



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Technologie

Réalisé par :

Della Chaima

Amrani Bochra

FILIERE : Electronique

OPTION : Instrumentation

Thème

Etude par simulation des différentes topologies de convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
BIRANE Mouhoub	MCA	Encadreur
BELLAKHDAR Aissa	MCA	Président
AMEUR Aissa	PR	Examineur

Promotion : 2022/2023

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail. Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ces années d'études n'auraient été que le pâle reflet de celles que nous avons passées.

Nos sincères remerciements à notre encadreur M r BIRANE Mouhoub nous a bien encadré et nous a encouragé tout au long de notre travail.

Nous remercions également les membres du jury, BELLAKHDER Aïssa président de jury ,AMEUR Aïssa, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.

Enfin nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, ainsi que tous ceux qui ont participé à notre formation.

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance. Qu' Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que nous dédions ce mémoire de Master :

A nos tendres Mères : lumière de notre jour, la source de notre effort, la flamme de notre cœur, notre vie et notre bonheur ;

A nos chers Pères : l'homme de notre vie, notre exemple éternel, notre soutien moral et source de joie et de bonheur, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour notre éducation et notre bien-être ;

A nos chers frères et sœurs ;

A nos oncles et tantes, cousins et cousines, et à toute la famille ;

A nos aimables amis et frères de cœur ; A tous les camarades de notre promotion ; A tous nos enseignants depuis notre première année d'études.

ملخص :

المحولات الكهربائية لها مجموعة واسعة من التطبيقات حيث نجد أهميتها في مجال الخلايا الكهروضوئية. تركز هذه الدراسة على المحولات المستخدمة بشكل متكرر في الأنظمة الكهروضوئية للاتصال بشبكات الكهرباء. تضمن بحثنا فحصاً كاملاً للمولد الكهروضوئي وتشغيله بأقصى طاقة، والذي تم تحقيقه من خلال استخدام مروحية معززة تتحكم فيها خوارزمية MPPT من نوع P&O. كان الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تحسين كفاءة الطاقة في الأنظمة الكهروضوئية. هدفنا التالي هو دمج النظام الكهروضوئي في عاكس من مرحلتين وثلاث مراحل مع طوبولوجيا.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية، المحولات محول مستمر / مستر-مستمر/متناوب ، المحاكاة ، Matlab

Résumé :

Les convertisseurs électriques ont une large gamme d'applications et sont particulièrement importants dans le domaine du photovoltaïque. Cette étude porte sur les convertisseurs fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques destinés à se connecter aux réseaux électriques. Notre recherche a impliqué un examen complet du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à puissance maximale, qui a été réalisé grâce à l'utilisation d'un hacheur de survolteur contrôlé par un algorithme MPPT de type P&O. L'objectif principal de cette recherche était d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques. Notre objectif est d'intégrer le système photovoltaïque à un onduleur triphasé à deux niveaux régis par des topologies.

Mots Clés : Système (PV) - Convertisseur DC/DC –DC/AC Commande MPPT – Modélisation. Simulation. Matlab

Abstract :

Electrical converters have a wide range of applications, and are particularly important in photovoltaics. This study focuses on converters frequently used in photovoltaic systems designed to connect to power grids. Our research involved a comprehensive examination of the photovoltaic generator and its operation at maximum power, which was achieved through the use of a booster chopper controlled by a P&O MPPT algorithm. The main aim of this research was to improve the energy efficiency of photovoltaic systems. Our next objective is to integrate the photovoltaic system with a two-level three-phase inverter governed by intelligent topologies and structures.

Key words: System (PV) – DC/DC-DC/AC Converter - MPPT Command - Modelling – Simulation – Matlab.

Liste des figures

Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'éolienne.

Figure I.2 : Fonctionnement d'un central Hydraulique.

Figure I.3 : La distance entre le soleil et la terre.

Figure I.4 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m²/jour sur un plan horizontal.

Figure I.5: Différents composants du rayonnement.

Figure I.6 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

Figure I.7: Le chauffage de la maison par énergie solaire passive.

Figure I.8 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à basse température.

Figure I.9 : Les différents techniques utilisée dans les centrales solaires.

Figure I.10 : schéma production de l'électricité par cellule photovoltaïque.

Figure I.11 : L'énergie solaire photovoltaïque.

Figure I.12 : parcours des électrons dans le photovoltaïque.

Figure I.13 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.14 : : Les types des cellules PV.

Figure I.15 : Composition d'un panneau solaire.

Figure I.16 : Association de Ns modules solaires en série.

Figure I.17 : : Caractéristique résultante d'un groupement de Ns cellules en série.

Figure I.18 : Association de Np modules solaires en parallèle.

Figure I.19: Caractéristique résultante d'un groupement de Np cellules en parallèle.

Figure I.20 : câblage série / parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protection.

Figure I.21: Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle.

Figure I.22: Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

Figure I.23 : Caractérisés électriques d'un module (PV) avec illustration du point de fonctionnement à puissance maximale.

Figure I.24 : Influence de l'éclairement sur I(V)et P(V).

Figure I.25 : : L'influence de la température sur les caractéristique I (V) et P(V).

Figure I.26 : Représentation d'un module photovoltaïque incliné à 35°.

Figure I.27 : Classification des systèmes photovoltaïques.

Figure I.28 : Schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique.

Figure I.29 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau.

Figure I.30 : Schéma d'une installation type d'un système hybride

Figure II.1 : les convertisseurs statiques.

Figure II.2 : Architecture générique d'un convertisseur statique.

Figure II.3 : Représentation symbolique des différents composants de puissance.

Figure II.4 : : Convertisseur AC-DC.

Figure II.5 : Convertisseur AC-AC.

Figure II.6 : Convertisseur DC-DC.

Figure II.7 : Différents types de hacheurs.

Figure II.8 : Représentation générale des hacheurs non réversibles.

Figure II.9 : Schéma réel de Convertisseur Buck.

Figure II.10 : Convertisseur survolteur (Boost).

Figure II.11 : Circuit électrique de base d'hacheur dévolteur-survolteur.

Figure II.12 : Structure d'un onduleur de courant.

Figure II.13 : Structure d'un onduleur de tension en pont.

Figure II.14 : Schéma de principe et la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.

Figure II.15 : Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi-pont.

Figure II.16 : Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Figure III.1 : Types des systèmes connectés au réseau.

Figure III.2 : Configuration d'un système PV avec

Figure III.3: Onduleurs photovoltaïques connecte au réseau.

Figure III.4: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation

Figure III.5: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.

Figure III.6: Principe du PWM (DC/DC).

Figure III.7: Organigramme de l'algorithme P&O.

Figure IV.1 : schéma block d'un générateur photovoltaïque.

Figure IV.2 : Résultats de simulation de courant et de tension de sortie de générateur photovoltaïque.

Figure IV.3 : Résultats de simulation de puissance de sortie de générateur photovoltaïque.

Figure IV.4: Schéma block d'un convertisseur élévateur.

Figure IV.5 : Schéma block d'un convertisseur onduleur.

Figure IV.6: Résultats de simulation de la tension de sortie d'onduleur.

Figure IV.7: Schéma Matlab-Simulink d'un système photovoltaïque avec Boost, la commande MPPT et onduleur triphasé.

Figure IV.8 : Résultats de simulation de courant (IGPV), la tension (VM1) et la puissance (product) d'entrée de l'hacheur élévateur dans le cas global.

Figure IV.9 : Résultats de simulation de courant (IGPV), la tension (VM1) et la puissance (product) de sortie du hacheur élévateur dans le cas global.

Figure IV.10 : Résultats de simulation de tension de sortie l'onduleur triphasé dans le cas global.

Figure IV.11: Résultats de simulation de puissance de sortie l'onduleur triphasé dans le cas global.

Figure IV.12 : Résultats de simulation de courant de sortie l'onduleur triphasé dans le cas global.

Figure IV.13 : Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur central.

Figure IV.14: Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) de sortie du hacheur élévateur (à central).

Figure IV. 15 : Résultats de simulation de tension de sortie l'onduleur triphasé (à central).

Figure IV. 16 : Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur parallèle.

Figure IV.17: Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) d'entrée du hacheur élévateur (à parallèle).

Figure IV.18: Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) de sortie du hacheur élévateur (à parallèle).

Figure IV.19 : Résultats de simulation de tension de sortie l'onduleur triphasé (à parallèle).

Figure IV.20: Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur string on série.

Figure IV.21 : Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) d'entrée du hacheur élévateur (à série).

Figure IV.22: Résultats de simulation de puissance de sortie du hacheur élévateur (à série).

Figure IV.23: Résultats de simulation de tension de sortie du l'onduleur (à série).

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont H.

Tableau II.2 : Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en demi-pont.

Tableau IV.1 : Représente les données de la simulation des différentes architectures des systèmes PV.

Liste des symboles

h : Constante de Planck ($6.62.10^{-34}$ j.s).

E_g : Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m²).

E : Eclairement (W/m²).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

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

I₀ : courant de saturation de la diode

R_p : Résistances parallèle shunt. (Ω)

R_s : Résistance série (Ω).

T : Température de jonction ($^{\circ}$ K).

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

V_{th} : La tension thermique.

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

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

FF : Facteur de forme.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

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

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

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

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

k : coefficient de Boltzman ($1.38.10^{-23}$ J / K).

η : le rendement (%).

Ns : Nombre des cellules en série

Np : Nombre des cellules en parallèle

Dp : Diode by-pass

Dr : Diode anti-retour

Vd : la tension directe

V_{CE} : la tension aux bornes collecteur C et l'émetteur E

VL: Tension à la bobine

r : le taux de modulation,

m : l'indice de modulation,

D : le rapport cyclique

FF : Facteur de forme.

Liste d'abréviation

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

EVA : éthylène-acétate de vinyle

GTO : Gate Turn-Off

BJT : Bipolaire Junction Transistors

FET : Field Effect Transistor

MOS : Metal-Oxide-Semiconductor

IGBT : transistor bipolaire à grille isolée

G : la grille

E : l'émetteur,

L : bobine

Charge RL : résistance et bobine

PWM : Pulse wide modulation

MLI : Modulation largeur d'impulsion

Table des matières

- I. Résumé
- II. Liste des figures
- III. Liste des tableaux
- IV. Liste des symboles
- V. Liste d'abréviations

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables et le système photovoltaïque

I.1	Introduction	4
I.2	Les Energies Renouvelables	4
I.2.1	L'énergie éolienne	5
I.2.2	L'énergie hydraulique.....	5
I.2.3	La Biomasse	6
I.2.4	La Géothermie	6
I.2.5.2	L'irradiation et l'éclairement	8
I.2.5.2.1	L'irradiation.....	8
I.2.5.2.2	L'éclairement.....	8
I.2.5.3	Rayonnement solaire	8
I.2.5.4	Les différents types de rayonnement.....	9
I.2.5.4.1	Le rayonnement direct	9
I.2.5.4.2	Le rayonnement diffus.....	9
I.2.5.4.3	Le rayonnement réfléchi	9
I.2.5.4.4	Le rayonnement global	9
I.3	Le système photovoltaïque	13
I.3.1	L'effet Photovoltaïque	14
I.3.2	Principe de fonctionnement d'une cellule PV	15
I.3.2.1	Les matériaux semi-conducteurs	15
I.3.2.2	Les différentes technologies.....	15
I.3.3	Module photovoltaïque.....	17
I.3.3.1	Constitution d'une module de photovoltaïque.....	17
I.3.3.2	Association en série et en parallèle d'une module PV	18
I.3.3.2.1	Association en série	18
I.3.3.2.2	Association en parallèle.....	19
I.3.3.3	Protection d'un module PV	20
I.3.3.4	Modélisation d'une cellule PV	21
I.3.3.4.1	Schéma électrique équivalent	22
I.3.4	Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque	23
I.3.4.1	Caractéristique Courant-Tension :	23
I.3.4.1.1	Le courant de court-circuit (I_{cc}).....	24
I.3.4.1.2	Tension de circuit-ouvert (V_{co})	24

I.3.4.2	Facteur de forme.....	25
I.3.4.3	Rendement de la conversion	25
I.3.5	Influence de l'éclairement et de température	25
I.3.5.1	Influence de l'éclairement.....	25
I.3.5.2	Influence de la température	26
I.3.6	Orientation des panneaux solaires	27
I.3.6.1	Choix de l'orientation des modules.....	27
I.3.6.2	Choix de l'inclinaison des modules	27
I.3.7	Application du photovoltaïque	28
I.3.7.1	Systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux	28
I.3.7.2	Le photovoltaïque autonome (non raccordé au réseau électrique).....	29
I.3.7.3	Les systèmes hybrides	30
I.3.8	Avantages et inconvénients de l'énergie PV	30
I.4	Conclusion	31
Chapitre II : Généralité sur les convertisseurs statiques		
II.1	Introduction	33
II.2	Les convertisseurs statiques et principaux composants électroniques de puissance	33
II.2.1	Constructions du convertisseur statique.....	34
II.2.1.1	Interrupteur non commandable	34
II.2.1.2	Interrupteur commande seulement à la fermeture	34
II.2.1.3	Interrupteur à ouverture et à fermeture commandées	35
II.2.1.3.1	Fonction thyristor ouvert contrôlable	35
II.2.1.3.2	Fonction transistor bipolaire de puissance	35
II.2.1.3.3	Fonction du tube Power MOS	35
II.2.1.3.4	Fonction de transistor IGBT.....	36
II.3	Classification des convertisseurs statique.....	37
II.3.1	Les redresseurs.....	37
II.3.2	Les gradateurs	37
II.3.3	les hacheurs	38
II.3.3.1	différents type hacheur.....	38
II.3.3.1.1	Hacheurs réversibles	39
II.3.3.1.2	Hacheurs non réversibles	40
II.3.3.2	Les types de hacheurs non réversibles	40
II.3.3.2.1	Convertisseur dévolteur (Buck).....	40
II.3.3.2.2	Hacheur survolteur (Boost)	41
II.3.3.2.2.1	le modèle du convertisseur	41
II.3.3.2.2.2	Dimensionnement des composants du convertisseur (L et C)	43
II.3.3.2.3	Le convertisseur Buck-Boost	44

II.4 Les convertisseurs DC/AC	44
II.4.1 onduleurs non autonomes	45
II.4.2 onduleurs autonomes	45
II.4.2.1 onduleurs autonomes du courant	45
II.4.2.2 onduleurs autonomes de tension	46
II.5 Onduleur monophasé.....	46
II.5.1 Onduleur monophasé en pont (Pont H)	47
II.5.1.1 Principe de fonctionnement	47
II.5.2 Onduleur en demi-pont	48
II.5.2.1 principe de fonctionnement.....	48
II.6 Onduleur triphasée.....	49
II.7 Commande des onduleurs.....	50
II.7.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion	50
II.7.2 Caractéristique de la modulation	51
II.9 Conclusion	51
Chapitre III: les topologies d'onduleurs et poursuite du point de puissance maximale	
III.1 Introduction	53
III.2 Composants des appareils connectés au réseau	54
III.3 Types des installations photovoltaïques connectées au réseau.....	54
III.3.1 Centrale de production d'énergie photovoltaïque	54
III.3.2 Générateurs photovoltaïques Dans Les Constructions (installations décentralisées).....	55
III.4 Avantages et inconvénients des systèmes connectes au réseau.....	56
III.4.1 Avantages	56
III.4.2 Inconvénients	56
III.5 Topologie onduleur couplés au réseau	57
III.5.1 Onduleur modulaire (module d'onduleur)	57
III.5.2 Onduleur centralisé (central invertir)	57
III.5.3 Onduleurs « String » ou « de rangé »	57
III.5.4 Interconnexion de plusieurs onduleurs.....	58
III.6 Choix d'onduleurs	58
II. 6 Principe de MPPT.....	59
II.6.1 La commande MPPT	60
II.6.1.1 Principe PWM.....	60

II.6.1.2 Classification des commandes de MPPT selon le type de recherche	61
II.6.1.3 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée	62
III.6.2 Poursuite du point de puissance maximale	62
III.7 Conclusion	64

Chapitre IV : simulation et évaluation des résultats

IV .1 Introduction.....	66
IV.2 l'outil Matlab / Simulink.....	66
IV.3 le système photovoltaïque	66
IV.4 Simulation d'hacheur élévateur (parallèle).....	68
IV.5 Simulation d'un onduleur triphasé.....	68
IV.6 Simulation de système global	69
IV.7 Simulation de convertisseur dans le cas central.....	72
IV.8 Simulation de convertisseur dans le cas string.....	74
IV.8.1 Association de convertisseur en parallèle	74
IV.8.2 Association de convertisseur en série.....	76
IV.9 Conclusion	78
Conclusion générale :	80
Bibliographie	82

Introduction Générale

Introduction Générale

Le défi de la production d'énergie est de plus en plus important pour l'avenir, car les sociétés industrialisées et en développement continuent de connaître une augmentation de la demande énergétique. Au cours des 60 dernières années, la production d'énergie a triplé. Il convient de noter que toute la production d'énergie dans le monde provient de fossiles et que leur consommation a entraîné des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution. De plus, l'utilisation excessive de ces ressources naturelles épuise la réserve de ce type d'énergie, mettant en péril les générations futures. Pour compléter les sources d'énergie traditionnelles telles que les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, les sources d'énergie renouvelables telles que l'éolien, le solaire, la biomasse et l'hydroélectricité peuvent fournir des solutions prometteuses. Les sources d'énergie renouvelables sont dérivées de sources naturelles telles que le soleil, le vent, la chaleur terrestre, l'eau ou la biomasse.

Contrairement aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables sont une source d'énergie aux ressources illimitées. Le type d'énergie renouvelable qui fait l'objet de ce travail est l'énergie solaire. Les performances techniques et la fiabilité des convertisseurs statiques utilisés pour connecter les systèmes photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité sont des facteurs cruciaux qui peuvent avoir un impact significatif sur la production d'énergie annuelle et la rentabilité financière d'un système.

L'intégration des systèmes PV dans les réseaux de distribution peut entraîner divers impacts sur les réseaux électriques tels que des changements bidirectionnels dans les flux de puissance, des effets sur le plan de tension, le plan de protection, la qualité de l'énergie et la planification du réseau. Inversement, le fonctionnement des systèmes photovoltaïques peut également être influencé par les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution.

Le but dans ce présent travail est l'étude des topologies d'onduleurs et des structures intelligentes dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, réalisé en quatre chapitres :

Dans le Premier chapitre nous avons abordé les généralités sur l'énergie renouvelable et le système PV (leurs caractéristiques est le principe de fonctionnement).

En suite dans le Deuxième chapitre on a présenté une description générale sur les convertisseurs DC/DC et DC-AC utilisés dans les systèmes photovoltaïques

Par la suite dans le Troisième chapitre contient au réseau électrique (centralisés et décentralisés) et ces avantages et inconvénients, présente les topologies d'onduleurs couplés au réseau et quelque technique de la commande MPPT.

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats obtenus par la simulation du système photovoltaïque et les différentes topologies d'onduleurs avec la commande MPPT.

Enfin, on conclura notre travail par une conclusion général et perspective avenir.

Chapitre I

Généralité sur les énergies renouvelables et le système photovoltaïque

I.1 Introduction

La production mondiale d'électricité provient principalement de l'énergie Combustibles fossiles et nucléaires. Utilisation systématique des énergies fossiles, Comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, il provoque un important dégagement de gaz polluants et gaz à effet de serre. Production d'électricité à partir de combustibles fossiles Il représente 40 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone.

L'énergie nucléaire, qui n'émet pas directement de CO₂, est concernée Souvent, l'image médiatique est mauvaise en raison des risques importants encourus. Certes, le risque d'accident lié à son exploitation est très faible, mais les conséquences Un accident serait catastrophique. De plus, ce modèle génère une élimination des déchets Très coûteux à produire : la radioactivité du produit transformé est Depuis de nombreuses années, nocif pour l'homme et l'environnement (animaux et végétaux).

Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole, limitées (moins de cent ans au rythme actuel de consommation). [1]

Pour résoudre tous ces problèmes, nous utilisons des énergies renouvelables : Solaire, éolien, géothermie....,

I.2 Les Energies Renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies qui peuvent être régénérées naturellement. Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, ce sont [2]:

- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)
- La géothermie.
- L'énergie solaire

I.2.1 L'énergie éolienne

Une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : le vent Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique, qui à son tour est convertie en énergie électrique grâce à un générateur électromagnétique intégré au rotor. L'électricité peut être livrée au réseau de distribution, stockée dans des batteries ou utilisée par des charges isolées.

- Les éoliennes exploitent le mouvement de l'air pour générer de l'énergie en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique.
- L'énergie éolienne est une forme d'énergie non polluante et infiniment durable.
- Le vent tourne les pales de l'hélice qui a leurs tours font tourner l'arbre d'une génératrice produisant de l'électricité.

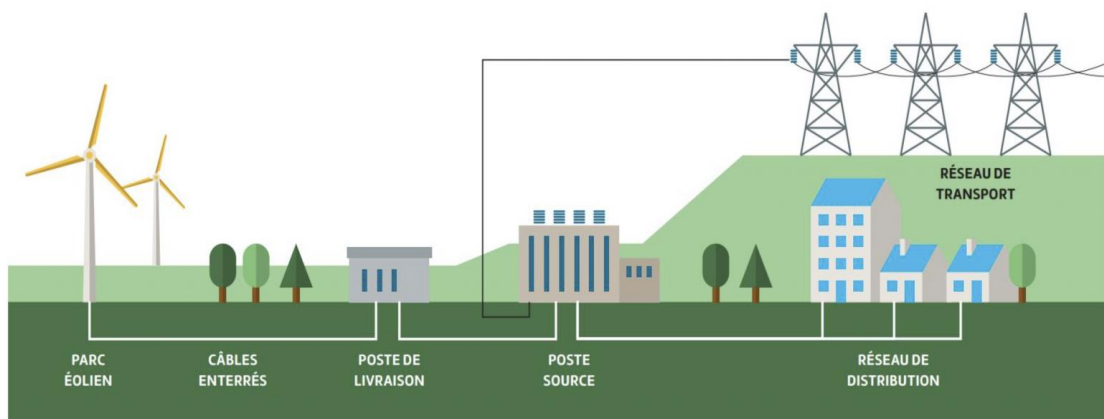


Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'éolienne [2].

I.2.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique exploite la puissance des rivières et des ruisseaux en utilisant leur courant pour faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité. Plus une rivière ou un ruisseau se déplace rapidement, plus la turbine produit d'énergie.

La quantité d'énergie produite dépend également de la pression et du volume d'eau disponible.

La pression de l'eau du lac varie en fonction de la hauteur de la surface du lac par rapport à l'emplacement d'une turbine. Cette forme d'électricité renouvelable utilise un minimum de ressources et ne produit ni dioxyde de carbone ni déchets.

Il s'appuie sur une ressource puissante et illimitée qui n'a pas besoin d'être transformée : l'eau passe à travers une centrale, et en ressort intacte ! [3]

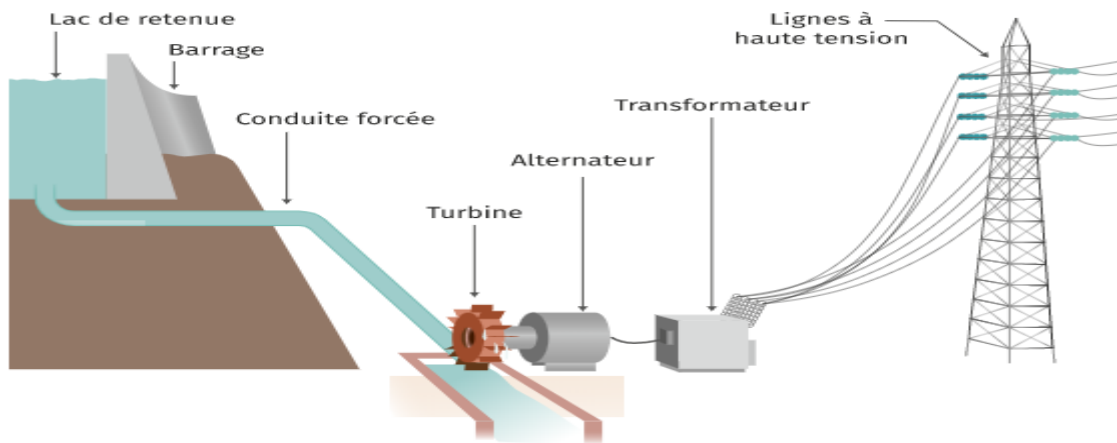


Figure I.2 : Fonctionnement d'un central Hydraulique [3].

I.2.3 La Biomasse

La biomasse fait référence à la quantité de matière vivante contenue dans un organisme ou un matériau. Quelle que soit la source, toute matière organique est considérée comme de la biomasse. Cela comprend à la fois les matières végétales et animales.

Il peut provenir de jardins publics et privés, de forêts, d'océans, d'effluents d'élevage, etc.

Elle est la source d'énergie principale pour cuisiner et se chauffer. Cette biomasse qui comprend tous les produits obtenus à partir de plantes ou de résidus de plantes, secs ou déshydratés comme le bois, la paille, les grignons d'olives, la bagasse de la canne à sucre, est exploitée par combustion ou métabolisation. Mais pour être une réelle énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas excéder les quantités produites. En fonction des besoins, elle permet une production de chaleur ou d'électricité. De ce fait, sa participation à la production d'énergie mondiale est énorme par rapport aux autres énergies [3]

I.2.4 La Géothermie

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète représente une formidable source d'énergie. Plus on creuse profondément, plus on atteint des températures élevées.

La géothermie utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité [3]

L'énergie géothermique passe de "haute énergie" à "très basse énergie" à mesure que la température change dans les couches terrestres. Les couches de la terre avec la température la plus basse se situent entre 30 et 90 degrés Celsius ; ceux-ci sont considérés comme "à faible consommation d'énergie". Les couches entre 90 et 150 degrés Celsius sont classées comme "moyenne énergie", tandis que les couches entre 150 et 90 degrés Celsius sont considérées comme "haute énergie".

- L'énergie géothermique provient de la chaleur du sous-sol. Une exposition prolongée à la chaleur extrême et à la vapeur du sous-sol profond donne faussement lieu à l'idée que les puits sont utilisés pour transporter l'eau chaude à la surface.
- En réalité, ce sont des conduits décrépités pour transporter la vapeur et l'eau chaude des profondeurs de la terre vers le haut. Cela nécessite l'utilisation de turbines pour produire de l'électricité ou chauffer les bâtiments.

I.2.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire provient du soleil. L'électricité peut être produite par des panneaux photovoltaïques peu polluants, économiques, facilement convertibles et disponibles. Grâce à des équipements fiables comme les modules photovoltaïques, cela est possible.

