

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :


MODÉLISATION, CONTRÔLE, ET SIMULATION D'UN MICRO RÉSEAU BASÉE SUR UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC UN CONVERTISSEUR DE TENSION VSC

Présenté par :

- BIDA Souheyla
- BENZELLAT Houda
- ACHOURI Nadjate

Soutenu le : ...19/06/2020..... devant le Jury :

<i>M. HABCHI Yassine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. LAOUER Mohamed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. BRAHIMI Mohammed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

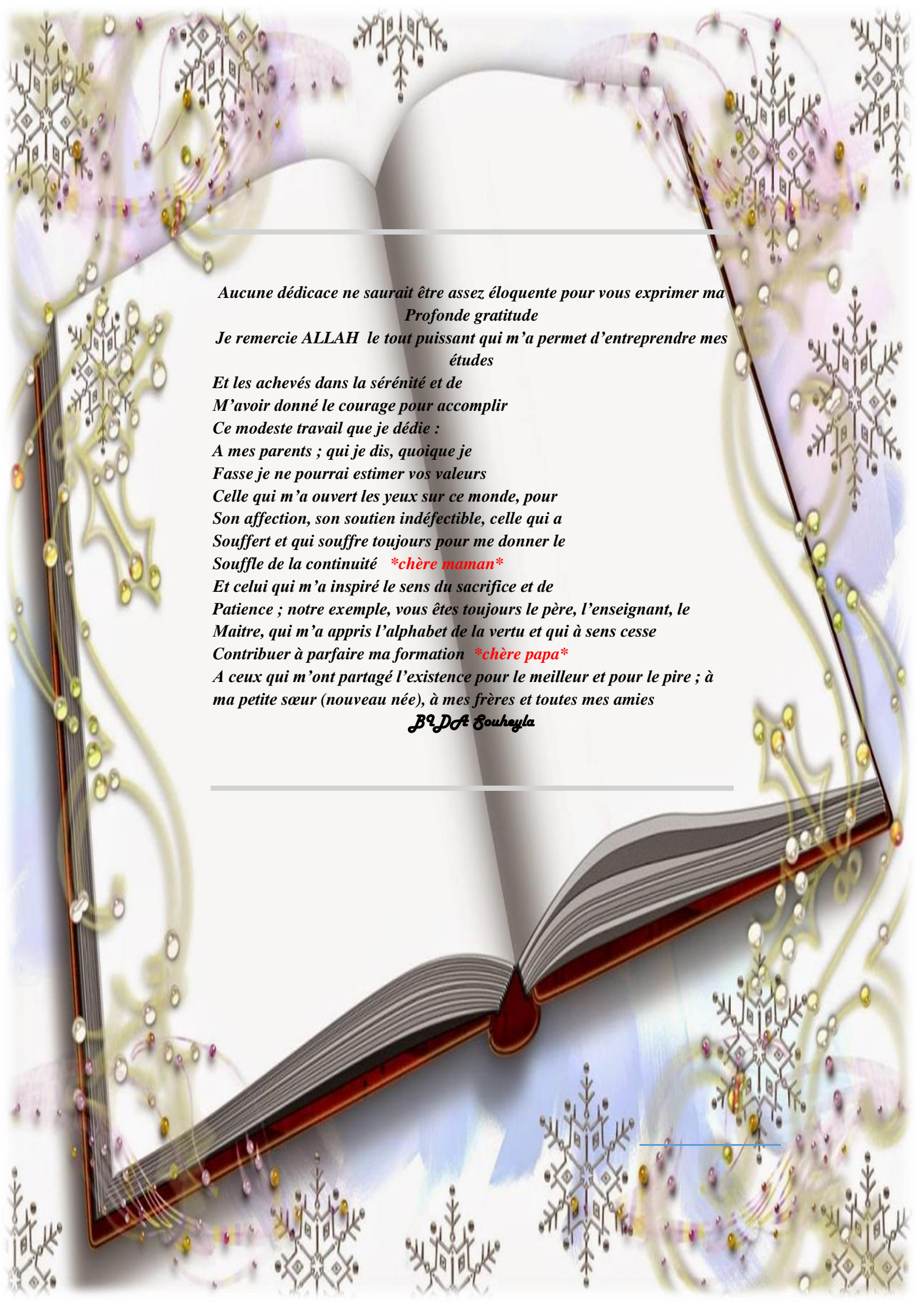
An open book with a dark red cover is the central focus, lying flat. The pages are white and mostly blank, with a semi-transparent white rectangular box overlaid on the right page containing text. The background is a soft, light blue and white gradient, decorated with numerous white snowflakes of various sizes and intricate patterns. Interspersed among the snowflakes are colorful garlands with small, round beads in shades of purple, yellow, and white. The overall composition is festive and elegant.

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour vous
exprimer ma
Profonde gratitude*

*Ma défunte maman, je te dédie ce modeste travail les
fruits de tes longues années de sacrifices, tu t'étais
toujours investie et soucieuse de ma réussite dans les études
ainsi que mon bonheur, je t'exprime plus que jamais mes
profondes reconnaissances, que Dieu t'accueille dans son
vaste paradis.*

*Mon père : toi qui a fait de moi ce que je suis maintenant
tu t'es privé de tellement de choses afin de me satisfaire,
aucune dédicace ne saurait exprimer le respect que j'ai
pour toi. Je dédie ce modeste travail à mes sœurs et frère
et à toute ma famille et à mes meilleurs amis*

ACHOUR Nadjate



*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour vous exprimer ma
Profonde gratitude*

*Je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a permis d'entreprendre mes
études*

Et les ai achevés dans la sérénité et de

M'avoir donné le courage pour accomplir

Ce modeste travail que je dédie :

A mes parents ; qui je dis, quoique je

Fasse je ne pourrai estimer vos valeurs

Celle qui m'a ouvert les yeux sur ce monde, pour

Son affection, son soutien indéfectible, celle qui a

Souffert et qui souffre toujours pour me donner le

*Souffle de la continuité ***chère maman****

Et celui qui m'a inspiré le sens du sacrifice et de

Patience ; notre exemple, vous êtes toujours le père, l'enseignant, le


Maitre, qui m'a appris l'alphabet de la vertu et qui à sens cesse

*Contribuer à parfaire ma formation ***chère papa****

A ceux qui m'ont partagé l'existence pour le meilleur et pour le pire ; à

ma petite sœur (nouveau née), à mes frères et toutes mes amies

B⁹D⁹A Souheyla



À qui je préfère, et pourquoi pas; Elle s'est sacrifiée pour moi Elle n'a ménagé aucun effort pour me rendre toujours heureuse (L'amour de ma mère).

Nous marchons sur les chemins de la vie, et il reste qui contrôle nos esprits dans chaque chemin que nous empruntons Le propriétaire du bon visage et des bonnes actions. Il ne m'a pas épargné toute sa vie (Mon cher père).
À mes amis et à tous ceux qui se tenaient à côté de moi et m'ont aidé avec tous leurs biens, à plusieurs niveaux Cette recherche vous est présentée, et j'espère qu'elle vous satisfera

BENZELLAT

HOUDA

Remerciement

Ce travail a été réalisé dans le cadre de préparation du projet de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique spécialité énergies renouvelables. Il n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien de nombreuses personnes que nous aimerions à remercier.

Nous aimerions tous d'abord à remercier notre encadreur Mr. Laouer qui nous a encouragé pour suivre nos travaux de recherche dans le cadre de ce mémoire, qui grâce à sa disponibilité et ses rigoureux conseils. Sans oublier nos honorables professeurs qui nous ont accompagnés pendant toutes ces années.

*Nous remercions également notre famille et tous nos amies et amis de la promotion 2019*2020 pour leur soutien et les moments agréables que nous avons passé ensemble.*

BENZELLAT HOUDA

BIDA SOUHAYLA

ACHOURI NADJATE

Résumer

Les énergies renouvelables en général et le photovoltaïque en particulier sont souvent considérés comme des solutions alternatives durables aux problèmes actuels de la ressource énergétique, au moins dans le domaine d'électricité.

Notre projet étudie étape par étape la conception, la modélisation, le contrôle et la simulation d'un micro-réseau basé sur plusieurs éléments avec une attention particulière au système photovoltaïque (PV) et aux convertisseurs de source de tension (VSC).

Dans un premier temps, ce mémoire présente une généralité sur le système étudié, en suite la modélisation et la simulation et présentation des résultats.

On a effectué l'étude du fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale en utilisant l'hacheur survolteur commandé par la technique MPPT pour but d'améliorer le rendement de puissance du système, puis on raccorde ce système a un micro-réseau

Abstract

Renewable energies in general and photovoltaics in particular are often considered as sustainable alternative solutions to the current problems of the energy resource, at least in the field of electricity. Our project studies step by step the design, modeling, control and simulation of a micro-network based on several elements with particular attention to the photovoltaic system (PV) and voltage source converters (VSC).

Initially, this thesis presents a generality on the studied system, then modeling and simulation and presentation of the results.

We carried out the study of the operation of the photovoltaic generator at its maximum power using the booster chopper controlled by the MPPT technique in order to improve the power efficiency of the system, then we connect this system to a micro-network

ملخص

غالبًا ما تُعتبر الطاقات المتجددة بشكل عام والخلايا الكهروضوئية على وجه الخصوص حلولًا بديلة مستدامة للمشكلات الحالية لموارد الطاقة ، على الأقل في مجال الكهرباء

يدرس مشروعنا خطوة بخطوة نمذجة و محاكاة لشبكة صغيرة تعتمد على عدة عناصر مع إيلاء اهتمام خاص للنظام الكهروضوئي (PV) ومحولات مصدر الجهد. (VSC)

في البداية ، تقدم هذه المذكرة عمومية على النظام المدروس ، ثم النمذجة والمحاكاة وعرض النتائج.

درسنا تشغيل المولد الكهروضوئي بأقصى طاقته باستخدام المروحية الداعمة التي تتحكم فيها تقنية MPPT لتحسين كفاءة الطاقة في النظام ، ثم نربط هذا النظام بشبكة صغيرة

Table des figures

Figure	Titre	page
Fig.I.1	Module photovoltaïque	03
Fig.I.2	principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule Photovoltaïque	03
Fig. II.1	Tension de circuit ouvert	10
Fig. II.2	Courant de court-circuit	10
Fig. II.3	Générateur photovoltaïque avec résistance parallèle	11
Fig. II.4	Simulink modèle de panneau PV	14
Fig. II.5	caractéristique $I=f(V)$	14
Fig. II.6	caractéristique $P=f(V)$	15
Fig. II.7	Influence de R_s sur les caractéristiques $I(V)$	15
Fig. II.8	Influence de R_s sur la caractéristique $P(V)$	15
Fig. II.9	Influence de R_p sur la caractéristique $I(V)$	16
Fig. II.10	Influence de R_p sur la caractéristique $P(V)$	16
Fig. II.11	Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$	17
Fig. II.12	Influence de la température sur la caractéristique	17
Fig. II.13	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I(V)$	18
Fig. II.14	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P(V)$	18
Fig. II.15	les différents types de convertisseurs statiques	20
Fig. II.16	Symbole d'un convertisseur DC-DC	21
Fig. II.17	Schéma électrique de convertisseur survolteur	22
Fig. II.18	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost	22

Fig. II.19	Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	23
Fig. II.20	Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	23
Fig. II.21	Schéma électrique du convertisseur dévolteur	24
Fig. II.22	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.	24
Fig. II.23	Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé.	25
Fig. II.24	Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert	25
Fig. II.25	Schéma du convertisseur dévolteur-survolteur	26
Fig. II.26	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck-boost	26
Fig. II.27	Schéma électrique d'un hacheur Buck- boost fermé	27
Fig. II.28	Schéma électrique d'un hacheur Buck- boost ouvert	27
Fig. II.29	Schéma block d'un hacheur sur Matlab/Simulink	28
Fig. II.30	Allure de la tension de commande de l'interrupteur	28
Fig. II.31	Bloc diagramme d'un contrôleur MPPT pour un système photovoltaïque	29
Fig. II.32	Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM	30
Fig. II.33	Algorithme incrémental conductance	31
Fig. II.34	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	32
Fig. II.35	Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé et son entrée et sortie	32
Fig. II.36	Structure d'un onduleur triphasée	33
Fig. II.37	Schéma block d'un onduleur monophasé « commande plaine onde avec charge R »	35
Fig. II.38	Schéma block d'un onduleur monophasé « commande plaine onde avec charge « RL »	36

Fig. II.39	gauche: modèle réel du VSC.figure droite: modèle simplifié du VSC.	37
Fig. II.40	Modèle équivalent du côté AC du convertisseur VSC	37
Fig. II.41	Schéma de contrôle VSC pour un système PV	38
Fig. II.42	Schéma de contrôle côté réseau VSC pour le système d'énergie renouvelable	39
Fig. II.43	Graphique supérieur : Vitesse angulaire électrique réelle (rouge) vs estimée (bleue) ; Graphique inferieur : Angle PLL «erreur= angle de réseau réel moins angle de réseau estimé.	39
Fig. II.44	Points de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque avec différents types de charges en connexion directe	42
Fig. II.45	Étage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un générateur photovoltaïque et une charge pour le transfert du PPM	42
Fig. II.46	Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique	43
Fig. II.47	Système de tensions triphasé équilibré	44
Fig. II.48	schéma block d'un réseau triphasé sur Matlab/Simulink	45
Fig. II.49	Les trois tensions d'un réseau électrique	45
Fig.III.1	Schéma synoptique de système PV raccordé au micro-réseau	49
Fig.III.2	Caractéristiques I-V et P-V de PV array	50
Fig.III.3	Les allures de puissance tension rapport cyclique et irradiance «Boost »	51
Fig.III.4	Les allures de tension de références « VSC Contrôleur »	52
Fig.III.5	L'allure de tension Vab de VSC Contrôleur (Onduleur)	52
Fig.III.6	L'allure de puissance de réseau électrique	52
Fig.III.7	Les allures de tension et courant de réseau électrique	53

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau.I.1	Technologies des cellules photovoltaïques	04
Tableau.I.2	Les avantages et les inconvénients d'un Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus DC	07
Tableau.I.3	Les avantages et les inconvénients d'un Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus AC	07
Tableau.II.1	Paramètres pour la simulation d'un générateur PV	14
Tableau.II.2	Résumé du fonctionnement de l'algorithme Inc&Cond	31
Tableau.III.1	les configurations des systèmes PV	46
Tableau.III.2	Caractéristiques des composants utilisées	47

Listes d'abréviations

I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{oc}	Tension de circuit ouvert (V)
V	Volte « unité de tension »
KV	Kilo Volte « unité de tension »
PV	Panneau Photovoltaïque
DC	Direct Curent (Courant Continu (CC))
AC	Alternatif Curent (Courant Alternatif (CA)).
MPPT	Maximum Power Point Tracking
TGBT	Société de transport d'énergie électrique basse tension
P_m	Puissance maximale
R_s	Résistance série
R_p	Résistance parallèle
G	Rayonnement solaire
MLI	Modulation de largeur
R	Résistance
L	Inductance
VSC	Voltage source converter
T	Température (C°)
PLL	Boucle de verrouillage
IGBT	thyristor
P&O	Perturbation et Observation
Inc&Cond	Incremental conductance
KW	Kilo Watt « unité de puissance »
A	Ampère « unité de courant »
KW/m²	Kilo watt par mètre carré « unité de l'éclairement »
V_{mpp}	Tension équivalente la puissance maximale de PV module
I_{mpp}	Courant équivalent la puissance maximale de PV module

Introduction générale

De nos jours, les énergies renouvelables jouent un rôle important dans le remplacement des ressources énergétiques fossiles conventionnelles. L'énergie photovoltaïque est l'une des ressources énergétiques renevoulables très prometteuse qui a connu une croissance rapide au cours de ces dernières années.

Le photovoltaïque a un problème majeur et qui est qu'avec la variation des conditions de fonctionnement du réseau, la tension à laquelle la puissance maximale peut en être obtenue, change également.

Le système PV raccordé au réseau électrique peut servir à fournir d'importantes quantités d'énergie. Cependant, cela nécessite un énorme investissement qui rend le coût de l'électricité produite très élevé. Hormis ses avantages, l'énergie solaire présente quelques inconvénients, par son intensité variable, son caractère intermittent et son coût. La modélisation et la simulation de systèmes utilisant ses énergies sont donc nécessaires pour pouvoir optimiser le rendement de la production.

Le présent mémoire étudie pas à pas la conception, la modélisation, le contrôle et la simulation d'un micro-réseau basé sur plusieurs éléments avec une attention particulière au système photovoltaïque et aux convertisseurs de source de tension(VSC)

Notre travail se compose de trois chapitres :

Dans le chapitre **I**, nous présenterons des généralités sur le photovoltaïque, sur les convertisseurs, et système de stockages ainsi que la description d'un micro-réseau et ses architectures

Le chapitre **II** sera consacré à la modélisation, et à la simulation de tous les éléments du système étudié (le panneau photovoltaïque, le hacheur, Régulateur, la batterie et enfin le réseau).

Le chapitre **III** sera consacré à la simulation du système global constituant le micro-réseau.

Evidemment, le mémoire sera enveloppé par respectivement une introduction et une conclusion générales.

CHAPITRE I

Généralités sur le photovoltaïque

I.1 Introduction

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Ce dernier est la plus jeune des énergies renouvelables et d'avoir l'avantage d'être non polluante, souple et fiable.

Dans ce chapitre nous décrirons la conception d'un système photovoltaïque

I.2 Historique et développement [3]

L'effet photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Le mot "Photovoltaïque" vient du mot grec "photos" (lumière) et de "volta" nom du physicien italien qui découvrit la pile électrique.

- 1839: C'est le savant français Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891) le premier qui mit en évidence les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Il le décrit dans un "Mémoire" sur les effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaires.
- 1873: L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photosensibles du sélénium
- 1877: W.G. Adams et R.E. Day expliquent l'effet photovoltaïque du silicium.
- 1883: Charles Fritts construit la première cellule en silicium et en or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.
- 1905: Albert Einstein publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.
- 1911: Wilhelm Ostwald, prix Nobel de chimie en 1909, «en reconnaissance de ses travaux sur la catalyse et pour ses recherches touchant les principes fondamentaux gouvernant l'équilibre chimique et les vitesses de réaction ».
- 1918: Le scientifique polonais Jan Czochralski développe un procédé pour créer du silicium monocristallin.
- 1939: L'ingénieur américain Russel Ohl (1898-1987) découvre la jonction P-N.
- 1954: Les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller mettent au point une cellule photovoltaïque en silicium pour les laboratoires Bell.
- 1955 : Des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les *laboratoires Bell Telephone* (devenus aujourd'hui *Alcatel-Lucent Bell Labs*) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %.
- 1958: Première utilisation spatiale de photopiles solaires dans le satellite américain Vanguard.
- 1958: Le satellite Sputnik III s'est équipé de cellules photovoltaïques.
- 1971: Elliot Berman crée la société Solarpower pour développer des applications terrestres pour les modules photovoltaïques
- 1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à

l'Université de Delaware.

- 1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie
- 1990 : En Californie, 1er système photovoltaïque commercial raccordé au réseau
- 2000 : First Solar construit la plus grande usine de panneaux solaires à Perrysburg(Ohio) :100MW produits par an
- Juillet 2016 : Fin du tour du monde par l'avion Solar impulse
- Septembre 2016 : Naissance de la nouvelle plateforme ISWT Nantes

I.3 Production de L'énergie photovoltaïque [4]

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

I.4. Constitutions du système photovoltaïque raccordé au micro-réseau

I.4.1.Générateur photovoltaïque [4]

Un générateur ou module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires interconnectées et protégées de l'extérieur par une structure composée essentiellement d'un verre et d'un cadre rigide montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{oc}).

