

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF- M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE
N° :



DOMAINE :S. ET TECHNOLOGIE
FILIÈRE : **Électronique**
OPTION : **Instrumentation**

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Par :

BOUDARRADJI Salima **OULD MAKHLOUFI Meriem**

Intitulé

**Etude et commande d'un générateur photovoltaïque
sous ombrage partiel raccordé à un réseau électrique**

Soutenu le : 14/10/2020, devant le jury composé de :

Mme. Malika FODIL	Université de M'sila	Président
Mr. Amar GUICHI	Université de M'sila	Encadreur
Mr. A. BENHAMADOUCHE	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

*Avant tout, nous remercions **Allah** le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.*

Nous tenons, tout d'abord, à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur « Dr. Amar GUICHI », pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction et tout l'aide qu'il nous a apporté durant toute la durée de ce travail de recherche.

On adresse aussi nos reconnaissances à tous les professeurs et au corps administratifs de département d'électronique pour leurs conseils et leurs connaissances généreusement transmises.

Nous tenons à remercier également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Un grand remerciement plein d'amour pour nos parents qui nous ont tellement soutenues avec l'aide et les motivations ainsi que les moyens qu'ils nous ont procuré et nous ont facilité la réalisation de ce projet. A tous nos amis avec qui nous avons passé d'agréables moments, pour leurs aides et encouragements.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail.

DÉDICACE

*On dédie ce modeste travail à **nos parents** :*

Que le bon dieu les garde.

A tous mes enseignants, du primaire à l'université

À tous :

*BELKHIRI.M, BADREDINNE.K, DRIS.Y et
KARKADI .F*

*Qui m'ont beaucoup aidé et étaient toujours avec
moi*

Merci beaucoup

A tous les amis que j'ai eus dans ma vie.

A toutes les personnes que j'aime, que je respecte.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	1
1 Introduction au système d'énergie photovoltaïque	3
1.1 Énergie solaire	3
1.1.1 Constituants d'un système photovoltaïque	4
1.2 Cellule solaire	4
1.2.1 Caractéristiques électrique d'une cellule solaire	5
1.3 Différents modèles d'une cellule photovoltaïque	6
1.3.1 Modèle à une diode	6
1.3.2 Modèle à deux diodes	7
1.4 Modélisation d'un module photovoltaïque	7
1.4.1 Mise en séries des cellules PV	8
1.4.2 Mise en parallèle des cellules PV	8
1.4.3 Association hybride (Série/Parallèle) des cellules PV	9
1.5 Générateur photovoltaïque	10
1.5.1 Association des modules photovoltaïques	10
1.6 Influence de l'éclairement et de la température	12
1.6.1 Influence de l'éclairement	12
1.6.2 Influence de la température	12
1.7 Effect d'ombrage sur les générateur photovoltaïques	14
1.7.1 Ombrage partiel	14
1.8 Différentes topologies des systèmes PV	16

1.8.1	System autonome (isolé)	17
1.8.2	Système connecté au réseau	18
1.8.3	Système photovoltaïque avec stockage	18
1.8.4	Système photovoltaïque sans stockage	19
1.9	Conclusion	19
2	Convertisseurs DC/DC et poursuite du point de puissance maximum	20
2.1	Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge	20
2.2	Hacheurs	21
2.2.1	Types des hacheurs	22
2.3	Principe du MLI (PWM)	25
2.4	Principe de la commande MPPT	26
2.4.1	Classification des Commandes MPPT	28
2.4.2	Classification des Commandes MPPT selon les paramètres d'entrée	28
2.4.3	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche	29
2.5	Algorithmes d'MPPT	30
2.5.1	Algorithme Perturber et Observer (P&O)	30
2.5.2	Algorithme de l'incrément de conductance	30
2.6	Algorithmes intelligents	32
2.6.1	Algorithme Optimisation par essaim particulaire (PSO)	32
2.6.2	Logique Floue	36
2.7	Simulation de la poursuite du MPPT	38
2.7.1	Résultats de la simulation de la commande P&O :	38
2.7.2	Résultats de la simulation de la commande PSO	41
2.8	Conclusion	43
3	Système PV sous éclairage non-uniforme connecté au réseau	45
3.1	Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau	46
3.2	Structure des systèmes PV connectés au réseau électrique	46
3.2.1	Différents types de systèmes photovoltaïques	46
3.2.2	Structure générale d'un système photovoltaïque	47
3.2.3	Configuration des systèmes PV	47
3.3	Convertisseur DC/AC (onduleur)	48
3.3.1	Structure d'onduleur	50
3.3.2	Modèle de l'onduleur dans le repère (a, b, c)	51
3.3.3	Modèle de l'onduleur dans le repère (α, β)	52
3.3.4	Modèle de l'onduleur dans le repère (d, q)	52
3.4	Transformation de Park	53

3.5	Boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop(PLL)	54
3.5.1	Principe d'une P.L.L classique	54
3.6	Structure de la commande à base du régulateur PI	54
3.6.1	Synthèse du régulateur de la tension continue	55
3.6.2	Synthèse des régulateurs des courants	56
3.7	Techniques de commande d'onduleur	56
3.7.1	Commande MLI	57
3.8	Topologie de filtre	57
3.9	Modélisation de réseau	59
3.10	Résultats de la simulation de réglage du bus continu	60
3.10.1	Interprétation des résultats	61
3.10.2	Conclusion	62
	Bibliographie	65

LISTE DES FIGURES

1.1	Constituants d'un système photovoltaïque	4
1.2	Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [1].	5
1.3	Schéma électrique d'une cellule PV	6
1.4	Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (LM5P)	7
1.5	Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles (2M7P)	7
1.6	Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série	8
1.7	Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en série parallèle	9
1.8	Regroupement (série et parallèle)	9
1.9	Association série et/ou parallèle des modules photovoltaïques [1]	10
1.10	Branchement de panneaux en série	11
1.11	Branchement de panneaux en parallèle	11
1.12	Influence du rayonnement sur la caractéristique I-V	12
1.13	Influence du rayonnement sur la caractéristique P-V	13
1.14	Influence de la température sur la caractéristique I-V	13
1.15	Influence de la température sur la caractéristique P-V	14
1.16	Courbe I-V d'un module PV dans une région de polarisation inverse	16
1.17	Position du point de puissance maximale global [2]	17
1.18	Diagramme général d'un système photovoltaïque autonome	17
1.19	Diagramme général d'un système photovoltaïque connecté au réseau	18
2.1	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	21
2.2	Symbole d'un convertisseur DC/DC	22
2.3	Organigramme des différents types des convertisseurs DC/DC	22
2.4	Schéma électrique d'un hacheur boost	23
2.5	Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur boost en conduction continue [3]	24

2.6	Schéma de base d'un convertisseur Buck [3]	24
2.7	Circuit électrique de base du hacheur survolteur –dévolteur	25
2.8	Principe du MLI	26
2.9	Génération du signal dent de scie	26
2.10	Chaîne de conversion photovoltaïque commandé par une MPPT	27
2.11	Principe de la commande MPPT [4]	27
2.12	Recherche du PPM par la méthode (P&O)[4]	31
2.13	Algorithme de P&O	31
2.14	Organigramme de l'algorithme "Incrémentation de Conductance" [5]	33
2.15	Organigramme général de PSO [5]	34
2.16	Schéma bloc sur le principe de la logique floue	37
2.17	Structure de base de la commande floue	37
2.18	Schéma MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT	39
2.19	Profil d'ensoleillement pour un éclairage uniforme	40
2.20	Caractéristiques P-V du générateur PV sous le profil d'ensoleillement la figure 2.19	40
2.21	Courant absorbé par la charge lors du changement de l'éclairage	40
2.22	Tension de la GPV lors du changement de l'éclairage	41
2.23	Puissance générée par le GPV lors du changement de l'éclairage	41
2.24	Raccordement des trois générateurs PV utilisés dans la création du phénomène d'ombrage partiel	42
2.25	Caractéristiques P-V du générateur PV global pour les trois scénarios d'ombrage partiel	43
2.26	Courant du générateur PV lors de trois scénarios d'ombrage partiel	43
2.27	Tension du générateur PV lors de trois scénarios d'ombrage partiel	44
2.28	Puissance générée par le générateur PV lors de trois scénarios d'ombrage partiel	44
3.1	Schéma globale d'un système PV connecté au réseau électrique	46
3.2	Structure d'un système PV à onduleur central (Central-plant inverter)	48
3.3	Structure d'un système PV à hacheur Multiple-string et un seul onduleur	48
3.4	Structure d'un système PV à onduleur Multiple-string	49
3.5	Structure d'un système PV à onduleur modulaire (Module-integrated inverter)	49
3.6	Symbole de convertisseur Continue - Alternative (DC/AC)	49
3.7	Structure d'un onduleur triphasée	50

3.8	Repères fixes abc, et repère synchrone dq	54
3.9	Schéma de principe d'une P.L.L classique	55
3.10	Schéma de commande à base d'un régulateur PI	55
3.11	Schéma de régulation de la tension du bus continu	55
3.12	Schéma de régulation des courants i_d et i_q	56
3.13	Schéma de régulation des courants i_d et i_q	57
3.14	Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur	58
3.15	Topologie de filtre de base (a) : L, (b) : LC, (c) : LCL	58
3.16	Système de tensions triphasé équilibré	59
3.17	Schéma de l'onduleur côté réseau avec sa commande	61
3.18	Valeur du courant de la source de courant connectée au bus DC	61
3.19	Tension du bus DC	61
3.20	Tension de sortie de l'onduleur avec zoom	62
3.21	Courant injecté au réseau avec zoom	62

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Paramètres du panneau de American Solar Wholesale <i>ASW – 215P</i> Au <i>STC</i> : Température = $25^{\circ}C$ et Éclairement = $1000W/m^2$	39
2.2	Éclairements des trois générateurs utilisés dans la création du phénomène d'ombrage partiel	42
3.1	Paramètre de simulation de l'onduleur côté réseau	60

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant, l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne,...etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT). En effet, le développement des systèmes photovoltaïques a mis en évidence plusieurs facteurs affectant directement le rendement de cette technologie. Des études ont permis de mettre en évidence d'une part l'influence de l'ombrage partiel et d'autre part l'influence de l'augmentation de la température sur le rendement des systèmes solaires photovoltaïques. Les phénomènes d'ombrages partiels en rappel, ont pour conséquence de générer des pertes de puissances élevées, pouvant aller jusqu'à la destruction des panneaux solaires. D'un point de vue économique, ces entraves plombent la rentabilité de la production des systèmes photovoltaïques aussi bien pour la vente, que pour l'auto-production avec un temps de retour d'investissement trop long et une durée de vie non optimisés des équipements. Beaucoup de travaux trouvés dans la littérature ont proposé des solutions techniques dans le but de réduire, ou mieux, éliminer ces

phénomènes. Le but ultime visé étant de faire travailler les panneaux photovoltaïques à leurs points de puissance maximale sous n'importe quelles conditions environnementales.

La présente étude a pour ambition de proposer des solutions techniques pour un transfert optimisé de l'énergie photovoltaïque lors des phénomènes d'ombrage et de l'injecter à un réseau électrique. Le reste de ce mémoire sera développé dans trois chapitres. Le premier chapitre abordera les éléments de base de la conversion photovoltaïque, nous y rappellerons le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, nous présenterons la structure du module PV et le comportement des cellules au sein du module en cas d'occultation ou d'ombrage partiel et les différents modes de dégradations et les effets environnementaux sur le module PV et la description du phénomène d'ombrage et leurs conséquences sur les générateurs photovoltaïques. Dans le deuxième chapitre, on expliquera les techniques de suivie du point de puissance maximale, que ce soit dans les conditions normales ou sous ombrage partiel et on appliquera deux algorithmes MPPT sur un convertisseur DC/DC de type boost, l'algorithme Perturber et Observer (P&O) pour poursuivre le MPPT dans les conditions normales, alors que l'algorithme d'Optimisation par essaim particulaire (PSO) sera appliqué pour poursuivre le MPPT dans les conditions d'ombrage partiel. Dans le troisième chapitre, on présentera les modèles mathématiques de l'onduleur triphasé à deux niveaux, le filtre L et le réseau électrique, ainsi que la technique de commande à tension orientée VOC qui sera appliquée à l'onduleur afin d'injecter la puissance produite par le générateur PV au réseau électrique, cette dernière a aussi besoin d'une technique de synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau. Dans ce travail, on utilisera la boucle à verrouillage de phase (en anglais, phase-locked loop, ou PLL) qui va permettre) est de comparer, en fréquence et en phase, la sortie de l'onduleur à celle du réseau électrique. Finalement, des simulations ont été entreprises dans le but d'observer le comportement du système PV sous conditions d'ombrage partiel lors de l'injection de la puissance produite au réseau électrique.

INTRODUCTION AU SYSTÈME D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Ce chapitre sera commencé par un aperçu général sur les différents constituants d'un système photovoltaïque, puis nous détaillerons les différentes techniques de fabrications des cellules photovoltaïques. Par la suite, on abordera la technique de regroupement des cellules afin d'avoir un module photovoltaïque (PV), ainsi comment regrouper ces modules pour avoir un générateur PV, ensuite, le modèle mathématique d'un module PV sera présenté, puis on passera à l'étude des caractéristiques de ce module ainsi que l'influence de l'éclairement et de la température sur eux. Ce chapitre se terminera par une explication du phénomène d'ombrage partiel et son influence sur le rendement d'un générateur PV.

1.1 Énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à $1367W/m^2$ [6].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- **L'énergie solaire thermique** : elle consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir

de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité ;

- **L'énergie solaire photovoltaïque** : ce type consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposent pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [1].

1.1.1 Constituants d'un système photovoltaïque

Pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire, les installations photovoltaïque doivent nécessairement être composées de ces éléments : des panneaux solaires, des convertisseurs et des batteries de stockage. Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la consommer, de la stocker ou de la l'injecter au réseau électrique.

- Les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu ;
- Les convertisseurs permettent ensuite d'adapter ou de transformer l'électricité obtenue en une forme compatible avec la charge ;
- Les batteries de stockage permettent de stocker le surplus d'énergie pour être utilisé par la suite au moment critiques [6].

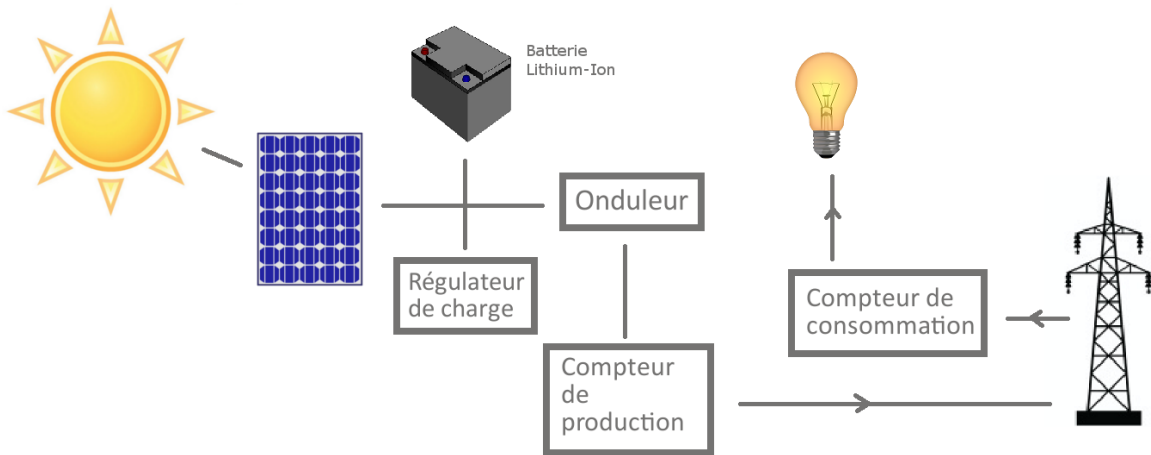


FIGURE 1.1 – Constituants d'un système photovoltaïque

1.2 Cellule solaire

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque [1].

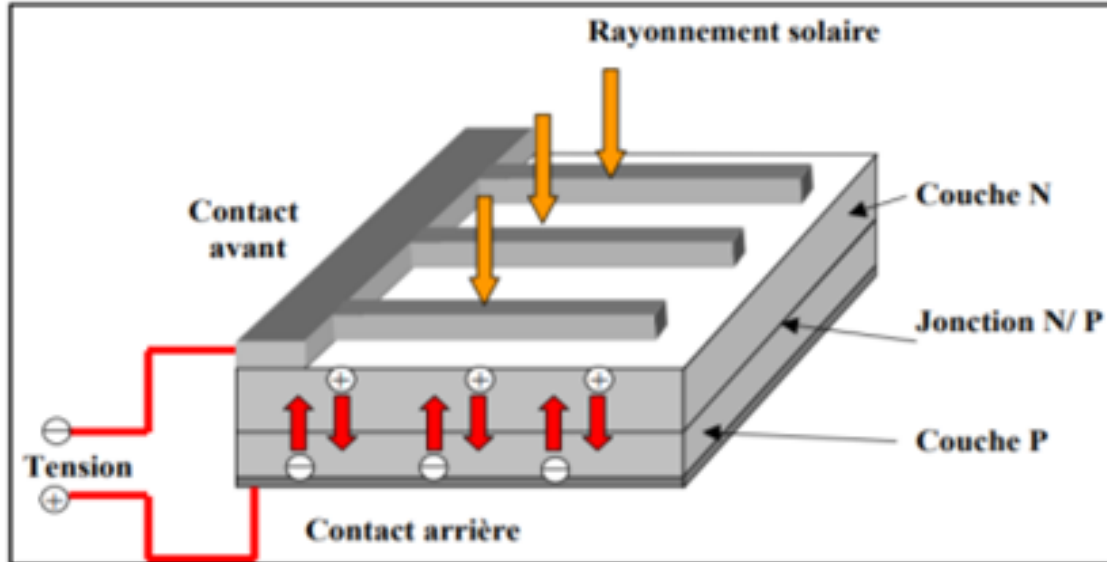


FIGURE 1.2 – Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [1].

1.2.1 Caractéristiques électrique d'une cellule solaire

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{cell} = I_{cc} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{cell} + (I_{cell} \cdot R_{serie})}{nVt} - 1\right) \right] - \frac{V_{cell} + (I_{cell} \cdot R_{serie})}{R_{shunt}} \quad (1.1)$$

Tel que :

I_{cell} : le courant fourni par la cellule [A].

I_{cc} : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit en [A].

I_s : le courant de saturation de la jonction [A].

V_{cell} : la tension aux bornes de la cellule [V].

Vt : $(nKT)/q$: potentiel thermique.

K : la constante de Boltzmann $(1,381 \cdot 10^{23})$ [J/K].

T : la température de la jonction en [K].

q : la charge de l'électron $1.6e^{19}$ [ev].

n : le facteur de non idéalité de la jonction.

R_{shunt} : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction en [Ω].

R_{serie} : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de Connexions [Ω].

La figure 1.3 représente le schéma électrique de la cellule déduit de l'équation (1.1)[7].

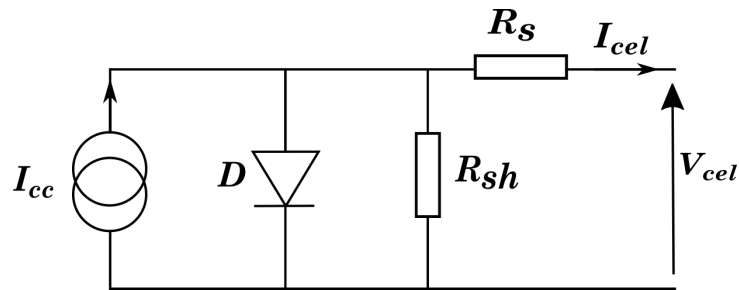


FIGURE 1.3 – Schéma électrique d'une cellule PV

1.3 Différents modèles d'une cellule photovoltaïque

1.3.1 Modèle à une diode

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure 1.4 qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt, une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants : n , I_{ph} , R_s , R_{sh} et I_{sh} . Il est connu sous le nom modèle à cinq paramètres (L5P : Lumped mechanism with 5 Parameters). L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.2)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [8] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{nVt}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

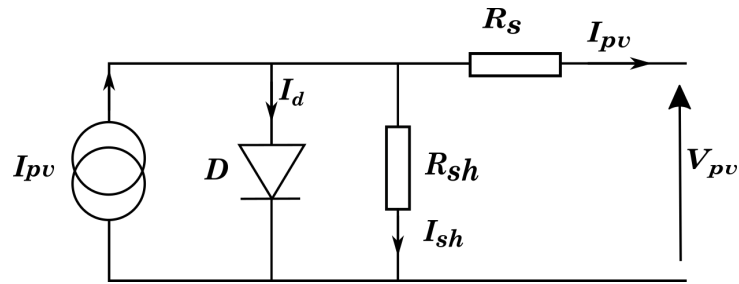


FIGURE 1.4 – Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (LM5P)

1.3.2 Modèle à deux diodes

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters). Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent de la figure 1.5. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (1.4)$$

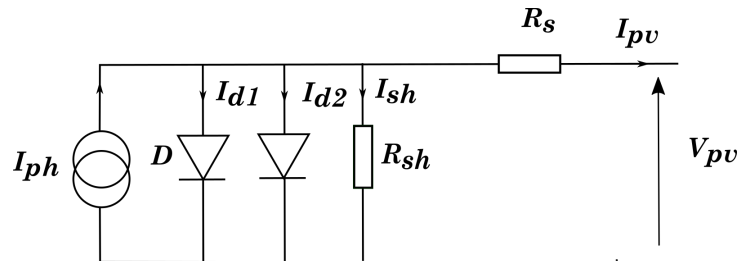


FIGURE 1.5 – Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles (2M7P)

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [8] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{Vt \cdot n_1}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{Vt \cdot n_2}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

1.4 Modélisation d'un module photovoltaïque

La tension et le courant d'une seule cellule sont généralement insuffisants pour alimenter une charge électrique, à cet effet, les cellules sont associées en série et en parallèle

pour obtenir une tension et un courant plus important [7].