I.2.5.1 Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique d'un diamètre de 139 kilomètres. Il est composé d'hydrogène et d'hélium gazeux, avec un centre qui entretient des fusions nucléaires perpétuelles. La température centrale du Soleil est 10^7 k.

Le soleil est à des millions de kilomètres, mais la surface de la terre absorbe plus de 180 millions de gigawatts d'énergie. C'est parce que l'énergie solaire remplace efficacement les combustibles fossiles.

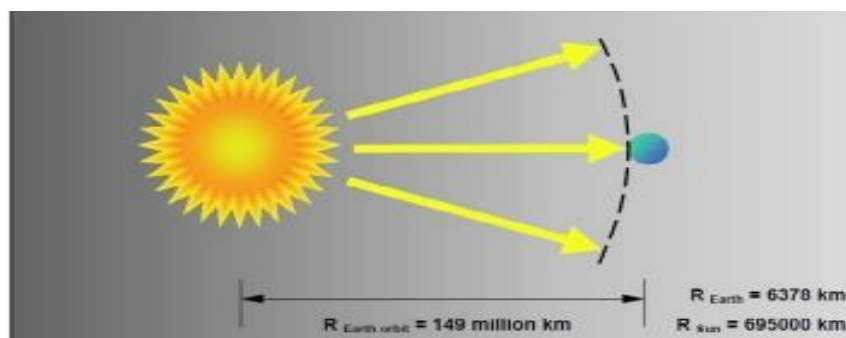


Figure I.3 : La distance entre le soleil et la terre [3].

I.2.5.2 L'éclairage et l'irradiation

I.2.5.2.1 L'irradiation

L'irradiation est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en J/m^2 (joule par mètre carré). Symbole H. D'autres unités peuvent être utilisées comme le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré). [4]

I.2.5.2.2 L'éclairage

L'éclairage est défini comme une puissance reçue par une surface, il s'exprime en W/m^2 (watt par mètre carré). Symbole G. [4] Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- De l'orientation et l'inclinaison de la surface.
- De la latitude du lieu et son degré de pollution.
- De la période de l'année et de l'instant considéré dans la journée
- De la nature des couches nuageuses. [5]

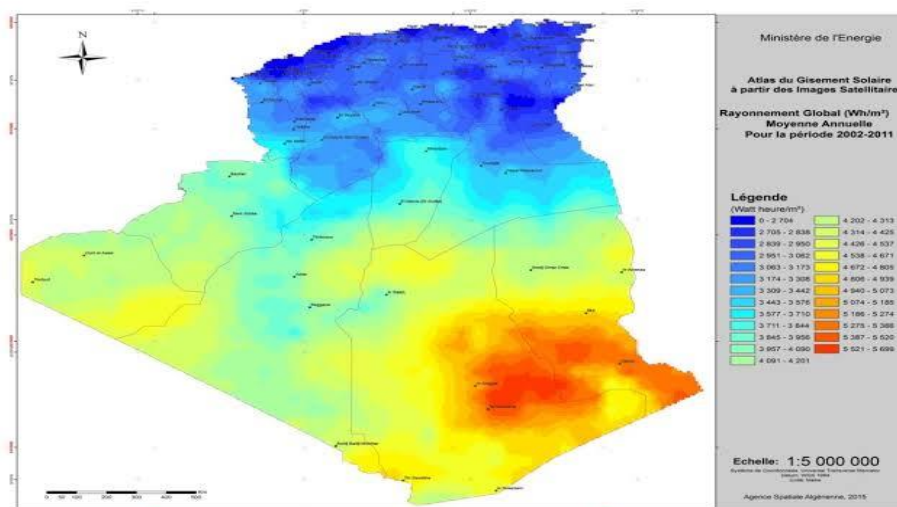


Figure II.4 : Carte de l'Algérie de l'irradiation moyenne annuelle en $kWh/m^2/jour$. [6]

I.2.5.3 Rayonnement solaire

Alors que le rayonnement émis par la surface du Soleil reste stable, il subit d'importantes fluctuations au moment où il atteint la surface de la Terre, grâce à son interaction avec l'atmosphère de la planète, y compris l'absorption et la diffusion.

I.2.5.4 Les différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé vers le sol, On distingue plusieurs composantes [7]:

I.2.5.4.1 Le rayonnement direct

Le rayonnement direct fait référence au rayonnement solaire qui tombe directement sur une surface ou un plan spécifique.

I.2.5.4.2 Le rayonnement diffus

Émergeant d'une position centrée et fixe autour du disque solaire.

Le rayonnement émane de toutes les directions à travers les obstacles, tels que les bâtiments, le sol et les nuages, et est appelé rayonnement diffus. L'illustration représente à la fois le rayonnement direct et diffus.

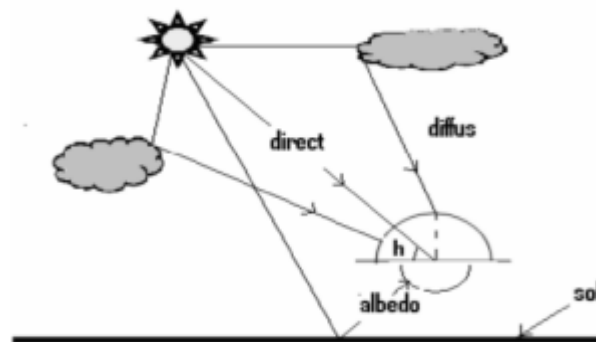


Figure II.5 : Différents composants du rayonnement [8]

La conversion de l'énergie solaire via des modules photovoltaïques (PV) peut exploiter à la fois le rayonnement direct et diffus.

I.2.5.4.3 Le rayonnement réfléchi

Il s'agit de la proportion de rayonnement solaire qui est réfléchi ou diffusée par les nuages et la surface de la Terre. Le terme « albédo » se rapporte généralement aux surfaces au sol et représente la mesure de réflectivité typique pour un rayonnement et un angle d'incidence particuliers. Il convient de noter qu'un corps noir, par définition, possède un albédo de zéro.

I.2.5.4.4 Le rayonnement global

Lors du calcul du rayonnement global sur une surface inclinée, il est important de prendre en compte les effets combinés du rayonnement direct, diffus et réfléchi.

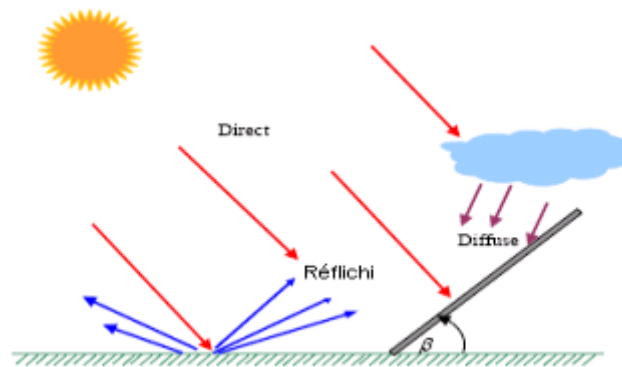


Figure II.6 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné. [1]

I.2.5.5 Type d'énergie solaire

Les gens qui croient au pouvoir du soleil aiment souvent rappeler aux gens que toute l'énergie de la planète en provient.

Afin d'utiliser l'énergie de la terre, les humains doivent comprendre comment le soleil, la terre et l'atmosphère interagissent les uns avec les autres. Cela comprend la compréhension des effets de la température et de l'humidité sur la surface de la terre.

Et enfin, quelqu'un doit comprendre les combustibles fossiles formés à partir de la chaleur de la terre.

I.2.5.6 L'énergie solaire passive

Le placement d'éléments de construction appropriés dans un bâtiment exploite l'énergie solaire passive, qui est une forme d'énergie abondante et non polluante.

Le chauffage solaire passif fonctionne de la manière suivante : lorsque la lumière du soleil pénètre dans une pièce par les fenêtres, les meubles, les sols et les murs absorbent l'énergie lumineuse, qui est ensuite émise sous forme de chaleur. Ce système de chauffage peut être complété par des baies vitrées et la thermo-circulation, entraînant à terme une diminution de la consommation des autres formes d'énergie.

En conséquence, l'énergie solaire passive augmente significativement le confort des occupants tout en fournissant une énergie rentable.

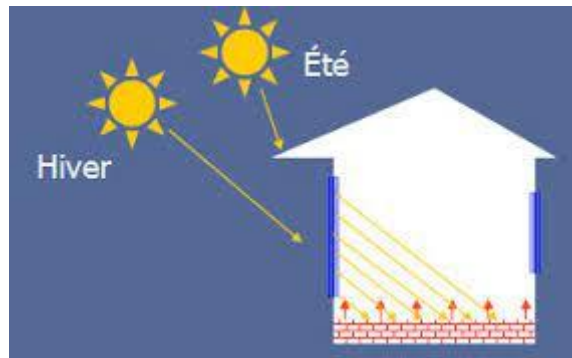


Figure I.7 : Le chauffage de la maison par énergie solaire passive [9].

I.2.5.7 L'éclairage naturel

L'éclairage naturel est utilisé à la place de l'éclairage artificiel.

L'éclairage naturel quotidien est la luminosité du soleil. Il change continuellement et naturellement.

I.2.5.8 L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique fait référence à l'énergie récupérée de la lumière du soleil par des capteurs solaires en verre pour le chauffage.

L'énergie solaire thermique se présente sous deux formes.

I.2.5.8.1 L'énergie solaire thermique à basse température

Les rayons du soleil captés par le capteur de chaleur en verre transfèrent leur énergie à l'absorbeur métallique, un réseau de tubes en cuivre dans lequel circule un fluide caloporteur chauffé. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans les cumulus.

Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct". [9]

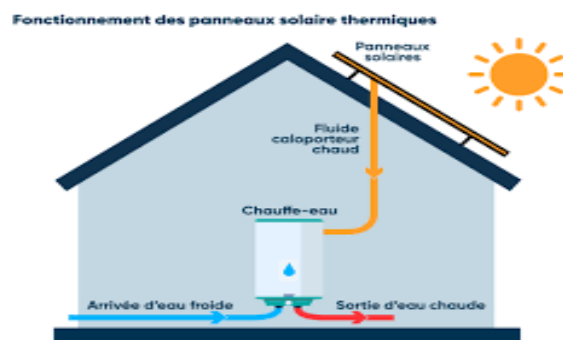


Figure I.8 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à basse température [9].

I.2.5.8.2 L'énergie solaire thermique à haute température

La concentration du rayonnement solaire sur la surface collectrice permet d'obtenir des températures très élevées, typiquement comprises entre 400°C et 1000°C.

La vapeur produite par le soleil alimente les turbines, qui elles-mêmes alimentent les générateurs pour produire de l'électricité. C'est la thermodynamique solaire. Trois technologies différentes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- a) Les capteurs paraboliques cylindriques concentrent les rayons solaires sur des tubes caloporteurs situés au point focal du capteur solaire.
- b) Dans un concentrateur parabolique, les rayons du soleil sont concentrés en un point, le foyer de la parabole
- c) Dans une centrale à tour, des centaines de miroirs (héliostats) suivent la progression du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet de la tour.

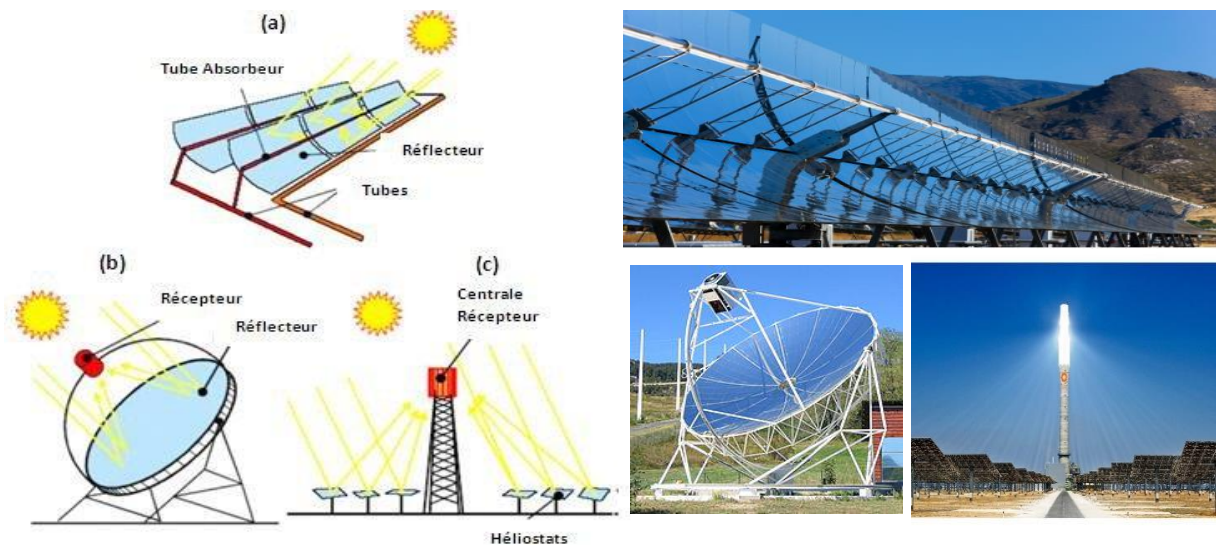


Figure I.9 :Les différents technologies dans le centrale solaire

a) cylindro-parabolique b) parabolique c) à tour. [9]

I.2.5.9 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est la conversion directe de la lumière du soleil en électricité.

Le mot "photo" vient du grec, signifiant lumière, et "voltaïque" vient du nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a apporté de nombreuses contributions à la découverte de l'électricité, et l'unité qui porte son nom est également nommée tension "Volts". [3]

L'énergie photovoltaïque est le moyen le plus élégant de produire de l'électricité. Pas de bruit, pas de pièces mécaniques, pas de pollution.

L'énergie solaire photovoltaïque est donc une sorte d'énergie renouvelable, qui peut convertir une partie du rayonnement solaire pour produire de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques.

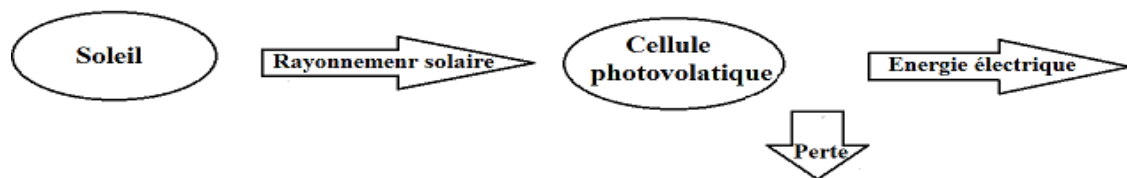


Figure I.10 : schéma production de l'électricité par cellule photovoltaïque.

I.3 Le système photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque fait référence à la création d'énergie électrique directement à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Cela se produit lorsque la lumière du soleil est absorbée par un semi-conducteur et convertie en un électron et un photon. L'énergie solaire photovoltaïque est abondante et non polluante. Il peut être récolté à la surface de la terre, même lorsqu'une quantité importante traverse l'atmosphère. Comme on peut s'y attendre, une partie de la lumière perd de son intensité lorsqu'elle se déplace dans l'air. Cependant, les panneaux créés en utilisant 1000 watts par mètre carré ou plus produisent encore suffisamment d'énergie pour répondre aux besoins de la zone tempérée à 1400 watts par mètre carré.

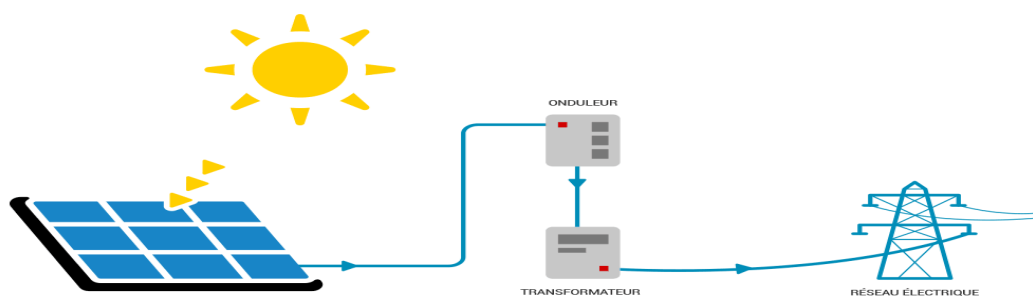


Figure I.11 : L'énergie solaire photovoltaïque [9].

I.3.1 L'effet Photovoltaïque

Le mot "photovoltaïque" vient du grec "photos", signifiant lumière, et "volta" du nom d'un physicien italien.

Le phénomène physique de l'effet photovoltaïque se retrouve dans les cellules solaires, qui permettent de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Les rayons solaires sont constitués de "particules lumineuses" photons dont l'énergie dépend de la longueur d'onde (spectre visible compris entre 0,4 et 1,1 μm). Après que la lumière entre en collision avec des atomes de cristal, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de bande interdite leur confèrent.

L'énergie des atomes. Chaque atome déplace un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse un trou, ce qui crée une charge positive ainsi que des paires électron-trou. A l'intérieur du matériau, un champ électrique permanent empêche les électrons de se recombiner avec leurs atomes d'origine.

Ce champ peut être généré de plusieurs manières : soit par une jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonction), soit par une barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur, soit par une jonction de concentration différente en électrons libres (homo-jonction ou PN).

À l'interface de la même région semiconductrice. Une tension est développée entre les deux régions, N et P, qui peut varier entre 0,3V et 0,7V, selon les matériaux utilisés et leur disposition, et l'âge de l'appareil. L'appareil devient un générateur sous l'action de la lumière, et pour la connexion avec des circuits extérieurs, des collecteurs ou des grilles sont utilisés sur chaque face (avant et arrière).

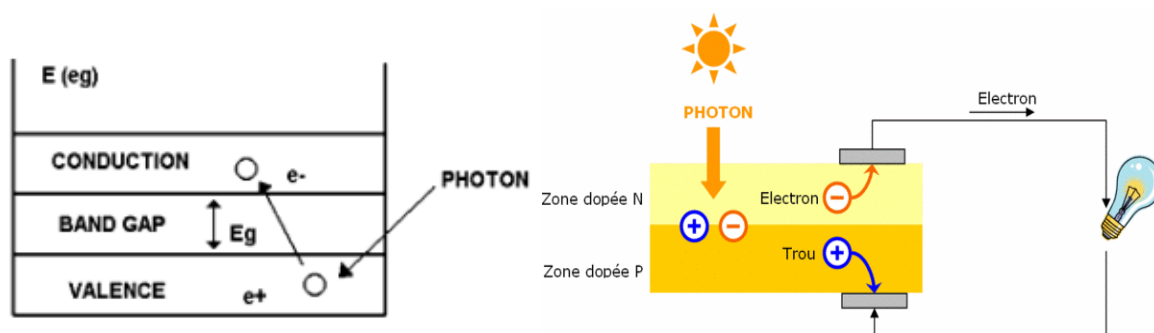


Figure I.12 : parcours des électrons dans le photovoltaïque [10].

I.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule

I.3.2.1 Les matériaux semi-conducteurs

Un matériau semi-conducteur est un objet dont la résistivité est comprise entre celle d'un conducteur et celle d'un isolant.

Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec les atomes voisins.

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [11]

a) Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons liés par covalence situés sur les couches les plus éloignées du noyau peuvent devenir porteurs de charge sous l'action de l'agitation thermique.

Le diagramme d'énergie est constitué de deux bandes (de conduction et de valence) séparées par une bande interdite. Pour traverser cette bande, les électrons doivent gagner de l'énergie (énergie thermique, photons, etc.). Mais le nombre d'électrons libres dans les semi-conducteurs intrinsèques est encore très faible. Ici, le nombre de trous et d'électrons est le même.

b) Les semi-conducteurs extrinsèques

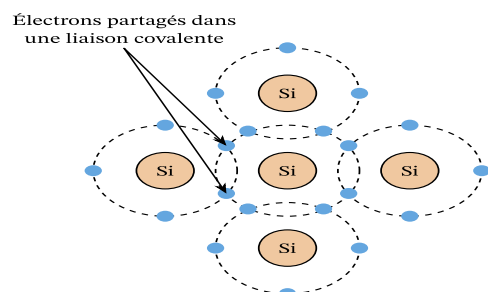
Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage [11]

I.3.2.2 Les différentes technologies

Le silicium est le semi-conducteur le plus couramment utilisé dans la fabrication de cellules et il existe trois types de cellules photovoltaïques en silicium :

Monocristal, polycristallin ou amorphe.

Les cellules monocristallines et polycristallines sont les plus courantes, mais leur fragilité oblige à les protéger par des panneaux de verre, ce qui alourdit encore le poids des panneaux solaires. Le matériau de base est le silicium, qui est très abondant, mais la qualité requise pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté, et



son coût joue un rôle important dans le coût global de l'installation. La pénurie actuelle de silicium de haute qualité pèse sur le marché et fait grimper les prix des cellules.

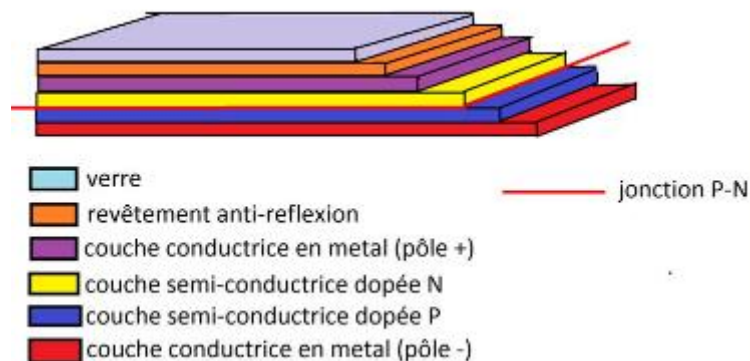


Figure I.13 : Composition d'une cellule photovoltaïque [11].

Le rendement de ces cellules varie entre 12 et 16% pour le monocristallin et le polycristallin et il est de 7% pour l'amorphe [12]. Il est donc indispensable de connaître les particularités de chacune :

a) Les cellules en silicium monocristallines

Elles sont les photopiles de la première génération, possédant un taux de rendement de 12 à 17%, mais la méthode de leurs productions est laborieuse et difficile, puisqu'il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. [11]

b) Les cellules en silicium polycristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les différentes orientations des cristaux.

Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que celui des cellules monocristallines [11]

c) Les cellules amorphes

Elles ont un coût de production moins chère, mais malheureusement leur rendement est faible (8 à 10%). La cellule est grise très foncé.

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium, ou on peut appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du plastique souple ou du métal. C'est le silicium amorphe qu'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation

comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits. [11]

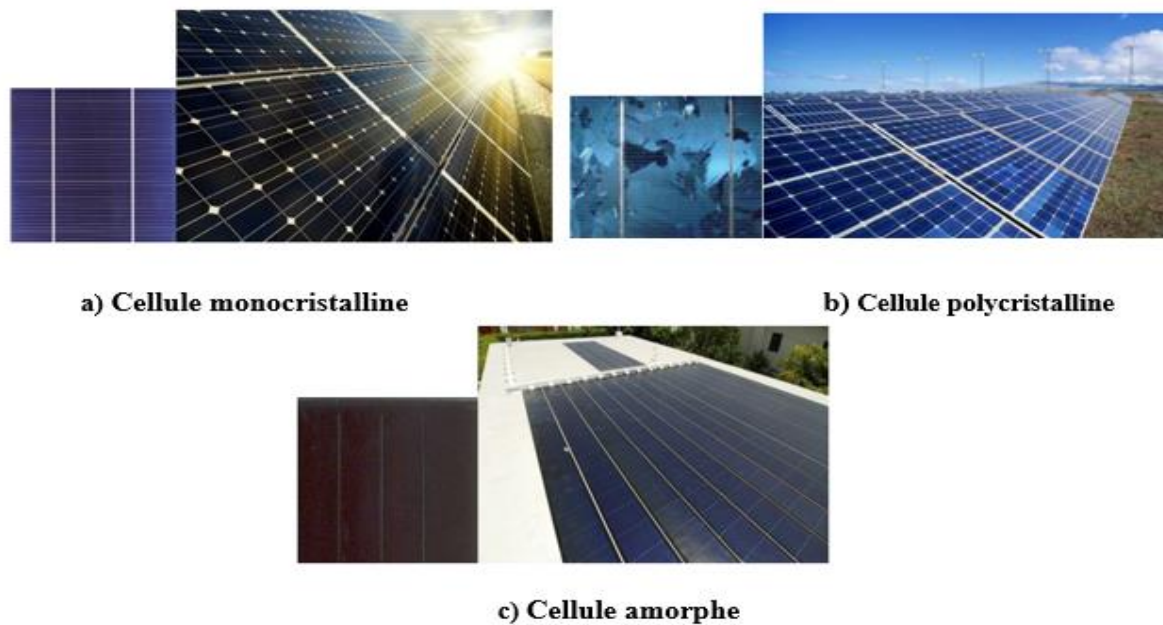


Figure I.14 : Les types des cellules PV [10].

I.3.3 Module photovoltaïque

I.3.3.1 Constitution d'un module de photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (figure I.15) [13]

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïques.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.

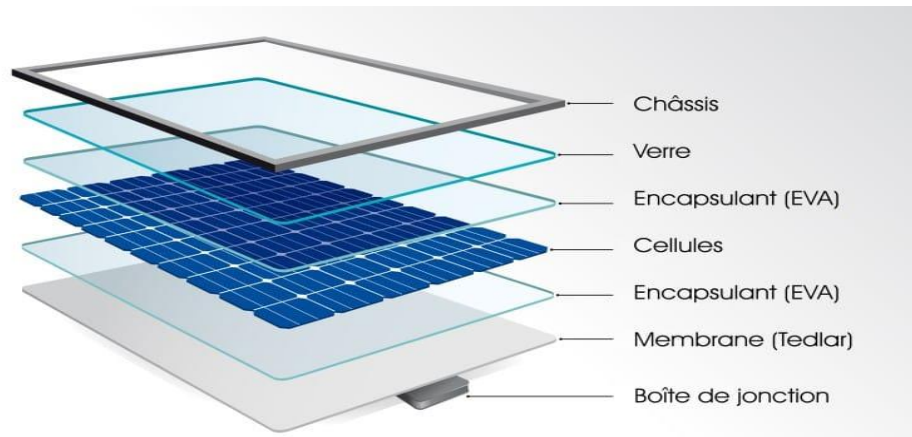


Figure I.15 : Composition d'un panneau solaire.[12]

I.3.3.2 Association en série et en parallèle d'une module PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière...etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [14]

I.3.3.2.1 Association en série

En ajoutant les mêmes cellules ou modules en série, le courant de branche reste constant, mais la tension de générateur PV (GPV) augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) connectées en série.

