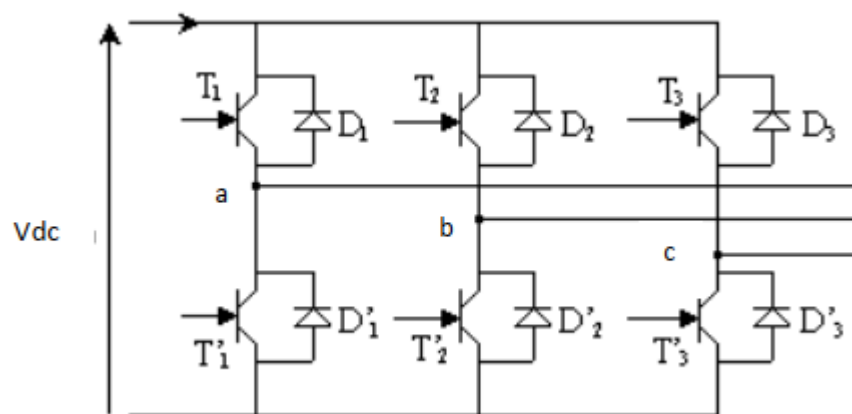


Figure IV.170: Schéma block de la commande de l'onduleur triphasé.

Les états de commutation de l'onduleur sont définis par les fonctions logiques suivantes.

$$F_a = \begin{cases} 0 & \text{si } T_1 \text{ conduit et } T'_1 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_1 \text{ conduit et } T_1 \text{ bloqué} \end{cases}$$

$$F_b = \begin{cases} 0 & \text{si } T_2 \text{ conduit et } T'_2 \text{ bloqué} \\ 0 & \text{si } T'_2 \text{ conduit et } T_2 \text{ bloqué} \end{cases}$$

$$F_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_3 \text{ conduit et } T'_3 \text{ bloqué} \\ 0 & \text{si } T'_3 \text{ conduit et } T_3 \text{ bloqué} \end{cases}$$

Avec T_i, T'_i ($i = 1, 2, 3$) : transistors des trois bras de l'onduleur, chaque bras est composé de deux interrupteurs bidirectionnelle (Fig.IV.10).

Les tensions des phases sont exprimées en fonction des variables logiques F_a , F_b et F_c par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2F_a - F_b - F_c \\ 2F_b - F_a - F_c \\ 2F_c - F_a - F_b \end{pmatrix}$$

V_{dc} : tension d'alimentation continue de l'onduleur, obtenue à la sortie des PV.

IV.5 Résultats de la simulation :

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents résultats de la simulation :

5.1 Caractéristiques du module photovoltaïque.

Les figures qui suivent illustrent les caractéristiques (I-V) et (P-V) du module PV sous différentes conditions météorologique.

➤ Influence de l'éclairement :

Les (Fig.IV.11 et IV.12) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

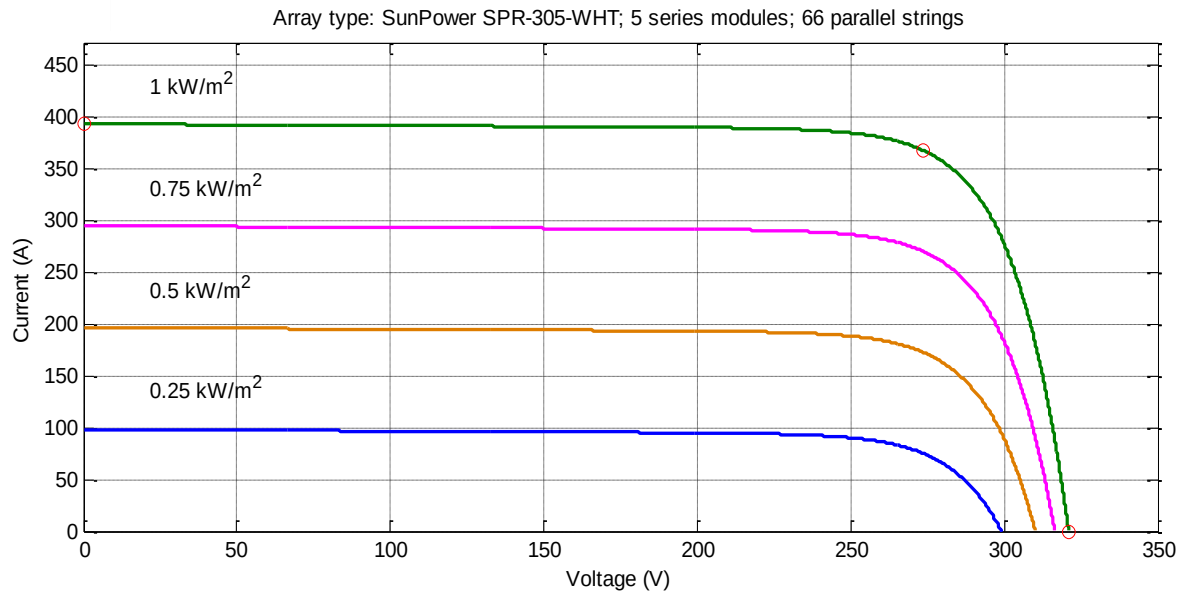


Figure IV.11: Allure de la caractéristique (I-V) à ensoleillement variable

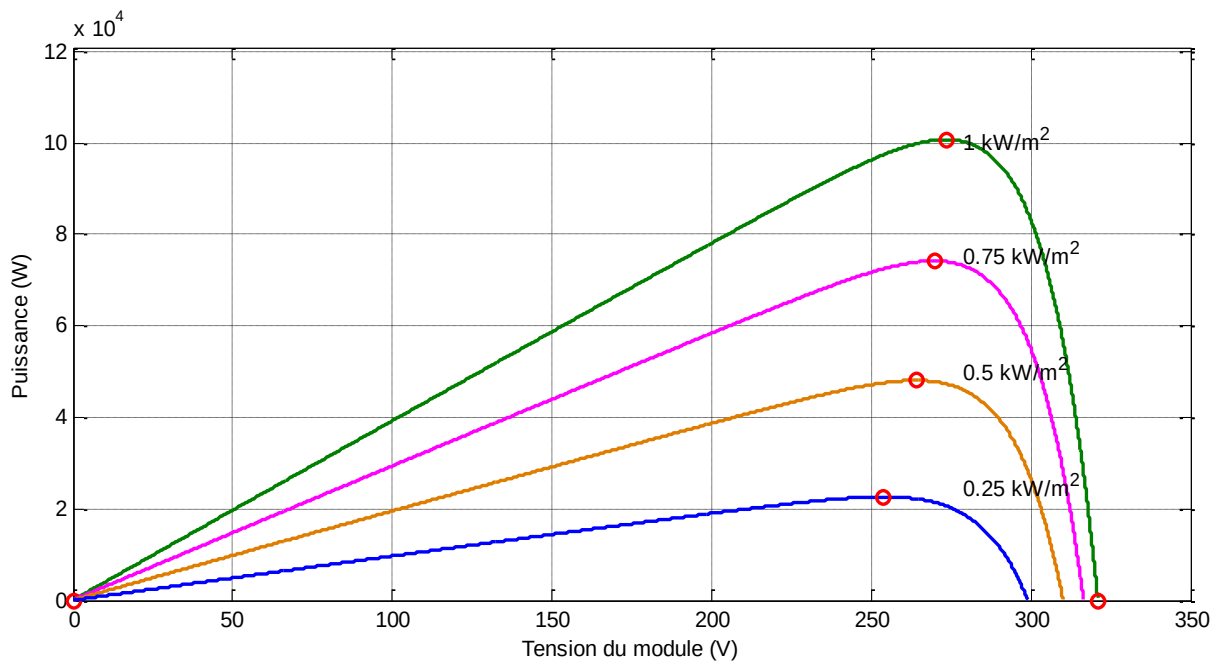


Figure IV.12: Allure de la caractéristique (P-V) à ensoleillement variable.