1.4.1 Mise en série des cellules PV

Une association de Ns cellules solaire en série permet d'augmenter la tension d'un module photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule comme le montre la figure 1.6. L'équation (1.6) résume les caractéristiques électriques d'une association série de Ns cellules solaire [7].

$$\begin{cases} V_{co,m} = n_s \cdot V_{co,cell} \\ I_{cc,m} = I_{cc,cell} \end{cases} \quad (1.6)$$

Avec :

$V_{co,m}$: tension du circuit ouvert du module PV [V].

$I_{cc,m}$: courant de court circuit du module PV [A].

$V_{co,cell}$: tension de circuit ouvert d'une cellule solaire [V].

$I_{cc,cell}$: courant de court circuit d'une cellule solaire [A].

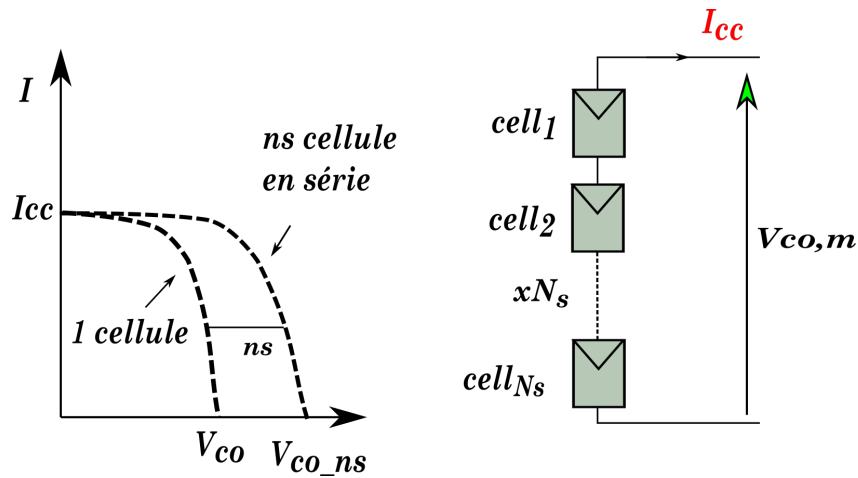


FIGURE 1.6 – Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série

1.4.2 Mise en parallèle des cellules PV

Une association parallèle de Np cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du module ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenu par addition des courants comme il est illustré sur la figure 1.7. L'équation (1.7) résume à son tour les caractéristiques électrique d'une association parallèle de Np cellules [7].

$$\begin{cases} I_{cc_Np} = N_s \cdot I_{cc} \\ V_{co_Np} = V_{co} \end{cases} \quad (1.7)$$

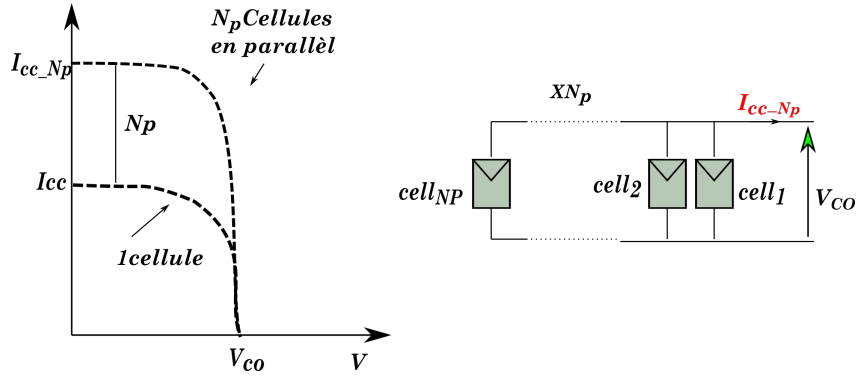


FIGURE 1.7 – Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en série parallèle

1.4.3 Association hybride (Série/Parallèle) des cellules PV

Selon l'association en série et /ou parallèle de ces cellules, voir figure 1.8, les valeurs totales du courant de court-circuit et de la tension à vide sont données par les relations suivantes [7].

$$\begin{cases} I_{pv_m} = N_p \cdot I_{cc} \\ V_{pv_m} = N_s \cdot V_{co} \end{cases} \quad (1.8)$$

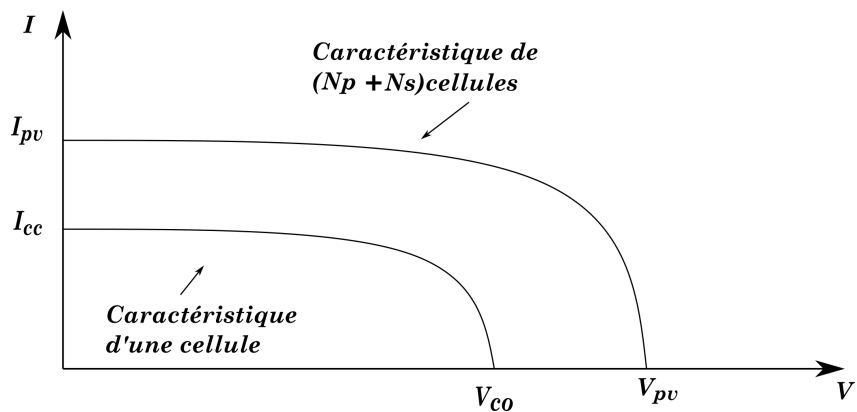


FIGURE 1.8 – Regroupement (série et parallèle)

1.5 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble des modules photovoltaïques montés en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirés tels que la puissance, le courant de court circuit (I_{cc}) ou la tension en circuit ouvert (V_{OC}) [1].

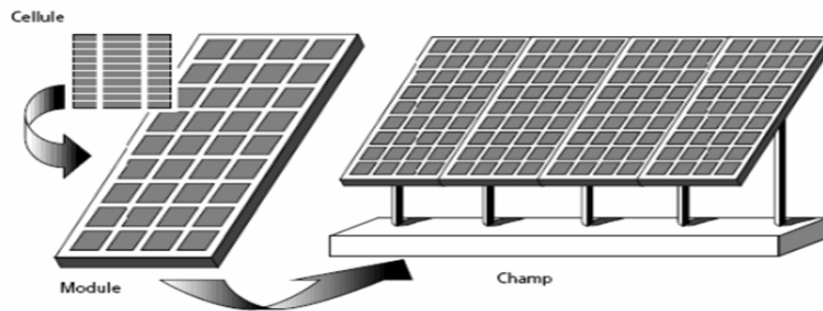


FIGURE 1.9 – Association série et/ou parallèle des modules photovoltaïques [1]

1.5.1 Association des modules photovoltaïques

Les modules PV peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent en dommage les cellules de façon permanente.

1.5.1.1 Montage de panneaux photovoltaïques en série

Pour une installation sur mesure, on opte pour un raccordement des panneaux en série ou en parallèle, voire une combinaison des deux. Le montage de panneaux photovoltaïques en série est l'option à retenir lorsque l'on souhaite additionner les tensions de chaque panneau en préservant un ampérage identique. On relie les pôles positifs d'un panneau aux pôles négatifs d'un autre panneau.

1.5.1.2 Montage de panneaux photovoltaïques en parallèle

Le montage des panneaux photovoltaïques en parallèle additionne les intensités tandis que la tension reste identique. Ce type de raccordement influe donc sur l'ampérage et non sur le voltage. Les bornes positives de chaque panneau sont reliées entre elles, de même que les bornes négatives. On choisit ce type de branchement lorsque l'on souhaite une forte intensité. Afin d'éviter les risques de surtension et de court-circuit, on relie entre

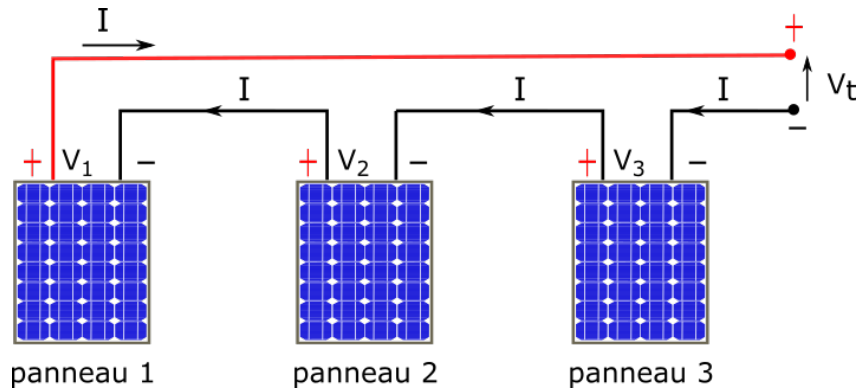


FIGURE 1.10 – Branchement de panneaux en série

eux des panneaux de même voltage. On peut par contre utiliser des panneaux d'intensité différente afin d'atteindre l'ampérage désiré.

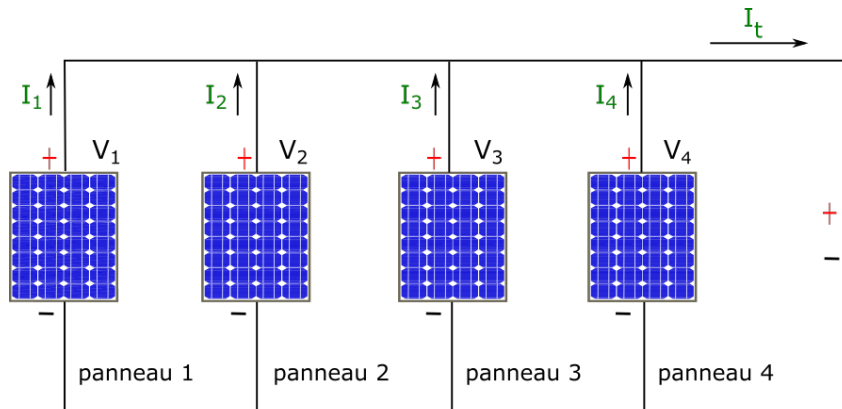


FIGURE 1.11 – Branchement de panneaux en parallèle

1.5.1.3 Association mixte des panneaux solaires photovoltaïques

Afin d'obtenir des puissances désirées par exemple de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en rangées de panneaux série et parallèle pour former un générateur photovoltaïque. La constitution d'un générateur photovoltaïque de puissance élevée se limite par le poids et la manipulation des modules à utiliser. Pour cela, on réunit systématiquement en plusieurs modules photovoltaïques et on les câble entre eux avant de les relier au reste du système. Les équations (1.9) et (1.10), résument ce cas de groupement [9] :

$$\sum I_{sc} = N_{pp} \cdot I_{sc} \quad (1.9)$$

$$\sum V_{oc} = N_{ss} \cdot V_{oc} \quad (1.10)$$

1.6 Influence de l'éclairement et de la température

L'éclairement et la température ont une influence directe sur le rendement de la cellule et de la puissance générée par cette dernière.

1.6.1 Influence de l'éclairement

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'éclairement pour une température donnée, de sorte que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement [10].

Les figures 1.12 et 1.13 présentent les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule/module PV sous différents niveaux de rayonnements, respectivement :

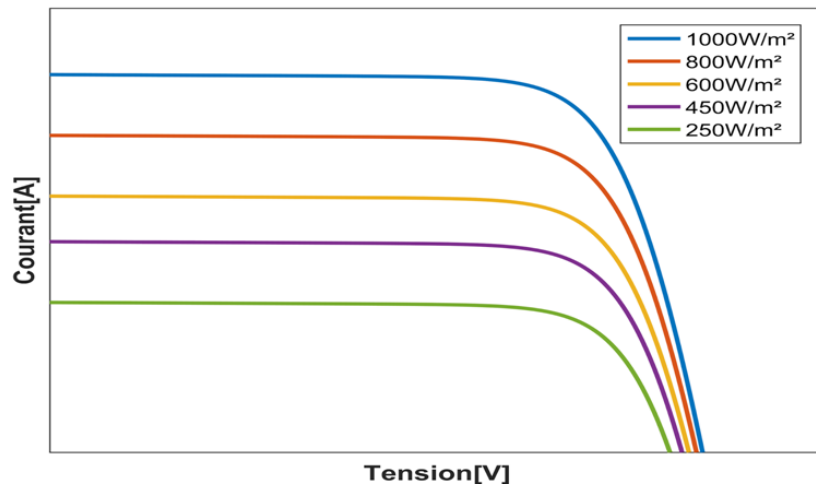


FIGURE 1.12 – Influence du rayonnement sur la caractéristique I-V

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas de les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'éclairement standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température de 25° [11].

1.6.2 Influence de la température

Une grande partie du rayonnement absorbé par la cellule n'est pas convertie en énergie électrique, car il se dissipe sous forme de chaleur, ce qui va lui faire augmenter sa température. La tension de circuit ouvert diminue quand la température augmente, ceci

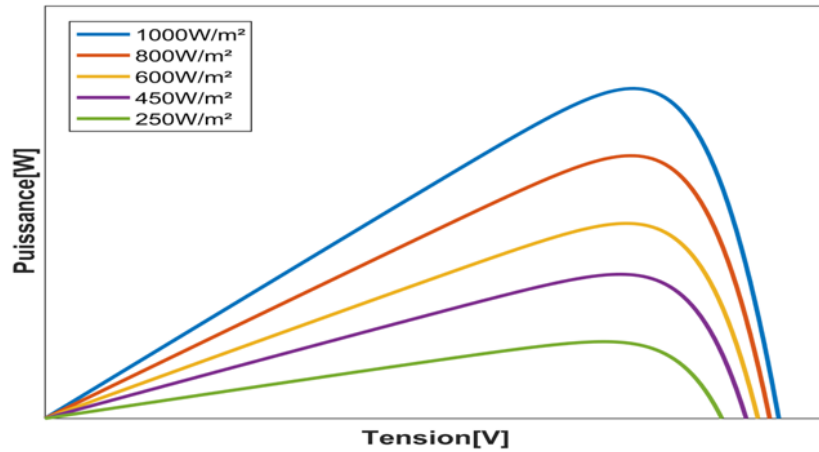


FIGURE 1.13 – Influence du rayonnement sur la caractéristique P-V

engendre une diminution de la puissance maximale comme il est montré sur les figures 1.14 et 1.15 [10].

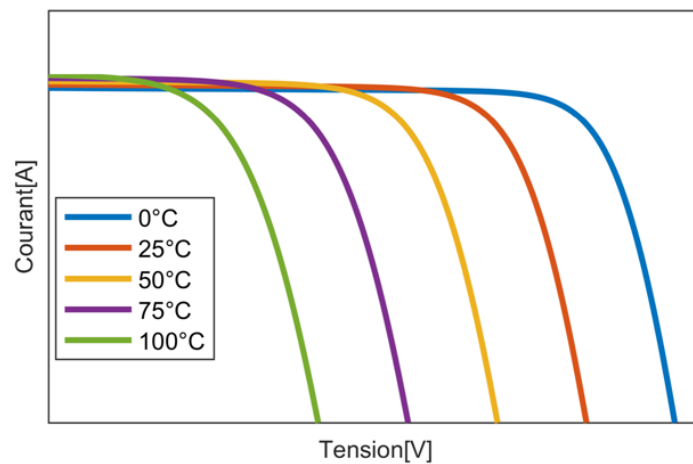


FIGURE 1.14 – Influence de la température sur la caractéristique I-V

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court circuit, par contre, la tension de circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent, la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0.5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25°C [11].

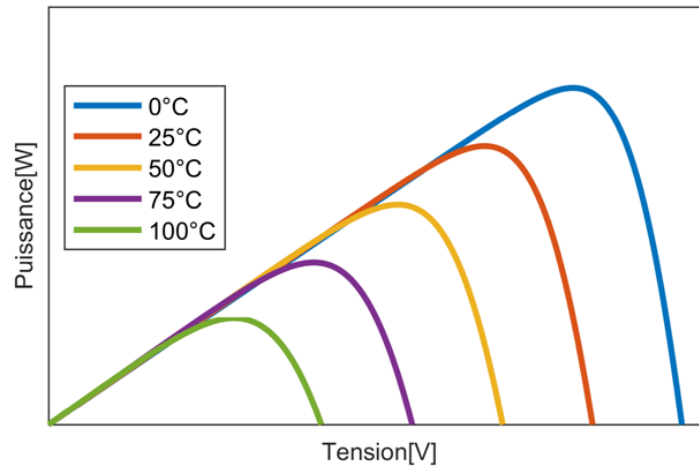


FIGURE 1.15 – Influence de la température sur la caractéristique P-V

1.7 Effect d'ombrage sur les générateur photovoltaïques

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) fasse de l'ombre aux panneaux solaires. De l'ombre sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques [12].

1.7.1 Ombrage partiel

C'est un ombrage qui laisse passer en partie les rayons du soleil. L'ombrage partiel empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (par exemple, une cheminée, un arbre, un nuage) Pendant l'ombrage partiel, une fraction des cellules PV qui reçoivent un éclairage uniforme fonctionnent encore à l'efficacité optimale. Puisque le courant traverse toujours la cellule dans une configuration en série est naturellement constante, les cellules ombrées doivent fonctionner avec une tension de polarisation inverse pour fournir le même courant que les cellules éclairées. Toutefois; la polarité de puissance inverse qui en résulte conduit à une consommation d'énergie et à une réduction de la puissance de sortie maximale du module PV partiellement ombragé. L'exposition des cellules ombrées à une tension de polarisation inverse excessive peut également provoquer l'apparition de «points chauds» et créer un circuit ouvert dans l'ensemble du module PV. Ceci est souvent résolu avec l'inclusion d'une diode de dérivation à un nombre spécifique de cellules dans le circuit en série [12].

⊗ problème du point chaud

Si l'une des cellules PV/modules connectés en série ont beaucoup moins de photo

courant I_{ph} que d'autres en raison de l'ombrage partiel du a la poussière ou bien a la dégradation, il fonctionne comme une charge pour d'autres cellules/modules et deviennent polarisés inversement. Cette cellule/module va alors dissiper l'énergie plutôt que de la générer, ce qui entraîne une augmentation de la température de la cellule, si la température est trop élevée, la cellule/module peut être endommagé et affecter l'ensemble Module/groupe PV, connu sous le nom de problème de point chaud [13].

1.7.1.1 Rôle de la diode by-pass dans les modules PV ombragés

Le courant généré par l'ensemble des modules PV est directement proportionnel au niveau d'éclairage qu'ils reçoivent. Cependant, dans les conditions d'ombrage partiel, le courant généré par les modules ombragés est inférieur par rapport au courant des modules non-ombragés, malgré que le même courant doit circuler à travers les modules en série d'un même string. En effet, cette diminution du courant est causée par les(le) modules ombragés qui fonctionnent dans la région de polarisation inverse afin de conduire le courant de modules non ombragés, ce qui dissiperait une partie de l'énergie générée par ce dernier. D'autre part, la tension de polarisation inverse peut atteindre la tension de claquage qui conduit à la rupture thermique de la cellule et provoquer la création des points chauds. Alors qu'un échauffement excessif va conduire à un circuit ouvert dans le champ PV. La figure 1.16 montre graphiquement comment le module ombragé doit fonctionner en tension de polarisation inverse pour faire circuler le courant du string. Ce problème a été résolu par l'insertion d'une diode by-pass, qui empêchera la tension de polarisation inverse d'atteindre la tension de claquage. En outre, elle devient le deuxième chemin pour conduire la surintensité générée par les modules non ombragés du même string [2].