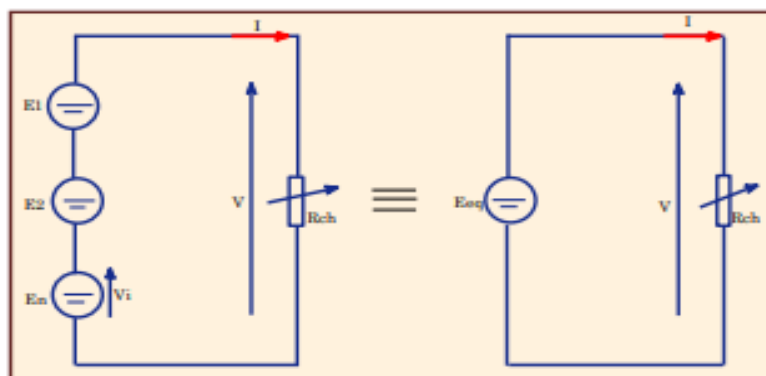


Figure II.16 : Association de N_s modules solaires en série[13].

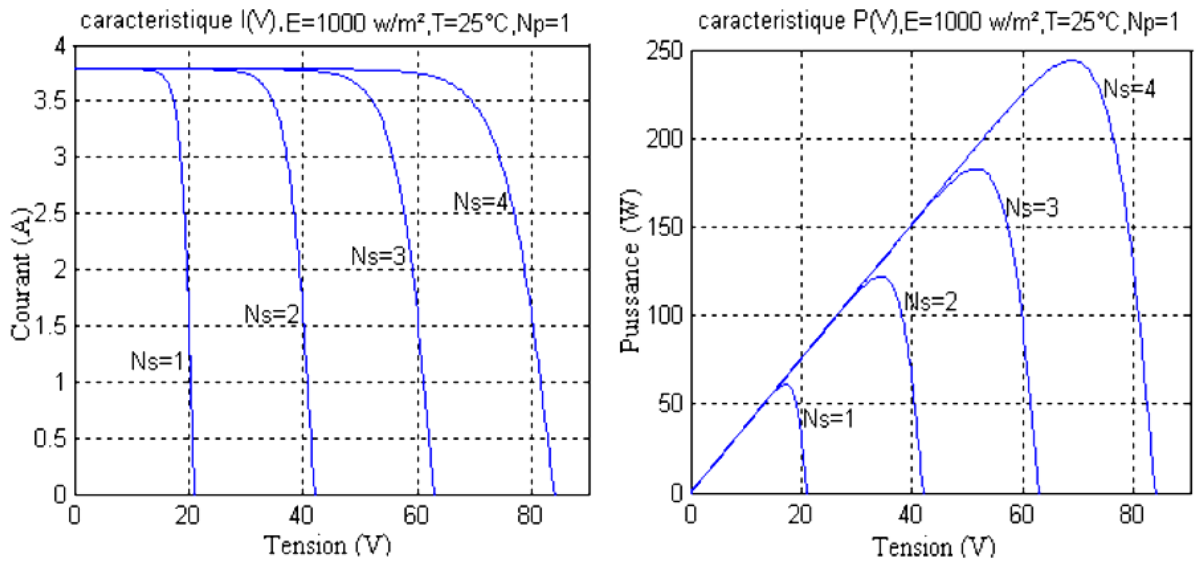


Figure I.17 : Caractéristique résultante d'un groupement de N_s cellules en série [13]

I.3.3.2 Association en parallèle

En ajoutant des modules ou des batteries identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à celle de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules connectés en parallèle dans la branche.

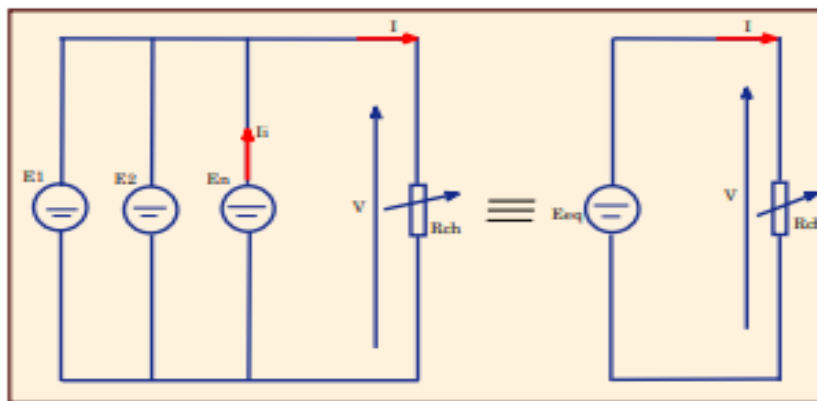


Figure II.18 : Association de N_p modules solaires en parallèle.[13]

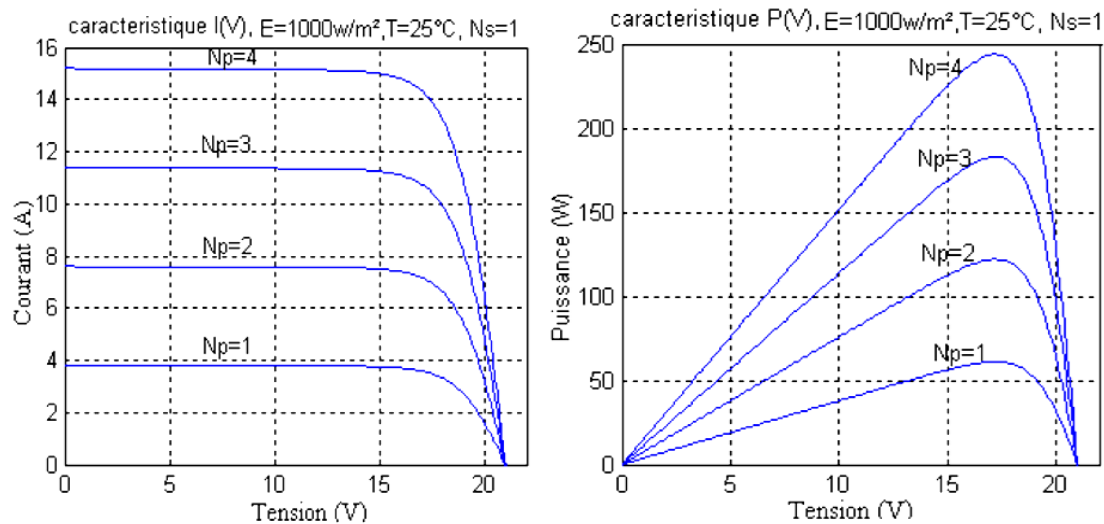


Figure I.19 : Caractéristique résultante d'un groupement de N_p cellules en parallèle [13]

I.3.3.3 Protection d'un module PV

Dans certaines conditions d'éclairement non uniforme et de fonctionnement proche du court-circuit, une cellule du groupement série peut même être soumise à la tension des (n_s-1) autres cellules appliquées en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante qui peut la détruire si la contrainte thermique est trop forte ou si la tension d'avalanche est dépassée. Pour éviter cela, il faut disposer une diode D_p connectée en parallèle, appelée "diode by-pass", aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum. L'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès l'apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement limite cette dernière à la valeur V_d de la tension directe de conduction de la diode choisie et la puissance dissipée à $V_d \cdot I_s$. Des modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses. De façon duale, une diode anti-retour D_r doit protéger des voies en parallèle des courants inverses [15]

Finalement **la Figure I.20** montre le câblage typique d'un réseau de cellules ou de modules photovoltaïques munis de ces diodes protections.

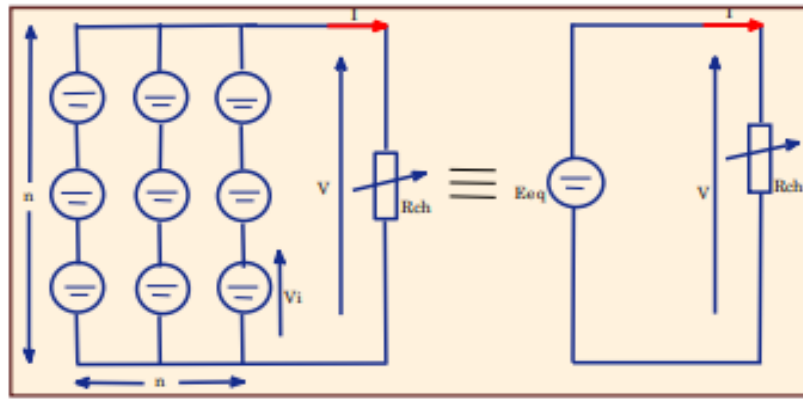


Figure I.20 : câblage série / parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protection. [14]

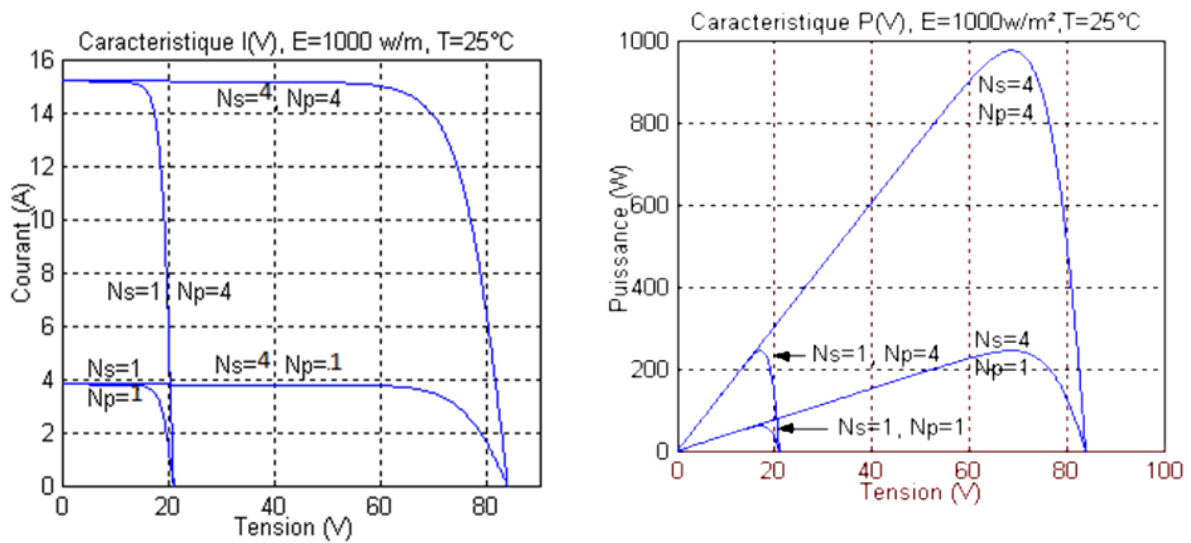


Figure II.21: Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle [13]

I.3.3.4 Modélisation d'une cellule PV

Pour établir un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque correcte sans considération du courant et de la tension, il est nécessaire de faire un choix bien déterminé des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Il y a deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode [16]. Dans notre cas, nous allons utiliser le modèle à une diode.

I.3.3.4.1 Schéma équivalent

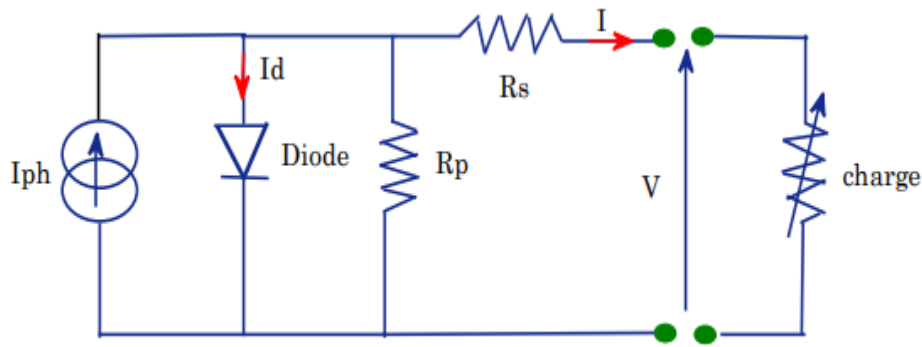


Figure I.22 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.[15]

Selon la Figure I.22, une cellule photovoltaïque est composée d'une résistance série R_s et d'une résistance shunt R_p , toutes deux impactant la caractéristique I-V de la cellule :

- La résistance interne d'une cellule, appelée résistance série, est principalement déterminée par le type de semi-conducteur utilisé, la résistivité des grilles de collecteur et la résistance de contact de ces grilles.
- La résistance du shunt est causée par le courant qui fuit à la jonction, et sa valeur dépend de son procédé de fabrication.

D'après la Figure I.22, le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donné par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad I.1$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad I.2$$

Avec

$I_{ph} = I_{cc} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right)$: est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses et le photo-courant dépendant de l'éclairement (G). Ce courant correspond également au courant de court-circuit ;

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{nKT}} - 1 \right)$$

$$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p} : \text{ le courant dérivé par la résistance parallèle ;}$$

V : Tension de sortie de la cellule (Ohm)

Rs : Résistance série

I : Courant de sortie de la cellule (A)

Rp : Résistance parallèle

I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A)

q : La charge électrique 1.6×10^{-19} (c)

I₀ : Courant de saturation de la diode (A)

K : Constant de Boltzmann 1.38×10^{-23} J/K

T : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°)

n : Facteur d'idéalité de la diode ($m \in [1,2]$), La valeur typique de **m** est 1.3

I.3.4 Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement.

Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle à la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un 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 I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{co} .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} et un V_{co} désirés.

I.3.4.1 Caractéristique Courant-Tension :

La **Figure I.23** représente la courbe $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

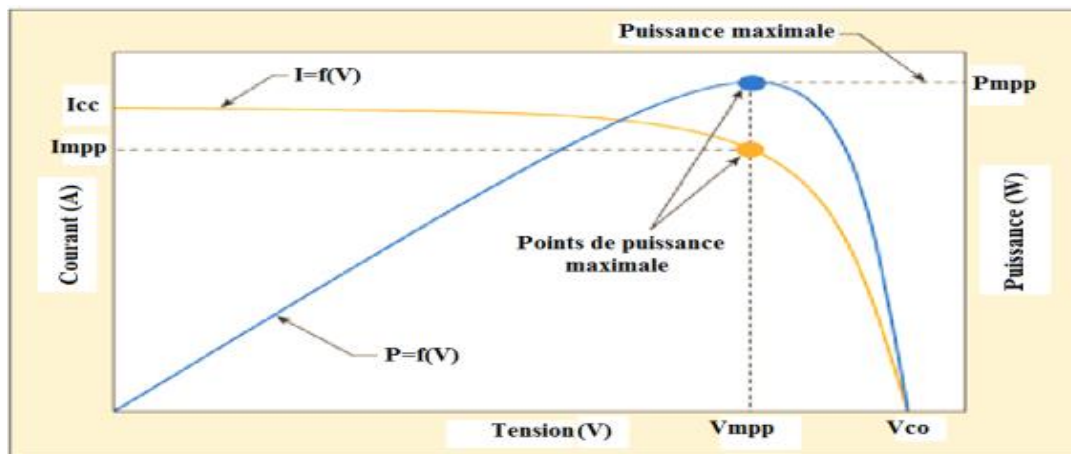


Figure I.23 : Caractéristiques électriques d'un module (PV) avec illustration du point de fonctionnement à puissance maximale.[16]

Sur cette figure nous constatons quelques paramètres qui caractérisent un module (PV) comme :

- I_{cc} : Courant de court-circuit ($V_{PV}=0V$).
- V_{co} : Tension à circuit ouvert (avec $I_{PV}=0A$).
- I_{mpp} : Courant de fonctionnement à puissance maximale.
- V_{mpp} : Tension de fonctionnement à puissance maximale.
- P_{mpp} : Puissance maximale
- La courbe (bleue) représente la puissance délivrée par le module (PV) en fonction de la tension à ses bornes.
- La courbe (orange) représente le courant généré par le module (PV) en fonction de la tension à ses bornes.

I.3.4.1.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où $V = 0$. (Pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

I.3.4.1.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad I.3$$

Avec ($V_{th} = \frac{n \cdot K \cdot T}{q}$) : La tension thermique.

I.3.4.2 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_p . Il est défini par [17]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad I.4$$

I.3.4.3 Rendement de la conversion

Le rendement de la conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module photovoltaïque. Si S est la surface de ce module, et E l'éclairement en W/m^2 , le rendement énergétique s'écrit [15]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot G_a} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad I.5$$

Avec : $P_m = I_{mpp} \times V_{mpp}$, est la puissance maximale. Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions standard, « STC » (Standard Test Conditions) condition d'essai standard, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1000W/m^2$, à la température de $25^\circ C$ et sous un spectre AM1,5 (air mass: masse d'air en français). Ce dernier d'écrit l'angle d'incidence et le trajet parcouru par le rayonnement incident du soleil. [13]

I.3.5 Influence de l'éclairement et de température

I.3.5.1 Influence de l'éclairement

Le graphique ci-dessous montre la variation du courant en fonction de la tension pour différentes intensités lumineuses et la puissance maximale dans chaque cas. On remarque que le point de fonctionnement à puissance maximale se décale peu et se situe autour de la même

valeur. On peut aussi remarquer que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire.

En revanche, la diminution de tension est relativement faible. Nous en déduisons donc que la batterie fournit la tension correcte même dans des conditions de faible luminosité.

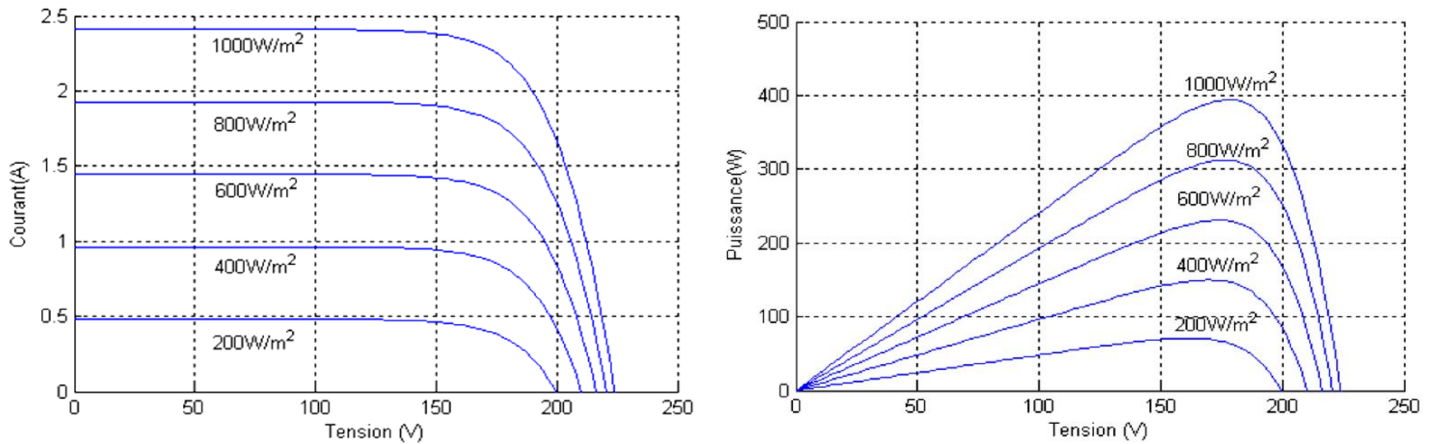


Figure I.24 : Influence de l'éclairement sur I(V) et P(V).

I.3.5.2 Influence de la température

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque. Expérimentalement, on remarque que le courant de court-circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée (de l'ordre de - 0.4%/K). La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°). [10]

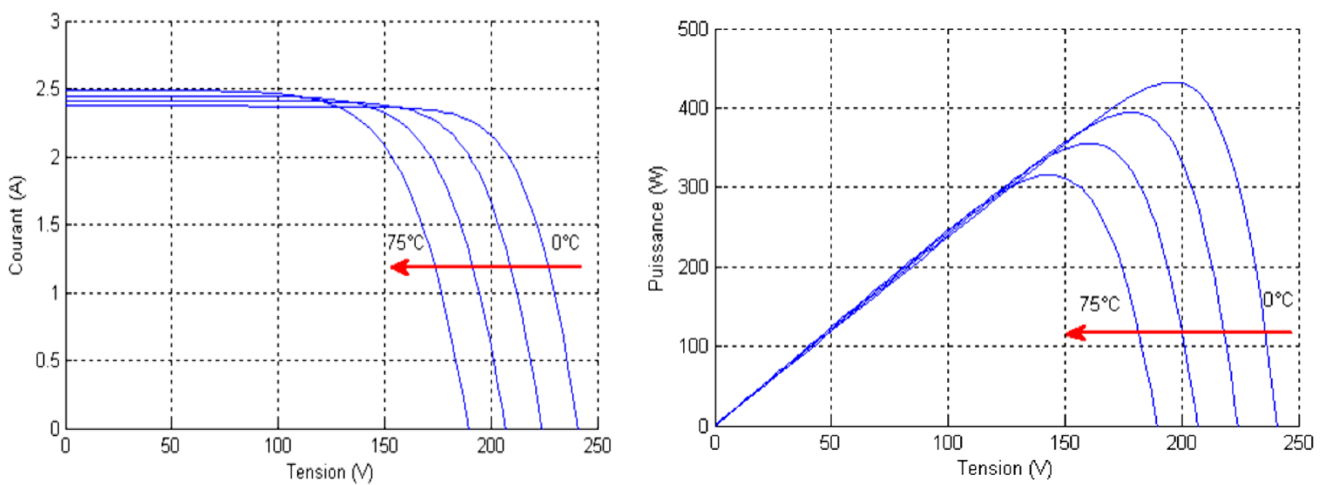


Figure I.25 : L'influence de la température sur les caractéristiques I (V) et P(V).

I.3.6 Orientation des panneaux solaires

I.3.6.1 Choix de l'orientation des modules

L'orientation des modules doit idéalement être plein sud. Cependant, les deux paramètres suivants doivent être considérés lors du choix d'une orientation :

- Masques autour.
- Orientation du site.

Dans le cas où le site présente des masques importants à l'est (végétation, bâtiments, etc.), il est peut-être préférable d'orienter plus à l'ouest le champ photovoltaïque plutôt que de le placer plein sud. La production sera alors plus importante l'après-midi sans pour autant défavoriser le matin (qui n'est pas ensoleillé du fait des masques). [18]

I.3.6.2 Choix de l'inclinaison des modules

L'objectif est de produire le plus d'énergie sur l'année. La production est maximale lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au module. L'incidence du rayonnement sur les modules photovoltaïques varie de manière importante entre l'été et l'hiver. D'autre part, la durée d'ensoleillement est elle aussi très variable entre l'été et l'hiver à tel point que chaque mois d'hiver représente moins de 5 % de la production totale. Il faut donc rechercher quelle est l'inclinaison qui permettra de produire le plus d'énergie sur l'année. Celle-ci dépend de la latitude du lieu et aussi de l'orientation des capteurs. [18]

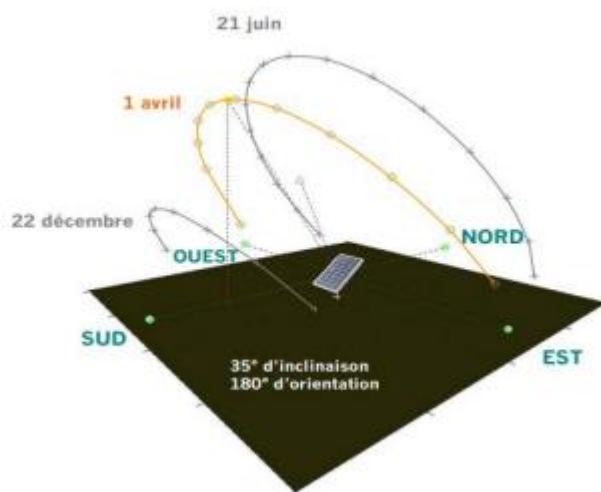


Figure I.26 : Représentation d'un module photovoltaïque incliné à 35°. [18]

I.3.7 Application du photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque peut être utilisée aussi bien dans les villages isolés des montagnes que dans les centres des grandes villes. Produite au plus près de son lieu de consommation, directement chez l'utilisateur, elle peut être valorisée de deux manières : soit en se raccordant au réseau, soit en amenant l'électricité sur des sites isolés. Il peut être utilisé avec d'autres sources d'énergie renouvelables, d'où le nom de système hybride.