➤ Influence de la température :

Les (Fig.IV.13 et IV.14) ci-dessous montrent que la tension d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire). Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la (Fig.IV.14) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

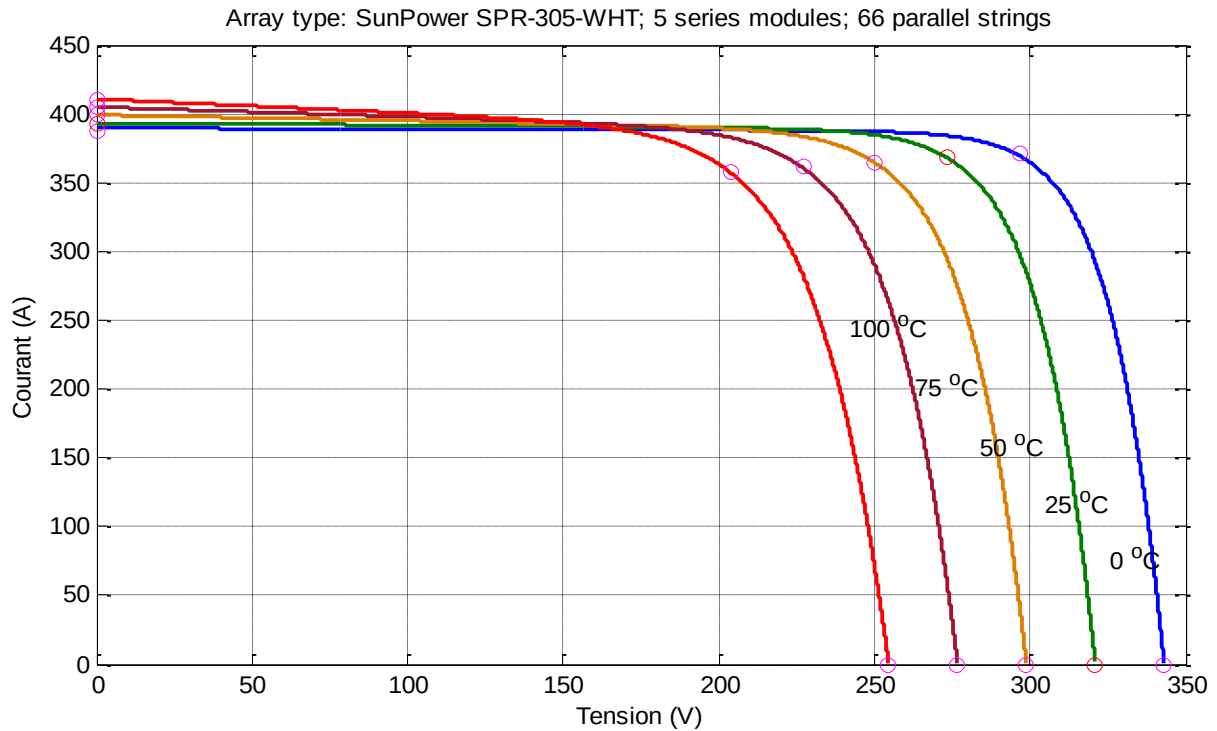


Figure IV. 13: Allure de la caractéristique (I-V) à température variable.

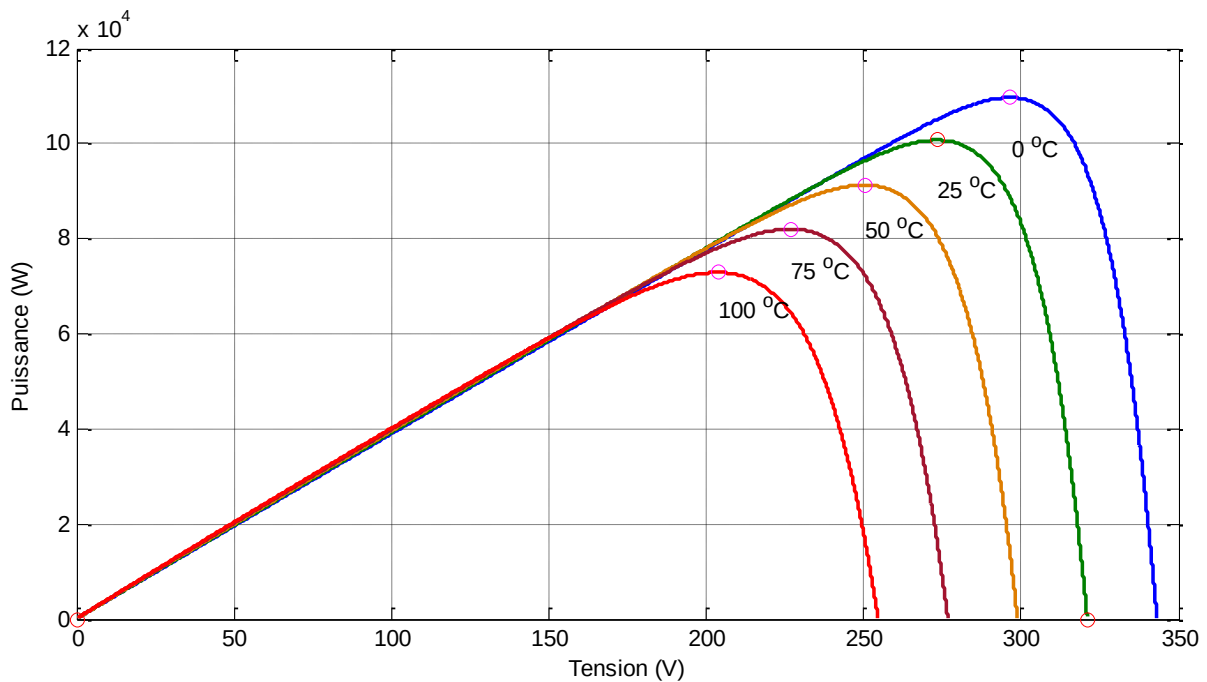


Figure IV.14: Allure de la caractéristique (P-V) à température variable.

5.2 Résultats de la simulation de l'installation sous différentes conditions métrologique

Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances des différentes parties du système (panneaux photovoltaïques, convertisseur DC/DC, convertisseur DC/AC, filtre et réseau). Les figures suivantes montrent les résultats obtenus sous différentes conditions métrologiques.

➤ **Simulation à ensoleillement variable et température constante**

Dans le but d'étudier les performances du système, on a appliqué un éclairage variable tel qu'il est donné en (figure (IV.15)) à une température fixée à 25°C.

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est montrée dans la figure (IV.16). La tension optimale correspondante, obtenue à partir de l'algorithme PO est représentée sur la figure (IV.17). La figure (IV.18) représente l'allure du courant photovoltaïque $I_{pv}(t)$ qui change suivant les variations de l'ensoleillement.

La caractéristique du générateur photovoltaïque $P(V)$ au point PPM est représentée sur la figure (IV.19) avec les caractéristiques théoriques pour les variations du niveau de l'irradiation.

La diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation. L'algorithme PO détermine continuellement la tension optimale qui donne la puissance maximale.