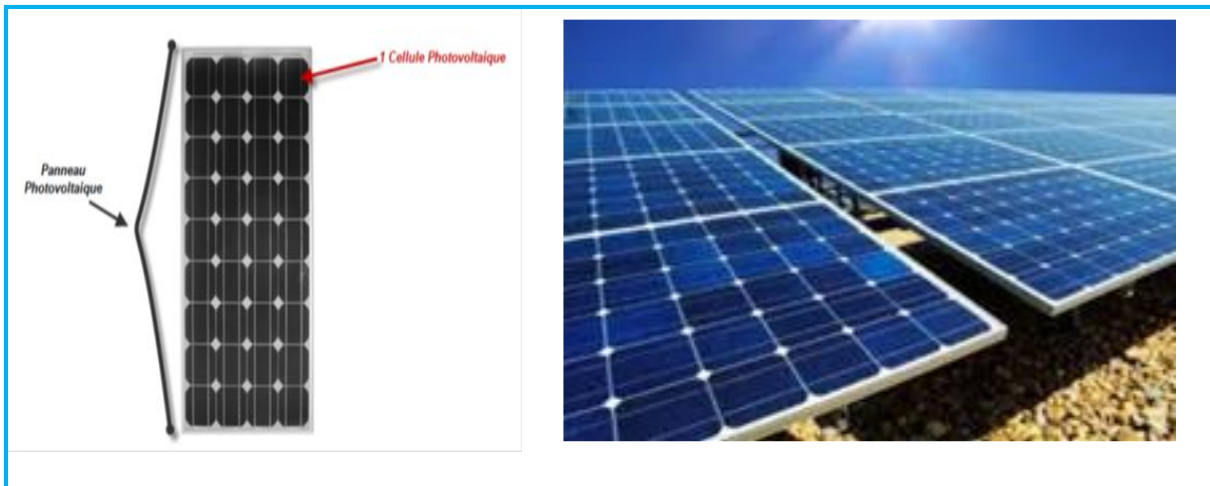


Fig I.1 : Module photovoltaïque

I.4.1.1. Effet photovoltaïque [5] et [6]

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque), qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

-Comme le montre la figure suivante

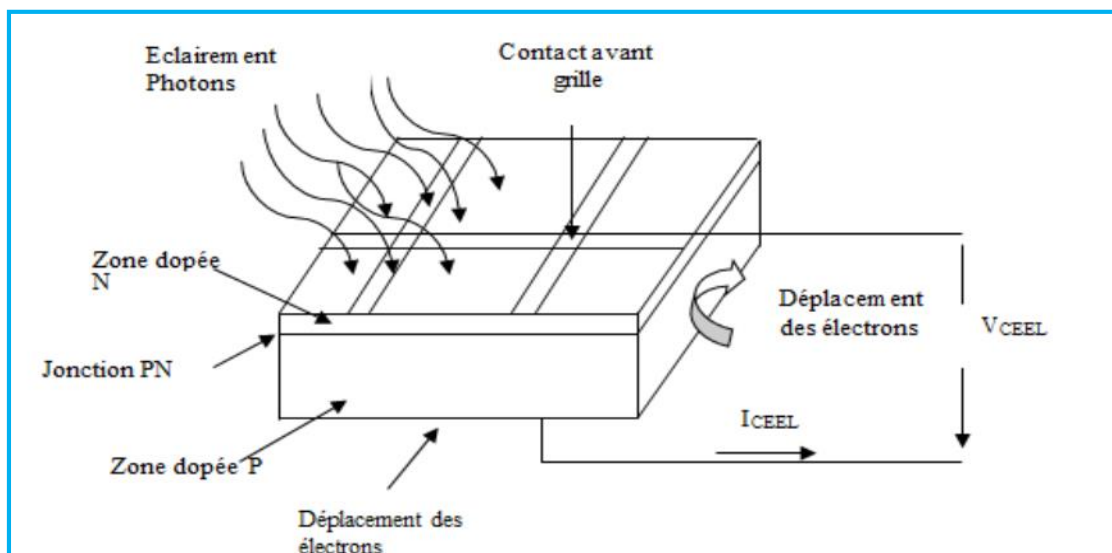


Fig.I.2 : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule Photovoltaïque

I.4.1.2. Cellule photovoltaïque [7]

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d’une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l’énergie lumineuse en énergie électrique.

I.4.1.3. Technologies des cellules photovoltaïques [8]

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Technologies des cellules photovoltaïques

Génération	Type	Rendement	Durée de vie	Principales utilisation
1 ^{ère} génération	Silicium monocristallin	12-20%	30ans	Spatiales, modules pour toits, façades...
	Silicium poly cristallin	11-15%	30ans	Modules pour toits, façades, générateurs, Fermes au sol...
2 ^{ème} génération	Silicium amorphe	5-10%	10ans	Appareils électronique, intégration dans le bâtiment
	Silicium cristallin en couche mince	7%	-	Production Industrielle
	CIS	9-11%	>20ans	Intégration dans le bâtiment

	CdTe	6-10%	>20ans	Appareils électronique, intégration dans le bâtiment, fermes au sol
3 ^{ème} génération	Cellule organique	5.9% en laboratoire	-	En cours de développement
	Cellule de Grätzel(CIGS)	19.9% en laboratoire	-	Spatiales, intégration dans le bâtiment
4 ^{ème} génération	Cellule multi jonction	Environ 40%	-	ce type n'est pas commercialisable

I.4.2.Régulateur de charge et décharge [9]

Le régulateur électronique dans un système photovoltaïque gère la charge et la décharge de la batterie. Ainsi que tous les composants alimentés partir de la source solaire. Il limite la tension de la batterie afin d'éviter une surcharge, en déconnectant la batterie trop chargée des modules PV. Quand la batterie est trop déchargée, il la déconnecte de l'utilisation par un disjoncteur automatique pour la protéger contre la décharge profonde. Prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie qui est le seul composant fragile du générateur photovoltaïque assurant le stockage de l'énergie électrique.

I.4.3.Batterie d'accumulation (Moyen de stockage) [10]

Dans un système photovoltaïque, la ressource solaire ne pouvant être disponible à tout moment, il est indispensable de stocker de manière journalière ou saisonnière de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. On utilise pour cela des batteries d'accumulateurs. Les batteries les plus courantes sont de type plomb-acide a plaque plane pour les installations de faible puissance. Il existe aussi des accumulateurs de type nickel-cadmium qui est chères et qui posent des problèmes de régulation de tension. A long terme, on pourra voir apparaitre d'autres systèmes de stockage. La batterie est constituée essentiellement des deux électrodes l'une positive et l'autre négative et une solution électrolytique : solution d'acide sulfurique de viscosité variable.

Nous pouvons associer plusieurs batteries en série pour obtenir une tension adaptée à l'utilisation et satisfaire les besoins. Les tensions des batteries seront déterminées par rapport à celle qui sera adaptée aux récepteurs à courant continu et la tension des modules. Le nombre de batterie sera déterminé à partir de l'autonomie désirée.

I.4.4. Onduleur de tension (DC/AC) [11]

La tension produite par les modules photovoltaïques est continue et celle fournie par les batteries pour l'alimentation des charges est aussi de nature continue. Dans ces conditions, il faudra intégrer obligatoirement un onduleur au système PV destiné à alimenter des charges alternatives. L'onduleur est un convertisseur DC/AC, c'est-à-dire convertir la sortie continue (DC) du champ de module ou des batteries en électricité alternative (AC) standards comme celle fournie par la SONELGAZ.

I.4.5. Contrôleurs (DC/DC) (hacheur) [12]

Il est possible que dans un système PV, la tension de sortie du champ ou de la batterie soit inférieure ou supérieure à celle de l'usage, qui doit être assurée en continu. Il est donc nécessaire pour ces systèmes, un convertisseur DC/DC qui transforme une tension continue de son entrée en une tension de sortie continue inférieure ou supérieure à celle de l'entrée selon qu'il soit abaisseur ou élévateur. Il permet de contrôler le signal d'alimentation de la charge et le stabilise. Les câbles relient électriquement tous les composants du système PV. Le câblage est un point critique de toute installation PV. Il est très important de bien dimensionner les conducteurs afin d'éviter la circulation d'un courant très fort dans les câbles même pour de petites puissances dans le cas d'utilisation de faibles tensions. Le choix des câbles dont l'enveloppe est adaptée aux conditions d'utilisation est nécessaire.

I.4.6. Récepteurs et charges [13]

Les récepteurs ou charges (utilisation) font partie du système PV. Leurs tensions d'usage et leurs puissances déterminent les caractéristiques des éléments du système. Les récepteurs doivent être choisis avec soin. Lorsque c'est possible, il faut choisir les récepteurs de grand rendement. Après le choix des charges à alimenter par notre mini-centrale PV, nous relèverons leurs caractéristiques qui nous permettront de déterminer la puissance à installer.

I.5. L'architecteur de Micro-réseau

-Micro-réseau

Un micro réseau est un système énergétique discret composé de sources d'énergie réparties et de charges capables de fonctionner en parallèle ou indépendamment du réseau électrique principal.

L'objectif principal est d'assurer une sécurité énergétique locale, fiable et abordable pour les communautés urbaines et rurales. La distinction "autonome" fait référence au genre d'applications non raccordées au réseau et (ou) à l'autonomie de ces applications. La structure d'un micro-réseau autonome varie en fonction des contraintes de l'application. Néanmoins, quatre éléments sont souvent utilisés :

- Les sources (renouvelables, batteries, générateur diesel...etc.) ;
- Les convertisseurs de puissance (permettant le contrôle et la gestion du système) ;
- Les filtres d'interconnexions (assurant la transmission d'une énergie de qualité) ;
- Les charges (statiques, ou dynamiques).

Les potentialités d'un micro-réseau autonome sont évaluées suivant trois critères principaux :

- L'autonomie ;
- La qualité de l'énergie transitée ;
- La stabilité.

-Autonomie

Il est indispensable dans un système énergie renouvelable d'intégrer le système de stockage pour assurer l'autonomie de l'installation. En effet, la nature intermittente de ces sources, nécessite un système de soutien, dont le rôle est d'accumuler l'excédent d'énergie produite et de fournir le complément nécessaire lors d'un déficit de production. Toutefois, nous soulignons que l'adjonction de stockage peut s'avérer nécessaire même pour les applications raccordées au réseau.

-Architectures électriques d'un micro-réseau autonome

Selon la disposition de l'organe de stockage au jeu de barres continu ou au alternatif, on peut distinguer deux principales architectures.

a)Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus DC

Cette configuration est dite "Stand-Alone", cette configuration est une solution naturelle pour l'association de la plus part des sources (de nature DC) utilisées dans ce genre d'application (panneaux photovoltaïques, pile à combustible, éléments de stockage...etc.).

TableauI.2 : Les avantages et les inconvénients d'un Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus DC

Avantages	Inconvénients
-la simplicité à mettre en œuvre -La connaissance dans la gestion des flux énergétiques -Des remarques importantes concernant les durées de vie des éléments de stockage	- Toute la puissance transite par le convertisseur DC/AC ce qui induit un surdimensionnement de l'onduleur qui seul doit fournir les pointes de puissance

b) Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus AC

Cette structure, est moins courante que la première. Toutefois, quelques travaux ont montré la possibilité ainsi que les avantages d'une telle hybridation.

TableauI.3 : Les avantages et les inconvénients d'un Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus AC

Avantages	Inconvénients
-Répondre aux appels de charge sans remonter au bus continu -réduction des pertes de l'onduleur principal	-Nous ignorons l'impact de ce couplage sur la durée de vie des éléments de stockages (batteries).

I.6.Conclusion

Une brève description sur les systèmes photovoltaïque a été présentée dans ce chapitre, comme beaucoup d'énergies renouvelables, l'historique de développement de l'énergie solaire puis la présentation des principaux composants avec leur notions à savoir (cellules, modules, effet photovoltaïque, et les technologies de fabrication des cellules). Enfin, on termine ce chapitre par des courtes définitions des composantes d'un système photovoltaïque raccordé au micro-réseau ainsi que leur architecteur.

CHAPITRE II

Modélisation et simulation des éléments du système photovoltaïque

II.1.Introduction [16]

On a vu dans le chapitre précédent que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit génère 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* contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (*MPPT*).

Certains dispositifs utilisent l'énergie alternative pour les alimenter à partir d'un générateur photovoltaïque, pour cela on devra utiliser un convertisseur *DC-AC*. Il y a plusieurs commandes mais le principal objectif est d'avoir un signale sinusoïdale.

Dans ce chapitre, on va étudier quelques types des convertisseurs *DC-DC* et *DC-AC*, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrira la commande *MPPT* des convertisseurs *DC-DC* (la commande *Inc&Cond*) et des convertisseurs *DC-AC*(commande décalée).

II.2.Objectif général

- ✓ Modéliser et de simuler les éléments d'un système photovoltaïque raccordé au réseau dans l'environnement Matlab/Simulink en commençant par le petit composant qui est la cellule jusqu'au dispositif de raccordement au réseau électrique

II.3.La conception de tout système dépend de 6 tâches principales [20]

1. Type de l'installation
2. Type des charges (Load)
3. Type et capacité de l'onduleur (Invertor)
4. Type et capacité des batteries (Battery bank)
5. Spécification des panneaux PV
6. Autres exigences (Balance of system)

II.4.Les composants de l'installation et leurs Modélisations dans l'environnement Matlab/Simulink

II.4.1.Panneaux électriques

II.4.1.1.Définition [17]

Les modules présentent un assemblage de photopile(ou cellule) montés en série, afin d'obtenir la tension désirée (*12V, 24V...*).La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion du rayonnement. Plusieurs cellules sont associées dans un module qui est la plus petite surface de capacité transformable, montable et démontable sur un site. Les modules sont regroupés en panneaux, qui sont à leur tour associés pour obtenir des champs

photovoltaïques selon les besoins. Les cellules photovoltaïques sont réalisées principalement par le silicium cristallin, qui est utilisé sous forme monocristalline ou multi-cristalline en plaquette ou en ruban ou encore en couches semi-minces sur substrat selon les technologies récentes. Les modules sont associés en série et en parallèle pour obtenir des puissances importantes et la tension voulue. On protège chaque cellule **PV** contre l'échauffement en lui montant une diode dite « diode by-pass » en parallèle qui court-circuite. Aussi on évite qu'un module **PV** soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti retour » de chute de tension négligeable.

II.4.1.2. Caractéristiques du panneau PV [10]

II.4.1.2.a. Tension de circuit ouvert

C'est la tension continue obtenue aux bornes d'un panneau sous un ensoleillement constant sans aucune circulation de courant. On appelle cette tension la tension de circuit ouvert V_{oc} (Fig. II.1) d'où :

$$V_{oc} = N \cdot V_{ec}$$

II.1

Avec : N : le nombre de cellules,

V_{ec} : Tension d'une cellule élémentaire, elle dépend de la technologie utilisée et l'ensoleillement.

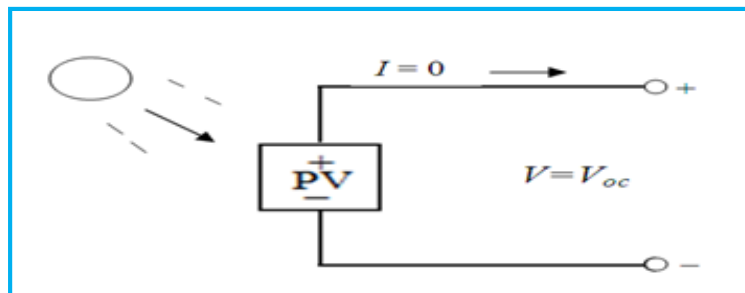


Fig. II.1: Tension de circuit ouvert

II.4.1.2.b. Courant de court-circuit

À l'opposé, le courant présent lorsqu'il n'y a aucune tension, appelée un courant de court-circuit (I_{cc}). Figure présente le schéma équivalent. Il est à noter que dans cette condition aucune puissance n'est extraite du panneau. C'est une caractéristique importante, car elle nous informe directement sur le niveau d'ensoleillement auquel le panneau est exposé.

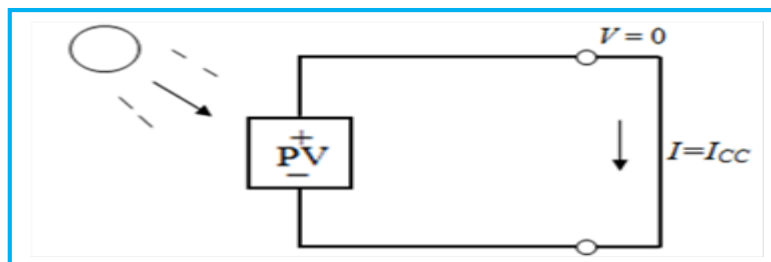


Fig. II.2: Courant de court-circuit

II.4.1.2.c. Facteur de forme

Il est défini comme le rapport de la puissance maximale délivrée par le module P_m à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de Court-circuit :

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le module est performant.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad II.2$$

II.4.1.2.d. Rendement

Le rendement μ est le rapport entre la puissance électrique fournie par le module et la puissance incidente (puissance lumineuse reçue):

$$\mu = \frac{P_m}{P_{incid}} \quad II.3$$

P_{incid} : est égale au produit de l'ensoleillement et la surface des n cellules qui compose le module.

II.4.1.3. Modélisation d'un module PV [10] et [30]

II.4.1.3.1. Simulation d'un panneau Photovoltaïque [18]

A. Modèle d'un panneau photovoltaïque

Un générateur ou module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

Pour caractériser les courants de fuites de la jonction des panneaux solaires qui sont la conséquence de l'état de surface le long de la périphérie des panneaux, on fait inclure une résistance en parallèle avec le modèle idéal. Le circuit équivalent pour ce modèle est représenté par la figure.

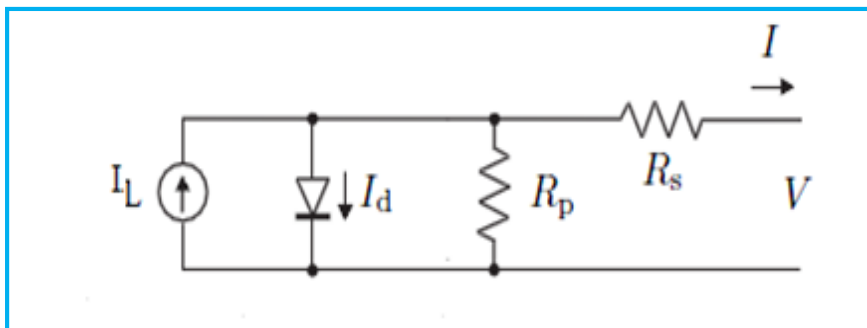


Fig.II.3: Générateur photovoltaïque avec résistance parallèle

I_L : photo courant crée par la cellule.

I : courant générer par la cellule PV.

I_d : le courant circulant dans la diode

I_P : le courant circulant dans la résistance R_P

R_P et R_s : deux résistances représentant les pertes « R_P : courant de fuite ; R_s : pertes par effet de joule »).

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

$$I = I_L - I_d - I_P \quad II.4$$

B. La photo courant

La photo courant est proportionnelle à l'éclairement et dépend aussi de la température, son expression est la suivante

$$I_L = [I_{cc} + K_i (T_{op} - T_{ref})] * G / G_0 \quad II.5$$

Avec:

I_{cc} : courant de court-circuit

K_i : coefficient de la température de c-c

G_0 : éclairement pour STC

T_{op} : température de fonctionnement de la cellule ; $T_{op} = [G * (N_{OCT} - 20 / 800) + T_{ref}]$

Où

N_{OCT} : étant la température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur.

T_{ref} : température référence de la cellule

C. Le courant de saturation

Le courant de saturation I_s dépend de la température, son expression est sous la forme

$$I_s = I_{cc} (T_{op} / T_{ref})^3 \exp [((q * E_g) / (A * K)) * (1 / T_{ref} - 1 / T_{op})] \quad II.6$$

Avec:

E_g : le GAP représente l'énergie de seuil

A : facteur d'idéalité de diode = 1.6

K : la constante de Boltzmann = $1.3854 \cdot 10^{-23}$ (j/k)

q : la charge électrique élémentaire « e^- » = $1.6 \cdot 10^{-19}$ (C)

D. Le courant de la jonction « Diode »

Son expression est donnée comme suit :

$$I_d = I_s (\exp [(V_d / V_{th})] - 1) \quad II.7$$

Avec: V_{th} : tension thermique

$$V_{th} = (A * K * T_{op}) / q \quad II.8$$

E. Le courant de la résistance parallèle

Son expression est donnée comme suit

$$I_{Rp} = V_d + R_s * I / R_p$$

II.9

Avec:

I_{Rp} : Le courant circulant dans la résistance R_p

V_d : Tension aux bornes de diode

Alors l'équation totale est

$$I = I_L - I_d - I_{Rp}$$

II.10

$$I = [I_{cc} + K_i (T_{op} - T_{ref})] * G / G_0 - I_s [exp (V_d / V_{th}) - 1] - V_d + R_s * I / R_p$$

Le schéma block réalisée dans l'environnement Matlab /Simulink [30]

**Dimensionnement d'un générateur [28]*

Le dimensionnement d'un convertisseur est fonction de l'application et des caractéristiques du générateur photovoltaïque utilisé. Dans ce cas, nous avons opté pour un hacheur boost, néanmoins l'étude aussi bien pu être menée pour un hacheur Buck,

Paramètres	Valeurs
La puissance maximale	190(Wc)
La tension Vmpp	36.14(V)
Le courant	5.26(A)
La tension de circuit ouverte	43.66(V)
Le courant de court -circuit	5.69(A)
Coefficient de température par rapport à la tension	-0.35%
Coefficient de température par rapport au courant	0.04%
Coefficient de température par rapport à la puissance	-0.45%

Rendement de panneau aux conditions STC	14.9%
Rendement de panneau à 200W/m ²	14.48%
N _{oct} (C°)	45 plus ou moins 2%
Nombre et type de cellule	72 cellules monocristallines
Dimensionnement de la cellule	125mm*125mm
Energie de gap E _g	1.12Ev
Coefficient d'idéalité	1.6

Tableau.II.1. Paramètres pour la simulation d'un générateur PV

- ✓ **Le système désiré doit assurer les contraintes du cahier des charges suivantes[28]**
 - Tension de sortie du convertisseur d'ordre **34 V**
 - Courant minimal de sortie du convertisseur doit être **0.5 A**
 - Ondulations de la tension d'entrée ne doivent pas dépasser les **0.1 Volts**
 - Ondulations tolérées pour la tension de sortie sont de **1 mV** ;
 - Ondulations du courant de sortie tolérées sont de **0,1A** ;
 - Fréquence de commutation du hacheur est fixée à **0.1Mhz**.