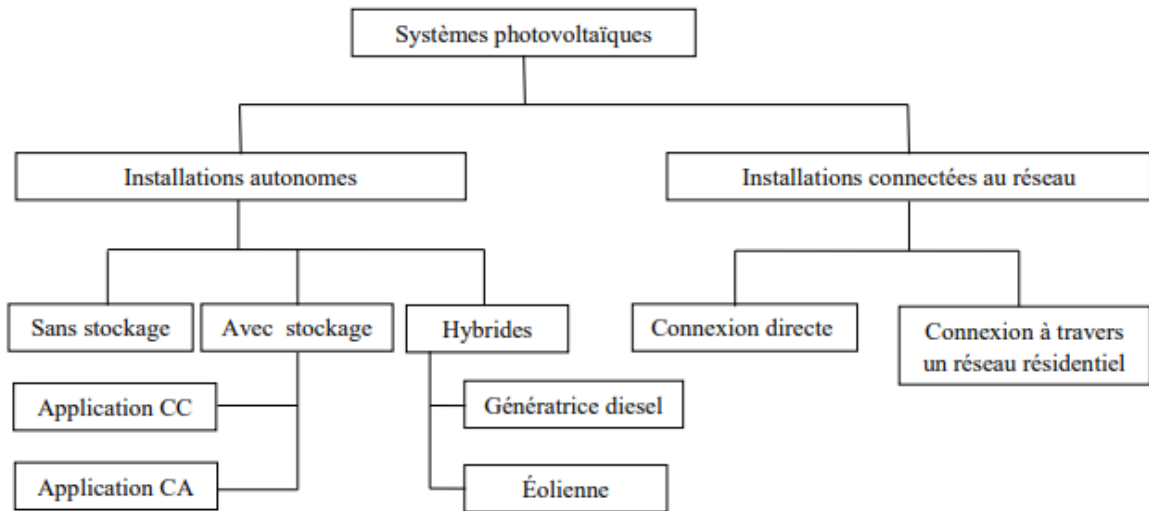


Figure I.27 : Classification des systèmes photovoltaïques.[18]

I.3.7.1 Systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux

Les centrales photovoltaïques, représentant plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de MW, se développent dans différents pays. Sur le bâti, il existe un potentiel très important de surfaces pouvant accueillir l'énergie photovoltaïque et, dans la plupart des pays, les panneaux photovoltaïques sont installés en toiture. Mais, Dans une centrale au sol, les modules photovoltaïques peuvent être fixés sur un angle d'exposition optimal au soleil, ou montés sur un ou deux axes motorisés permettant aux capteurs de suivre la trajectoire du soleil. Ce système de « tracker » permet d'augmenter le rendement solaire de près de 30 %, mais les coûts d'investissement et de maintenance sont plus élevés. [18]

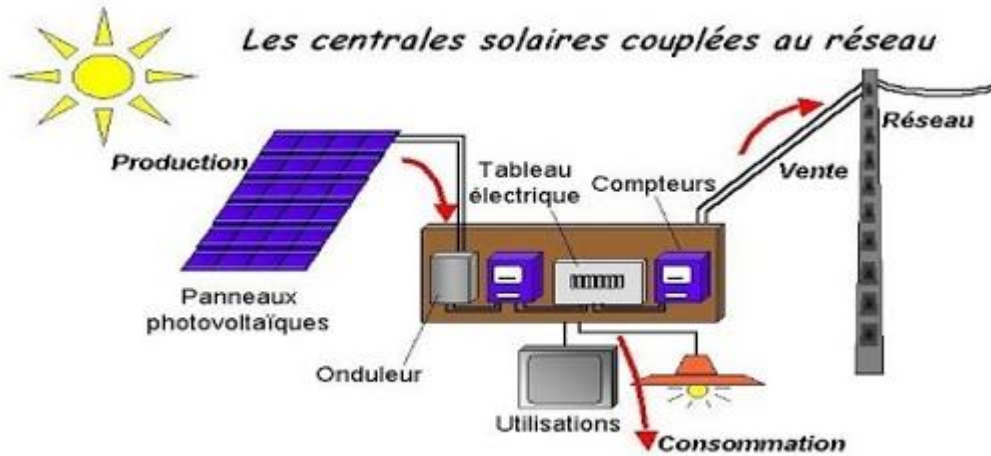


Figure I.28 : Schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique [19]

I.3.7.2 Le photovoltaïque autonome (non raccordé au réseau électrique)

L'électricité photovoltaïque ne nécessite pas de réseau électrique. C'est pourquoi elle constitue une énergie précieuse pour les pays en développement, qui ne disposent pas de réseau électrique, et pour les sites isolés. Deux millions de personnes n'ont pas accès à l'électricité dans le monde et 80 % d'entre elles vivent en milieu rural où la faible densité de population rend prohibitif le coût du raccordement au réseau électrique public. Le photovoltaïque permet de couvrir à moindre coût la plupart des besoins de la population. Les applications domestiques fournissent l'électricité nécessaire à l'éclairage et au fonctionnement des équipements de communication. Le photovoltaïque est également utilisé pour satisfaire d'autres besoins fondamentaux : l'accès à l'eau potable assuré par des panneaux photovoltaïques utilisés pour le pompage et la purification de l'eau. Il existe également des systèmes photovoltaïques autonomes, de plus forte puissance, qui alimentent en électricité des écoles et des hôpitaux. En moyenne, une surface de 10 m² de panneaux photovoltaïques suffit pour alimenter un petit centre médical en Afrique. [17]

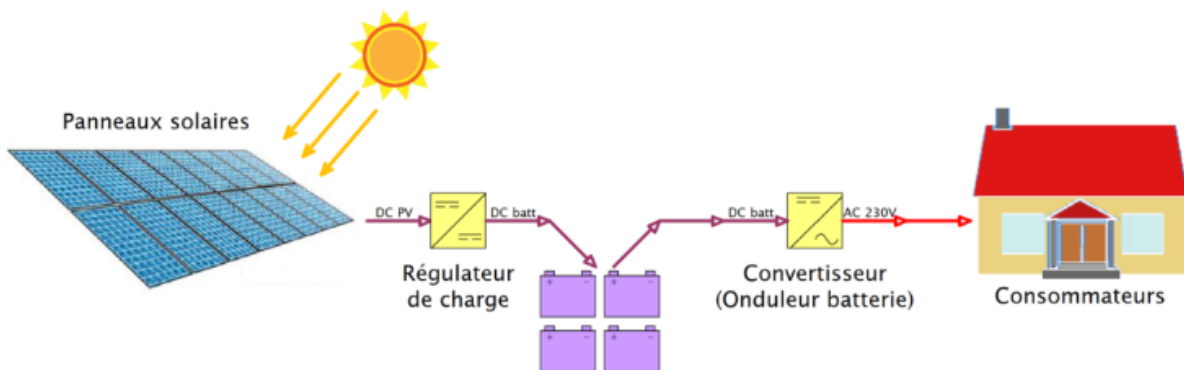


Figure I.29 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau.[16]

I.3.7.3 Les systèmes hybrides

Les applications hybrides permettent d'utiliser différentes sources renouvelables (photovoltaïque, éolien, petite hydraulique, biomasse...) afin de mieux garantir la qualité de l'approvisionnement en électricité. Dans tous les cas, ces systèmes hybrides sont couplés avec des batteries. D'une manière générale, les énergies éolienne et photovoltaïque constituent deux solutions complémentaires permettant d'électrifier, efficacement et à moindre coût, les sites isolés. [17]

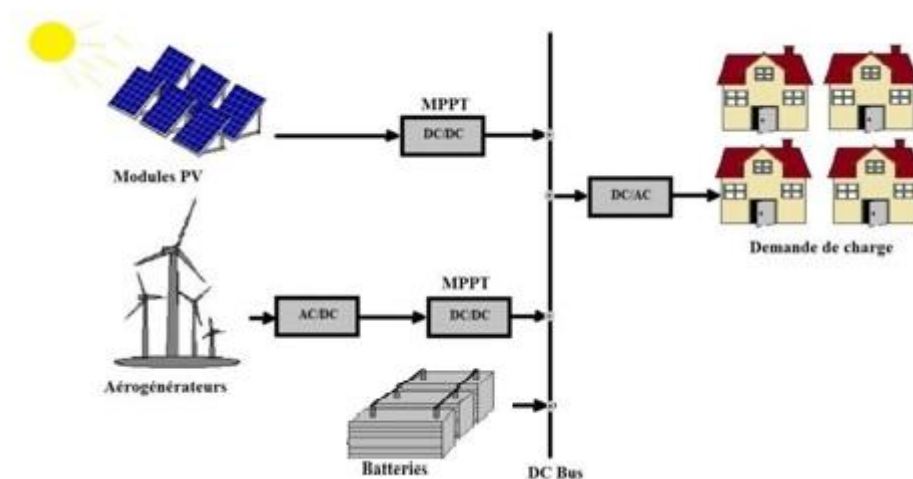


Figure I.30 : Schéma d'une installation type d'un système hybride.[16]

I.3.8 Avantages et inconvénients de l'énergie PV

- **Avantages**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.
- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.

- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés.

Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.

- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle (par exemple, la ferme solaire de Toul-Rosières en Lorraine). [20]

- **Inconvénients**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Fabrication et recyclage des panneaux peu écologiques.
- Production qui dépend des conditions d'ensoleillement.
- Durée de vie limitée (env. 20 ans).
- Rendement assez faible (15%) [21]

I.4 Conclusion

Ce chapitre traite de la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. Il commence par une définition de l'effet PV et comprend des informations sur la composition, la protection et l'installation des GPV. Différentes applications des systèmes PV sont discutées, ainsi que leurs structures correspondantes. Un modèle mathématique de la cellule PV a été établi. Cela permet de mesurer les différentes caractéristiques de la cellule, telles que ses effets résistifs et les conditions environnementales et on termine avec les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Généralité sur les convertisseur statiques

II.1 Introduction

Entre l'électronique et l'électrotechnique, une nouvelle technologie développée dans la seconde moitié du XXe siècle, l'électronique de puissance, a parfois été appelée électronique à courant fort dans un premier temps. Le développement des semi-conducteurs au silicium, des diodes, des thyristors et des transistors, qui permettaient de contrôler des courants et des tensions élevées, a donné un énorme coup de pouce à cette nouvelle technologie, en faisant aujourd'hui une discipline fondamentale du génie électrique. Nous nous intéresserons à ce chapitre au convertisseur statique, système permettant d'adapter une source d'énergie électrique à un récepteur donné. [22]

II.2 Les convertisseurs statiques et principaux composants électroniques de puissance

Les convertisseurs statiques sont des systèmes chargés de manipuler l'énergie électrique. Qui permettant d'adapter de manière réversible ou non la forme alternative ou continue de l'énergie entre la source et le récepteur (monophasée ou triphasé)

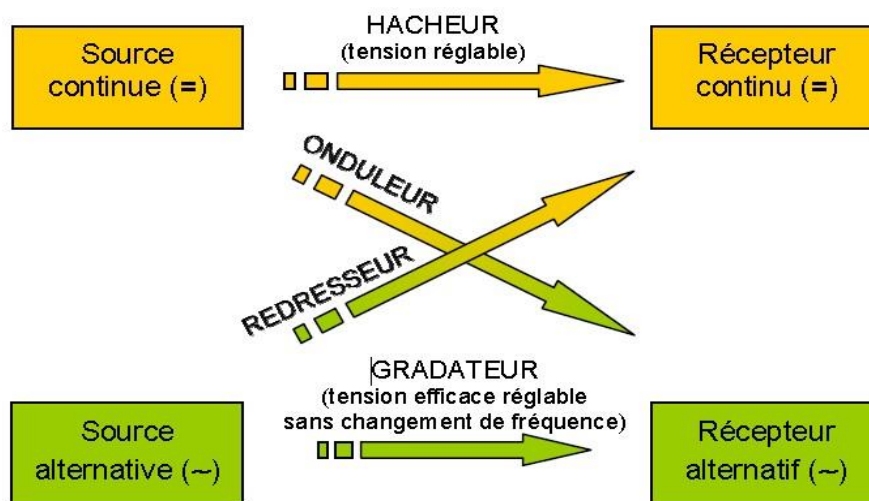


Figure II.1 : les convertisseurs statiques. [23]

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors, ...) utilisés comme des interrupteurs entre deux états : bloquant ou passant, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquence, phases) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ses dispositifs est souvent appelée électronique de puissance. [23]

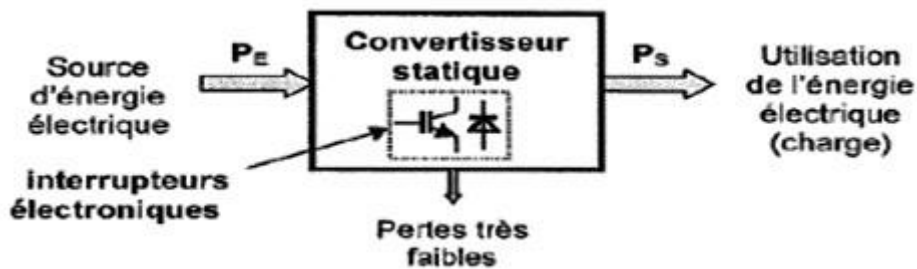


Figure II.2 : Architecture générale d'un convertisseur statique. [23]

II.2.1 Constructions du convertisseur statique

La fonction de base de la construction du convertisseur statique est l'élément de puissance (commutateur). Distinguons-les selon leur usage [24] :

II.2.1.1 Interrupteur non commandable

C'est un interrupteur qui s'ouvre et se ferme spontanément, et c'est la fonction d'une diode. Sa représentation symbolique est illustrée à la Figure (II.3.a).

- Il s'allume (ne conduit plus) lorsque le courant qui le traverse s'annule (devient légèrement négatif),
- Il s'éteint (conduit) lorsque la tension à ses bornes devient positive (au-delà d'une certaine valeur appelée tension de seuil).

Les diodes se trouvent dans les circuits de mise en forme pour supprimer l'alternance négative des réservoirs, par exemple, pour calibrer les signaux ou comme interrupteurs de puissance. Ils sont également présents dans les circuits de transformateurs d'impulsions. [25]

II 2.1.2 Interrupteur commande seulement à la fermeture

Il s'agit d'un interrupteur à ouverture spontanée et fermeture commandée, qui est la fonction d'un thyristor. Sa représentation symbolique est illustrée à la Figure (II.3.b).

- Il s'allume (cesse de conduire) lorsque le courant qui le traverse s'annule comme une diode (devient légèrement négatif),
- Lorsqu'un signal de commande est envoyé à la bascule et que la tension à ses bornes est positive, elle s'éteint (conduit).

Les thyristors sont utilisés comme interrupteurs dans les applications basse fréquence telles que le redressement contrôlé. On les trouve également dans les onduleurs et les gradateurs.

II.2.1.3 Interrupteur à ouverture et à fermeture commandées

Le choix de ces interrupteurs est fondamental dans le processus conduisant à la réalisation de circuits de puissance, dans la plupart des cas la réversibilité de l'alimentation et de la charge nécessite que les interrupteurs puissent fonctionner dans les quatre quadrants du plan, c'est-à-dire le courant et tension sont bidirectionnelles. De plus, ces interrupteurs doivent être contrôlés lorsqu'ils sont allumés et éteints. Fermé de manière à assurer une commutation forcée, c'est-à-dire un interrupteur à commande bidirectionnelle. Il existe quatre commutateurs de base à double commande :

II.2.1.3.1 Fonction thyristor ouvert contrôlable

L'interrupteur est représenté comme un thyristor équipé d'un deuxième déclencheur pour indiquer qu'il a une fonction de démarrage et de verrouillage contrôlé, c'est-à-dire la fonction de thyristor à mise en marche contrôlable GTO (Gate Turn-Off) illustrée à la figure (II.3.c).

II.2.1.3.2 Fonction transistor bipolaire de puissance

Les transistors bipolaires de puissance ou BJT (Bipolar Junction Transistors) sont des transistors, généralement de type NPN (Figure II.3.d), spécifiquement conçus pour fonctionner en mode commutation.

Le collecteur C et l'émetteur E forment les bornes de l'interrupteur, V_{CE} est la tension à ses bornes, et i_C est le courant qu'il est inséré dans le circuit. L'état de l'interrupteur est contrôlé par le courant i_B circulant de la base B vers l'émetteur E.

II.2.1.3.3 Fonction du tube Power MOS

Un transistor à effet de champ ou FET (Field Effect Transistor) peut être utilisé comme interrupteur comme un transistor bipolaire.

Il existe deux types de transistors à effet de champ :

- Transistor à jonction ou JFET,
- Transistor à grille isolée ou MOSFET.

Ces derniers, souvent appelés simplement transistors MOS, sont les seuls transistors utilisés pour réaliser des "commutateurs" de puissance. MOS vient de Metal-Oxide-Semi-conductor; le contact métallique de l'électrode de commande, la grille (gate) est séparée de la puce semi-

conductrice à travers la couche d'oxyde isolante. Par conséquent, il n'y a pas de flux de courant continu entre les parties de contrôle et contrôlées de tels composants.

La grille ne fonctionne pas en injectant ou en extrayant des charges comme la base d'un transistor bipolaire, mais en modifiant le champ électrique dans le semi-conducteur. Par conséquent, il contrôle le flux de courant du drain D à la source S à travers plusieurs petits canaux. La représentation symbolique de cet interrupteur est représentée sur la Figure (II.3.e).

II.2.1.3.4 Fonction de transistor IGBT

Le transistor bipolaire à grille ou IGBT (transistor bipolaire à grille isolée) est un composant combiné dans la même structure. Comme le montre la figure (II.3.f), il s'agit d'un transistor bipolaire constitué d'un transistor commandé par un transistor MOS.

- A la borne de commande, entre la grille G et l'émetteur E, se trouve un MOS
- Côté commandé, entre le collecteur C et l'émetteur, il est bipolaire

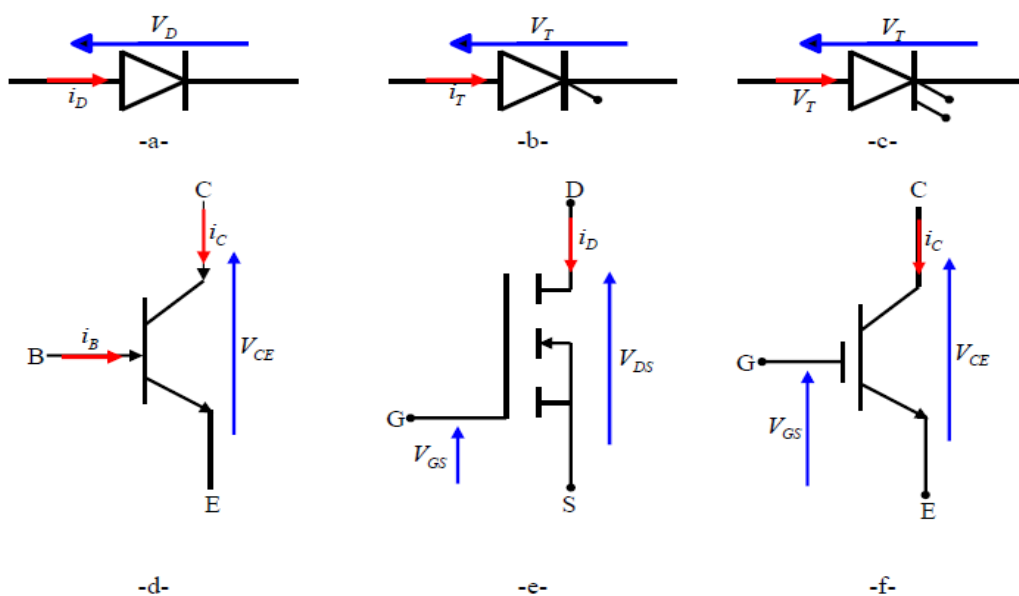


Figure II.3 : Représentation symbolique des différents composants de puissance. [25]

Remarque

Maintenant, Aucun composant n'a de caractéristiques tension-courant dans les quatre quadrants et ne peut être contrôlé pour s'ouvrir et se fermer. Par conséquent, nous appelons généralement la fonction associée. [26]

II.3 Classification des convertisseurs statique

- Il est important de noter que l'énergie électrique est utilisée soit sous forme de tension et de courant alternatif (généralement une onde sinusoïdale), soit sous forme de tension et de courant continu (en mode permanent). Sachant que "l'électronique de puissance" s'occupe de connecter une source d'énergie à un récepteur donné, il existe quatre types de convertisseurs dont un schéma est donné :
- Convertisseur alternatif-continu : redresseur.
- Convertisseur alternatif-alternatif : c'est un gradateur lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, sinon c'est un cyclo-convertisseur.
- Convertisseur continu-continu : hacheur.
- Convertisseur continu-alternatif : onduleur.

II.3.1 Les redresseurs

Un redresseur peut obtenir une tension de valeur moyenne non nulle à partir d'une tension alternative (monophasée ou triphasée) de valeur moyenne nulle.

Le redresseur contrôlable peut ajuster la valeur moyenne de la tension redressée. Les redresseurs sont utilisés comme étages intermédiaires pour les cartes électroniques, les fours, l'électrolyse, la transmission à courant continu et le changement de vitesse des moteurs à courant continu. [27]

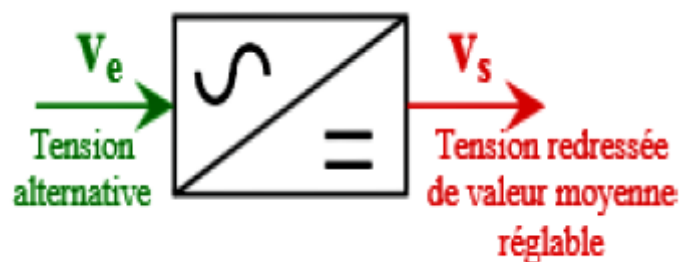


Figure II.4 : Convertisseur AC-DC. [27]

II.3.2 Les gradateurs

Les gradateurs permettent d'obtenir une tension alternative de valeur efficace réglable à partir d'une tension alternative de valeur efficace et de fréquence fixe.

Les gradateurs sont utilisés pour le chauffage électrique (charges résistives), les systèmes de compensation de puissance réactive et le démarrage progressif des moteurs asynchrones. [27]

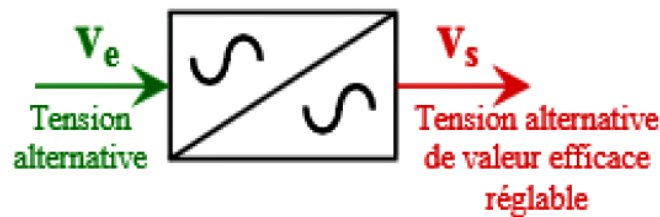


Figure II.5 : Convertisseur AC-AC. [27]

II.3.3 les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent le transfert d'énergie électrique d'une source continue à une autre (ils sont équivalents aux transformateurs AC). Lorsque l'entrée et la sortie ont des caractéristiques dynamiques différentes, elles peuvent être directement liées (on parle alors d'hacheur à liaison directe). Lorsqu'ils ont les mêmes caractéristiques dynamiques, il est nécessaire d'utiliser un élément de stockage transitoire (ici appelé hacheur à accumulation). Enfin, dans les cas où une isolation galvanique de la sortie de l'entrée est requise. Des hacheurs dits « isolés » ont été produits. Selon le degré de réversibilité requis, la structure des composants variera.

Enfin, suivant la puissance nominale du système, les technologies des composants ne sera pas la même. [27]

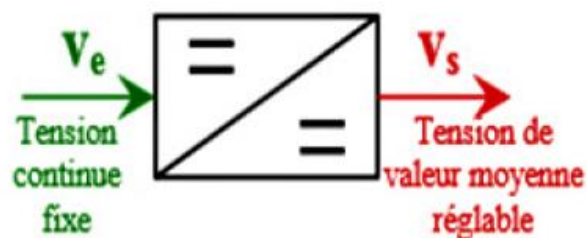


Figure II.6 : Convertisseur DC-DC [27].

II.3.3.1 différents type hacheur

Selon le cheminement de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux Catégories de hachoirs : réversibles et non réversibles (Figure II.7) :

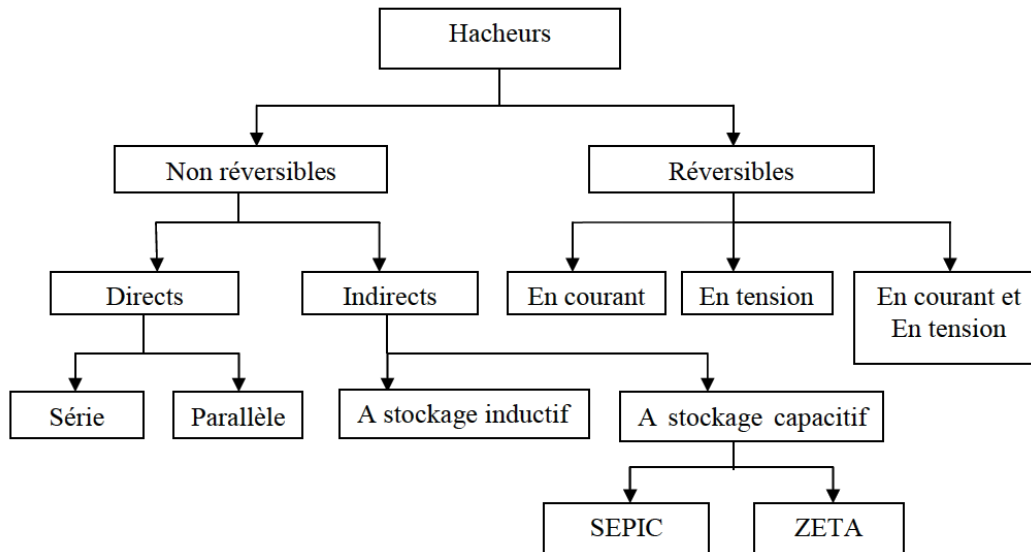


Figure II.7: Différents types de hacheurs. [28]

II.3.3.1.1 Hacheurs réversibles

Ce sont des structures qui assurent la réversibilité de la tension et/ou du courant. Par conséquent, le sens de déplacement de l'énergie peut être inversé. Ainsi une source peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement est couramment rencontré dans les systèmes de traction électrique. Par conséquent, le moteur à la sortie de l'hacheur représente la charge. Cependant, si l'on mettait en place un freinage, le moteur deviendrait un générateur, ce qui provoquerait un retour d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique).

Dans cette catégorie, il existe trois types :

- hacheur réversible en tension,
- hacheur inverseur de courant,
- Hacheurs de courant et de tension réversibles.

Un convertisseur DC-DC peut être caractérisé par une indication de sa réversibilité, ou réversibilité commune aux sources de tension et de courant :

- Le convertisseur de tension réversible relie deux sources d'alimentation réversibles.
- Un convertisseur de tension réversible connecte deux sources de tension réversibles.
- Un convertisseur de courant réversible connecte deux sources de courant réversibles.

- Un convertisseur de courant et de tension réversible relie deux sources réversibles en courant et en tension [28].

II.3.3.1.2 Hacheurs non réversibles

Ce sont des structures qui n'assurent pas la réversibilité, que ce soit en tension ou en courant. Par conséquent, l'énergie ne peut circuler que de la source à la charge. Dans cette catégorie, il existe deux types (Figure II.8) :

- Un hacheur de liaison directe qui combine deux types de sources différents :
 - ✚ Hacheur série ou hacheur abaisseur (Buck).
 - ✚ Hacheur parallèle ou hacheur survolteur (Boost).
- Hacheurs indirects ou à accumulation qui associent deux sources de même type :
 - ✚ Hacheur de stockage inductif ou série parallèle (buck-boost).
 - ✚ Hacheur de stockage capacitif (Cuk). [29]

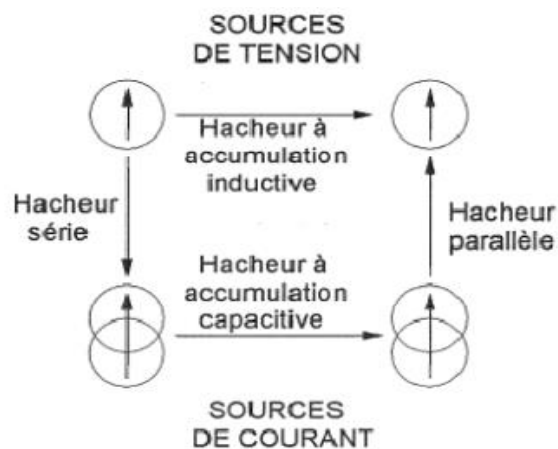


Figure II.8 : Représentation générale des hacheurs non réversibles. [28]

II.3.3.2 Les types de hacheurs non réversibles

II.3.3.2.1 Convertisseur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La figure II.9 présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure [30].