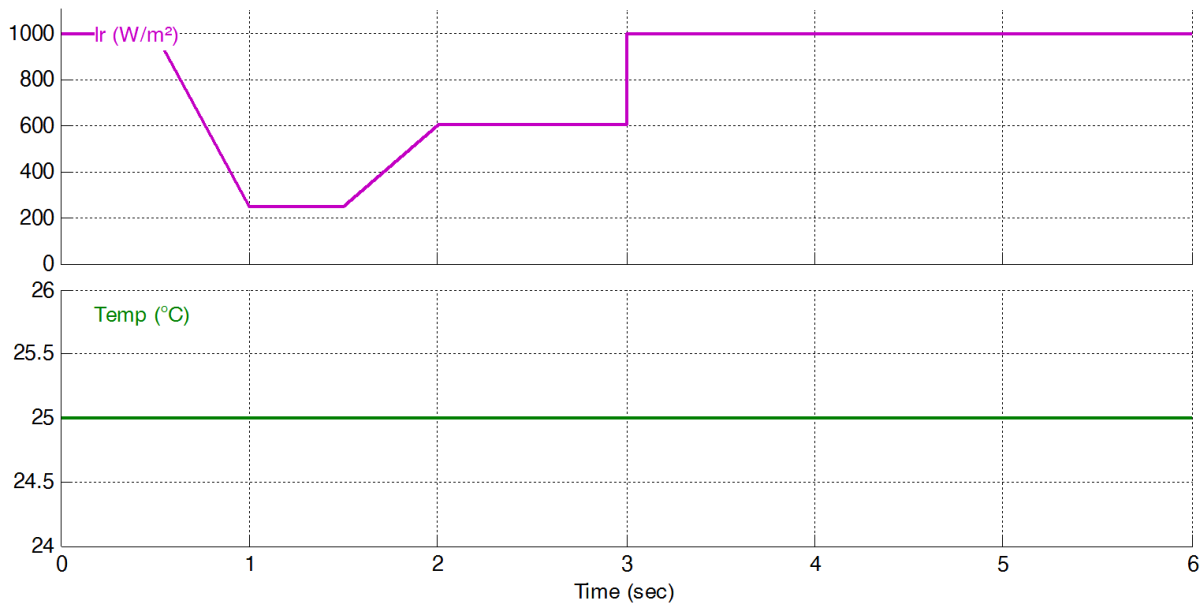


Figure IV.15: Variation de l'éclairement à une température fixe (25°C).

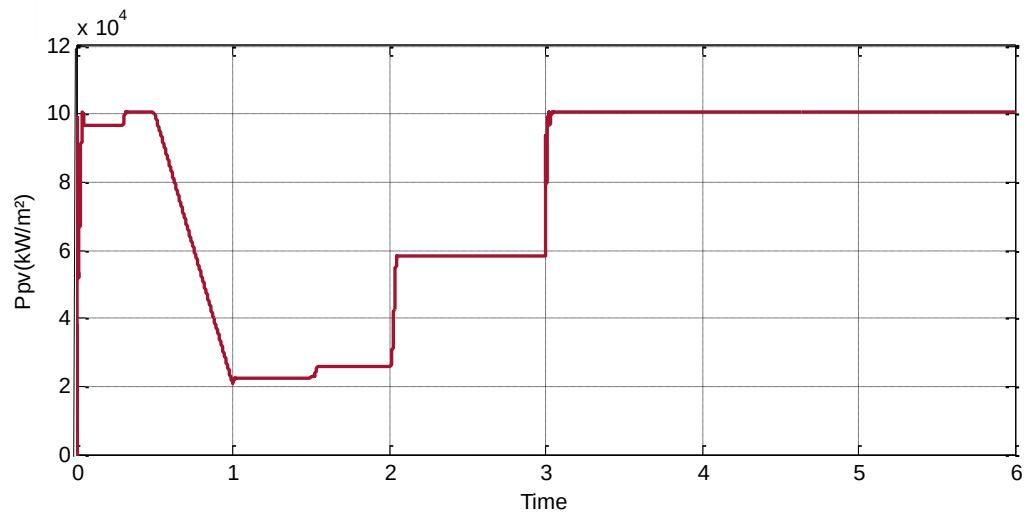


Figure IV.16: Allure de la puissance du panneau photovoltaïque Ppv

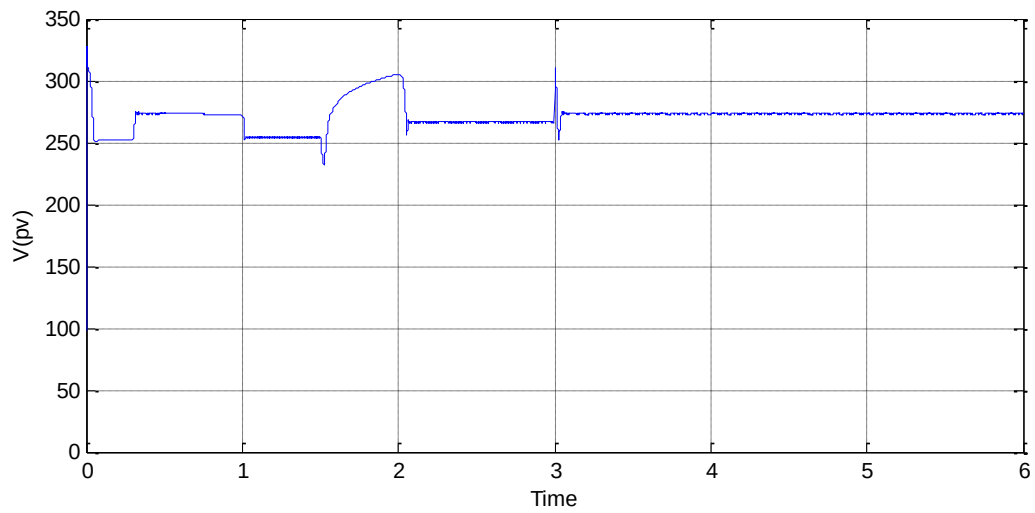


Figure IV.17: Allure de la tension du panneau photovoltaïque Vpv

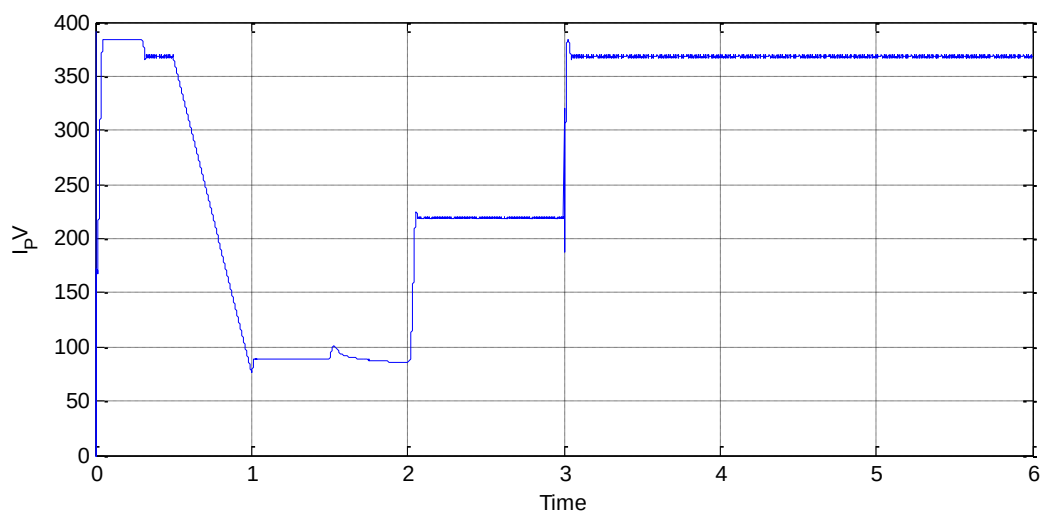


Figure IV.18: Allure du courant panneau photovoltaïque Ipv.

