République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de YAHIA Fares de Médéa



Faculté de la Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Projet de Fin d'Etude Présenté pour l'obtention du diplôme

De Master en Génie Electrique

***Spécialité* : Réseaux électriques**

THÈME

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté aux réseaux

Proposé et dirigé par :

Dr : Hanini Noureddine

Préparé et présenté :

Melle : Kihal HAfidha

Melle **:** Baghdadi fatiha

Année Universitaire 2016-2017



Remerciement

Au terme de ce mémoire On tient en premier Lieu à remercier le bon Dieu le tout puissant De nous' avoir donné la volonté et la patience qui nous' ont permis de mener à bon terme ce travail.

On remercie vivement notre Promoteur, Monsieur *Hanini Noureddine, pour son suivi, son aide et son soutien documentaire et moral et pour ses conseils précieux.*

On oublié pas de remercie beaucoup plus Monsieur Morsli Abd elkader à *son aide.*

,

On tient à adresser nos sincères remerciements à tous les membres du Jury chargés de présider et d'examiner la soutenance de notre projet de fin d'étude.

Nous voudrons exprimer notre profond respect à tous les Enseignants qui ont contribués à notre formation Durant notre cycle universitaire.

Sans oublier de remercier toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, nous' a aidé à l'élaboration de ce travail surtout l'ingénieur de l'laboratoire Aniba Yahia .

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :
Mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pour voir le jour là et pour ces précieux conseils ainsi pour ses recommandation.

A mes très chérs frères : Yakoub, Ali ,Mohamed ,Khaled

A toute ma famille Baghdadi,grand et petit sans exception.

A touts mes amis de la classe.

A mes amies Oumaima,samia,Ritadj,Randa,Hadjer,lamia,manel

Merci pour les moments grandioses passés et a venir.

Fatiha

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :
Mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragé et soutenu pendant tout leur vie pour voir le jour là et pour ces précieux conseils ainsi pour ses recommandation.

A mes très chères frères et sœurs.

A touts mes amis de la classe.

A mes amies Sonia, Ablla, Hafidha, Djahida.

A touts qui m'aide dans ce travail.

Merci pour les moments grandioses passés et a venir.

Hafida

Notation

E_g : Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m2).

E : Eclairement (W/m2).

I_{ph} : Le courant de cellule (A).

: Le courant photovoltaïque (A).

I_{sat}: Courant de saturation (A).

R_p : Résistances parallèle shunt(Ω).

R_S : Résistance série (Ω).

S : la surface du module photovoltaïque (m2)

D : le rapport de cyclique.

T_c : Température de jonction (°K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m2).

T_{ref} : La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

I_{sc} : Le courant de court-circuit (A).

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

FF : Facteur de forme.

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max}: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

K : coefficient de Boltzmann (1.38.10-23 J / K).

T_a: Température ambiante (C°).

T_c : Température de la cellule (C°).

Abréviation utilisées

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MLI : modélisation large impulsion.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

CS : convertisseur statique.

Notation

E_g : Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m2).

E : Eclairement (W/m2).

I_{ph} : Le courant de cellule (A).

: Le courant photovoltaïque (A).

I_{sat}: Courant de saturation (A).

R_p : Résistances parallèle shunt(Ω).

R_S : Résistance série (Ω).

S : la surface du module photovoltaïque (m2)

D : le rapport de cyclique.

T_c : Température de jonction (°K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m2).

T_{ref} : La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

I_{sc} : Le courant de court-circuit (A).

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

FF : Facteur de forme.

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max}: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

K : coefficient de Boltzmann (1.38.10-23 J / K).

T_a: Température ambiante (C°).

T_c : Température de la cellule (C°).

Abréviation utilisées

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MLI : modélisation large impulsion.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

CS : convertisseur statique.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à une modélisation d'un tel système et plus particulièrement des différents composants d'une centrale photovoltaïque connecté à un réseau public de distribution électrique. Les principaux éléments constitutifs d'une centrale PV connectée sont modélisés et simulés sous Matlab/Simulink. Le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC (hacheur survolteur) et le Convertisseur DC/AC (onduleur de tension) sont ainsi représentés par des modèles élaborés en vue d'une simulation de comportement de l'ensemble du réseau.

Mots clés : Modélisation, système photovoltaïque connecté au réseau, Matlab/Simulink.

Abstract

The work presented in this report is a contribution to a maid to model of such a system and more particularly various components of a photovoltaic power plant connected to a public network of electric distribution (casting). The main constituent elements of a power plant connected PV are modeled and feigned under Matlab / Simulink. The photovoltaic generator, the converter DC / DC (Booster) and the Converter DC / AC (inverter of tension) are so represented by models elaborated with the aim of a simulation of behavior of the whole network.

Keywords: modeling, photovoltaic system connected to the network, Matlab / Simulink.

ملخص :

العمل المقدم هذه الذرة نمذجة العناصر المختلفة المنظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة الكهربائية. ومحاكاة العناصر المكونة الرئيسية لمحطة الكهروضوئي المتصل مشبكة الكهربائية سندام ماتلاب / SIMULINK. مع عرض اله وكهروضوئي ،المحولات DC / DC ومحولات DC / AC من خلال النماذج التي وضعت لإجراء محاكاة الشبكة بالكامل.

كلمات مفاتحة : النمذجة , موكهروضوئي، المشبكة الكهربائيةة، ماتلاب / SIMULINK

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les différentes caractéristiques du modèle SPR-305-WHT 14

La Liste des figures

Figure I.1: Composante du rayonnement global sur un plan horizontal. 05

Figure I.2: Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque 07

Figure I.3 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau. 08

Figure I.4: coupe transversale d'une cellule photovoltaïque. 09

Figure I.5: Schéma électrique d'une cellule idéale 09

Figure I.6: Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle. 10

Figure I.7 : la tension d'une cellule PV en fonction du temps 12

Figure I.8: le courant d'une cellule PV en fonction du temps 12

Figure I.9 : caractéristique I-V d'une cellule PV 12

Figure I.10: caractéristique P-V d'une cellule PV 12

Figure I.11 : influence de la résistance série sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV 16

Figure I.12: influence de la résistance série sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV 16

Figure I.13: influence de la résistance parallèle sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV 17

Figure I.14: influence de la résistance parallèle sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV 17

Figure I.15: influence de l'éclairement sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV 17

Figure I.16: influence de l'éclairement sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV 17

Figure I.17: influence de la température sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV 18

Figure I.18: influence de la température sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV 18

Figure I.19 : Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèle. 19

Figure I.20: influence de nombre de cellule en série sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV 20

Figure I.21: influence de nombre de cellule en série sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV 20

Figure I.22 : Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèle. 20

Figure I.23: influence de nombre de cellule en parallèle sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV. 21

Figure I.24: influence de nombre de cellule en parallèle sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV 21

Figure I. 25: Association mixte Ns x Np modules solaires 21

Figure I.26: influence de nombre de cellule série/ parallèle sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV 22

Figure I.27: influence de nombre de cellule série/ parallèle sur les Caractéristiques P-V 22

d’une cellule PV
Figure I.28 : Modèle du générateur photovoltaïque. 22
Figure I.29: les Caractéristiques I-V d’un générateur PV 23
Figure I.30 Caractéristiques d’un générateur PV 23
Figure I .31: Les différentes zones de Caractéristique I(V) d’un générateur photovoltaïque 24
Figure I.32 : étage d’adaptation entre un GPV et une charge. 25
Figure II.1 : schéma du système de conversion PV. 28
Figure II.2 : Caractéristiques I(V) et P(V) d’un GPV pour différents points de fonctionnement. 29
II.3 : Symbole d'un convertisseur DC-DC. 30
Figure II.4: Schéma électrique d'un hacheur Buck 31
Figure II.5 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé 32
Figure II.6 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert. 33
Figure .II.7: Schéma électrique d'un hacheur boost 33
Figure .II. 8. Schéma électrique d'un hacheur boost fermé. 34
Figure .II. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert 35
Figure .II. 10: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost. 36
Figure .II. 11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé. 36
Figure .II. 12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert. 37
Figure II.13.principe de la première commande MPPT numérique. 39
Figure II.14 : Algorithme de la méthode P&O. 40
Figure .II .15. Relation entre la puissance du GPV et le rapport cyclique du convertisseur statique. 41
Figure II.16. Algorithme type de la commande Hill Climbing. 42
Figure .II.17. Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G. 43
Figure. II. 18. Algorithme d’une commande MPPT basée sur la Méthode Incrément de Conductance. 44
Figure II. 19 : Système PV formé par un générateur PV, convertisseur d’énergie ‘survolteur’ et une charge (RS). 45
Figure. II. 20.la tension de sortie du hacheur boost 45
Figure .II.21: Symbole de convertisseur 46
Figure II.22. Exemple de signaux électrique en sortie de l’onduleur 46
Figure .II. 23: Structure d'un onduleur triphasée. 47
Figure .II. 24: Schéma de simulation d'un onduleur triphasée 47

Figure II.25: Principe de l'MLI Sinus-Triangle. 47
Figure .II. 26: Schéma de simulation d'une commande MLI 49
Figure III.27: Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse triangulaires. 49
Figure II.28: les impulsions d'un interrupteur. 50
Figure II.29: la tension composée du bras d'un onduleur. 50
Figure II.30: la tension simple du bras d'un onduleur. 50
Figure II.31: Schéma de simulation d'un système PV connecté avec une charge. 51
Figure III.1 : Schéma bloc d'une PPL. 55
Figure III.2 : Principe de la PLL triphasée dans le domaine de Park 57
Figure II.3: Repère synchrone de référence tournant 57
Figure III.4. Représentation de l'angle $\theta_s$de la PLL 58
Figure III.7 : Schéma de la régulation des courants de l'onduleur 59
Figure III.8 : Schéma bloc du régulateur (PI). 60
Figure III.9 : Schéma bloc de la régulateur PI sans compensation de pôle. 61
Figure III.10 : Schéma de régulateur de la PLL. 62
Figure III.11: le courant de la référence du régulateur (PI) 62
Figure III.12 : les tensions de la référence de la commande MLI 63
Figure III.13 : Schéma monophasé équivalent du filtre LC. 63
Figure III.13: Schéma du filtre LC et de la charge RL 64
Figure III.14: les tensions de l'onduleur après le filtre 64
Figure III.14: Modèle en série d'une ligne de transmission courte 65
III.6.1.3 Ligne de transmission longue 66
Figure III.16 : Modèle en pi d'une longue ligne de transmission 66
Figure III.17 : Schéma synoptique de commande et contrôle de la chaîne de conversion 67
Figure III.18.Modèle de simulation du réseau. 67
Figure III.19 : la tension simple injecter au réseau. 68
Figure III.20 : le courant simple injecter au réseau. 68
Figure III.21 : la puissance Active injecter au réseau. 68

Tableau des matières

Résumé

Notation

Liste des tableaux

Liste des figures

Tableau des matières

Introduction générale

Chapitre I : Notions Générales et Système Photovoltaïque

I.1: Introduction 03

I.2. Energie solaire photovoltaïque 04

I.2.1. Historique 04

I.2.2. Rayonnement solaire 04

I.3. Electricité photovoltaïque 06

I.3.1. Effet photovoltaïque 06

I.3.2.les types de systèmes photovoltaïques 07

I. 3 .3. La cellule photovoltaïque 08

I.4. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque 09

I.4.1. Cas d'une cellule idéale 09

I.4.2. Cas d'une cellule réelle 10

I.4.2.1.Caractéristiques électrique d'une cellule réale 11

I.4.3. Les paramètres d'une cellule solaire 12

I.5.Modèle du module photovoltaïque 14

I.5.1. Les paramètres influents sur la caractéristique 15

I.5.1.1. L'influence de la résistance série R_s 15

I.5.1.2.Influence de la résistance parallèle R_{sh} 15

I.5.1.3.Influence de l'éclairement 16

I.5.1.4.Influence de la température 17

I.5.1.5.L'association en série 18

I.5.1.6.L'association en parallèle 19

I.5.1.7.Association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV 20

I.6.Le générateur photovoltaïque 21

I.6.1. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque 22

I.6.2.Fonctionnement d'u générateur PV à sa puissance Maximale 22

I.6.3. Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge 23
I.7.conclusion 24
Chapitre II : modélisation et simulation d'une chaine de conversion photovoltaïque
II.1. Introduction 25
II.2.Optimisation du rendement énergétique du système PV 26
II.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) 26
II.4.Les convertisseurs électroniques 28
II.4.1. Les Hacheurs 28
II.4.1.1. Hacheur Buck 29
II.4.1.2. Hacheur Boost 31
II.4.1.3.Hacheur Buck-Boost 33
I.5. Commande MPPT 36
II.6.Différents types de commande MPPT 36
II.6.1.1. Premières commandes MPPT 36
II.6.1.2. Méthode de perturbation et observation (P&O) 37
II.6.1.3.Principe de la commande "Hill Climbing" 39
II.6.1.4.Principe de la commande "Incrément de conductance" (IncCond) 40
II.7. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur Boost commandé en MPPT 42
II.6.1. Schéma GPV et un hacheur boost : 43
II.7. Les onduleurs 44
II.7.1. Structure d'onduleur 44
II.7.2. la commande du convertisseur DC/AC 45
II.7.3. Commande MLI à porteuse triangulaire 46
II.8. Schéma de simulation d'un système PV avec la chaine de conversion 48
II.9.conclusion : 49
Chapitre III : le raccordement d'un GPV au réseau
III.1.Introduction 50
III.2. Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau 51
III.2.1 Centrales de petite taille (Pw = 1 à 10 KW) 51
III.2.2. Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 500 KW 51
III.2.3 Centrales de grande taille (Pw $\geq$ 500 KW) 51
III.3.Etude de la synchronisation du convertisseur sur le résea 51
III.3.1. Synchronisation par PLL 51

III.3.2. Principe général d'une PLL 52
III.3.2. Principe général d'une PLL 53
III.4.La boucle à verrouillage de phase dans le cas d’un réseau triphasé 54
III.4.1.PLL triphasé dans le domaine de Park 54
III.5. les régulateurs utilisés dans la synchronisation 55
III.5. 1. Régulateur proportionnel-Intégral 56
III.5.2 Régulateur PI avec compensation de pôle 57
III.5.3.Régulateur (PI) sans compensation de pôle 58
III.5.4.les correcteurs d’une PLL triphasé 59
III.6. Modélisation du filtre LC et la charge 60
III.6.1. Fonction de transfert du filtre 60
III.6.2.le Modèle globale (onduleur, filtre LC et la charge RL) 60
III.6.Système PV connecté à un réseau électrique 61
III.7.Système PV connecté à un réseau électrique 63
III.7.1 Modèle de boucle de régulation de l’ensemble du système PV 66
III.7.2.Modèle de simulation du réseau 67
III.8.Résultat de simulation des grandeurs injecté au réseau 67
III.9.Conclusion 69
Conclusion générale 71
Annexe
Bibliographies

Introduction Générale

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La production d'électricité par des sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques.

La filière étudiée dans ce projet est l'énergie solaire photovoltaïque. Il s'agit alors de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Le soleil est une source d'énergie renouvelable inépuisable

L'énergie photovoltaïque peut être considérée comme étant la plus attractive parmi les différentes sources d'énergies renouvelables du fait qu'elle présente plusieurs avantages tels que : La disponibilité de l'énergie solaire partout et gratuitement, la fiabilité des systèmes PV et la modularité de la puissance en fonction des besoins. De plus cette technologie est bien adaptée à un fonctionnement décentralisé et autonome et ne produit pas de gaz à effet de serre. Enfin, les systèmes PV d'aujourd'hui nécessitent peu d'entretien et affichent une durée de vie de 20 à 25 ans.[1]

Pour assurer un bon raccordement du générateur à énergie renouvelable au réseau électrique, la tension de sortie du convertisseur doit avoir les mêmes paramètres caractéristiques pour chacune des trois phases. Ce résultat est obtenu si l'angle de phase de la tension du réseau est correctement asservi. Dans le système de commande du convertisseur, un signal modulé (MLI) est créé par la différence de phase. Ce qui est sélectionné comme le signal de commande pour le système de contrôle MLI.

Ce système électronique, qui garantit les caractéristiques du courant produit est conforme aux exigences imposées par les normes fixées par le gestionnaire du réseau. Ce qui est responsable de la stabilité du courant (tension, fréquence, émission d'harmoniques, etc.) et assure aussi la sécurité du système (protection de découplage). Il s'agit d'un processus fonctionnant en temps réel et en permanence pour assurer la synchronisation des sorties des inverseurs avec celles du réseau électrique. La technique la plus courante utilisée pour l'asservissement de phase consiste en l'utilisation d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).[2]

Le but de ce travail est conception d'un système de conditionnement pour raccorder les systèmes photovoltaïques et le réseau électrique. La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

Au premier chapitre, on fait une description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

Le deuxième chapitre décrit une étude préliminaire des convertisseurs DC/DC et DC-AC, et leur principe et les différents types existants. Nous avons aussi présenté leur modèle mathématique ainsi que leur commande.

Le troisième chapitre présente la structure actuelle du réseau électrique. La modélisation des composants du réseau de distribution ainsi que le raccordement des systèmes PV au réseau.

Chapitre (I)

Notions Générales et Système Photovoltaïque

I.1: Introduction :

Face au contexte environnemental, économique et politique actuel, l'intégration des énergies renouvelables dans la part de la production d'énergie devient primordiale. De part ces nombreux atouts, l'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement de GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux borne du GPV.

Cette première partie résume les concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Puis la modélisation des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi principe de fonctionnement. Enfin les caractéristiques d'un module photovoltaïque.

I.2. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire est émise par le soleil sous forme de rayonnement électromagnétique, dont la quantité perçue est de l'ordre de 1000 w/m^2 par une belle journée ensoleillée [3]. Classiquement, on distingue deux méthodes pour pouvoir convertir l'énergie solaire en électricité :

- Système de conversion thermique, ou la chaleur est récupérée directement par grandes panneaux dans lesquels circule l'eau.
- Système direct, fondés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation incidente et les électrons du matériau, l'effet photovoltaïque.

L'énergie solaire reçue en un point sur la terre dépond :

- De l'irradiance solaire perçue en ce point qui dépond du rayonnement du soleil.30% du rayonnement direct du soleil est réfléchi vers l'espace par l'atmosphère terrestre, et seulement 70% traversent l'atmosphère, et atteignent la terre.
- De la nébulosité, nuages, brouillard, neige, et donc du temps météorologique.
- De la latitude, de la saison et de l'heur (jour et nuit) [4].

I.2.1. Historique :

L'émergence des technologies énergétiques fut précipitée par la crainte de l'épuisement des sources d'énergie existantes et le besoin d'accroitre les rendements énergétiques. La technologie solaire, dont la chronologie suivante retrace l'histoire, fit son apparition en 1839 lors de la découverte de l'effet photovoltaïque :

1839 : Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1876 : Adams et Day observent l'effet photovoltaïque de sélénium.

1900 : Planck postule la nature quantique de la lumière.

1930 : Wilson propose la théorie quantique des solides.

1940 : Mott et Schottky élaborent la théorie de redresseur à semi-conducteur (diode).

1949 : Bardeen, Brattain et Schottky inventent le transistor.

1954 : Chapin, Fuller et Pearson annoncent la création d'une photopile au silicium dont le rendement atteint 6%.

1954 : Reynolds et ses collaborateurs rapportent la mise au point d'une pile solaire au sulfure de cadmium. [5]

1958 : première utilisation des photopiles dans le satellite orbital Vanguard-1.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [6].

I.2.2. Rayonnement 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 (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. En effet, trois types de rayonnement global ont été répertoriés dans la littérature : [7]

- ✓ **Le rayonnement diffus :** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.
- ✓ **Le rayonnement direct :** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- ✓ **Le rayonnement solaire réfléchi:** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

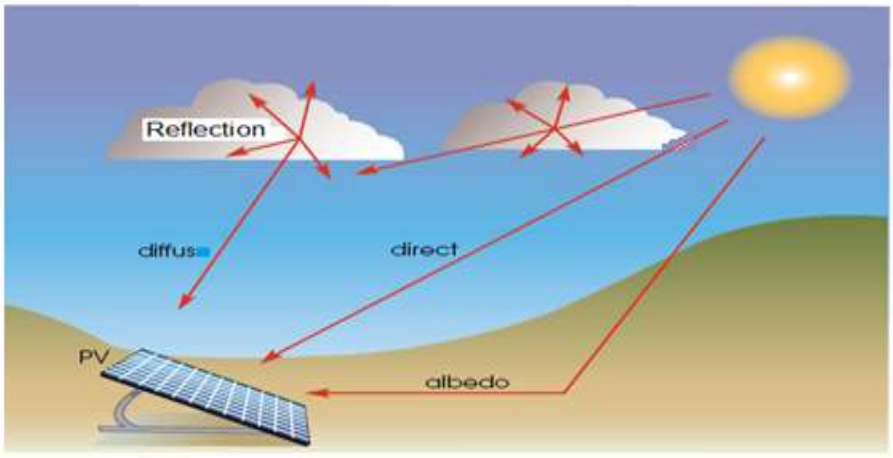


Figure I.1: Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

I.3. Electricité photovoltaïque :

I.3.1. Effet photovoltaïque :

Le terme « Photovoltaïque » se compose du mot grec désignant la lumière « photo » et du nom de famille de physicien Alessandro Volta, auquel la « tension » électrique lui doit aussi son unité « «Volt ». Il signifie la conversion directe d'énergie lumineuse en énergie électrique au moyen de cellules photovoltaïques.

Le processus de conversion repose sur l'effet photovoltaïque due le physicien français Alexandre Edmond Becquerel avait déjà découvert en 1839.l'effet photovoltaïque est la libération, par la radiation incidente de la lumière, de porteurs de charge d'un corps solide. [8]

La quantité de l'énergie transportée par les photons des rayonnements solaire d'après la théorie du " corps noirs" élaborée par Planck et selon l'étude de l'effet photoélectrique faite par Einstein est : [9]

$$E_{ph} = h.c/\lambda \qquad \text{(I.1)}$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, *h* la constante de Planck et *c* la vitesse de la lumière.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule [10].

Sous l'action de la lumière (photons) et de la différence de potentiel existant entre les deux zones, des électrons sont extraits de la zone N et collectés par une électrode métallique reliée au circuit extérieur .ce dernier leur permet de revenir à la zone P, dans les sens inverse du sens conventionnel du courant [11] .

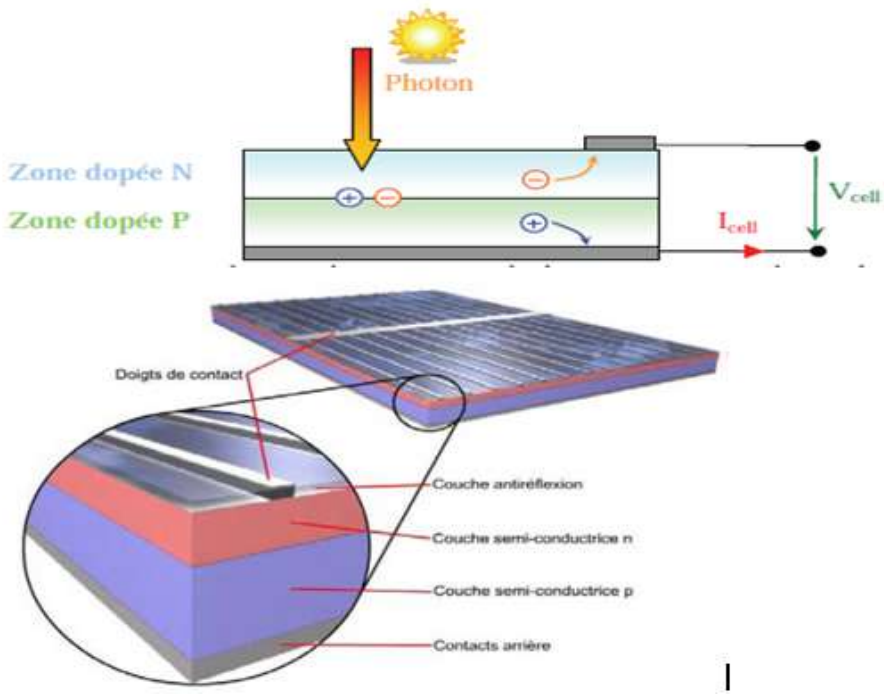


Figure I.2: Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.

I.3.2.les types de systèmes photovoltaïques :

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes**, les systèmes **hybrides** et les systèmes **connectés à un réseau .**Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.3.2.1. Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

I.3.2.2. Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

I.3.2.3. Les systèmes connectés au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau représentent la quasi-totalité des systèmes PV installés.