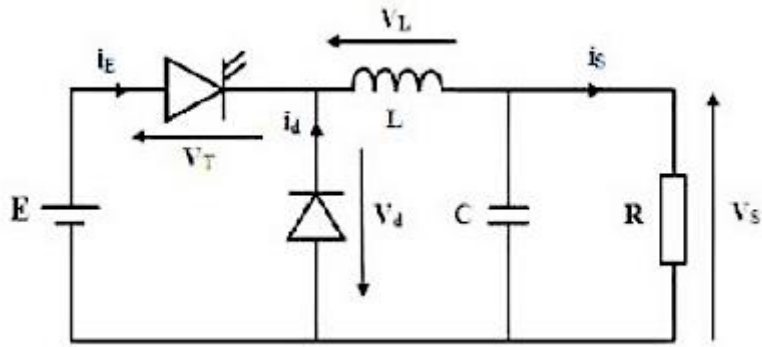


Figure II.9: Schéma réel de Convertisseur Buck. [30]

II.3.3.2.2 Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure II.10. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. [31]

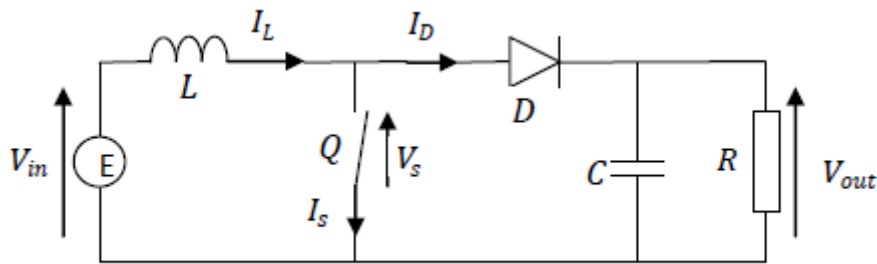


Figure II.10 : Convertisseur survolteur (Boost). [31]

II.3.3.2.2.1 le modèle du convertisseur

Lorsque la fonction de commutation est D=1, on obtient la dynamique suivante :

$$V_{in} = VL \tag{II.1}$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} \tag{II.2}$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = - \frac{V_{out}}{R} \tag{II.3}$$

A partir de l'équation (II.2)

$$i(t) = \frac{V_{in}}{L} (t) + i_{min} \tag{II.4}$$

Le courant augmente linéairement avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum à $t \rightarrow t_{on} = DT$:

$$i_{max} = \frac{V_{in}}{L}DT + i_{min} \quad \text{II.5}$$

$$i_{max} - i_{min} = \frac{V_{in}}{L}DT \quad \text{II.6}$$

$$\Delta i = \frac{V_{in}}{L}DT \quad \text{II.7}$$

Lorsque la fonction de commutation est $D=0$, on obtient la dynamique suivante :

$$VL = V_{in} - V_{out} \quad \text{II.8}$$

$$L \frac{di}{dt} = V_{in} - V_{out} \quad \text{II.9}$$

$$i(t) = \frac{V_{in} - V_{out}}{L}(t) + i_{min} \quad \text{II.10}$$

$$i_c = i - i_{out} \quad \text{II.11}$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = i - \frac{V_{out}}{R} \quad \text{II.12}$$

Quand $t \rightarrow t_{on}$ Le courant à travers l'inductance diminue linéairement de sa valeur maximale à sa valeur minimale :

$$i_{min} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L}(1 - D)T + i_{max} \quad \text{II.13}$$

Donc :

$$\Delta i = \frac{V_{out} - V_{in}}{L}(1 - D)T \quad \text{II.14}$$

$$\frac{V_{in}}{L}DT = \frac{V_{out} - V_{in}}{L}(1 - DT) \quad \text{II.15}$$

Ce qui implique :

$$V_{out} = \frac{1}{1-D}V_{in} \quad \text{II.16}$$

Cette équation II.16 donne la relation de base entre la tension d'entrée et de sortie de ce convertisseur. Par conséquent, la tension d'entrée peut être augmentée en utilisant le circuit promoteur.

II.3.3.2.2 Dimensionnement des composants du convertisseur (L et C)

Afin de dimensionner correctement les composants du circuit convertisseur, certaines considérations doivent être prises en compte. Il est nécessaire de diminuer les ondulations de courant et de tension sans avoir besoin de surdimensionnement. Si ces composants devaient être calculés différemment, cela pourrait entraîner une augmentation à la fois du poids et du prix des circuits. On ne saurait trop insister sur l'importance cruciale d'avoir les valeurs appropriées. Cette déclaration est très importante pour atteindre le résultat souhaité. L'inductance L doit être dimensionnée de manière appropriée pour garantir que le courant autorisé par l'interrupteur n'est pas dépassé. Dans des situations pratiques, les ondulations du courant IL ont tendance à être plus grandes en comparaison. Surtensions ultérieures.

En appliquant la relation $V_L = L \frac{di}{dt}$ est on obtient :

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}}{L} \quad \text{II.17}$$

A partir de la relation, la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$I_{LCC} = 2\Delta i \approx \frac{V_{in}}{L} DT \quad \text{II.18}$$

- La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{V_{in}}{2\Delta i} DT \quad \text{II.19}$$

Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{I_C}{C} \approx \frac{I_{out}}{C} \quad \text{II.20}$$

- La valeur d'ondulation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{CC} = 2\Delta V_C \approx \frac{I_{out}}{C} DT \quad \text{II.21}$$

La valeur de la capacité est donnée par :

$$C = \frac{I_{out}}{2\Delta V_c} DT \quad \text{II.22}$$

II.3.3.2.3 Le convertisseur Buck-Boost

La deuxième topologie de base du DC/DC est donnée par **la figure II.11**. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le thyristor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur se met sur la position (off) l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans les bornes de la charge décrivant le fonctionnement par l'équation suivante [17]:

$$U_o = \frac{D}{1-D} U_i \quad \text{II.23}$$

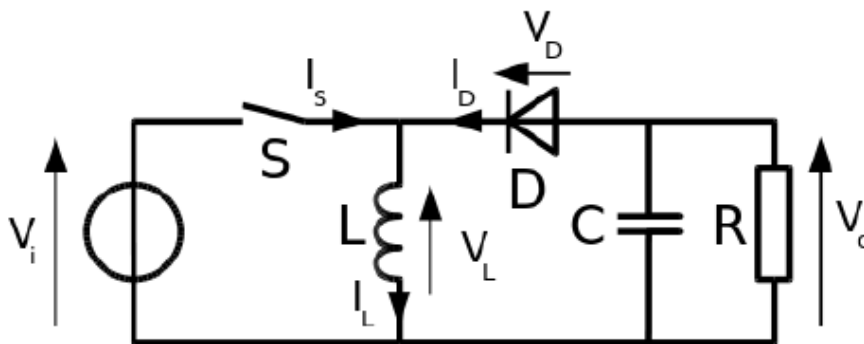


Figure II.11: Circuit électrique de base d'hacheur dévolteur-survolteur. [17]

II.4 Les convertisseurs DC/AC

Un onduleur (DC-AC) est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour [32]:

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [32]

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation [33] :

- 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.4.1 onduleurs non autonomes

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour commuter les thyristors Alimenté par le réseau alternatif, il s'agit donc d'un réseau actif. Voici à quoi ça ressemble en action Redresseur de conversion de fréquence. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont données par réseau alternatif. [34]

II.4.2 onduleurs autonomes

Les onduleurs autonomes sont des convertisseurs statiques qui assurent la conversion alternez en continu. Alimenté en permanence, il modifie périodiquement la connexion entre l'entrée et la sortie, et des alternatives sont disponibles à la sortie. Les onduleurs indépendants dépendent principalement de la nature du générateur et Il est installé entre les récepteurs qui produisent à distinguer. [34]

II.4.2.1 onduleurs autonomes du courant

Les onduleurs de courant, appellent interrupteurs de courant, sont Alimenté par une alimentation CC. La source de responsabilité est si grande que le courant qui le traverse ne peut pas être affecté par des changements de tension à ses bornes, en particulier les changements brusques de l'interrupteur correspondant. L'alimentation CC applique du courant à l'entrée du convertisseur et donc à sa sortie. La figure II.12 donne un schéma Principe de l'inverseur de courant. [35]

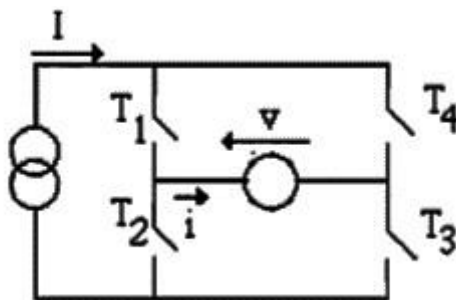


Figure II.12 : Structure d'un onduleur de courant. [35]

II.4.2.2 onduleurs autonomes de tension

Un onduleur de tension est un onduleur alimenté par une source pour la tension continue, sa tension V_e n'est pas affectée par les variations de tension Une alimentation CC applique une tension à l'entrée pendant que le courant la traverse onduleur, donc à sa sortie. La configuration la plus courante pour un onduleur de tension monophasé est Sa structure est une structure de pont complet, comme le montre la figure II.13. On considère que la tension d'alimentation V_e est constante et égale à E . [35]

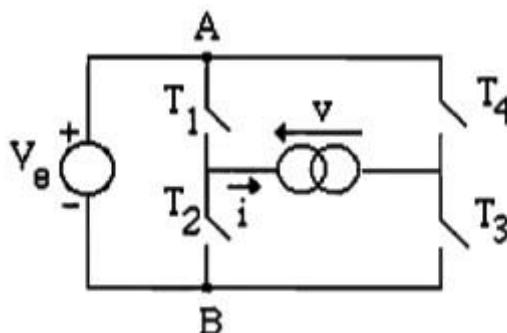


Figure II.13 : Structure d'un onduleur de tension en pont. [35]

II.5 Onduleur monophasé

Les onduleurs monophasés les plus couramment utilisés sont :

- Un pont onduleur composé de quatre interrupteurs ;
- Un onduleur avec un diviseur de tension capacitif en entrée (appelé onduleur demi-pont) ne contient que deux interrupteurs.

II.5.1 Onduleur monophasé en pont (Pont H)

La figure II.14 montre la forme de la tension de sortie aux bornes de l'onduleur à pont en H monophasé et de sa charge RL :

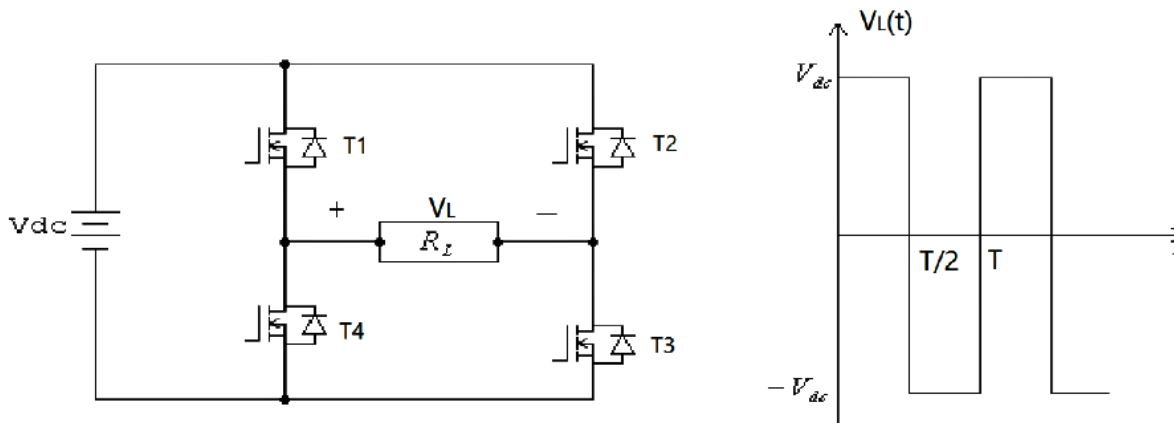


Figure II.14: Schéma de principe et la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H. [35]

L'onduleur est constitué de deux bras contenant chacun deux interrupteurs à diodes montés en antiparallèle, qui garantissent la réversibilité du passage du courant dans la charge.

À partir de la source de tension continue principale, l'onduleur permet à la tension de sortie d'être plus proche d'une onde sinusoïdale.

II.5.1.1 Principe de fonctionnement

Le contrôle de l'onduleur monophasé à pont en H est établi comme suit :

- Lorsque les interrupteurs T1 et T3 sont fermés dans la première demi-période ($0 \leq t \leq T/2$), les interrupteurs T2 et T4 sont ouverts. À ce stade, la tension de sortie aux bornes de la charge est égale à V_{dc} .
- Lorsque les interrupteurs T2 et T4 sont fermés pour la durée restante ($T/2 \leq t \leq T$), les interrupteurs T1 et T3 sont ouverts et la tension de sortie à la charge devient $-V_{dc}$.

Pour éviter le problème de court-circuit de la tension d'entrée, un temps mort est observé entre deux commutations [26].

Le tableau suivant II.1 montre les états de commutation des interrupteurs de l'onduleur pont monophasé [27]:

T1	T2	T3	T4	$V_L(t)$
ON	OFF	ON	OFF	V_{dc}
OFF	ON	OFF	ON	$-V_{dc}$
ON	OFF	OFF	ON	0
OFF	ON	ON	OFF	0

Tableau II.1 : Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont H.

II.5.2 Onduleur en demi-pont

En sortie, cette variante d'onduleur transmet une tension qui alterne en une seule phase. Selon leur topologie, il existe deux catégories d'onduleurs monophasés.

Dans **la figure II.15**, vous pouvez observer le schéma fonctionnel ainsi que la tension de sortie aux bornes de la charge RL de l'onduleur monophasé en demi-pont.

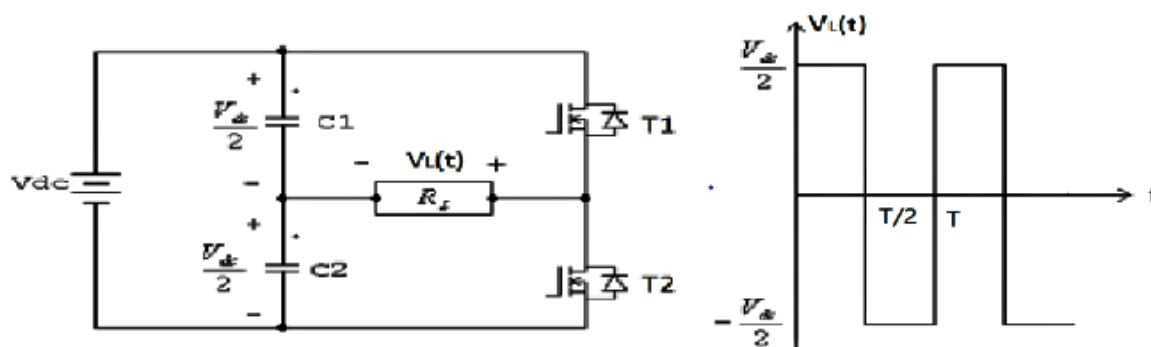


Figure II.15: Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi-pont. [35]

L'onduleur monophasé en demi-pont se compose d'un seul bras, qui contient deux tubes de commutation de puissance commandés complémentaires T1 et T2, et les tubes de commutation de puissance peuvent être des MOSFET, des IGBT, etc. Deux diodes montées en anti-parallèle aux bornes de l'interrupteur permettent à la bobine de récupérer l'énergie emmagasinée lors de la mise sous tension de l'interrupteur.

II.5.2.1 principe de fonctionnement

Dans ce circuit, l'opération de commutation des interrupteurs T1 et T2 se fait de telle sorte que si le premier est fermé, l'autre doit être ouvert et vice versa.

- Dans la première demi-période ($0 \leq t \leq \frac{T}{2}$), le tube interrupteur T1 est fermé (T2 est ouvert), et la tension à la borne RL de la charge inductive est :

$$V_L = \frac{V_{dc}}{2}. \tag{II.24}$$

- Pendant la seconde demi-période ($\frac{T}{2} \leq t \leq T$), lorsque l'interrupteur T2 est fermé (T1 est ouvert), la tension

$$V_L = \frac{-V_{dc}}{2}. \tag{II.25}$$

La fermeture des deux interrupteurs T1 et T2 en même temps provoque un court-circuit de la tension d'entrée V_{dc} provoquant le passage d'un courant important très préjudiciable à l'interrupteur de puissance. Le tableau suivant II.2 montre l'état de commutation du commutateur [27]:

T1	T2	VL
ON	OFF	$\frac{V_{dc}}{2}$
OFF	ON	$\frac{-V_{dc}}{2}$

Tableau (II.2) : Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en demi-pont.

II.6 Onduleur triphasé

Les onduleurs triphasés à deux niveaux sont généralement utilisés dans les applications de moyenne puissance. La structure de cet onduleur peut être obtenue en connectant trois onduleurs monophasés en demi-pont en parallèle, comme illustré à la **figure II.16**. Chaque bras contient deux interrupteurs de commande complémentaires afin que la tension d'entrée ne soit jamais court-circuitée. Ce type d'onduleur est largement utilisé avec PWM pour fournir une tension et une fréquence variables à un récepteur triphasé équilibré, chacune des trois tensions de sortie étant convertie de l'une à l'autre. [36]

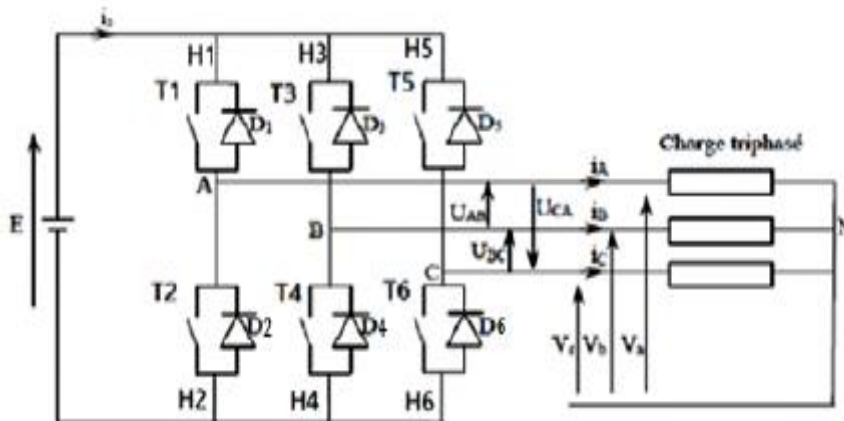


Figure II.16 : Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Les attributs de l'onduleur sont principalement définis par ses composants de puissance. Ces facteurs établissent la puissance, la tension et le courant de commutation les plus élevés possibles, ainsi que la fréquence de commutation maximale et le temps mort. Ces deux dernières caractéristiques sont particulièrement cruciales car elles impactent le processus de conception.

La fréquence de commutation la plus élevée possible est affectée par deux facteurs cruciaux, à savoir la durée des temps d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur et le temps mort, qui est en place pour protéger le circuit des courts-circuits potentiels qui peuvent se produire entre l'ouverture d'un interrupteur et la fermeture de son complément.

II.7 Commande des onduleurs

II.7.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) (en anglais : Pulse Width Modulation (PWM)) est obtenue en comparant un signal triangulaire appelé porteuse haute fréquence à un signal de référence appelé modulateur. Les instants de commutation Déterminé par le point d'intersection entre la porteuse et le modulateur. Fréquence La commutation de l'interrupteur est fixée par l'opérateur.

Dans le cas triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f . Comme la tension à la sortie de l'onduleur n'est pas une onde sinusoïdale pure, il y a harmoniques, qui créent des pertes supplémentaires.

Les commandes MLI sont utilisées pour résoudre ces problèmes et présentent les avantages suivants :

- Modifications de la fréquence de la tension de sortie.
- Éliminer certaines harmoniques de tension.

II.7.2 Caractéristique de la modulation

Coefficient de réglage : le taux de modulation, r , qui est l'image du rapport des amplitudes de tension de la référence V_{mref} sur la tension de la porteuse V_{mp} , qui exprimé par :

$$r = \frac{v_{mref}}{v_{mp}} \quad \text{II.26}$$

L'indice de modulation : l'indice de modulation, m , qui est l'image du rapport de fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de référence f . Ce dernier est donné par :

$$m = \frac{f_p}{f} = \frac{T_{ref}}{T} \quad \text{II.27}$$

D'autre technique de MLI existe également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier ou l'on peut distinguer deux méthodes :

1. La MLI à échantillonnage régulier symétrique ou la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
2. La MLI à échantillonnage régulier asymétrique ou la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Rapport cyclique : C'est le rapport entre la durée de conduction de l'onduleur sur une demi-période et la période : $D = \Delta t / T$ sa valeur est au maximum de 0.5 ($\Delta t = 1/2 T$).

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons centré notre étude sur deux formes de convertisseurs électroniques : les hacheurs de type boost et les onduleurs triphasés. Dans un premier temps, nous avons commencé par donner un aperçu des convertisseurs statiques en général, qui comprenaient des onduleurs, des gradateurs, des redresseurs et des hacheurs. Ensuite, nous avons fourni des définitions pour chaque type de convertisseur et un système de classification pour les convertisseurs statiques. Enfin, nous avons approfondi les spécificités du contrôle de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) de l'onduleur.

Chapitre III

Les topologies d'onduleurs et poursuite du point de puissance maximale

III.1 Introduction

Les systèmes connectés au réseau sont désormais très appréciés en tant que complément à la production d'électricité conventionnelle dans de nombreux pays développés. En fait, plusieurs projets de démonstration de réseau explorent cette possibilité. L'énergie solaire est devenue viable pour le développement économique, mais l'impact négatif des sources d'énergie traditionnelles sur l'environnement a accru la participation de l'énergie solaire dans la production d'électricité à grande échelle.

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau alimentent le réseau via des onduleurs pendant la journée. En revanche, les systèmes distribués permettent aux propriétaires de systèmes de "récolter" cette énergie la nuit, tandis que les systèmes centralisés permettent au réseau de fonctionner pendant les pics de charge. Cette approche est logique car la consommation d'énergie est élevée pendant la journée.

L'utilisation des cellules photovoltaïques est largement répandue dans le domaine de l'alimentation en énergie électrique, et du fait de cette vaste gamme d'utilisations, elles doivent fonctionner dans des conditions de fonctionnement variées. Afin de s'assurer qu'un panneau photovoltaïque génère sa puissance maximale à tout moment, il ne doit pas être directement relié à la charge ; au lieu de cela, il doit subir une étape d'adaptation à l'aide d'un convertisseur statique. Ce dernier dispositif doit être géré par un système de contrôle MPPT, qui maintiendra le point de fonctionnement du panneau dans la zone de puissance maximale. Il existe plusieurs types de contrôles MPPT, chacun avec ses propres caractéristiques uniques.

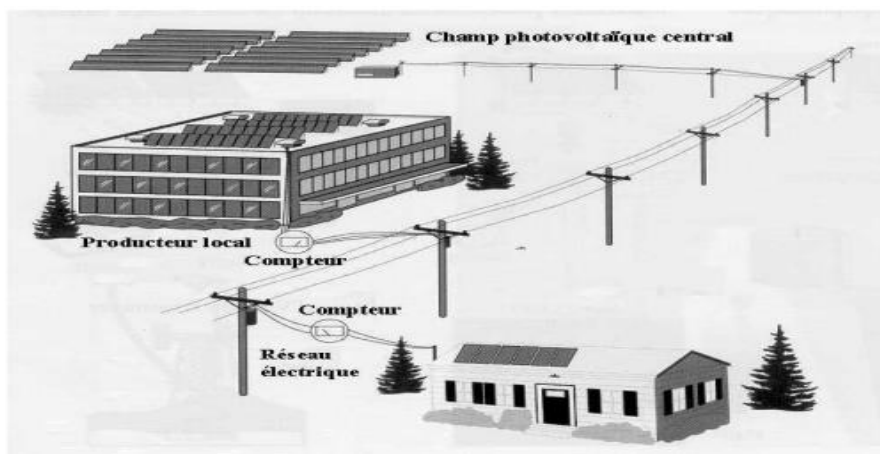


Figure III.1 : Types des systèmes connectés au réseau.

III.2 Composants des appareils connectés au réseau

Il se compose de trois éléments de base :

- Panneaux photovoltaïques
- Convertisseurs synchrones qui convertissent le courant pour être compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Un compteur d'énergie (en fait, généralement deux compteurs dans le cas d'installations décentralisées).
- Accessoires.

III.3 Types des installations photovoltaïques connectées au réseau [37]

III.3.1 Centrale de production d'énergie photovoltaïque

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, il y a un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais elles sont encore au stade pilote. Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques.

Un système de puissance PV qui génère la puissance instantanément alimente le réseau à travers un ou plusieurs onduleurs et transformateurs. La plupart des systèmes utilisent des redresseurs qui fonctionnent en régime onduleur équipés par un poursuiveur de point de puissance maximale comme il est montré sur la (Fig. III.2.a, III.2.b).

A cause de toutes ça il peut être économique de placer un système PV pour assister avec un réseau local durant les périodes de demande de pic pour fonctionner en parallèle, plus au moins que construire une nouvelle station de puissance.

À la fin du réseau, la qualité de l'énergie se détériore à mesure que la demande d'énergie augmente. Une centrale photovoltaïque placée en bout de ligne permet de corriger la tension et d'augmenter la puissance.

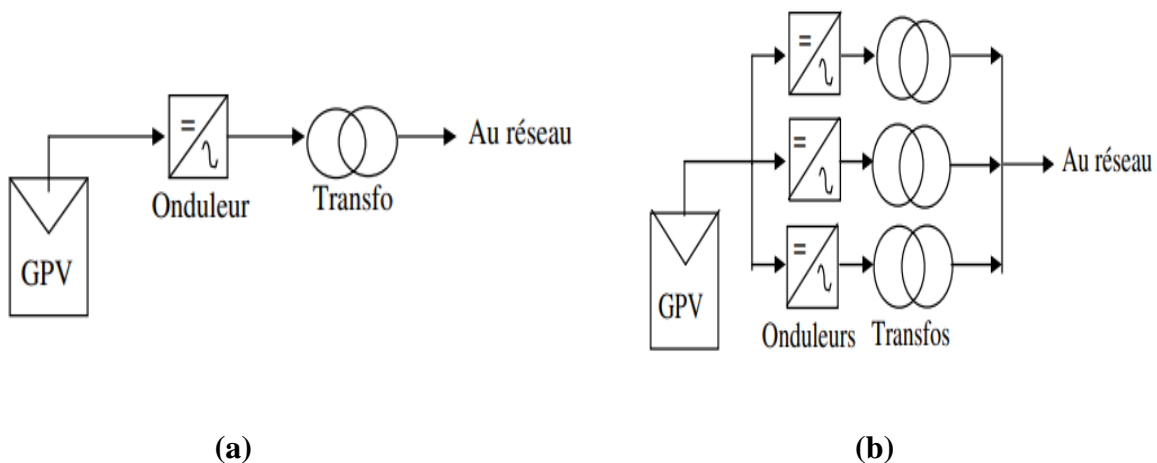


Figure III.2 : Configuration d'un système PV avec :
a) un onduleur b) plusieurs onduleurs. [37]

III.3.2 Générateurs photovoltaïques Dans Les Constructions (installations décentralisées)

L'alimentation en électricité d'un site éloigné du réseau électrique par un câble est une opération coûteuse, lorsque les besoins en énergie sont relativement faibles. A cause de ce problème il apparaît un nouveau modèle qui est probablement basé sur une décentralisation poussée du système électrique, où la production et la consommation seront à proximité l'une de l'autre.