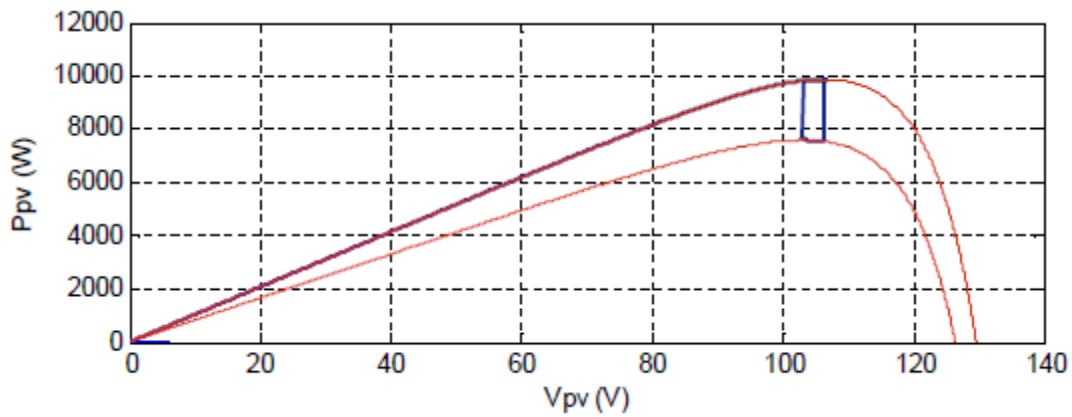
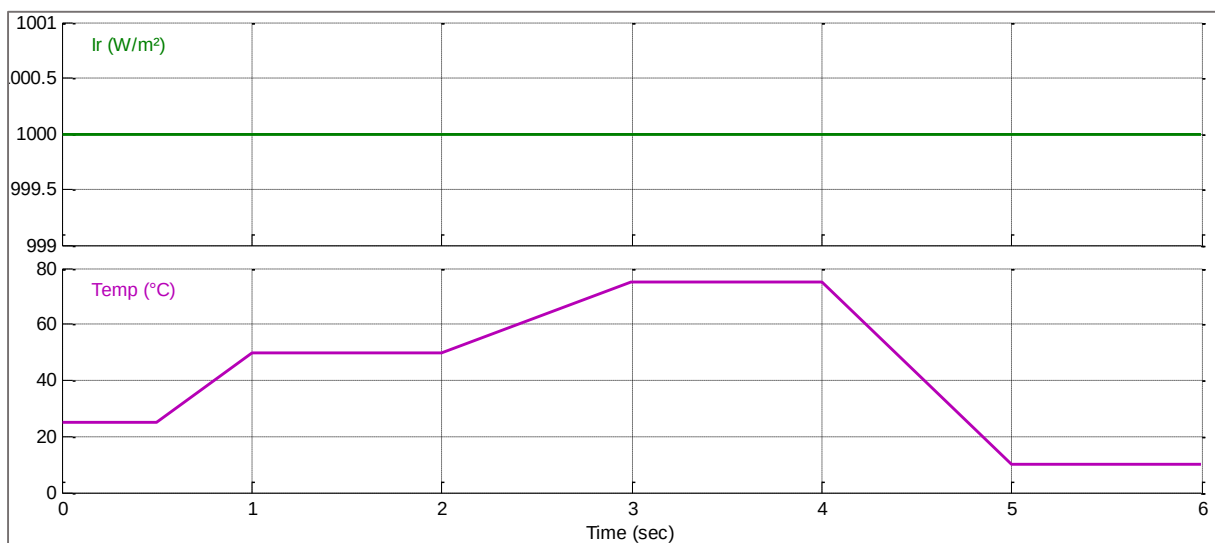


Figure IV.19 : caractéristique P(V) du panneau photovoltaïque

➤ **Simulation à température variable et ensoleillement constant :**

On a appliqué une température variable et un ensoleillement constant de 1000 W/m^2 tel qu'il est donné en figure (IV.20), pour montrer le fonctionnement au point PPM de l'algorithme P&O. L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est représentée dans la figure (IV.21). La tension optimale correspondante, obtenue à partir de l'algorithme PO est représentée sur la figure (IV.22), on voit bien que la tension augmente avec la diminution de la température et le courant photovoltaïque reste pratiquement inchangé tel qu'il est représenté sur la figure (IV.23).

La caractéristique du générateur photovoltaïque $P_{pv}(V_{pv})$ au point PPM est représentée avec les caractéristiques théoriques pour les variations de température, figure (IV.24). La diminution de la température implique une augmentation de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

Figure IV.20: Variation de la température à une irradiance fixe (1000 W/m^2).

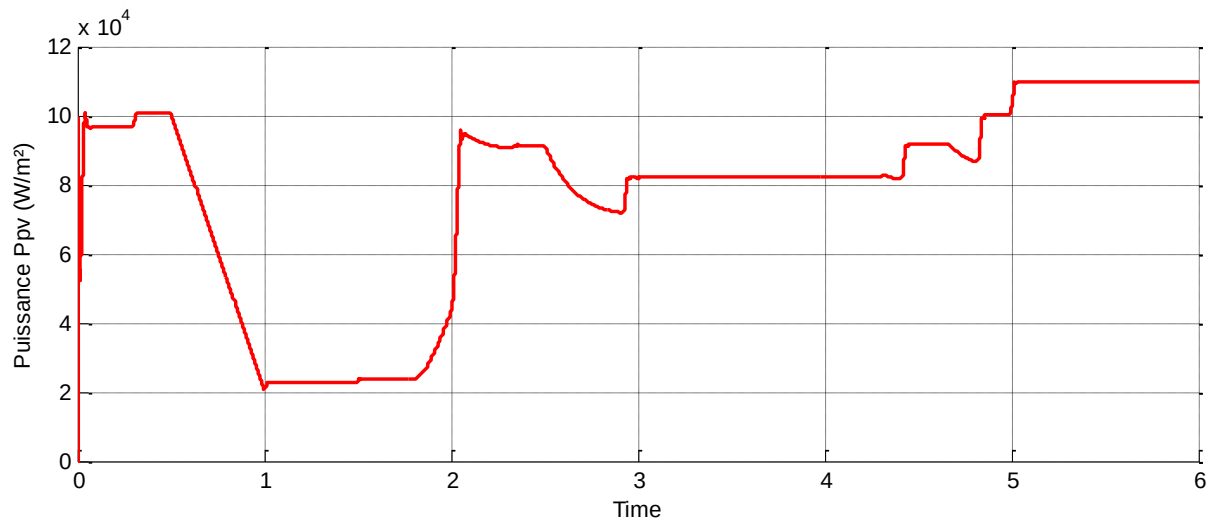


Figure IV.21: Allure de la puissance photovoltaïque P_{pv} à Irradiance fixe ($1000 W/m^2$).

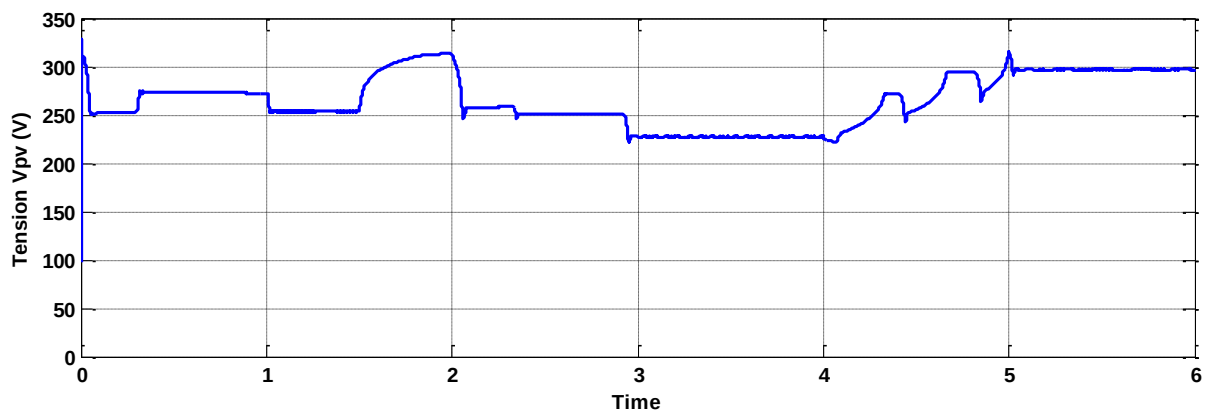


Figure IV.22: Allure de la tension photovoltaïque V_{pv} .