1.7.1.2 Influence de l'ombrage partiel sur le champ photovoltaïque

Idéalement les systèmes photovoltaïques doivent être construits en utilisant des modules PV identiques et sont supposé fonctionner sous un éclairage et une température uniformes, cependant l'apparition de l'ombrage partiel ne peut pas facilement être évité à cause des nuages et obstacles tels que les arbres et les bâtiments, l'ombrage partiel non seulement conduit à des points chauds dans les modules PV, mais il est également considéré comme l'une des principales causes de rendements énergétiques réduits dans les systèmes PV [13].

1.7.1.2.1 Point du maximum global : Les figures 1.17(a) et 1.17(b) montrent trois strings recevant trois intensités d'éclairage différentes et leurs courbes P-V

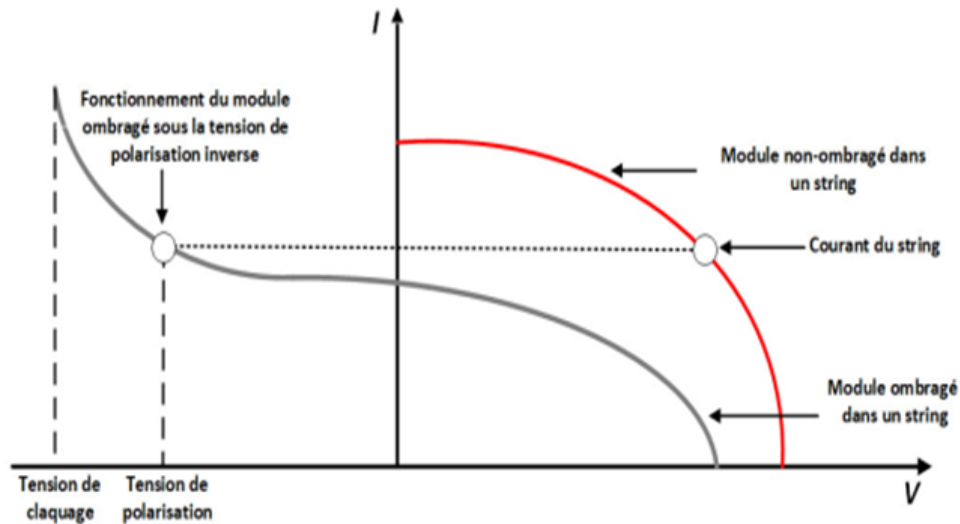


FIGURE 1.16 – Courbe I-V d'un module PV dans une région de polarisation inverse

correspondantes consécutivement, le premier module P1 du deuxième string est entièrement illuminé, le second est légèrement ombragé, tandis que le troisième est fortement ombragé, sous ces niveaux d'éclairement, la courbe P-V correspondante montre le GM au milieu. Dans le cas du premier string, les deuxièmes et troisièmes modules continuent à recevoir le même niveau d'éclairement, tandis que le premier module commence à recevoir une intensité d'éclairement élevée par rapport aux deux autres modules, ce qui pousse le GM vers la droite (Voir figure 1.17(b1)). Pendant ce temps, entre le deuxième et troisième string, le changement a été vu dans le troisième module, où le niveau d'éclairement devient un peu plus élevé que dans le deuxième string, alors que les deux autres modules sont encore exposés à la même intensité d'éclairement, ce qui a attiré le GM au côté droit tel que présenté dans la Figure 1.17(b3). Ainsi, on peut conclure que le nombre de maxima locaux est égal au nombre de modules qui ont un niveau d'ombrage différent. Alors que la position du point maximal global est liée à la différence de l'intensité d'éclairement [2].

1.8 Différentes topologies des systèmes PV

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïque, on peut cependant les classer en deux groupes principaux. Le premier groupe inclut le système autonome, non reliés à un réseau électrique. L'autre groupe inclut des systèmes PV reliés différemment au réseau électrique. On cite dans ce qui suit les caractéristiques de chaque type [14].

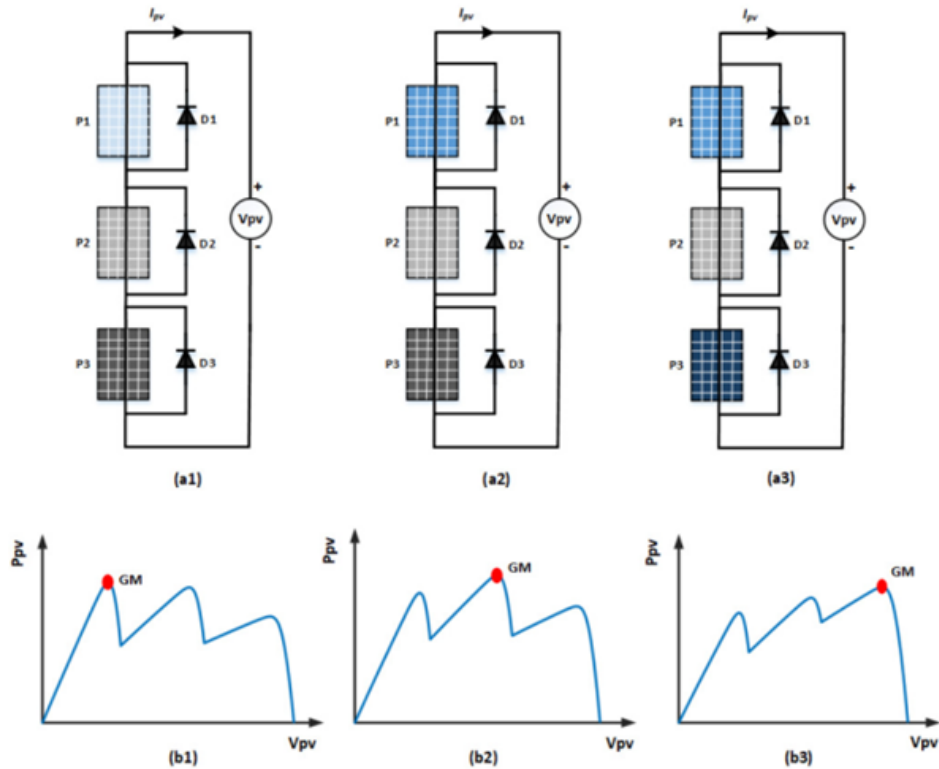


FIGURE 1.17 – Position du point de puissance maximale global [2]

1.8.1 System autonome (isolé)

Ce système peut fonctionner indépendamment de toutes autres sources d'énergie, et dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Dans tel site, le champ photovoltaïque est dimensionné pour fournir de l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner des récepteurs précis (éclairage et équipement domestique). On est besoin d'un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique et la réutiliser en l'absence de soleil.

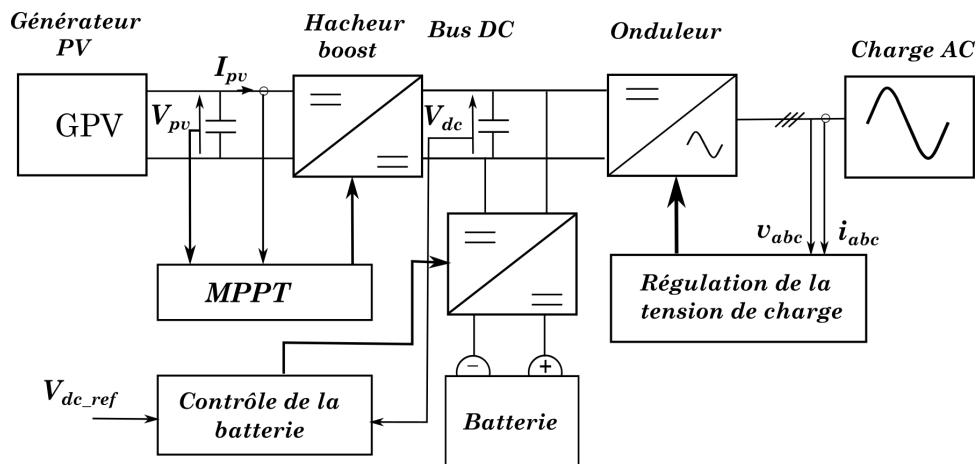


FIGURE 1.18 – Diagramme général d'un système photovoltaïque autonome

1.8.2 Système connecté au réseau

Les systèmes PV connectés au réseau gagnent de plus en plus de terrain puisque la demande de puissance dans le monde augmente. La disponibilité de ces sources d'énergie ainsi que leur respect pour l'environnement représentent des avantages majeurs par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, par contre leur efficacité et leur contrôlabilité restent leur principal désavantage. De plus, les opérateurs du système de transfert d'énergie doivent respecter certaines normes lorsque le système est connecté au réseau. Plusieurs critères doivent être satisfaits comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie.

Dans ce type de système PV, le champ photovoltaïque est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur, le rôle principal est d'injecter l'énergie électrique produite dans les réseaux électriques. Le particulier peut revendre tout ou partie de l'électricité qu'il produit. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'installer de batteries de stockage de l'énergie produite [15]. La structure de l'étage d'adaptation pour la connexion du générateur PV au réseau est représentée par figure 1.19.

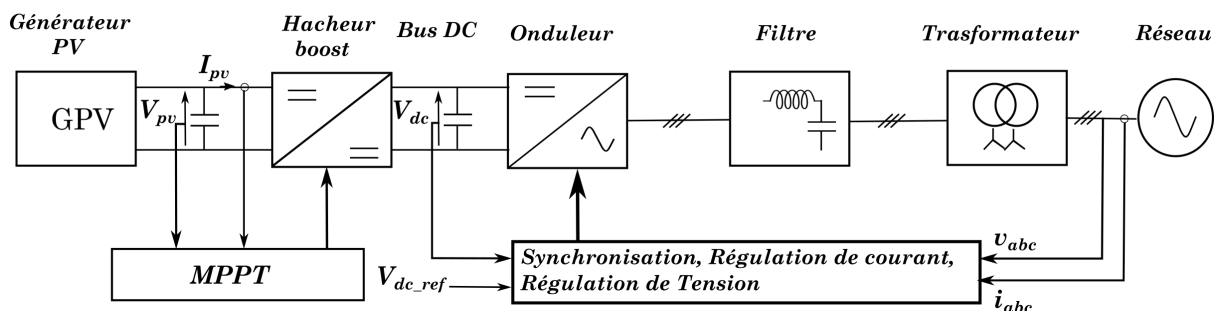


FIGURE 1.19 – Diagramme général d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Toute la puissance produite par le panneau est transférée au réseau électrique. Le hacheur est relié directement au générateur PV, il permet d'élever la tension pour arriver à la valeur imposée au bus continu. Ce dernier est relié à un onduleur commandé en courant afin d'injecter celui-ci avec un facteur de puissance unitaire dans le réseau. Un filtre est utilisé à la sortie de l'onduleur afin de réduire les distorsions de courant et de tension [16].

1.8.3 Système photovoltaïque avec stockage

L'énergie électrique, en particulier celle générée par un système photovoltaïque, peut être stockée pour être réutilisée plus tard lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement ou dans le cas de l'incapacité du générateur PV de subvenir au besoin de la charge. Cette énergie

peut être stockée dans différents composants, qui sont principalement :

1. **Batteries** : le mode de stockage d'énergie électrique privilégié actuellement dans notre vie courante reste l'accumulateur. Qu'il s'agisse de téléphones portables ou de voitures, les batteries sont très largement répandues. La technologie est basée sur le concept chimique de pile : on accumule de l'énergie chimique. Fondamentalement, l'élément de base d'une batterie est composé de deux électrodes, jouant les rôles d'anode et cathode, ainsi que d'un électrolyte, en contact avec les électrodes et permettant la circulation des ions.
2. **Accumulateurs à circulation** : Ceux-ci fonctionnent sur le même principe que les piles précédemment présentées, à ceci près que l'électrolyte est circulant, et donc, qu'il n'y a pas création de composés solides. Les composés chimiques responsables du stockage sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. De plus, cette technologie ne nécessite pas de substances très toxiques ou très réactives.
3. **Pile à combustible** : Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est le même que celui d'une pile traditionnelle, En effet, quand l'intérêt pour la pile à combustible s'est réveillé vers la fin des années 1980, les développements ont porté bien davantage sur la pile que sur le combustible. Aujourd'hui, du fait des progrès technologiques obtenus sur la pile, force est de constater qu'un déséquilibre inverse est apparu et que l'on est moins avancé sur le combustible que sur la pile [17].

1.8.4 Système photovoltaïque sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex : pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage) [14].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques des éléments d'un système photovoltaïque, le regroupement des cellules et des modules PV, soit en séries, en parallèle ou en série/parallèle, ainsi que le modèle mathématique de la cellule et ses caractéristiques électrique. on a également abordé l'influence de l'éclairement et de la température sur le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert de la cellule/module PV. Finalement, le chapitre a été conclu par la définition du phénomène d'ombrage partiel, son effet sur les performances des panneaux, ainsi que la solution adéquate à ce phénomène inévitable.

CONVERTISSEURS DC/DC ET POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMUM

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques ou les batteries afin de l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible. . .). Dans ce chapitre, on va étudier la connexion directe entre le générateur photovoltaïque et la charge, et la maximisation de la puissance extraite de ce générateur (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). De ce fait, un convertisseur DC/DC de type éleveur sera interconnecté entre le générateur et la charge, et sa commande sera, premièrement assuré par un algorithme classique, l'algorithme de perturbation et observation (P&O), puis en raison de l'incapacité de ce genre d'algorithme de suivre le point de maximum global durant le phénomène d'ombrage partiel, l'algorithme d'optimisation par essaim particulière (Particle Swarm Optimisation (PSO)) sera utilisé.

2.1 Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum (MPP). Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le générateur photovoltaïque (GPV) débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée

à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme présenté dans la figure 1.2.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

Le rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quel que soit l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation [1].

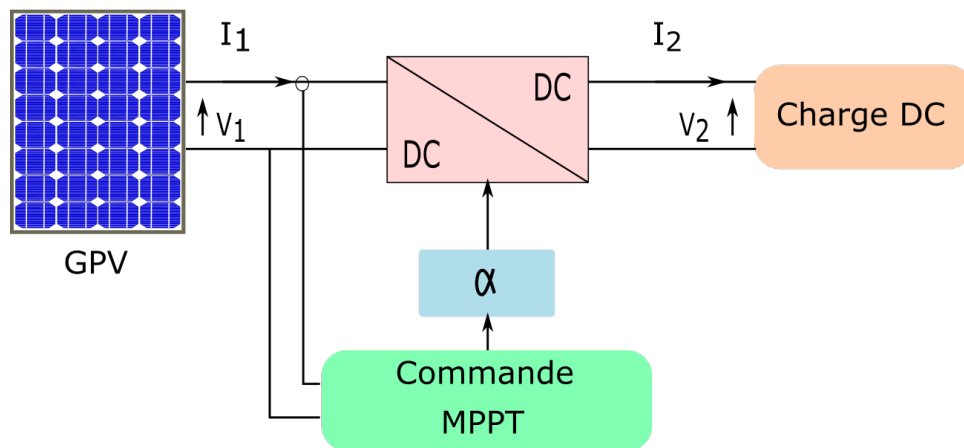


FIGURE 2.1 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

2.2 Hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a des bons rendements dans les hacheurs. Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [18].

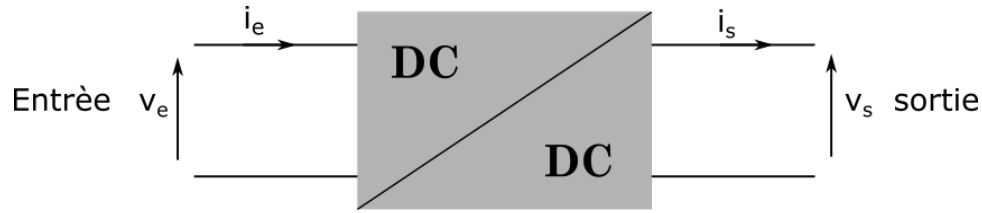


FIGURE 2.2 – Symbole d'un convertisseur DC/DC

2.2.1 Types des hacheurs

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer :

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) présentés sur la figure 2.3 [18].

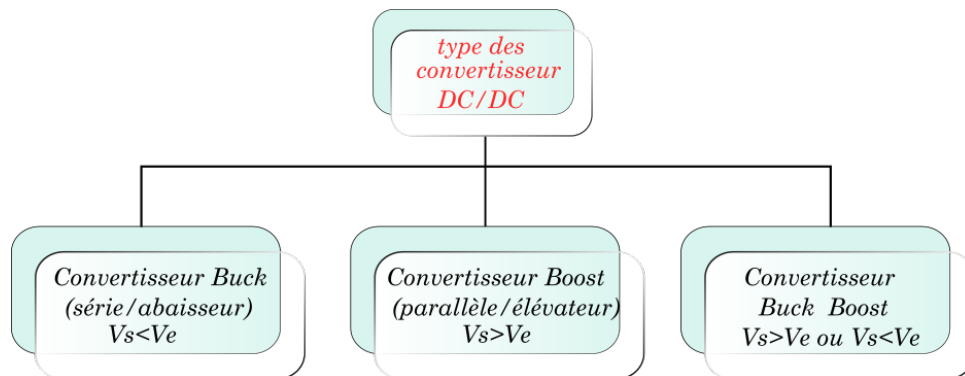


FIGURE 2.3 – Organigramme des différents types des convertisseurs DC/DC

2.2.1.1 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur, connu par le nom (élevateur de tension) peut être représenté par le circuit de la figure 2.4. 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 S 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)[3].

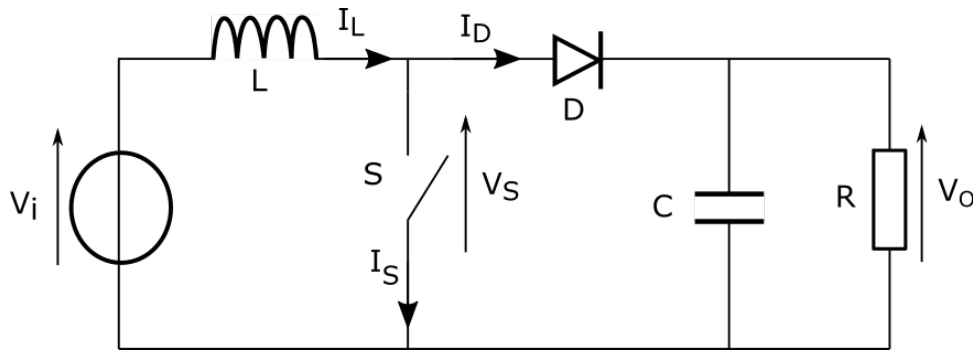


FIGURE 2.4 – Schéma électrique d'un hacheur boost

2.2.1.1.1 Principe de fonctionnement du convertisseur boost : Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S (voir Figure 2.4) Une phase d'accumulation d'énergie : Lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation. Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D , le condensateur C et la charge R . Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [3].

⊗ **Conduction continue**

Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

$$V_I = (1 - \alpha) \cdot V_0 \quad (2.1)$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit. α est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps). Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α lorsque α est proche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur [3].

2.2.1.1.2 Avantages de convertisseur BOOST : Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur Boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires.

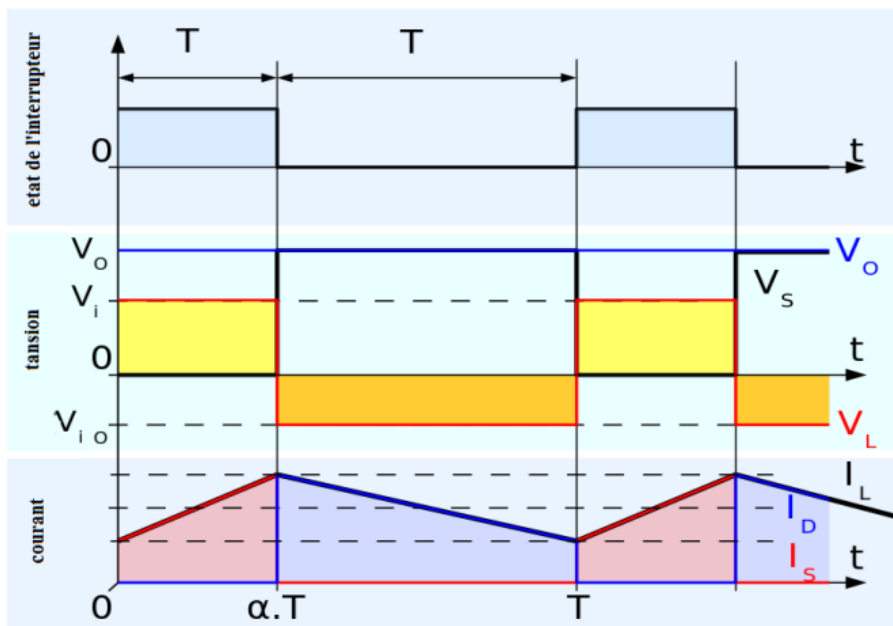


FIGURE 2.5 – Formes d’ondes courant/tension dans un convertisseur boost en conduction continue [3]

Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur Boost peut être plus grand que le convertisseur Buck. Le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie [3].