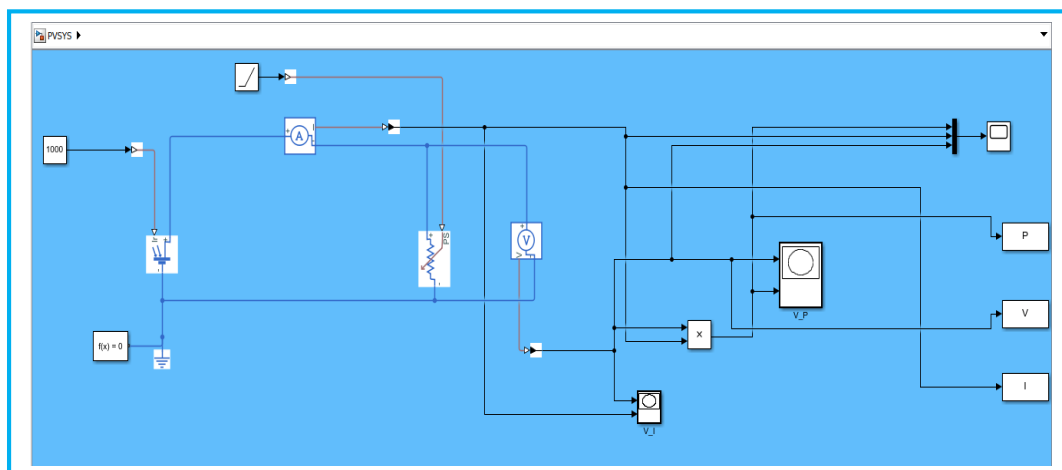


Fig.II.4: Simulink modèle de panneau PV

G. Les résultats obtenus « Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ »

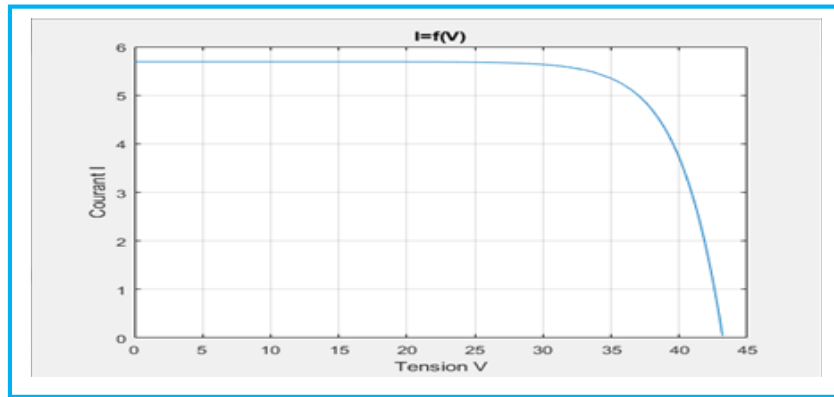


Fig.II.5: caractéristique $I=f(V)$

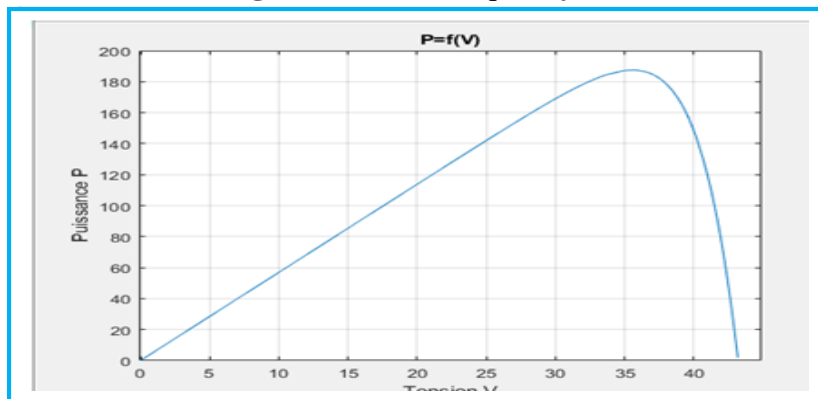


Fig.II.6: caractéristique $P=f(V)$

*On remarque que le courant est constant ($5.69A$) jusqu'à $V= 25.01V$ puis il diminue.

*On remarque que la puissance augmente ($187.5Wc$) à $V=35.82V$ puis elle diminue.

II.4.1.3.2. Influence des paramètres internes et externes sur les caractéristiques $[I(V), P(V)]$ d'une cellule photovoltaïques

N.B : en prend ces caractéristiques pour un cas idéale.

✓ **Paramètres internes**

- **Influence de la résistance série et parallèle [30] et [28]**

✚ Les figures montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristiques $[I(V), P(V)]$

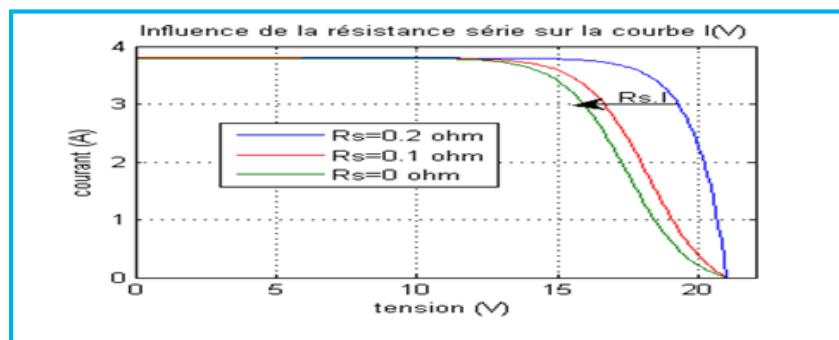


Fig.II.7: Influence de R_s sur les caractéristiques(V)

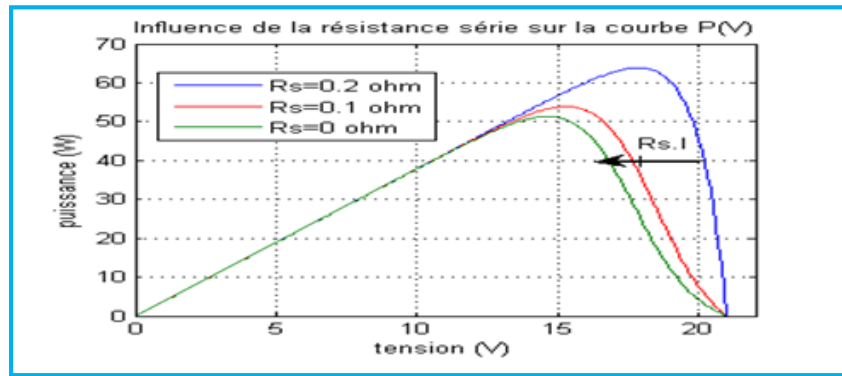


Fig.II.8:Influence de R_s sur la caractéristique $P(V)$

*Les figures montrent l’influence de la résistance série sur la caractéristiques de la cellule. Celle-ci se traduit par la diminution de la pente de $[I(V)]$ dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension pratiquement constant, et qui ne modifie pas la tension du circuit ouvert(V_{oc}). Mais lorsque R_s est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement le courant de court-circuit(I_{cc}).

Même si sa valeur est très petite, la résistance série R_s agit sur la pente de la courbe $I(V)$, et incline vers la gauche les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ selon la relation :

$$\Delta V = I \cdot R_s$$

II.12

Ce qui implique une perte de puissance donc une perte de rendement.

- Les figures montrent l’influence de la résistance parallèle sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$

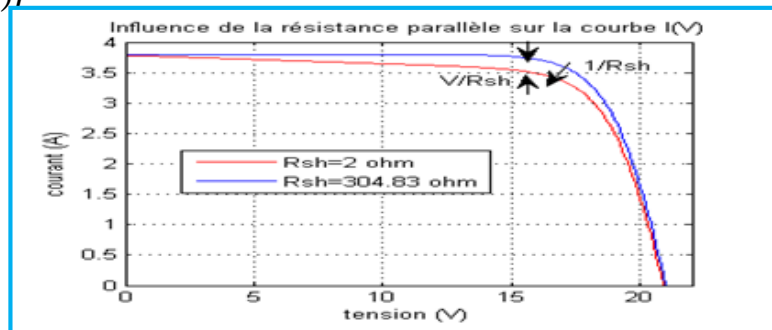


Fig.II.9: Influence de R_p sur la caractéristique $I(V)$

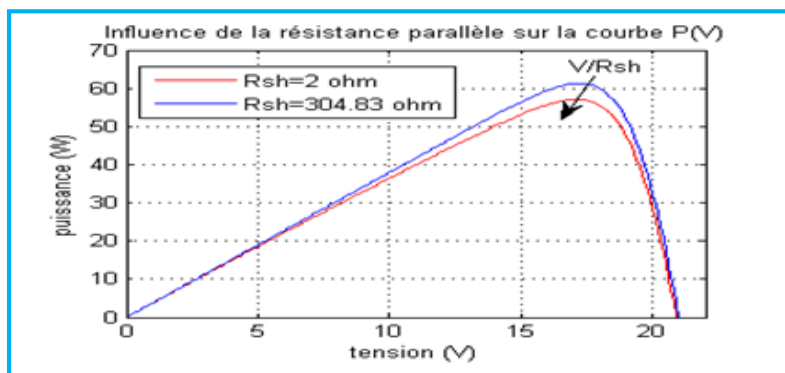


Fig.II.10: Influence de R_p sur la caractéristique $P(V)$

*Les figures montrent que le courant chute avec la diminution de la R_p selon la relation suivante

$$\Delta I = V/R_p$$

II.13

La résistance parallèle se traduit par une légère diminution de la tension de circuit-ouvert, et une augmentation de la caractéristique de la cellule dans la zone de fonctionnement en générateur de courant presque constant. La résistance R_p a pour origine les imperfections de la qualité de la jonction ($P-N$) et elle est responsable de l'existence des courants de fuite. Ce qui implique une perte de puissance donc une perte de rendement.

✓ **Paramètres externes**

- **Influence de la température et de l'ensoleillement sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$**

L'ensoleillement et la température ont un impact direct et non négligeable sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$ d'un panneau solaire photovoltaïque. Au fait une petite partie de l'ensoleillement qui atteint le module est convertie en électricité, le reste de l'énergie incidente se convertit en chaleur.

Le courant produit par la photopile (cellule) I_L est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire (G). Par contre, la tension V aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction ($P-N$) du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminue que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que

*La puissance optimale de la cellule P_m est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

*Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension

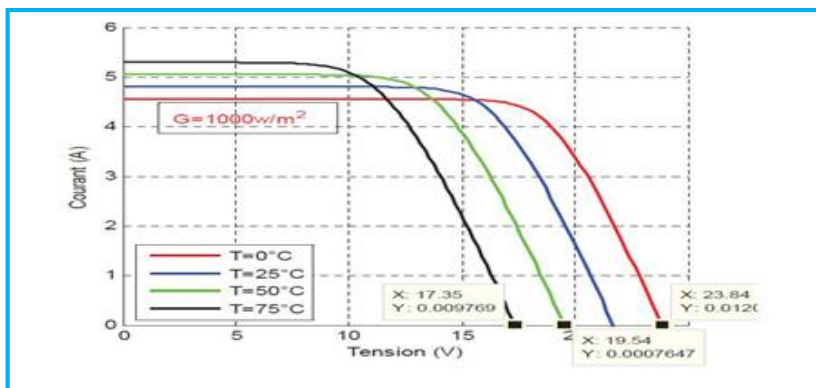


Fig.II.11: Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ [26]

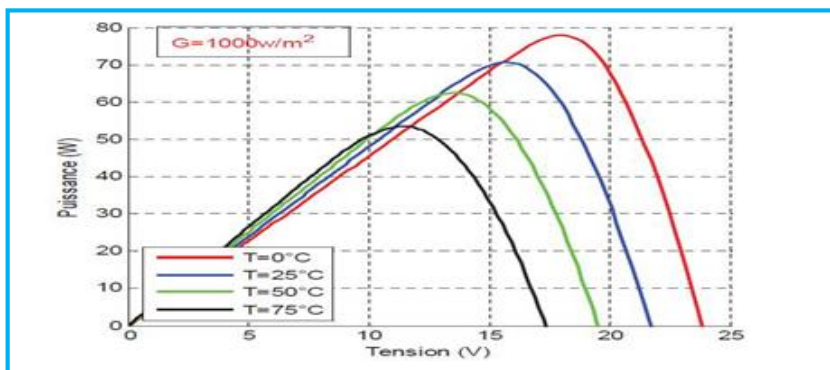


Fig.II.12: Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ [26]

CHAPITRE II Modélisation et simulation des éléments du système photovoltaïque

Pour les cellules en silicium cristallin, V_{oc} baisse d'environ **0.37%** pour chaque degré en dessus de 25°C , par contre I_{cc} augmente de **0.05%** pour les mêmes conditions.

Pour tenir compte des conditions météorologiques du lieu d'emplacement des panneaux photovoltaïques, leurs fabricants fournissent souvent un indicateur appelé N_{OCT} (Nominal Operating Cell Température) donné pour une température ambiante $T=20^{\circ}\text{C}$ et ensoleillement $E=8000\text{ W/m}^2$ et une vitesse du vent égale à 1 m/s .

La température de la cellule est donnée donc par l'expression suivante :

$$T_{cell} = T_{amb} + [(NOCT + 20^{\circ}) / 800] * E \quad II.14$$

Il existe une autre loi pour prévoir la température de la cellule en fonction de la température ambiante, de l'ensoleillement, et de la vitesse du vent dont l'expression est

$$T_{cell} = 276 + (E/4) + 0.9 * T_{amb} \quad II.15$$

Par contre, quand l'ensoleillement augmente le courant I_{cc} augmente la tension V_{oc} augmente légèrement aussi. Les courbes $I(V)$, $P(V)$ sont illustrées dans les figures et tracées pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclaircissement variable.

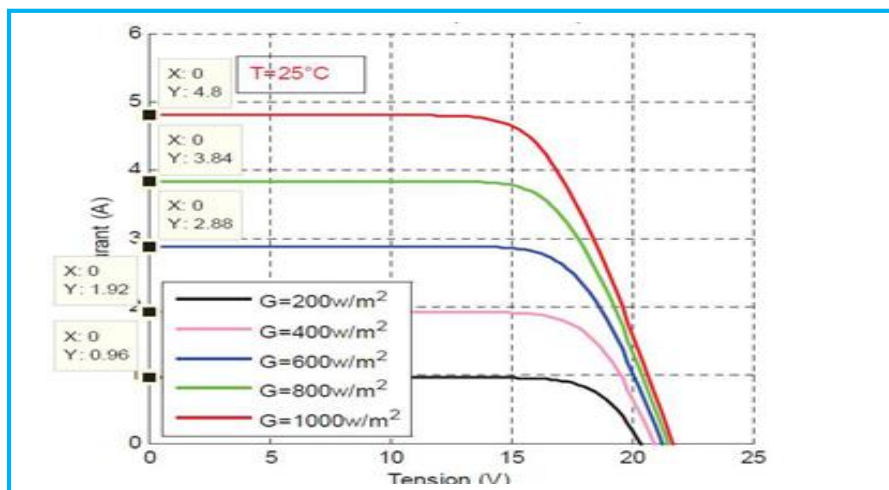


Fig.II.13: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I(V)$ [26]

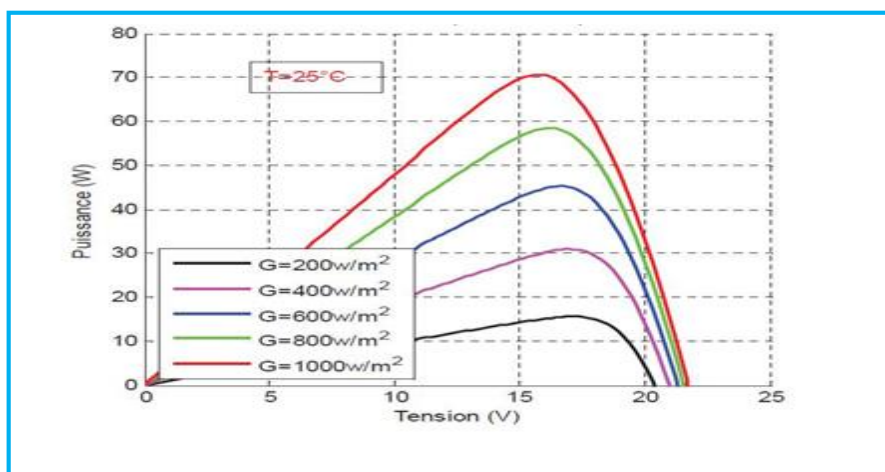
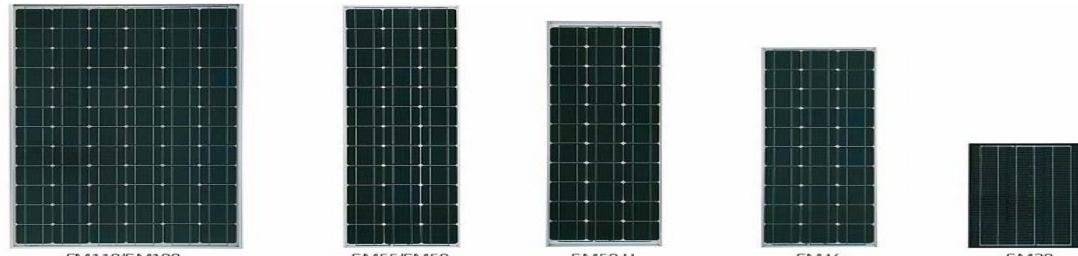


Fig.II.14: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P(V)$ [26]



Type de module	SM110	SM100	SM110-L	SM100-L	SM55/SM50	SM50-H	SM46	SM20
Caractéristiques électriques								
Puissance nominale P_{max} [W _p]	110	100	110	100	55 / 50	50	46	20
Configuration	12/24 V	12/24 V	12/24 V	12/24 V	12 V	12 V	12 V	12 V
Courant nominal I_{MPP} [A]	6,3/3,15	5,9/2,95	6,3/3,15	5,9/2,95	3,15 / 3,05	3,15	3,15	1,38
Tension nominale U_{MPP} [V]	17,5/35,0	17,0/34,0	17,5/35,0	17,0/34,0	17,4 / 16,6	15,9	14,6	14,5
Courant de court-circuit I_{sc} [A]	6,9/3,45	6,5/3,25	6,9/3,45	6,5/3,25	3,45 / 3,4	3,35	3,35	1,6
Tension à vide U_0 [V]	21,7/43,5	21,0/42,0	21,7/43,5	21,0/42,0	21,7 / 21,4	19,8	18,0	18,0
Caractéristiques physiques								
Longueur [mm]	1321	1307	1307	1307	1293	1219	1083	567
Largeur [mm]	660	652	652	652	329	329	329	328
Profondeur [mm]	40	5,5	5,5	5,5	34	34	34	35
Profondeur avec boîte électrique [mm]	54	52	52	52	-	-	-	-

Img.II.1 : Games de panneaux solaires / Siemens

II.4.2. Electronique de puissance [16] et [25]

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- ✓ Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- ✓ Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- ✓ Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

La conversion statique est réalisée à partir de convertisseurs statiques qui permettent qu'ils de transformer l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge.

II.4.2.1. Electronique de puissance et la conversion électrique

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdale sou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques.

II.4.2. 2. Convertisseurs électriques

Les convertisseurs sont des appareils qui servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nos besoins. Il y a deux types de convertisseurs (les hacheurs DC-DC et les onduleurs DC-AC).

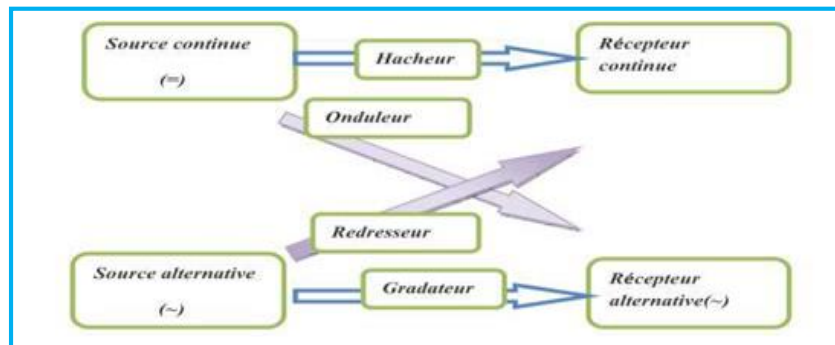


Fig.II.15: les différents types de convertisseurs statiques.[26]

II.4.2.3.Les Interrupteurs

Les interrupteurs sont réalisés par un ou plusieurs composants électroniques à semi-conducteurs. On a vu qu'en électronique de puissance, on met en œuvre des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (fermé), soit à l'état bloqué (ouvert). Le passage d'un état à l'autre, appelé commutation, s'effectue périodiquement. On note T cette période.

Selon le composant utilisé, la fréquence de découpage à laquelle est soumis le composant change. En général, on cherche à utiliser la fréquence la plus élevée possible. Cependant, plus la puissance nominale d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible.

II.4.2.4.Convertisseur DC/DC « Hacheur » et Commande MPPT

II.4.2.4.a.Définition [15] et [23] et [27]

Un hacheur est un convertisseur Continu – Continu. Il permet, à partir d'une tension continue fixe, d'obtenir une tension de valeur moyenne réglable. Il est composé d'un interrupteur électronique unidirectionnel (transistor ou thyristor). Il permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

Ils permettent de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

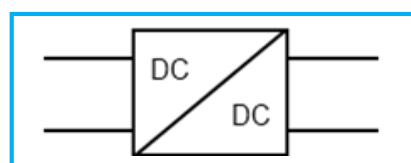


Fig.II.16: Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.4.2.4.b.Exigences de l'utilisateur [16]

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double: d'une part, adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part, stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe: fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit. Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet :

*délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé;

*posséder un rendement élevé;

*présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau;

*posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc.);

*ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique);

*être la plus petite et la plus légère possible;

* et bien entendu être de préférence peu coûteuse

II.4.2.4.c.Type hacheurs [27] et [16]

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

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

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

Il en découle donc quatre types de hacheurs:

- ✓ Les hacheurs directs qui associent deux sources de nature différentes :
 - Le hacheur série, baptisé aussi Buck, Down ou hacheur dévolteur,
 - Le hacheur parallèle, Boost, Up ou survolteur,
- ✓ Les hacheurs à accumulation qui associent deux sources de même nature
 - Le hacheur à stockage inductif baptisé aussi Buck_Boost ou Up-Down
 - Le hacheur à stockage capacitif ou hacheur de Cuk.

a. Hacheur survolteur (Boost)

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Le circuit électrique du convertisseur survolteur est illustré à la Figure nous supposons que les semi-conducteurs sont idéaux. Cela permet que l'état de conduction et le blocage soit activés instantanément.