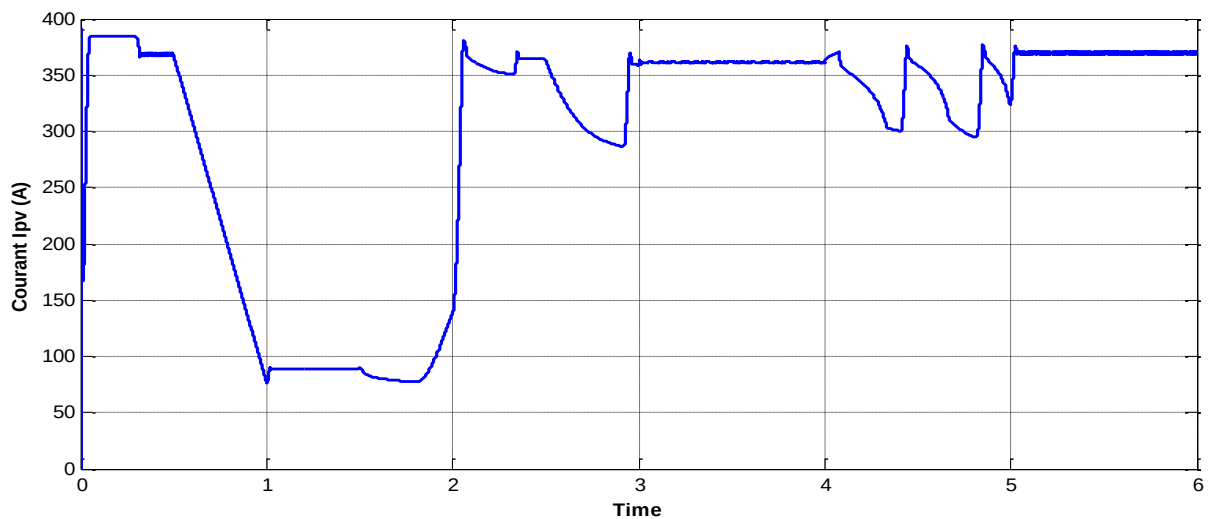


Figure IV.23: Allure du courant photovoltaïque I_{pv} .

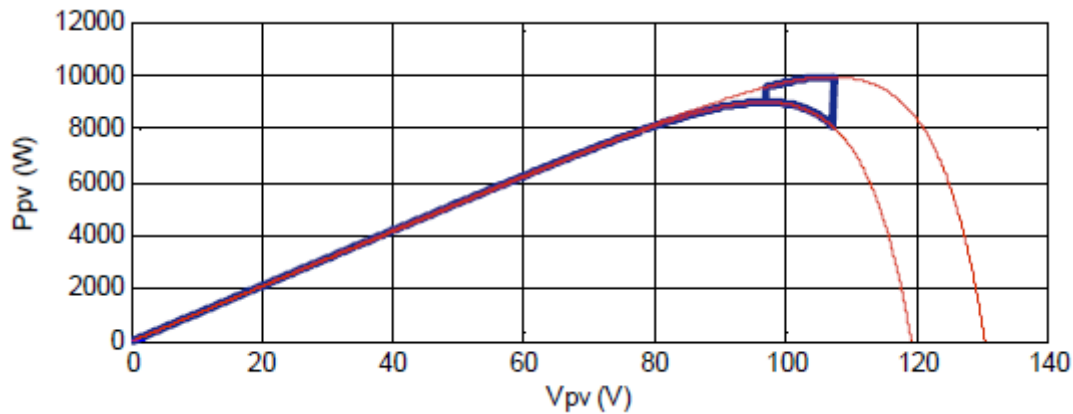


Figure IV.184: Allure de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension photovoltaïque $P_{pv}(V_{pv})$

➤ Simulation dans les conditions variables d'ensoleillement et de température

Dans le but d'étudier les performances du système photovoltaïque connecté au réseau, en fonctionnement à puissance maximale, durant une certaine période, nous utiliserons des profils variables d'ensoleillement et de la température qui sont donnés sur les figures (IV.25). L'allure de la puissance extraite des panneaux photovoltaïques est montrée sur la figure (IV.26).

La tension du panneau V_{pv} est représentée sur la figure (IV.27). Le courant photovoltaïque I_{pv} se développe suivant les variations de l'ensoleillement figure (IV.28). L'allure du rapport cyclique de la commande MPPT est illustrée sur la figure (29).

La tension aux bornes du bus continu obtenue à partir de la commande MPPT de type perturbation et observation est montrée sur la figure (IV.30), elle est bien régulée à sa valeur de référence qui est de 500 V même lors de variations des conditions environnementales. La commande PO permet d'extraire le MPP même quand les conditions climatiques changent rapidement.

La figure (IV.31) représente une comparaison entre les allures de la puissance photovoltaïque et de la puissance fournie au réseau. On peut voir que la puissance photovoltaïque produite correspond à la puissance fournie au réseau. On peut voir, aussi, que la puissance réactive est nulle (figure (IV.32), ce qui correspond à un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Les figures (IV.33), (IV.34) illustrent les allures de la tension et du courant extraits du réseau électrique ($V_{rés}$ et $I_{rés}$) respectivement.