Les panneaux photovoltaïques débitent sur un bus de tension continue à travers un convertisseur dont le rôle est d'effectuer la conversion DC-AC et de faire en sorte que le générateur PV fonctionne toujours à son point de fonctionnement optimal (MPPT : Maximum Power Point Tracking). Les caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques étant liées aux conditions météorologiques,

Ce convertisseur améliore la rentabilité du système global. Actuellement, non seulement les tarifs de rachat de l'électricité sont incitatifs mais en plus, sauf coupure exceptionnelle et dans la mesure d'un taux de pénétration relativement faible, le réseau de distribution peut accepter en permanence l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques permettant un retour sur investissement relativement rapide. Il n'y a donc pas de délestage de production dans ce type de système. [12]

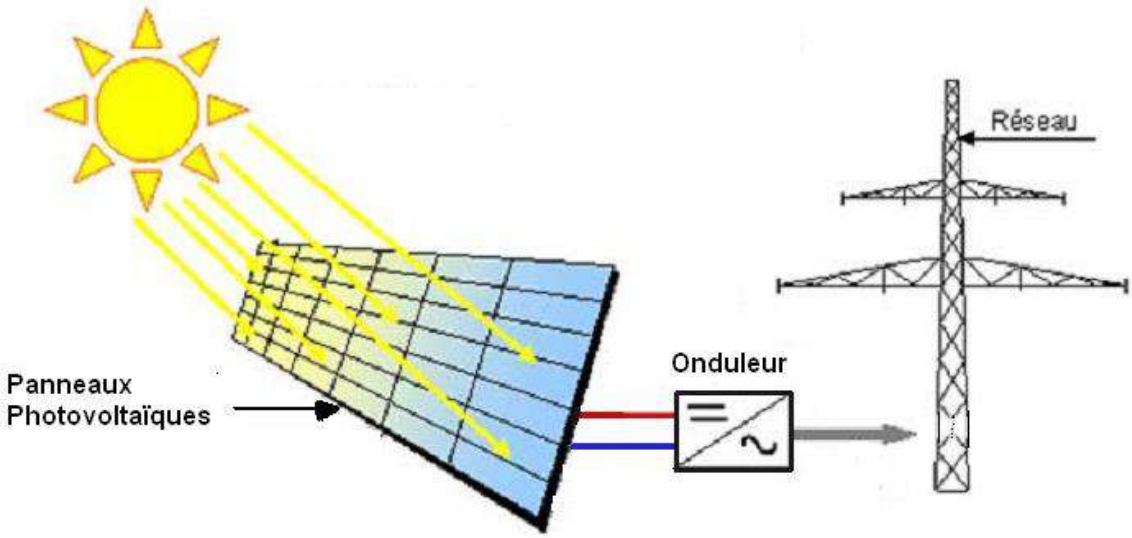


Figure I.3 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

I. 3 .3. La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque, unité de base des panneaux solaire, est constituée de l'assemblage de deux semi-conducteurs faiblement enrichis d'atomes de nature différente : les un donnant des électrons (zone N), les autres créant un déficit d'électrons que l'on nomme des trous (zone p).cet assemblage crée une différence de potentiel entre la zone Net P. C'est l'analogue d'une diode. [13]

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm^2 ou plus, sa forme et circulaire, carrée ou dérivée des deux géométrique.

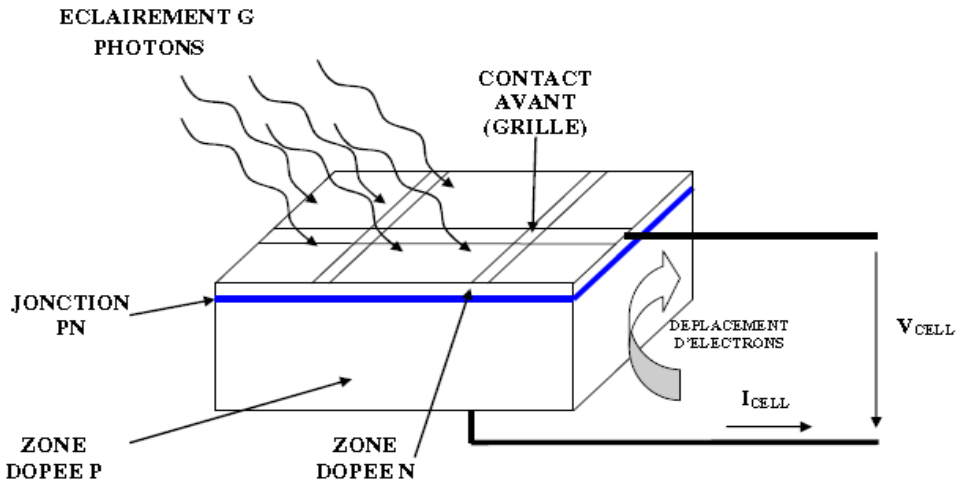


Figure I.4: coupe transversale d'une cellule photovoltaïque.

I.4. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

I.4.1. Cas d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.5), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale. [14]

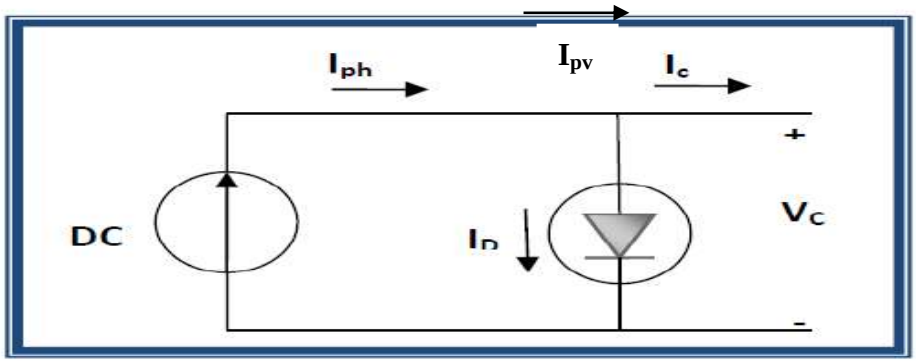


Figure I.5: Schéma électrique d'une cellule idéale.

Les équations régissant ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \qquad (I.2)$$

$$I_d = I_0 \left[exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \qquad (I.3)$$

I_0: Courant de saturation inverse de la diode.

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : Constant de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}$J/K).

q : Charge de l'électron ($1{,}6.10^{-19}$ C).

T : la température de la jonction en K;

I_d : le courant circulant dans la diode;

I_{pv} : le courant de sortie.

V : la tension de sortie.

En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et V ≈ V_{oc}, qui est la tension en circuit ouvert :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] = 0 \qquad (I.4)$$

Qui donne

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} log\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \qquad (I.5)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{cc} avec V = 0, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

I.4.2. Cas d'une cellule réelle :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série et parallèle.

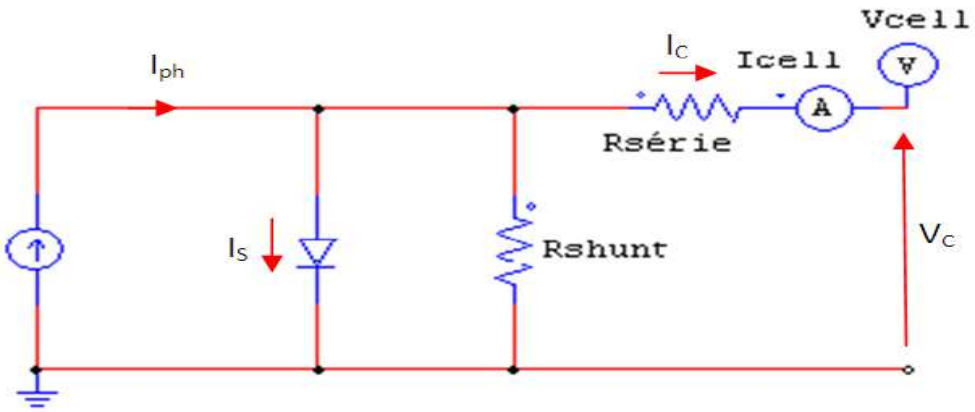


Figure I.6: Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque réelle.

La résistance série (Rs) est due à la résistivité de différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur).ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

La résistance shunt ou de court-circuit (Rsh) traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à traverse l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion de contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court- circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible. [15] La modélisation de la cellule PV à partir du schéma électrique équivalent définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique.

L'équation suivante d'écrit le comportement d'une cellule PV.

$$I_{ph} = I_d + I_r + I \qquad (I.6)$$

Avec :

$\mathbf{I_{ph}}$: Photo-courant (A).

$\mathbf{I_{sc}} = \mathbf{Iscr}\left(\frac{\mathbf{G}}{\mathbf{1000}}\right)$: Le courant de court-circuit de référence.

$I_d = I_0[e^{\frac{V+I.R_S}{nV_T}} - 1]$ **:** Le courant traversant la diode.

$\mathbf{I_r} = \frac{\mathbf{V+I.R_s}}{\mathbf{R_{sh}}}$: Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I *:* Le courant fourni par la cellule.

$\mathbf{I_0}$: Le courant de saturation inverse d'une diode.

$\mathbf{V_T} = \frac{\mathbf{KT}}{\mathbf{q}}$: La tension thermique.

Telle que

q : charge d'électron (1.602 x 10^{-19} C).

K: constante de Boltzmann (1.381 x 10^{-23} J/K).

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T: La température effective de la cellule en kelvin.

D'après les équations ci-dessus, l'expression finale relie le courant délivré par la cellule photovoltaïque et la tension de sortie est:

$$I = I_{ph} - I_0[e^{(\frac{V+I.R_S}{nV_T})} - 1] - (\frac{V+I.R_S}{R_p}) \qquad (I.7)$$

I.4.2.1.Caractéristiques électrique d'une cellule réale:

La capacité d'une cellule à produire de l'énergie est mesurée grâce a sa caractéristique courant-tension, puissance-tension (Figures I.9, I.10).

- **Résultat de simulation**

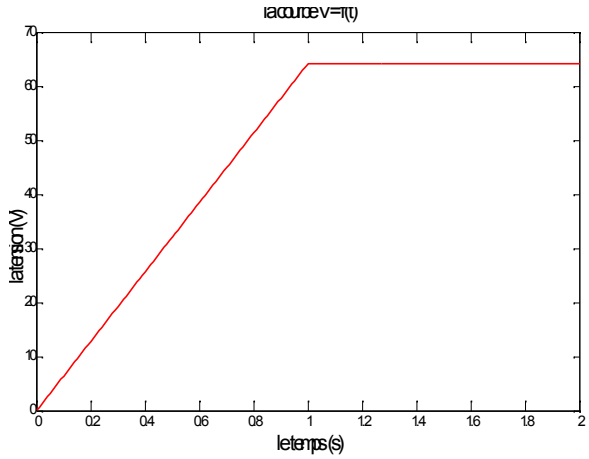


Figure I.7 : la tension d'une cellule PV en fonction du temps

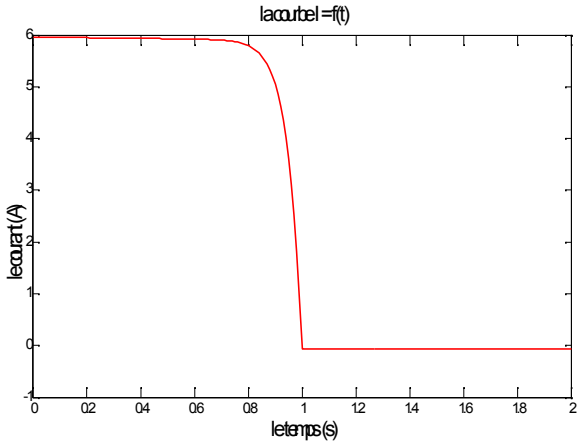


Figure I.8: le courant d'une cellule PV en fonction du temps

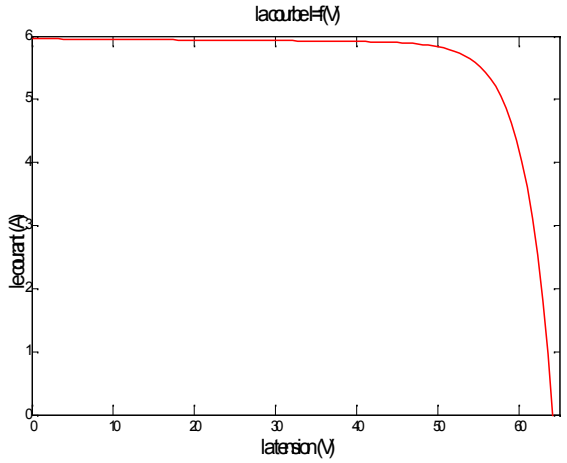


Figure I.9 : caractéristique I-V d'une cellule PV

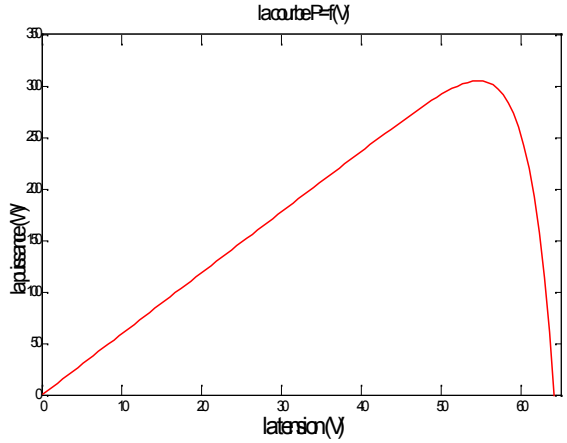


Figure I.10: caractéristique P-V d'une cellule PV

On peut facilement obtenir à partir de cette caractéristique certains paramètres qui vont nous renseigner sur les phénomènes physiques mis en jeu dans la cellule.

I.4.3. Les paramètres d'une cellule solaire :

I.4.3.1. le Courant de court-circuit (Isc) : $\mathbf{I_{cc} = I_{ph}}$ est proportionnel à l'éclairement et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit (V_s=0).

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{ph} infinie),donc l'équation (I.7) devient :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0[e^{(\frac{I.R_S}{nV_T})} - 1] - (\frac{I.R_S}{R_p}) \qquad (I.8)$$

Dans le cas général la résistance série des cellules donc on peut négliger le terme :

$$I_0[e^{(\frac{I.R_S}{nV_T})} - 1] \square 0 \qquad (I.9)$$

D'après l'équation **(I.9)** l'expression approchée du courant de court-circuit est:

$$I_{sc} = \frac{I_{ph}}{(1+\frac{R_S}{R_p})} \qquad (I.10)$$

On a dit précédemment que la résistance série est très faible devant la résistance shunt alors la plus grande valeur du courant généré par la cellule, pratiquement :

$$I_{sc} \square I_{Ph} \qquad (I.11)$$

I.4.3.2. La tension de circuit-ouvert (Vco) :

Correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le courant I_{ph} [13] ($I_d=I_{ph}$), I=0. Cette tension est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. (C'est la tension d'un générateur photovoltaïque).

La tension peut être exprimé mathématiquement par :

$$0 = I_{ph} - I_0[e^{(\frac{V}{nV_T})} - 1] - (\frac{V}{R_p}) \qquad (I.12)$$

D'ou

$$V_{co} = V_T ln\left[\frac{I_{Ph}}{I_0} + 1\right] \qquad (I.13)$$

I.4.3.3. La Puissance maximale P_{max}:

La puissance crête est la puissance maximale produite par les cellules photovoltaïques sous un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 à une température de 25 °C. [16]

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale **P_{max},** correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{max} multipliée par le courant de court-circuit **I_{max}.**

$$P_{max}=V_{max} * I_{max} \qquad (I.14)$$

Le produit (V_{max} * I_{max}) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit (V_{co}*I_{sc}).

I.4.3.4 Le facteur de qualité :

A est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace (compris entre 1 et 2).

I.4.3.5. Le facteur de forme ff:

Il s'agit d'un rapport qui rend compte de la qualité de la forme de la caractéristique courant-tension. Il est défini par la relation suivante : $ff = \frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{co}} = \frac{I_{max}.V_{max}}{I_{cc}.V_{co}}$

I.4.3.6.Rendement énergétique maximum η:

L'efficacité de conversion photovoltaïque est le rapport de la puissance maximale de sortie P_{max} divisée par la puissance radiative incidente P_{in} : **η=** P_m / P_{in}. [17]

I.5. Modèle du module photovoltaïque :

Les cellules génèrent une tension qui va de 0.5 à 1.5 V et une densité de courant de 10 à 50 mA cm^{-2} suivant la technologie utilisée. Elles délivrent donc une puissance très faible. Pour délivrer une puissance exploitable et une tension compatible avec la charge d'une batterie, par exemple, il faut les associer en série et/ou en parallèle. De plus, cet assemblage de cellules doit être protégé des intempéries extérieures (humidité, variations de température...). C'est pour palier à ces problèmes que l'on fabrique des modules PV composés de plusieurs cellules interconnectées en série, ou en parallèle ou bien les deux et encapsulées.

Le module PV est donc composé de plusieurs cellules associées en série et/ou parallèle, disposées en rangées. [18]

Le modèle suivant utilise une méthode différente pour calculer la de la résistance série et de la résistance parallèle. Par exemple, le module SPR-305-WHT est fait de cellules solaires (96 nitrure de silicium multi-cristallines) en série et fournit 305 W de puissance maximale nominale. La tension de point de puissance maximale est de 54.7V et courant délivré au point de puissance maximale est de 5.58 A. Les paramètres de la SPR-305-WHT sont donnés dans le tableau II.1, ce qui est essentiel pour modéliser le photovoltaïque.

Caractéristiques	Paramètres	valeurs
Electriques des modules PV	Puissance max	305W
	Tension à puissance max(Vpp)	54.7 V
	Courant à puissance max (Ipp)	5.58A
	Courant de court-circuit (Isc)	5.96A
	Tension à circuit ouvert (Voc)	64.2V
	Température de cellule (NOCT)	49°C
physiques	Nombre de cellules en série (Ns)	96
	Nombre de modules en parallèle (Np)	1
Autres	Constante de Bolzmann	$1.38e-^{23}$J/K
	Constante de Coulomb	$1.6e-^{19}$C

Tableau I.1 : les différentes caractéristiques du modèle SPR-305-WHT.

I.5.1. Les paramètres influents sur la caractéristique:

Quatre paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule solaire ou un générateur photovoltaïque :

- La résistance série R_s
- La résistance shunt R_{sh}.
- L'éclairement E.
- La température T.

I.5.1.1. L'influence de la résistance série R_s :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contactes ohmiques de la cellule. Les contactes semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [19]

Résultat de simulation

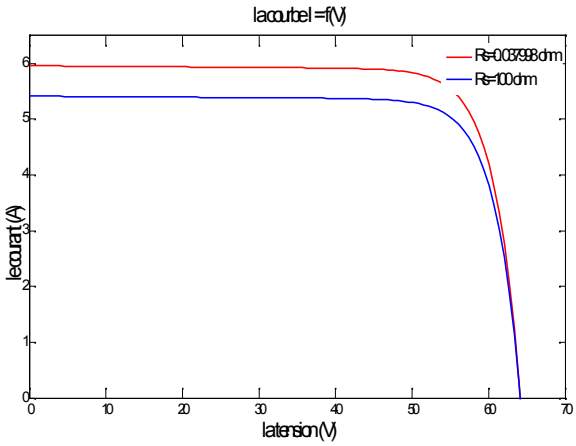


Figure I.11 : influence de la résistance série sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

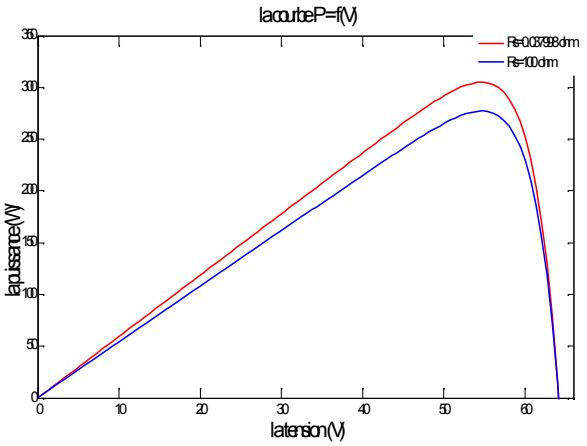


Figure I.12: influence de la résistance série sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

I.5.1.2.Influence de la résistance parallèle R_{sh} :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une parallèle R_{sh}. L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si : $Rsh = 10^2$ à10^4 Ω. R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. [20]

- **Résultat de simulation**

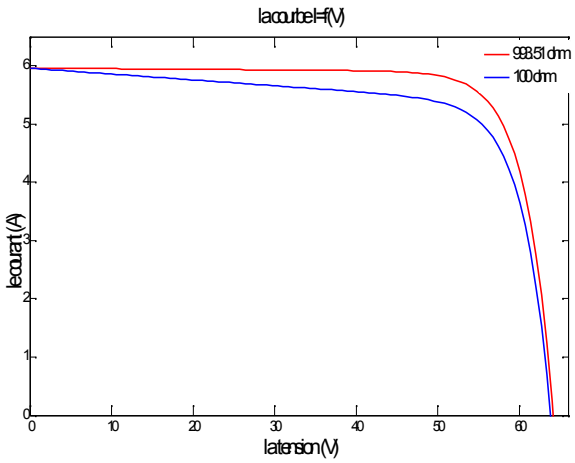


Figure I.13: influence de la résistance parallèle sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

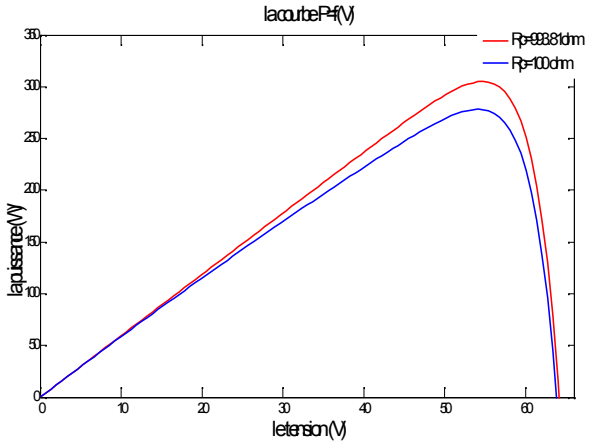


Figure I.14: influence de la résistance parallèle sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

I.5.1.3.Influence de l'éclairement : L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (I.15) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constant Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

- **Résultat de simulation**

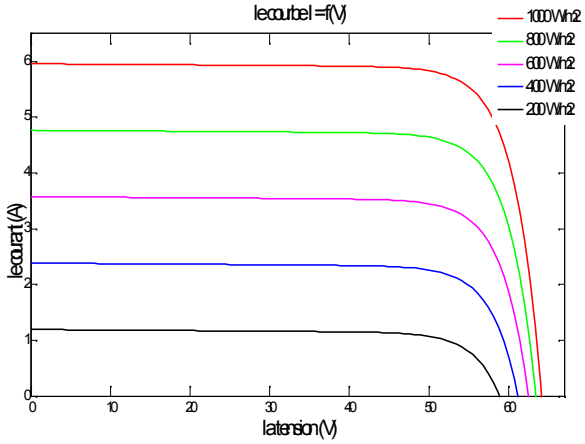


Figure I.15: influence de l'éclairement sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

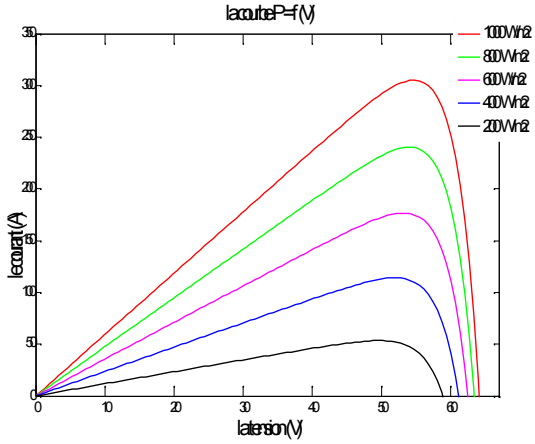


Figure I.16: influence de l'éclairement sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

I.5.1.4.Influence de la température :

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température, de la cellule (Tc) est toujours plus élevée que la température ambiante (Ta).

$$Tc=Ta+(NOCT-20/800)*G \qquad (I.15)$$

Avec

NOCT : température normale de fonctionnement de la cellule (Normal Operating Cell Temperature). Cette valeur est généralement donnée par le fabricant [°C]

G : ensoleillement reçu par la cellule PV [W/m²]

La figure (I.17), montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale.