2.2.1.2 Convertisseur Buck (Hacheur série)

Un convertisseur Buck ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

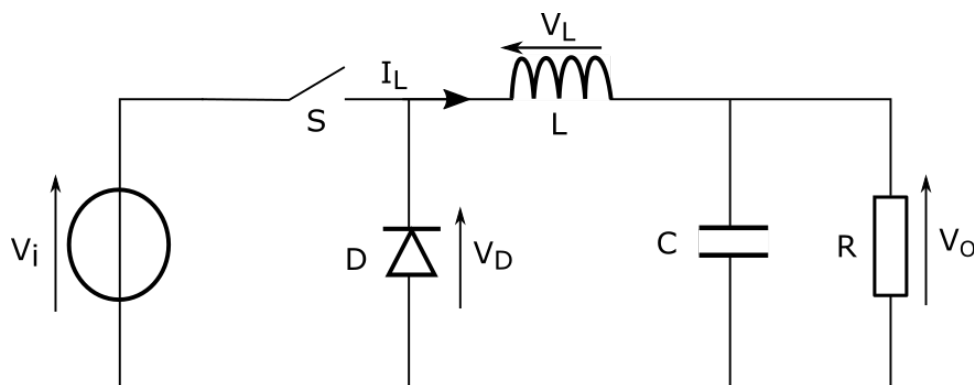


FIGURE 2.6 – Schéma de base d’un convertisseur Buck [3]

2.2.1.2.1 Principe de fonctionnement du convertisseur Buck : Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L - V_i = V_0$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = -V_0$. Le courant traversant l'inductance décroît [3].

2.2.1.3 Convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure 2.7. 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.

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur est donné par la figure 2.7 :

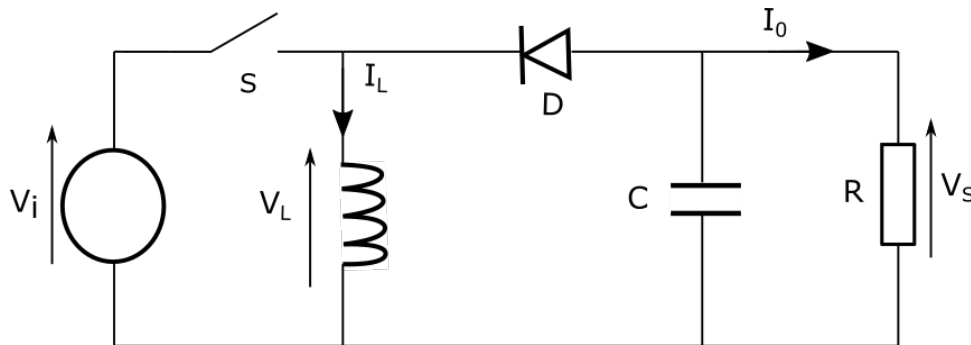


FIGURE 2.7 – Circuit électrique de base du hacheur survolteur –dévolteur

2.3 Principe du MLI (PWM)

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier, une méthode pour réguler la tension de sortie $V_0(t)$ afin d'obtenir une tension moyenne V_{0moy} fixe consiste à ajuster en

permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = T_{ON}/T$ sans modifier T . Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation). Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique α et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit [1] :

- Lorsque $\alpha > V_{DS}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé à la fermeture (état *ON*).
- Lorsque $\alpha < V_{DS}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé à l'ouverture (état *OFF*).

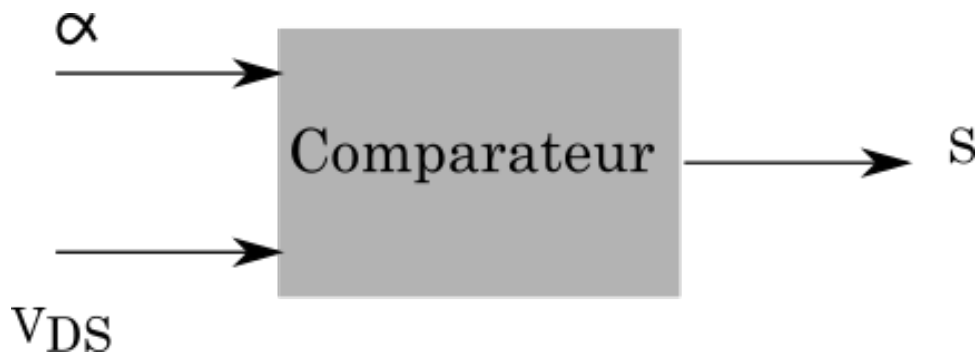


FIGURE 2.8 – Principe du MLI

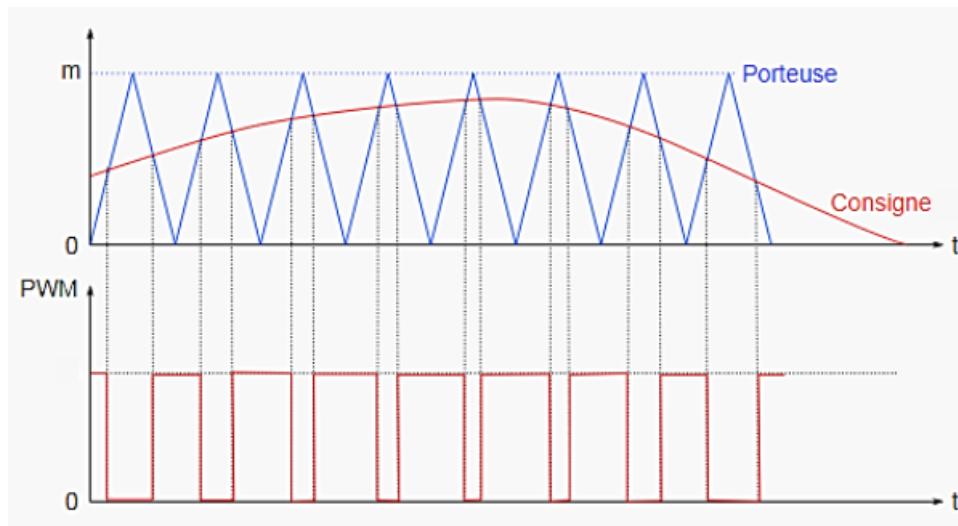


FIGURE 2.9 – Génération du signal dent de scie

2.4 Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa

puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la figure 2.10 [4].

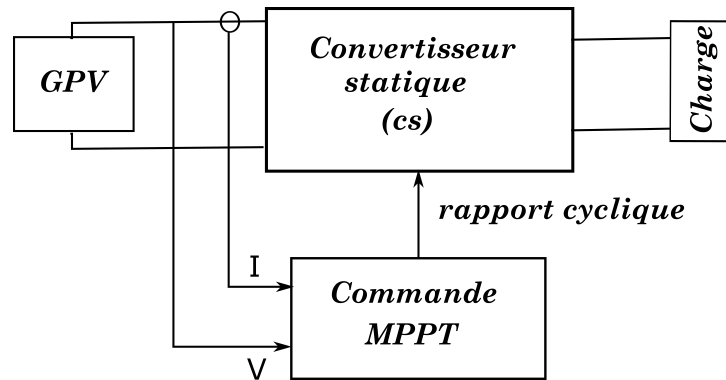


FIGURE 2.10 – Chaîne de conversion photovoltaïque commandé par une MPPT

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [4].

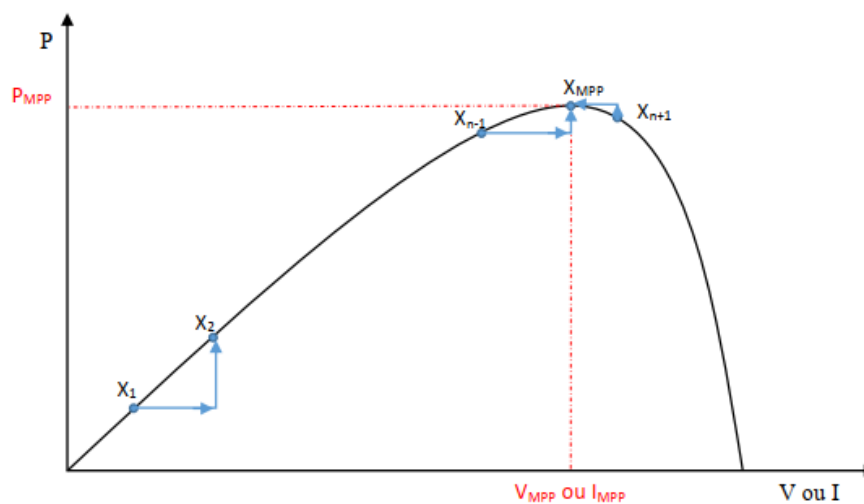


FIGURE 2.11 – Principe de la commande MPPT [4]

2.4.1 Classification des Commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [4].

2.4.2 Classification des Commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

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

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPTs inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [4].

2.4.2.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple, les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui 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. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [4].

2.4.3 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

2.4.3.1 MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. 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 [4].

2.4.3.2 MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. 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. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [4].

2.5 Algorithmes d'MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPTs plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Mais on peut généralement les classer à des MPPTs classiques et des MPPTs intelligents. Les MPPTs classiques, comme Perturbation & Observation (P&O) ou incrément de conductance, peuvent donner des bons résultats dans le cas où un seul maximum de puissance peut exister, alors que pour faire face au problème de présence de multiples maxima, les techniques issues de l'intelligence artificielle, tout comme les réseaux de neurones artificielles, la logique floue et les algorithmes génétiques, seront utilisés.

2.5.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure 1.12, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{PV} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure 1.13 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [1].

2.5.2 Algorithme de l'incrément de conductance

Dans cette méthode, la dérivée de la puissance de sortie du panneau est évaluée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V , de dV , du courant I et de dI . Cette dérivée s'annule au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite.

La puissance du panneau solaire est donnée par :

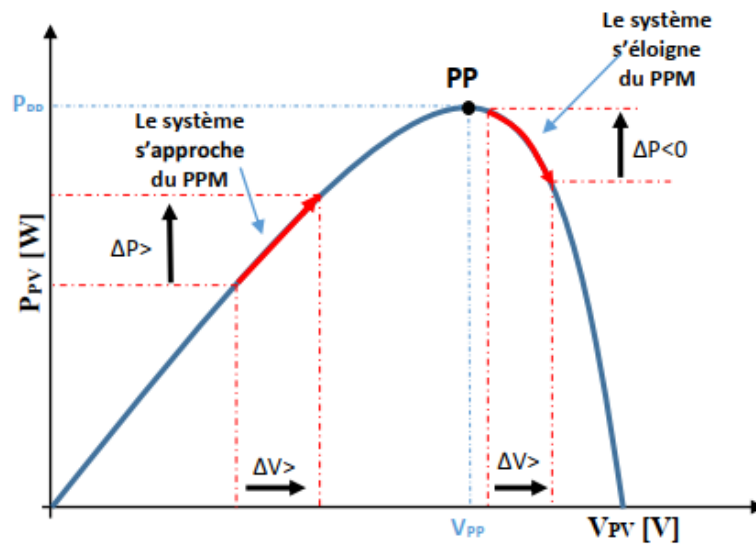


FIGURE 2.12 – Recherche du PPM par la méthode (P&O)[4]

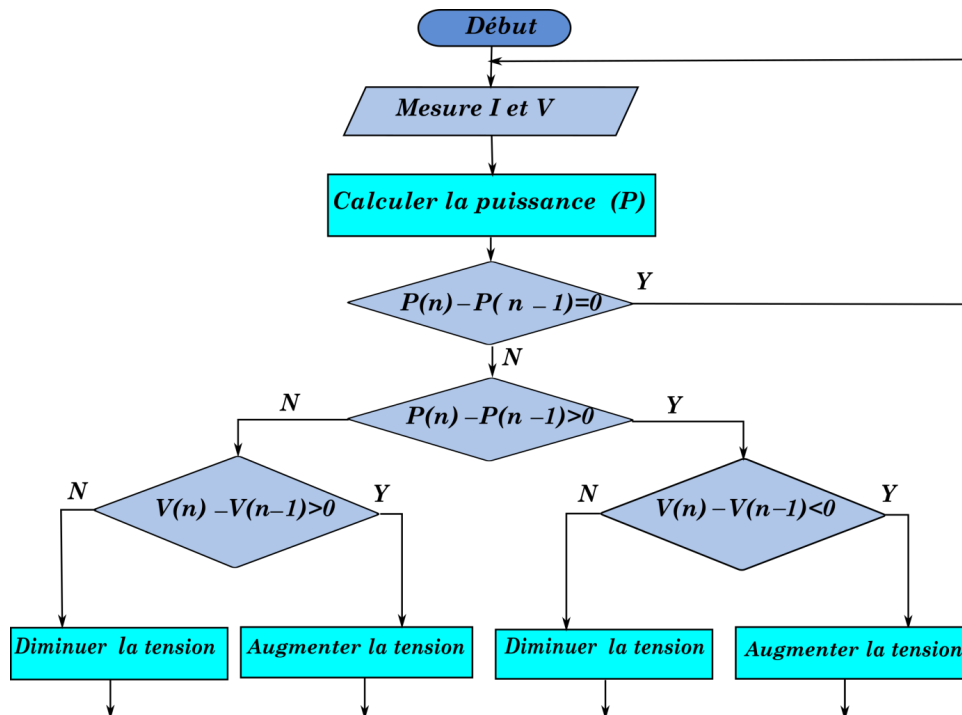


FIGURE 2.13 – Algorithme de P&O

$$P = V.I \tag{2.2}$$

La dérivée partielle dp/dv est donnée par :

$$\frac{dp}{dv} = I + V \cdot \frac{di}{dv} \tag{2.3}$$

D'où :

$$\frac{I}{V} \frac{dp}{dv} = \frac{I}{V} + \frac{di}{dv} \quad (2.4)$$

On définit la conductance de la source $G = I/V$ et l'incrément de Conductance $\Delta G = di/dv$.

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (2.4) montre que le point de puissance maximale est atteint quand la conductance de la source G est égale à l'incrément de Conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrément de Conductance ΔG et vice versa, comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{dp}{dv} > 0 & \text{si} \quad \frac{I}{V} > -\frac{di}{dv} \\ \frac{dp}{dv} = 0 & \text{si} \quad \frac{I}{V} = -\frac{di}{dv} \\ \frac{dp}{dv} < 0 & \text{si} \quad \frac{I}{V} < -\frac{di}{dv} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Lorsque le point de fonctionnement atteint le PPM, dV devient nulle, pour éviter ce problème et donc éviter une division par zéro, l'algorithme effectue un test de dV . Si dV est nul, il teste si $dI = 0$. Si c'est le cas, alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement. Dans le cas contraire, l'algorithme teste le signe de dI pour déterminer la position du PPM et ajuste la tension de référence correspondante. La figure 2.14 donne l'organigramme de cet algorithme [5].

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du MPP, à cause du test $dI = 0$. L'algorithme se stabilise une fois le MPP atteint et le signe de dI donne la vraie direction à emprunter pour la poursuite du MPP. Une fois que le système est stable, on aura une réponse rapide pour d'éventuelles conditions atmosphériques. Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action constant, la condition $i/v = dI/dV$ est rarement vérifiée, ce qui conduit à des oscillations autour du MPP [5].

2.6 Algorithmes intelligents

2.6.1 Algorithme Optimisation par essaim particulaire (PSO)

2.6.1.1 Principe général

On dispose d'une fonction objectif à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de définition de la fonction

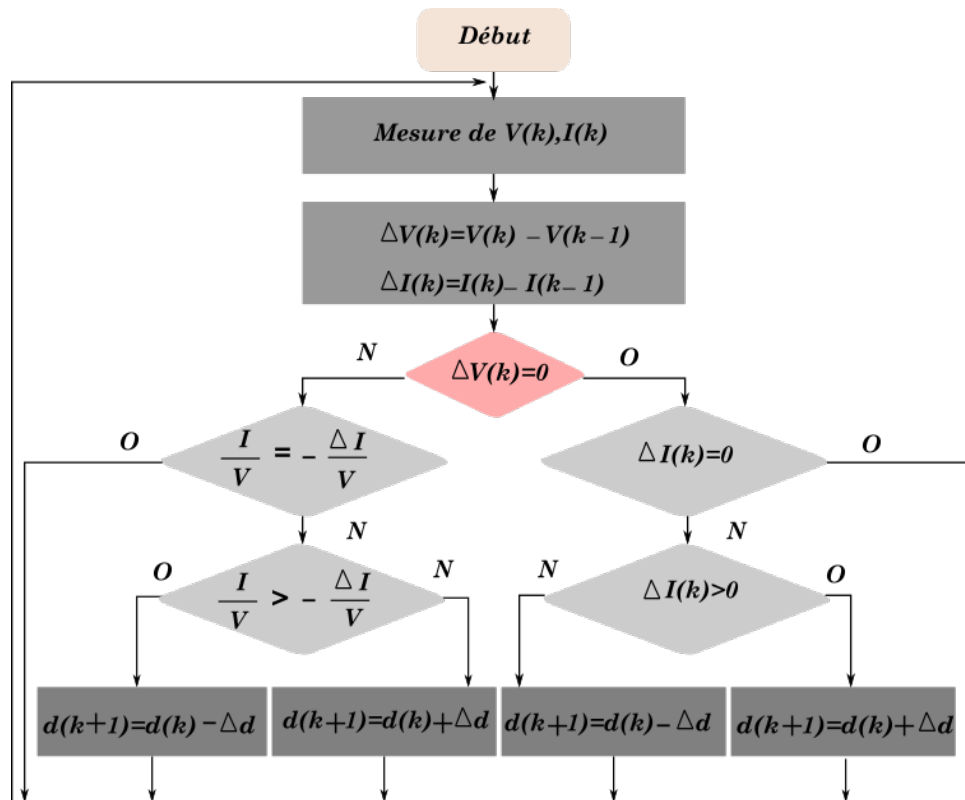


FIGURE 2.14 – Organigramme de l'algorithme "Incrémentation de Conductance" [5]

objectif. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de définition afin de trouver la solution optimale. Une particule est caractérisée par plusieurs attributs :

- **Sa position actuelle** : c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition et la valeur de la fonction objectif lui correspond ;
- **Sa meilleure position** : c'est la valeur obtenue par la particule et ses coordonnées ;
- **Sa vitesse** : cette donnée, recalculée à chaque itération de l'algorithme, permet de déduire la position suivante de la particule. Elle est fonction de la meilleure position de la particule depuis le début de la recherche, du voisin le mieux positionné à l'instant actuel et de la vitesse précédente de la particule ;
- **Ses voisins** : c'est un ensemble de particule qui influe sur ses déplacements, en particulier celui qui est le mieux positionné [5]

2.6.1.2 Fonctionnement

L'organigramme du PSO est présenté selon la procédure illustrée par la figure 2.15.