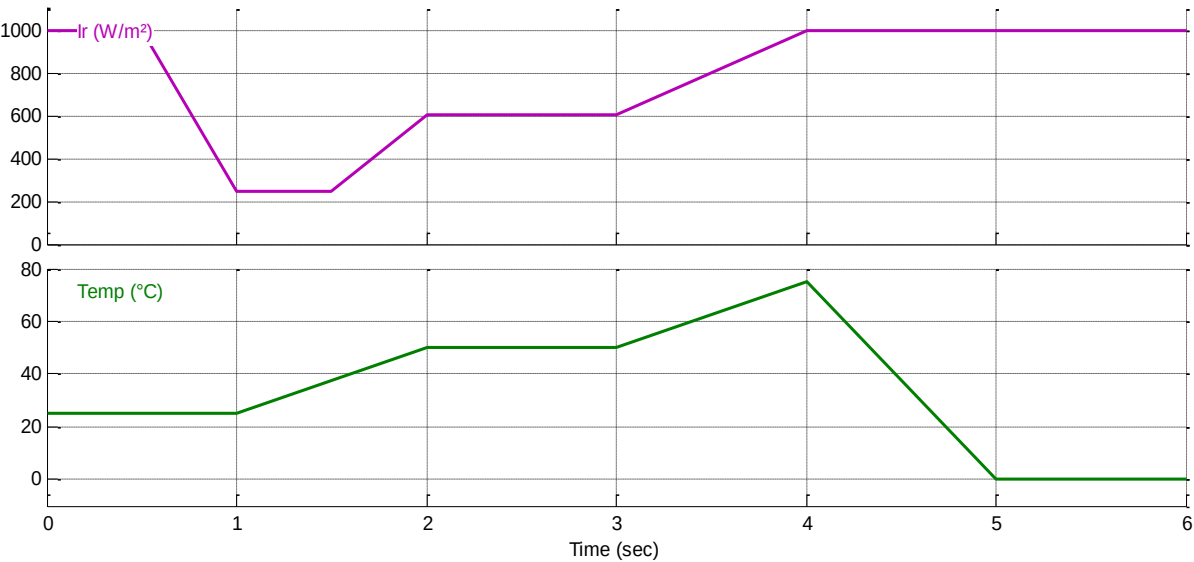


Figure IV.25: Variation de la température et de l'ensoleillement

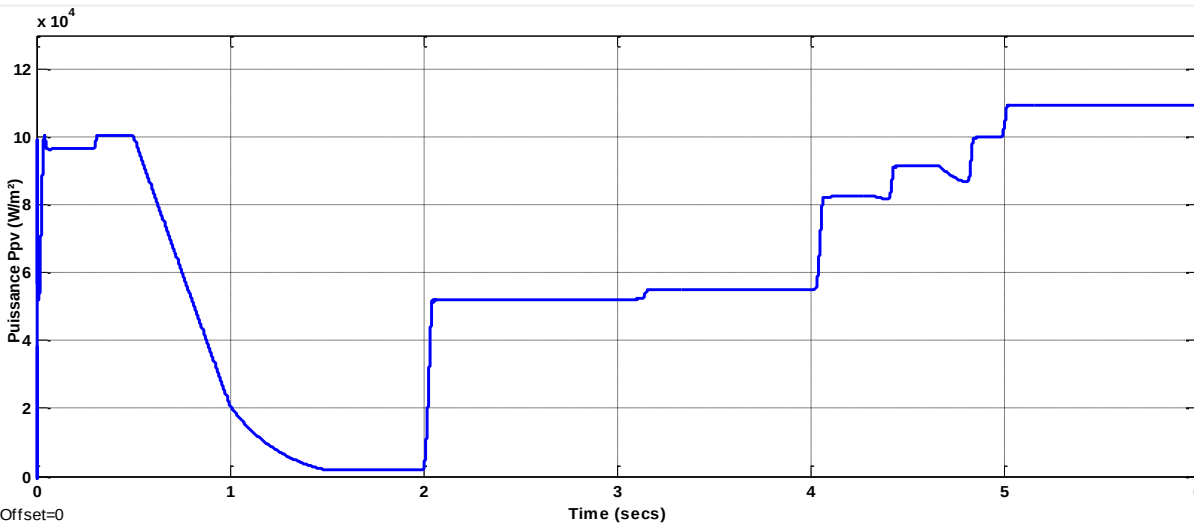


Figure IV.26: Allure de la puissance du panneau Ppv

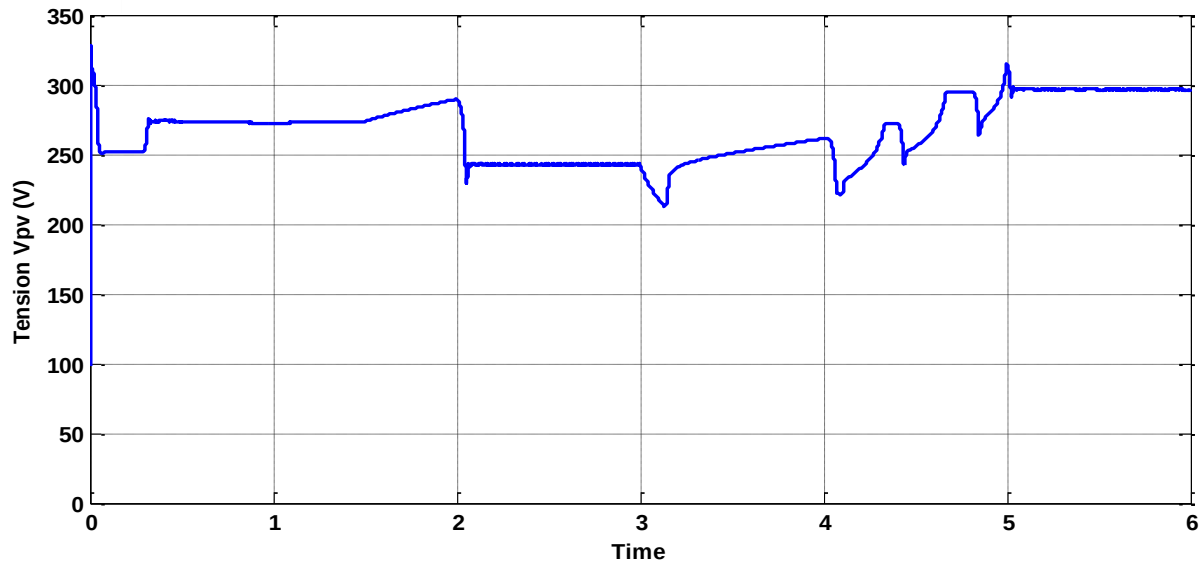
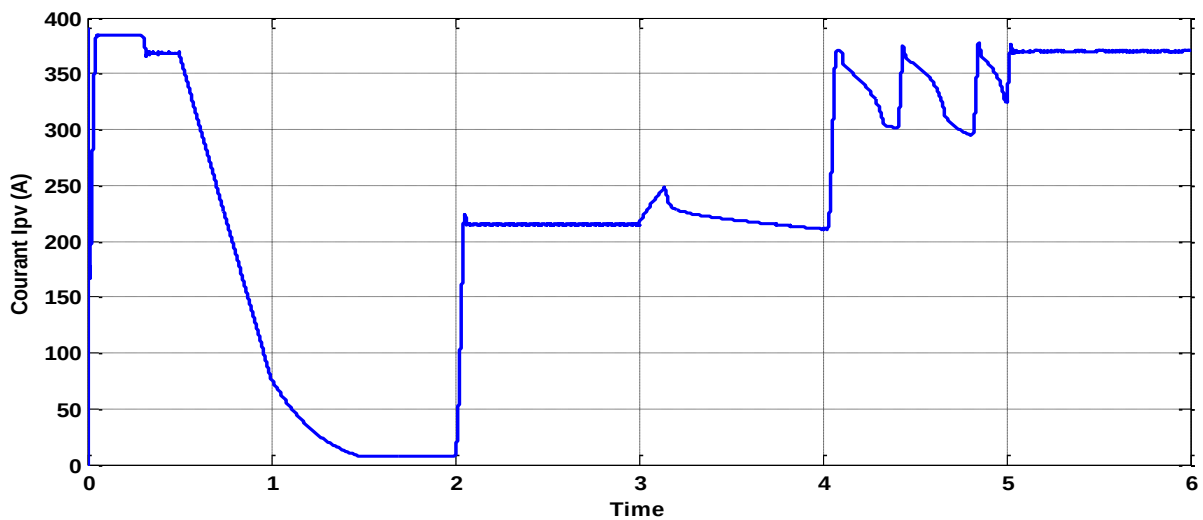
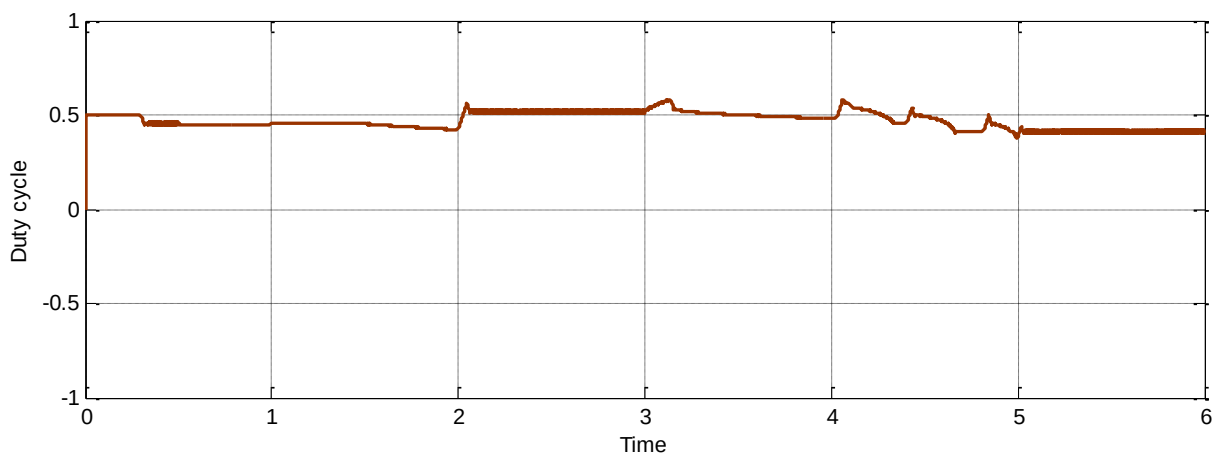
Figure IV.27: Allure de la tension du panneau V_{pv} .Figure IV.28: Allure du courant photovoltaïque I_{pv} .