Plusieurs arguments plaident en faveur de cette hypothèse : la réduction des pertes en ligne, la limitation des lignes à très haute tension, inesthétique et à la pollution électrique mal maîtrisée, la libération du marché d'électricité qui offrira de nouvelles possibilités de ventes et d'achats libre d'électricité, comme la plupart des autres biens et aussi Il n'y a pas de coût de vendre de la région et de la préparation du site.

Dans ce contexte, il est fort probable que la production d'électricité photovoltaïque par petites unités dispersées et raccordés au réseau de distribution aura un rôle important à jouer. En effet la meilleure façon de produire sur site les modestes quantités nécessaires au consommateur est de convertir l'énergie solaire en électricité grâce à de simples capteurs fixés sur son toit, son mur sa façade. L'installation étant reliée au réseau, celui-ci absorbe le surplus d'énergie fournie, ou apporte le complément. Il est possible aussi d'augmenter sa production, en raccordant de nouveaux panneaux.

III.4 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau [37]

III.4.1 Avantages

- N'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins.

III.4.2 Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchi.
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation.

Mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau...

Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre un niveau de prix où le Kwh photovoltaïque sera compétitif avec le KWh conventionnel, issu de combustibles fossiles (pétrole, gaz ou charbon) ou fissile (nucléaire). Il est évident que ce choix n'est aujourd'hui économiquement viable qu'avec un soutien de fonds publics significatifs, et c'est ce que ce passe dans la plupart des pays européens. Mais ce concept est tellement séduisant que de plus

en plus de personnes sont intéressés et souhaitant participer à la démonstration qu'il est possible de produire soi-même d'électricité.

Au-delà des arguments rationnels, l'envie de devenir son propre producteur d'électricité et une motivation forte. Avec notre toit solaire, nous pourrions subvenir à une partie de nos besoins en ayant recourt au soleil, une source d'énergie abondante et renouvelable [37].

III.5 Topologie onduleur couplés au réseau

III.5.1 Onduleur modulaire (module d'onduleur)

Selon ce concept, chaque module solaire avec un seul onduleur est connecté en parallèle dans le côté actuel du côté alternatif pour une installation plus grande. L'onduleur modulaire est installé près du module solaire correspondant.

III.5.2 Onduleur centralisé (central invertir)

Les onduleurs centralisés capables élevés passent à travers tout le courant CC généré par le champ de cellules solaires par la conversion du courant alternatif.

Les champs de batterie solaire sont généralement composés de plusieurs lignes connectées en parallèle.

Chaque ligne elle-même se compose de plusieurs modules solaires connectés. Afin d'éviter les pertes dans le câble et d'obtenir des performances élevées, autant de modules de série [38].

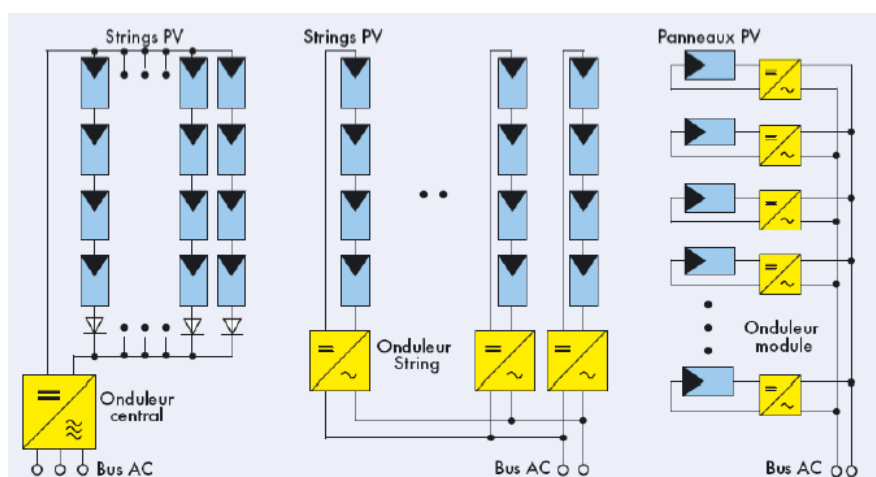


Figure III.3: Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau. [38]

III.5.3 Onduleurs « String » ou « de rangé »

Les onduleurs string sont les plus utilisés. Dans la plupart des cas, huit modules solaires (ou plus) sont connectés en série. Les coûts d'installation sont réduits puisqu'une seule connexion série est nécessaire. Il est à noter qu'en cas d'ombrage partiel du module solaire, il n'y a pas de

déperdition, et l'utilisation de diodes by-pass est fortement recommandée. Les installations jusqu'à 3 kW sont souvent réalisées avec des onduleurs String. Pour une puissance plus élevée, plusieurs onduleurs String peuvent être connectés Parallèle, côté AC. L'intérêt de ce concept réside dans l'utilisation d'un plus grand nombre d'onduleurs d'un même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un avantage supplémentaire : en cas de panne d'un onduleur, seule la production de la rangée concernée tombe en panne.

III.5.4 Interconnexion de plusieurs onduleurs

Pour des puissances supérieures à 10 kW, les onduleurs sont parfois modulaires : une unité de contrôle gère plusieurs modules de puissance.

D'autre part, pour augmenter le rendement à faible puissance, certains appareils peuvent fonctionner en mode "maître-esclave" : lorsque le premier onduleur atteint sa puissance maximale, il se met automatiquement en parallèle avec le deuxième onduleur.

III.6 Choix d'onduleurs

Les normes de compatibilité de l'onduleur et du réseau sont :

- ❖ Caractéristiques d'entrée (DC) :
 - Activer et désactiver automatiquement le seuil d'exposition faible.
 - Qualité et précision de la recherche du point de puissance maximale sur le terrain Photovoltaïque (suivi du point de puissance maximale).
 - Large plage de tension d'entrée (ex : 120 à 500 V).
 - Protection contre les surtensions.
 - Protection des personnes (par exemple : contrôle d'isolement DC).
- ❖ Caractéristiques de sortie (CA) :
 - Synchronisation parfaite avec le réseau.
 - Déphasage nul ou faible (facteur de puissance = 1).
 - Découplage automatique du réseau en cas de dépassement des tolérances de tension et de fréquence.
 - Protection des personnes (par exemple : contrôle d'isolement AC).
- ❖ Caractéristiques générales :
 - Rendement élevé aux niveaux de puissance installés typiques (par exemple 92 % à 98 %).
 - Faible consommation et niveau sonore.
 - Faibles interférences électromagnétiques et fréquence harmonique.

- Bonne fiabilité.

II. 6 Principe de MPPT

MPPT, en anglais "Maximum Power Point Tracking " est un principe qui permet son nom, c'est-à-dire le point de puissance maximum des générateurs non linéaires. Par conséquent, pour le même éclairage, selon les différentes charges, la puissance transmise sera différente.

La Figure III.4 illustre trois cas d'interférence. En fonction du type d'interférence le point de fonctionnement se balance du point de puissance maximum PPM1 vers le nouveau la distance optimale est plus ou moins éloignée. Utilisé pour changer l'ensoleillement (cas -a-), ajustez simplement les valeurs de la boucle accédez au nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour les changements de charge (situation -b-), nous pouvons voir la modification du point de fonctionnement, et nous pouvons en trouver un en raison de l'action de la commande, la nouvelle meilleure position. Le dernier cas de changement le point de fonctionnement peut être lié à des changements dans la température de travail GPV (cas-C-). Bien que cela prenne également des mesures, ce dernier Il n'y a pas de mêmes contraintes de temps comme les deux premiers cas. Bref, surveillance PPM est effectué par une commande spécifique appelée MPPT. La commande agit principalement sur le rapport cycle du convertisseur statique.

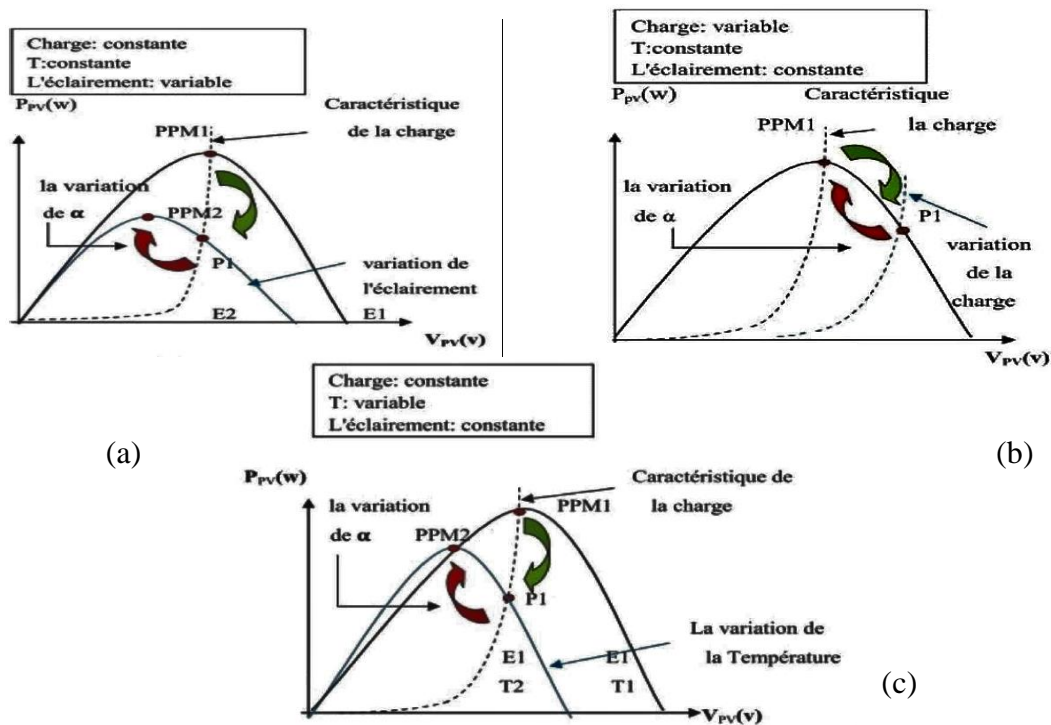


Figure III.4: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

II.6.1 La commande MPPT

Nous pouvons généralement classer la commande MPPT en fonction du type d'implémentation électronique : simulation, nombres ou mélanges. Mais plus les classer en fonction des types qu'ils exécutent les paramètres d'entrée de la commande MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de commandes MPPT scientifiques et moins compliquées.

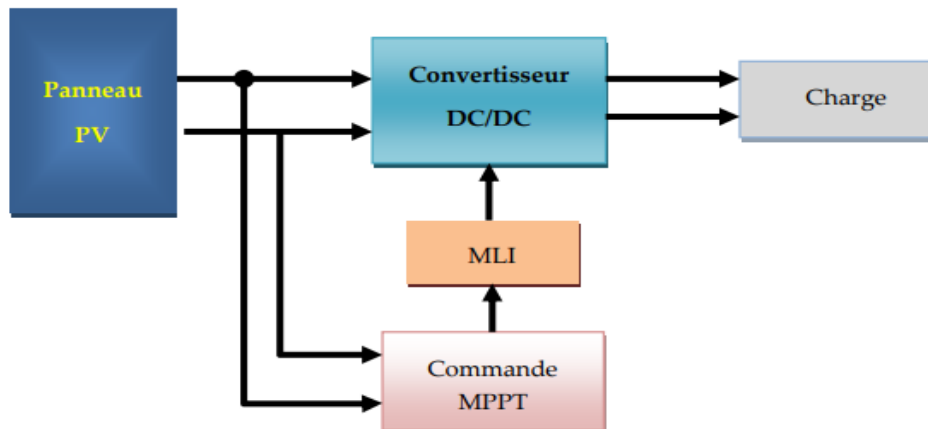


Figure III.5: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.

La Figure III.5 il représente un résumé du système photovoltaïque. Le principe de la commande MPPT fournit des opérations de contrôle appropriées pour toujours suivre le point de puissance maximum. Dans le convertisseur DC-DC, la tension de sortie doit être ajustée à égalité en continu à la tension de référence, car la charge V et la charge de l'alimentation peuvent varier.

II.6.1.1 Principe PWM

Une façon de réguler la tension de sortie $V_0(t)$ pour obtenir une tension moyenne fixe V_{0moy} consiste à ajuster en continu le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $D = \frac{T_{on}}{T}$ sans changer T .

Cette méthode de variation de la largeur de l'impulsion de commande de commutation est appelée méthode de modulation de largeur d'impulsion (PWM) ou PWM (modulation de largeur d'impulsion).

Le signal de commande de l'interrupteur S doit être calculé en comparant le rapport cyclique D avec la tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

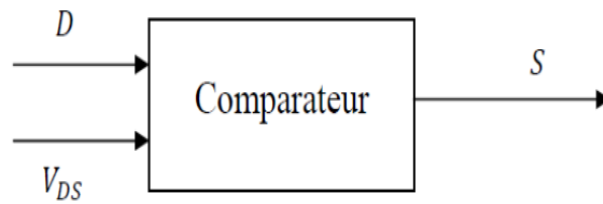


Figure III.6: Principe du PWM (DC/DC)

- Lorsque $D > V_{DS}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé fermer (état ON).
- Lorsque $D < V_{DS}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé ouvert (état OFF).

II.6.1.2 Classification des commandes de MPPT selon le type de recherche

- **MPPT indirect**

Ce type de commande MPPT utilise des liens entre les variables de mesure (I_{sc} ou V_{oc}), peut être facilement déterminé et la position approximative du MPP. Il calcule l'ordre en fonction de l'estimation du point de fonctionnement du GPV fabriqué par modèle de paramètre prédéfini. Il y a aussi des commandes ne considérer que changements de température cellulaire donnés par les capteurs. [39]

Les avantages de ces commandes sont simplement la production. Ils visent le système bon marché et d'emprisonnement peut fonctionner dans des zones géographiques il y a peu de changement climatique (cette commande est utilisée dans notre travail).

- **MPPT direct**

Ce type de commande MPPT détermine le meilleur point de fonctionnement (MPP) le courant, la tension ou la résistance mesurés dans le système. Par conséquent, il peut répondre aux changements le fonctionnement du GPV est imprévisible.

Habituellement, ces programmes sont basés sur l'algorithme de recherche, avec déterminez la courbe de puissance maximale sans fonctionnement d'interruption. à cette fin, La tension du point de fonctionnement augmente en fonction de l'intervalle conventionnel. Si vous avez du pouvoir la sortie est plus grande, donc l'étape suivante consiste à maintenir la gestion de la recherche, sinon elle sera inversée. Ensuite, le point de fonctionnement réel oscille autour du MPP. D'autres algorithmes peuvent conserver ce principe de base pour s'opposer aux erreurs. Par exemple, en raison d'une mauvaise direction de recherche, ces erreurs peuvent entraîner une puissance accrue, qui est causée par une augmentation rapide des niveaux de rayonnement.

Déterminer la valeur de la valeur de puissance du générateur PV (indispensable pour la recherche de MPP) nécessite une tension de mesure et le courant du générateur, et la multiplication de ces deux variables. L'avantage de cette commande est leurs détails et leur vitesse de réponse.

II.6.1.3 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

- **Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrée du convertisseur**

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur. [39]

D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Ce type de commande ayant d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

- **Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur**

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie CS. Exister Effet, ce type utilise la tension CS et le courant de sortie deux. La commande MPPT est maximisée en fonction du courant de sortie pour Il est principalement utilisé dans la charge lorsque la batterie est utilisée. Tous les systèmes utilisant des paramètres de sortie, une valeur approximative est Fabriqué par les performances du convertisseur. Mieux c'est le sol, mieux c'est, C'est presque efficace. D'un autre côté, tous les systèmes avec un seul capteur sont inexacts. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour l'espace.

III.6.2 Poursuite du point de puissance maximale

Pour améliorer l'efficacité d'un système PV, il est nécessaire de maximiser sa puissance de sortie. Si le point de fonctionnement du générateur PV est correctement sélectionné en alignant la source de tension avec la charge, le générateur peut produire le plus de puissance possible. Le convertisseur DC-DC fonctionne comme un adaptateur d'impédance, permettant au système de fonctionner à son point optimal et de produire la puissance de sortie maximale du générateur PV. Cela a été démontré dans la recherche.

Afin de faire fonctionner un GPV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisés pour minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de la variable de référence, en tenant compte de la méthode optimale basée sur les conditions climatiques dominantes.

La puissance extraite du module est déterminée en calculant les mesures de courant, notées I , et leurs valeurs correspondantes. En multipliant le courant I du module par sa tension V , on obtient la puissance générée, exprimée sous la forme $P = I_{PV} \times V_{PV}$. L'exécution de la régulation est accomplie par l'utilisation de la commande MPPT. Cette commande particulière a pour fonction de modifier le rapport cyclique de manière variable. Le convertisseur statique (CS) peut être ajusté à une valeur de référence constante en utilisant un signal. Pour utiliser pleinement la puissance du GPV, il est recommandé d'utiliser des connexions électriques appropriées qui peuvent tirer le maximum de puissance.

Une gamme de techniques utilise ces mesures pour surveiller le vrai MPP. Le concept en cours de discussion est la rage. Les techniques employées dans cette poursuite reposent sur des algorithmes de recherche qui itèrent afin de localiser le résultat souhaité. L'objectif est de maximiser la puissance de sortie du module solaire en ajustant son point de fonctionnement en conséquence. L'interruption du fonctionnement du système est un phénomène qui ne s'enracine dans aucune valeur spécifique. Le processus de maximisation ne repose pas uniquement sur des références prédéfinies ou des paramètres opérationnels, mais plutôt sur d'autres facteurs. La méthode de génération d'énergie permanente par le biais de modules PV, en particulier photovoltaïques, est couramment utilisée. L'algorithme d'incrémentaire d'inductance implique la méthode d'observation et de génération de perturbations. Il existe deux méthodes différentes pour obtenir la stabilité des circuits électriques : la méthode du courant constant et la méthode de la tension constante.

- **Méthode de perturbation et observation**

Le concept fondamental du contrôle P&O consiste à induire une perturbation d'une ampleur minimale.

La variation de puissance est générée par les changements de tension. Ceci, à son tour, provoque une augmentation de la pression artérielle.

Lors d'une montée en puissance, le point de fonctionnement a tendance à se déplacer vers la gauche du PPM. A l'inverse, si la puissance subit une baisse, le point de fonctionnement se décale vers la droite. Ce principe s'applique de la même manière à notre situation.

L'explication d'une baisse de tension.

En résumé, face à une perturbation de tension, une augmentation de puissance se traduira par un changement de sens. Le maintien d'une perturbation est maintenu, et si ce n'est pas le cas, alors le point de fonctionnement est inversé pour la restaurer. Le PPM est le point de convergence **Invalid source specified.**

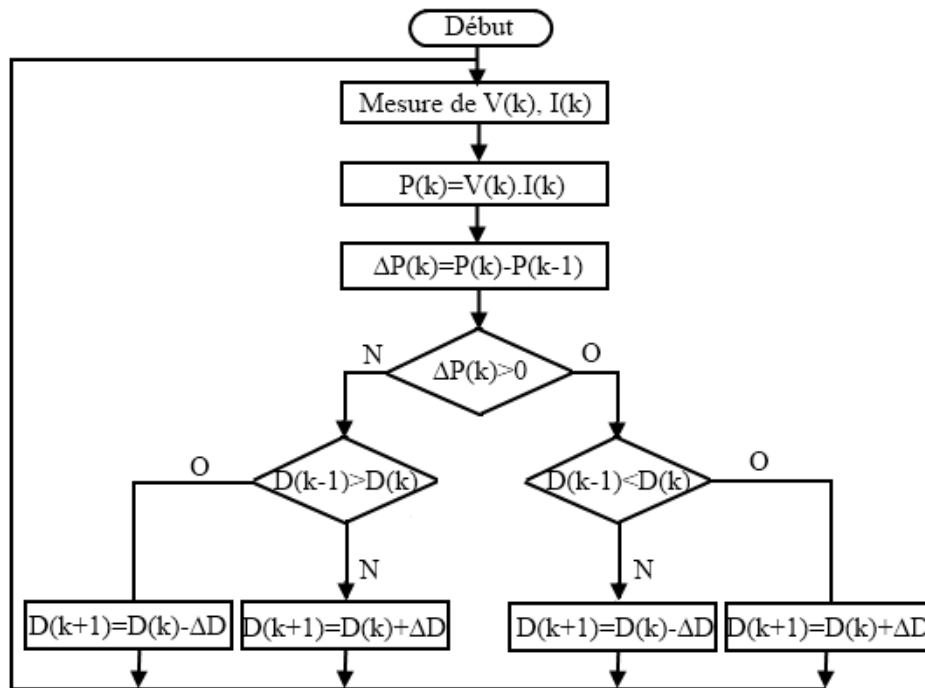


Figure III.7: Organigramme de l'algorithme P&O. [39]

III.7 Conclusion

Le fonctionnement optimal de l'efficacité du générateur (GPV) et du récepteur nécessite l'insertion d'un convertisseur statique entre le récepteur du générateur. Dans la littérature, plusieurs travaux portent sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Dans ce chapitre, nous présentons des informations générales sur les réseaux électriques (centralisés et décentralisés), leurs avantages et inconvénients, les topologies des onduleurs couplés au réseau et les méthodes de suivi du point de puissance maximale MPPT.

Chapitre IV

Simulation et évaluation des résultats

IV.1 Introduction

Ce chapitre particulier présentera une analyse de simulation approfondie d'un générateur photovoltaïque et de son système de convertisseur correspondant, y compris un convertisseur "boost" et un contrôle MPPT "d'observation et de perturbation". De plus, les différentes topologies de convertisseurs seront également explorées en détail.

IV.2 l'outil Matlab / Simulink

Le logiciel MATLAB/Simulink a été utilisé pour effectuer le contrôle de puissance, ainsi que les tâches de modélisation et de simulation.

Des boîtes à outils, constituées de bibliothèques de fonctions spécialisées, sont disponibles pour répondre à une variété de besoins.

- Simulink est un environnement de modélisation robuste qui utilise des diagrammes de blocs comme base. L'imitation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires est au centre de cette étude.
- Des collections spécialisées de blocs Simulink, également appelées jeux de blocs, se trouvent couramment dans les bibliothèques.
- Il existe plusieurs autres modules qui existent en plus de ceux mentionnés, comme un compilateur, un générateur de code C et un accélérateur.
- L'atelier DSP est une collection d'outils complets spécialement conçus pour le traitement du signal

IV.3 le système photovoltaïque

Composé de 324 cellules photovoltaïques individuelles, le générateur PV a la capacité de produire une puissance de sortie de 6000 W et un courant de 40 A dans des conditions optimales déterminées par des tests standards (CST). Cette sortie optimale est obtenue grâce à une tension de 150V.

Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type boost utilisé pour les tâches nécessitant des tensions supérieures à 150 volts.

Le contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) est systèmes photovoltaïques et permet de trouver le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque Dépend du temps stable et de la charge. Son principe de régulation est passe automatiquement à la valeur

appropriée en fonction du rapport cyclique α de sorte que maximisez en continu la puissance de sortie du réseau photovoltaïque.

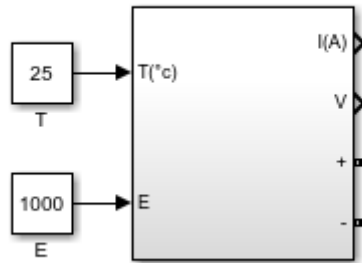


Figure IV.1 : schéma block d'un générateur photovoltaïque.

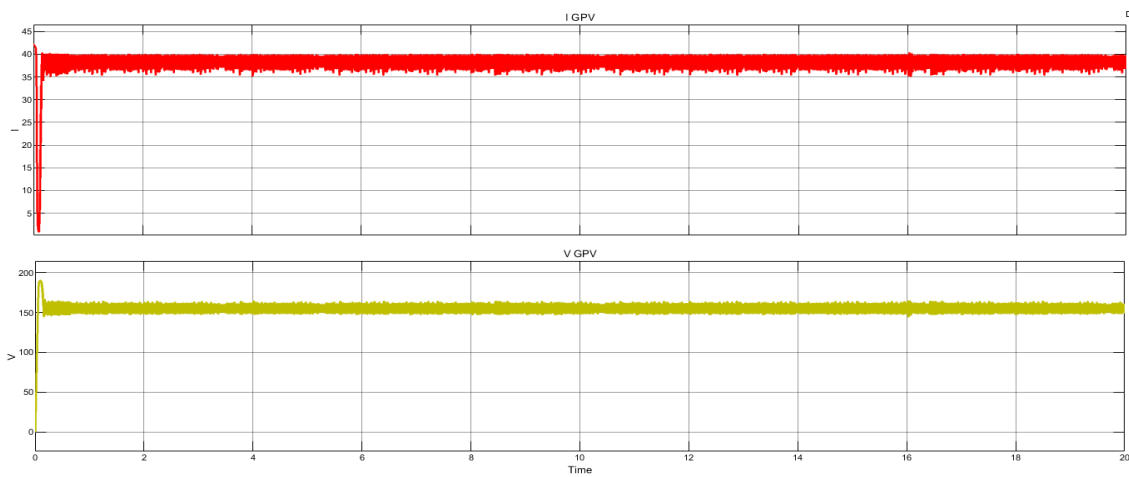


Figure IV.2 : Résultats de simulation de courant et de tension de sortie de générateur photovoltaïque.

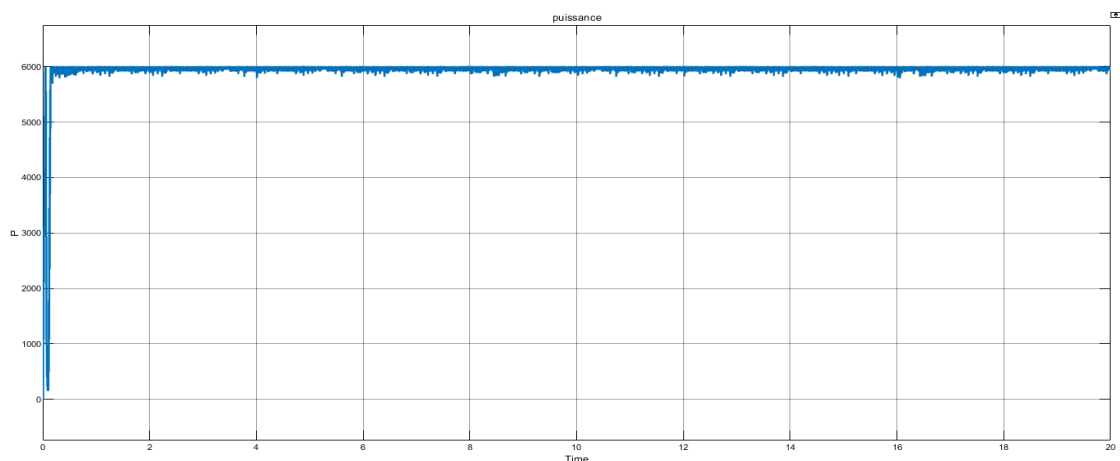


Figure IV.3 : Résultats de simulation de puissance de sortie de générateur photovoltaïque.