Dans ce qui suit, on présente les quatre étapes qui seront exécuter pour arriver à la solution optimale :

- **Etape 1 : Génération d'un état initial de chaque particule**

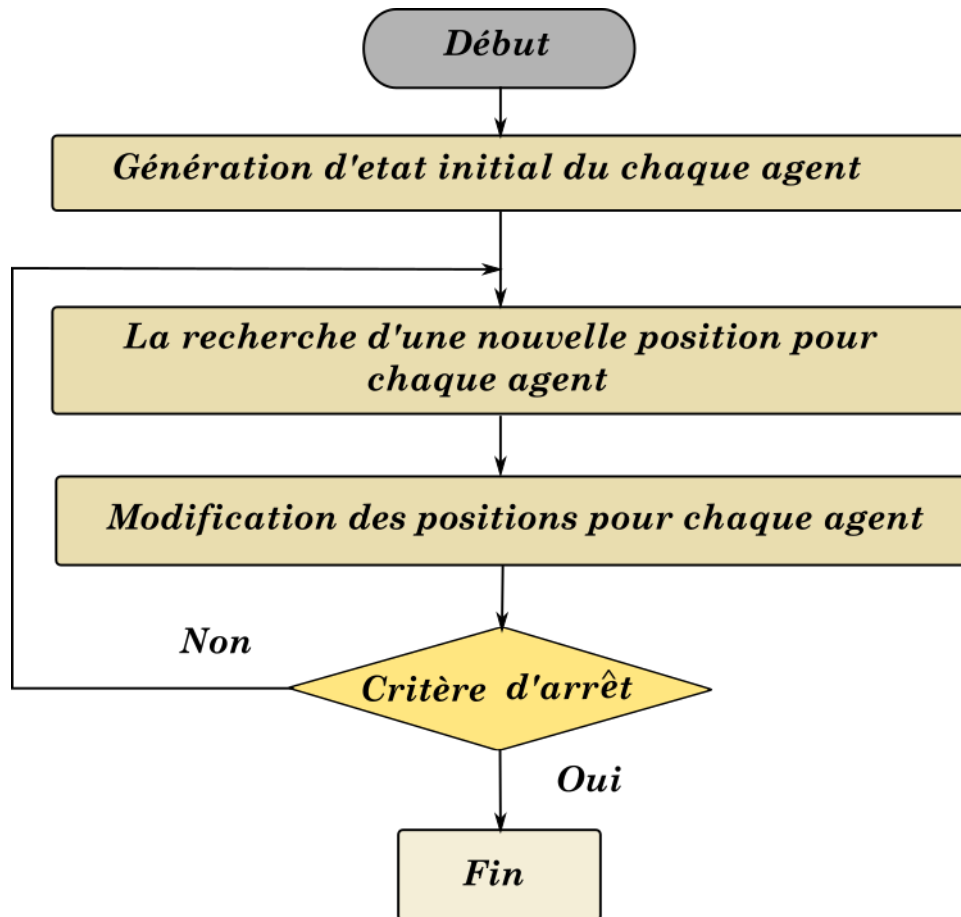


FIGURE 2.15 – Organigramme général de PSO [5]

Les points de recherche initiaux, position (S_{i0}) et vitesse (V_{i0}) de chaque particule sont générés aléatoirement dans l'espace de recherche. Le point de recherche courant est placé à P_{best} pour chaque agent. La meilleure valeur évaluée de P_{best} est placée à G_{best} ;

— **Etape 2 : Recherche d'une nouvelle position pour chaque agent**

La valeur de la fonction objective est calculée pour chacun des agents. Si la valeur d'un agent est meilleure que son G_{best} courant, P_{best} prend cette nouvelle valeur. Si la meilleure valeur de P_{best} est meilleure que G_{best} courant, G_{best} est remplacé par celle-ci et l'agent qui correspond à cette valeur est ainsi stocké ;

— **Etape 3 : Modification de chaque point de recherche**

Le point de recherche courant de chaque agent est changé en utilisant les équations (2.6), (2.7) et (2.8)

— **Etape 4 : Vérification de l'état de sortie**

Le nombre courant d'itération atteint le nombre maximum d'itération $itermax$, alors fin du programme, autrement, retourner à l'étape 2 [5].

2.6.1.3 Formalisation

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ et par son vecteur vitesse $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $P_{besti} = (P_{besti1}, P_{besti2}, \dots, P_{bestiD})$ et la meilleure position atteinte par tous les particules de l'essaim notée $G_{best} = (G_{best1}, G_{best2}, \dots, G_{bestD})$.

PSO démarre le processus d'optimisation par une population des solutions aléatoires qui se déplacent dans l'espace de recherche. Le déplacement de chaque particule, dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle et la mise à jour de sa vitesse.

En effet, à l'itération $k + 1$, le vecteur position est calculée à partir de l'équation (2.6).

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (2.6)$$

S_i^{k+1}, S_i^k : position de la particule i à l'itération $k + 1$ et k respectivement.

V_i^{k+1} : Vitesse de la particule i à l'itération $k + 1$.

Chaque particule dans l'essaim, change sa vitesse suivant deux informations essentielles. Une, est liée à son expérience personnelle, qui est la meilleure position trouvée par la particule durant le processus de recherche P_{best} . La deuxième information, concernant la meilleure position trouvée par les voisins (I_{best}) (ou par tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme G_{best}). Cette information est obtenue à partir de la connaissance de la façon dont les autres agents ont exécuté leurs recherches.

Sachant que la variation de la vitesse est proportionnelle à l'éloignement d'une solution par rapport à la solution globale afin de faire bouger la particule vers les meilleures solutions. Le principe de changement de la vitesse est défini par l'équation (2.7).

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 rand_1.(P_{best} - S_i^k) + C_2 rand_2.(G_{best} - S_i^k) \quad (2.7)$$

Avec :

V_i^k : vitesse de l'agent i a l'itération k .

S_i^k : position actuelle l'agent i a l'itération k .

P_{best_i} : meilleur position trouvée par la particule i jusque ici.

G_{best} : meilleur position trouvée par l'essaim jusque ici.

ω : Fonction de pondération ou coefficient d'inertie.

C_1, C_2 : Sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération, sachant que $C_1 + C_2 < 4$.

$rand_1, rand_2$: sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$ à chaque

itération k et pour chaque dimension j .

La fonction de pondération ω est donnée par l'équation suivante (II.8).

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (2.8)$$

Avec :

ω : poids initial.

ω_{min} : poids final.

$iter_{max}$: nombre d'itération maximum.

$iter$: itération courante

La fonction de pondération ω joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale, un bon choix de cette fonction augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de ω de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats. Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées et les deux vecteurs P_{best_i} et G_{best} sont mis à jour à l'itération $k + 1$, suivant les deux équations précédentes [5].

2.6.2 Logique Floue

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification [19].

2.6.2.1 Principe de la logique floue

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative. . . etc. Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance [19].

Le schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue est présenté dans la figure 2.16.

La mise en œuvre de la commande logique floue (Fuzzy Logic Control) se fait en quatre étapes conventionnelles, fuzzification, bases de connaissance, inférence floue

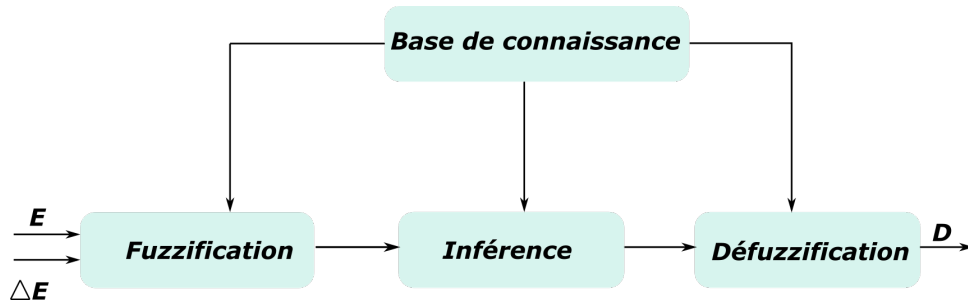


FIGURE 2.16 – Schéma bloc sur le principe de la logique floue

et défuzzification. Les variables d'entrées sont généralement l'erreur E et changement d'erreur ΔE et la variable de sortie est la variation du rapport cyclique $\Delta\alpha$. En particulier, dans le cas de la poursuite du PPM, l'erreur E et changement d'erreur ΔE sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et la tension comme suit [12] :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (2.9)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (2.10)$$

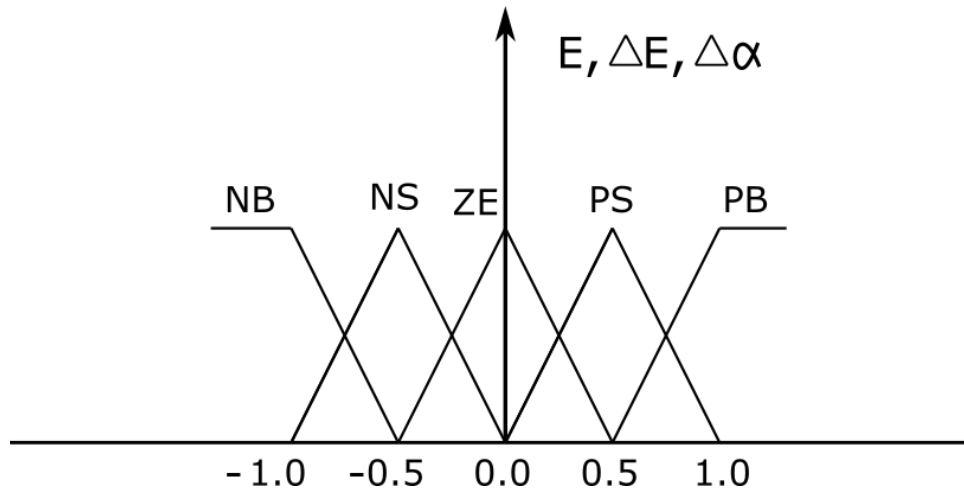


FIGURE 2.17 – Structure de base de la commande floue

Les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques pouvant prendre les sept valeurs suivantes [12] :

NB : Negative Big.

NS : Negative Small.

ZE : Zero Egal.

PS : Positive Big.

PB : Positive Means.

NM : Negative Means.

PM : Positive Means.

En résumé, cette méthode s'avère être performante lors du changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée, entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau [20].

2.7 Simulation de la poursuite du MPPT

Avant de passer à l'injection de puissance dans réseau électrique, on va commencer par la simulation de la poursuite du MPPT dans la cas d'un rayonnement uniforme où un seul point de maximum existe, puis dans le second cas, où plusieurs maxima sont apparus, provoqués par le phénomène d'ombrage partiel. à cet effet, deux algorithmes seront utilisés, le P&O pour le premier cas, et l'algorithme intelligent d'optimisation par essaim particulière (PSO) pour le second cas.

La figure 2.18 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque dont le convertisseur Boost sera commandé par l'un de deux algorithmes P&O et PSO. Pour valider et tester l'efficacité de deux algorithmes, deux conditions d'éclairage sont créés, éclairage uniformes et un éclairage non-uniforme pour les conditions d'ombrage partiel. Le système PV utilisé pour ce but est composé de :

- Un générateur PV, simulant le fonctionnement de trois modules photovoltaïque ;
- Un convertisseur DC-DC, simulant le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost ;
- Algorithme de commande, simulant la commande MPPT appliquée au convertisseur ;
- Paramètres météorologiques, définissant les conditions d'ensoleillement et de température extérieure.

2.7.1 Résultats de la simulation de la commande P&O :

L'algorithme P&O est validé sous une éclairage uniforme. Le générateur PV utilisé est composé de 12 modules de type (American Solar Wholesale ASW-215P), ces modules sont regroupés en trois rangées en séries et 4 rangées en parallèle (3x4). Sa puissance globale est de 2557.8W. Les caractéristiques physiques et électriques du module utilisé sont données dans le tableau suivant :

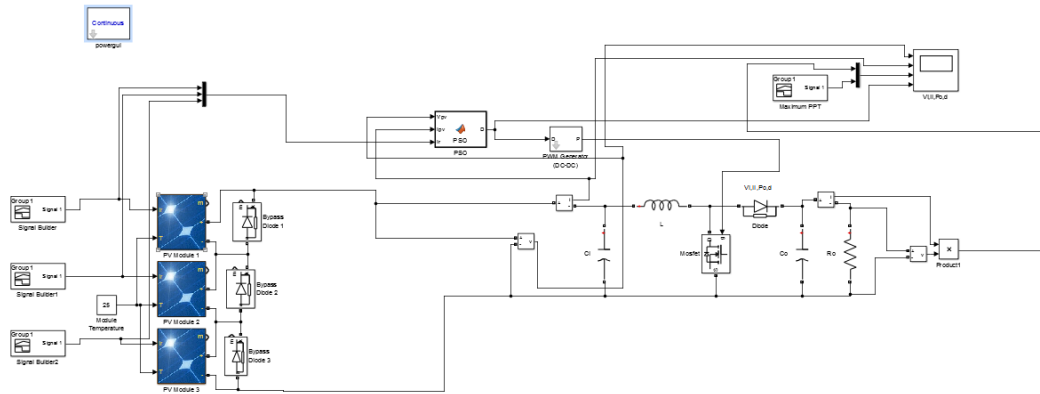


FIGURE 2.18 – Schéma MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT

TABLE 2.1 – Paramètres du panneau de American Solar Wholesale *ASW – 215P* Au *STC* : Température = $25^{\circ}C$ et Éclairement = $1000W/m^2$

Paramètre	Valeur
Puissance Maximale (P_{MMP})	214.85W
Tension au point de puissance maximale (V_{MMP})	29.8V
Courant au point de puissance maximale (I_{MMP})	7.21A
Tension de circuit ouvert (V_{OC})	36.12V
Courant de court-circuit (I_{SC})	7.7A
Resistance série (R_s)	0.27328 Ω
Resistance parallèle (R_{sh})	178.0121 Ω
Nombre de cellules par module	60

Le profil d'ensoleillement utilisé pour la validation de ce premier algorithme est varié entre ($1100W/m^2$ et $500W/m^2$) comme le montre la figure 2.19.

Les caractéristiques Puissance-Tension (P-V) du générateur PV sous les différentes valeurs d'ensoleillement du profil choisi et pour une température fixe de ($25^{\circ}C$) sont présentées sur la figure 2.20.

Le courant, la tension et la puissance du générateur PV qui sont obtenus par l'application de l'algorithme P&O pour la poursuite du MPPT, sont donnés par les figures 2.20, 2.20 et 2.20, respectivement.

Les résultats de simulation précédentes ont clairement montré l'efficacité de l'algorithme P&O dans la poursuite du MPPT lors du changement d'éclairement avec une bonne précision et d'une rapidité et temps de réponse très acceptables.

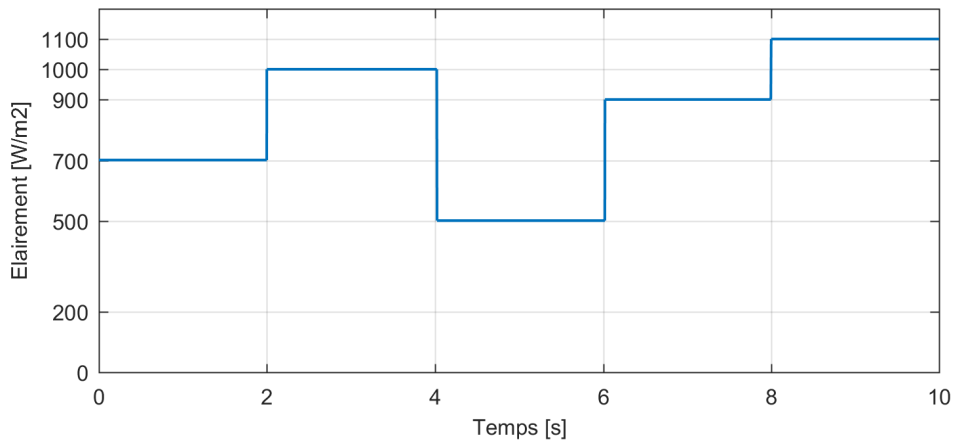


FIGURE 2.19 – Profil d’ensoleillement pour un éclairement uniforme

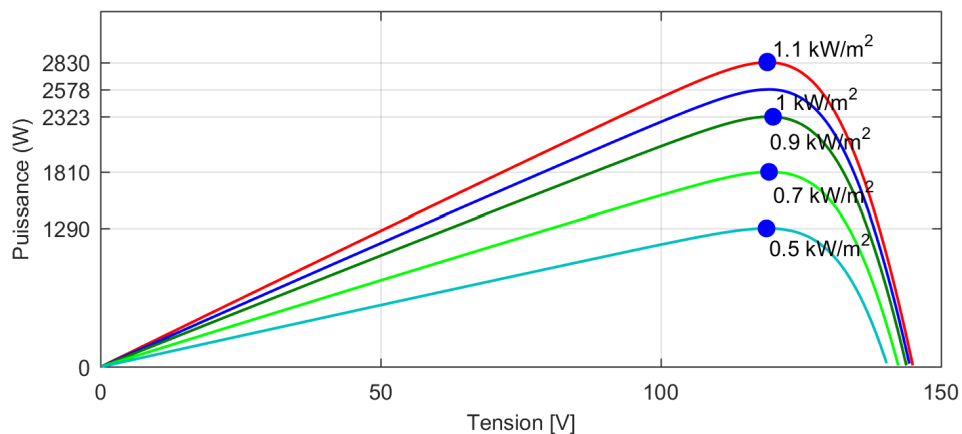


FIGURE 2.20 – Caractéristiques P-V du générateur PV sous le profil d’ensoleillement la figure 2.19

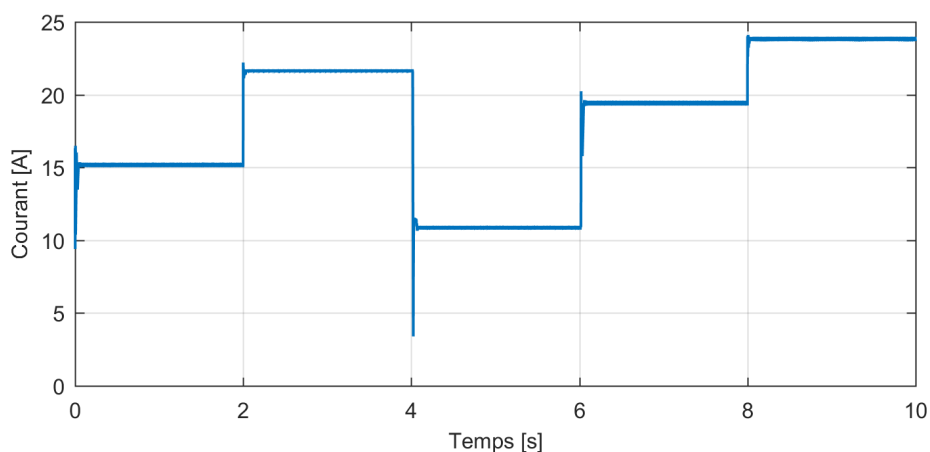


FIGURE 2.21 – Courant absorbé par la charge lors du changement de l’éclairement

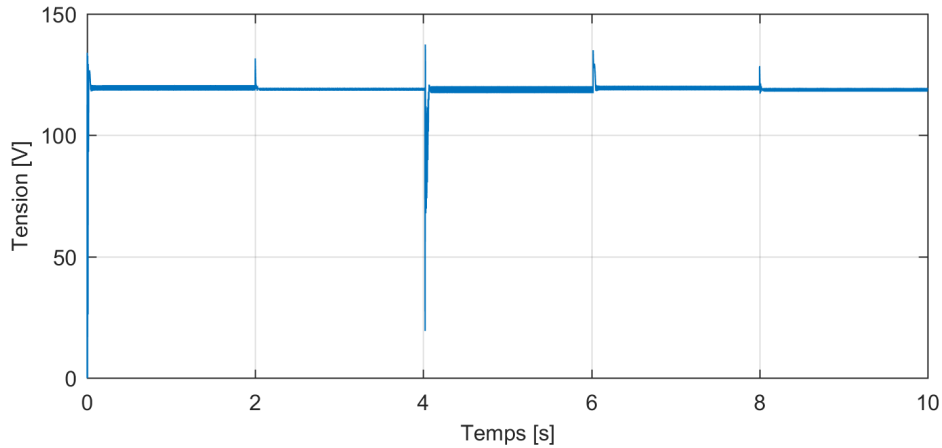


FIGURE 2.22 – Tension de la GPV lors du changement de l'éclairement

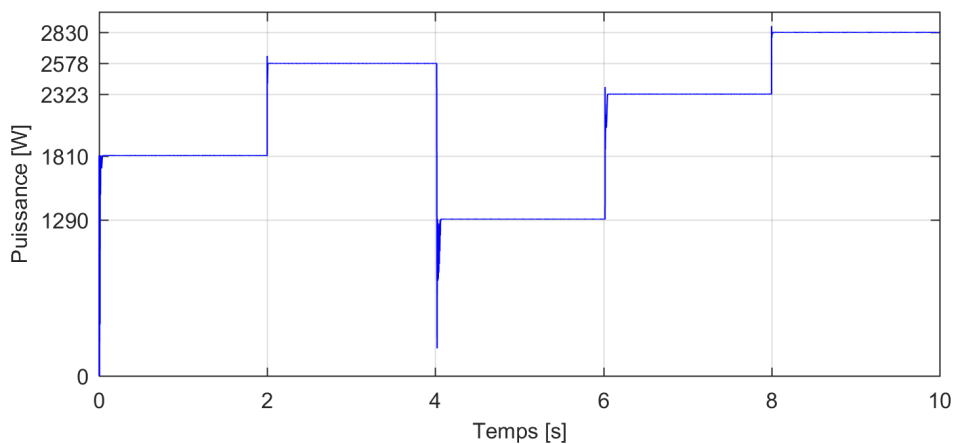


FIGURE 2.23 – Puissance générée par la GPV lors du changement de l'éclairement

2.7.2 Résultats de la simulation de la commande PSO

En raison de l'incapacité des algorithmes classiques à poursuivre le point de maximum global lors du phénomène d'ombrage partiel, on a opté pour l'algorithme PSO, qui est classé parmi les algorithmes intelligents. Cet algorithme présente plusieurs avantages par rapport aux autres algorithmes intelligents, et plus particulièrement sa simplicité qui s'accompagne par une grande précision et rapidité de recherche. Pour pouvoir tester l'efficacité de cet algorithme dans la poursuite du point de maximum global, trois scénarios ont été envisagés, dans lesquels une comparaison est faite entre la puissance que le générateur PV peut fournir en statique et celle en dynamique. Afin de créer les conditions d'ombrage partiel, trois générateurs PV (G1, G2, G3) connectés en série, où chacun d'entre eux contient quarante modules (10x4), sont exposés aux trois éclairements différents donnés dans le tableau 2.2.