- **Résultat de simulation**

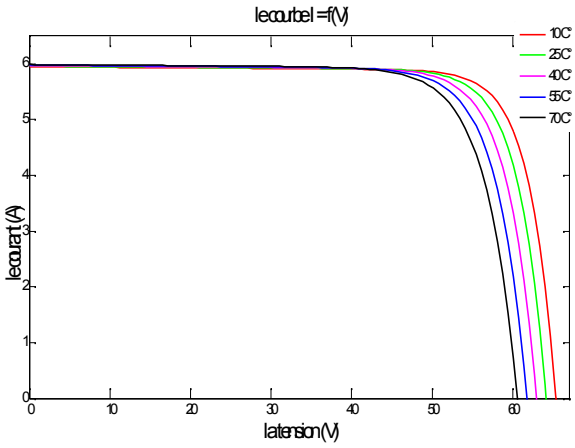


Figure I.17: influence de la température sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

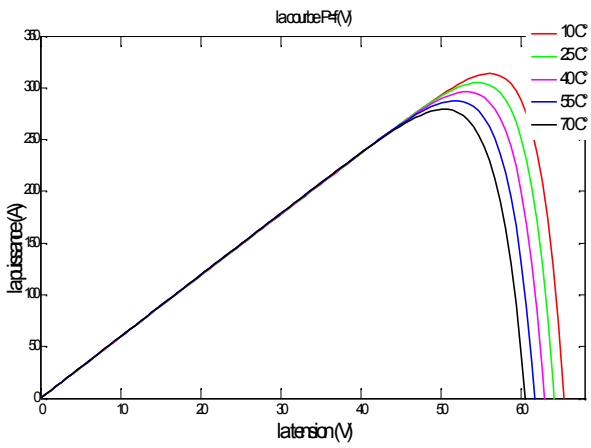


Figure I.18: influence de la température sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

a) L'association en série

Lorsque l'on associe Ns cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. La caractéristique I-V résultante de l'association de la Figure I.19 est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension individuelle Vi par Ns. On note aussi que l'impédance optimale de l'association sera Ns fois plus grande que celle de la cellule de base.

Le courant généré par Ns cellules PV en série étant le même dans toute la branche et limité par le courant de la cellule la plus faible, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules ayant la même densité de courant. C'est pour cela qu'en production, toutes les cellules sont testées et triées en fonction de leur rendement.

Les résistances séries s'ajoutent. L'augmentation de la résistance série induit une perte de puissance, il faut donc faire attention à la résistance d'interconnexion des cellules, dans une association en série. Le facteur de forme d'un module ne peut en général pas être meilleur que celui de ses cellules constitutives. Comme pour le courant, il se rapproche de celui de la plus mauvaise cellule. Les résistances parallèles s'ajoutent également.

$$V_{sco} = N_s * V_{co} \quad (I.16)$$

$$I_{scs} = I_{sc} \quad (I.17)$$

Où

I_{ssc} : le courant de court-circuit du groupement série.

I_{sc} : le courant de court-circuit.

V_{sco} : la tension de circuit ouvert du groupement série.

N_s : le nombre de cellules en série.

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

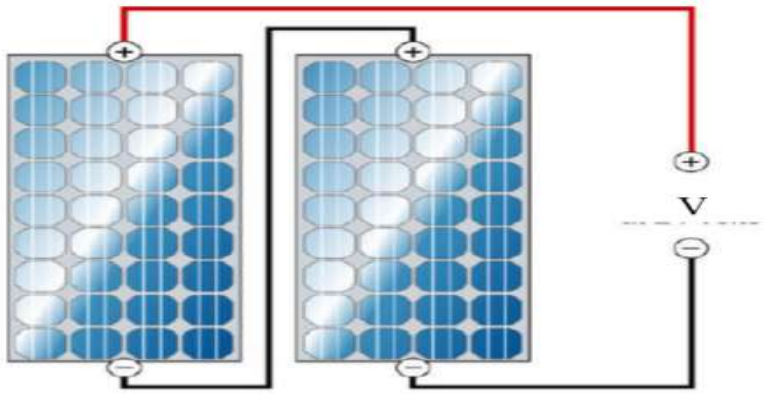


Figure I.19 : Schéma des cellules photovoltaïques associées en série.

Résultat de simulation

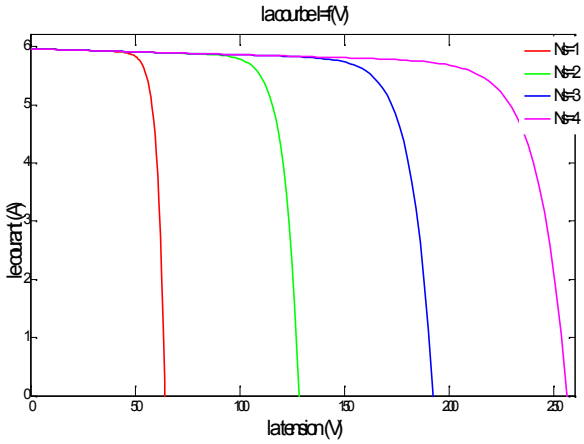


Figure I.20: influence de nombre de cellule en série sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

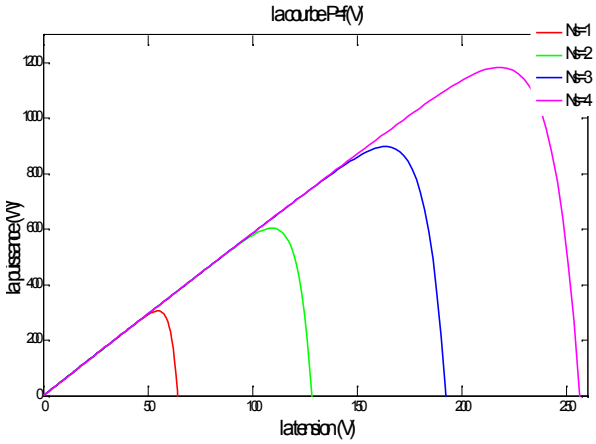


Figure I.21: influence de nombre de cellule en série sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

b) L'association en parallèle

Cette fois-ci, c'est la tension de chaque cellule qui doit être identique, les courants s'ajoutant. La nouvelle courbe de la Figure.I.22 est obtenue en additionnant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule de base par Np.

$$I_{psc}=N_p*I_{sc} \qquad (I.18)$$

$$V_{pco}=V_{co} \qquad (I.19)$$

Où

I_{psc} : le courant de court-circuit du groupement parallèle.

V_{pco} : la tension de circuit ouvert du groupement parallèle.

N_p : le nombre de cellules en parallèle.

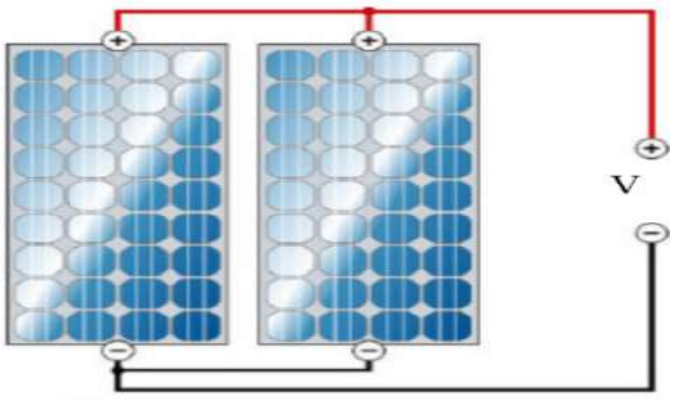


Figure I.22 : Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèle.

- **Résultat de simulation**

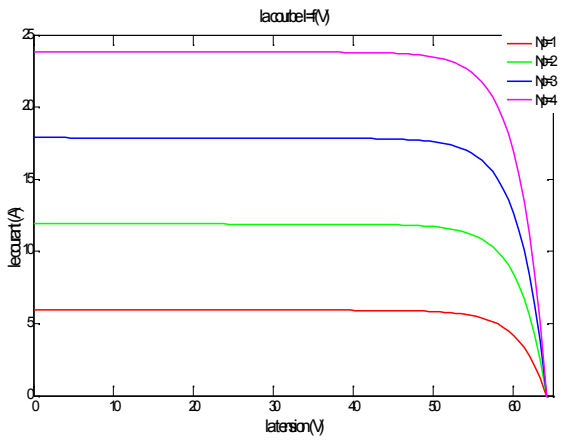


Figure I.23: influence de nombre de cellule en parallèle sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

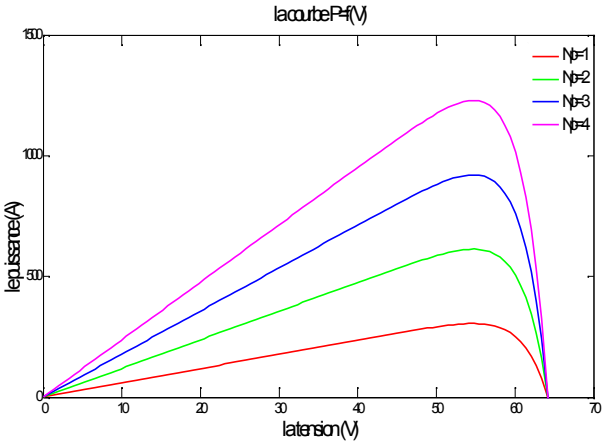


Figure I.24: influence de nombre de cellule en parallèle sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

c)Association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (I.25). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport *ns* parallèlement à l'axe des tensions et de rapport *Np* parallèlement à l'axe des courants.

$$I_{gsc} = N_p.I_{cc} \qquad (I.20)$$

$$V_{gco} = N_s.V_{co} \qquad (I.21)$$

Où

I_{gsc} : le courant de court-circuit du groupement mixte.

V_{gco} : la tension de circuit ouvert du groupement mixte.

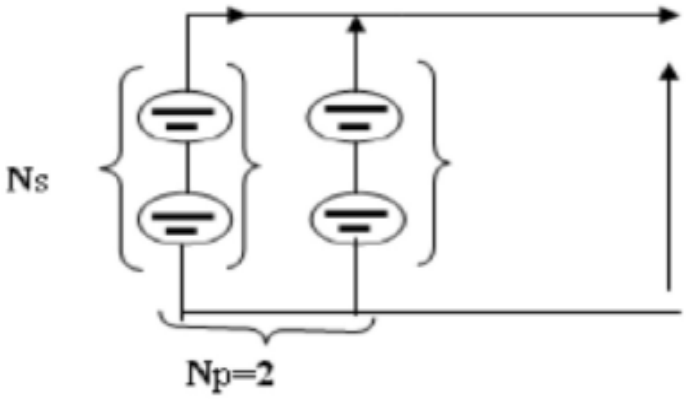


Figure I. 25: Association mixte Ns x Np modules solaires.

Résultat de simulation

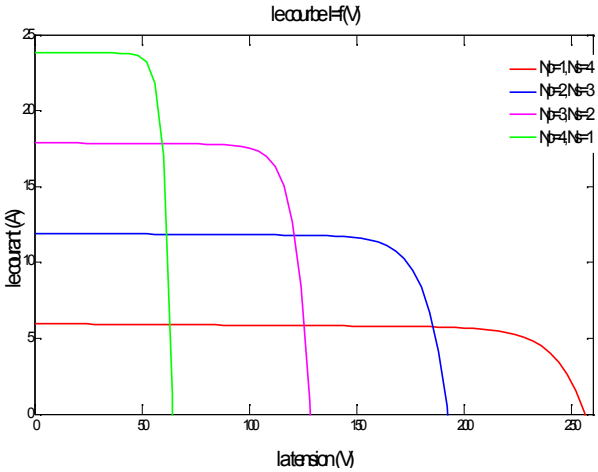


Figure I.26: influence de nombre de cellule série/ parallèle sur les Caractéristiques I-V d'une cellule PV

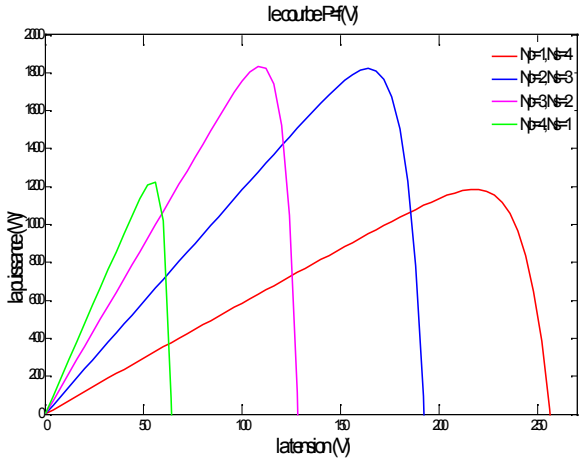


Figure I.27: influence de nombre de cellule série/ parallèle sur les Caractéristiques P-V d'une cellule PV

I.6. Le générateur photovoltaïque :

La puissance délivrée par une cellule ne suffit par pour alimenter une charge DC de la taille d'une station relais de télécommunications (BTS). Il va falloir interconnecter plusieurs cellules en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque et atteindre la puissance désirée.

A leur tour, l'interconnexion de modules entre eux en série et en parallèle, pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque (GPV).

Pour chaque module, le constructeur donne le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension de circuit couvert (V_{co}) aux conditions standards (T=25°C et Es=1000W/m^2). Si on pose Ns, le nombre de modules connectés en série dans une branche et N_p, le nombre de branches connectées en parallèle. [21]

Le schéma équivalent du générateur photovoltaïque devient :

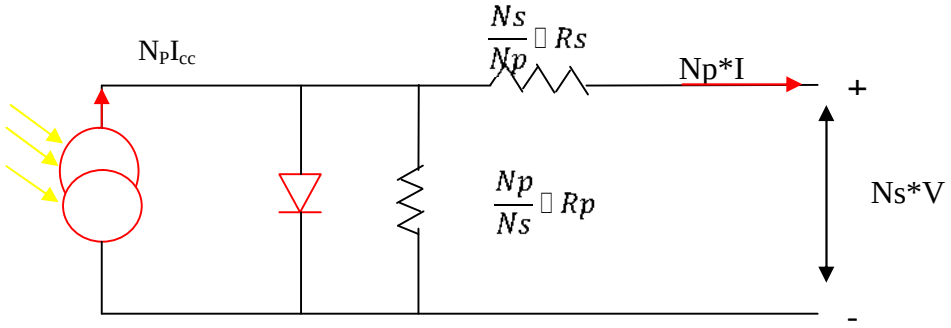


Figure I.28 : Modèle du générateur photovoltaïque.

L'équation régissant ce modèle de générateur photovoltaïque est obtenue à partir de l'équation (I.7) :

$$I = I_{ph} - I_0[e^{(\frac{V+I.R_S}{nV_T})} - 1] - (\frac{V+I.R_S}{R_p}) \quad (I.23)$$

$$I_{PV} = N_P I_{ph} - N_P I_S \left| exp\left(\frac{q\left(\left(\frac{v_{pv}}{N_S} + \frac{R_S . I_{PV}}{N_p}\right)\right)}{N_S nKT} \right] - 1 \right| - \left(\frac{NpVpv + NsRsIpv}{NsRsh}\right) \quad (I.24)$$

Pour notre cas en utilise un générateur utilisé de 05 panneaux en série et 66 en parallèle de type SPR-305-WHT.

.

$$p_{pv} = N_S \,.\, N_P \,.V_{PV} \,.I_{PV} \quad (I.25)$$

- **Résultat de simulation**

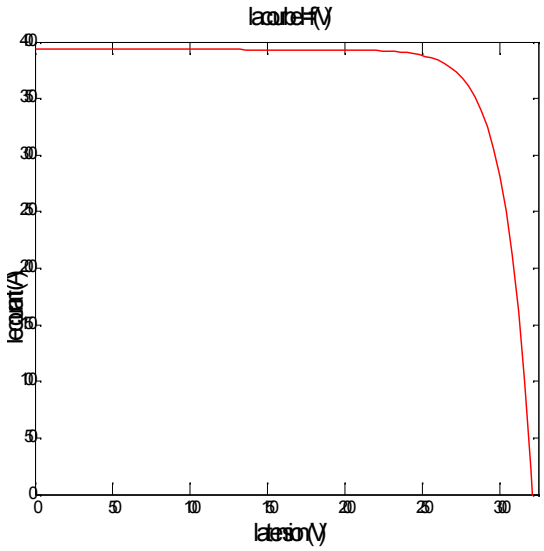


Figure I.29: les Caractéristiques I-V d'un générateur PV

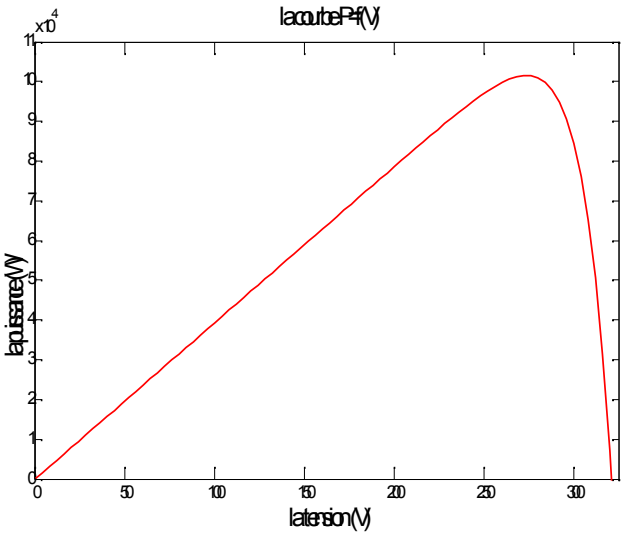


Figure I.30 Caractéristiques d'un générateur PV

I.6.1. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, la courbe **I=f(V)** représente trois zones essentielles :

a) La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) La zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) La zone (3): qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

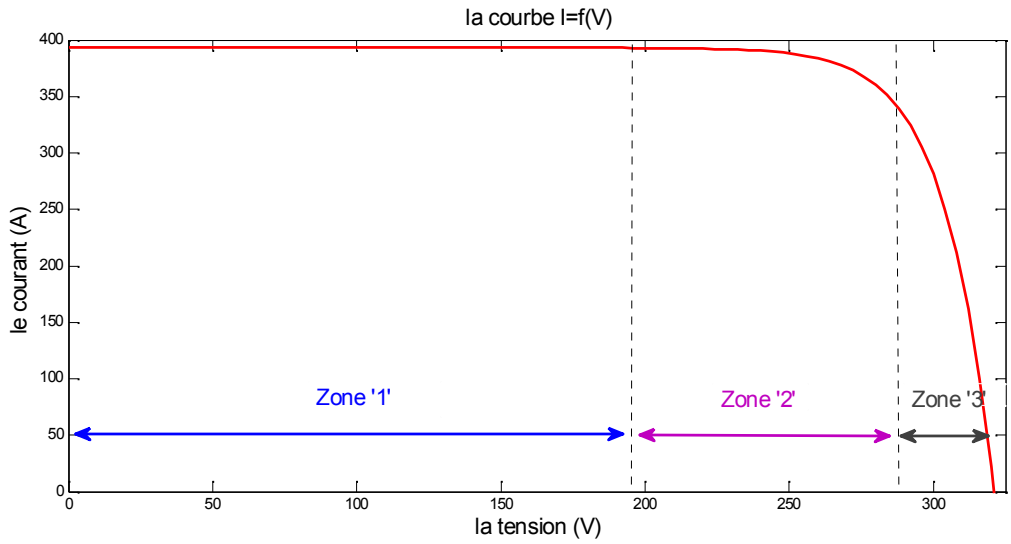


Figure I .31: Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

I.6.2.Fonctionnement d'u générateur PV à sa puissance Maximale :

De point de vue source d'énergie, pour un générateur PV, la protection de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température et de la nature de la charge connectée. Chaque charge à son comportement, en outre, souvent, la variation du comportement de la charge varie brutalement en fonction de la consommation des utilisateurs. En conséquence, les performances des générateurs PVs se dégradent .dans ces conditions, pour que le générateur PV fournisse sa puissance maximale et fonctionne à un rendement élevé, une adaptation du générateur à la charge est nécessaire. [22]

I.6.3. Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge :

Un générateur présente des caractéristique I(V) non linéaire avec des PPM.ces caractéristique dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de température de la cellule .de plis, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le 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 direct. [23]

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux borne du GPV et de la transférée à l charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (I.32).cet étage joue un rôle de l'interface entre les deux éléments en assurant à traverses un e action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par qu'elle soit la plus proche possible de P_{max} disponible .[24]

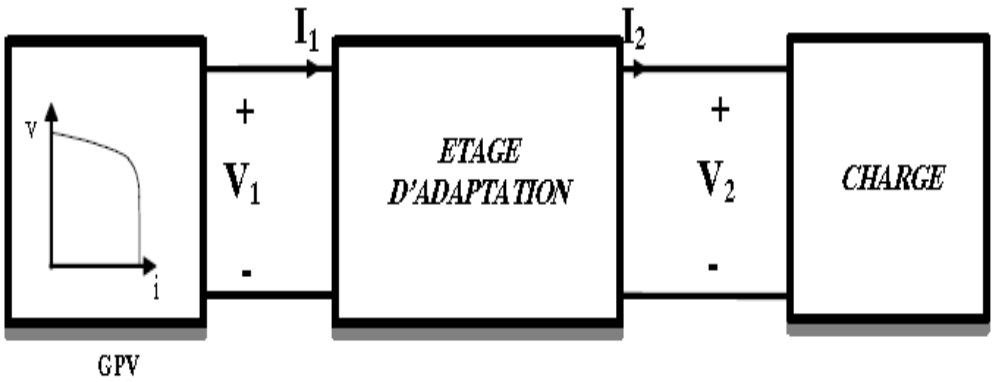


Figure I.32 : étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

I.7.Conclusion

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement.

Pour que le module fourni sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC et DC-AC contrôlé par des mécanismes capables de garder le fonctionnement du module à sa puissance maximale.

Chapitre II

Modélisation et simulation d'un Chain de conversion Photovoltaïque

II.1. Introduction :

Le raccordement d'un générateur PV à une charge quelconque nécessite l'adaptation de ce générateur pour qu'il fonctionne, à une température et un éclairement donnés, à sa puissance maximale.

Généralement l'étage d'adaptation, comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques, permet de transformer les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à la charge. Cet étage peut être commandé par une ou plusieurs lois de commande afin de maximiser la puissance produite par le générateur.

Un convertisseur DC/DC connecté entre les générateurs photovoltaïques et ce bus permet de remplir cette fonction en ajustant en permanence la tension aux bornes des panneaux photovoltaïques. La méthode la plus simple consiste à modifier en continu la tension imposée au générateur PV, de mesurer la puissance fournie et d'ainsi, toujours tenter de s'approcher le plus possible de la puissance maximale.

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.

Certain dispositif utilise l'énergie alternative qui impose une nécessité de raccorder le générateur photovoltaïque par une autre chaine d'adaptation de type DC-AC. Le but de cette dernière est d'assurer à la fin un signal alternatif demandé par la charge.

Le chapitre contient une représentation des convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrive la commande MPPT des convertisseurs DC-DC et la commande MLI des convertisseurs DC-AC.

II.2.Optimisation du rendement énergétique du système PV :

Il existe un seul point sur la caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque pour lequel la puissance maximale est produite. Quand un panneau est connecte directement sur une charge (couplage direct), en général le point de fonctionnement n'est pas le point de puissance maximale (MPP maximum power point).

La puissance délivrée par les panneaux PV dépend de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes ainsi, dans un système à couplage direct, le système PV doit être surdimensionné pour assurer la puissance demandée par la charge.

Pour optimiser le rendement énergétique du système PV, une solution est l'utilisation d'un MPPT (Maximum Power Point Tracker). Qui permet de suivre le point de puissance maximale en contrôlant la tension ou le courant PV indépendamment de la charge. [25]

Le bloc d'adaptation du panneau PV avec la stratégie de commande est illustré dans la figure II-1. Dans notre projet Le convertisseur CC /CC est model du hacheur de type Boost.

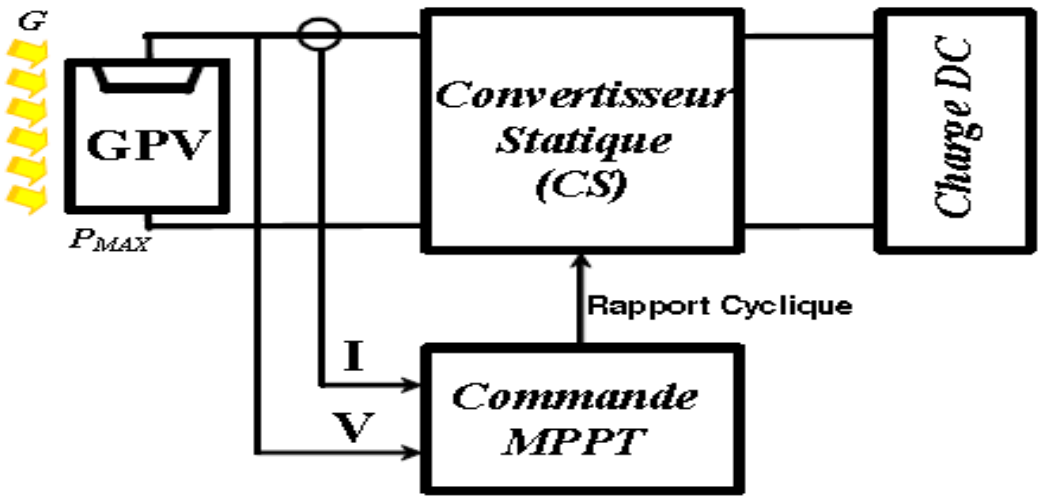


Figure II.1 : schéma du système de conversion PV.

II.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le P_{MAX} disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être

plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS (I_{PV} et V_{PV}).

La variation de V_{PV} avec une dérivée temporelle constante est effectuée à travers le même type de variations introduites sur le rapport cyclique du CS.