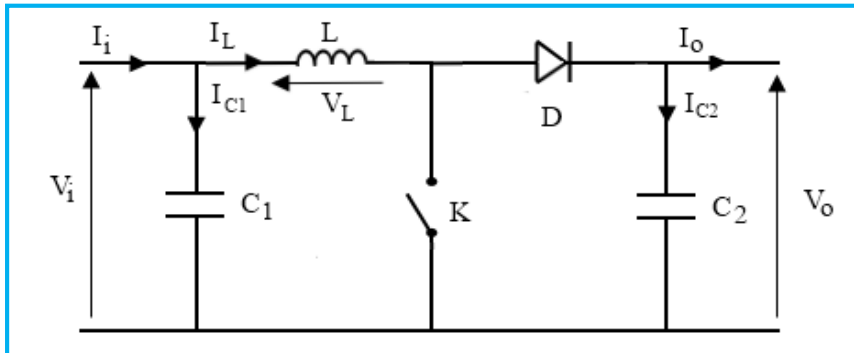


Fig.II.17: Schéma électrique de convertisseur survolteur

1). Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D . On a alors $V_K = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à

$$V_0 (1-\alpha) = V_i$$

II.16

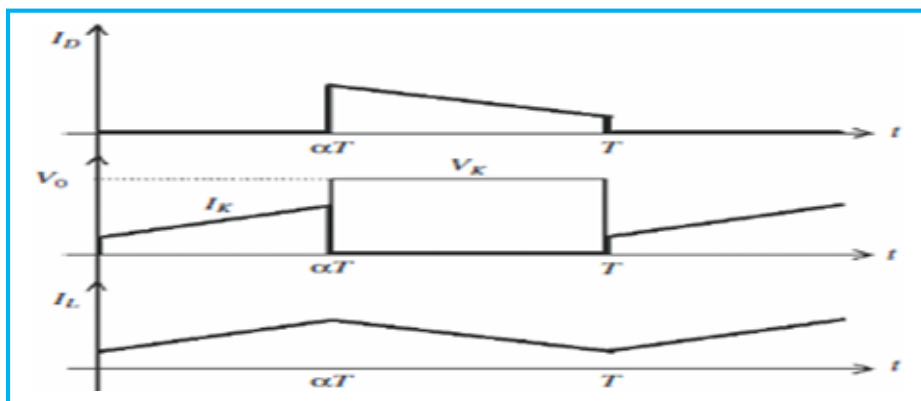


Fig.II.18: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

2). 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 (Fig.II.19), présente le circuit équivalent du boost lorsque **K** est fermé c'est-à-dire entre $[0, \alpha T_e]$.

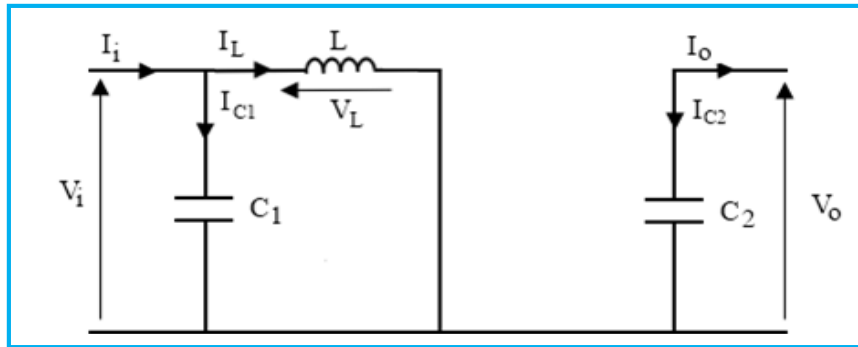


Fig.II.19: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

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

$$I_{C1}(t) = C_1 dV_i(t)/dt = I_i(t) - I_L$$

$$I_{C2}(t) = C_2 dV_o(t)/dt = -I_o(t) \tag{II.17}$$

$$V_L(t) = L dI_L(t)/dt = V_i(t)$$

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

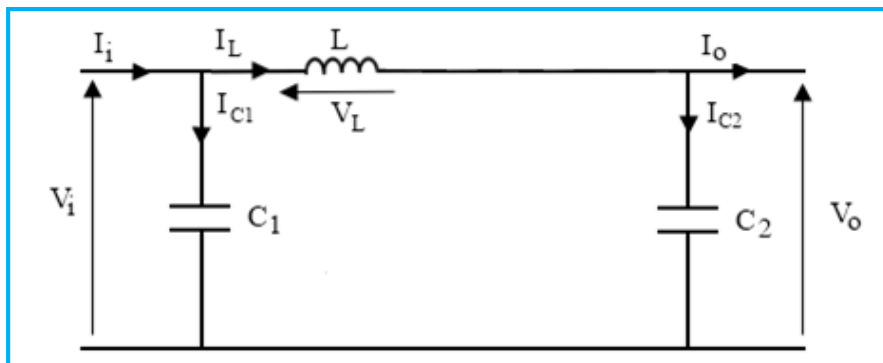


Fig.II.20: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 dV_i(t)/dt = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 dV_o(t)/dt = I_L(t) - I_o(t) \tag{II.18}$$

$$V_L(t) = L dI_L(t)/dt = V_i(t) - V_o(t)$$

b. Hacheur dévolteur (Buck) [27] et [16]

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur **K** figure 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). Le schéma de circuit du convertisseur dévolteur est illustré à la figure ce schéma contient un transistor et une diode avec un filtre **LC**. Son principe

de fonctionnement consiste à multiplier la tension d'entrée constante par un facteur scalaire, plus petit que l'unité.

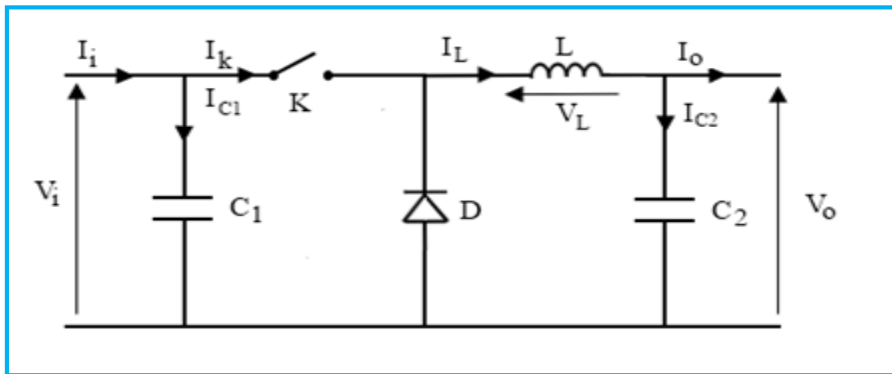


Fig.II.21 : Schéma électrique du convertisseur dévolteur.

1) Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i . L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e=1/T_e$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D . La tension à ses bornes est donc nulle.

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

$$V_0 = \alpha V_i$$

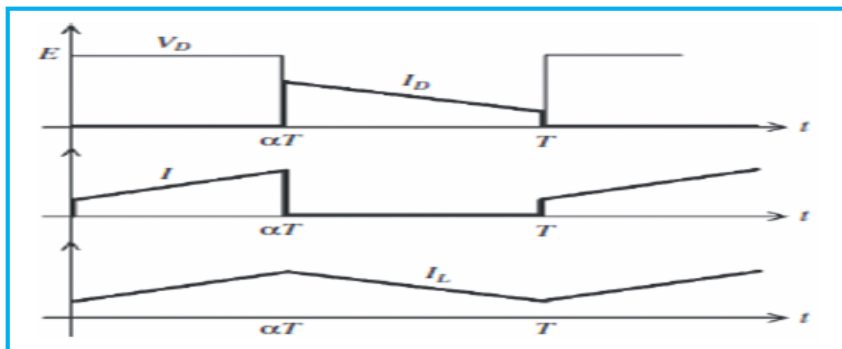


Fig.II.22: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.

2) 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 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha)*T_e$.

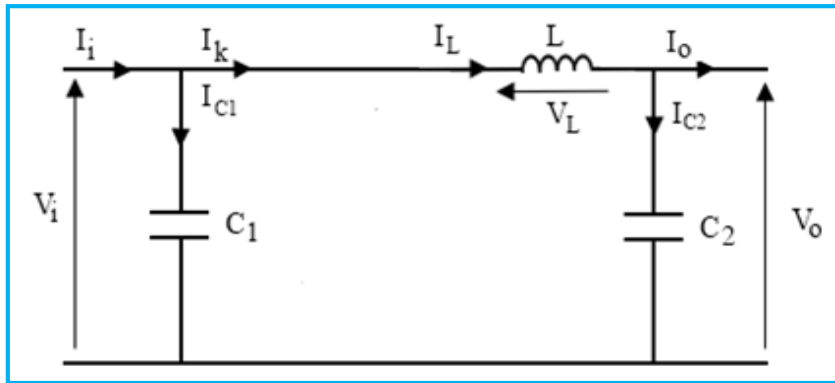


Fig.II.23 : Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé.

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

$$I_{C1}(t) = C_1 dV_i(t)/dt = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 dV_o(t)/dt = I_L - I_o$$

II.19

$$V_L(t) = L dI_L(t)/dt = V_i(t) - V_o(t)$$

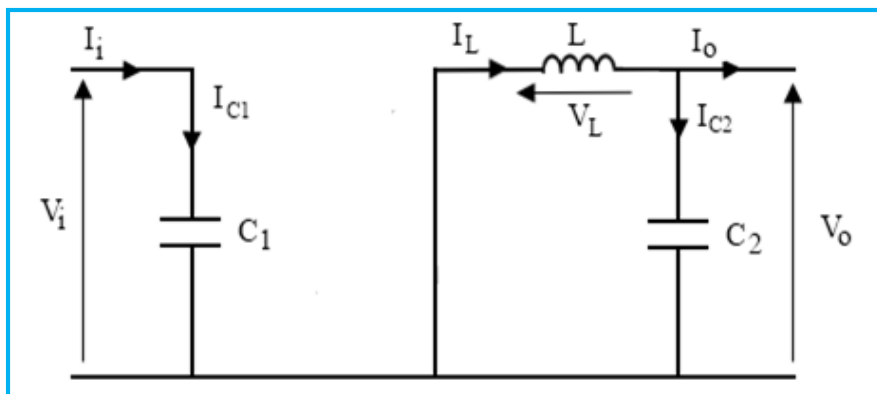


Fig.II.24: Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert

Les équations suivantes sont déduites de la figure:

$$I_{C1}(t) = C_1 dV_i(t)/dt = I_i(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 dV_o(t)/dt = I_L(t) - I_o(t)$$

II.20

$$V_L(t) = L dI_L(t)/dt = -V_o(t)$$

c.Hacheur dévolteur-survolteur (Buck_Boost)

Un autre arrangement possible des commutateurs à semi-conducteurs permet d'ajouter un autre type de convertisseur DC-à-DC connu sous le nom de convertisseur dévolteur survolteur.

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).

En fait, ce nouveau convertisseur est obtenu en échangeant la diode D et l'inductance L du convertisseur dévolteur. Le circuit est illustré à la figure. Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieur ou inférieur à un par rapport au changement de polarité. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs dévolteur et survolteur est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E .

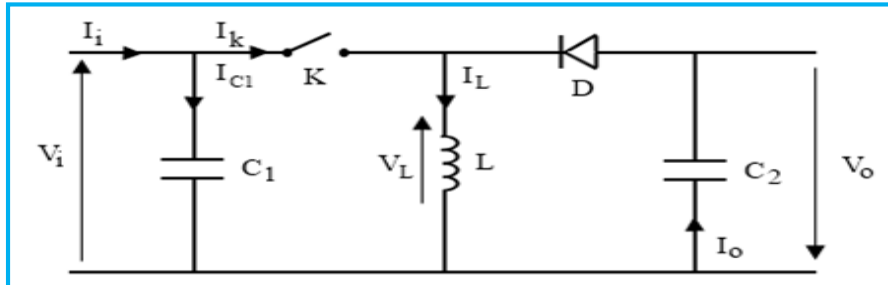


Fig.II.25: Schéma du convertisseur dévolteur-survolteur.

1) Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté sur la figure. 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 V_L est égale à $-V_o$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que:

$$V_i \cdot \alpha \cdot T = V_o (1 - \alpha) T \tag{II.21}$$

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.

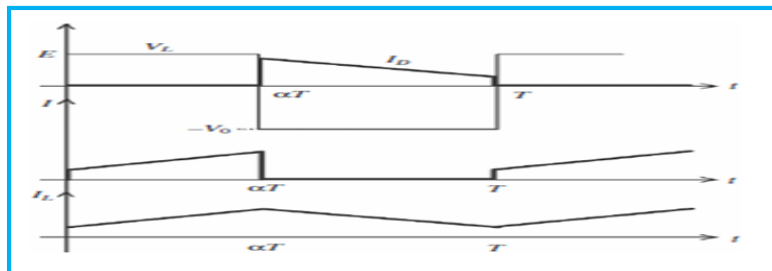


Fig.II.26: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck_Boost

2) Modèle mathématique équivalent :

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure

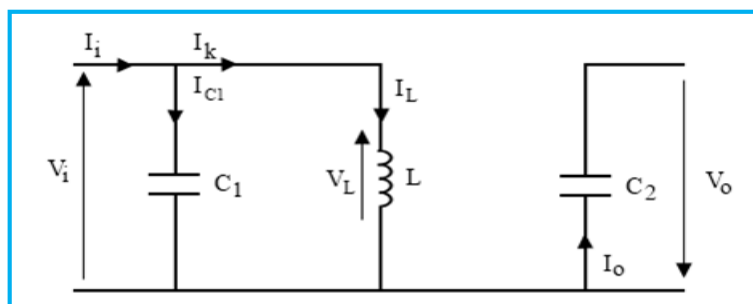


Fig.II.27: Schéma électrique 'un hacheur Buck- boost fermé

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

$$I_{C1}(t) = C_1 dV_i(t)/dt = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 dV_o(t)/dt = -I_o(t)$$

$$V_L(t) = L dI_L(t)/dt = V_i(t)$$

II.22

Lorsque l'interrupteur **K** est ouvert le circuit équivalent apparaît à la figure :

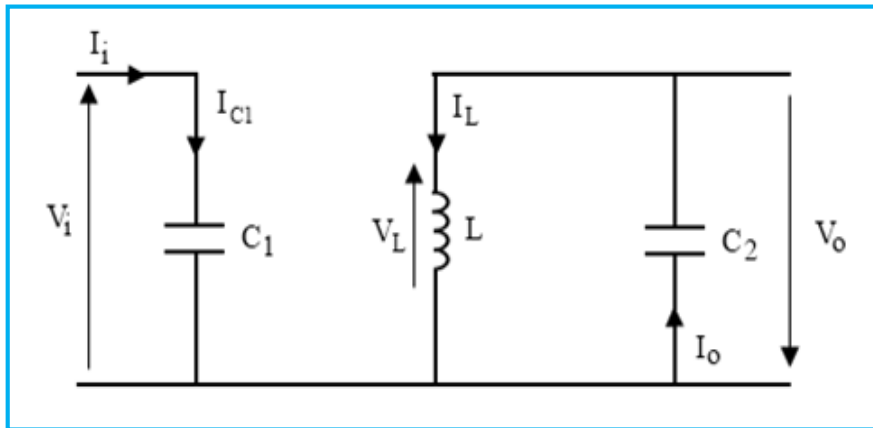


Fig.II.28: Schéma électrique d'un hacheur Buck- boost ouvert

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

$$I_{C1}(t) = C_1 dV_i(t)/dt = I_i(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 dV_o(t)/dt = I_o(t) - I_L(t)$$

$$V_L(t) = L dI_L(t)/dt = V_o(t)$$

II.23

II.4.2.4.d. Modèle d'un hacheur sur l'environnement Matlab/Simulink

On a essayé de faire une petite simulation sur le hacheur pour voir comment il fonctionne

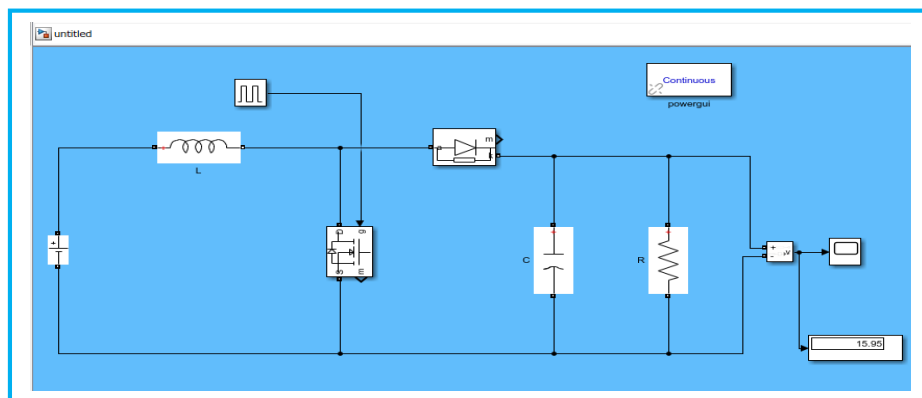


Fig.II.29: Schéma block d'un hacheur Boost sur Matlab/Simulink

- Le résultat obtenu de cette simulation est illustré dans la figure

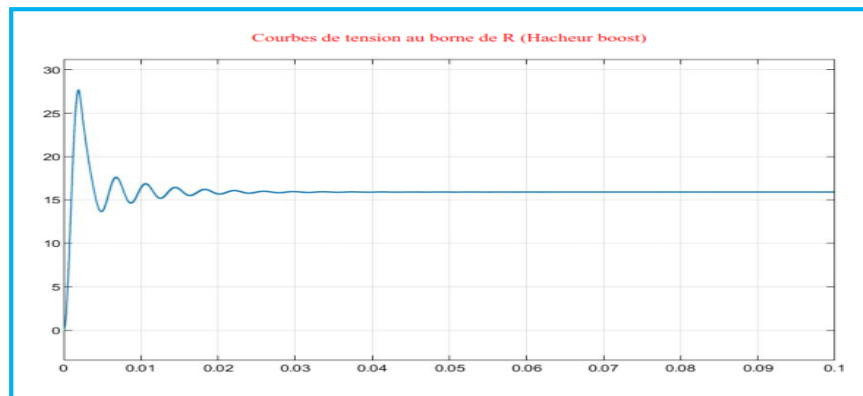


Fig.II.30 : Allure de la tension de commande de l'interrupteur

*Le hacheur est fonctionné avec une commutation d'ouverture et fermeture des interrupteurs avec une impulsion dans la gâchette (un système ON /OFF, (1 et 0)). Ce hacheur doit être doté de fonctions de poursuite de puissance maximale.

II.4.2.5. Commande MPPT [25]

II.4.2.5.1. Définition [25]

Un panneau photovoltaïque a des caractéristiques courant-tension (I V) non linéaires. Sa puissance de sortie change avec les conditions atmosphériques. Il existe seulement des points (PPM) où la puissance est maximale.

L'efficacité d'un système photovoltaïque n'est améliorée si seulement si le panneau est actionné intentionnellement au PPM indépendamment des variations des conditions atmosphériques. Ceci peut être fait en accordant correctement le panneau avec la charge à l'aide des techniques qui détectent et localisent mécaniquement ou électriquement les PPM sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles étaient les raisons de ce changement.

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les premières utilisations du MPPT datent de 1968.

Le MPPT est le point clé du montage. Il s'agit d'un genre de contrôleur qui va forcer le générateur à travailler à sa puissance maximale (MPP). En effet, cette opération permet d'obtenir le meilleur rendement de puissance de la cellule. Il existe différentes méthodes pour obtenir ce point. Les algorithmes de programmation de contrôleurs MPPT sont relativement simples, du fait des limitations technologiques dans les microprocesseurs disponibles. Il peut donc être facilement implémenté sur un ordinateur ou un microprocesseur.

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique $I = f(U)$ est non linéaire. En conséquence, pour un même éclairage, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le

maximum de puissance à la charge Il existe différents types de contrôleurs MPPT. Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- ✓ le rendement global du système désiré par le constructeur;
- ✓ le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DCDC, DC-AC), ou à un réseau électrique;
- ✓ l'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux.);
- ✓ les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse;
- ✓ le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

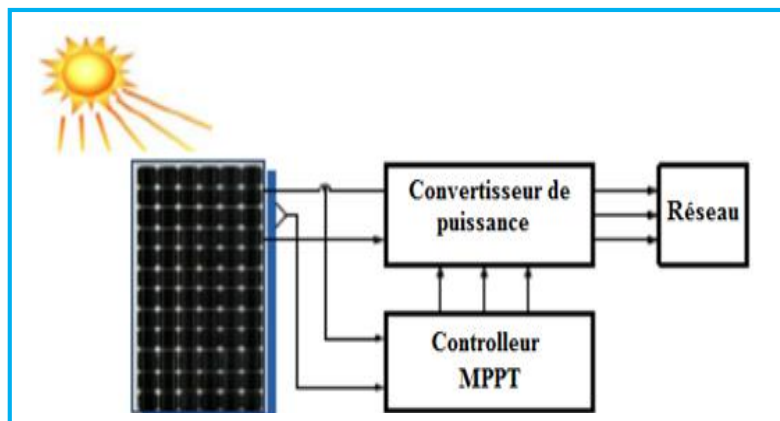


Fig.II.31: Bloc diagramme d'un contrôleur MPPT pour un système photovoltaïque

II.4.2.5.2. Différents techniques de MPPT [25] et [28]

Dans la section suivante, nous présentons un bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature en détaillons l'algorithme MPPT Inc&Cond.