La connexion de trois générateurs (G1, G2, G3) est éclairée sur la figure 2.24.

TABLE 2.2 – Éclairements des trois générateurs utilisés dans la création du phénomène d'ombrage partiel

Scénarios	Éclairements des générateurs (W/m^2)	Maximum global (W)
Scénario 1	[800 600 1000]	16930
Scénario 2	[700 250 1100]	12840
Scénario 3	[500 200 1200]	10150

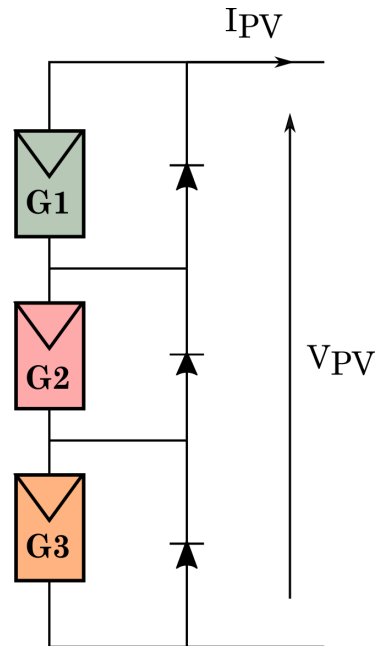


FIGURE 2.24 – Raccordement des trois générateurs PV utilisés dans la création du phénomène d'ombrage partiel

Alors que les caractéristiques Puissance-Tension (P-V) du générateur PV global pour les trois scénarios sont figurés dans la figure 2.25.

L'application de l'algorithme PSO dans la poursuite du point de puissance maximal global, pour les trois scénarios, a permis d'obtenir les résultats montrés sur les figures 2.26, 2.27 et 2.28.

La figure 2.28 montre l'efficacité de l'algorithme PSO de poursuivre parfaitement le point de maximum global (GM) pendant les trois profils d'ombrage partiel, en dépit du changement de la position de ce point, qui était à l'extrême droite milieu pour le premier profil [800 600 1000], puis il s'est tourné vers milieu pour le second profil [700 250 1100] et pour le troisième profil, il s'est déplacé vers l'extrême gauche. En plus de l'écart en puissance et en tension entre les maximums globaux de ces profils, tout cela confirme les performances du PSO d'atteindre le GM quelles que soient les conditions d'éclairement dans lesquelles il fonctionne le GPV, ce qui rend ce dernier très rentable.

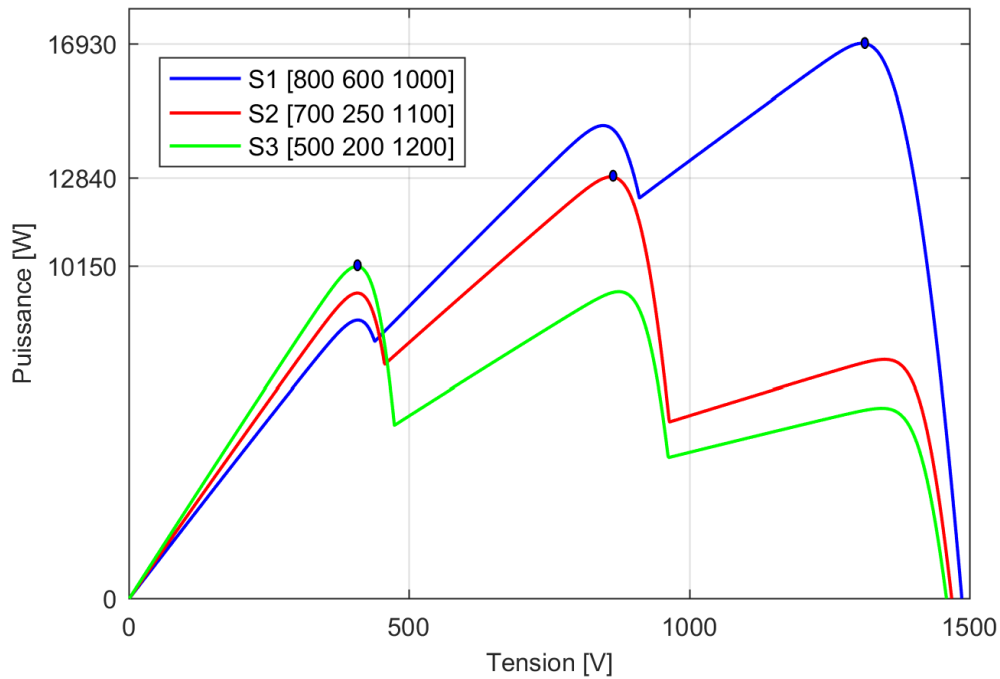


FIGURE 2.25 – Caractéristiques P-V du générateur PV global pour les trois scénarios d’ombrage partiel

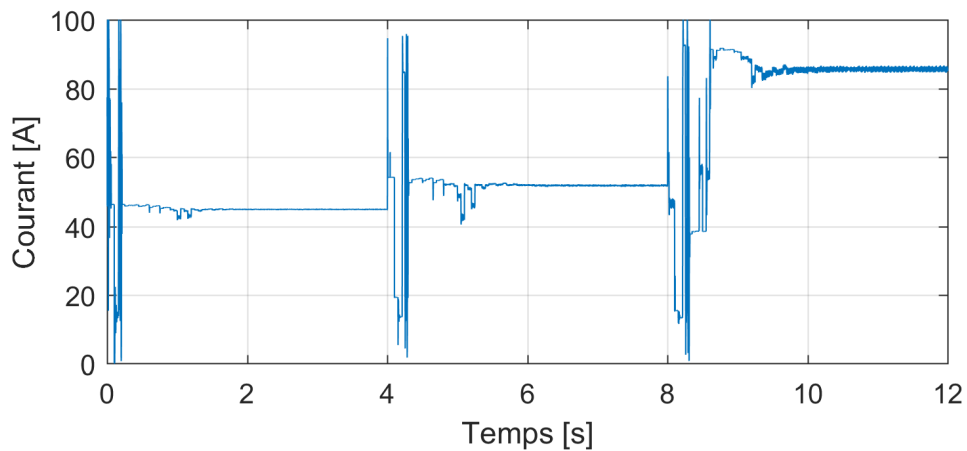


FIGURE 2.26 – Courant du générateur PV lors de trois scénarios d’ombrage partiel

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement abordé la topologie de base des alimentations à découpage, qui ne sont rien d’autres que des convertisseurs continu-continu, comme le convertisseur survolteur (hacheur parallèle). Ce convertisseur a été étudié en mode continu régulé par les deux méthodes d’MPPT, souvent rencontrées dans la littérature, à savoir la technique “P&O” et la technique “PSO”. Les conditions d’application de chaque algorithme ont été discutées, puis la simulation dans l’environnement Matlab/Simulink du

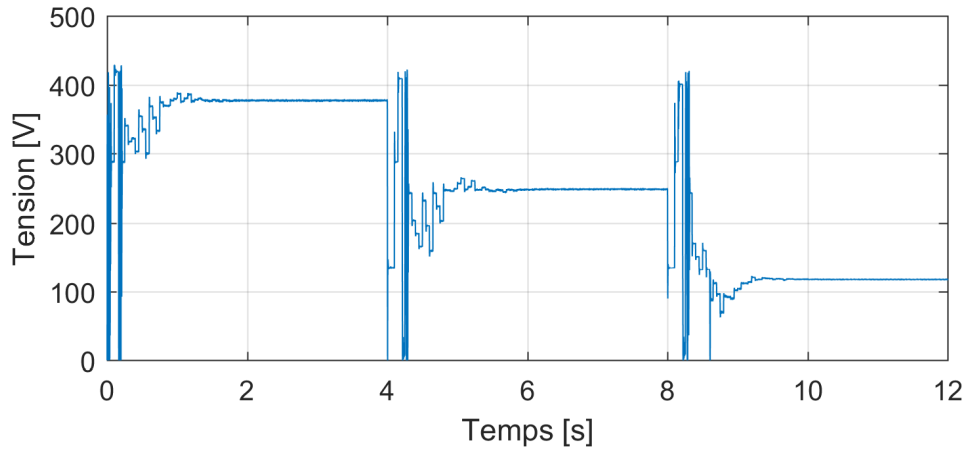


FIGURE 2.27 – Tension du générateur PV lors de trois scénarios d'ombrage partiel

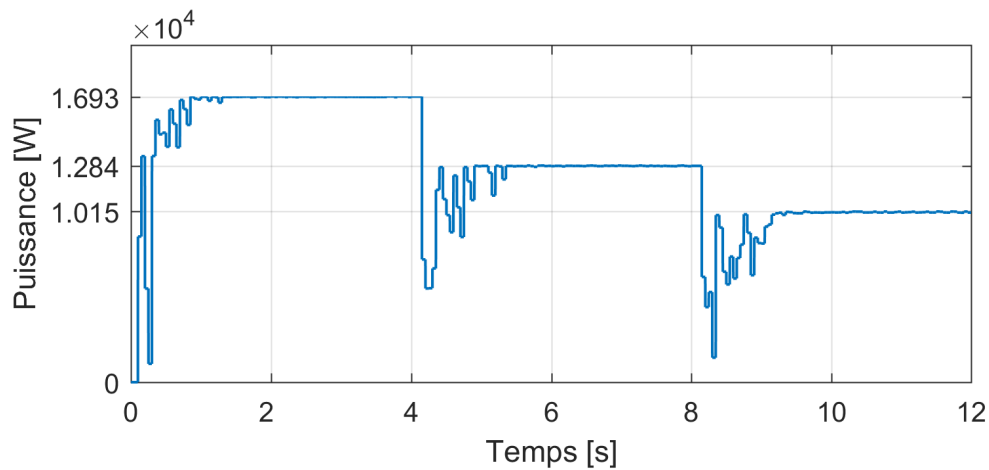


FIGURE 2.28 – Puissance générée par le générateur PV lors de trois scénarios d'ombrage partiel

générateur PV commandé par ces deux algorithmes a été réalisée, où ces deux techniques ont été testées à l'état stable et lors des changements brusques de l'irradiation. À partir des résultats de la simulation, la méthode PSO a pu poursuivre correctement le MPP dans toutes les conditions d'éclairement, et elle est avantageuse par rapport aux d'autres techniques, comme l'algorithme P&O, qui est capable de localiser le MPP seulement dans le cas d'éclairement uniforme ou d'autres techniques intelligentes, pas son efficacité, sa structure simple, sa mise en œuvre facile et sa vitesse de convergence très rapide vers la solution souhaitée. Cependant, le choix de ses paramètres a des impacts sur la optimisation de ces performances.

SYSTÈME PV SOUS ÉCLAIREMENT NON-UNIFORME CONNECTÉ AU RÉSEAU

Un système PV raccordé au réseau électrique a pour rôle principal de contribuer à la production d'électricité issue d'une source renouvelable sur le réseau. L'énergie produite par le générateur PV est directement exploitée par les charges locales de l'installation et l'éventuel excès de production d'électricité est injecté dans le réseau. Le réseau est utilisé en complément à la production PV. Dans ce cas, le réseau est considéré comme une forme de stockage virtuel d'énergie. Dans la littérature, il existe un grand nombre de solutions pour l'extraction de la puissance maximale des panneaux solaires photovoltaïques et de proposer des pistes d'optimisation, afin de minimiser les effets néfastes de l'ombrage partiel sur les systèmes des panneaux solaires photovoltaïques. Ainsi la modélisation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink nous a permis d'exposer les limites des algorithmes de suivi de puissance maximale conventionnel sous différentes conditions d'ensoleillement en utilisant les configurations de champs solaires série-parallèle. Nous avons alors utilisé un algorithme de maximisation capable de trouver le maximum global sous n'importe quel modèle d'ombrage partiel. Ensuite le modèle de commande associé au convertisseur a été étudié. Il s'agit de la commande MLI pour le contrôle de l'onduleurs triphasés. Ces commandes vont d'une part faciliter l'intégration accrue des systèmes solaires photovoltaïques au réseau tout en assurant une bonne qualité de l'énergie et d'autre part vont garantir un transfert optimisé de la production lors des phénomènes d'ombrage partiel. Ce chapitre présente un modèle mathématique de simulation s'appliquant à chaque composant du système PV connectée au réseau. Le modèle contient une représentation détaillée des composants principaux du système, l'onduleur de tension triphasé à deux niveau (DC-AC) commandé par la MLI (sinus triangle), le filtre(L),et le réseau électrique (BT). Une commande du convertisseur

(DC-AC) est développée dans le but de transférer l'énergie produite du générateur PV dans le réseau en gardant la tension alternative constante. On a utilisé le toolbox Simpower du logiciel MATLAB pour simuler le fonctionnement du système PV proposé.

3.1 Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau

La figure 3.1 représente la configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC/DC qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal (MPP). L'ensemble est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/AC commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau électrique [21].

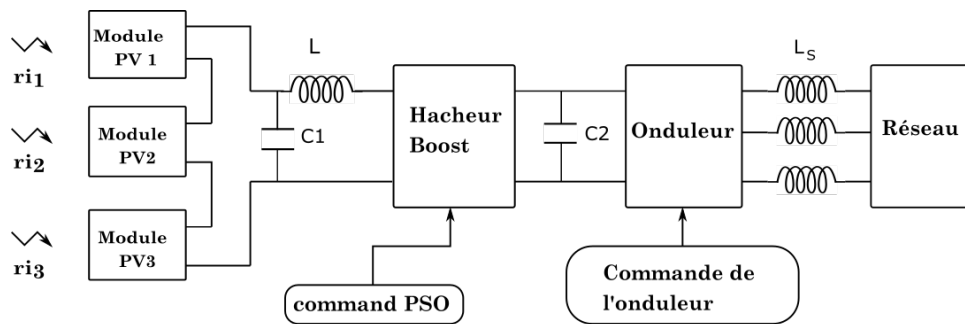


FIGURE 3.1 – Schéma globale d'un système PV connecté au réseau électrique

3.2 Structure des systèmes PV connectées au réseau électrique

3.2.1 Différents types de systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et le régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif ou pour injecté la puissance produite au réseau électrique [21].

3.2.2 Structure générale d'un système photovoltaïque

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

- **Les systèmes à connexion directe au réseau :** Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.
- **Le système à bus continu intermédiaire :** Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230V)[22].

3.2.3 Configuration des systèmes PV

Les convertisseurs utilisés doivent être utiles et compatibles pour le traitement de puissance et la synchronisation avec la puissance de service. En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs configurations ont été conçues comme suit [22] :

- Système PV à onduleur central (Central-plant inverter)
- Système PV à hacheur Multiple-string avec un onduleur unique
- Système PV à onduleur Multiple-string
- Système PV à onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

3.2.3.1 Système PV à onduleur central (Central-plant inverter)

Dans les systèmes PV à des onduleurs centraux, habituellement on utilise un grand onduleur pour convertir la puissance du côté DC des modules (PV) à une puissance (AC) sur le côté alternatif. Dans ce système, les modules sont connectés en série pour former une chaîne, et plusieurs de ces chaînes sont reliées en parallèle au hacheur [22].

3.2.3.2 Système PV à hacheur Multiple-string avec un onduleur

Dans le système PV de multiple-string du convertisseur DC-DC, chaque hacheur Boost est utilisé pour poursuivre le point MPP d'une chaîne. Les sorties des différents hacheurs sont reliées à un seul onduleur [22].

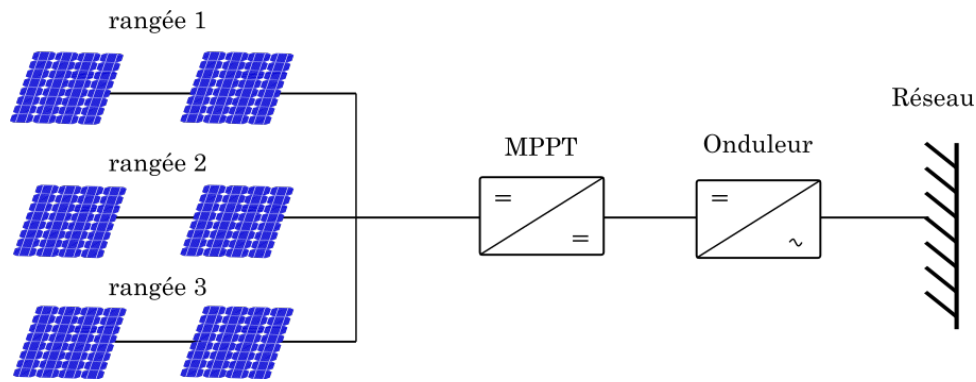


FIGURE 3.2 – Structure d'un système PV à onduleur central (Central-plant inverter)

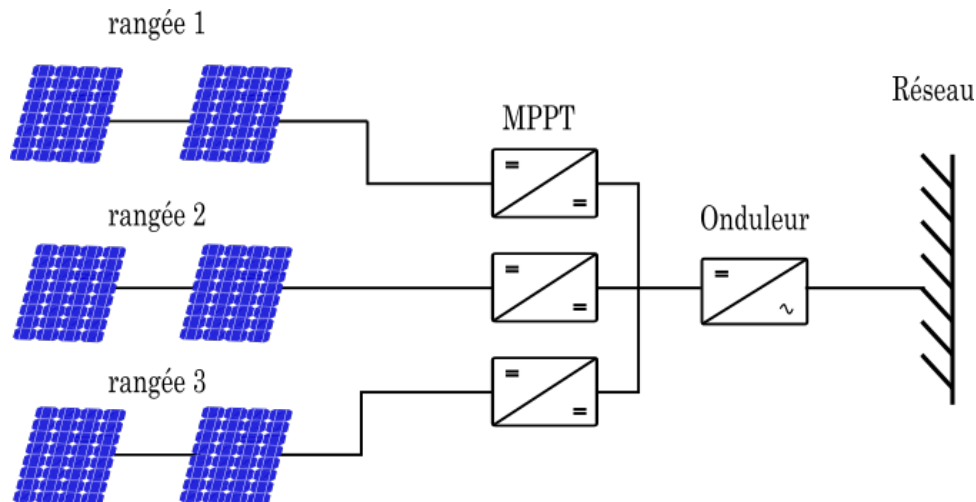


FIGURE 3.3 – Structure d'un système PV à hacheur Multiple-string et un seul onduleur

3.2.3.3 Système à onduleur Multiple-string

Dans ce type de système, comme le montre la figure 3.4, l'ensemble des modules PV sont rangés en des chaînes, chaque chaîne PV a sa propre hacheur boost et sa propre onduleur, ces petites onduleurs sont reliés en parallèle au côté AC [22].

3.2.3.4 Système à onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

Dans les systèmes d'onduleur modulaire chaque module photovoltaïque aura un petit onduleur (typiquement de 50W à 300W) et aucun câblage n'est requis. On prévoit de petits onduleurs pour réduire le coût du système [22].

3.3 Convertisseur DC/AC (onduleur)

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de tension de sortie de l'onduleur doit

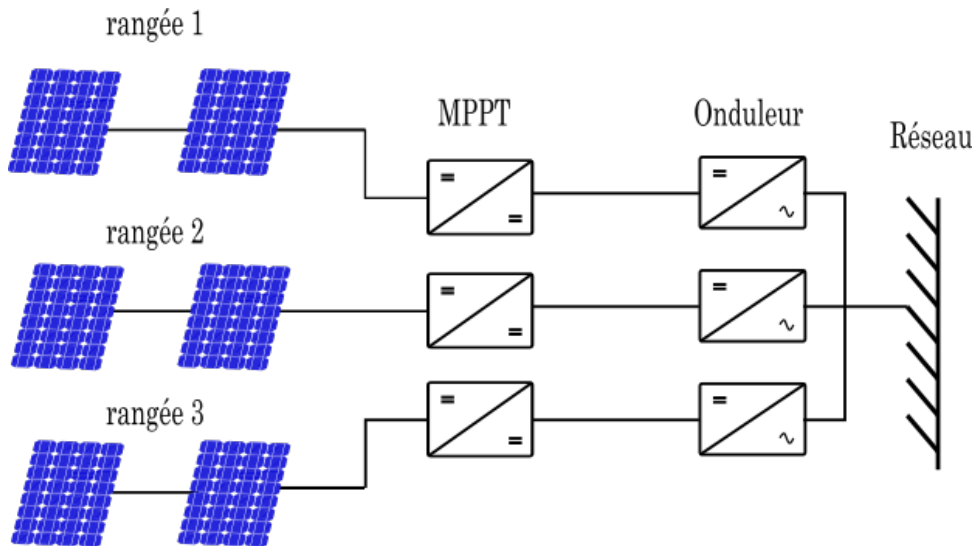


FIGURE 3.4 – Structure d'un système PV à onduleur Multiple-string

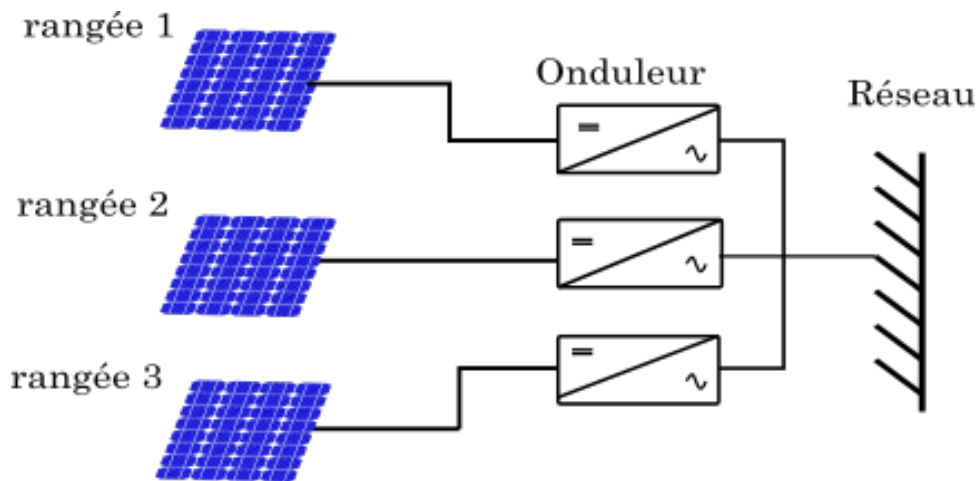


FIGURE 3.5 – Structure d'un système PV à onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée [23].