Les variations introduites sur le rapport cyclique du CS modifient la tension d'entrée du CS mais aussi le point de fonctionnement du GPV, comme indiqué dans la figure II.2. Dans cette figure, les points de fonctionnement P_1 et P_2 correspondent respectivement aux tensions d'entrée V_1 et V_2 et, de manière équivalente, aux rapports cycliques D_1 et D_2. Si nous supposons que le CS de la figure I.1 est une structure de type survolteur (boost), la tension d'entrée du CS peut s'exprimer : $V_{IN} = V_s (1-D)$. [26]

Avec

V_{IN} : la tension d'entrée du convertisseur statique.

V_s : la tension de sortie du convertisseur statique.

D : rapports cycliques du convertisseur statique.

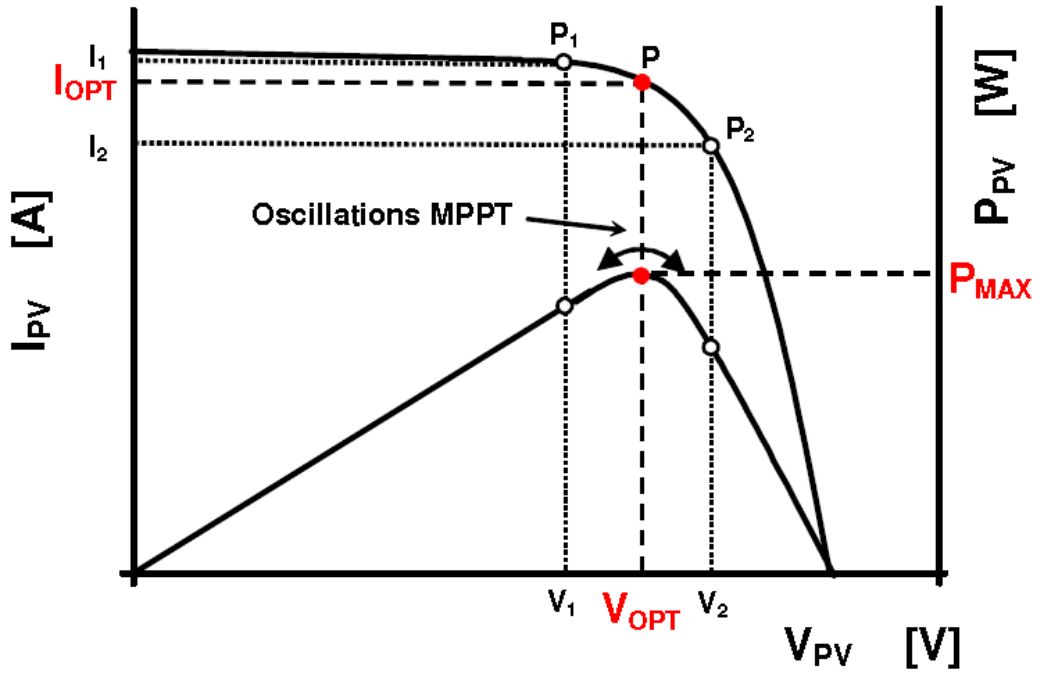


Figure II.2 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un GPV pour différents points de fonctionnement.

II.4.Les convertisseurs électroniques :

Les convertisseurs électroniques de puissance jouent, un rôle important dans la chaine protection-utilisation de l'énergie électrique, car ils sont utilisés pour mettre l'énergie électrique sous forme adaptée aux besoins de l'application.

En pratique, l'énergie électrique est disponible sous forme de sources de tension continue ou alternative.

Les convertisseurs électronique de puissance sont donc des diapositifs électroniques destinés à convertir un ou plusieurs paramètres de l'énergie électrique produite par un générateur selon les besoins du récepteur qu'il aliment. [27]

II.4.1. Les Hacheurs :

L'hacheur est un convertisseur statique DC/DC. Ile peut être « dévolteur », abaisseur de tension ou « survolteur ». Il permet d'obtenir une tension contenue réglable, en valeur moyenne, par celui de rapport cyclique, à partir d'une tension continue fixe. [28]

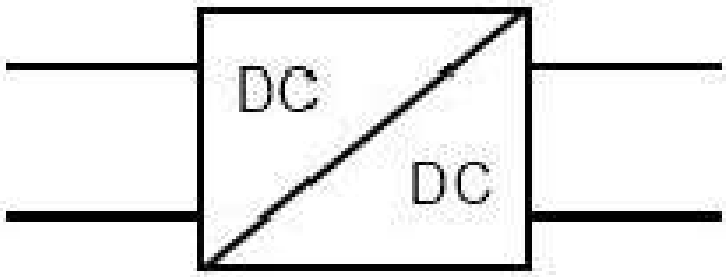


Figure II.3 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Dans la chaine de conversion le convertisseur DC/DC est situé entre le module photovoltaïque et la charge, il permet de faire l'adaptation entre ces deux éléments. Le hacheur oblige le GPV à fonctionner à puissance maximale quel que soit l'éclairement, et de le transférer à la charge pour un rapport cyclique bien défini. [29]

II.4.1.1. Hacheur Buck :

Le convertisseur Buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K figure (II.4) 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). [30]

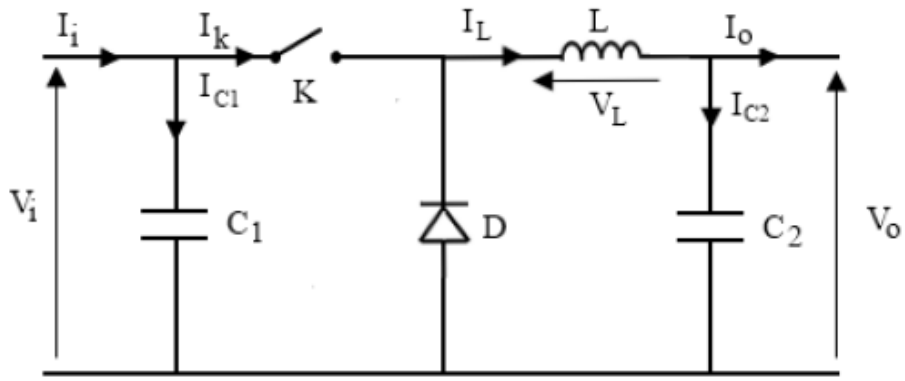


Figure II.4: Schéma électrique d'un hacheur Buck. [30]

a) Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur. Dans l'état passant, la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. 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 s'ouvre. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut, $V_L = -Vo$. Le courant traversant l'inductance décroît.

Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle:

$$V_0 = \alpha V_i \qquad \text{(II.1)}$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie *Vo* est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle parfois de dévolteur. [31]

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (figure .II.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (figure .II.6) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant (1-α) T_e.

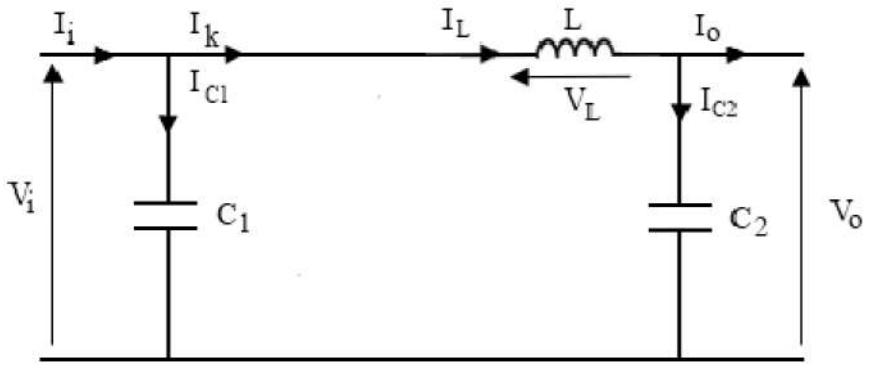


Figure II.5: Schéma électrique d'un hacheur buck fermé. [32]

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

$$I_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(II.2)}$$

$$I_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \textit{(II.3)}$$

$$V_L(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \textit{(II.4)}$$

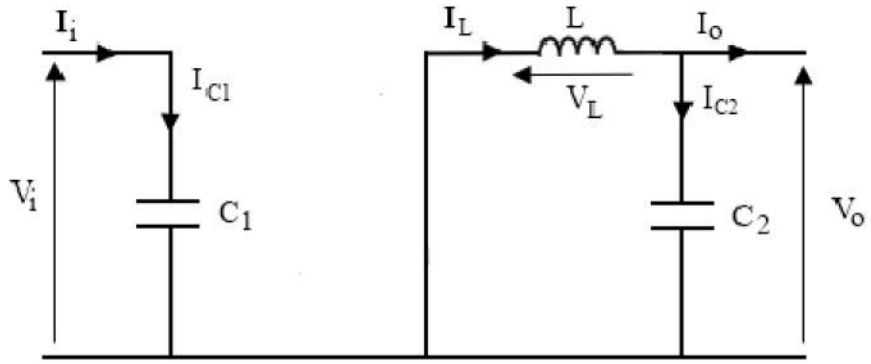


Figure II.6 *:* Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

Les équations suivantes sont déduites de la figure (II .6):

$$I_{C1}(t) = c_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i\ (t) \qquad (II.5)$$

$$I_{C2}(t) = c_2 \frac{dv0\ (t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \qquad (II.6)$$

$$V_L(t) = L \frac{dIL(t)}{dt} = -\ V_0\ (t) \qquad (II.7)$$

II.4.1.2 Hacheur Boost :

L'hacheur Boost nommé aussi survolteur ou « convertisseur parallèle ». On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par photovoltaïque utilisent souvent plusieurs cellules en série afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. Un convertisseur Boost permet d'augmenter la tension fournie par la cellule photovoltaïque et ainsi diminuer le nombre de cellule nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. [33]

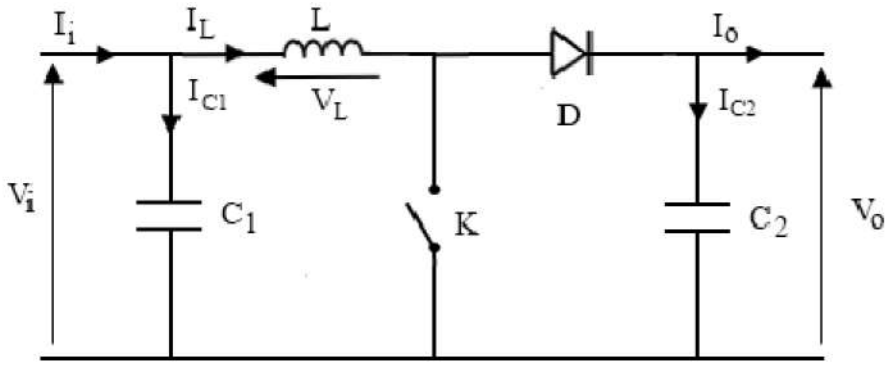


Figure .II.7: Schéma électrique d'un hacheur boost. [34]

Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur (Boost) est divisé en deux phases :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur 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 la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque le l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.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. Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant IL traversant l'inductance ne s'annule jamais.

La tension et le courant de la charge du convertisseur survolteur en conduction continue sont donnés par les équations suivantes :

$$V_0\,(\alpha\text{-}1) = V_i \qquad \text{(II.8)}$$

$$I_0\,(\alpha\text{-}1) = I_i \qquad \textit{(II.9)}$$

Avec **α :** est le rapport cyclique. [35]

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (figure .II.8), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre [0, αTe] [36].

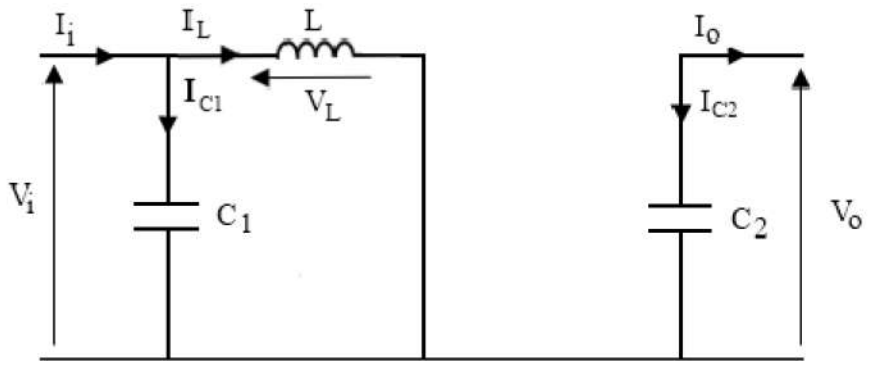


Figure .II. 8. Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = c_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(II.10)}$$

$$I_{c2}(t) = c_2 \frac{dv0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad \text{(II.11)}$$

$$I_l(t) = L \frac{dIL(t)}{dt} = V_i(t) \quad \text{(II.12)}$$

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

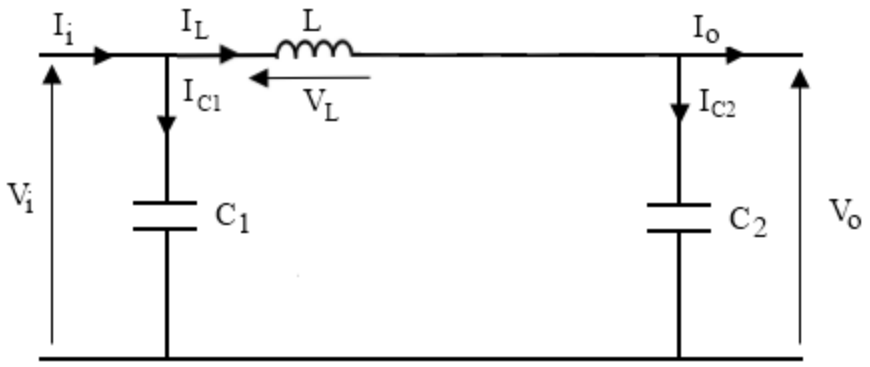


Figure .II. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = I_{c1} \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \textit{(II.13)}$$

$$I_{C2}(t) = I_{c2} \frac{dv0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \textit{(II.14)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dIL}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \textit{(II.15)}$$

II.4.1.3. Hacheur Buck-Boost :

Dernier convertisseur de la famille des convertisseurs DC/DC, le convertisseur buck-boost est également appelé abaisseur-élévateur par son aptitude à fournir une tension plus faible ou plus élevé que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique. [37]

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension

(condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [38].

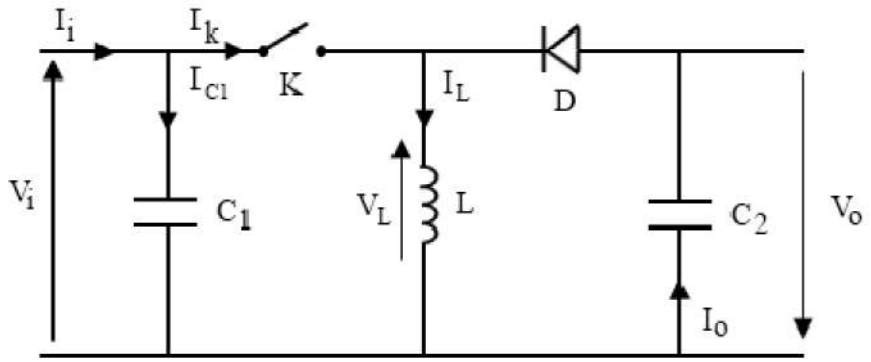


Figure .II. 10: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.

a) Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté sur (figure II.10). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_i . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension est égale V_i à $-V_0$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que [39] : $V_i .\alpha.T=V_0 (1-\alpha)T$

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

b) Modèle mathématique équivalent :

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure (figure II.11)

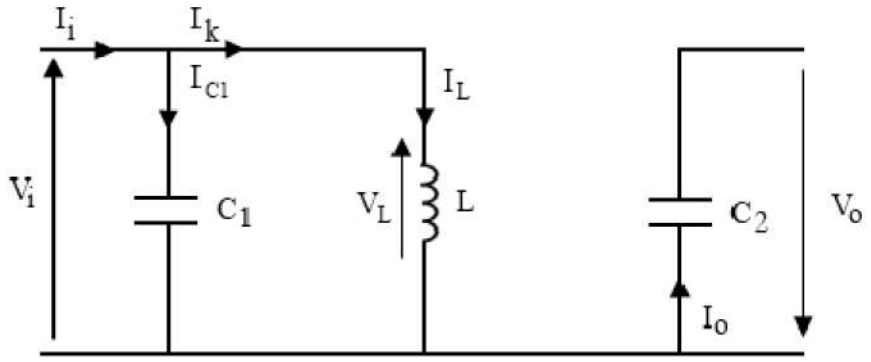


Figure .II. 11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \qquad (II.16)$$

$$I_{C2}(t) = c_2 \frac{dv0(t)}{dt} = -I_0(t) \qquad (II.17)$$

$$V_L(t) = L \frac{dIL(t)}{dt} = V_i(t) \qquad (II.18)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparait à la figure (figure .II.12)

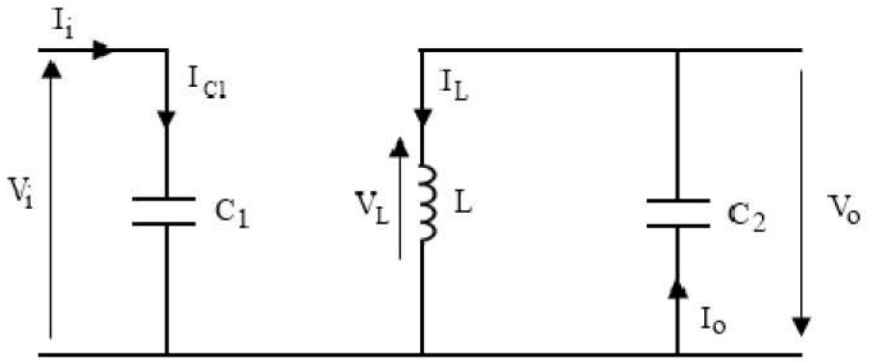


Figure .II. 12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) \qquad (II.19)$$

$$I_{C2}(t) = c_2 \frac{dvi(t)}{dt} = I_0(t) - I_L(t) \qquad (II.20)$$

$$V_L(t) = L \frac{dIL(t)}{dt} = V_0(t) \qquad (II.21)$$

II.5. Commande MPPT :

L'amélioration du rendement du système PV nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV. Cela est possible si le point de fonctionnement est bien choisi en adaptant l'impédance de la charge à la source de tension. Le convertisseur DC/DC jouera le rôle d'un adaptateur d'impédance assurant ainsi le fonctionnement au point optimal qui permet de produire la puissance maximale du générateur PV.

La maximisation de puissance de la source PV, revient à chercher ce point de fonctionnement optimal. Cette opération est dite MPPT ou « Maximum Power point Tracking».

II.5.1.Différents types de commande MPPT :

Dans le fonctionnement des GPV, pour un meilleur rendement, la technique de la poursuite de la puissance maximale qui consiste à transférer de manière optimale toute la puissance électrique convertible de cette source pour alimenter la charge. Elle est indispensable dans toutes applications utilisant un générateur photovoltaïque dès lors que le critère du « retour sur investissement » est directement lié à la production d'énergie. C'est le cas pour une production injectée dans un réseau.

Plusieurs familles de commandes sont proposées dans la littérature. Parmi Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Incrément de conductance (IncConductance) et Perturb&Observ (P&O). [40]

II.6.1.1. Premières commandes MPPT :

En Janvier 1968, A.F. Boehringer a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque Iph et de la tension V_{ph}, la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant ti et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant ti-1. Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique.

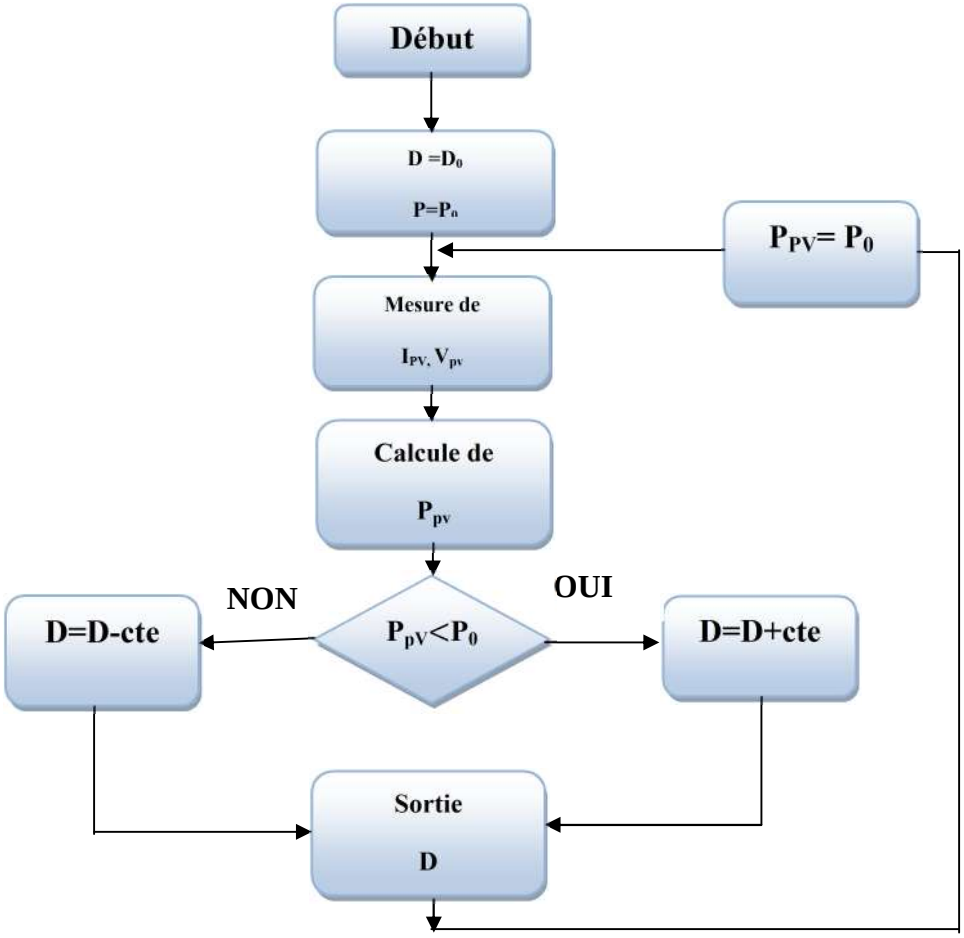


Figure. II.13.principe de la première commande MPPT numérique.

Ce principe de commande est toujours valable, il est appliqué maintenant sur des algorithmes numériques plus performants, avec un temps de réaction et une précision de la recherche du PPM améliorés. [41]

II.6.1.2. Méthode de perturbation et observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) consiste à perturber l'un des paramètres d'entrées du convertisseur statique (généralement la tension Vpv) puis d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du système, Elle permet d'extraire la puissance maximale même si l'éclairement et la température varient.

Le principe de cette méthode est qu'à partir d'un rapport cyclique initialement petit, on mesure Vpv et Ipv et on calcule P(k). La valeur obtenue est comparée avec la valeur P (k-1) calculée au cycle précédent, et selon le résultat de comparaison, Vpv est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée. Ainsi, la puissance va augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer et

dès la détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé,...etc. Cependant, l'oscillation du système autour du maximum permet de suivre le maximum de puissance. [42]

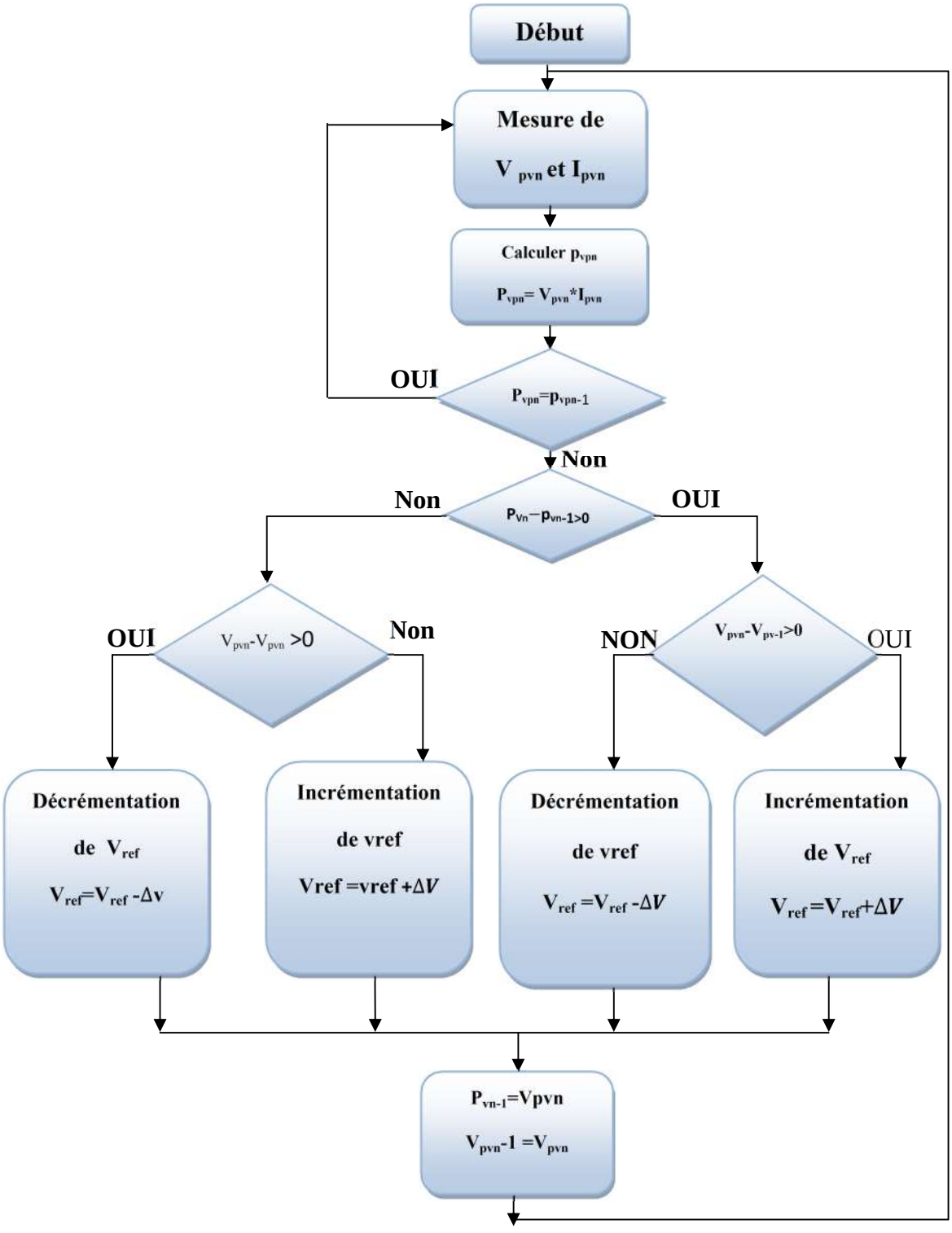


Figure II.14 : Algorithme de la méthode P&O.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

II.6.1.3.Principe de la commande "Hill Climbing" :

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est basé sur la caractéristique P(α) qui présente un maximum à $\frac{dp}{d\alpha} = 0$ comme le montre la figure II.7.