Il existe différentes manières de classification des algorithmes MPPT. Cependant il est plus intéressant de les classer selon le nombre de variables (paramètres d'entrée) ou selon la technique utilisée pour la poursuite du PPM

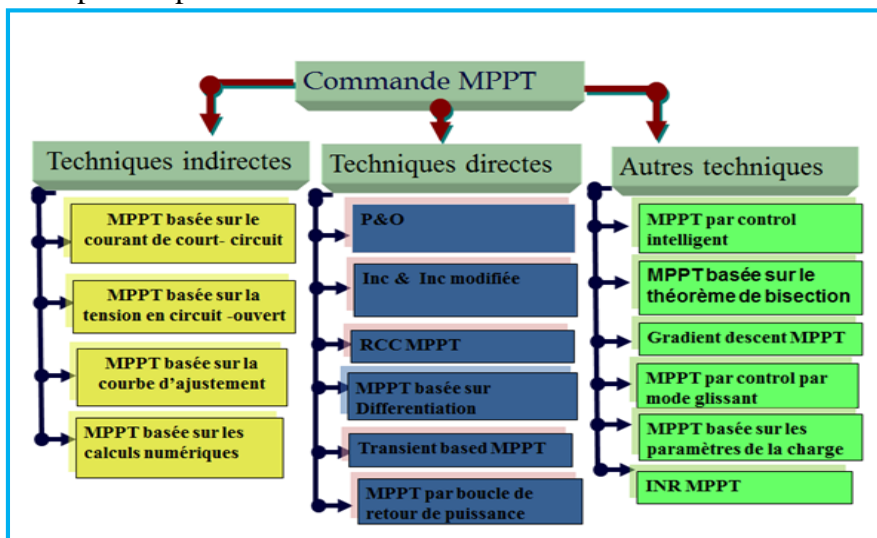


Fig.II.32: Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.

II.4.2.5.3.Réalisation du convertisseur MPPT [29]

II.4.2.5.3.a.Circuit de puissance

Le convertisseur MPPT est conçu de façon à supporter une puissance délivrée par les panneaux PV. La partie puissance est basée sur le circuit intégré et des MOSFET. Le choix des composants a été dicté par les critères suivants :

- ✓ Tension maximale des panneaux: environ de 100 volts
- ✓ Courant maximum des panneaux: environ de 10 ampères
- ✓ Fréquence de commutation à 10kHz

Pour pouvoir faire fonctionner l'IR2110 dans sa configuration classique, il faut que le condensateur entre V_b et V_s se charge à chaque période de commutation. La seule condition est lorsque V_s tombe à zéro pour permettre la circulation du courant. Comme notre montage comporte une batterie à la sortie, cette condition n'est pas assurée. Il a fallu ajouter un MOSFET et une diode à la sortie pour permettre cette condition. Ainsi, le MOSFET IRF520 du bas ne sert qu'à charger le condensateur entre les entrées V_b et V_s de l'IR2110, qui lui servira à commuter l'IRF540 du haut.

II.4.2.5.3.b.Circuit de commande

Pour le circuit de commande, un microcontrôleur de la famille PIC a été utilisé. Il s'agit d'un PIC18F242 avec un cristal de **10MHz** Il s'occupe de mesurer le courant et la tension aux bornes des panneaux. Avec ces mesures, il applique un algorithme et génère un signal à largeur d'impulsion variable pour le circuit de puissance.

➤ **Notre étude est basée sur l'algorithme « Inc&Cond »**

***Conductance incrémentale**

C'est une méthode à contre réaction de puissance. La méthode basée sur la conductance incrémental est également très utilisée. Cet algorithme est basé sur une considération de la dérivée de la puissance par rapport à la tension. Effectivement, nous savons qu'au point de puissance maximale, cette dérivée est égale à zéro. Dans l'équation :

$dP/dV=0$	➔	$dUI/dU=0$	➔	$(dU/dU)I+(dI/dU)U$	II.24
$dI/dU=-I/U$					

L'algorithme calcule donc le rapport I/U , et le compare à la dérivée de I par rapport à U . Quand les deux membres de cette équation sont exactement opposés, nous avons atteint le point de puissance maximale. Cela nécessite une conservation en mémoire de la tension et du courant précédents. A travers ce tableau, on résume le fonctionnement de l'algorithme Inc&Cond

Cas	Dérivée	Action
1	$dI/dU < -I/U$	V--
2	$dI/dU > -I/U$	V++

Tableau II.2 : Résumé du fonctionnement de l’algorithme Inc&Cond

- Voici l’organigramme de l’algorithme Inc &Cond

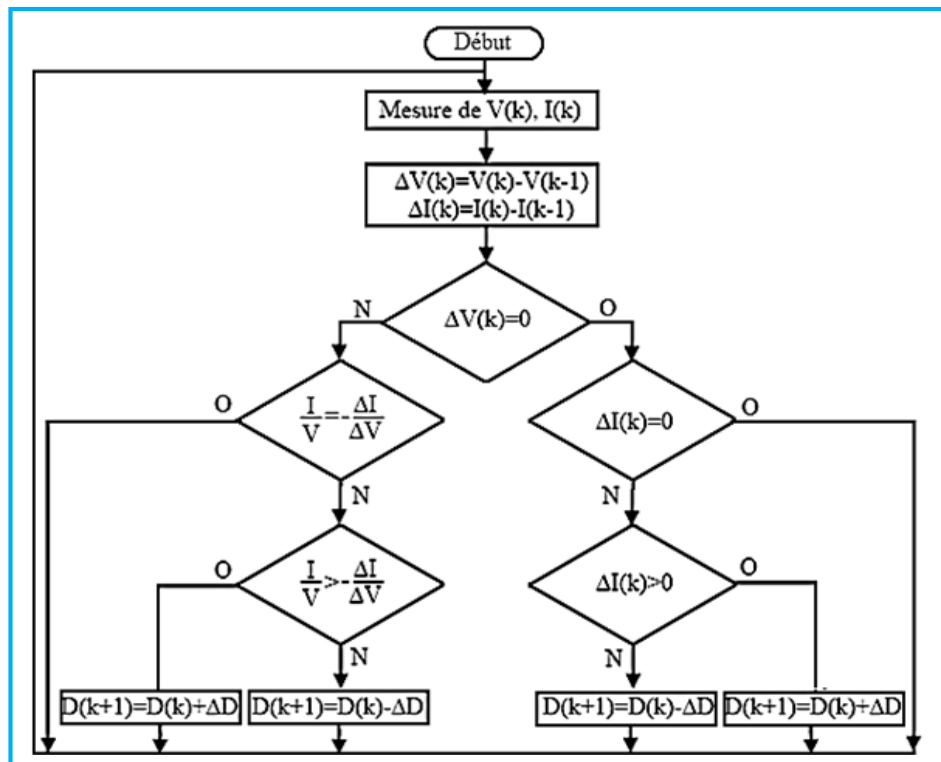


Fig.II.33: Algorithme incrémental conductance [16]

*Cette commande est trop sensible au bruit, des erreurs de mesure de quantification rendent la condition $(I/V) + (dI/dV) = 0$ rarement vraie dans la pratique. En plus, les oscillations diminuent un peu, mais elles existent toujours autour du PPM.

Dans ce cas, les performances de la méthode conductance incrémentale ne sont guère meilleures que celles de la P&O, avec en prime une augmentation de la complexité de l’algorithme

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique jusqu’à l’obtention L’algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM. Il est basé généralement sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique qui le place sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d’entrée du convertisseur statique (IPV et VPV) qui dépendent fortement de l’ensoleillement et de la température.

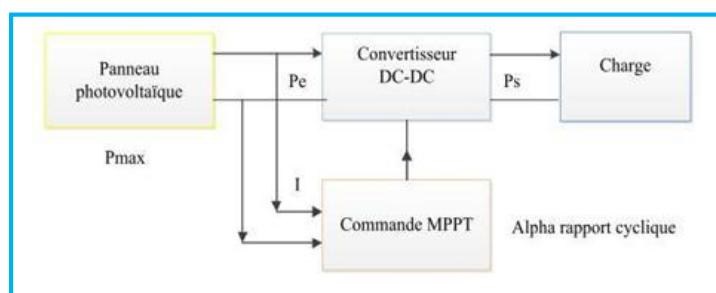


Fig.II.34: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT. [26]

II.4.2.6. Onduleur triphasé [16]

II.4.2.6.1.Définition [16]

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement de la technique de commande utilisée.

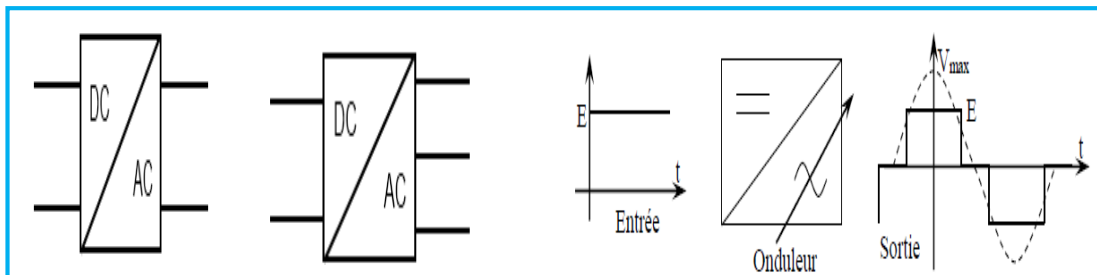


Fig.II.35 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé et son entrée et sortie

II.4.2.6.2.Classification des onduleurs [16]

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation

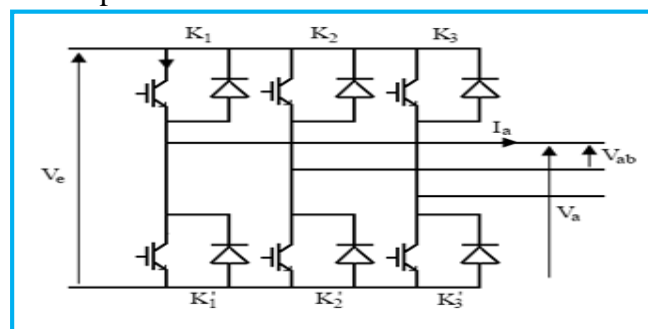
- Les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.
- Les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.

Selon la nature de la source continue :

- Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal.
- Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale.

II.4.2.6.3.Structure d'onduleur [16]

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 V_c . 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.



ée

II.4.2.6.4. Principe de fonctionnement [16]

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.

II.4.2.6.4.a. Commande plein onde

Deux thyristors d'un même bras sont commandés à 180° de décalage. Les thyristors de deux bras voisins sont commandés à 120° de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont $E, 0$ ou $-E$ volts, la durée d'un niveau non nul étant de 120° par alternance.

II.4.2.6.4.b. Commande MLI

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

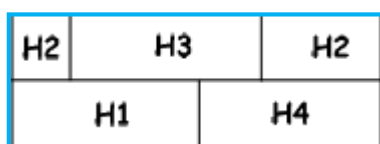
La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'undécoupage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse.

- ✓ Notre travail est fait par un onduleur triphasé commandé par la Commande décalée.
- On a fait une petite simulation sur l'environnement Matlab /Simulink d'un Onduleur monophasé commandée par une commande décalée comme suit :

II.4.2.6.4.c.Commande décalée [31]

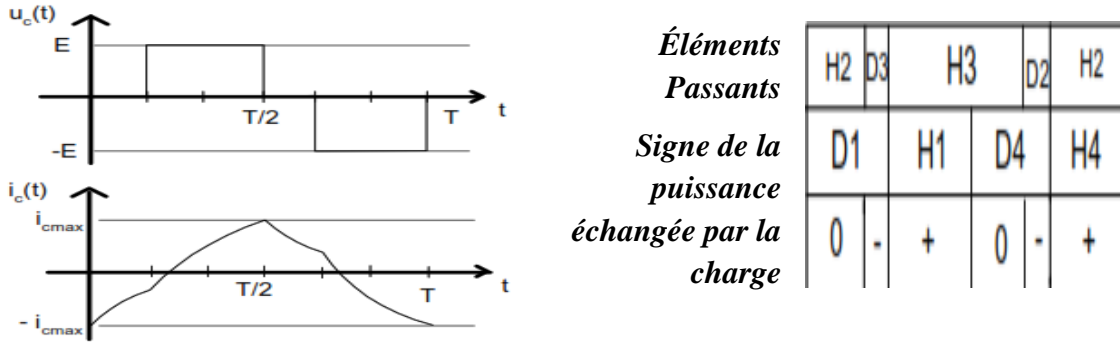
Cette commande, plus sophistiquée dans sa conception, est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdale. Si nous attachons à une analyse spectrale, nous verrions dans la commande précédente que la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes. La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliore donc le convertisseur.

Au niveau de la commande décalée il suffit de décaler la fermeture des différents interrupteurs dans un ordre précis (ordre donné ci-dessous). Nous traçons à nouveau les oscillogrammes.



Éléments

Commandés à la fermeture



La puissance échangée par la charge comporte une phase de plus avec la commande décalée pendant deux intervalles de temps, elle est nulle : il s'agit de phase de roue libre. Au cours de ces intervalles, l'énergie emmagasinée par la bobine est cédée à la résistance car la tension aux bornes de la charge est nulle. De plus, nous retrouvons les phases de récupération.

La valeur efficace de la tension U aux bornes de la charge est

$$U_{\text{eff}} = E \sqrt{1 - \frac{2\tau}{T}}$$

II.4.2.6.5.Simulation d'un onduleur monophasé sur l'environnement Matlab/Simulink

II.4.2.6.5.1.Onduleur monophasé avec une charge résistive « R » commandée par une commande décalée [22]

On a fait cette simulation avec ces paramètres :

$E=100V, R=100\Omega$

➤ Le modèle de simulation est comme suit :

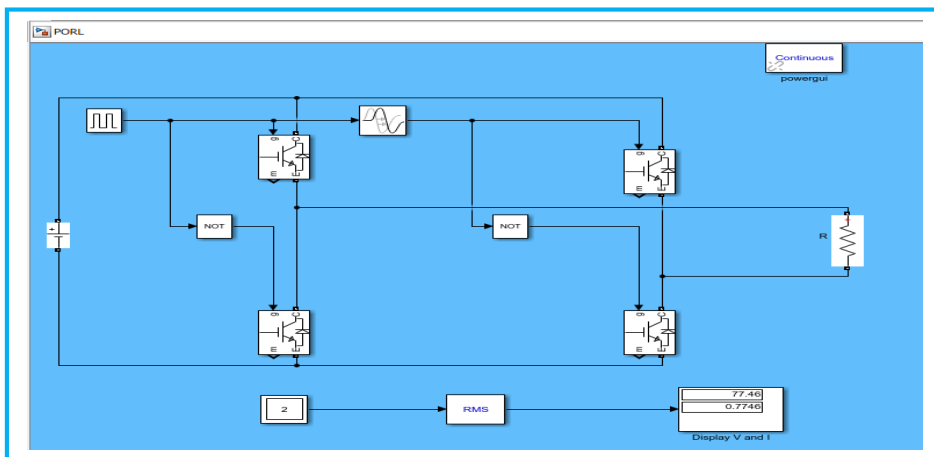
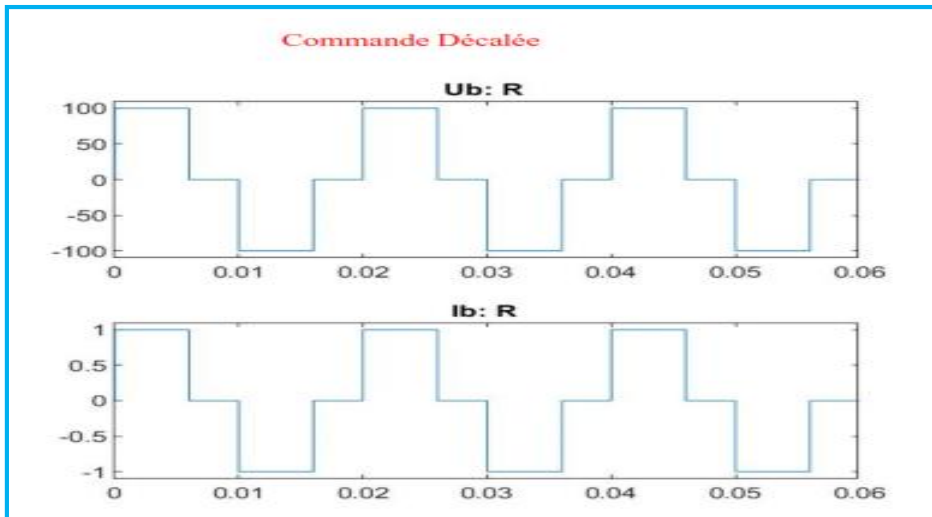


Fig.II.37 : Schéma block d'un onduleur monophasé « commande décalée avec charge R »

➤ Les résultats obtenus



II.4.2.6.5.2. Onduleur monophasé avec une charge « RL » commandée par une commande décalée [22]

On a fait cette simulation avec ces paramètres

$$E=100V, R=100\Omega, L=0.5H$$

➤ Le modèle de simulation est comme suit

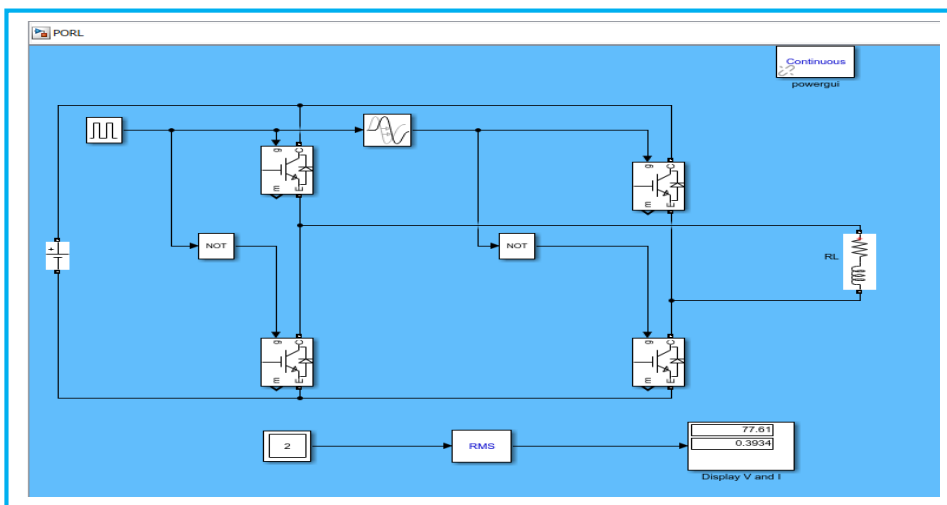
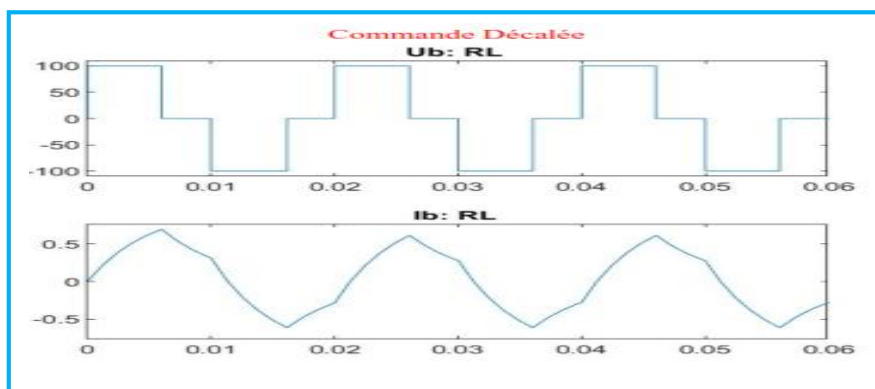


Fig.II.38 : Schéma block d'un onduleur monophasé « commande décalée avec charge « RL »

➤ Les résultats obtenus



***Interprétation des résultats obtenus**

La commande de l'onduleur et des systèmes de production, déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension.

Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante et même de s'adapter aux défauts du réseau et ainsi de ne pas être déconnectée du réseau.

Le modèle a été testé par l'augmentation brusque de la charge et de son influence sur la production de l'électricité coté photovoltaïque et le réseau.

II.4.2.7.VSC contrôleur « voltage source contrôler» [15]

Les VSC sont des onduleurs AC/DC, ils connectent un système DC à un système AC comme mentionné précédemment, un VSC à deux niveaux sera appliqué ils sont construits en utilisant six IGBT (deux IGBT chaque phase) Cependant ; pour simplifier le contrôle de VSC, un modèle simplifié idéal du VSC sera utilisé. Ce modèle simplifié divise le VSC en deux côtés : Côté DC et Côté AC, le côté AC est modélisé comme des sources de tension contrôlées triphasées et le côté DC est modélisé comme une source de courant contrôlée.

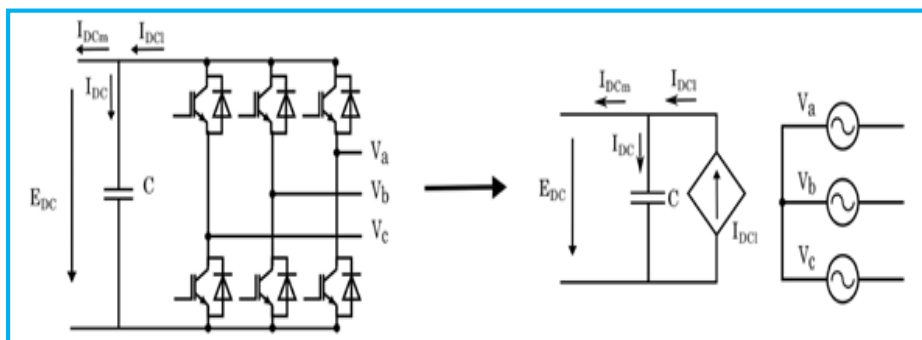


Fig.II.39 : gauche: modèle réel du VSC.figure droite: modèle simplifié du VSC.