IV.4 Simulation d'hacheur élévateur (parallèle)

La figure IV.4 représente le schéma block d'un hacheur boost.

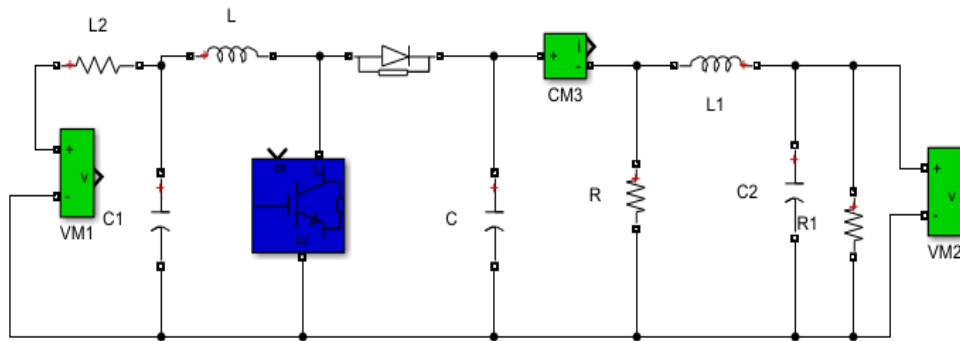


Figure IV.4 : Schéma block d'un convertisseur élévateur.

IV.5 Simulation d'un onduleur triphasé

La figure IV.5 représente le schéma block d'un onduleur triphasé

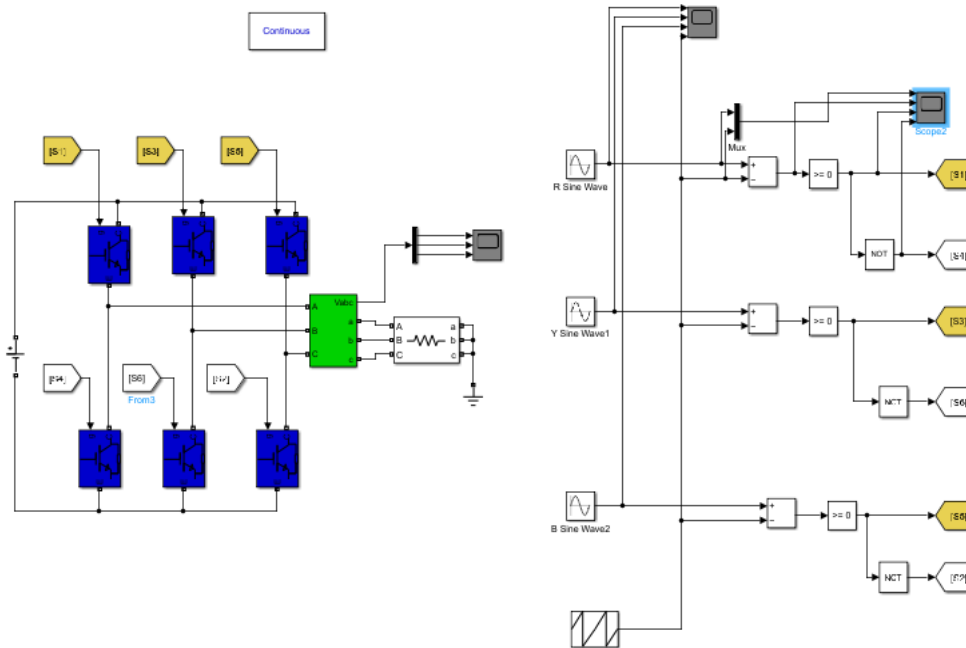


Figure IV.5 : Schéma block d'un convertisseur onduleur.

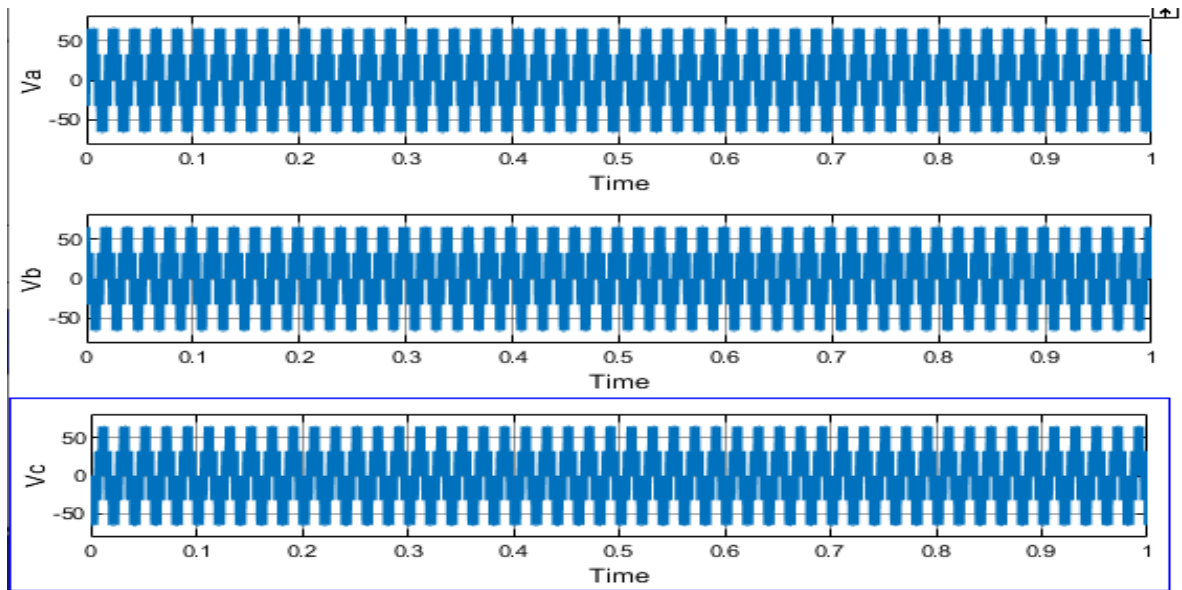


Figure IV.6 : Résultats de simulation de la tension de sortie d'onduleur.

IV.6 Simulation de système global

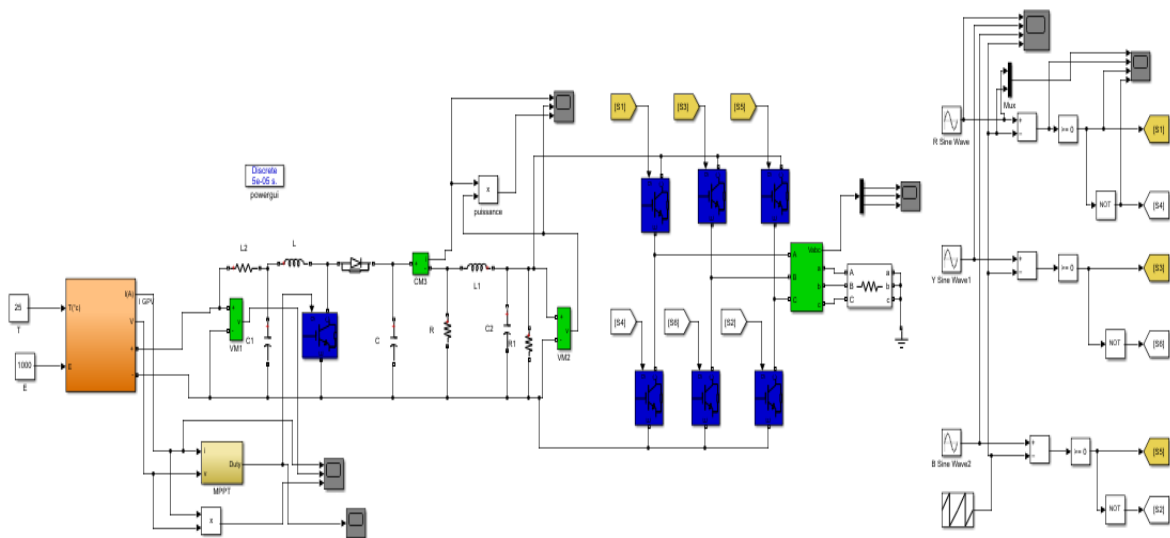


Figure IV.7: Schéma Matlab-Simulink d'un système photovoltaïque avec Boost, la commande MPPT et onduleur triphasé.

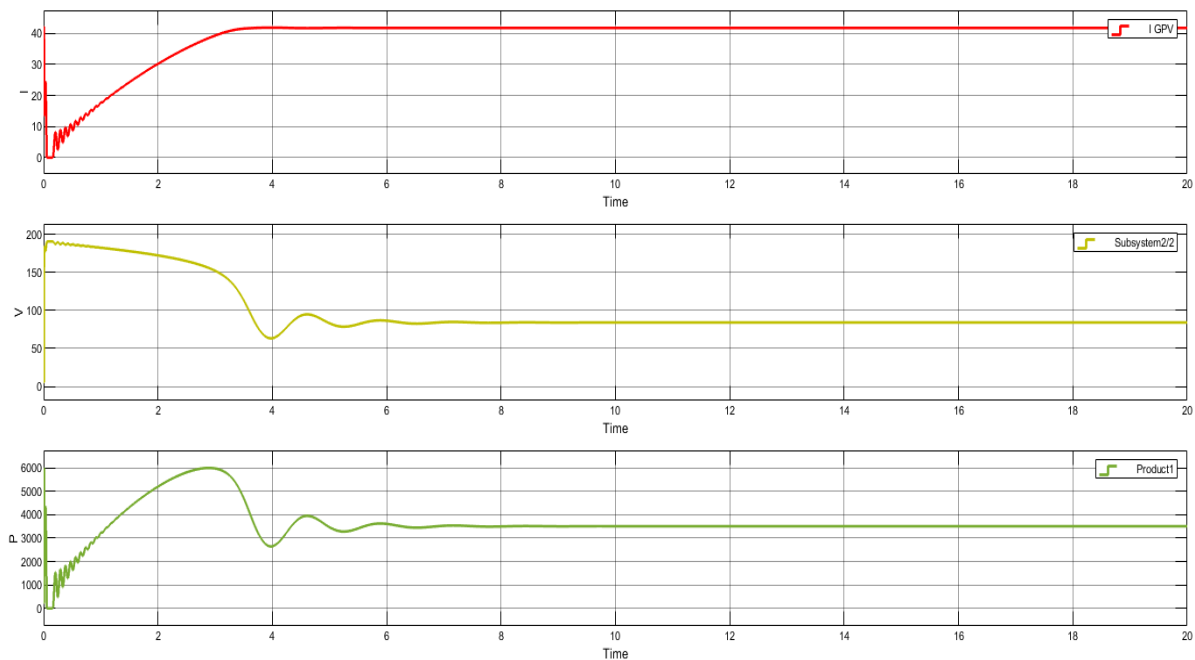


Figure IV.8: Résultats de simulation de courant (IGPV), la tension (VM1) et la puissance (product) d’entrée de l’hacheur élévateur dans le cas global.

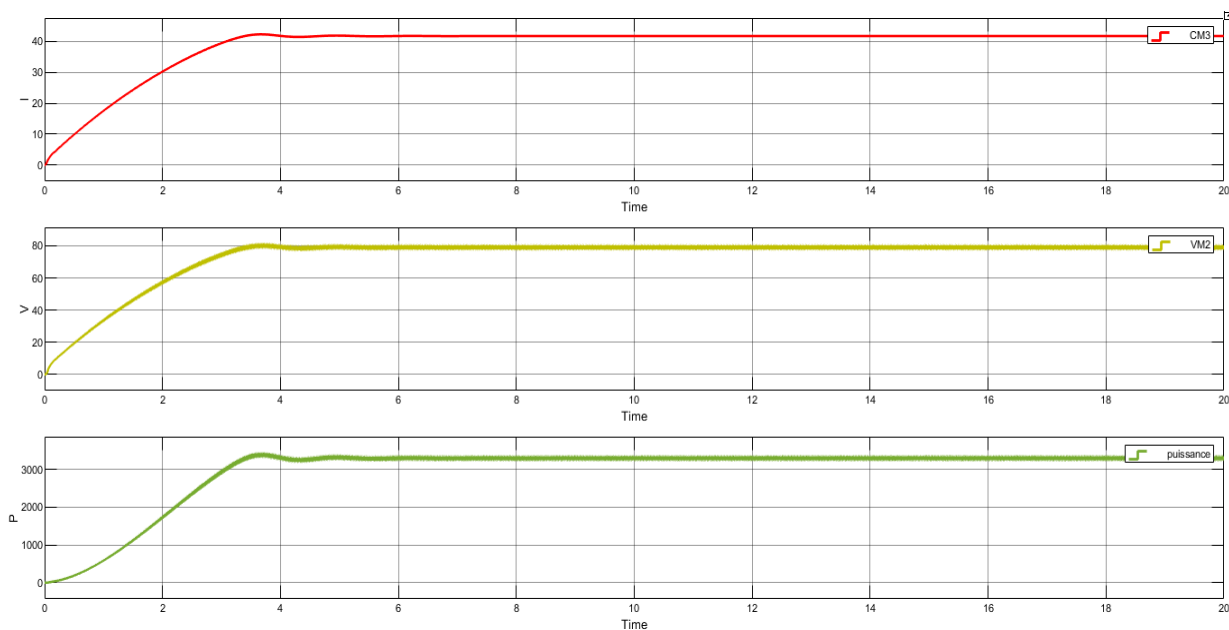


Figure IV.9 : Résultats de simulation de courant (IGPV), la tension (VM1) et la puissance (product) de sortie du hacheur élévateur dans le cas global.

Les données présentées indiquent que l’hacheur de suralimentation produit une tension de sortie d'environ 80 volts, notée V_o . L'amplitude de la tension de sortie, V_o , est notablement supérieure à celle de la tension d'entrée, V_i , qui est d'environ 85 volts. Par conséquent, le booster hacheur fonctionne correctement.

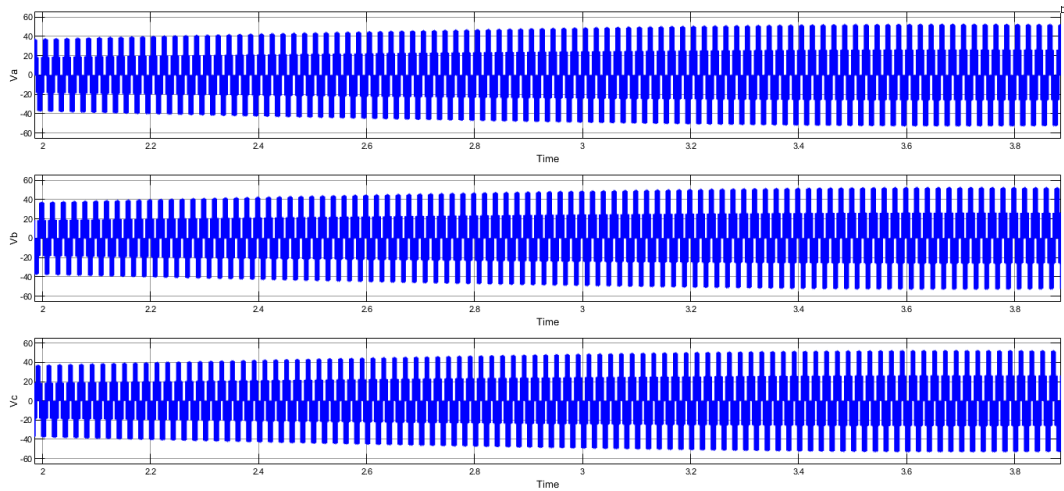


Figure IV.10 : Résultats de simulation de tension de sortie l'onduleur triphasé dans la cas global.

L'onduleur fait son rôle par transformer la tension qui provenant à partir de la tension de sortie d'hacheur. la tension qui fournit par l'onduleur est environ 40Vet -40V.

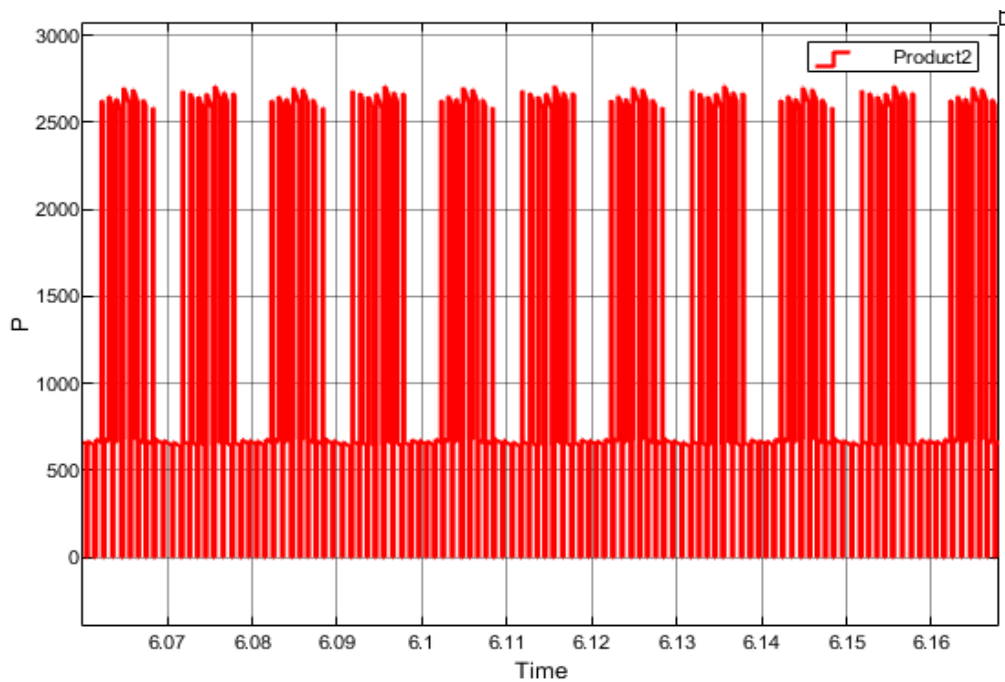


Figure IV.11 : Résultats de simulation de puissance de sortie l'onduleur triphasé dans le cas global.

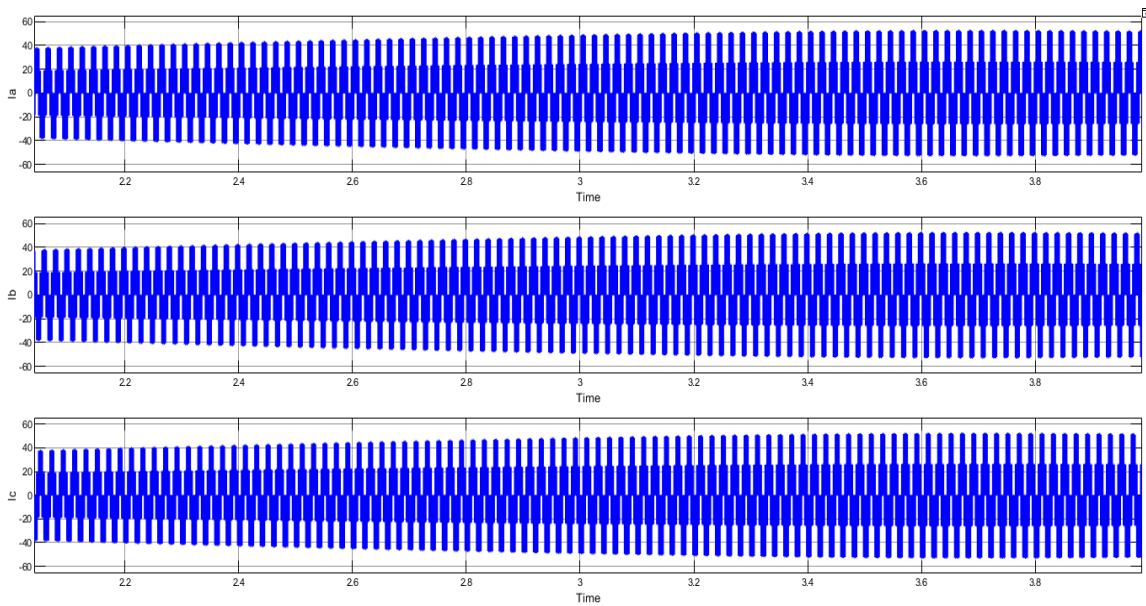


Figure IV.12 : Résultats de simulation de courant de sortie l'onduleur triphasé dans le cas global.

IV.7 Simulation de convertisseur dans le cas central

La figure IV.13 représente schéma global d'un convertisseur dans le cas central.

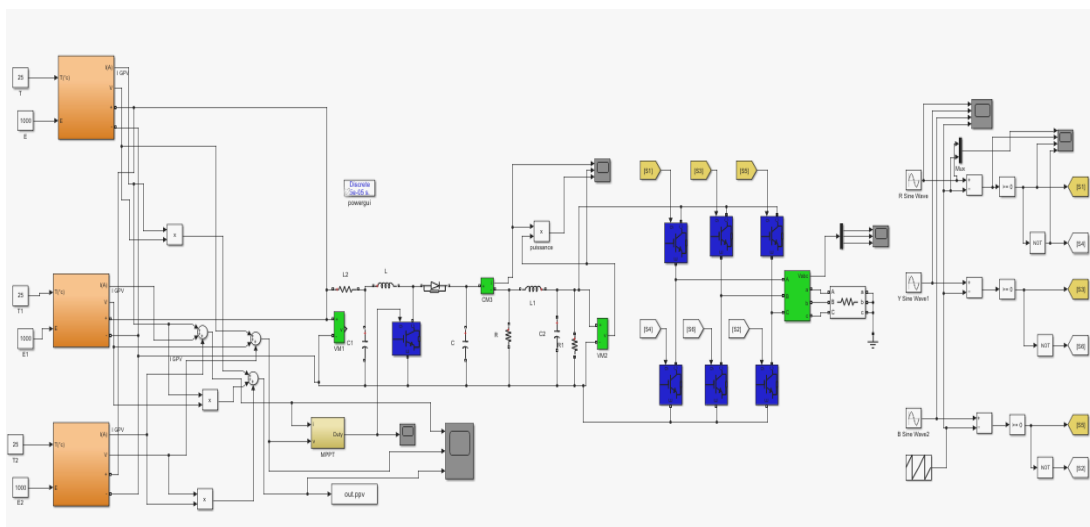


Figure IV.13 : Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur central.

Les résultats de la simulation pour le générateur photovoltaïque et le convertisseur central sont disponibles. Les chiffres représentant l'intensité radiante de 1000 watts par mètre carré et une température de 25 degrés Celsius sont les suivants. Les deux valeurs numériques représentées dans ce contexte sont la tension générée par la sortie de l'appareil et la tension qui lui est appliquée en entrée. De plus, le courant qui traverse l'appareil est également mesuré. Les trois principaux composants liés à la puissance dans les convertisseurs centraux sont la sortie, la puissance de sortie et la puissance d'entrée.

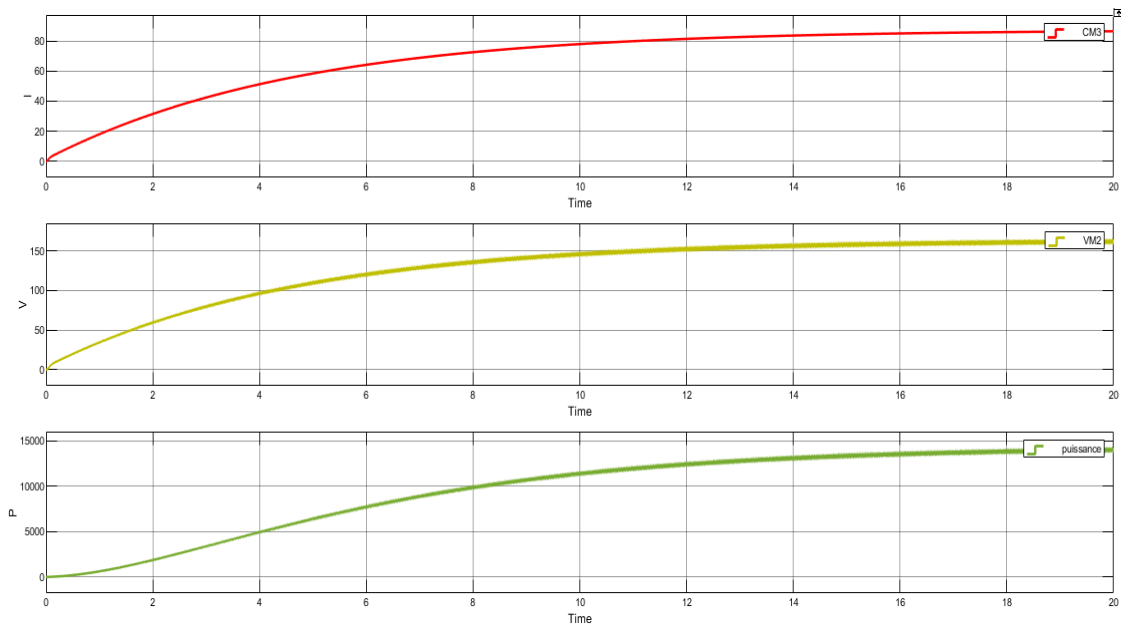


Figure IV.14: Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) de sortie du hacheur élévateur (à central).

La tension de sortie augmentée de 0V à 152 V dans la période $0s < t < 16s$ et d'après 16s la tension de sortie est stable 152V.

Le courant de sortie augmentée de 0A à 82 A dans la période $0s < t < 16s$ et d'après 16s le courant de sortie est stable 82A.

La puissance de sortie augmentée de 0W à 5000W dans la période $0s < t < 16s$ et d'après 16s la puissance de sortie est stable 5000W.

Le rendement dans le cas central 33.33%.