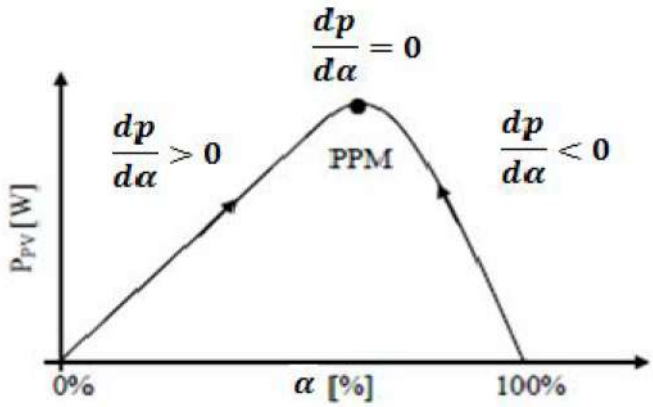


Figure .II .15. Relation entre la puissance du GPV et le rapport cyclique du convertisseur statique

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure II.16. La variable *Slope* correspond à une variable qui prend le signe « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau, symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance *Ppvn* est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{pvn-1}. En fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur *Slope* change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations

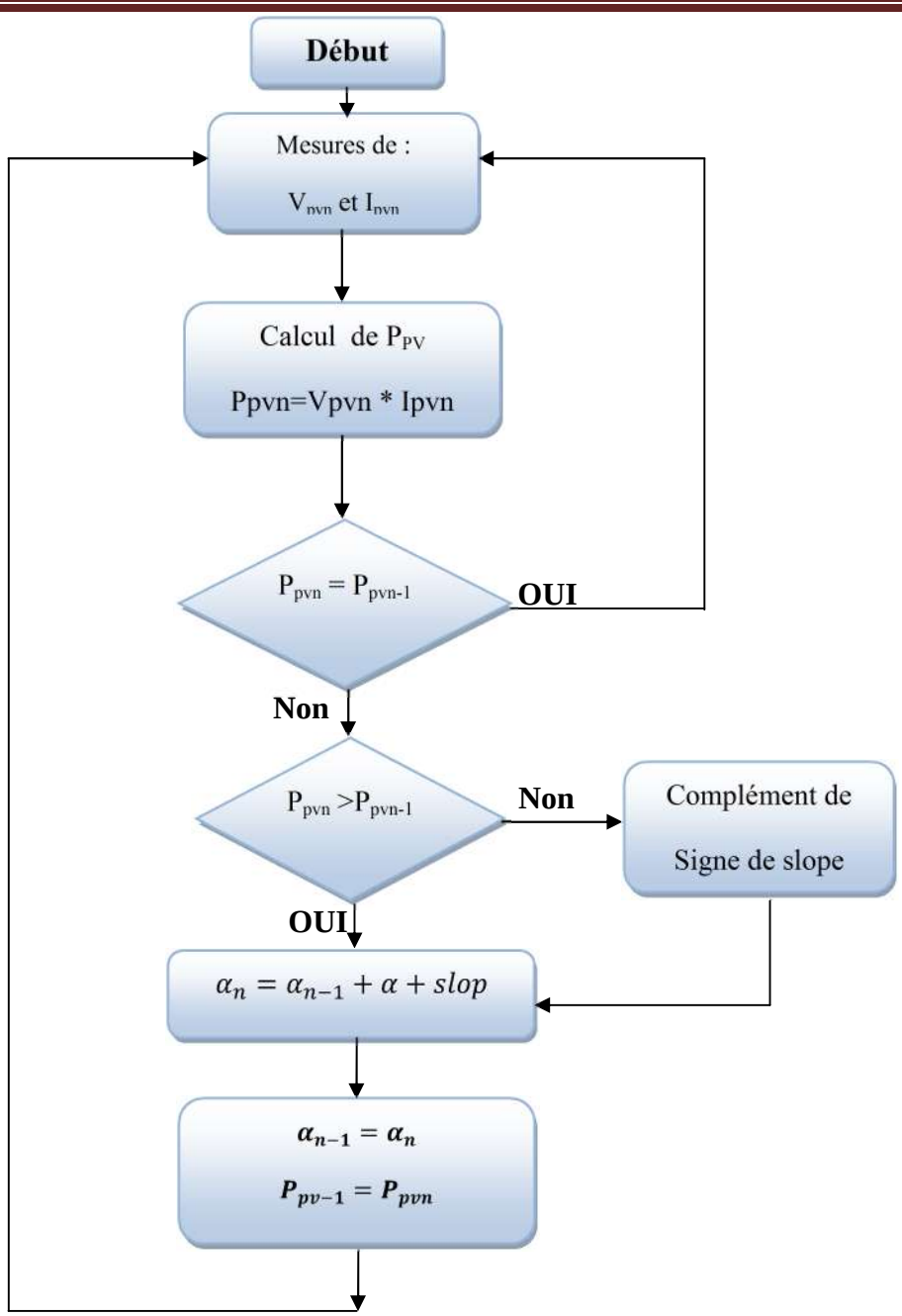


Figure II.16. Algorithme type de la commande Hill Climbing.

II.6.1.4.Principe de la commande "Incrément de conductance" (IncCond) :

La commande basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. La conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV. $G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ (II.22)

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

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \qquad \text{(II.23)}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure II.17 permet d'écrire les conditions suivantes :

Si$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM

Si$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

Si$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, e point de fonctionnement est sur le PPM,

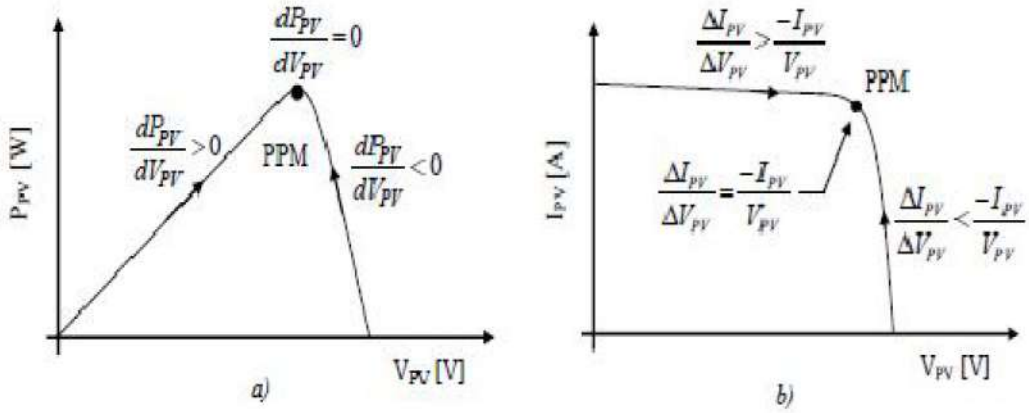


Figure .II.17. Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G.

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (II.23) et la dérivée de la puissance :

$\left(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}\right)$ Peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv}.\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \approx I_{pv} + V_{pv}.\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \qquad \text{(II.24)}$$

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

si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est sur le PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$), avec celle de l'incrément de conductance$\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$, comme l'illustre l'algorithme de la figure II.17. V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{ppm}. Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{pv}. Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure II.18.

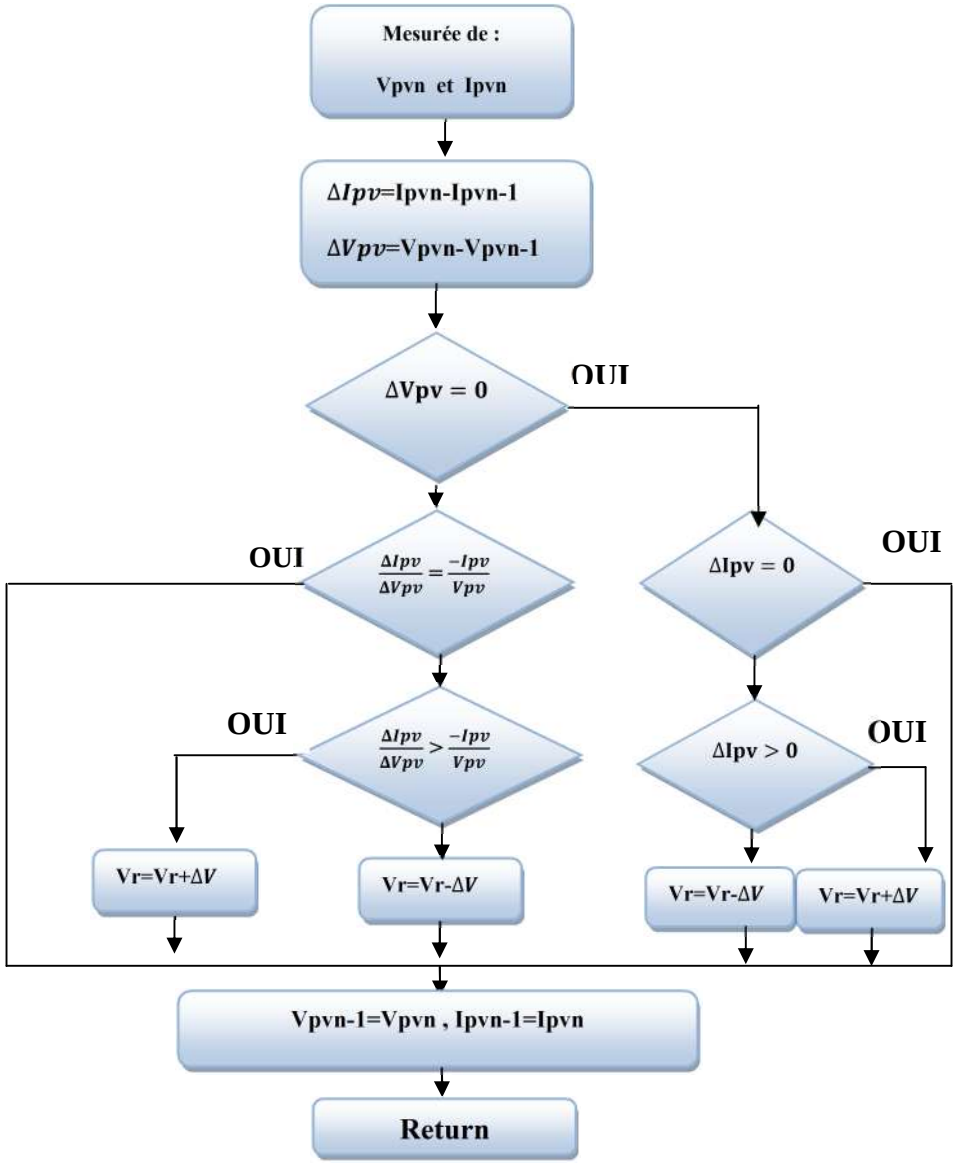


Figure. II. 18. Algorithme d'une commande MPPT basée sur la Méthode Incrément de Conductance. [43]

II.6. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur Boost commandé en MPPT :

Dans notre simulation on utilise un générateur PV de type SPR-305-WHT et un hacheur de type boost caractérisé par: C_1, L, C_2, ces valeurs en Annexe. Pour ce convertisseur on utilise la commande MPPT de type P&O avec une charge d'essaie charge R= 2.5 Ω

Telle que la tension d'entrer du générateur : 274.7 V ;

La tension du sortie du l'hacheur est : 500 V ;

II.6.1. Schéma GPV et un hacheur boost :

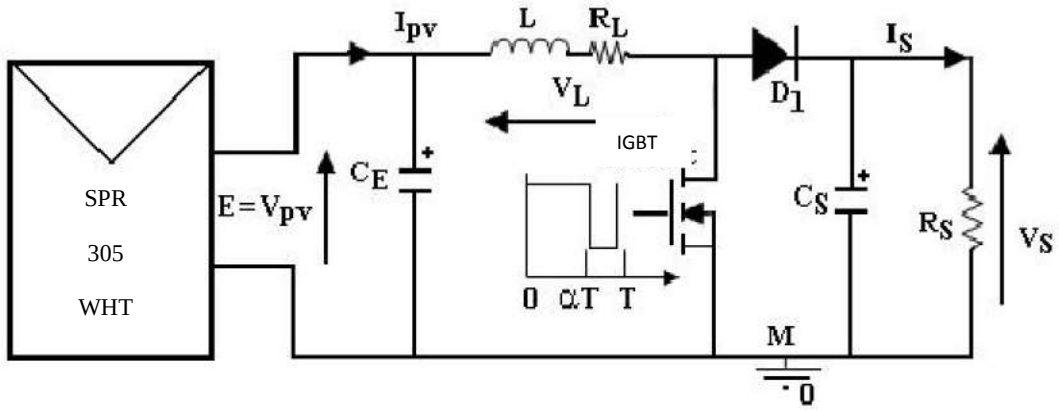


Figure II. 19 : Système PV formé par un générateur PV, convertisseur d'énergie 'survolteur' et une charge (RS).

- **Résultat de simulation :**

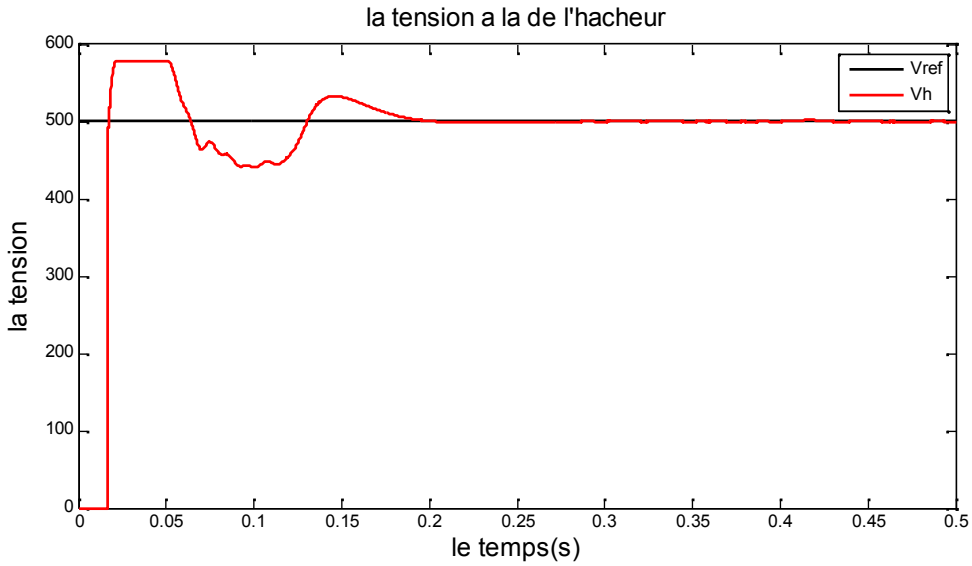


Figure. II. 20.la tension de sortie du hacheur boost.

II.7. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une tension continue en tension alternative, il existe aussi des onduleurs de courant. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), avec des onduleurs à modulation de large d'impulsion, la tension alternative en sortie de l'onduleur est composée d'une succession de créneaux de tension dont la largeur est variable en fonction de la référence et de la stratégie de modulation. [44]

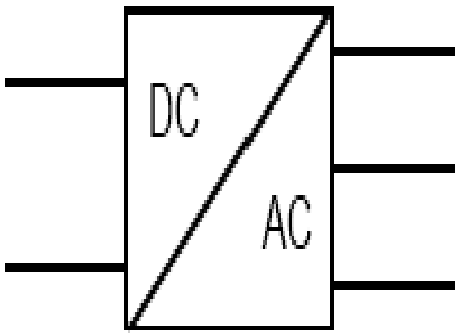


Figure .II.21: Symbole de convertisseur

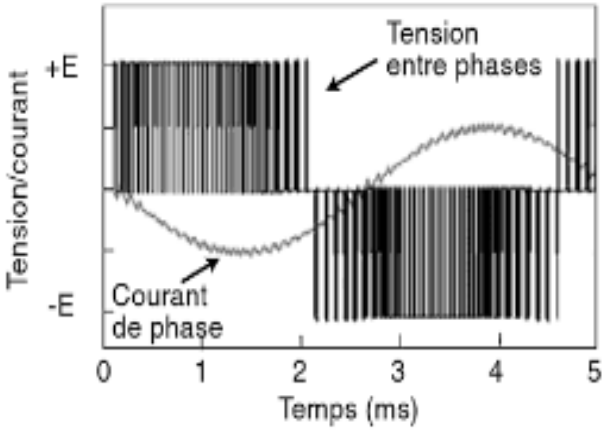


Figure II.22. Exemple de signaux électrique en sortie de l'onduleur

II.7.1. Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés 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. Donc 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 antiparallèle. [45]

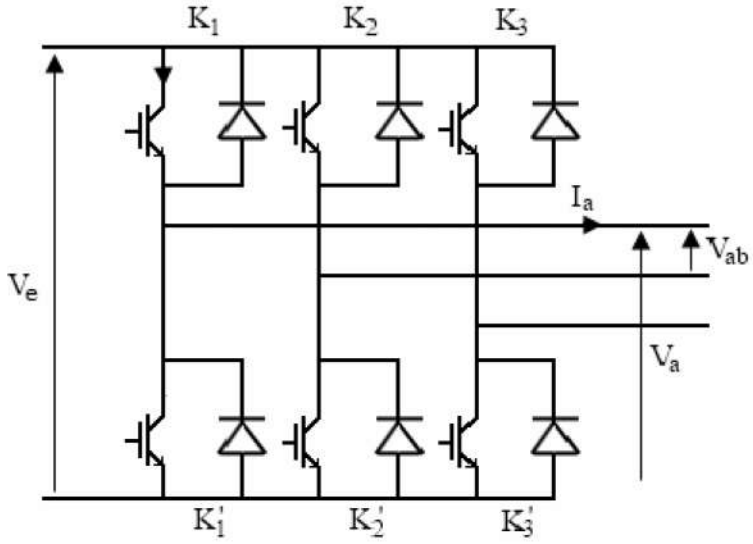


Figure .II. 23: Structure d'un onduleur triphasée.

- **Schéma de simulation d'un onduleur triphasée :**

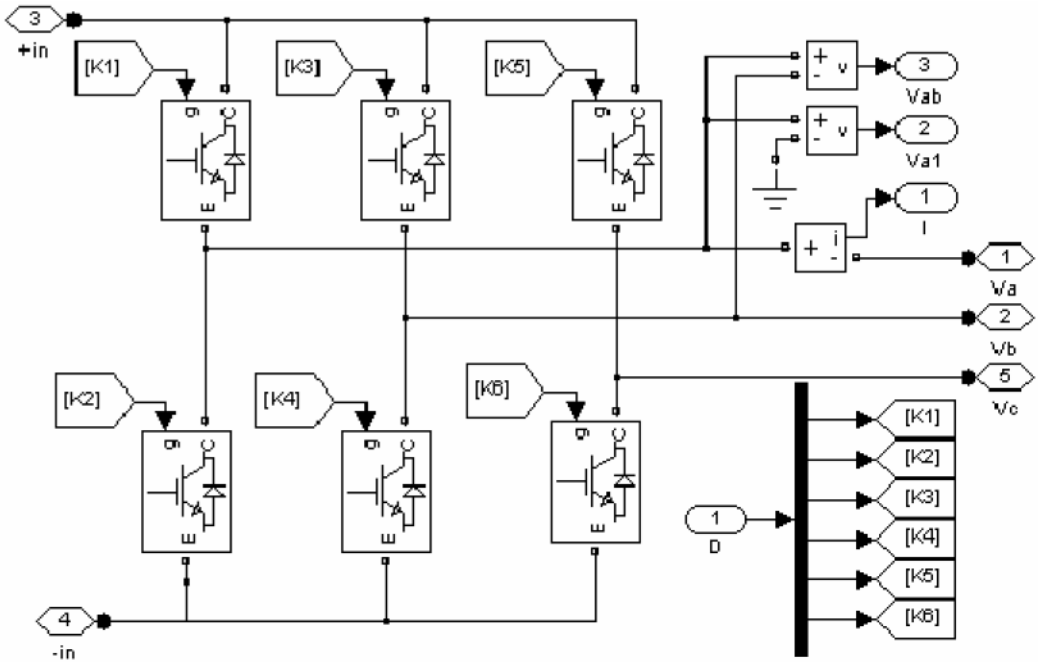


Figure .II. 24: Schéma de simulation d'un onduleur triphasée.

II.7.3. la commande du convertisseur DC/AC :

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique (adjacente), Décalée (disjointe), MLI….).les déférente commande ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie .et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

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. [46]

II.7.3.2. Commande MLI à porteuse triangulaire:

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 f_d) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence f_s) à fréquence beaucoup plus basse.

Cette méthode consiste à comparer trois tensions de références sinusoïdales (modulatrices) propres à chaque phase à un signal triangulaire d'une amplitude et d'une fréquence fixées (porteuse) commun pour les trois phases.

On a,

$$V_{ref}(i) = V_{refmax}.\sin\left(2\pi.f_m.t - (i-1).\frac{2\pi}{3}\right) \qquad (II.25)$$

Avec

i =1, 2, 3 : indices des 3 phases.

$V_{ref\ max}$: amplitude maximale de la tension de référence.

f_m : fréquence des modulatrices.

L'avantage c'est que la largeur d'impulsion dépend uniquement de la valeur de la tension de référence au début de l'échantillonnage, ce qui facilite la réalisation pratique de cette méthode de modulation par des algorithmes numériques.

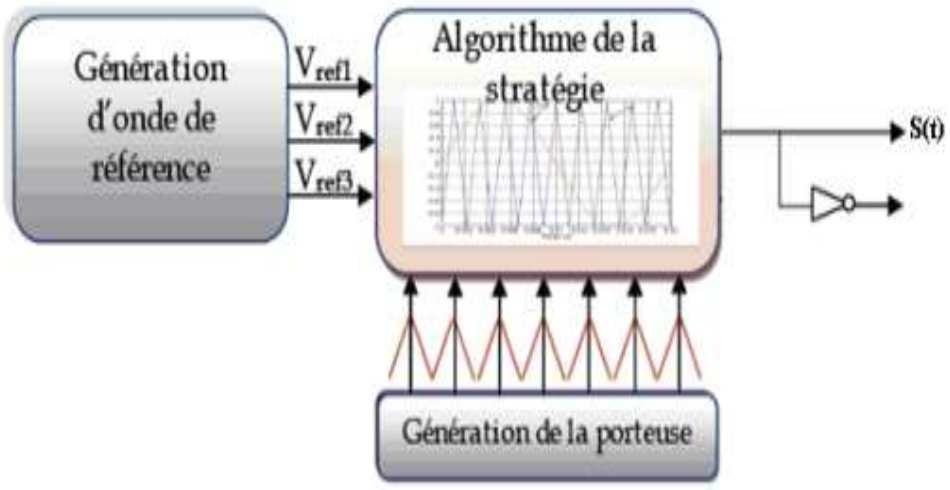


Figure II.25: Principe de l'MLI Sinus-Triangle.

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$Ur \geq Up \rightarrow S(t) = 1$ Si non S(t)=0

Avec :

U_r : Tension de référence.

U_p: Tension de porteuse.

S(t) : est le signale MLI résultant.