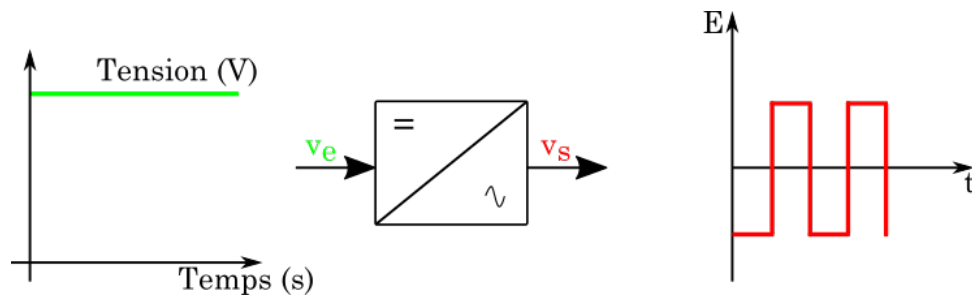


FIGURE 3.6 – Symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC/AC)

3.3.1 Structure d'onduleur

Les onduleurs triphasés à deux niveaux sont des convertisseurs constitués de trois bras, chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. De ce fait, les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en anti-parallèle [24].

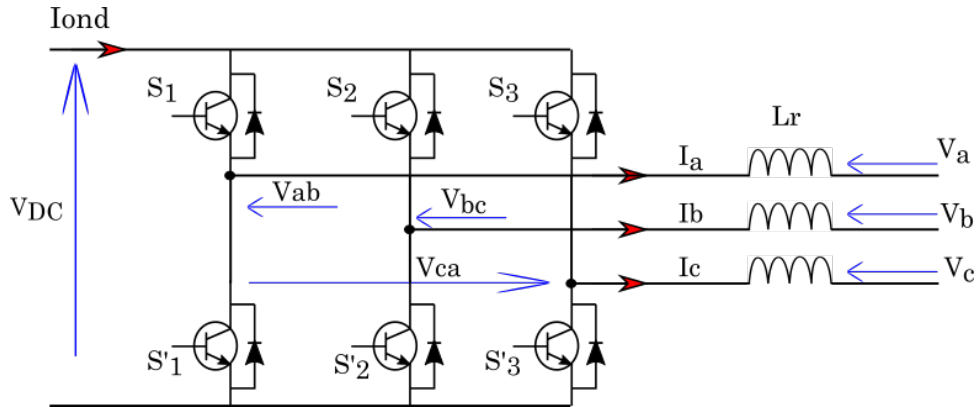


FIGURE 3.7 – Structure d'un onduleur triphasée

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F qui détermine ses états de conduction [24] :

$$F1 = \begin{cases} 1 & \text{si } S_1 \text{ passant et } S'_1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } S'_1 \text{ passant et } S_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$F2 = \begin{cases} 1 & \text{si } S_2 \text{ passant et } S'_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } S'_2 \text{ passant et } S_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$F3 = \begin{cases} 1 & \text{si } S_3 \text{ passant et } S'_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } S'_3 \text{ passant et } S_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont liées aux fonctions de connexion F via les équations suivantes [24] :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{DC}(F_1 - F_2) \\ V_{bc} = V_{DC}(F_2 - F_3) \\ V_{ca} = V_{DC}(F_3 - F_1) \end{cases} \quad (3.1)$$

Par conséquent, les tensions simples V_a, V_b, V_c sont alors synthétisées ainsi :

$$\begin{cases} V_a = \frac{V_{DC}}{3}(2F_1 - F_2 - F_3) \\ V_b = \frac{V_{DC}}{3}(-F_1 + 2F_2 - F_3) \\ V_c = \frac{V_{DC}}{3}(-F_1 - F_2 + 2F_3) \end{cases} \quad (3.2)$$

En définitif, l'équation matricielle suivante permet de modéliser l'onduleur de tension à deux niveaux :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$I_{ond} = F_1 I_a + F_2 I_b + F_3 I_c \quad (3.4)$$

3.3.2 Modèle de l'onduleur dans le repère (a, b, c)

Les équations gouvernant les trois phases de l'onduleur sont données par [25] :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_a}{dt} = u_{ca} - R_f i_a - e_a \\ L_f \frac{di_b}{dt} = u_{cb} - R_f i_b - e_b \\ L_f \frac{di_c}{dt} = u_{cc} - R_f i_c - e_c \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec :

e_a, e_b, e_c : sont les tensions aux points de raccordements communs ;

i_a, i_b, i_c : représentent les courants sortant de l'onduleur ;

L_f : représente l'inductance de couplage d'une phase du filtre entre l'onduleur et le réseau ;

R_f : représente la résistance interne de l'inductance de couplage (L_f).

L'équation donnant la tension coté continu est donnée par :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_d - (F_1 i_a + F_2 i_b + F_3 i_c) \quad (3.6)$$

Où : I_d : représente le courant d'entrée du bus continu ; C_{dc} : représente la capacité du condensateur du bus continu.

En remplaçant l'expression (3.2) dans (3.5) on trouve le système suivant [25] :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_a}{dt} = \frac{2F_1 - F_2 - F_3}{3} V_{DC} - R_f i_a - e_a \\ L_f \frac{di_b}{dt} = \frac{-F_1 + 2F_2 - F_3}{3} V_{DC} - R_f i_b - e_b \\ L_f \frac{di_c}{dt} = \frac{-F_1 - F_2 + 2F_3}{3} V_{DC} - R_f i_c - e_c \end{cases} \quad (3.7)$$

3.3.3 Modèle de l'onduleur dans le repère (α, β)

Pour rendre le modèle de l'onduleur sous une forme plus simplifiée, on utilise la théorie de transformation d'espace de vecteurs du système triphasé au système biphasé virtuel. Ce qui donne [25] :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_\alpha}{dt} = u_{c\alpha} - R_f i_\alpha - e_\alpha \\ L_f \frac{di_\beta}{dt} = u_{c\beta} - R_f i_\beta - e_\beta \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_d - (F_\alpha i_\alpha + F_\beta i_\beta) \end{cases} \quad (3.8)$$

Où :

$$\begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} = \alpha\beta T_{abc} \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Et

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \alpha\beta T_{abc} \begin{bmatrix} e_{ca} \\ e_{cb} \\ e_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Les courants sont exprimés par [25] :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \alpha\beta T_{abc} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

On a aussi :

$$\begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{6}}(2F_a - F_b - F_c) \\ \sqrt{\frac{1}{2}}(F_b - F_c) \end{bmatrix} V_{dc} \quad (3.12)$$

Ce qui donne :

$$F_\alpha = \sqrt{\frac{1}{6}}(2F_a - F_b - F_c), \quad F_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}}(F_b - F_c)$$

3.3.4 Modèle de l'onduleur dans le repère (d, q)

L'intérêt principal du repère $\alpha\beta$ est de réduire la complexité du système. Cependant, il existe un autre repère qui répond aux mêmes objectifs que le précédent : c'est le repère tournant (d, q) . Ce repère tournant est obtenu en appliquant une rotation sur le repère stationnaire $\alpha\beta$ d'un angle ωt où ω est la vitesse angulaire de vecteur tension de la source.

Dans le repère tournant (d, q) , le modèle transformé devient [25] :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} = u_{cd} - R_f i_d - L_f \omega i_q - e_d \\ L_f \frac{di_q}{dt} = u_{cq} - R_f i_q - L_f \omega i_d - e_q \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_d - (F_d i_\alpha + F_q i_\beta) \end{cases} \quad (3.13)$$

La transformation du système biphasé (3.8) dans le repère (d, q) nécessite d'avoir les relations de transformation des tensions et des courants entre les deux repères [25] :

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

En remplaçant l'équation (3.12) dans (3.14), on trouve :

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} V_{dc} \quad (3.15)$$

Avec :

$$F_d = F_\alpha \cos(\omega t) + F_\beta \sin(\omega t), \quad \text{et} \quad F_q = -F_\alpha \sin(\omega t) + F_\beta \cos(\omega t)$$

Les tensions et les courants sont transformées par [25] :

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

3.4 Transformation de Park

On peut aussi faire le transfert du repère abc au repère tournant (d, q) d'une manière direct en utilisant la transformation de Park, Cette transformation renvoie des systèmes équilibrés de courants à des courants constants dans le repère d, q [26].

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} = c. \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$x_{0dq} = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad x_{abc} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad x_{0dq} = P.x_{abc} \quad (3.19)$$

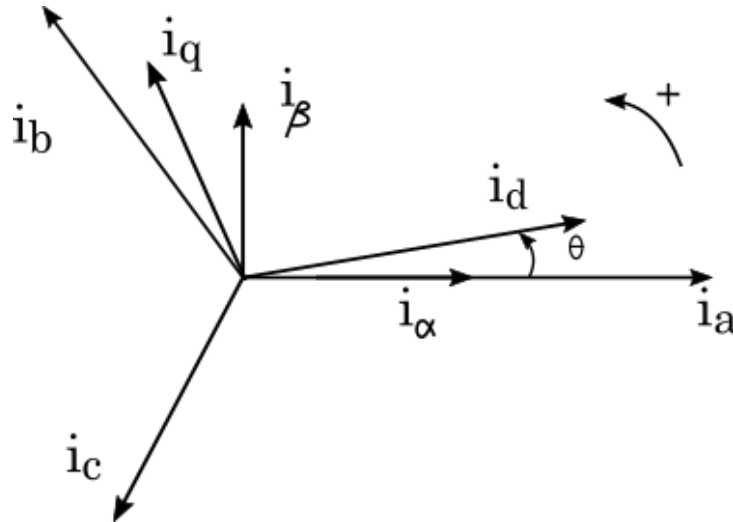


FIGURE 3.8 – Repères fixes abc, et repère synchrone dq

Parfois il est plus commode de séparer la transformation de Park en deux opérations. Un changement de trois phases a,b,c à deux phases $\alpha\beta$ (transformation de Clarke), suivie du passage du système de coordonnées fixe à un repère synchrone d, q [26].

3.5 Boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop(PLL))

3.5.1 Principe d'une P.L.L classique

La P.L.L est couramment utilisée dans la commande des filtres actifs de puissance. D'un point de vue théorique, le principe est simple, mais sa réalisation, notamment dans un environnement perturbé (*en présence d'harmoniques et/ou d'un déséquilibre pour les systèmes triphasés*) est assez délicate. En effet, certains de ses composants nécessitent des réglages fins prenant en compte de nombreux paramètres. Son schéma de principe est illustré sur la figure suivante [27] :

3.6 Structure de la commande à base du régulateur PI

Chaque boucle de régulation dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique sera présenté comme le montre le schéma bloc de la figure 3.10, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [28].

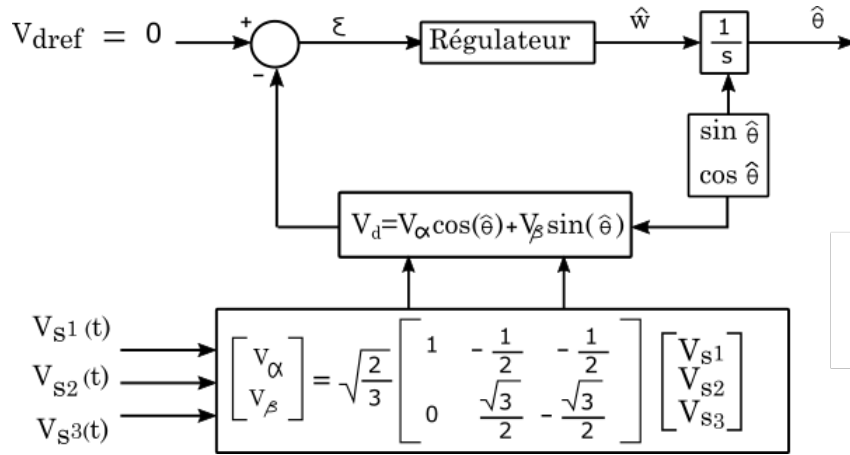


FIGURE 3.9 – Schéma de principe d'une P.L.L classique

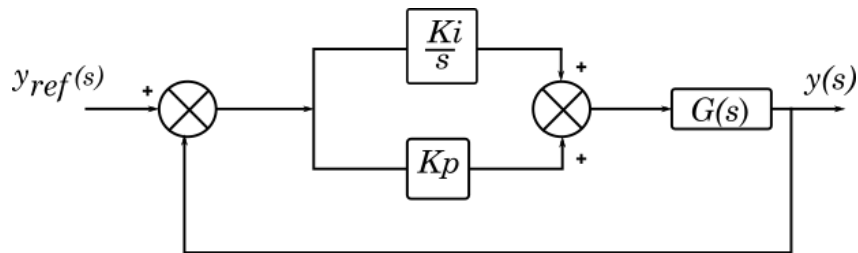


FIGURE 3.10 – Schéma de commande à base d'un régulateur PI

Avec $G(s)$ est un système de premier ordre peut être donné par une des fonctions suivant [28] :

$$\begin{cases} G_f = \frac{G_1}{s + \tau_1} \\ G_f = \frac{G_0}{s + \tau_s} \end{cases} \quad (3.20)$$

Avec : $\tau_1 = 1/\tau$

3.6.1 Synthèse du régulateur de la tension continue

La figure 3.11 représente la boucle de régulation de la tension du bus continu par un régulateur PI [25] :

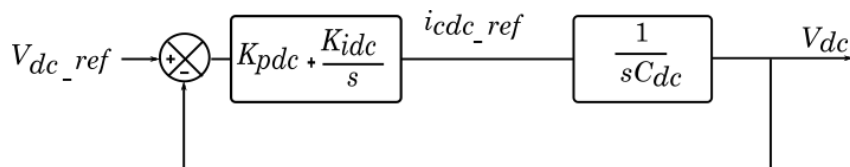


FIGURE 3.11 – Schéma de régulation de la tension du bus continu

L'identification de la fonction de transfert en boucle fermée avec celle d'un système de deuxième ordre conduit à [25] :

$$\begin{cases} K_{pdc} = 2\varepsilon_{dc}\omega_{ndc}C_{dc} \\ K_{idc} = C_{dc}\omega_{ndc}^2 \end{cases} \quad (3.21)$$

Où ε_{dc} et ω_{ndc} , représentent respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation du système.

Le produit de la tension continue V_{dc} avec le courant continu I_{dc} donne la puissance de référence P_{ref} exprimée par :

$$P_{ref} = V_{dc}I_{dc} \quad \text{avec} \quad I_{dc} = I_{dc.ref}$$

3.6.2 Synthèse des régulateurs des courants

La figure 3.12 représente le schéma bloc des régulateurs des courants i_d, i_q , par des régulateurs PI [25] :

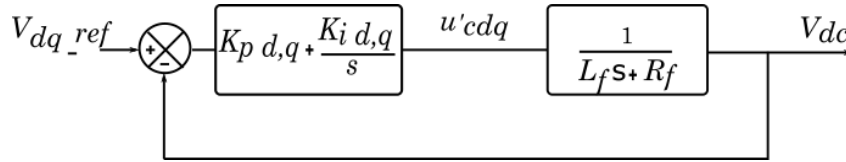


FIGURE 3.12 – Schéma de régulation des courants i_d et i_q

L'identification de la fonction de transfert en boucle fermée avec celle d'un système de deuxième ordre conduit à [25] :

$$\begin{cases} K_{pdq} = 2\varepsilon_{dq}\omega_{ndq}L_f - R_f \\ K_{idq} = L_f\omega_{ndq}^2 \end{cases} \quad (3.22)$$

Où ε_{dq} et ω_{ndq} , représentent respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation du système.

Les tensions de référence à l'entrée de l'onduleur sont calculées en utilisant le principe de compensation suivant [25] :

$$\begin{cases} u_{cd.ref} = e_d + u'_{cd} - L_f\omega i_q \\ u_{cq.ref} = e_q + u'_{cq} - L_f\omega i_d \end{cases} \quad (3.23)$$

3.7 Techniques de commande d'onduleur

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (Commande symétrique, Décalée, MLI). Les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale au niveau de la sortie et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

3.7.1 Commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (référence) à fréquence beaucoup plus basse [29].

La figure 3.13 montre les différents blocs utilisés dans Matlab/Simulink pour générer les six signaux MLI de l'onduleur, les signaux de référence sont des tensions sinusoïdales déphasées entre elles de 120° .

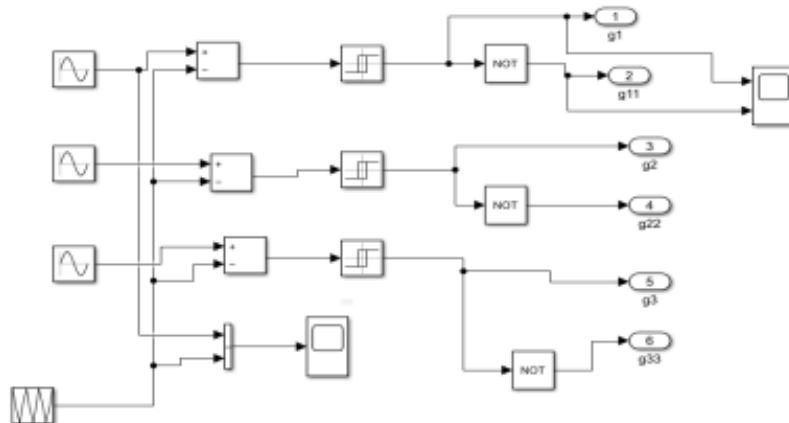


FIGURE 3.13 – Schéma de régulation des courants i_d et i_q

Les deux signaux MLI complémentaires générés en comparant une porteuse triangulaire avec une tension de référence sinusoïdale sont représentées sur la figure 3.14.

3.8 Topologie de filtre

L'injection de la puissance à partir du système photovoltaïque au réseau de distribution est typiquement faite par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. Des harmoniques dans la tension de sortie du convertisseur sont habituellement atténués en reliant un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique, afin de faire face aux conditions de qualité de puissance du réseau.