- ✓ Les deux côtés du convertisseur (DC et AC) sont liés afin de garantir l'équilibre de puissance, toute la puissance générée par le côté DC est injectée vers le côté AC et vice versa, ainsi ; la valeur de la source de courant contrôlée du côté DC peut être exprimé sous forme d'équation

$$I_{DC} = P_{AC} / E_{DC}$$

II.27

Où :

I_{DC} : est l'intensité de la source de courant du côté DC du convertisseur.

P_{AC} : est la puissance du côté AC du convertisseur.

E_{DC} : est la tension de côté DC.

Afin de connecter le côté AC de réseau principale, il est nécessaire d'inductances avec leurs résistances associées entre les sources de tension pour éviter de connecter des sources de même nature qui pourraient produire des court-circuit en chemin, les sources de tension sont converties en source de courant.

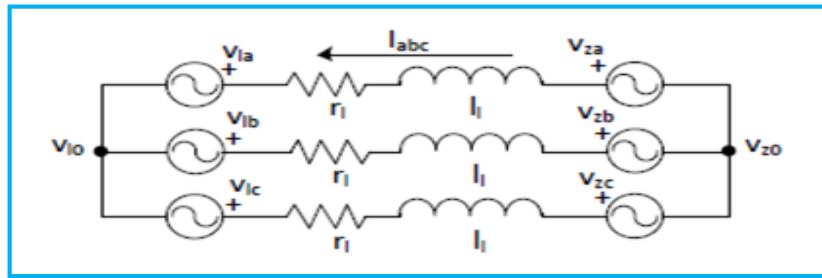


Fig.II.40: Modèle équivalent du côté AC du convertisseur VSC.

II.4.2.8.Système de contrôle [15]

II.4.2.8.1.Contrôle des systèmes PV

1). Côté PV du contrôle VSC

La commande du VSC côté PV permet de contrôler la puissance générée par les modules PV, il s’agit de la puissance qui sera transférée au VSC côté DC et injectée récemment dans le réseau, les performances d’une cellule **PV** dépendent de deux facteurs climatiques variables : irradiance et température. Les autres facteurs référant à la qualité de la cellule ou au dimensionnement du **PV** système, comme vu dans les titres précédant ; les courbes **IV** d’une cellule solaire change avec l’intensité lumineuse (**G**) et la température(**T**). Cependant, seul le changement de la température modifie la valeur de la tension en circuit ouvert. Par conséquent, il est essentiel de faire le système PV fonctionne au point de puissance maximale pour chaque température, qui est le genou de l’**IV** courbe. La solution est de mettre en œuvre un algorithme MPPT comme mentionné précédemment ; il suivra la tension de la courbe **IV** qui donne la puissance maximale et ayant la tension à la puissance maximale, le module **PV** déterminer automatiquement le courant à la puissance maximale. En résumé, le contrôle du VCS du côté **PV** est esquissé à la figure , ou les entrées de le module **PV** sont l’irradiance (**G**), la température (**T**) et le tension du côté DC (E_{DC}) donné par l’équation vue à la section et la sortie est le courant traversant la cellule , l’entrée de block MPPT est la température (**T**) et sa sortie sera la tension au maximum puissance V_{mpp} qui est la tension souhaitée pour le côté DC (E_{DC}^*).

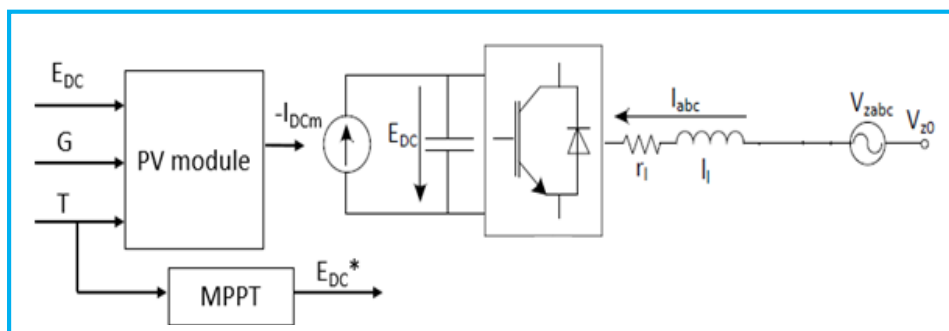


Fig.II.41 : Schéma de contrôle VSC pour un système **PV**.

2).Côté réseau du contrôle VSC

Les convertisseurs VSC sont capables de contrôler séparément la puissance active et réactive. Normalement, la référence de puissance réactive peut être obtenue à partir d’un système de contrôle de niveau supérieur, pour par exemple opérateur de réseau ou défini sur

une valeur donnée. La référence de puissance active pour le cas d'un système d'énergie renouvelable comme le système *PV*, il est ajusté pour réguler la tension du bus DC afin pour assurer l'équilibre de puissance. Par conséquent, la puissance injectée dans le réseau sera la même que celle générée. Le schéma de commande de ce convertisseur est esquissé à la figure, il est basé sur deux niveaux de cascade de système de contrôle. Le contrôleur de niveau interne permet de réguler le courant alternatif dans la référence qd0 (boucle de courant), tandis que le contrôleur de niveau externe permet de réguler la tension du bus DC dans le qd0 référence aussi (boucle de tension).

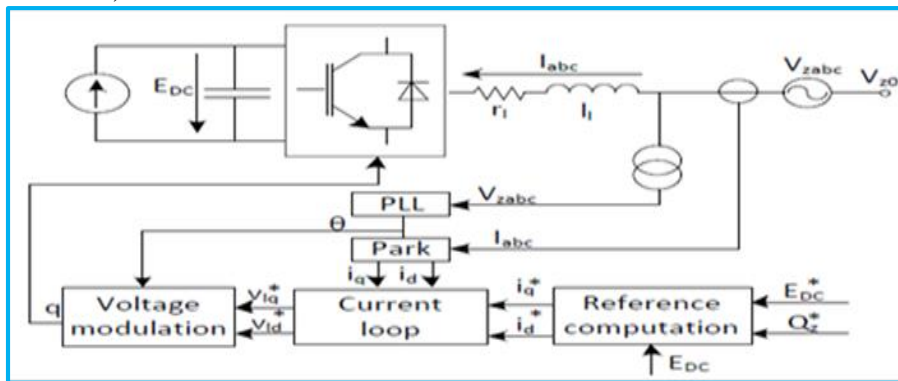


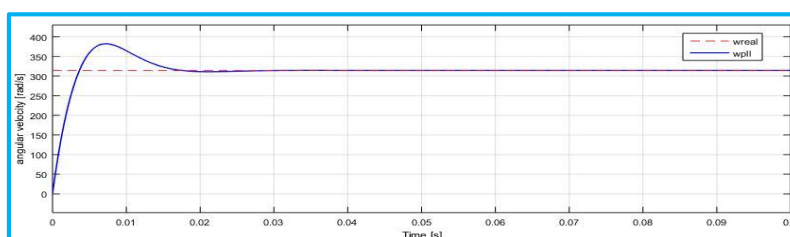
Fig.II.42 : Schéma de contrôle côté réseau VSC pour le système d'énergie renouvelable.

Les différents contrôleurs traitent le courant et les tensions dans la référence à deux axes rotatifs qd0 cadrent pour régler l'angle du réseau électrique. De ce fait, une boucle à verrouillage de phase (PLL) pour suivre un angle de réseau est requise. Cet angle de réseau sera utilisé pour réaliser tous les Park et anti-Park transformations nécessaires pour contrôler le système. Les sections suivantes suivront le schéma de contrôle en commençant par la conception de la PLL, puis le calcul de référence, la boucle de courant et enfin la modulation de tension.

3).Conception de la boucle de verrouillage de phase PLL

Une boucle à verrouillage de phase PLL est utilisée pour déterminer l'angle et la vitesse angulaire de réseau d'électricité. La conception d'un contrôleur PLL typique est élaborée en utilisant la méthodologie expliquée par Chung. Un schéma de contrôle PLL est illustrée à la figure. Il consiste en un retour de l'axe « d » composante de tension filtrée par un contrôleur PID. La sortie du contrôleur est la valeur angulaire estimée la vitesse du réseau électrique ω et son intégration donne l'angle estimé du réseau θ .

En supposant que l'erreur d'angle est petite, le système peut être linéarisé et modélisé en système deuxième ordre.



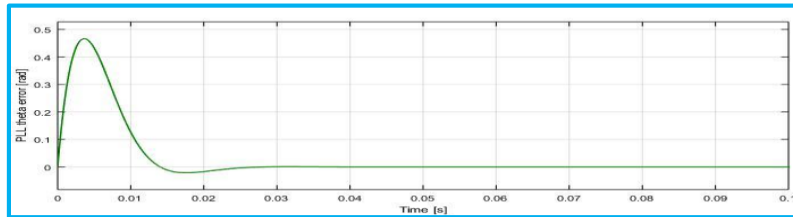
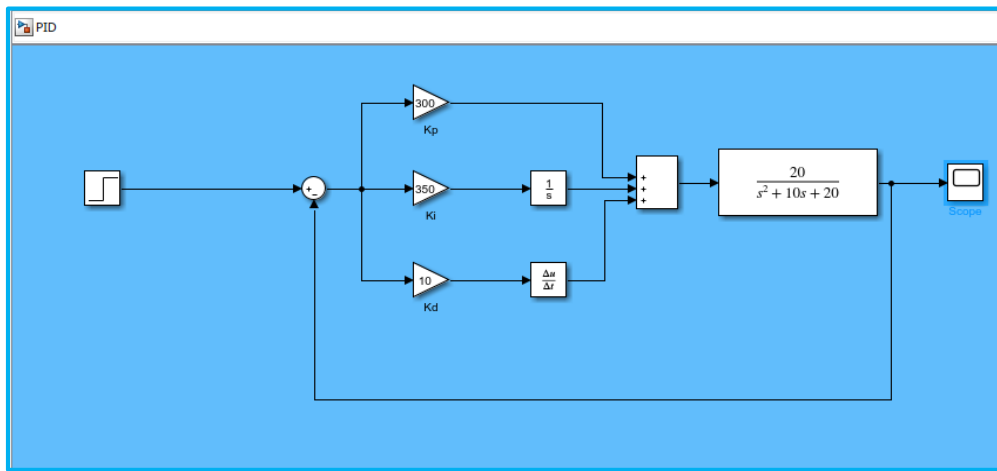
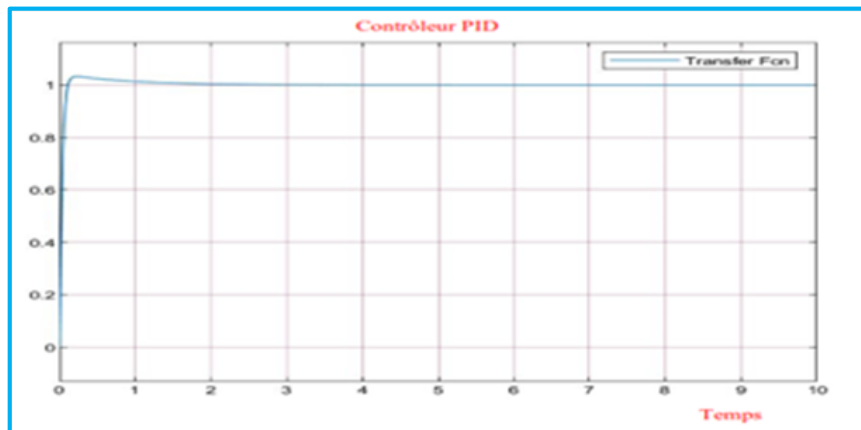


Fig.II.43 : Graphique supérieur : Vitesse angulaire électrique réelle (rouge) vs estimée (bleue) ; Graphique inférieur : Angle PLL «erreur= angle de réseau réel moins angle de réseau estimé.

✓ On a fait une petite simulation sur un régulateur PID [21]



➤ Résultat obtenue



4).Conception de la boucle de tension

La boucle de tension ou le régulateur de tension DC est nécessaire pour contrôler la tension du bus CC en assurant équilibre de puissance entre la source de générateur PV et la puissance injectée dans le réseau. Le résultat du contrôleur de tension DC fournira la puissance active P^* et en appliquant l'équation qui suivra après, le i_q^* la référence pour la boucle actuelle sera obtenue. Le schéma de commande de la boucle de tension est esquissé à la figure. La quantité contrôlée est E_{DC}^2 car il est proportionnel à l'énergie stockée dans le condensateur, il est d'abord comparé à l'énergie souhaitée tension de bus puissance deux E_{DC}^2 . Latension de bus souhaitée est réglée sur le MPP pour extraire la maximum puissance que le système PV peut générer. Un

schéma de rétroaction est utilisé pour améliorer le système. La sortie du contrôleur est la puissance active injectée dans le condensateur P_C^* .

Cette puissance est ensuite ajoutée à la puissance active mesurée avant le condensateur PDC et la puissance résultante est la référence de puissance du convertisseur (équation) la puissance du VSC injecté au réseau vers le bus pour obtenir la tension de bus souhaitée.

$$P^* = P_C^* + P_{DC}$$

II.28

P^* : La référence de puissance du convertisseur.

P_C^* : La puissance du VSC injectée au réseau

P_{DC} : Puissance mesurée avant le condensateur

Le contrôleur appliqué à la boucle de tension peut être un contrôleur proportionnel (P) ou un contrôleur intégré (PI). Les projets actuels utilisent un contrôleur PI.

5). Conception de la boucle du courant

La boucle de courant a pour but de déterminer les tensions que le VSC doit appliquer pour s'assurer que les courants traversant le convertisseur sont le même que ceux requis par le contrôle. C'est à partir des courants réels qui traversent le convertisseur i_q et i_d et de la courant requis i_q^* et i_d^* .

6). Conception de la modulation de tension

Jusqu'à présent, le système de contrôle a été le même si le mode de fonctionnement du convertisseur VSC est le simplifié ou réel (avec IGBT). Cependant, la modulation de tension n'est nécessaire que pour le vrai modèle. Pour le modèle simplifiée ou idéal, les tensions calculées à partir de la boucle de courant. la référentiel « dq » est transformée en la référentiel « abc » avec une transformation Anti-Park. Pour cette modulation nous avons utilisé la commande plaine onde pour le convertisseur DC/ AC comme on a vu précédemment.

II.4.3. Charge utilisée

II.4.3.1. Récepteurs et charges [17]

Les récepteurs ou charges (utilisation) font partie du système PV. Leurs tensions d'usage et leurs puissances déterminent les caractéristiques des éléments du système. Les récepteurs doivent être choisis avec soin. Lorsque c'est possible, il faut choisir les récepteurs de grand rendement. Après le choix des charges à alimenter par notre mini-centrale PV, nous relèverons leur caractéristiques qui nous permettront de déterminer la puissance à installer.

- Notre charge que nous avons utilisée est : Charge RL coté alternatif.

II.4.3.2. Étage d'adaptation [28]

Pour bien comprendre ce terme, on suppose que la nature de la charge est continue.

On présente ainsi dans la figure les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque et les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charge.

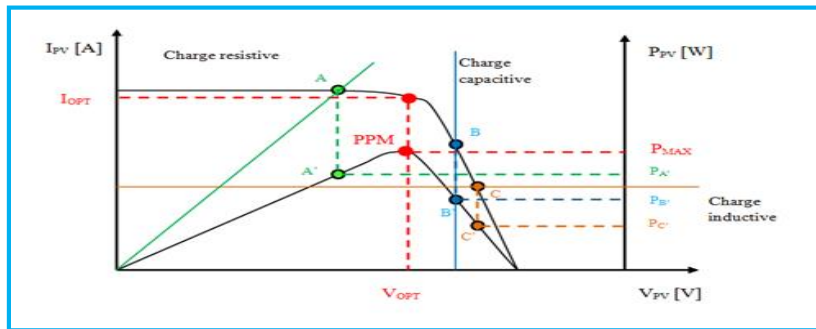


Fig.II.44 : Points de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque avec différents types de charges en connexion directe

On identifie les points suivants:

- A : pour une charge résistive ;
- B : pour une charge capacitive;
- C : pour une charge inductive ;
- PPM : point de puissance maximale.

Pour ces trois points, les puissances fournies par le générateur sont respectivement P_A , P_B , P_C correspondent à des valeurs inférieures à la puissance maximale disponible.

Afin d'extraire cette puissance maximale avec un rendement de conversion très élevé et de la transférer aisément à la charge, un étage d'adaptation est utilisé comme interface entre les deux éléments est décrit dans la figure.

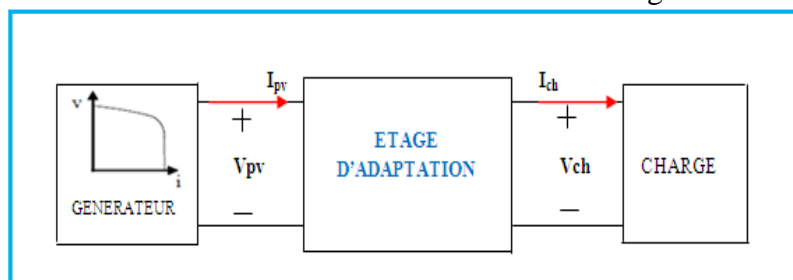


Fig.II.45: Étage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un générateur photovoltaïque et une charge pour le transfert du PPM

N.B: Cet étage d'adaptation n'est qu'un hacheur, dont la gamme de puissances peut s'étendre de quelques watts à des centaines de kilowatts.

II.4.4. Réseau électrique [16]

II.4.4.1. Définition

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois

principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs (voir Figure).

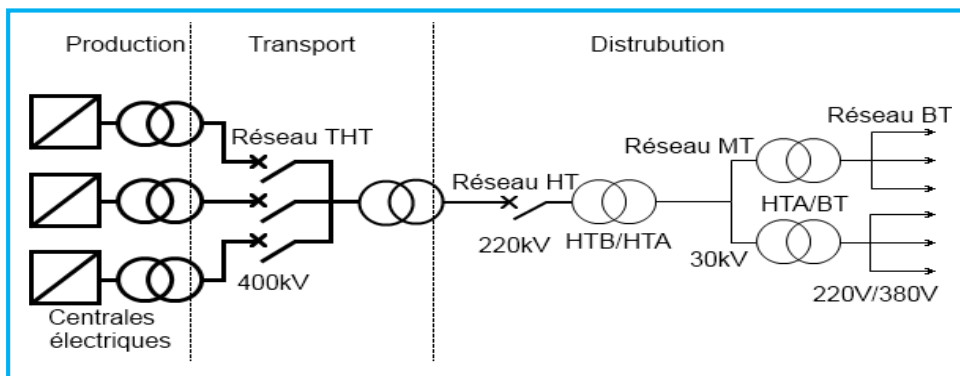


Fig.II.46: Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique

- Les réseaux de transport à très haute tension (**THT.400 kV**). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.
- Les réseaux de répartition à haute tension (**HT, de 60 kV à 220 kV**) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.
- Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à moyenne tension (**MT, de 5,5kV à 30 kV**) et les réseaux à basse tension (**BT, de 110 V à 220 V**). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse. Les réseaux basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie.

II.4.4.2. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont:

- ✓ Le débrogage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).
- ✓ La protection contre la foudre.
- ✓ La qualité de puissance fournie au réseau.
- ✓ Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.
- ✓ Le dosage fiable des flux de puissance.
- ✓ Risques techniques et financiers.

II.4.4.3. Perturbations des réseaux électriques

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- La fréquence
- L'amplitude des trois tensions

- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions, leur déphasage et l'ordre de succession des phases).

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'énergie et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties.

Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de la tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une fluctuation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques.

II.4.4.4. Modélisation de réseau BT

II.4.4.4.1. Modèle mathématique

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $2\pi/3$, et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.

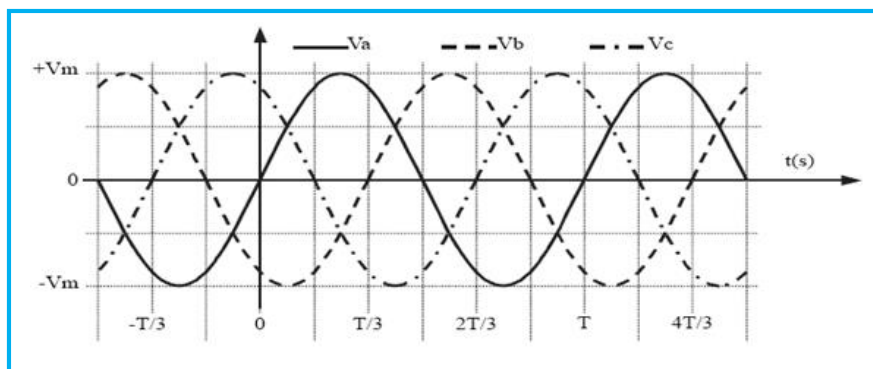


Fig.II.47: Système de tensions triphasé équilibré

- Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que (V_a, V_b, V_c) est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}) . On a :

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_m \sin(\omega t) & U_{ab} &= V_a - V_b \\
 V_b &= V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & U_{bc} &= V_b - V_c \\
 V_c &= V_m \sin(\omega t - 4\pi/3) & U_{ca} &= V_c - V_a
 \end{aligned}
 \tag{II.29}$$

✓ Relations pour un système triphasé équilibré

$$\begin{aligned}
 V_m &= \sqrt{2} V_{eff} \\
 U_m &= \sqrt{3} V_m U_{eff} = \sqrt{3} V_{eff}
 \end{aligned}
 \tag{II.30}$$

II.4.4.4.2. Schéma de simulation de réseau [24]

On va utiliser une tension ou : $V_a = V_b = V_c = 120V$ avec une fréquence de $60Hz$ et avec un déphasage entre les trois tensions égale à 120° .