- **Schéma de simulation de la commande MLI**

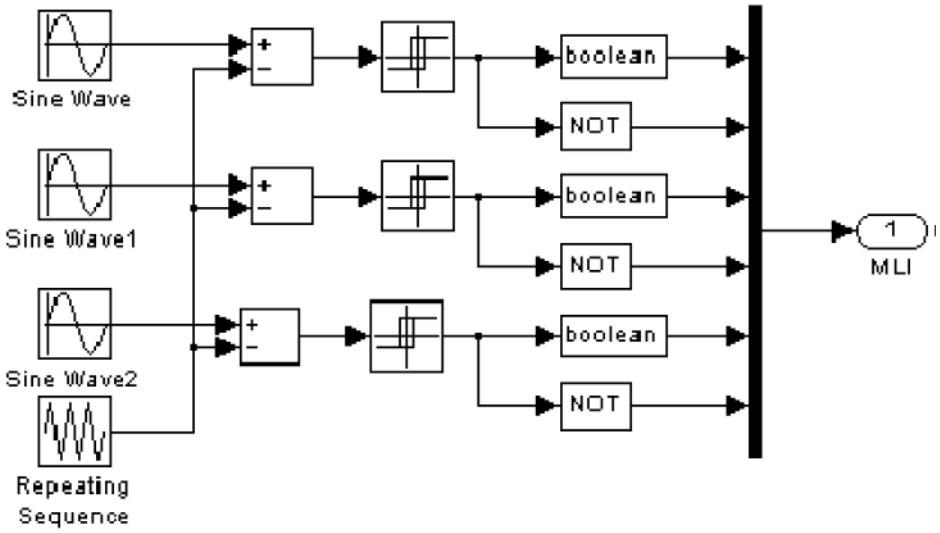


Figure .II. 26: Schéma de simulation d'une commande MLI.

- **Les signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse triangulaires.**

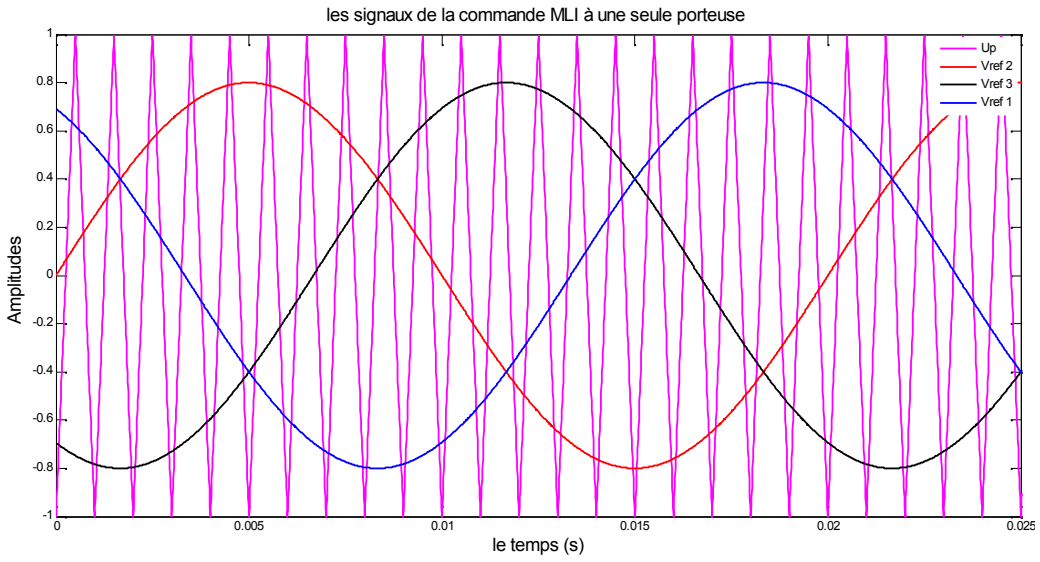


Figure III.27: Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à une seule porteuse triangulaires.

Signal des impulsions d'un interrupteur

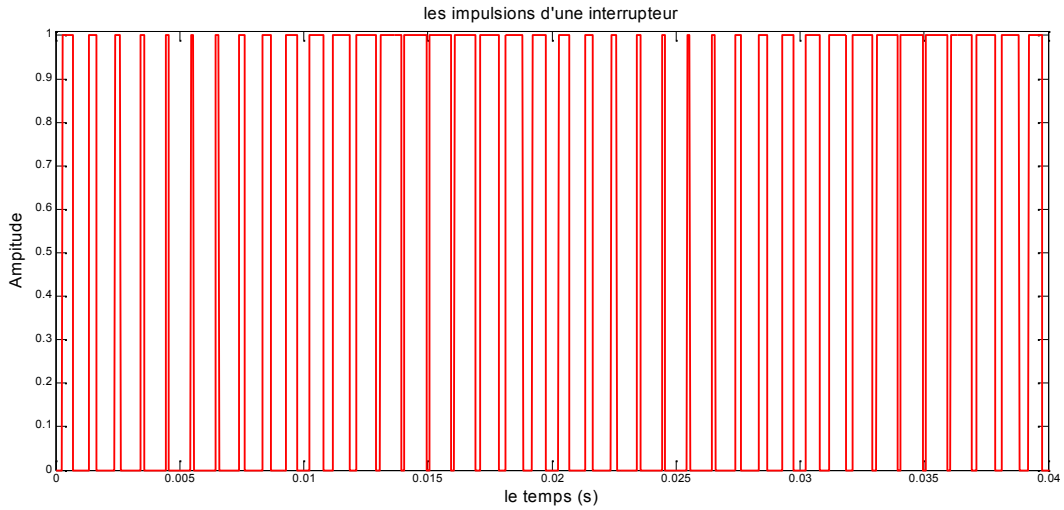


Figure II.28: les impulsions d'un interrupteur.

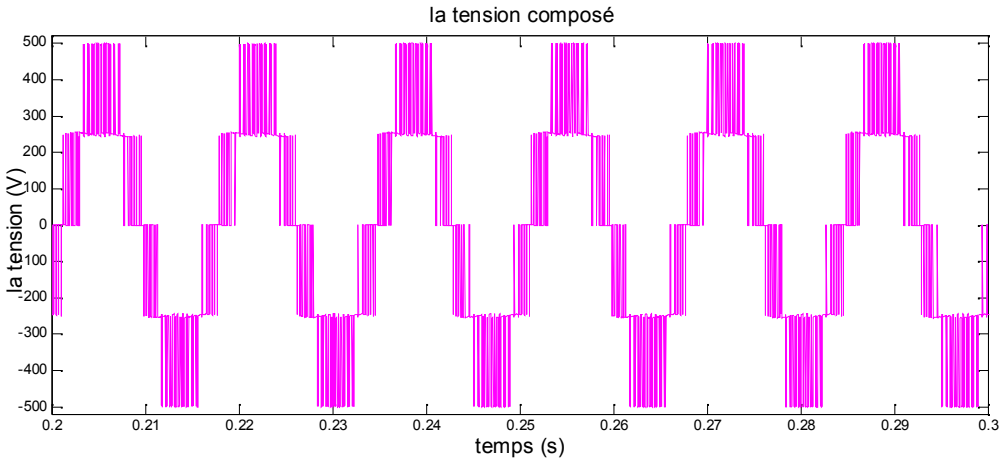


Figure II.29: la tension composée du bras d'un onduleur.

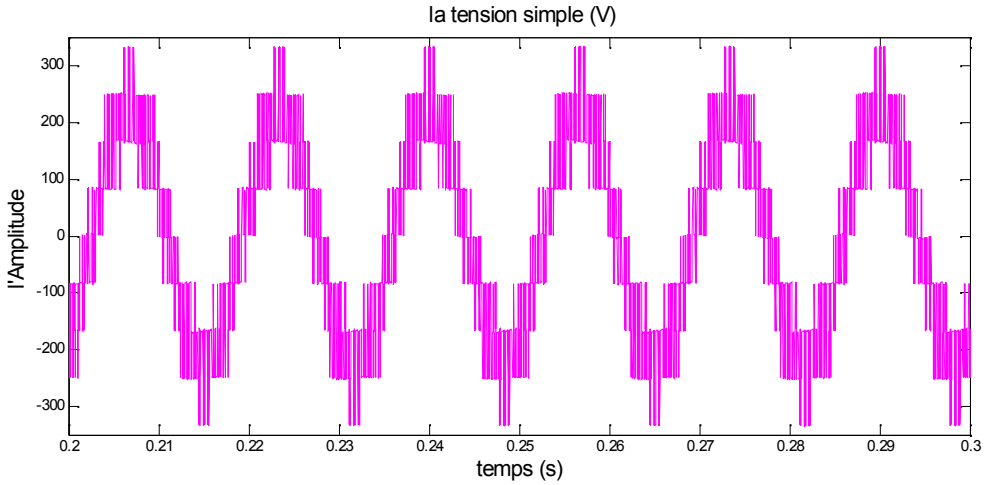


Figure II.30: la tension simple du bras d'un onduleur.

II.8. Schéma de simulation d'un système PV avec la chaine de conversion :

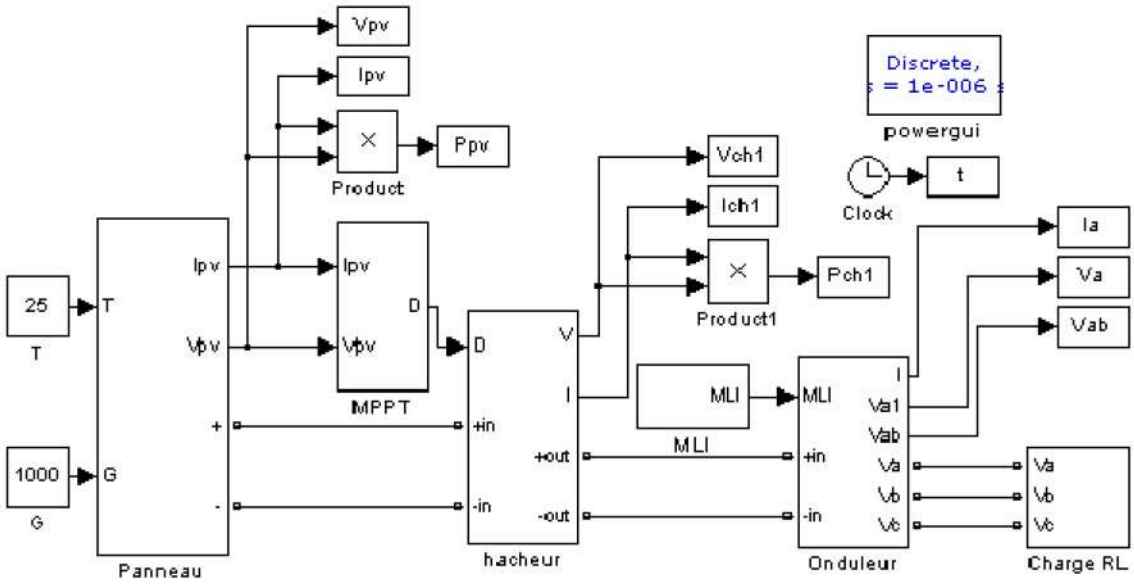


Figure II.31: Schéma de simulation d'un système PV connecté avec une charge.

.

II.9.conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et simulation de tous les composants représentant la chaine de conversion de système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, tels que, le convertisseur survolteur et l'onduleur. Vue les résultats obtenus qui se rapprochent de ceux dans la revue littéraire, nous amène à les combiner au réseau électrique ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

III.1.Introduction

Pour assurer un bon raccordement du générateur à énergie renouvelable au réseau électrique, la tension de sortie du convertisseur doit avoir les mêmes paramètres caractéristiques pour chacune des trois phases. Ce résultat est obtenu si l'angle de phase de la tension du réseau est correctement asservi. Dans le système de commande du convertisseur, un signal modulé (MLI) est créé par la différence de phase. Ce qui est sélectionné comme le signal de commande pour le système de contrôle MLI.

Pour assurer la synchronisation des sorties des inverseurs avec celles du réseau électrique. La technique la plus courante utilisée pour l'asservissement de phase consiste en l'utilisation d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

Ainsi, dans ce travail, dans une première étape, nous nous sommes intéressés à l'étude et à la conception d'une PLL capable d'évaluer d'une manière correcte l'angle de phase de la tension d'un réseau idéal. Cet angle de phase permet de synchroniser la source d'énergie renouvelable par rapport à l'évolution de ce dernier.

III.2. Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau :

Une première classification en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante **:**

III.2.1 Centrales de petite taille (Pw = 1 à 10 KW) :

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques .Elles se connectent au réseau basse tension.

III.2.2. Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 500 KW) (notre cas) :

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille. [47]

III.2.3 Centrales de grande taille (Pw $\geq$ 500 KW) :

Ce sont des systèmes centralisés et sont de la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

III.3.Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau :

Les paramètres caractérisant les réseaux de distribution d'énergie sont: la fréquence, l'amplitude, la phase, la forme d'onde et la symétrie du système triphasé. Les sources d'énergies renouvelables actuelles raccordées aux réseaux de distribution d'énergie, disposent dans leur chaîne de conversion des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes en matière d'absorption des courants non sinusoïdaux et particulièrement de la puissance réactive.

Pour assurer la synchronisation des sorties des inverseurs avec celles du réseau électrique. La technique la plus courante utilisée pour l'asservissement de phase consiste en l'utilisation d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

Une PLL, ou boucle à phase asservie, ou encore boucle à verrouillage de phase, est un montage électronique permettant d'asservir la phase instantanée de sortie sur la phase instantanée d'entrée, mais elle permet aussi d'asservir une fréquence de sortie sur un multiple de la fréquence d'entrée.

III.3.1. Synchronisation par PLL :

Les asservissements de phase appelés également « boucle à verrouillage de phase » sont très fréquents dans le domaine des télécommunications. On les rencontres également

dans le domaine industruiel.ils font l'objet de réalisations de circuits intégrés appelés « circuit PLL » pour « phase locked loop ».

Dans ces diverses applications, le bouclage est réalisé par un comparateur de phase, ce qui ne veut pas dire que les informations utiles soient les phases des grandeurs. Dans la plupart des cas, la boucle à verrouillage de phase n'est en fait qu'un modèle de représentation utile à l'étude de la fonction globale. [48]

Le système d'asservissements de phase a été introduit en 1932 par un ingénieur français, De Bellescize.il s'agit d'un système bouclé destiné à asservir la phase instantanée du signale de sortie $\varphi_s(t)$ sur la phase instantanée du signale d'entrée $\varphi_e(t)$. [49]

III.3.2. Principe général d'une PLL

Les PLLs sont constituées généralement de trois blocs comme le montre le schéma de la figure III.1. Une comparaison de phase est effectuée entre le signal d'entrée et un signal généré localement à l'aide d'un oscillateur contrôlé. La synchronisation est obtenue lorsque l'écart de phase entre les deux signaux est nul. Le filtre de boucle, encore appelé correcteur, détermine le comportement dynamique de la PLL.

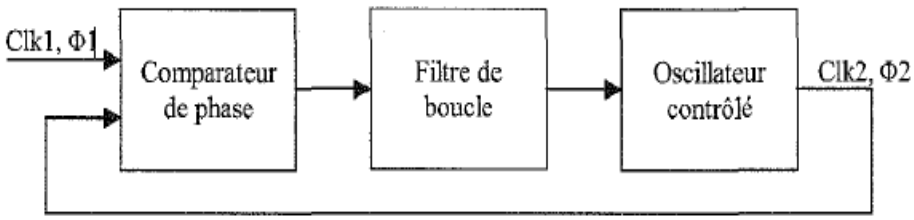


Figure III.1 : Schéma bloc d'une PPL.

Le comparateur de phase et le filtre de boucle sont des éléments qui présentent peu de difficulté de développement. Le choix du type de filtre de boucle (PI, PID, ...) dépend du comportement dynamique désiré et du taux de réduction de la gigue d'entrée. L'aspect le plus sensible des PLLs est le choix d'une technique pour modifier la fréquence de l'oscillateur. Ce choix va entraîner des compromis sur la nature de l'implantation : hybride ou totalement numérique. Si le choix se porte sur un système totalement numérique, l'architecture peut être implantée facilement en ciblant une nouvelle technologie; l'effort à fournir reste à un niveau relativement faible en paramétrant éventuellement les outils de synthèse logique. Les PLLs

hybrides, devront quant à elles être reconçues pour s'adapter avec la technologie en redessinant les différents composants tels que les VCO au niveau transistor. [50]

III.3.3. Les différents types de PLL :

Les PLLs peuvent être classées, suivant la nature des éléments utilisés (analogique ou numérique), de la manière suivante:

- LPLLs (Linear PLLs) ou APLLs (Analog PLLs) : ces PLLs sont constituées uniquement d'éléments analogiques. Le comparateur de phase utilise un multiplieur analogique (quatre quadrants), et le filtre de boucle utilise des composants analogiques passifs ou actifs. Le signal de sortie de la PLL est généré par un VCO (Voltage Controlled Oscillator). Ces PLLs ont des bandes passantes très larges et peuvent fonctionner à des fréquences très élevées (jusqu'à plusieurs Giga Hertz), et sont donc utilisées notamment dans les systèmes de transmission par satellite.

- DPLLs (Digital PLLs) : ces PLLs sont des circuits hybrides: tous ces éléments sont numériques mis à part le générateur de base de temps qui est réalisé à l'aide d'un DCO (Digitally Controlled Oscillator), encore appelé NCO (Numerically Controlled Oscillator). Dans le cas des DPLLs, le DCO intègre un VCO qui dispose d'une interface numérique/analogique pour le contrôle de la fréquence. On retrouve les DPLLs notamment dans les systèmes de synthèse de fréquence, sur des plages de fréquence allant jusqu'à quelques centaines de Méga Hertz.

- ADPLLs (AlI-Digital PLLs) : ces PLLs sont constituées uniquement d'éléments numériques. Elles sont limitées en fréquence de fonctionnement (jusqu'à 50 MHz) et sont utilisées notamment dans des applications qui nécessitent de réduire l'encombrement matériel.[51]

III.4.La boucle à verrouillage de phase dans le cas d'un réseau triphasé :

III.4.1.PLL triphasé dans le domaine de Park :

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est rappelé sur la Figure III.2.

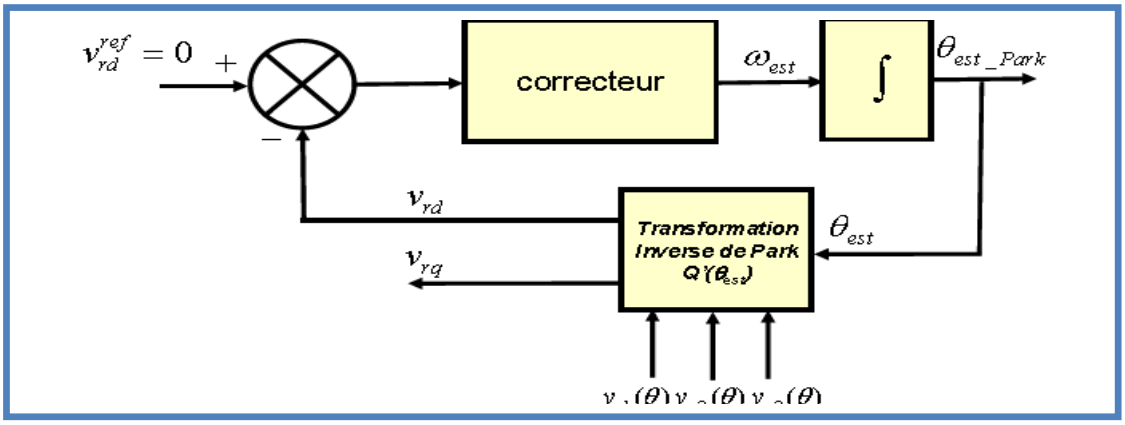


Figure III.2 : Principe de la PLL triphasée dans le domaine de Park.[52]

Dans le cas d'un système équilibré, la tension du système triphasé de tension s'exprime de la manière suivante :

$V_{r1}=V_m \sin\theta$ (III.1)

$V_{r2}=V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$ (III.2)

$V_{r3}=V_m \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$ (III.3)

Ou θ est l'angle de phase qui est égal à $2\pi \times f \times t$.

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe générée par cette transformation (Figure III.3) est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park (θ'). En régime établi, l'angle estimé (θ') est égal à l'angle du réseau θ . Ici, le vecteur spatial de tension est synchronisé avec l'axe q des comme représenté dans la figure. III.3 [53].

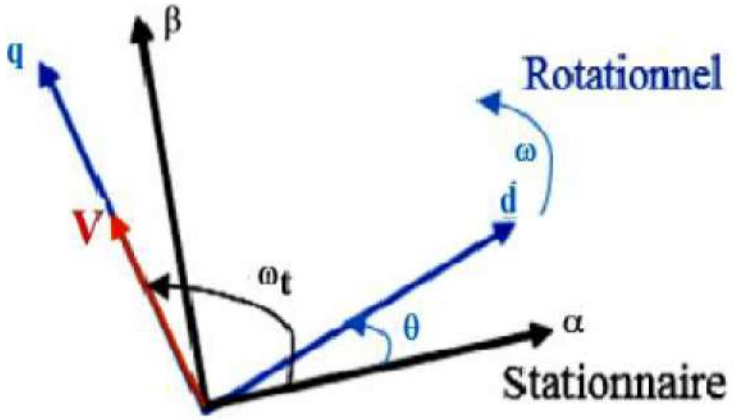


Figure II.3: Repère synchrone de référence tournant

L'application de la transformation de Park sur les trois phases du réseau conduit aux expressions suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta - \theta') \\ V_m \cos(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad \text{(II.4)}$$

Dans ce cas, la matrice de transformation est donnée par

$$T_{qd} = \begin{bmatrix} sin\theta' & cos\theta' \\ -cos\theta' & sin\theta' \end{bmatrix} \quad \text{(II.5)}$$

Où est l'angle de phase déterminé par le système PLL.

La pulsation estimée w' est la somme de la sortie du régulateur PI et la fréquence d'action directe w_n.

Nous constatons qu'il s'agit d'un système fortement non linéaire. Pour synthétiser le correcteur, on se base sur un modèle linéaire pour des faibles variations de la phase (θ). Ainsi, lorsque θ' est très proche de θ , l'approximation des petits angles pour la fonction sinus conduit alors au modèle simplifié présenté sur la figure III.4. Ce qui permet une simple synthèse du correcteur faisant partie de cette boucle.

Le but de l'utilisation de la fréquence d'action directe, w_n , est de pouvoir contrôler le régulateur PI et de détecter le passage d'un signal de sortie par zéro. Dans notre cas, la pulsation d'action directe correspond à la valeur $2\pi f = 100\pi$.

C'est le cas d'un fonctionnement idéal d'un réseau où sa fréquence est exactement de 50 Hz. Ainsi, une fois le régulateur réalise l'asservissement de la phase, la sortie du régulateur sera nulle. [54]

- Les résultats de simulation pour la PLL obtenus dans l'environnement MATLAB/Simulink, ont donnée :

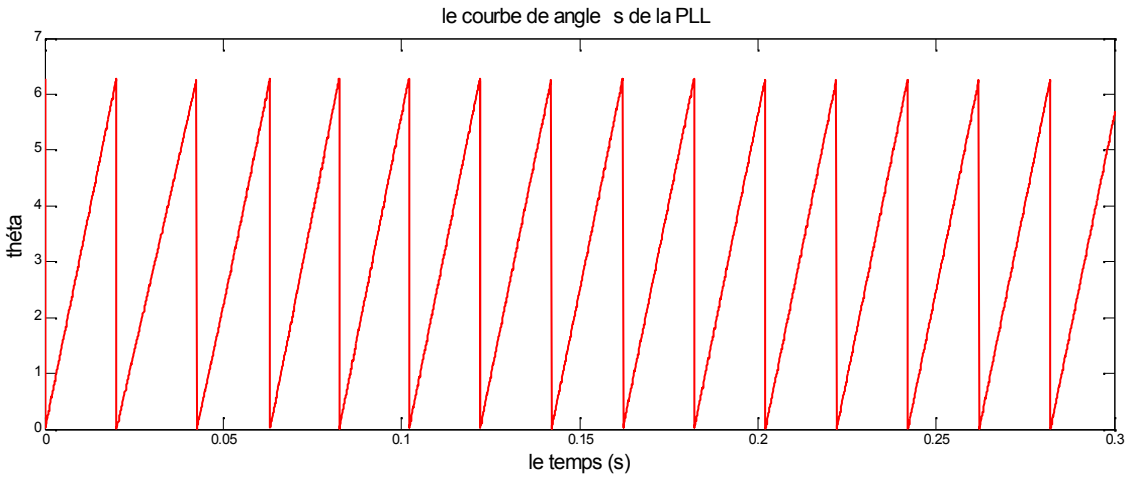


Figure III.4. Représentation de l'angle $\theta_s$de la PLL.