Figure IV.29 :Allure du rapport cyclique la commande MPPT (D)

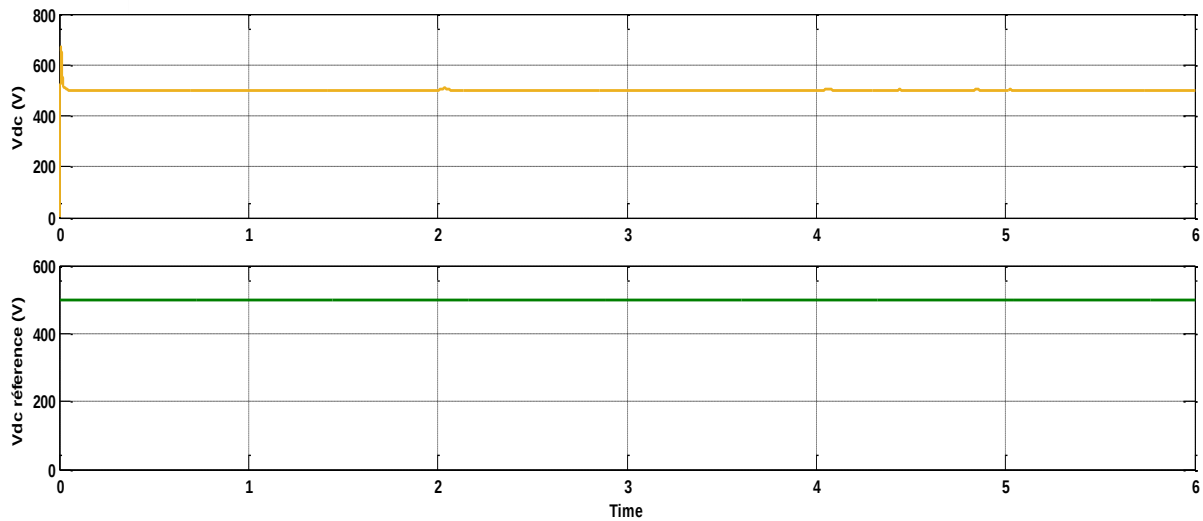


Figure IV.30: Allure de la tension du bus Vdc

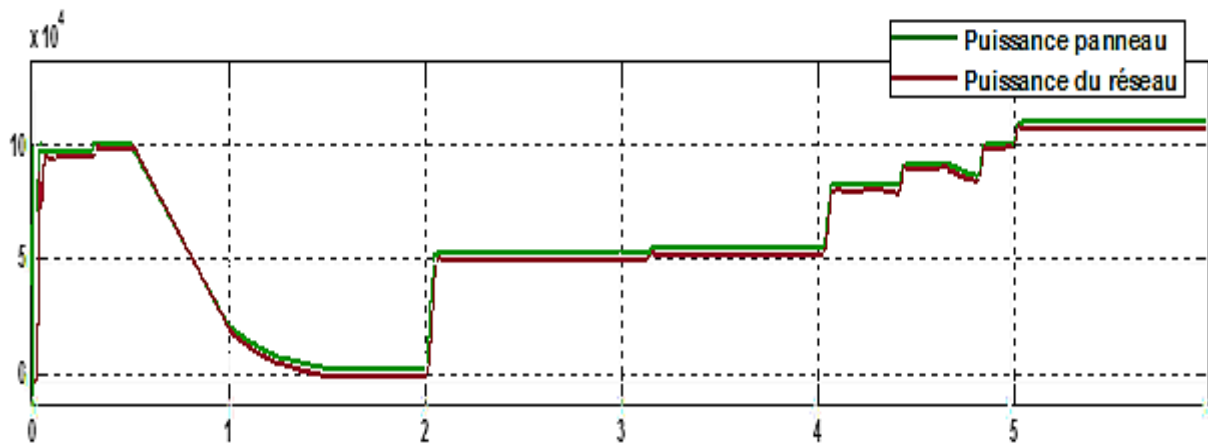


Figure IV.31: Allure de la puissance active fournie au réseau.

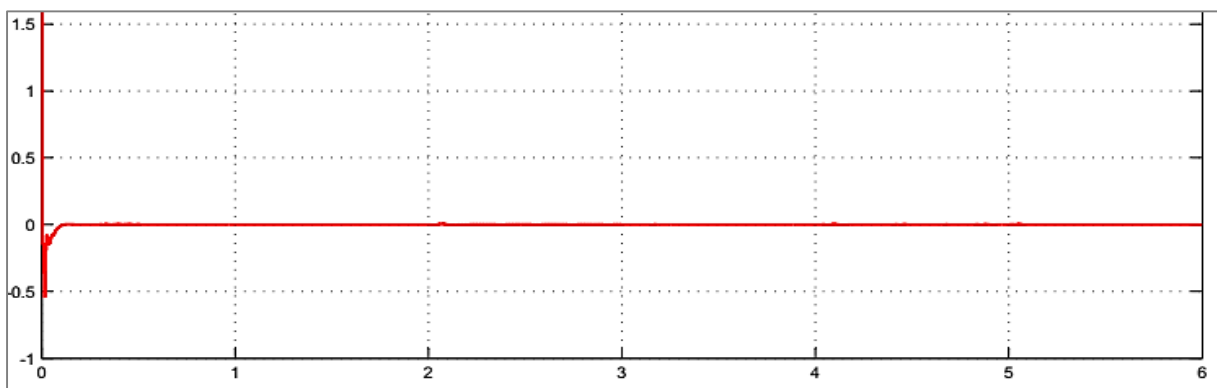


Figure IV.32: Allure de la puissance réactive du réseau.