- Le schéma block de simulation

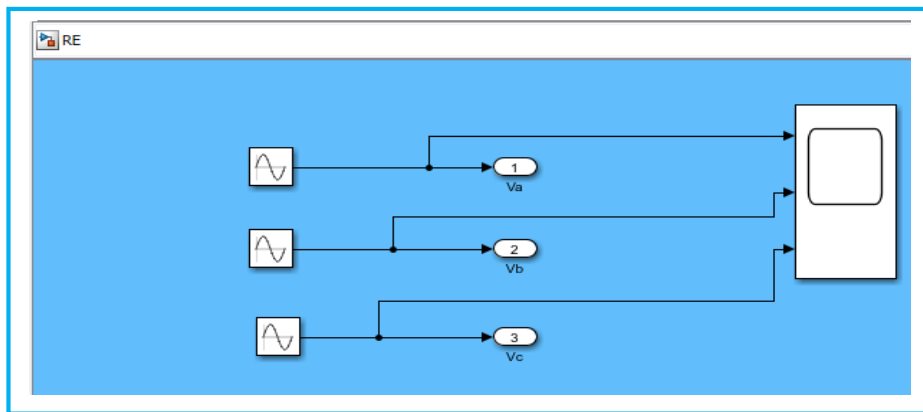


Fig.II.48: schéma block d'un réseau triphasé sur Matlab/Simulink

- Les résultats obtenus

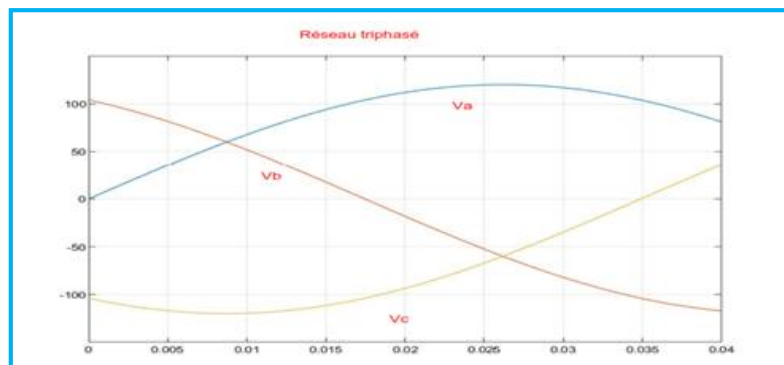


Fig.II.49: Les trois tensions d'un réseau électrique

II.5. Conclusion [16]

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique et on a présenté le principe de la conversion et la modélisation dans l'environnement Matlab/Simulink d'une cellule solaire, avec ses caractéristiques et ses performances. Nous avons vu aussi dans ce chapitre l'analyse du convertisseur statique DC/DC de type boost utilisé comme interface entre la charge et le générateur photovoltaïque pour que celui-ci fonctionne à un rendement optimal en plus de la commande classique MPPT (méthode P&O) pour la recherche du point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale et le convertisseur DC/AC qui converti la tension continu de production (tension générée par les panneaux PV) en tension alternative pour raccorder au réseau électrique de distribution. Avec une commande pleine onde ; et une charge RL et le réseau électrique.

CHAPITRE III

**Etude et simulation d'un micro-
réseau muni sur un système PV
avec un convertisseur de tension
VSC**

CHAPITRE III Etude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

III.1.Introduction

Notre présent mémoire, comme déjà mentionné, utilise un système constituant un micro réseau selon le mode de fonctionnement, ce qui signifie que la charge pourrait être alimentée soit par le système *PV* système de batterie, soit par le réseau. Selon la topologie de mise en œuvre.

Le champ d'application comprend l'étude de modélisation et de contrôle du *VSC*, la conception, la modélisation et le contrôle d'un système *PV* avec un algorithme *MPPT* (Maximum Power Point Tracking), une modélisation simplifiée d'un système de batterie et une charge constante. Le système de gestion de l'énergie n'est pas envisagé bien qu'il existe. Il comprend également l'analyse des performances des éléments mentionnés connectés pour créer le micro-grid. Tous les résultats de simulations ont été réalisés dans l'environnement Matlab/Simulink.

Dans ce chapitre, nous allons observer les simulations de l'ensemble du système, nous allons voir tous les résultats et les analyser.

III.2.Différent configurations des systèmes PV [17]

Tableau III.1 : les configurations des systèmes PV

Système autonome sans batterie	sont représentés par les blocs générateur PV et charge continue qui est alimentée par GPV
Système autonome avec batterie	sont représentés par les blocs dans le cas où la charge et de type continu et les blocs si la charge et de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée continuellement, même en l'absence de rayonnement solaire
Système fonctionnant au fil du soleil	font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue. Si la charge et de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit
Système avec appoint électrique	introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergies électriques de type continu ou de type alternatif ; et peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

III.3.Choix des composants de système [17]

Lors du choix des différents composants qui composent le système, ses différentes caractéristiques et catalogues de fabricants doivent être pris en compte, ce qui nous permettra

CHAPITRE III Etude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

de sélectionner facilement et de manière spécifique l'équipement approprié à utiliser, en tenant compte des coûts et de la qualité.

III.4. Caractéristiques des composants utilisés [19] et [33]

Désignation du composant	Caractéristiques techniques
PV array	SPR-305 WHT, Puissance max : 100 KW à 1000 W/m ² , NS (cellules séries)= 96, V _{OC} = 64.5 V, I _{CC} = 5.96 A, V _{mpp} = 54.7 V, I _{mpp} =5.58A
Hacheur	273.5 V/ 500V, 5 KHz
Régulateur	MPPT : Inc&Cond + INT REG
VSC contrôleur	1980 Hz (33*66) 3-phase et 3-level
Banque de condensateur « filtrage »	10Kvar
Transformateur triphasé	100 KVa, 260 V/ 25 KV
Modele de réseau électrique	25 KV

Tableau.III.2.Caractéristiques des composants utilisées.

III.5. Classification des centrales PV connectées au réseau [9] et [30]

- Centrales de petite taille ($P_w=1$ à 10 KW) (*basse tension*)
- Centrales de taille moyenne ($P_w=10$ à 100 KW) (*la moyenne tension*)
- Centrales de grande taille ($P_w=500$ KW) (*haut tension*)

III.6. Les micro-réseaux

Le micro-réseau est un regroupement localisé de production d'électricité, de stockage d'énergie et de charges qui fonctionne normalement connecté à un réseau centralisé traditionnel.

CHAPITRE III Étude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

Les micro-réseaux ne transmettent pas d'énergie seulement mais aussi des informations. Grâce à ces informations, ces réseaux peuvent s'autogérer via des applications informatisées qui tiennent compte :

- ✓ des tarifs de demande et de production
- ✓ Des tarifs variables selon le moment de la journée et les conditions météo
- ✓ La capacité de production des panneaux.

III.7. Interconnexion du système PV au réseau électrique

III.7.1. Conditions techniques d'interconnexions [9]

III.7.1.1 Raccordement

En fonction de la puissance à connecter, tous les éléments doivent être pris en considération et l'administrateur du réseau fixe ainsi les conditions de connexion pour assurer le maintien de la qualité des tensions dans les limites fixées par les normes et assurer la continuité de la production.

III.7.1.2 Jugement de conformité

Et cela provient du travail du producteur, il doit soumettre un rapport de surveillance qui a été préparé à ses frais par un organisme accrédité qui montre l'engagement de l'installation au règlement général pour les installations électriques. Dispositif parallèle et protection possible contre l'injection directe

III.7.1.3 Accord de raccordement

Autrement dit, sans le consentement écrit du directeur du réseau public (sonelgaz), les installations de production décentralisées ne peuvent pas être connectées au réseau de distribution.

III.7.1.4 Dispositif de coupure

Lors de travaux hors tension sur le branchement ou sur le réseau de distribution, l'installation de production décentralisée doit pouvoir être séparée du réseau par un dispositif de coupure de sécurité.

III.7.1.5 Dispositif de protection

Des installations doivent être disponibles sur les systèmes de protection pour garantir que la phase est interrompue en cas d'erreur interne provoquant un courant constant dépassant une certaine période. Les valeurs actuelles et de temporisation sont données par l'administrateur réseau. Les systèmes de protection doivent constituer un minimum de technologie

III.7.1.6 Couplage

La mise en parallèle de l'installation de production décentralisée avec le réseau public de distribution s'effectue au moyen d'un relais d'inspection de synchronisation équipé d'un point

CHAPITRE III Étude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

de vue de synchronisation pour les installations de plus de 10 kW. En parallèle, la tension, la fréquence et la différence de phase ne provoquent pas de différences relatives soudaines de tension.

III.7.1.7. Compensation avec Batteries de condensateurs

Si des bancs de condensats sont utilisés, des installations de production décentralisées seront installées avec des filtres destinés à éviter l'amortissement du signal. En même temps, il doit être séparé de la machine de production.

III.7.1.8. Harmoniques et inter harmoniques

Les perturbations résultant des harmoniques et des inters harmoniques ne devraient pas avoir d'impact sur le réseau de distribution et pour cette raison les mesures doivent être étudiées et appliquées au niveau de la production décentralisée afin que tout reste cohérent avec un niveau de signal acceptable

III.7.1.9. Protection contre l'injection de courant continu

Les onduleurs avec adaptateur n'injectent pas de courant continu dans le réseau de distribution et ne nécessitent donc pas de mesures de sécurité supplémentaires. La technologie de transformateur sans transformateur est acceptée tant qu'elle est certifiée pour ne pas injecter DC plus de 1% du courant nominal ou qu'ils ont un système de protection par injection DC.

III.8. Simulation [19] et [33]

III.8.1. Schéma synoptique du système [19]

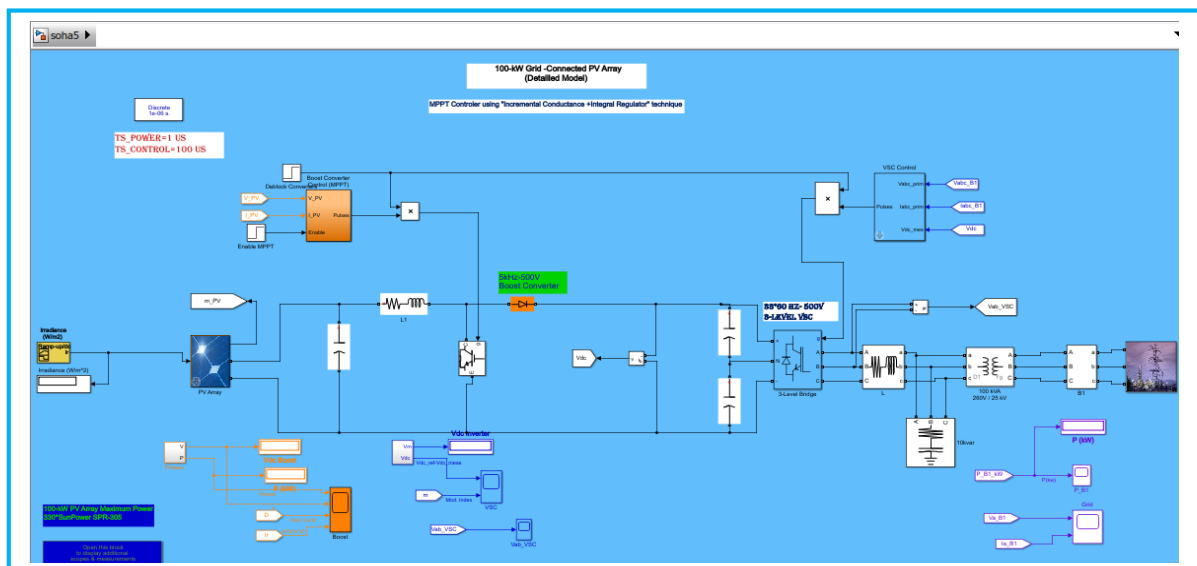


Fig.III.1 : Schéma synoptique de système PV raccordé au micro-réseau

III.8.2. Paramètres du micro-réseau [33]

- ✓ PVarray grid

CHAPITRE III Etude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

Cette réalisation illustre une installation qui contient un PV array de 100 KW de puissance électrique délivrée (produite) connecté à un réseau de 25 KV.

✓ Système de gestion intelligente

On a :

- un convertisseur *DC_DC* « Boost converter (Hacheur) »,
- un régulateur *MPPT* implémenté en (*BCC* boost converter control) sous un algorithme de « incremental conductance+ Integral regulator »
- un *VSC* contrôleur « Voltage Source Converter » de 3-phase et 3-niveaux et un banc de condensateurs pour le filtrage
- un onduleur *DC_AC* avec une commande plaine onde
- un transformateur de couplage triphasé.
- Le modèle du réseau utilisé.

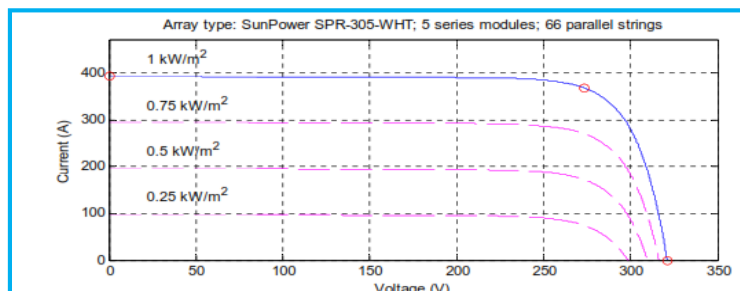
Description :

- Le PV array délivre au maximum **100 kW** à **1000 W/m²** de rayonnement solaire. Le boost convertisseur de **5 KHz**, l'augmentation de la tension PV naturelle **273.5 V_{DC}** au maximum puissance à **500 V_{DC}**. La commutation de cycle de service est optimisée par un contrôleur *MPPT* qui utilise la technique « incremental conductance + Integral regulator ». Le VSC « Onduleur » de **1980 Hz (33*66) 3-phase** et **3-niveaux** peut convertir **500 V_{DC}** à **260 V_{AC}** et garde l'unité de facteur de puissance. Le banc de condensateurs est de **10 Kvar** pour le filtrage des harmoniques produites par le VSC. Le transformateur de couplage triphasé est de **100KVa «260V /25KV** ». Utility de grid model « modèle de réseau de distribution » de **25KV+120KV** du système de transmission équivalent.

PV array à **100 KW** de ce modèle utilise **330 modules** « Sun power *SPR-305 WHT* », il contient **66 cordes** de **5 modules**-connectées en parallèle (**66*5*305W=100.65W**).

PV array block : N_S cellules séries = 96

V_{OC}= 64.5 V, I_{CC}= 5.96 A



CHAPITRE III Étude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

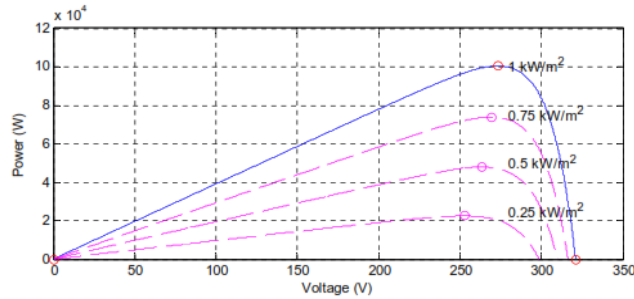


Fig.III.2 : Caractéristiques $I-V$ et $P-V$ de PV array

Les points rouges sur les courbes bleues indiquent les spécifications de fabricant du module « V_{oc} , I_{cc} , I_{mpp} » dans des conditions de test standard $25^{\circ}, 1000 W/m^2$.

Boost converter : dans ce modèle le convertisseur ($MPPT$) augmente la tension de 273.5 à $500V$, Ce convertisseur utilise le système $MPPT$ qui fait varier automatiquement le rapport cyclique afin de générer la tension requise pour extraire la puissance maximale.

VSC converter «Onduleur »: le VSC à trois niveaux régule la tension du bus CC à $500 V$ et maintient le facteur de puissance unitaire. Le système de contrôle utilise deux boucles de contrôle : une boucle de contrôle externe qui régule la tension du circuit intermédiaire à $\pm 250V$ et une boucle de contrôle interne qui régule les courants de g réseau « grid » I_d et I_q (composants de courants actifs et réactifs). La référence du courant I_d est la sortie de contrôleur externe de tension CC. La référence de courant I_q est mise à zéro afin de maintenir le facteur de puissance à l'unité. Les sorties de tension V_d et V_q du contrôleur de courant sont converties en trois signaux de modulation U_{ref_abc} utilisés par le générateur d'impulsions à trois niveaux de PWM. Le système de contrôle utilise un temps d'échantillonnage de $100\mu s$ pour les contrôleurs de tension et de courant ainsi que pour l'unité de synchronisation PLL. Dans ce modèle les générateurs d'impulsions des convertisseurs boost et VSC utilisent un temps d'échantillonnage rapide de $1\mu s$ afin d'obtenir une résolution appropriée des formes d'ondes PWM.

III.8.3.Simulation du micro-réseau [19]

L'exécution de la simulation de cette installation sur l'environnement Matlab/Simulink nous donne ces résultats :

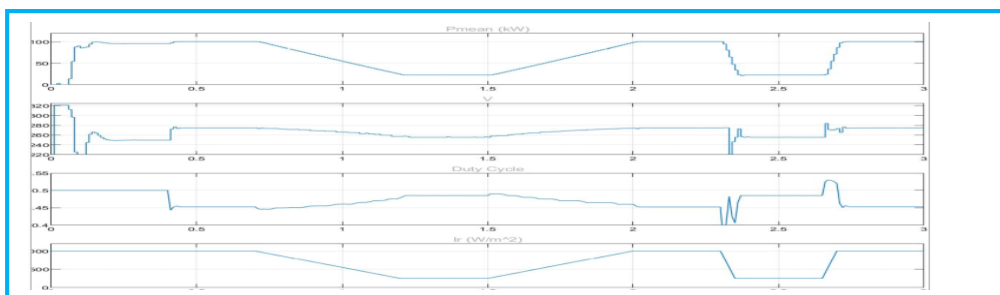


Fig.III.3 : Les allures de puissance tension rapport cyclique et irradiance «Boost»

CHAPITRE III Étude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

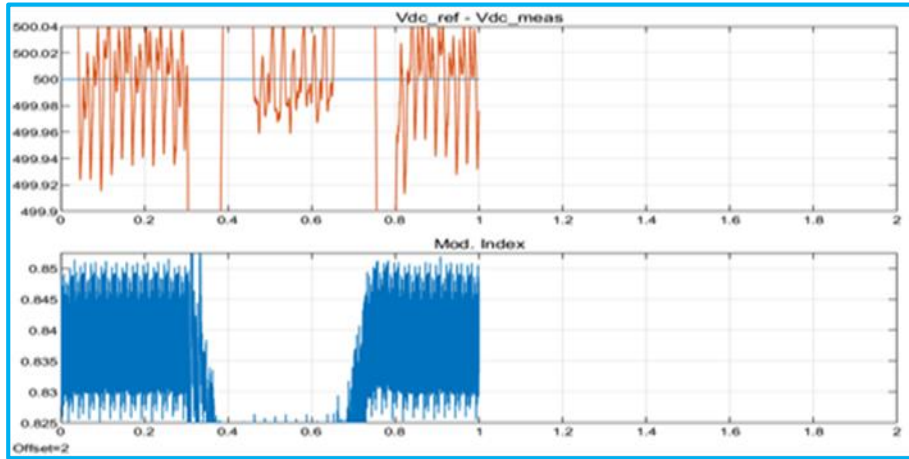


Fig.III.4 : Les allures de tension de références « VSC Contrôleur »

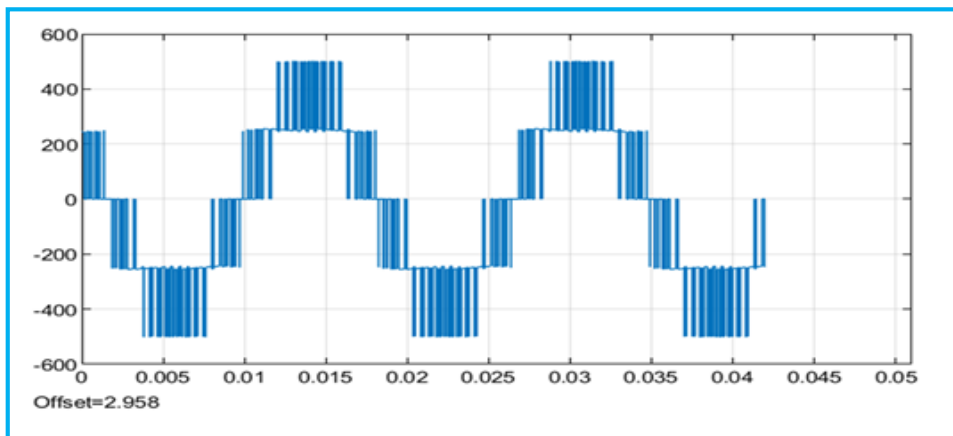


Fig.III.5 : L'allure de tension V_{ab} de VSC Contrôleur (Onduleur)