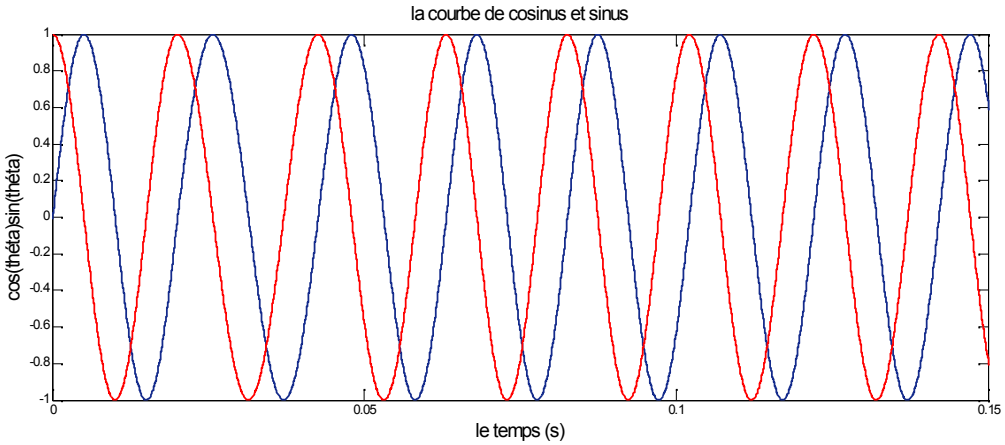


Figure III.5. Représentation des signaux cosinus et sinus de la PLL.

III.5. les régulateurs utilisés dans la synchronisation :

III.5. 1. Régulateur proportionnel-Intégral :

Ce type de régulateur, de conception simple, permet d'éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne grâce à son action intégrale, la rapidité de la régulation est liée à la dynamique désirée par son action proportionnelle. L'action dérivée est écartée, en effet bien que permettant d'anticiper et d'accélérer la régulation, elle est caractérise par le fait d'amplifier les bruits du système. [55]

Nous utilisons simplement pour chacune des phases un régulateur proportionnel Intégral suivi d'un filtre passe bas du premier ordre.

Le rôle de ce filtre est d'atténuer les signaux hautes fréquences venant de la MLI.

Le schéma de régulation du courant est représenté par la Figure III.7 :

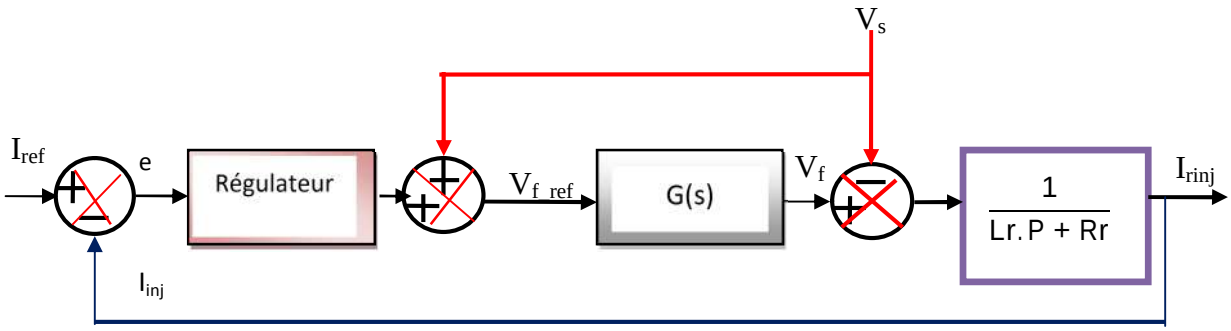


Figure III.7 : Schéma de la régulation des courants de l'onduleur

On prend (Δi) la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta i = I_{ref} - Ir_{inj} \qquad \text{(III.6)}$$

$$Rr.Ir_{inj} + Lr.\frac{dIr_{inj}}{dt} = Vs - Vf \qquad (III.7)$$

D'après (III.7) et (III.6), et le schéma de la figure III.7 nous obtenons l'expression suivante :

$$Rr.\Delta i + Lr\frac{d\Delta i}{dt} = \left(Vs + Lr\frac{dIref}{dt} + Rr.Iref\right) + Vf \qquad (III.8)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (III.8) peut être défini comme tension de référence (Vf_ref), ce qui nous donne l'expression suivante [56] :

$$Vf_ref = Vs + Lr\frac{dIref}{dt} + Rr.Iref \qquad (III.9)$$

L'onduleur de tension à commande MLI est modélisé par un gain Go:

$$Go = \frac{Udc}{Up} \qquad (III.10)$$

Où :

Udc: Tension côté continu de l'onduleur

Up : Amplitude de la porteuse

Pour que (Vf) soit égale à Vf_ref, nous choisissons Go égal à 1.

Rr et Lr Respectivement la résistance et l'inductance de raccordement intermédiaire entre l'onduleur et le réseau.

III.5.2 Régulateur PI avec compensation de pôle :

Le régulateur (PI) représenté par la Figure III.8 :

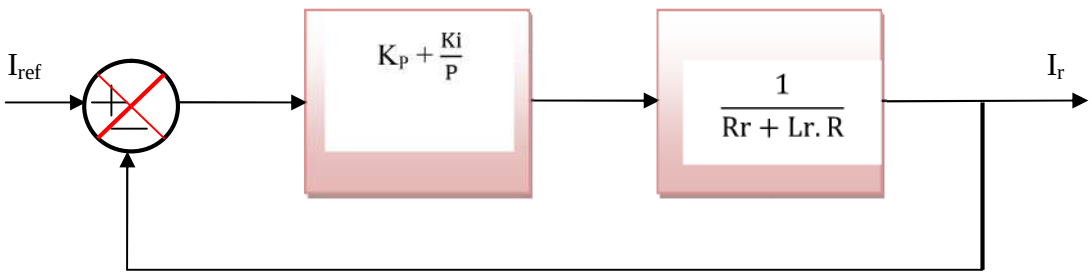


Figure III.8 : Schéma bloc du régulateur (PI).

La fonction de transfert de la boucle fermée et les coefficients du correcteur (PI) sont donnés par les équations suivantes [56] :

$$\frac{Ir}{Iref} = \frac{1}{1+\frac{Lr}{Kp}.P} = \frac{1}{1+\tau.P} \qquad \text{(III.11)}$$

Avec

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{Rr}{Lr} \qquad \text{(III.12)}$$

III.4.3.Régulateur (PI) sans compensation de pôle :

Cette méthode consiste à utiliser un régulateur (PI) comme représenté sur la Figure III.4. Il en résulte la fonction de transfert de la boucle fermée :

$$\frac{Ir}{Iref} = \left(\frac{Ki+Kp.P}{P}\right)\frac{\frac{Ki}{Lr}}{P^2+\left(\frac{Kp+Rr}{Lr}\right).P+\frac{Ki}{Lr}} \qquad \text{(III.13)}$$

Nous remarquons la présence d'un zéro en boucle fermée, nous pouvons l'éliminer en ajoutant un filtre passe-bas du premier ordre sur la consigne du courant comme indiqué sur la figure suivante

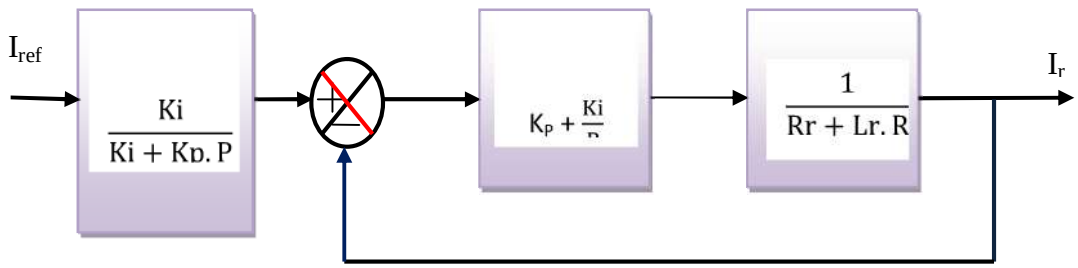


Figure III.9 : Schéma bloc de la régulateur PI sans compensation de pôle.

La réponse du système en boucle fermée peut être identifiée à celle d'un système du second ordre [56]:

$$\frac{Ir}{Iref} = \frac{wi^2}{P^2+(2.\zeta.wi).P+wi^2} \qquad \text{(III.14)}$$

Où :

$$Ki = wi^2.Lr \qquad \text{Et} \qquad Kp = 2.\zeta.wi.Lr - Rr$$

Dans cette étude, on a choisi le régulateur PI avec compensation de pôle avec les paramètres de réseaux suivants :

$$Rr = 0.002\ \Omega \qquad \text{et} \qquad Lr = 0.250\ mH$$

En appliquant ces valeurs dans la relation III.48, K_i et K_p peuvent s'écrit :

$$Ki = 800 \qquad \text{Et} \qquad Kp = 7$$

III.4.4.les correcteurs d'une PLL triphasé :

La PLL triphasée développée dans le cadre de ce projet utilise une transformée de Park comme suit :

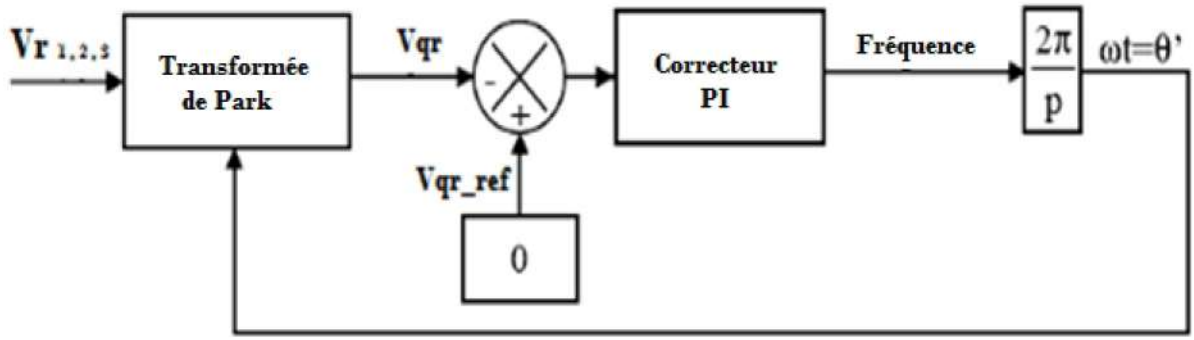


Figure III.10 : Schéma de régulateur de la PLL.

La transformée de Park a le rôle de comparateur de phase. Cette PLL a pour avantage de pouvoir également mesurer la fréquence du signal d'entrée. La figure suivante montre le fonctionnement de la PLL triphasée. En régime permanent, lorsque la PLL « est accrochée », $d = 0$ et $Vqr = 0$. On a alors $Vdr = Vr$.

- Le résultat de simulation le courant de la référence du régulateur (PI)

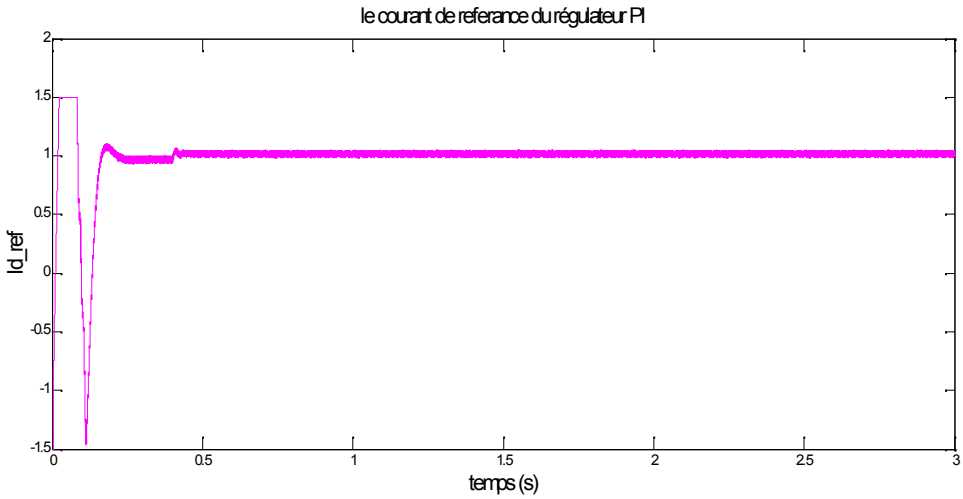


Figure III.11: le courant de la référence du régulateur (PI)

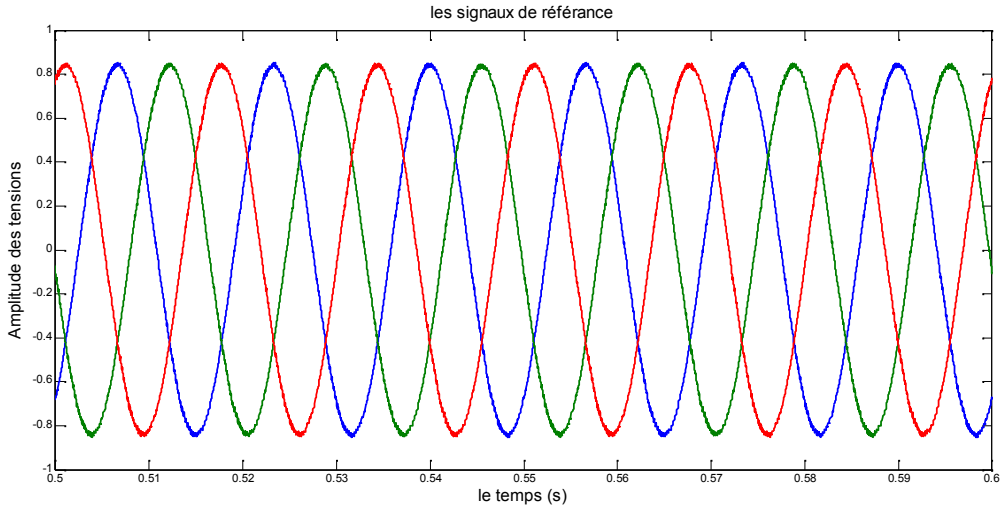


Figure III.12 : les tensions de la référence de la commande MLI.

III.5. Modélisation du filtre LC et la charge :

III.5.1. Fonction de transfert du filtre :

Afin de déterminer plus facilement la transmit tance du filtre, on utilise le schéma monophasé Équivalent suivant **[47]** :

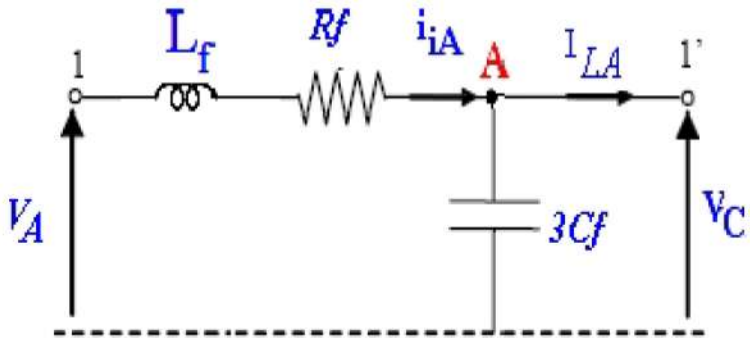


Figure III.13 : Schéma monophasé équivalent du filtre LC.

La fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante :

$$H(p) = \frac{Vc}{Va} = \frac{1}{1+3.Cf.Rf.P+3.Cf.Lf.P^2} \qquad \text{(III.15)}$$

Et la pulsation :

$$\omega o = \frac{1}{\sqrt{3.Cf.Lf}} \qquad \text{(III.16)}$$

Le modèle d'état de l'ensemble onduleur, filtre LC et la charge RL est donnée par la Figure III.13.

III.5.2.le Modèle globale (onduleur, filtre LC et la charge RL) :

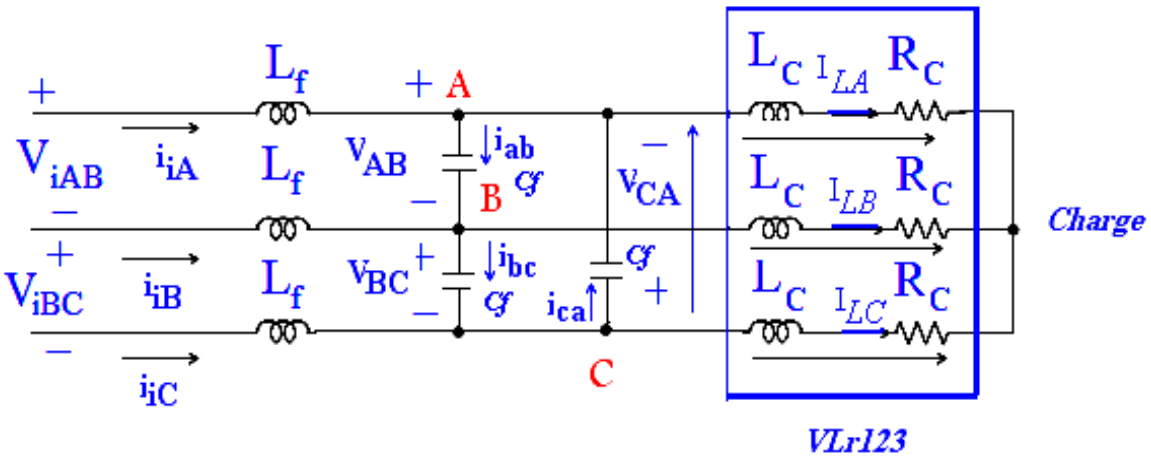


Figure III.13: Schéma du filtre LC et de la charge RL [58]

- **Résultat de simulation après filtre LC :**
  - **les tensions après le filtre.**

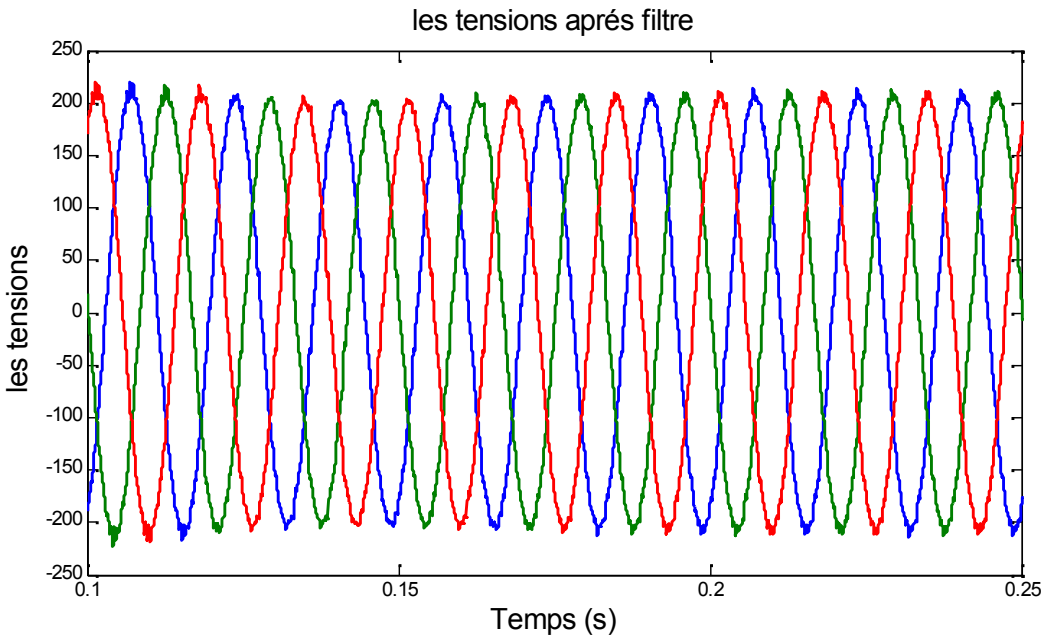


Figure III.14: les tensions de l'onduleur après le filtre.

III.6.Système PV connecté à un réseau électrique :

III.6.1 : Modèles d'un réseau électrique :

Une ligne de transmission à trois constants R, L et C distribué uniformément le long de la longueur entière de la ligne. La résistance et l'inductance forment l'impédance de série. La capacité existant entre les conducteurs. Il existe trois types de ligne de transmission à savoir :

- Ligne de transmission courte.
- Ligne de transmission moyenne.
- Ligne de transmission longue.

III.6.1.1. Ligne de transmission courte

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est 50 km et pour une tension de ligne (< 20kV), on la considère comme une ligne de transmission courte. En raison de la plus petite longueur et la plus basse tension, les effets de la capacité sont petits et peuvent être négligés. Donc seulement la résistance et l'inductance de la ligne sont prises en considération selon la figure suivante.

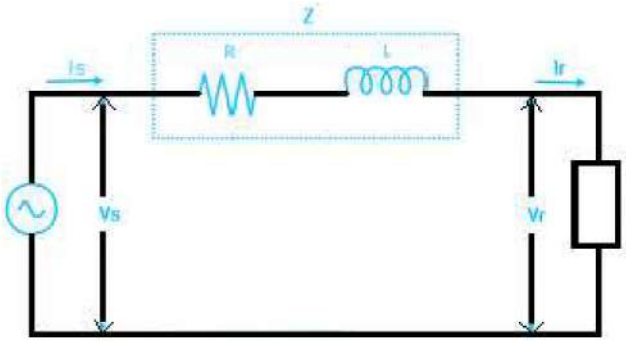


Figure III.14: Modèle en série d'une ligne de transmission courte

III.6.1.2.Ligne de transmission moyenne :

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est comprise entre 50 à 150 km et la tension de ligne est (> 20kV et < 100kV), on la considère comme une ligne de transmission moyenne. Vue la longueur suffisante et la tension de la ligne, les effets de capacité sont pris en considération.

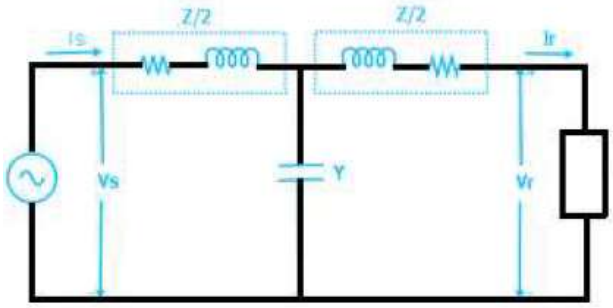


Figure III.15 : Modèle en T d'une ligne de transmission moyenne

III.6.1.3 Ligne de transmission longue :

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est plus de 150 km et la tension de ligne est très élevée (> 100kV), on le considère comme une longue ligne de transmission.

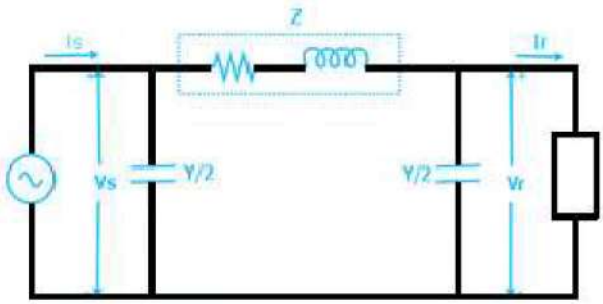


Figure III.16 : Modèle en pi d'une longue ligne de transmission [59]

III.7. Simulation d'un système PV connecté au réseau électrique :

III.7.1 Modèle de boucle de régulation de l'ensemble du système PV :

Après avoir modélisé et simulé les différents composants du système photovoltaïque, nous allons les regrouper en un bloc afin de voir les paramètres tension et courant à injecter. Le système de commande de l'ensemble est présenté à la figure III.4.

Sur ce schéma, les composantes du courant sont comparées avec ses références. Les écarts entre elles, passent par les régulateurs. Les sorties des régulateurs donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère d-q. Passant par la transformation inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande MLI des interrupteurs de l'onduleur.