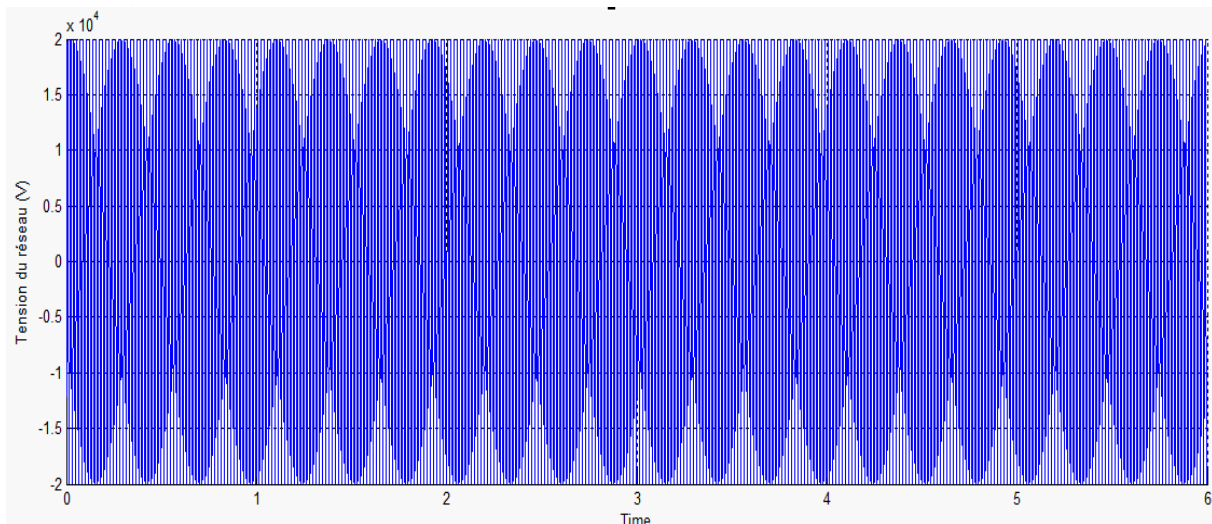


Figure IV.33: Allure de la tension extraite du réseau

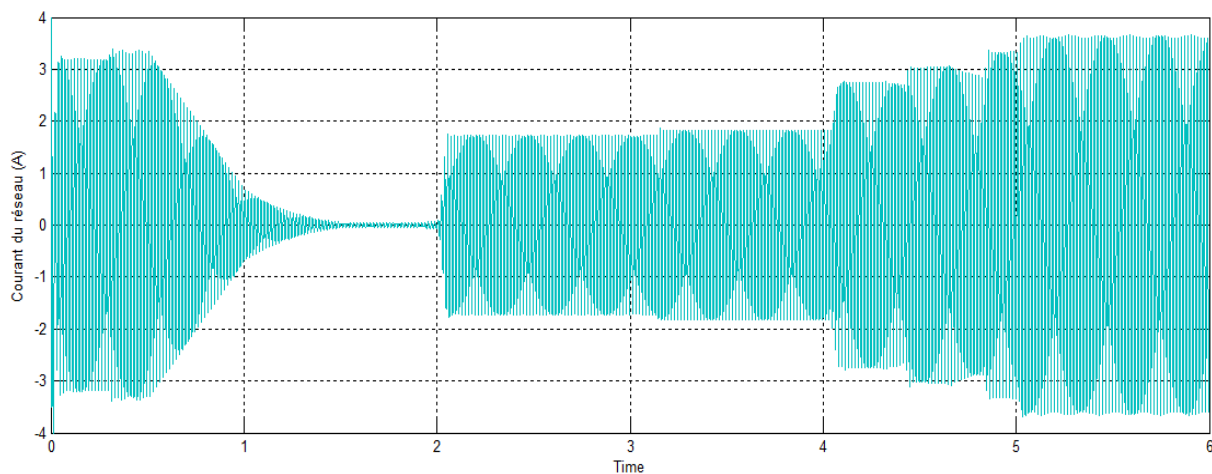


Figure IV.34: Allure du courant extrait du réseau

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés une description des différentes étapes de simulation d'un GPV raccordé au réseau, et illustré les schémas block réalisés sous simulink.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque, et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement.

Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink). Nous avons procédé à cette étude en quatre étapes : définition et généralité sur les systèmes photovoltaïque, les convertisseurs statiques, la méthode de poursuite de point de puissance maximale et système photovoltaïque connecté au réseau électrique (MPPT) enfin : la simulation de tout l'ensemble. Dans la première partie on parlera sur les bases de la cellule solaire et le schéma équivalent de la cellule solaire et de l'effet photovoltaïque.

Après on a parlé sur les convertisseurs DC-DC est on a opté pour le convertisseur survolteur « BOOST » la raison c'est que le panneau ne génère pas assez de tension donc il faut utiliser le BOOST pour augmenter sa tension et ainsi augmenter la puissance de notre installation.

Le convertisseur DC-DC nous a facilité la tâche de développement d'un modèle de recherche du MPPT en Simulink.

Ensuite, on a étudié la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Pour produire cette puissance et obtenir une efficacité maximale, l'ensemble du panneau photovoltaïque doit fonctionner à ce point particulier.

Enfin, on a utilisé un onduleur triphasé (convertisseur DC-AC) pour transformer le courant continu en courant alternatif, qui transférera ce courant en réseau domestique et l'excédent au réseau central. Nous avons démontrés tous le processus en utilisant Matlab/Simulink qui a englobé toute ces parties pour simuler un Panneau photovoltaïque connecté au réseau.

Les résultats obtenus lors de la simulation ont démontrés que les convertisseurs et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Nos perspectives, d'après ce travail, est de pouvoir raccorder une installation photovoltaïque au réseau électrique de haute tension pour subvenir aux besoins en énergies électriques, et optimiser cette installation afin d'avoir un meilleur rendement et une puissance optimale.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] B.Multon, "Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [2] IBGE institut bruxellois pour la gestion de l'environnement «le photovoltaïque –module.3 – fonctionnement et technologies» novembre 2010-9/10.
- [3] K. Helali ‘Modélisation d’une cellule photovoltaïque Etude comparative ‘ Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzou 2012
- [4] M.Blhadj ‘Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome ‘ Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2008.
- [5] Y. Pankow, « Étude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension », Thèse de doctorat de l’école nationale supérieure d’Arts et Métiers, Paris, décembre 2004.
- [6] Yann Riffonneau. « gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecter au réseau » – Application à l’habitat. Energie électrique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.
- [7] Labed, S., Lorenzo, E., 2004. The impact of solar radiation variability and data discrepancies on the design of PV systems. Renew. Energy 29 (7),1007–1022.
- [8] Angel Cid Pastor. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2006. Français.
- [9] K. Kheloufi, Modélisation mathématique et circuit électronique équivalent de cellules solaire à colorant organique, Master, Univ, UMMTO,2018.
- [10] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/conversion-d-energie/>
- [11] C. ROMBAUT, G SEGUIER. R. BAUSIERE Les convertisseurs de l’Électronique de Puissance. Tome 2 : La conversion alternatif-alternatif. 2ème édition. TEC-DOC LAVOISIER)
- [12] A. Courteix, Y. Cheron, H. Foch, M. Metz. Application à un convertisseur continu-alternatif complexe d’une méthode systématique de synthèse. Revue de Physique Appliquée, 1986, 21 (6), pp.357-364.
- [13] S. M. Ait-Cheikh, «*Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [14] Alain Bilbao Ibarreta ‘Réalisation de commandes MPPT Numériques ‘ Rapport de stage Projet Fin d’Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.
- [15] BENSACI Wafa, Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Master, Univ Kasdi Merbah–Ouargla,2012.
- [16] HANANOU.F. ROUABAH.A, Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque, Master, Univ Kasdi Merbah–Ouargla,2014
- [17] Hussein KH, Muta I, Hoshino T, Osakada M (1995) Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. IEE Proc Gener Trans Distrib 142 (1):59

Références bibliographiques

- [18] S.Lhlah “ Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)” Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.
- [19] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang. A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 7, JULY 2008
- [20] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «*Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque* », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [21] K.Sobaihi “ étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction “ Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [22] M. Adouane, «*Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [23] *Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications*. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177
- [24] Market survey : Inverters for grid-tied PV systems, Photon International Avril 2005 p.80, Séries de mesures effectuées à l'Université Suisse des sciences appliquées NeuTechnikum Buch,
- [25] F. Ansari ,A. K. Jha,, Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm” international journal of research in engineering & applied sciences, issn: 2294-3905, PP 19-30,2011.
- [26] Abbassen Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Option machines électriques Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.
- [27] H.Wenzl & all, « Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery », Journal of power sources, Vol 144, pp.373-384, 2005
- [28] A.Szumanowski, Y.Chang, « Battery Management System Based on Battery Nonlinear Dynamics Modeling », IEEE Transactions on vehicular technology, 2008.
- [29] Rameen AbdelHady, Modeling and simulation of a micro grid-connected solar PV system, Water Science 31 (2017) 1–10
- [30] S. Nema, R.K Nema., G. Agnihotri, “Matlab/ simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification”, *International Journal of Energy and Environment*, Vol.1, pp.487-500, 2010.
- [31] B. Subudhi , and R. Pradhan, “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems,”. *IEEE. Transustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 1949-3029, 2013.

Résumé :

Dans ce travail, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique « perturbation et observation » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans notre analyse, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module SPR-305 produisant, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 106W, un courant optimal de 5.58 A et une tension optimale de 54.7 V. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Abstract :

In this work, we analyzed the modeling and the simulation of the functioning of a photovoltaic system (PV) adapted by a numerical control "Disturbance and observation" ensuring the continuation of the maximum power provided by the PV generator. In our analysis, we designed a PV system where the PV generator is the module SPR-305 producing, under the standard test conditions (CST), a power peak of 106W, an optimum current of 5.58 A and an optimal voltage of 54.7 V. The results simulations obtained under Matlab / Simulink show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems

Mots clés: Système PV – Convertisseur survolteur - Commande MPPT –Modélisation – Simulation.