Généralement, le problème des harmoniques peut être défini comme : la perturbation particulière qui, lancée par la présence des composants non linéaires des systèmes

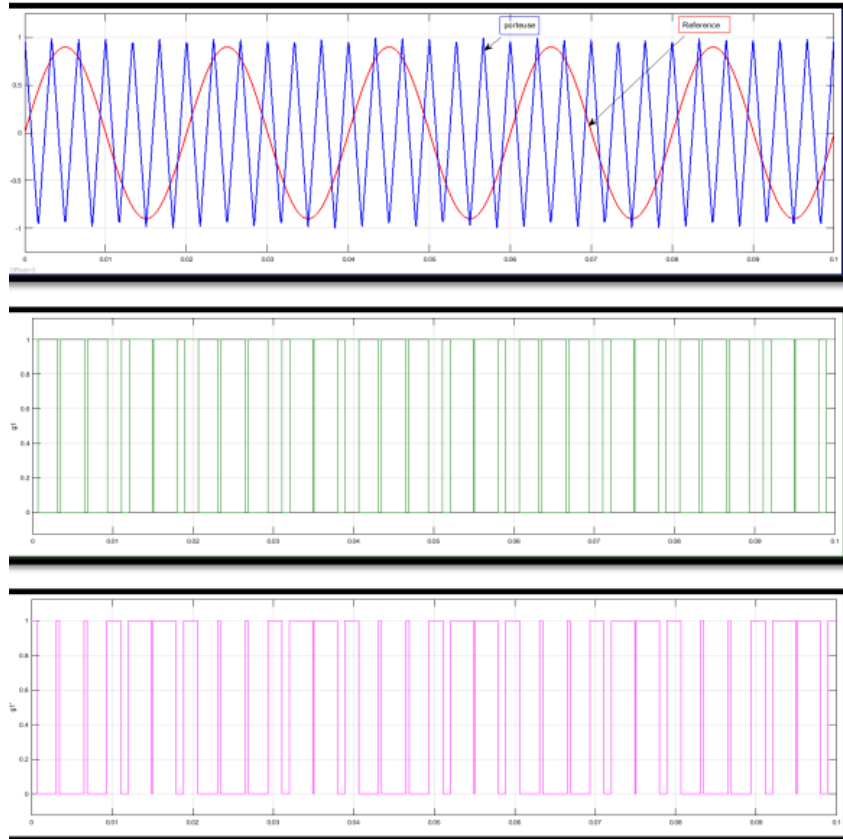


FIGURE 3.14 – Principe de la commande MLI et les impulsions d’un interrupteur

électriques, détermine une modification permanente des formes sinusoïdales de la tension et du courant, en termes de composants sinusoïdaux à une fréquence différente du celle de la composante fondamentale. Les générateurs photovoltaïques sont reliés au réseau de distribution par des convertisseurs statiques et peuvent donc potentiellement causer des harmoniques, dégradant ainsi la qualité de l’énergie électrique et changeant les performances des autres équipements sensibles aux harmoniques de tension. D’autre part, les convertisseurs statiques eux-mêmes sont sensibles aux harmoniques et peuvent fonctionner de manière non précise, en raison de la présence des harmoniques, ce phénomène rendre l’utilisation des filtres dans ces systèmes indispensable. Il existe plusieurs types de filtre, la topologie la plus simple c’est le filtre inductif (filtre L), il y a d’autre topologies comme LC ou LCL [30].

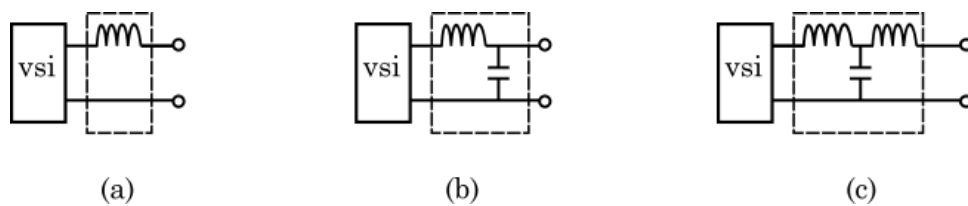


FIGURE 3.15 – Topologie de filtre de base (a) : L, (b) : LC, (c) : LCL

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale [30].

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (**L** ou **LCL**).

La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part de réduire la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler.

3.9 Modélisation de réseau

Le réseau triphasé a trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $2\pi/3$, et ayant la même valeur efficace. Ceci forme un système triphasé équilibré [31].

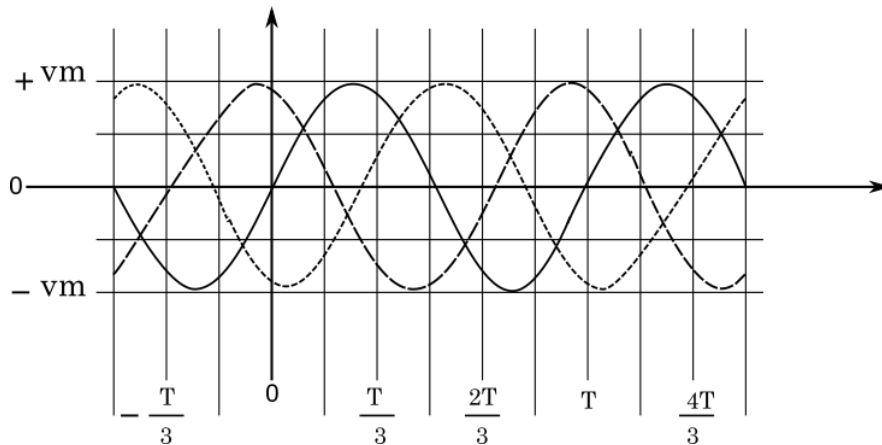


FIGURE 3.16 – Système de tensions triphasé équilibré

On peut généralement considérer que (V_a, V_b, V_c) est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour (u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}) . On a [31] :

Tension Simples :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.24)$$

Tension composées :

$$\begin{cases} u_{ab} = V_a - V_b \\ u_{bc} = V_b - V_c \\ u_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (3.25)$$

Relations pour un système triphasé équilibré :

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2V_{eff}} \\ U_m = \sqrt{3V_m} \\ U_{eff} = \sqrt{3V_{eff}} \end{cases} \quad (3.26)$$

3.10 Résultats de la simulation de réglage du bus continu

Le réglage de la tension du bus continu afin de la maintenir constante en dépit des variations du courant et de la tension du GPV, dans la topologie d'un système PV connecté au réseau avec bus DC, est indispensable. La stabilité de cette tension va assurer une tension alternative stable à la sortie de l'onduleur, comme cela a été précisé ci-dessus, de ce fait, avant de passer à la simulation du système complet, nous allons, tout d'abord, régler cette tension, tout en remplaçant le GPV par une source de courant qui génère un courant continue de valeurs différentes.

Le schéma de la figure 3.17 représente le modèle sous Matlab/Simulink, de l'onduleur triphasé à deux niveaux connecté au bus DC à son entrée et à travers un filtre L au réseau électrique de sa sortie. Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont générés par la commande à tension orientée VOC expliquée dans la partie théorique. Le bus DC est alimenté par une source de courant continue, les différents valeurs de cette source durant la période du simulation sont montrées sur la figure 3.18.

Les paramètres de simulations sont résumées dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Paramètre de simulation de l'onduleur côté réseau

Description	Valeur
Tension de référence de bus DC	$V_{dc.ref} = 700V$
Filtre L	$L = 5mH, R_{int} = 0.01\Omega$
Capacité de bus DC	$2000\mu F$
Tension de ligne	$380V(RMS)$

La tension du bus DC ainsi que la tension et le courant de sortie de l'onduleur, après l'exécution de la simulation, sont donnés, respectivement, par les figures 3.19, 3.20 et 3.21.

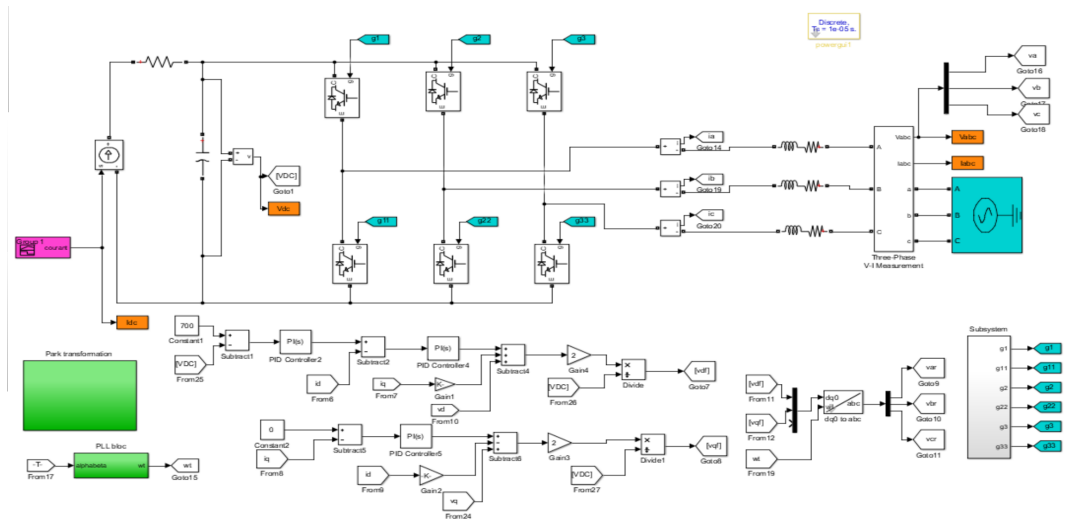


FIGURE 3.17 – Schéma de l’onduleur côté réseau avec sa commande

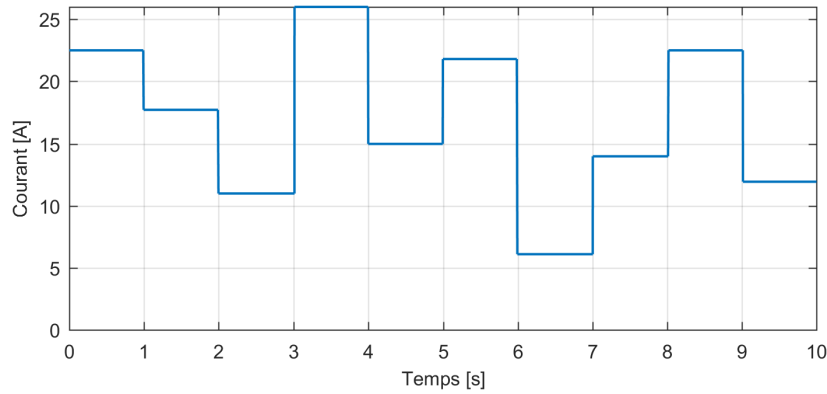


FIGURE 3.18 – Valeur du courant de la source de courant connectée au bus DC

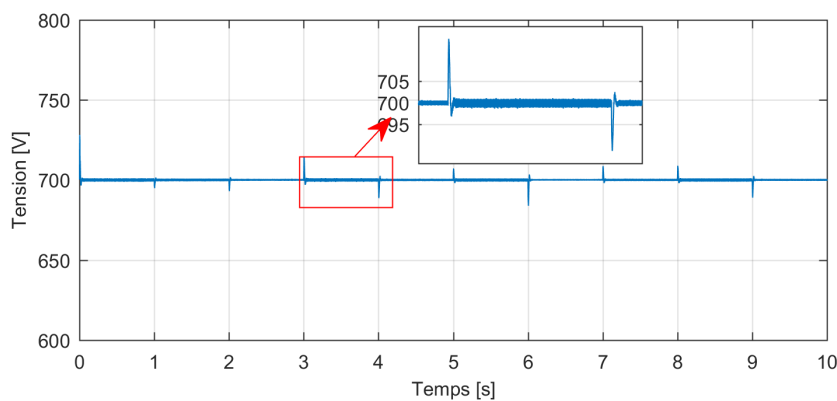


FIGURE 3.19 – Tension du bus DC

3.10.1 Interprétation des résultats

On remarque la tension de bus DC V_{dc} suit bien la tension de référence en dépit des changements de courant injecté dans ce bus I_{dc} . Comme le montre la figure 3.19, la valeur

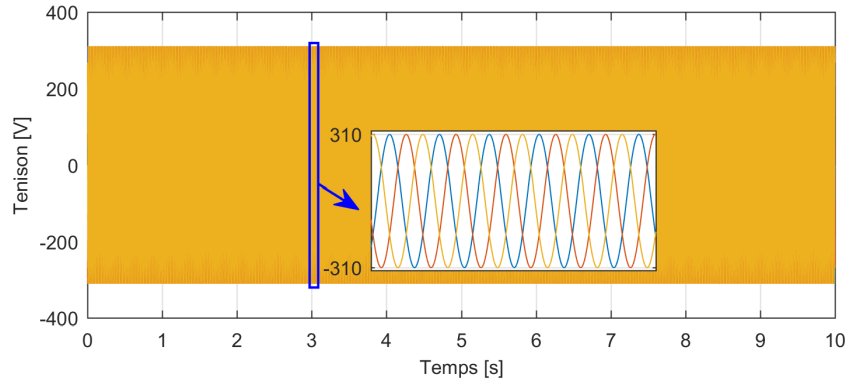


FIGURE 3.20 – Tension de sortie de l'onduleur avec zoom

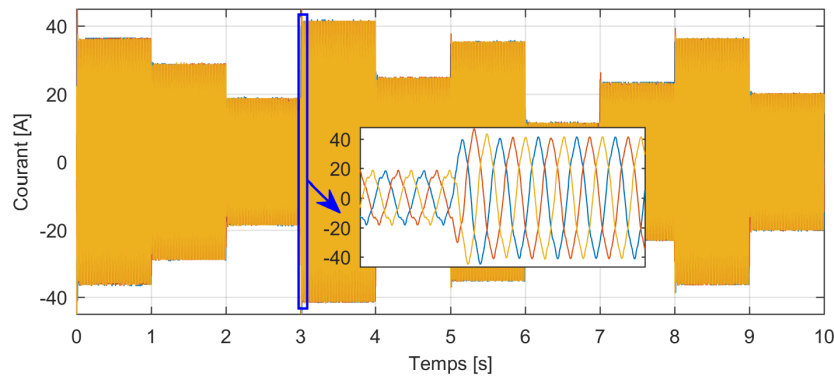


FIGURE 3.21 – Courant injecté au réseau avec zoom

de cette tension est égale à tension de référence (700V) tout au long de l'intervalle de simulation, les pics enregistrés aux instants de changement de courant sont de très courte durée et leur amplitude ne dépasse pas 15% de la valeur de référence.

Les tensions et les courants de l'onduleurs sont nettement meilleurs. Leurs courbes se rapprochent de la forme sinusoïdale, comme il est montré sur leurs figures 3.19 et 3.19 respectivement.

3.10.2 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné les divers topologies du système PV connecté au réseau, puis on a modélisé les différents composants du système PV connecté au réseau à base de bus DC et d'un seule onduleur. Ensuite, la technique de tension orientée VOC, qui a été utilisée dans le contrôle de l'onduleur, est largement expliquée. A la fin, le contrôle du bus continu par l'onduleur triphasé, afin d'injecté toute la puissance délivrée a ce dernier dans le réseau électrique, a été simulé dans l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenu ont montré l'efficacité de la technique utilisée à maintenir constante

la tension du bus continu , tout en injectant toute la puissance qu'il a reçu dans le réseau électrique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les performances des panneaux photovoltaïques dans des conditions partiellement ombragées a été d'intérêt considérable. Cet mémoire a étudié l'effet des conditions d'ombrage partiel sur la puissance d'un générateur photovoltaïque et sur son connexion au réseau électrique et comment faire face aux obstacles qui perturbent son rendement énergétique, d'où la nécessité de l'utilisation d'un algorithme de recherche performant pour extraire la puissance maximale en toutes circonstances. Le travail présenté dans cet mémoire s'est focalisé sur l'optimisation de la production d'énergie électrique photovoltaïque avec moins de pertes possibles. Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique malgré les inconvénients rendant cette source d'énergie chère et peu fiable tout au long de la durée de vie du générateur. Différents phénomènes ont été discutés en utilisant le modèle de simulation Matlab/Simulink basé sur l'étude des systèmes photovoltaïques qui se compose essentiellement d'un générateur PV (GPV), convertisseur (DC/DC boost), la commande (MPPT) et une charge. Dans notre travail nous avons présenté les systèmes photovoltaïques en se basant particulièrement sur le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique qui est constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur DC-DC Boost, un onduleur commandé par MLI et le réseau électrique. On a pris en compte l'influence de variation des conditions climatiques (l'éclairement) sur le MPPT où la puissance de fonctionnement du système est maximale. La commande MPPT permet le meilleur exploit d'un GPV et elle le force de fonctionner toujours au point de puissance maximale. A travers ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude d'un système photovoltaïque fonctionnant aux conditions d'éclairement non-uniformes et connecté à un réseau électrique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Zahar soria et Makhlouf cheymaa. *Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique*. Mémoire de master, électronique, instrumentation et maintenance industrielle, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2017.
- [2] GUICHI Amar. *ETUDE ET COMMANDE D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE - EOLIENGROUPE DIESEL*. Thèse de doctorat en sciences, électronique, instrumentation, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Faculté d'Electronique et d'Informatique, 2019.
- [3] BELMADI Mohamed et ABID Taha Yacine. *Étude Technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome*. Master genie electrique, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Institut de Technologie, 2017.
- [4] BENADEL FAIZA. *ETUDE ET SIMULATION D'UNE COMMANDE MPPT POUR SYSTEME PV*. Master en genie electrique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016.
- [5] AYAT Rahma. *Utilisation des techniques intelligentes (PSO/GA) en vue de la supervision d'une installation de production d'énergie renouvelable*. Magister automatique, electrotechnique, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS -SÈTIF-1 UFAS (ALGERIE), 2014.
- [6] Alayat Mahmoud et Boucetta Issam. *Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents*. Mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR de Annaba, juin 2017.
- [7] SAHNOUNE Khalissa. *Etude comparative des modèles de génération de la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque*. Mémoire de master, électronique,

- technologie des systèmes électro-énergétiques de sources d'énergies renouvelables, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2015.
- [8] HELALI KAMELIA. *Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative*. Mémoire de magister en électrotechnique, électrotechnique, machines électriques, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [9] YOUCEF Abdelaziz. *Contribution à l'Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque en Présence d'Ombrage Partiel*. Doctorat en électrotechnique, génie électrique, convertisseurs électromécaniques, université Djilali LIABES de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [10] AGROUM Abderrahmane. *Etude d'un Système Photovoltaïque autonome*. Mémoire de master, électrotechnique, Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE), École Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, 2017.
- [11] KADRI Ibtissem. *Etude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil*. Mémoire de master, physique énergétique et énergies renouvelables, université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, juin 2018.
- [12] Oubadji Mohamed et Nessel abdenacer. *Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque*. Mémoire de master, génie électrique, Université Djilali Bounaama-Khemis Miliana, 2018.
- [13] Bennabi Houssam Eddine et Kouadri radhwane. *Etude d'un générateur photovoltaïque reconfigurable en utilisant l'algorithme PSO*. Mémoire de master, génie électrique, Université Djilali Bounaama- Khemis Miliana, 2018.
- [14] HADJILA Djallal. *Etude de simulation d'une unité de commande d'un caractériser I-V à entrées multiples pour modules photovoltaïque*. Mémoire de master, génie électronique, contrôle industriel, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, juin 2011.
- [15] Aissa STATRA et Omar BEN MEBAREK. *Etude et commande d'un convertisseur DC/DC à base d'un microcontrôleur. Application à un système photovoltaïque*. Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en automatique, Laboratoire de Commande des Processus, Ecole Nationale Polytechnique, 2018.
- [16] BISKER Asma et CHIRI Meriem. *Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau*. Projet de fin d'études, Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, Juin 2012.

- [17] BOUHARCHOUCHE Abderrezzaq. *ETUDE ET COMMANDE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION HYBRIDE EOLIENPHOTOVOLTAÏQUE*. Mémoire de magister, systèmes électrotechniques, conditionnement de l'énergie et entraînements électriques, Ecole Militaire Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2013.
- [18] Krim Med lamine et Debbah Housseem Eddine. *Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque*. Master Électrotechnique industriel, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, juin 2018.
- [19] Zaiem Kamar. *Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit*. Master Électromécanique, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2019.
- [20] KHALDI Yacine et CHERIET Mohamed. *Commande d'un système photovoltaïque par carte dSpace*. Master génie électrique instrumentation, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2019.
- [21] Y. Pankow. *Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension*. Thèse de doctorat, Ecole National supérieure d 'Art et Métiers, Décembre 2004.
- [22] Muhammad H Rashid. *Power electronics handbook : devices, circuits and applications*. Elsevier, 2010.
- [23] MECHALIKH Med Nadjib et HAMADA Charaf Eddine. *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau*. Mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ourgla, 2013.
- [24] BOUZID Allal El Moubarek. *Onduleur triphasé commandé par la Stratégie d'Élimination d'Harmonique*. Thèse de magister, UNIVERSITE de Oran, 2010.
- [25] Abdelmalik Zorig. *Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé*. Master génie électrique, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, Juin 2011.
- [26] Robert Thibault. *Contrôle de l'énergie injectée dans un réseau électrique par un convertisseur triphasé utilisant un régulateur basé sur un modèle interne sinusoïdal*. Master en génie Électrique, Université du QUÉBEC, SEPTEMBRE 2006.
- [27] Mohamed Choukri Benhabib. *Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande*. Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy-1, Décembre 2004.

- [28] Ghania Boukerche. *Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application*. Master Électrotechnique, commande des systèmes industriels, juin 2017.
- [29] ABBASSEN LYESS. *Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque*. Thèse de magister, UNIVERSITE de MOULOU D MAMMERI - TIZI OUZOU, 2011.
- [30] M. Moulay-Amar et M. Loghouini. *Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque*. Mémoire d'ingéniorat, Université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [31] Michel Boës Guy Chateigner. *Manuel de génie électrique*. Dunod, 2007.