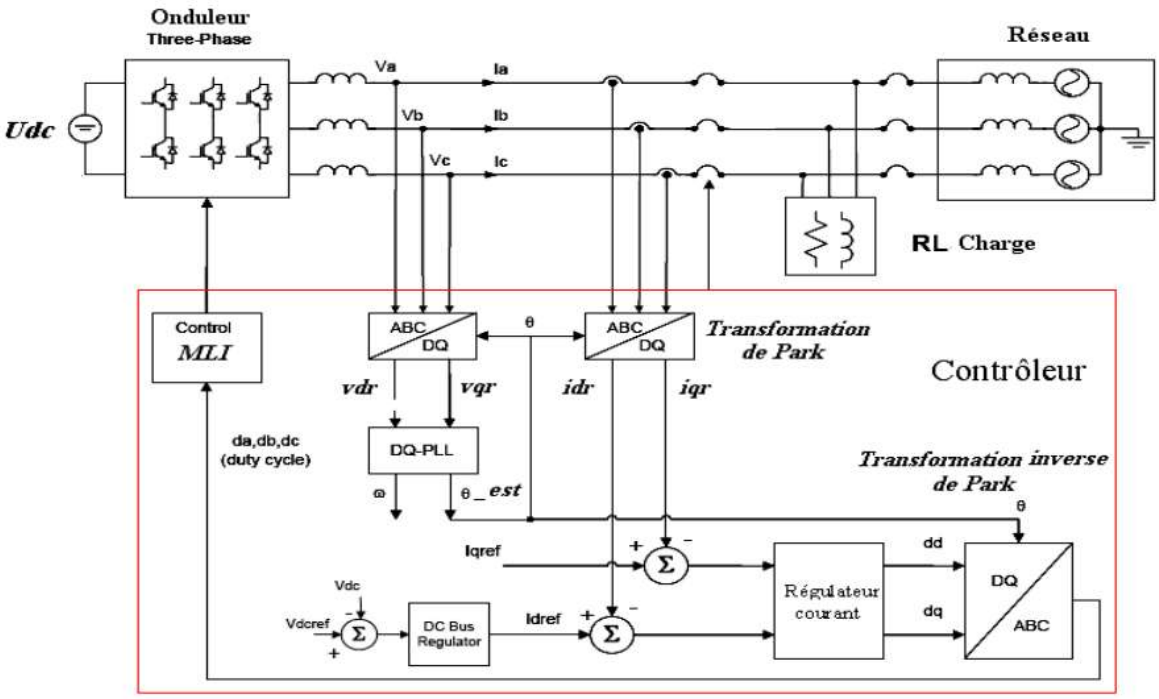


Figure III.17 : Schéma synoptique de commande et contrôle de la chaîne de conversion. [60]

III.7.2.Modèle de simulation du réseau :

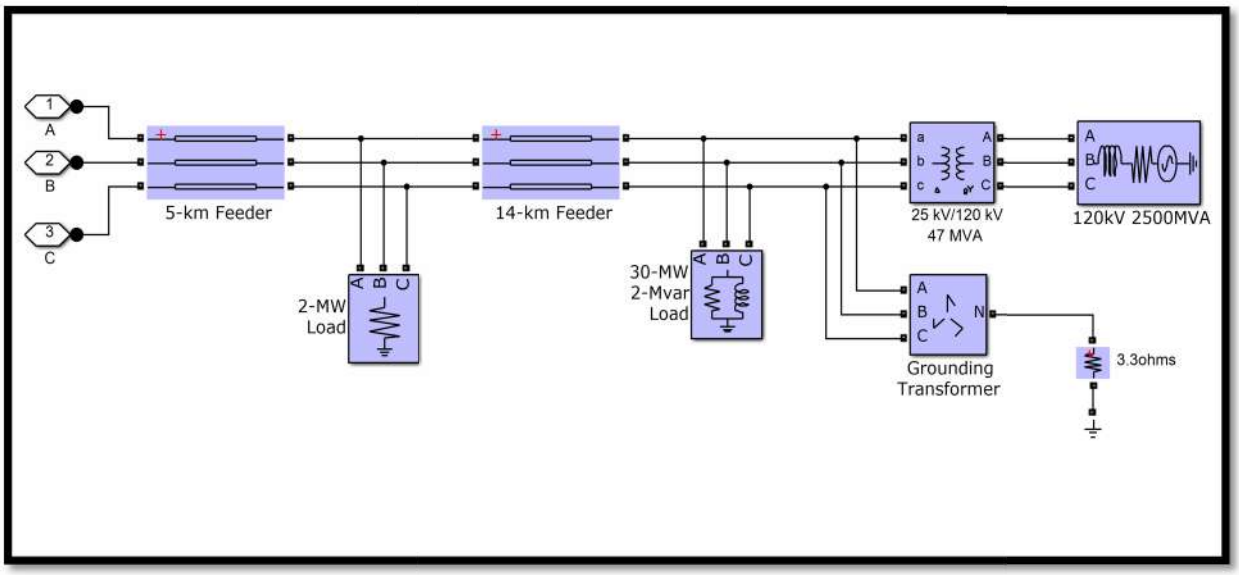


Figure III.18. Modèle de simulation du réseau.

III.8.Résultat de simulation des grandeurs injecté au réseau :

Pour le contrôle et l'injection de la puissance on suppose que les irradiations maximal G=1000W/m² et une température T= 25°.

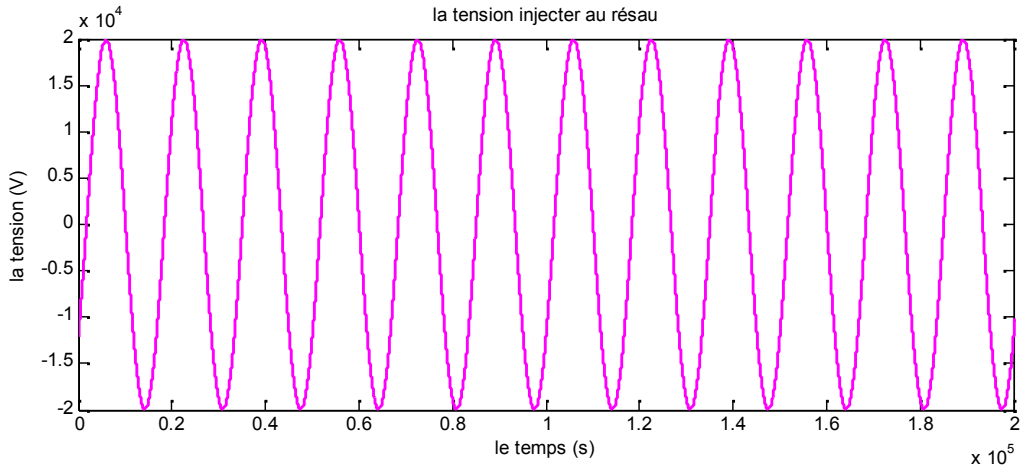


Figure III.19 : la tension simple injecter au réseau.

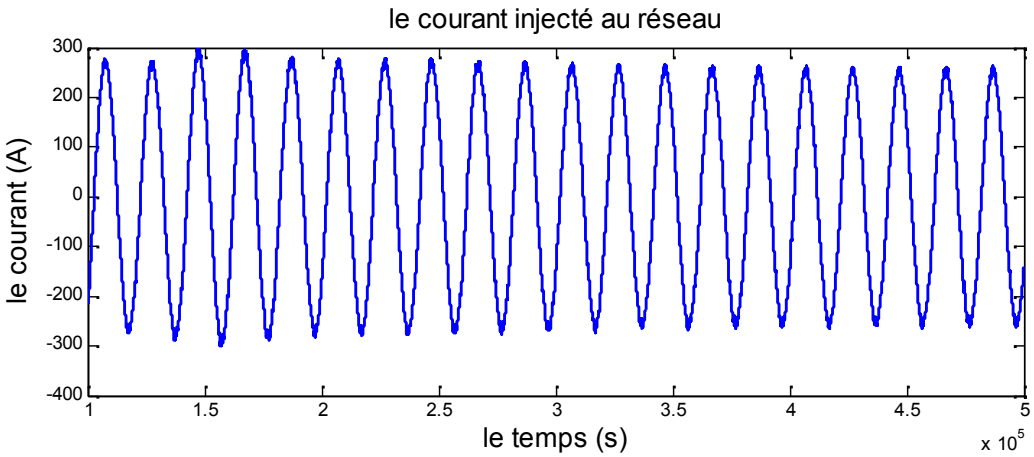


Figure III.20 : le courant injecter au réseau.

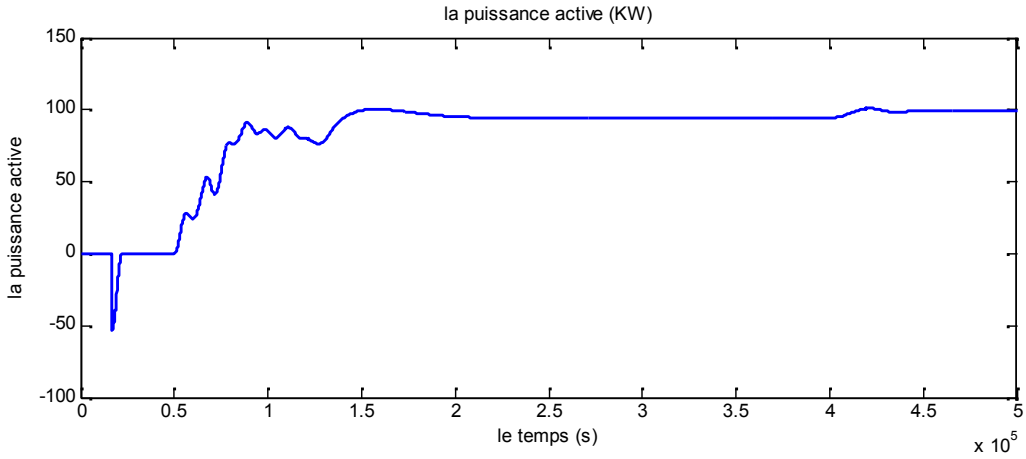


Figure III.21 : la puissance Active injecter au réseau.

III.9.Conclusion

Après avoir modélisé et simulé les différents éléments d'un système photovoltaïque, il est nécessaire de faire une simulation avec le réseau pour voir puissance délivrée par le GPV.
La commande et la connexion au réseau électrique sont assurés par :

- La synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau, qui a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.
- Les courants sont comparés avec la référence puis régulés d'injecter le maximum de la puissance active.
- Nous avons choisi la commande MLI, qui nécessite un contrôle de fréquence fixe des commutations tandis que les tensions sont variables.

Conclusion générale

L'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, et dans un souci du respect de l'environnement, pousse le monde de plus en plus à s'intéresser aux énergies renouvelables. L'intérêt porté aux énergies renouvelables, nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et de la température.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et simulation de chaque élément constituant le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique.

Nous avons débuté par une représentation du GPV en choisi le modèle électrique équivalent à une diode qui est un compromis entre la précision et la simplicité. A partir de l'analyse des résultats de simulation obtenus, nous avons pu observer l'influence des conditions extérieures sur le fonctionnement électrique de ces GPV.

Ensuite, Le système de commande MPPT qui permet de faire fonctionner un GPV dans les conditions optimales en fonction des variations des paramètres extérieurs a été réalisé par action sur le rapport cycle du signal de commande de l'interrupteur du convertisseur DC/DC, qui, permet d'élever la tension issue des modules PV à un niveau de tension adaptable à l'entrée du convertisseur DC/AC. Le convertisseur DC/AC (onduleur de tension) commandé par la MLI à transistors IGBT a sa sortie une tension filtrée par le filtre L, compatible à la tension du réseau a été modélisé et simulé à partir de blocs mathématiques basiques présentent dans le catalogue Matlab/Simulink.

On termine par un bref aperçu sur la constitution et différentes parties du réseau électrique et la chaîne photovoltaïque pouvant être relié au réseau.

Cette étude nous a permis de connaître les problèmes et difficultés des systèmes photovoltaïques connectés au réseau et d'avoir la prise en main du logiciel Matlab/Simulink tant important pour la modélisation.

L’annexe 1: chapitre I

- **Les grandeurs du générateur :**

Le générateur utlisé de livre une puissance maximale égale : 100kW.

La puissance généré par un panneau du modèle SPR-305WHT qui constitué de 96cellule identique en séries est : 305.5 W

Telle que :

la tension au point maximale est : 54.7V.

la courant au point maximale est 5.88 A .

Pmax=Vmpp*Impp

Pmax=54.7*5.58=305.226W

Doc la puissance maximale d’un générateur constitué d’u 05panneau en séries et 66 en parallèles est :

Pmax=305.226*5*66 :100.7KW.

L’annexe 1: chapitre II

- **Paramètres du convertisseur boost:**

La tension d’entrée de l’hacheur :

V_{PV} :(5*54.7)=273.7V.

La tension de sortie Vout égale :500V

Puissance maximale pv :(66*5)*305.2=100 kW.

Tempe des ondulations max du courant de l’inductance L : 10%

L’équitation du calcul de l’indicateur L

$$L \geq \frac{VCH\,Dm\,(1-Dm)}{Fs|\Delta ILripl|}$$

L’équation de calcul de rapport cyclique

$$\frac{V0}{VPV} = \frac{T}{toffe} = \frac{1}{1-D}$$

$$D = 1 - \frac{VPV}{Vcha}$$

$$D = \frac{273.5}{500} = 0.453$$

L’équation de calcul de courant de sortie de l’hacheur

$$I_{cha} = \frac{P_{cha}}{V_{char}}$$

Le courant de sortie de l’hacheur

$I_{cha}=\frac{100000}{500}=200A$

La résistance charge est

$R_{cha}=\frac{500}{200}=2.5\Omega$

L'inductance L est :

$L\geq \frac{500*0.453*(1-0.543)}{10000*2*365.63*0.1}$

$L\geq 3.38e\text{-}4\mu H$

La capacité d'entrée C_{in} utilisée la relation

$C_{in}\geq \frac{Iom.Dm^2}{0.02.(1-Dm)Fs\,Vmp}$

$C_{in}\geq \frac{5.3*0.453^2}{0.02*(1-0.453)*10000*273.5}$

$C_{in}\geq 1.3e-4F$

La capacité d'entrée Cout utilisée la relation

$C_{out}\geq \frac{Vcha.D}{Fs.|\Delta Vcha\,Rcha|}$

$C_{out}\geq \frac{500*0.453.}{10000*5*2.5}$

$C_{out}\geq 3.624e-4\,F$

Annexe3. Chapitre III. Le raccordement d'un GPV aux réseaux :

Modèle d'état de l'ensemble (onduleur, filtre LC et la charge RL)

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B, et C, les équations des courants et des tensions du filtre LC décrites par la figure III.9, sont données comme suit :

- Nœud (A) :

$$i_{iA}+i_{ca}=i_{ab}+i_{LA}\Longrightarrow i_{iA}+Cf.\frac{dV_{CA}}{dt}=Cf.\frac{dV_{AB}}{dt}+i_{LA}$$

- Nœud (B) :

$$i_{iB}+i_{ab}=i_{bc}+i_{LB}\Longrightarrow i_{iB}+Cf.\frac{dV_{AB}}{dt}=Cf.\frac{dV_{BC}}{dt}+i_{LB}$$

- Nœud (C) :

$$i_{ic}+i_{bc}=i_{ca}+i_{LC}\Longrightarrow i_{iC}+Cf.\frac{dV_{BC}}{dt}=Cf.\frac{dV_{CA}}{dt}+i_{LC}$$

Avec :

$$i_{ca} = Cf.\frac{dV_{CA}}{dt}\ , i_{ab} = Cf.\frac{dV_{AB}}{dt} \quad et \quad i_{bc} = Cf.\frac{dV_{BC}}{dt}$$

on trouve :

$$i_{iA} - i_{iB} + Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt}\right) + i_{LA} - i_{LB}$$

$$\square\ Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} + \frac{dV_{BC}}{dt} - 2.\frac{dV_{AB}}{dt}\right) = -i_{iA} + i_{iB} + i_{LA} - i_{LB}$$

on trouve :

$$i_{iB} - i_{iC} + Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt}\right) + i_{LB} - i_{LC}$$

$$\square\ Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} + \frac{dV_{CA}}{dt} - 2.\frac{dV_{BC}}{dt}\right) = -i_{iB} + i_{iC} + i_{LB} - i_{LC}$$

D’après l’équation président on trouve :

$$i_{iC} - i_{iA} + Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt}\right) + i_{LC} - i_{LA}$$

$$\square\ Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} + \frac{dV_{AB}}{dt} - 2.\frac{dV_{CA}}{dt}\right) = -i_{iC} + i_{iA} + i_{LC} - i_{LA}$$

Afin de simplifier les équations (III-56) et (III-58), nous utilisons le rapport de la somme des tensions algébriques égales à zéro entre les phases de la charge, tel que :

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$

Donc

$$\begin{cases} \frac{dV_{AB}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iAB} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LAB}) \\ \frac{dV_{BC}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iBC} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LBC}) \\ \frac{dV_{CA}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iCA} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LCA}) \end{cases}$$

Avec :

$$i_{iAB} = i_{iA} - i_{iB},\ i_{iBC} = i_{iB} - i_{iC},\ i_{iCA} = i_{iC} - i_{iA}$$

$$\text{Et } i_{LAB} = i_{LA} - i_{LB},$$
$$i_{LBC} = i_{LB} - i_{LC},$$
$$i_{LCA} = i_{LC} - i_{LA}$$

En appliquant la loi des mailles aux tensions du côté de l'onduleur, les équations des courants peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{iAB}}{dt} = -\frac{1}{Lf}.V_{LAB} - \frac{1}{Lf}.(V_{iAB}) \\ \frac{di_{iBC}}{dt} = -\frac{1}{3.Cf}.V_{LBC} - \frac{1}{Lf}.(V_{iBC}) \\ \frac{di_{iCA}}{dt} = -\frac{1}{3.Cf}.V_{LCA} - \frac{1}{Lf}.(V_{iCA}) \end{cases}$$

En appliquant la loi des mailles du côté charge, les équations des tensions peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = L_r.\frac{di_{LA}}{dt} + R_c.i_{LA} - L_c.\frac{d_{LB}}{dt} - R_c.i_{LB} \\ V_{BC} = L_r.\frac{di_{LB}}{dt} + R_c.i_{LB} - L_c.\frac{d_{LC}}{dt} - R_c.i_{LC} \\ V_{CA} = L_r.\frac{di_{LC}}{dt} + R_c.i_{LC} - L_c.\frac{d_{LA}}{dt} - R_c.i_{LA} \end{cases}$$

on peut être récrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LAB} + \frac{1}{L_c}.V_{LAB} \\ \frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LBC} + \frac{1}{L_c}.V_{LBC} \\ \frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LCA} - \frac{1}{L_c}.V_{LCA} \end{cases}$$

Par conséquent, nous pouvons écrire les équations sous forme matricielle, respectivement :

$$\begin{cases} \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.I_i - \frac{1}{3.Cf}.I_L \\ \frac{dI_i}{dt} = \frac{1}{Lf}.V_C + \frac{1}{Lf}.V_i \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L_r}.V_C + \frac{R_r}{L_r}.I_L \end{cases}$$

Bibliographies

[1] Bong-Hwan Kown, Tae-Woo Kim, Jang-Hyoun Youm, "A Novel SVM-Base Hysteresis Current Controller," IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 13. No. 2. March 1998.

[2] BOUZERIA HAMZA « Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque »thèse de doctorat, Université de Batna, 2016.

[3] Abdulkadir M. "Modeling and Simulation based Approach of Photovoltaic system in Simulink model". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.7(5):616-623. 2012.

[4] Adbullah M.A. "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16: 3220-3227, June. 2012.

[5] Safari and S. Mekhilef. "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 58: 1154-1161, April. 2011.

[6] Zegaoui. "Comparison of two maximum power point trackers by simulating of PV generators", Science Direct. pp. 678-687. 2011.

[7] Walker G. "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model". Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, IE Aust. 21(1): 49-56. 2001.

[8] Céline BERNARD, Carolina SEBRAO – OLIVEIRA, Bernard LAVAL, Clément VAUDOUER " Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT a base de logique floue " Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 – Energie renouvelables. Université de Compiegne. France, 2009.

[9] A. Ricaud "Photopiles solaires: de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2001.

[10] A. Labouret, "Cellules solaires: les bases de l'énergie photovoltaïque", Ed. Dunod, Paris, 2001.

[11] Michel Pinard, "Convertisseurs et électronique de puissance commande, description, mise en oeuvre", Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p.116. 2002.

[12] Hannes Knopf. "Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle. Master of Science in Electrical and Computer Engineering". Portland State University 1999.

[13] Michel Pinard, "Convertisseurs et électronique de puissance commande, description, mise en oeuvre", Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p.118. 2002.

[14] Muhammad H.Rachid "Power Electronics, circuits, devices, and applications", Prentice Hall, Englewood CM s , New Jersey 1993.

[15] K-Taniguchiand Klrie "Trapezoidd modulatingsignai for tree-phase ML1 inverter D". IEEE Transistors on industrial Electronics, Vol. IE3, N"2, pp 193-200. 1986.

[16] B.K. Bose, "Power electronics drives". Printice Hall Edition, 1986.

[17] Sidney R. Bowes, Yen-Shin Lai, "The relation Between Space- Vector Modulation and Regular-Sampled PW" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no 5, October 1997.

[18] H. van der Broeck, H. Skudelny and G. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors" rEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. l, 1988.

[19] Bong-Hwan Kown, Tae-Woo Kim, Jang-Hyoun Youm, "A Novel SVM-Base Hysteresis Current Controller," IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 13. No. 2. March 1998.

[20] M. khafallah, "Etude comparative des performances de la modulation sinusoïdale régulière et la modulation vectorielle d'un onduleur à MU", CCECE/CCGEI, Saskatoon, May 2005.

[21] S. Aït cheikh. "Etude, Investigation et Conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques". Thèse de doctorat. Ecole National Polytechnique Elharach. 2007.

[22] DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières textes officiels; "Installations solaires photovoltaïques raccordées au réseau".
www.industrie.gouv.fr

[23] A. Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system". Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Master of Science in Electrical

Engineering. Faculty of California Polytechnic State University. San Luis Obispo September 2005.

[24] **C**.Cabal '' Optimation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque '' Mémoire de doctorat Université Toulouse III-Paul Sabatier le 15 décembre 2008.

[25] Ionel Vechiu « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » thèse de doctorat 2005.

[26] Angel Cid Pastor « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques »thèse de doctorat l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[27] Dan Telteu-Nedelcu « similation des systèmes électriques de puissance une approche mécatronique » thèse de doctorat en sciences appliquées université de Louvain .

[28] Mohand Mokhtari,Nadia Martaj « electronique appliquée, electromécanique sous simscape & simpower systems (Matlab/simulink) ».

[29] M. LOUZAZNI1, E. AROUDAM1 H. YATIMI1 « Modélisation et simulation d'une source d'énergie solaire à 3kW pour une énergie propre sans pollution » Université Tétouan, Maroc,10.1050/matecconf/20141103017.

[30] BOUZERIA HAMZA « MODELISATION ET COMMANDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE »thèse de doctorat,universté de Datna,2016 .

[31] david irwin , muhammad H.RASHID « power electronics handbook University of west florida joint program and computer engineering , copyright 2001 by academic press.

[32] D.B.Riffel, R.G.V De Oliveira, S.B.Esquinta. 'Control Method Of A Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant Without Batteries Based On Maximum Power Point Tracking', IEEE

[33] MEHIMMEDETSI Boudjemâa « Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque »thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE,2007.

[34] david irwin , muhammad H.RASHID « power electronics handbook University of west florida joint program and computer engineering , copyright 2001 by academic press.

[35] Philippe Barrade « Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires »presses polytechnique et universitaire romandes

[36] Philippe Barrade « Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires »presses polytechnique et universitaire romandes

[37] T. Esram, P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”, IEEE Transactions On, Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439-449, Jun. 2007.

[38] D. P. Hohm, M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms using anexperimental programmable, maximum power point tracking test bed”, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000 pp. 1699-1702, Sept. 2000.

[39] Salim ABOUDA « contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: Application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, université de Sfax, 2015.

[40] BOUZERIA HAMZA « Modélisation et commande d’une chaine de conversion photovoltaïque »thèse de doctorat, Université de Batna, 2016.

[41] François Badin « les véhicules hybrides des composants au système »édition technip

[42] Philippe Barrade, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire", press polytechnique et universitaires, 1ére édition 2006.

[43] Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006.

[44] François Badin « les véhicules hybrides des composants au système »édition technip

[45] Philippe Barrade, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire", press polytechnique et universitaires, 1ére édition 2006.

[46] Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006.

[47] F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d’une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.

[48] Yhirru Hans- Pierre Guyénot « Automatique : réulations et asservissements » lavoisier hermes.

[49] Yann Pankow « étude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque » thèse de doctorat, université de Lille ,2006

[50] Christian MANNIN0 « Architecture configurable d'une boucle à verrouillage de phase totalement numérique : application à la mesure de gigue et de la dérive en fréquence en télévision numérique »thèse de doctorat,unversité de Henri Poincaré - Nancy 1,2006

[51] A. Rennane et D. Saheb – Koussa « **Evaluation des performances de la boucle à verrouillage de phase (PLL) pour l'interconnexion d'une source d'énergie renouvelable au réseau électrique »** *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°2 (2014) 227 – 243,*

[52] A. Ghoshal and J. Vinod, '*A Method to Improve PLL Performance Under Abnormal Grid Conditions*', In: National Power Electronics Conference 2007. Indian Institute ofScience, Bangalore, 2007.

[53] V. Kaura and V. Blasko, '*Operation of a Phase Looked Loop System Under Distorted Utility Conditions*', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N°1, pp. 58 – 63, 1997

[54] C. Benhabib S. Saadate. A new robust experimentally validated phase locked loop for power electronic control. In EPE Journal, Vol. 15, n. 3, 2005.

[55] Z. Ye, R.W., L. Garces, R. Zhou, L. Li and T. Wang, Study and Development of Anti-Islanding Control for Grid-Connected. General Electri GlobalResearch Center Niskayuna, New York, National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard.

[56] Christian MANNIN0 « Architecture configurable d'une boucle à verrouillage de phase totalement numérique : application à la mesure de gigue et de la dérive en fréquence en télévision numérique »thèse de doctorat,unversité de Henri Poincaré - Nancy 1,2006

[57] Cheikh, S.A., Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques Thèse de doctorat, Ecole National Polytechnique El-Harrach, Décembre 2007.

[58] Yhirru Hans- Pierre Guyénot « Automatique : réulations et asservissements » lavoisier hermes.

[59] Yann Pankow « étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque » thèse de doctorat, université de Lille ,2006