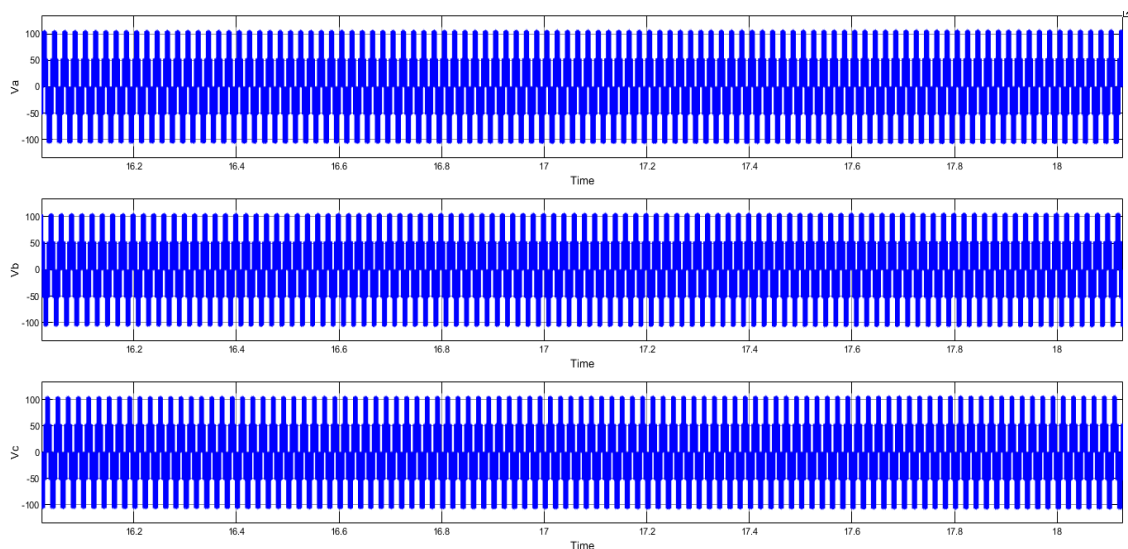


Figure IV. 15 : Résultats de simulation de tension de sortie l'onduleur triphasé (à central).

La tension qui fournit par l'onduleur est entre 100 V et -100v. Qui augmente par rapport à le cas global.

IV.8 Simulation de convertisseur dans le cas string

IV.8.1 Association de convertisseur en parallèle

La figure IV.16 représente le schéma block globale des trois générateurs avec un hacheur dans le cas association string parallèle avec MPPT.

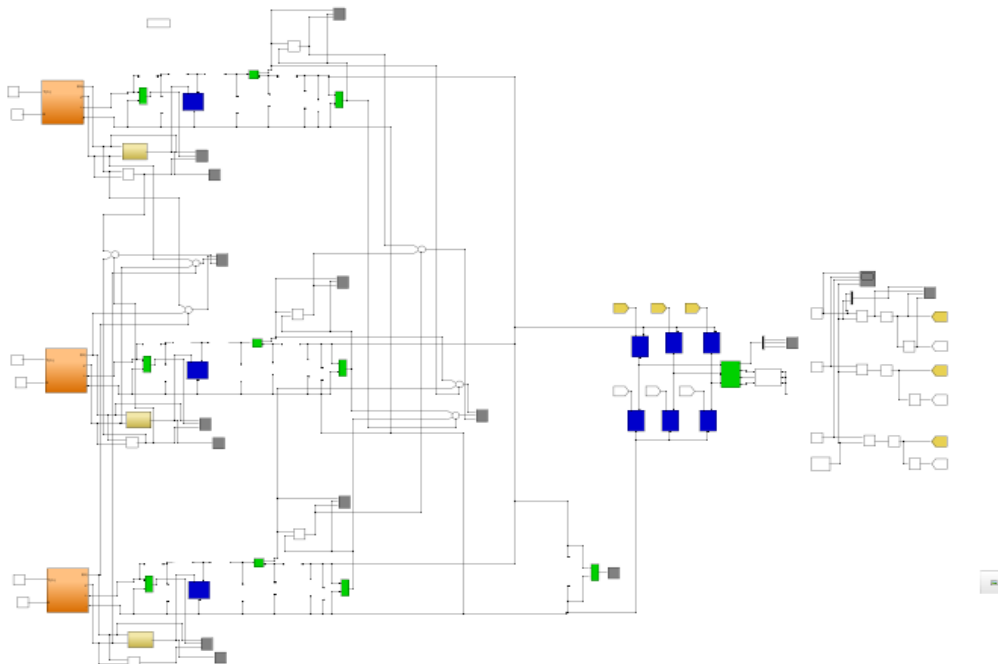


Figure IV. 16 : Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur parallèle.

Les résultats de la simulation pour le générateur photovoltaïque et les convertisseurs sont disponibles. Les chiffres représentant des conditions standards (Températures et l'intensité rayonnante). Représentant par les figures ci-dessous.

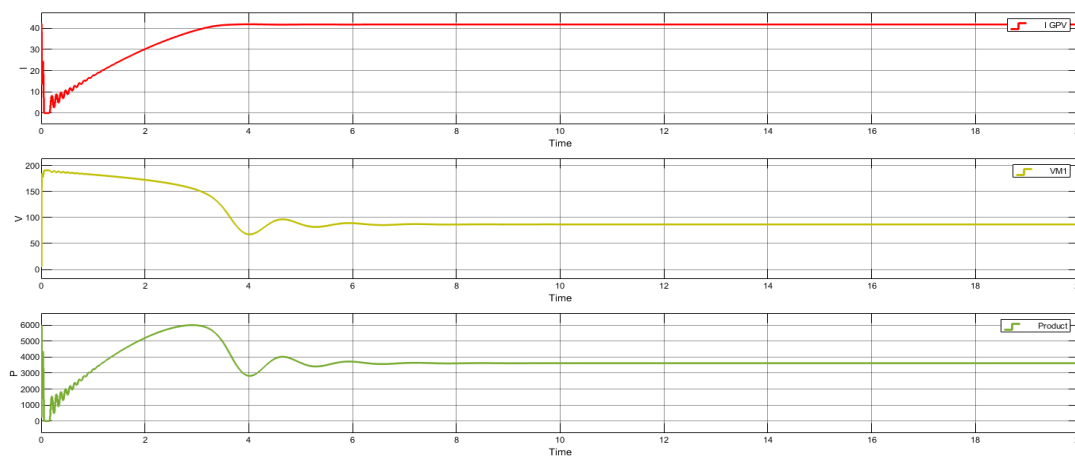


Figure IV.17: Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) d'entrée du hacheur élévateur (à parallèle).

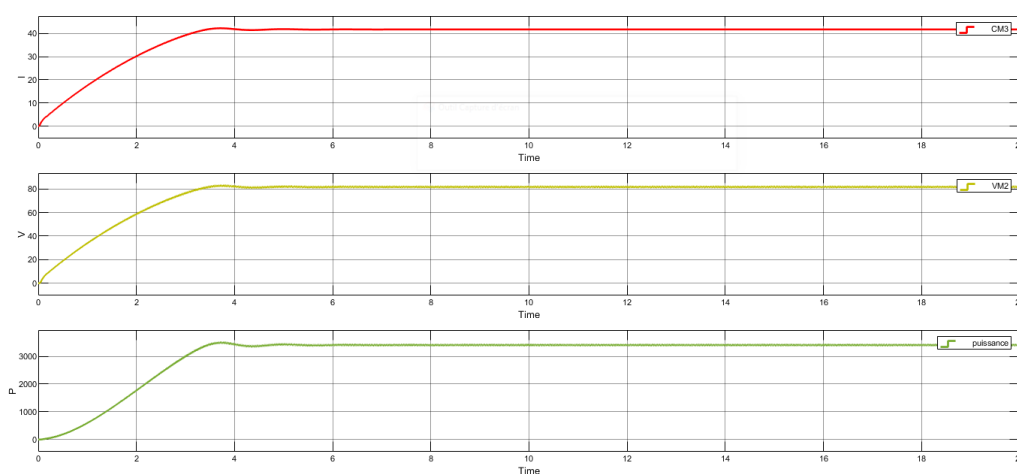


Figure IV.18: Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) de sortie du hacheur élévateur (à parallèle).

La tension de sortie augmentée de 0V à 250 V dans la période $0s < t < 4s$ et d’après 4s la tension de sortie est stable 250V.Par rapport la tension d’entrée varier de 0V à 260V de $0s < t < 7s$ et d’après 7s la tension est stable à 260V.

Le courant de sortie augmentée de 0A à 125 A dans la période $0s < t < 4s$ et d’après 4s le courant de sortie est stable 125A. Par rapport le courant d’entrée varier de 0A à 122A de $0s < t < 4s$ et d’après 7s le courant est stable à 122A.

La puissance de sortie augmentée de 0W à 10000 W dans la période $0s < t < 4s$ et d’après 4s la puissance de sortie est stable 10000W. Par rapport la puissance d’entrée varier de 0W à 12000W de $0s < t < 7s$ et d’après 7s la puissance est stable à 12000V.

Le rendement dans le cas string parallèle 83.33%.

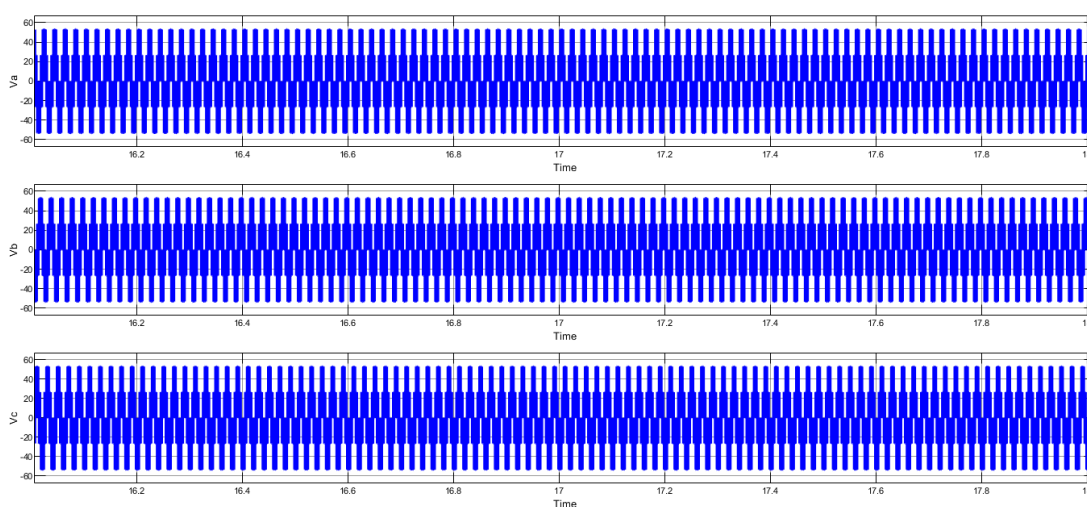


Figure IV.19 : Résultats de simulation de tension de sortie l’onduleur triphasé (à parallèle).

IV.8.2 Association de convertisseur en série

La figure IV.20 représente le schéma block globale des trois générateurs PV avec convertisseur dans le cas association de convertisseur string série avec la commande MPPT.

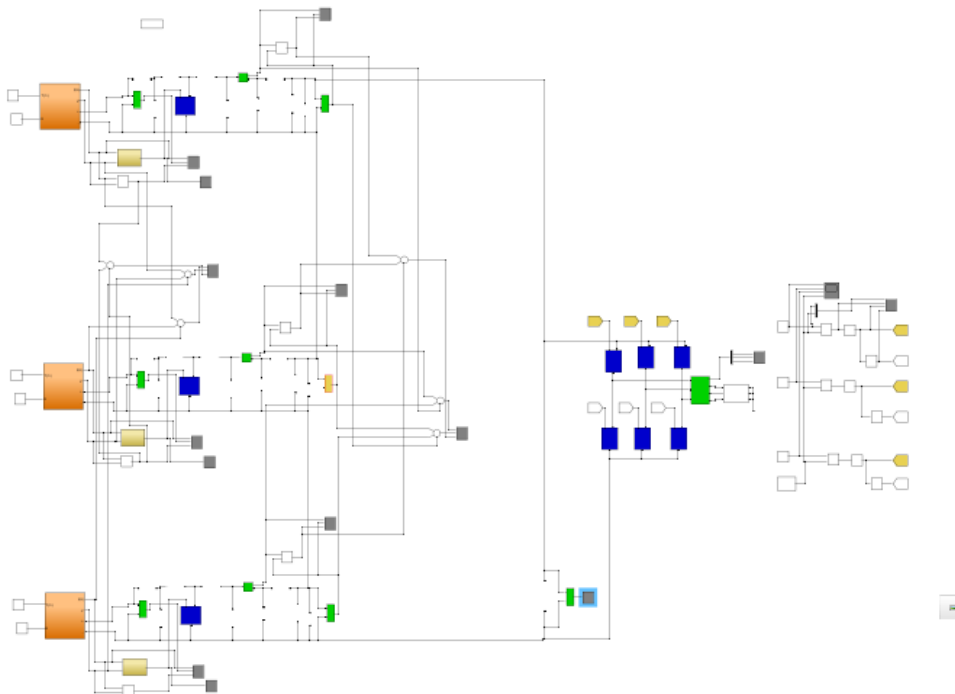


Figure IV.20: Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur string on série.

Les résultats de la simulation pour le générateur photovoltaïque et les convertisseurs sont disponibles. Le constant représentant des conditions standards (Températures et l'intensité rayonnante). Représentant par les figures ci-dessous.

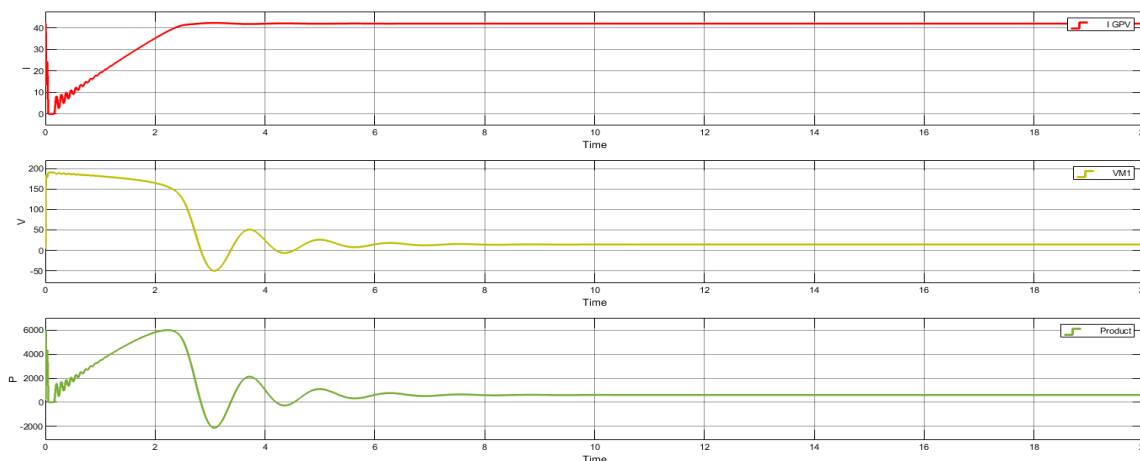


Figure IV.21 : Résultats de simulation de la tension (jaune) et le courant (bleu) d'entrée du hacheur élévateur (à série).

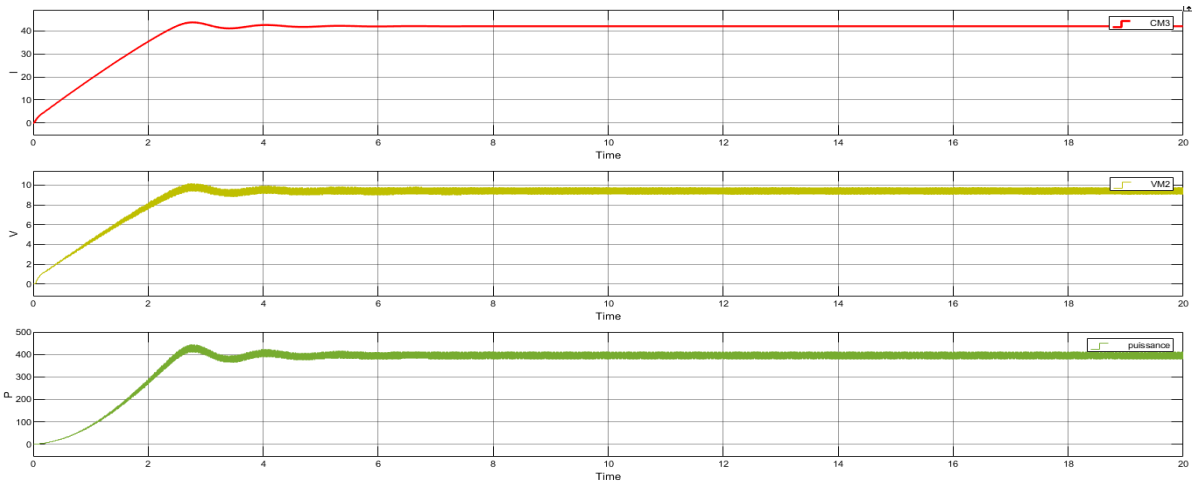


Figure IV.22: Résultats de simulation de puissance de sortie du hacheur élévateur (à série).

La tension de sortie augmentée de 0V à 250 V dans la période $0s < t < 5s$ et d’après 5s la tension de sortie est stable 250V. Par rapport la tension d’entrée varier de 0V à 260V de $0s < t < 7s$ et d’après 7s la tension est stable à 260V.

Le courant de sortie augmentée de 0A à 122 A dans la période $0s < t < 4s$ et d’après 4s le courant de sortie est stable 122A. Par rapport le courant d’entrée varier de 0A à 122A de $0s < t < 4s$ et d’après 7s le courant est stable à 122A.

La puissance de sortie augmentée de 0W à 11000 W dans la période $0s < t < 5s$ et d’après 5s la puissance de sortie est stable 11000W. Par rapport la puissance d’entrée varier de 0W à 12000W de $0s < t < 7s$ et d’après 7s la puissance est stable à 12000V.

Le rendement dans le cas string série 91.66%.

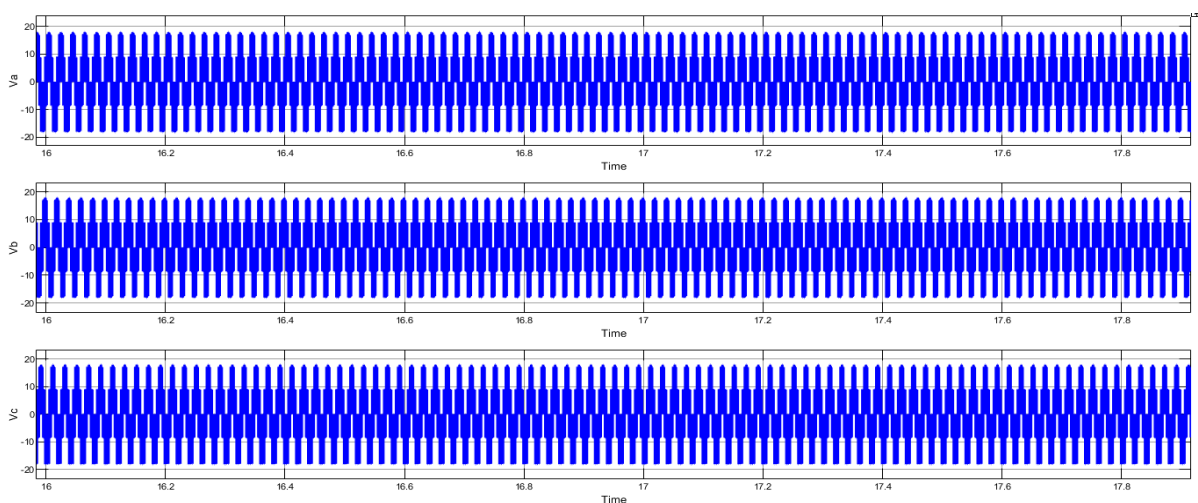


Figure IV.23: Résultats de simulation de tension de sortie du l’onduleur (à série).

Le tableau IV.1 représenté les données de la simulation des différentes architectures des systèmes PV.

	Pe (W)	Ps (W)	η (%)
Cas central	15000	5000	33.33
Cas string en parallele	12000	10000	83.33
Cas string en serie	12000	11000	91.66

TableauIV.1 : représente les données de la simulation des différentes architectures des systèmes PV.

IV.9 Conclusion

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque : La variation des signales de trois techniques de convertisseur DC-DC. La technique du convertisseur central, la technique du convertisseur string en parallèle et la technique du convertisseur string en série. Cela déterminera le rendement du boîtier central, le rendement du boîtier série à série et enfin le rendement du convertisseur série à série est le meilleur résultat.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans notre projet l'étude est basée sur étude par simulation des différentes topologies de convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux.

Dans un premier temps, nous avons exploré des concepts liés à l'énergie solaire, notamment une explication du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium et d'un générateur (GPV). Nous avons également discuté de diverses configurations possibles de cellules.

Ensuite, nous avons fourni un modèle mathématique pour la cellule, le générateur photovoltaïque, et donné des informations générales sur les convertisseurs statiques. Pour analyser le comportement d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque (constitué de 324 cellules connectées en série) dans des conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$), nous avons utilisé le logiciel MATLAB.

Enfin, nous avons approfondi le fonctionnement du hacheur DC-DC (Boost) et leur fonction, ainsi que le contrôle MPPT et l'onduleur.

Les résultats suivants ont été obtenus à partir de cet effort :

- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT fonctionnent efficacement dans leurs capacités respectives. Le convertisseur garantit que, dans des circonstances idéales, la tension qu'il produit à sa sortie dépasse celle générée par le générateur PV. D'autre part, la commande MPPT ajuste le générateur PV pour s'adapter à la charge, permettant le transfert de la puissance maximale disponible du générateur PV.
- Comparaison de l'efficacité énergétique de trois topologies de convertisseur DCDC : Topologie de convertisseur central, topologies de convertisseur parallèle et série. Cela déterminera l'efficacité du convertisseur série est le meilleur résultat.

Comme perspective de notre travail on va proposer des techniques de commande intelligent pour commander les convertisseurs avec des différents topologies.

Bibliographie

- [1] C. ALONSO, «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie», UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III.) 2003..
- [2] K. ZAKARIA, « Etude d'une centrale solaire thermique », MASTER GENIE MECANIQUE-UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA-2017.
- [3] B. MANEL, "Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voiture", MASTER EN GENIE MECANIQUE -Université de M'sila- 2019.
- [4] D. Delagnes, « Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE, / Juin 07 Approche générale..
- [5] Z. Bilal, «MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE», Magester en electrotechnique .Université de Annaba2010. .
- [6] Bouziane MAHMAH, « Projet Maghreb – Europe : Production d'Hydrogène Solaire Phase I : Etude d'Opportunité et de Faisabilité du Projet», 20th World Energy Congress – Rome, November .
- [7] H.Benis, « Contribution à la modélisation du problème de « Hot Spot » dans les modules solaire Photovoltaïque occultées », thèse de magistère, Constantine, 2008.
- [8] -. C.Delerome, « Revue internationale d'héliotechnique », 1997.
- [9] «<https://energies-renouvelables.org/>,» .
- [10] F. Zouache, « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque », mémoire de magister de l'université de Constantine 2009..
- [11] A. V. M. V. T. Mornay, « Les cellules photovoltaïques », Institution des Chartreux 2004/2005..
- [12] B. G. H. Merakchi, « Optimisation d'un système solaire de pompage d'eau », » thèse master en génie électrique université de OEB, juin 2010..
- [13] S. A. F. Guessoumi, « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic », Mémoire ingénieur, université de Biskra, 2010..
- [14] A. BORNI, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », Mémoire ingénieurs. université de Constantine, 2009..
- [15] B. Flèche - D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque.doc », juin 2007..

- [16] .. S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques:application aux systèmes de pompage », Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015..
- [17] Y. BENYAHIA, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », thèse master en génie électrique université de OEB,, juin 2013..
- [18] «<https://www.landes.fr/files/cg40/environnement/Guide-PV,>»
- [19] «<http://thesis.univ-biskra.dz/1151/4/2emechapitre.pdf,>» .
- [20] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque.>
- [21] «<http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/solaire,>» .
- [22] S. Ali, Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP,, S. Ali, Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'impléUNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI: mémoire de master,, 2016. .
- [23] «<http://medias.dunod.com/document/9782100738663/Feuilletage.pdf,>»
- [24] «G. J. Bonal, "Entraînements électriques à vitesse variable" rappels d'électronique de puissance et d'automatique,les variateurs électroniques de vitesse, vol. vol 2, Paris: Édition Lavoisier, 1998.,» .
- [25] V. Leger, "Physique appliquée" les bases de l'électronique de puissance, BTS électrotechnique, résumés de cours, exercices et contrôles corrigés, Paris: Édition Ellipses, 2004..
- [26] A.Bouafia, "Contribution à l'élaboration d'une loi de commande numérique en temps réel du Hacheur AC PWM",, Mémoire de magister UFAS,, 2001..
- [27] B. Souhila, Commande en Courant par Hystérésis Numérique pour les Systèmes de l'électronique de Puissance,, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF:: memoire magister,, 2008..
- [28] B. IMED, " Etude d'un hacheur à stockage capacitif ",, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi:: Mémoire de Master., 2014.
- [29] T. ABDERAOUF, Commende pare mode glissent des convertisseurs,, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj: : memoire de master , , 2022.
- [30] F. F. FATEH, " Etude et simulation d'un étage mppt pour un système à énergie renouvelable ",, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi:: Memoire de Master ., 2013..

- [31] A. ISMAIL, " Etude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque", Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi:: Mémoire de Master,, 2013..
- [32] V. Didier, «"Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement Etat de l'Art et Etude des Performances ",» Rapport de HESPUL, 2007..
- [33] Y. Lounis, " ETUDE ET SIMULATION D'UN CONVERTISSEUR ELECTRIQUE INTERCONNECTE AU RESEAU CONVENTIONNEL", UNIVERSITE MOULOU MAMMERI, TIZI-OUZOU: : Mémoire de fin d'études de MASTER PROFESSIONNEL,, 2016..
- [34] O. S. e. B. Walid, " Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI ", UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA:: memoire de master , , 2019..
- [35] FAICAL MNIF, "ÉTUDE ET RÉALISATION DES LOIS DE COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT ET PAR APPROCHE GÉOMÉTRIQUE:APPLICATION À UN ONDULEUR DE TENSION MONOPHASÉ", UNIVERSITÉ DU QUÉBEC,, MAI 1991..
- [36] [En ligne]. Available: <https://www.astuces-pratiques.fr..>
- [37] «<http://thesis.univ-biskra.dz/1151/4/2emechapitre.pdf>,» [En ligne].
- [38] S. M. Sofiane FELLOUAH, ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTE AU RESEAU, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU: Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, 2014-2015.
- [39] A. A.-B. Zoubida, Etude et simulation d'un régulateur de charge MPPT pour système photovoltaïque autonome, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou: Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE, 2017-2018.