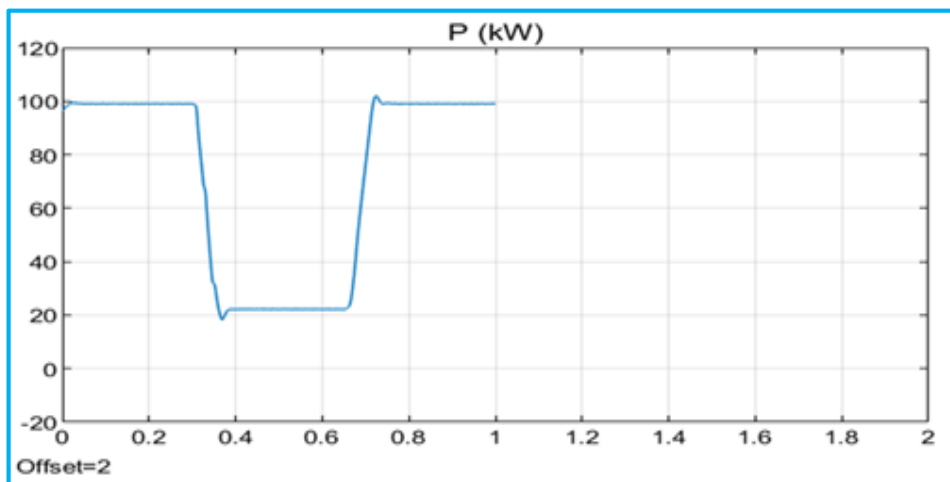


Fig.III.6 : L'allure de puissance de réseau électrique

CHAPITRE III Etude et simulation d'un micro-réseau muni sur un système PV avec un convertisseur de tension VSC

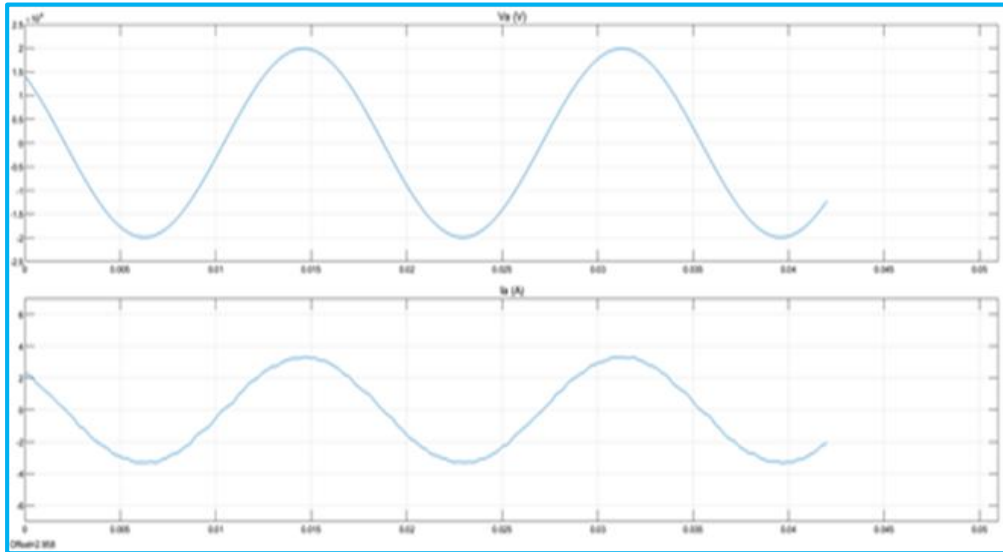


Fig.III.7 : Les allures de tension et courant de réseau électrique

III.8.4. Interprétation des résultats de simulation [33]

- De $t=0s$ à $t=0.05s$, les impulsions de boost et les convertisseurs *VSC* sont bloqués. La tension PV correspond à la tension en circuit ouvert ($N_{ser} * V_{oc}=5*64.2=321V$, voir l'allure en Fig.III.3). le pont à trois niveaux fonctionne comme un redresseur à diode et les condensateurs de la liaison CC sont chargés au-dessus de $500V$ (voir Fig.III.4).
- Au $t=0.05s$, les convertisseurs boost et *VSC* sont débloqués. La tension du circuit intermédiaire est réglée à $V_{DC}=500V$. Le rapport cyclique du convertisseur élévateur est fixe ($D=0.5$, voir Fig.III.3) et l'irradiance solaire est réglée sur $1000 W/m^2$. L'état d'équilibre est atteint à $t=0.25s$, la tension PV résultante est donc $V_{PV}=(1-D)*V_{DC}=(1-0.5)*500=250V$, voir Fig.III.3). La puissance de sortie du réseau PV est de $96 KW$ (voir Fig.III.3) alors que la puissance maximale avec un rayonnement de $1000 W/m^2$ est $100.7KW$. Voir Fig.III.7 que la tension et le courant de la phase 'A' est $25 KV$ bus sont en phase (facteur de puissance unitaire).
- Au $t=0.4s$ le *MPPT* est activé. Le régulateur *MPPT* commence à réguler la tension PV en variant le rapport cyclique afin d'extraire la puissance maximale. La puissance maximale de $100.7 KW$ est obtenue lorsque le rapport cyclique est $D=0.453$. à $t=0.6s$, la tension moyenne PV (PV mean voltage) $=274 V$, comme prévu à partir des spécifications du module PV ($N_{ser} * V_{mpp}=5*54.7= 273.5 V$).
- De $t=0.7s$ à $t=1.2s$, l'irradiance solaire est réduite de $1000 W/m^2$ à $250W/m^2$. Le *MPPT* continue de suivre la puissance maximale. Au $t=1.2s$ le moment où l'irradiance est tombée à $250W/m^2$, le rapport cyclique est $D=0.485$. La tension et la puissance PV correspondantes sont $V_{mean}=255V$ et $P_{mean} =22.6KW$. Noter que le *MPPT* continue de suivre la puissance maximale pendant ce changement rapide d'irradiance.
- De $t=1.5s$ à $t=3s$ divers changements d'irradiance sont appliqués afin d'illustrer les bonnes performances du contrôleur *MPPT*.

III.9.Conclusion

La validation des résultats est obtenue par les réponses des tensions, des courants, des puissances qui sont celles obtenues par simulation se rapprochent à celles présentées dans la littérature ce qui nous permet de valider notre travail.

Les pertes dues à la qualité de l'onduleur ont une influence importante sur l'énergie produite par la centrale PV, d'où la nécessité d'opter pour une technologie permettant la meilleure efficacité annuelle possible de ce composant qui représente l'élément clé et le plus délicat d'une installation PV.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif général de notre étude est la modélisation et la simulation d'un système solaire connecté à un mini-réseau pour la production d'énergie électrique indépendante en utilisant l'installation de systèmes PV

.Dans une première partie, nous avons cité les différentes technologies des cellules solaires, puis nous avons décrit le travail des systèmes photovoltaïques en étant présents sur chaque composant du système.

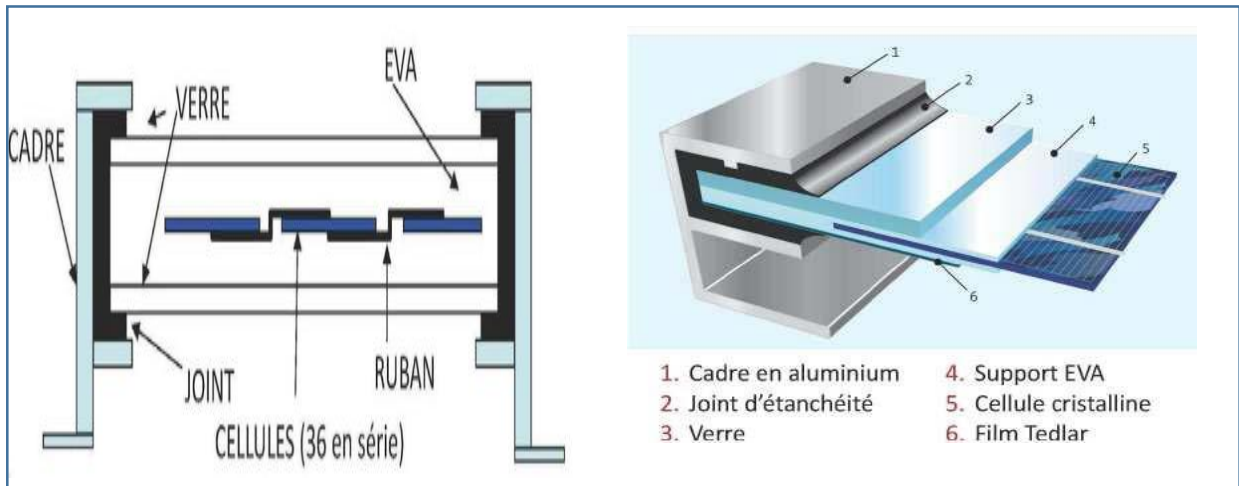
Dans la deuxième partie, nous avons identifié tous les équipements connectés au système photoélectrique. Du transformateur et de l'onduleur ,des convertisseur ...

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé les dimensions d'installation de notre système PV, puis nous avons appliqué une étude de simulation de l'installation photovoltaïque de 100KW connectée à un réseau électrique de 25 KV. Le programme de simulation que nous avons utilisé MATLAB SIMULINK répond correctement aux choix des composants qui composent notre installation, de nombreux résultats sont obtenus sous un meilleur angle et nous constatons qu'il est intéressant de noter que la structure photoélectrique peut être reliée à un mini réseau, ce qui ouvre des perspectives de développement dans ce domaine :

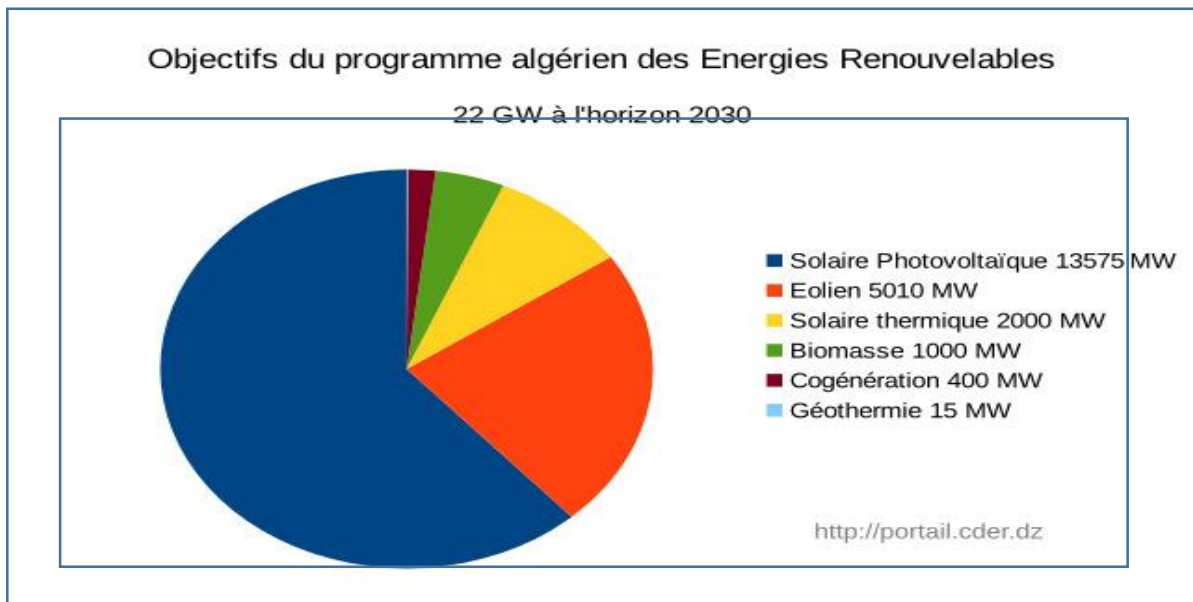
❖ Etude et développement de systèmes solaires contenant directement des transformateurs et onduleurs aux normes adaptées aux besoins des consommateurs afin d'éviter les complications auxquelles sont confrontés les ingénieurs lors de la connexion du système au réseau.

Annexes

Annexe A : Encapsulation des cellules.



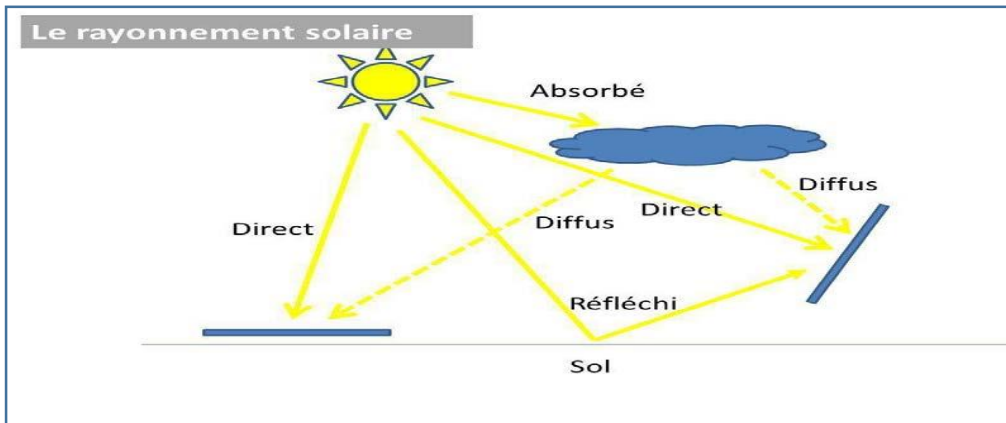
Annexe B : Les énergies renouvelables en Algérie



Annexe C : Irradiation globale journalière moyenne reçue sur un plan horizontal au mois de juillet

Wilaya	Puissance (kW)
Tamanrasset	149 703
Illizi	23 813
Tindouf	85 882
Adrar	25 145
Total	284 543

Annexe F : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.



Annexe G : Programme de simulation de générateur PV.

Programme de simulation de generateur PV "BP SX 150" :

```
function I=modulePV(V,G,TC)
k=1.381e-23;           % Constante de Boltzmann
q=1.602e-19;         % La charge d'électron
n=1.62;              % Le coefficient de non idéalité
Eg=1.12;            % L'énergie de la bande de gap
Ns=72;              % 72 Cellules en série
TrK=298;            % La température de référence(25C) en Kelvin
Vocr=43.5/Ns;       % Voc (Tension à circuit ouvert )
Iscr=4.75;          % Isc (Courant de court-circuit )
a=0.65e-3;         % Coefficient de température (0.065%/C)
TK=273 + TC;       % La température en kelvin
Vc=V/Ns;           % La tension à la borne de cellule.
% Courant de court-circuit
Isc=Iscr*(1+(a*(TK-TrK)));
% Le photo-courant
Iph=G*Iscr;
% La tension thermique de référence
Vtr=n*k*TrK/q;
b=Eg*q/(n*k);
% Le courant de saturation inverse d'une diode
I0r=Iscr/(exp(Vocr/Vtr)-1);
I0=I0r*(TK/TrK)^(3/n)*exp(-b*(1/TK-1/TrK));
% La résistance série
dVdI=-1.0/Ns;
Xv=I0r/Vtr*exp(Vocr/Vtr);
Rs=-dVdI-1/Xv;
% La tension thermique
Vt=n*k*TK/q;
% Initialisation du courant Ia à zéro
I=zeros(size(Vc));
for j=1:5;
    I=I-(Iph-I-I0.*(exp((Vc+I.*Rs)./Vt)-1)).*...
        ./(-1-I0*(Rs./Vt).*exp((Vc+I.*Rs)./Vt));
end
end
```

Annexe H

Association Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [10]

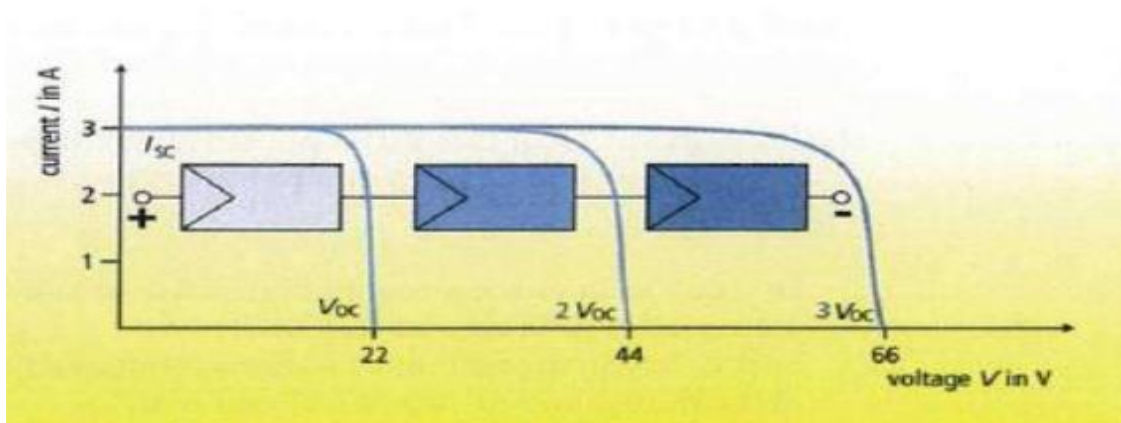


Figure : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n s cellules identiques

-Association Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont du a la mémé celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est Obtenue par addition des courants à tension donnée [10].

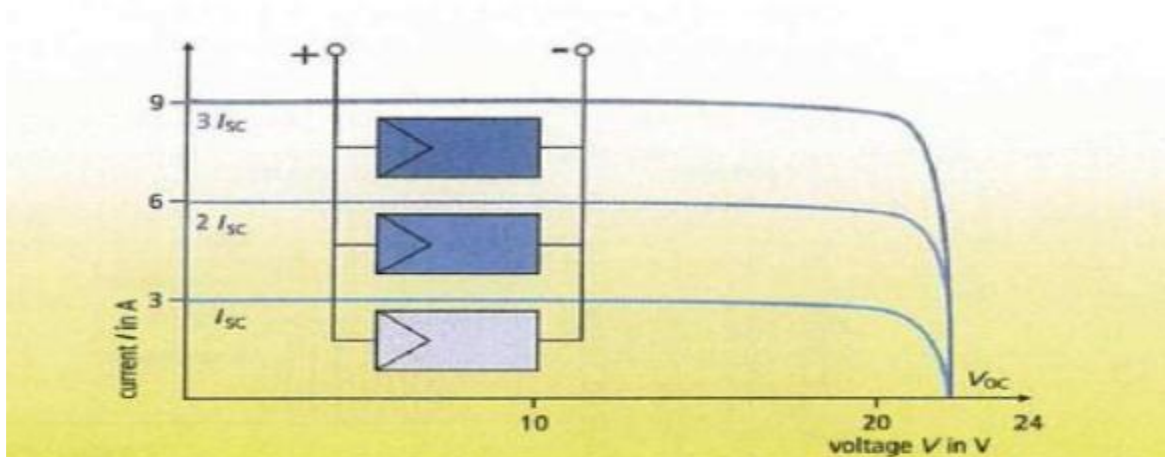


Figure : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n p cellules identiques

Association série et parallèle

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure I.5) La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [10].

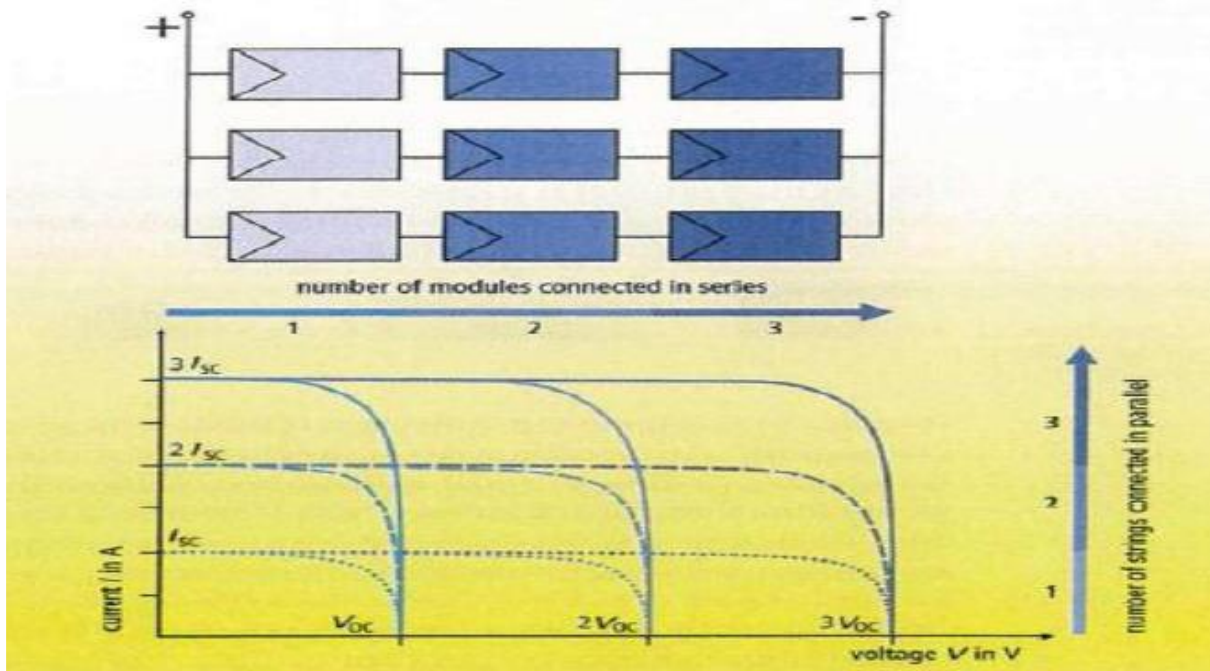


Figure : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques