

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de SIENCE et TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : TIABI Ahmed Boumedieneet DERKAOUI Wassim

Sujet

Étude de système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Soutenue publiquement en **25/06/2025** devant le jury composé de :

SEKOUR M'hamed	Professeur	Univ. Saida	Président
BENYAHIA Khaled	MCB	Univ. Saida	Rapporteur
BOUANANE Mokhtar	MCB	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2024/2025

Nous remercions Dieu<<ALLAH >> Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et la santé nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leurs encouragements, leur disponibilité et leur soutien ont été essentiels tout au long de ce parcours.

Je remercie vivement M. **BENYAHIA Khaled** pour son encadrement de qualité, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de ce travail. Son accompagnement m'a été d'une grande aide et d'un réel appui.

Nous tenons également à remercier les membres du jury pour l'intérêt porté à notre travail et pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de l'évaluer.

Nos pensées reconnaissantes vont aussi à l'ensemble de nos enseignants pour la qualité de leur enseignement, leur implication et leur soutien tout au long de notre formation.

Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements à nos parents, pour leur amour, leur soutien indéfectible et leur confiance. Leur présence à nos côtés a été un véritable pilier dans notre réussite.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire avec une profonde reconnaissance à nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience exemplaire et leur soutien constant, sans lesquels rien de tout cela n'aurait été possible.

À nos familles et à nos amis, pour leur présence, leurs encouragements et leur confiance en nos capacités, même dans les moments de doute.

Nous exprimons également notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont soutenus, motivés ou inspirés tout au long de ce parcours académique. Ce mémoire est aussi le fruit de votre bienveillance.

الملخص:

للمحد من الانبعاثات الملوثة والحد من تغير المناخ، تُعدّ الطاقات المتجددة حلاً فعالاً ومستداماً. من بين المصادر المختلفة، تتميز الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) بنضجها التكنولوجي، وقدرتها على التكيف مع القطاع السكني، وقدرتها على التكامل في الأنظمة المستقلة والشبكات الكهربائية المترابطة.

ركز هذا العمل تحديداً على دراسة نظام كهروضوئي متصل بالشبكة، ناقشنا مبدأ تشغيل النظام الكهروضوئي بالإضافة إلى تقنيات الخلايا الكهروضوئية وأنواع أنظمة الطاقة الكهروضوئية المختلفة. لفهم سلوك أنظمة الطاقة الكهروضوئية في ظل الظروف المناخية المتغيرة وتسهيل عملية التحكم، قمنا بنمذجة سلسلة التحويل الكهروضوئي.

وأخيراً، قررنا دراسة نظام كهروضوئي حقيقي متصل بالشبكة، وهو محطة توليد الطاقة الكهروضوئية في عين سخونة بقدرة 30 ميغاوات، والمثبتة في ولايتنا، والمتصلة بشبكة التوزيع. كما سيتم تقديم تحليل لأداء هذه المحطة الكهروضوئية خلال شهري مايو ويونيو من عام 2025. ويعتمد هذا التحليل على مؤشرات موحدة لتقييم أداء النظام وكفاءته.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة؛ الطاقة الشمسية؛ نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية؛ الشبكة الكهربائية؛ محطة الطاقة الشمسية الكهروضوئية عين السخونة.

Résumé :

Afin de réduire les émissions polluantes et de limiter le dérèglement climatique, les énergies renouvelables apparaissent comme une réponse pertinente et durable. Parmi les différentes sources l'énergie solaire photovoltaïque (PV) se distingue par sa maturité technologique, son adaptabilité au secteur résidentiel et sa capacité à s'intégrer aussi bien dans des systèmes autonomes que dans des réseaux électriques interconnectés

Ce travail a notamment été consacré à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau, nous avons abordé le principe de fonctionnement du système photovoltaïque, ainsi que les technologies des cellules photovoltaïques et les différents types de systèmes PV. Et afin de connaître les comportements de système PV sous des conditions climatiques variables et de faciliter le processus de contrôle, nous avons modélisé la chaîne de conversion photovoltaïque

Enfin, nous avons pris en compte d'étudier un système réel photovoltaïque connecté au réseau, il s'agit d'étudier la centrale photovoltaïque d'Ain Skhoune de 30 MW installée dans notre wilaya connectée au réseau de distribution. Une Analyse des performances de cette centrale PV durant les mois de Mai et Juin de l'année 2025 sera aussi présentée. Cette analyse repose sur des indicateurs normalisés permettant d'évaluer le rendement et l'efficacité du système.

Mots clés : Energies renouvelables; Energie solaire; Système PV; Réseau électrique; Centrale PV de Ain-Skhouna.

Abstract:

In order to reduce polluting emissions and limit climate change, renewable energies appear to be a relevant and sustainable response. Among the various sources, photovoltaic (PV) solar energy stands out for its technological maturity, its adaptability to the residential sector, and its ability to integrate both into stand-alone systems and interconnected electrical grids.

This work focused in particular on the study of a grid-connected photovoltaic system. We first discussed the operating principle of the photovoltaic system, as well as photovoltaic cell technologies and the different types of PV systems. To understand the behavior of PV systems under varying climatic conditions and facilitate the control process, we also modelled the photovoltaic conversion chain.

Finally, we decided to study a real grid-connected photovoltaic system, namely the 30 MW Ain Skhouana photovoltaic power plant installed in our Wilaya, connected to the distribution grid. An analysis of the performance of this PV plant during the months of May and June of 2025 will also be presented. This analysis is based on standardized indicators to assess the system's performance and efficiency.

Keywords: Renewable Energies; Solar energy; PV system; Electrical grid; Ain-Skhouna PV power plant.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières.....	I
Listes des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Table de notation et symboles.....	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur le système PV connecté au réseau électrique.....	4
I.1. Introduction	5
I.2. Potentiel solaire en Algérie :	6
I.3. Cellules photovoltaïques :	7
I.3.1. Normalisation :	7
I.4. Effet photovoltaïque :	7
I.4.1. Construction d'une cellule photovoltaïque :	7
I.5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	8
I.5.1.1. Technologie des cellules photovoltaïques :	9
I.6. Association des cellules photovoltaïques :	11
I.7. Protection des modules photovoltaïques :	12
I.8. Type des systèmes photovoltaïques :	13
I.8.1. Systèmes photovoltaïques autonomes :	13
I.8.1.1. Système PV autonome à entraînement direct :	13
I.8.1.2. Système PV autonome avec batterie de stockage alimentant des charges à CC et CA :	14
I.8.2. Systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique :	15

I.9. Chaîne de conversion du système photovoltaïque connecté au réseau :	15
I.10. Différentes configurations des systèmes solaires PV connectés au réseau électrique :	16
I.10.1. Configuration à onduleur centralisé :	17
I.10.2. Configuration à onduleur strings :	18
I.10.3. Configuration à onduleur multi-strings	19
I.10.4. Configuration à onduleur intégré aux panneaux	20
I.11. Conclusion.....	20

Chapitre II : Modélisation du système PV connecté au réseau électrique.....21

II.1. Introduction.....	22
II.2. Modélisation du générateur PV	22
II.3. Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque (I-V) (P-V).....	25
II.4. Modélisation de la partie d'électronique de puissance :	27
II.5. Convertisseurs électroniques de puissance utilisés :	28
II.5.1. Les Hacheurs :	28
II.5.1.1. Type des hacheurs :	29
II.5.2. Hacheur élévateur de tension (boost):.....	29
II.5.2.1. Détermination des paramètres de convertisseur élévateur.....	32
II.5.3. Modélisation de l'onduleur :	32
II.5.3.1. Classification des onduleurs :	33
II.5.3.2. Structure d'onduleur :	34
II.5.3.3. Modèle mathématique de l'onduleur-PV dans le repère de Park (d, q)...	36
II.6. Conclusion	38

Chapitre III : Contrôle du système PV connecté au réseau électrique.....	39
III.1. Introduction	40
III.2. Contrôle optimal de la puissance par la méthode MPPT.....	40
III.2.1. La méthode de perturbation et observation (P&O)	41
III.2.2. La méthode de la conductance incrémentale.....	42
III.2.3. La méthode de tension de circuit ouvert (Open circuit voltage)	43
III.3. Contrôle de l'onduleur PV connecté au réseau	44
III.3.1. Régulation des courants.....	46
III.3.2. Régulation de la tension	47
III.3.3. Commande de l'onduleur par MLI (Sinus-Triangle)	47
III.3.4. Synchronisation du système PV avec le réseau électrique.....	49
II.3.4.1. Méthode de verrouillage de phase ou (Phase Locked Loop (PLL))	50
III.4. Conclusion.....	52
Chapitre IV : Application de système PV connecté au réseau électrique : Station de Ain El Skhouna Saida	53
IV.1. Introduction	54
IV.2. Presentation of Ain-Sokhoua Photovoltaic Centre (Saïda)	54
IV.3. Situation Géographique et Vue d'ensemble de centrale de.....	54
IV.4. Composition de la centrale PV Skhoua(Saida)	55
IV.4.1. Champs Solaires Photovoltaïques.....	55
IV.4.2. Les Boîtes Centrales (Combiner Boxes).....	57
IV.4.3. Les Onduleurs Photovoltaïques – « Power Conditioners ».....	58
IV.4.4. L'Armoire de Communication des Charges	59
IV.4.5. Dispositif de Mesures Environnementales.....	60
IV.4.6. La salle de contrôle	61

Table des matières

IV.5. Fonctionnement de la centrale PV d'Ain Sokhna	62
IV.6. Actions d'entretien et de maintenance dans la centrale de Ain-Skhouna	62
IV.6.1. Répartition des tâches de maintenance	62
IV.6.2. Gestion des anomalies et réparations	62
IV.6.3. Le Nettoyage	63
IV.7. Analyse des données météorologiques du site d'Ain Skhouna	63
IV.7.1. Évolution de la production d'énergie solaire en kilowatts : une analyse quotidienne, hebdomadaire, et mensuelle	64
IV.8. Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67
Références Bibliographiques.....	70

Liste des figures

Figure I.1 : l'énergie Solaire photovoltaïque.	5
Figure I.2 : Irradiation globale journalière sur plan horizontal (a) en décembre (b) en juillet.	6
Figure I.3 : Irradiation globale journalière sur plan normale (a) en décembre (b) en juillet.	6
Figure I.4 : Cellules photovoltaïques	7
Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	8
Figure I.6 : Technologies des cellules PV les plus courantes.	10
Figure I.7 : Le passage d'une cellule à module à un panneau à un champ.	11
Figure I.8 : Caractéristiques d'une cellule photovoltaïques associant N_s cellules en séries et N_p cellules en parallèles.....	12
Figure I.9 : Association série- parallèle des modules photovoltaïques avec leurs protections... ..	13
Figure I.10 : Système PV autonome à entraînement direct.....	14
Figure I.11 : Système autonome avec batteries de stockages.	14
Figure I.12 : Chaîne de conversion d'un système PV connecté au réseau électrique.....	15
Figure I.13 : Différentes configurations des systèmes PV connecté au réseau : (a) configuration à onduleur centralisé, (b) configuration à onduleur strings, (c) configuration à onduleur multi strings, (d) configuration à onduleur intégré aux panneaux.	18
Figure II.1 : Modèle électrique d'une cellule PV.. ..	23
Figure II.2 :Caractéristiques du générateur PV sous différents éclairagements et différentes températures	26
Figure II.3 :Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	28
Figure II.4 : Circuit équivalent de convertisseur boost.....	30
Figure II.5 :État de commutation d'interrupteur K.....	30
Figure II.6 : Forme d'onde du courant I_s	31
Figure II.7 : P Symbole de convertisseur DC-AC monophasée triphasé.....	33
Figure II.8 :Onduleur triphasé à deux niveaux et son filtre.. ..	34

Figure III.1 :Principe de l'algorithme 'Perturbe and Observe'.....	42
Figure III.2 :Principe de l'algorithme 'conductance incrémentale'.. ..	43
Figure III.3 : Commande de tension orienté VOC pour l'onduleur PV.....	45
Figure III.4 : Principe de la commande MLI sinus-triangle.....	48
Figure III.5 :Fonction logique du signal de commande de la MLI.....	48
Figure III.6 :Les composants principaux d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).....	50
Figure III.7 : structure de PLL de repère de référence synchrone (dq PLL).....	51
Figure IV.1 :Centrale PV de 30 MW de Ain-Skhouna Saida.....	54
Figure IV.2 :Carte satellite de la centrale de Ain-Skhouna.	55
Figure IV.3 :Images illustrative de la boîte de jonction a) à l'extérieur, b) à l'interieur	57
Figure IV.4 : Image illustrative de l'onduleur PV de type Sunny Central 850CP XT installé dans la centrale de Ain-Skhouna.	59
Figure .IV5 :Image de l'armoire de communication des charges	60
Figure IV.6 :Station de surveillance météorologique d'Ain Skhouna	60
Figure IV.7 :Salle de contrôle de la centrale de Ain-Skhouna.....	61
Figure IV.8 :Machine mobile pour le nettoyage.	63
Figure IV.9 :Evolution de la puissance générée du champs PV Saida 1 durant un jour du mois de Juin.	64
Figure IV.10 :Evolution journalière de la puissance générée et le rendement du champ PV de la centrale de Ain-Skhouna durant la semaine du mois du Juin 2025	65
Figure 1.IV1 :Evolution journalière de la puissance générée et le rendement de la centrale PV de Ain-Skhouna durant le mois de Mai 2025.....	65

Liste des tableaux

Tableau.II.1 Paramètres électriques d'un module PV (CS6P-250P).....	25
Tableau.IV.1 Caractéristiques de panneau PV utilisé dans la centrale PV de Ain-Skhouna.....	56
Tableau.IV.2 Répartition des panneaux photovoltaïques dans la centrale d'Ain Sokhna.....	57
Tableau.IV.2. Caractéristiques des onduleurs de la centrale Ain Skhouna.....	58

Table des notations et symboles

I. Paramètres de modélisation de système photovoltaïque :

I_{pv}	Courant de sortie de cellule PV.
I_{ph}	Courant PV généré par les rayonnements solaires S.
I_{rsh}	Courant de la résistance shunt.
R_s	Résistance Série.
R_{sh}	Résistance shunt.
I_d	Courant de polarisation de la diode.
I_s	Courant de saturation.
Q	Charge élémentaire.
A	Facteur d'idéalité de la diode.
K	Constante de Boltzmann.
I_{sc-ref}	Courant de court-circuit.
T	Température ambiante de la cellule.
G	Irradiation solaire réelle.
T_{ref}	Température de référence des cellules aux conditions d'essai standard (STC).
G_{ref}	Irradiation de référence aux conditions d'essai standard (STC).
E_g	Énergie de gap.
n_c	Nombre de cellules en séries.
N_s	Nombre de Modules en séries.
N_p	Nombre de Modules en parallèles.

II. Paramètres de convertisseur boost (Hacheur survolteur):

V_e	Tension d'entrée de convertisseur.
V_s	Tension de sortie de convertisseur.
L	Inductance.
C_s	Capacité de sortie.
α	Rapport cyclique.
f	Fréquence de commutation du convertisseur.
ΔI	Ondulation du courant dans l'inductance.
ΔV_s	Ondulation de la tension de sortie.

III. Transformations :

(d, q)	Axes référentiels de Park.
----------	----------------------------

S	Opérateur de Laplace.
P	Opérateur de Park.

IV. Paramètres de l'onduleur PV et son filtre :

$V_a ; V_b ; V_c$	Tensions du réseau.
$V_{inv_a} ; V_{inv_b} ; V_{inv_c}$	Tensions de sortie de l'onduleur.
V_{dc}	Tension de bus continu.
$I_d ; I_q$	Les courants de sortie de l'onduleur dans l'axe directe et quadrature.
$V_{rd} ; V_{rd}$	Tensions du réseau dans l'axe directe et quadrature.
ω	Fréquence angulaire de réseau électrique.
I_M	Indice de modulation.
T_M	Taux de modulation.
$f_{réf}$	Fréquence de référence (modulante).
f_p	Fréquence de porteuse.

V. Nomenclature :

PV	Photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point Tracking (suivi de point de puissance maximale).
STC	Standard Test Conditions (Conditions d'essai standard).
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
VOC	Contrôle De Tension Orienté.
IGBT	InsulatedGateBipolar Transistor (Transistor Bipolaire à Grille Isolée).
GTO	Gate-Turn-Off Thyristors (Thyristors commandés à l'ouverture).
MOSFET	Metal-Oxyde-SemiconductorFiledEffect Transistor (Transistors à Effet de Champ).
PI	Proportionnel Intégrateur.
CA	Courant Alternatif.
CC	Courant Continu.
P	Puissance Active.
Q	Puissance Réactive.
PLL	Phase Locked Loop (Boucle à verrouillage de phase).
PCC	Point Commun de Connexion,
GD	Générateurs Décentralisés (ou Distribuée).
ZND	Zone De Non-Détection.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

VSI Voltage Source Inverter (onduleur de tension).

Introduction Générale

Contexte :

La transition énergétique constitue aujourd'hui un enjeu majeur à l'échelle mondiale, face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux impacts environnementaux de leur exploitation. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une réponse pertinente et durable pour réduire les émissions polluantes et limiter le dérèglement climatique. Parmi les différentes filières existantes – éolien, hydraulique, biomasse, géothermie – l'énergie solaire photovoltaïque (PV) se distingue par sa maturité technologique, son adaptabilité au secteur résidentiel et sa capacité à s'intégrer aussi bien dans des systèmes autonomes que dans des réseaux électriques interconnectés [1-3].

La libéralisation progressive du marché de l'électricité a par ailleurs favorisé l'émergence de nouveaux acteurs et accéléré le développement des productions décentralisées. Cette évolution transforme profondément la structure et le fonctionnement des réseaux de distribution, désormais confrontés à de nouveaux défis techniques liés à l'injection d'énergie issue de sources renouvelables Intermittentes[2].

L'énergie solaire photovoltaïque, en particulier, connaît un essor rapide ces dernières années. Il s'agit d'une ressource abondante, gratuite, silencieuse, non polluante et relativement simple à exploiter. Les installations PV se multiplient, allant des petites unités résidentielles raccordées au réseau basse tension (BT) jusqu'aux fermes solaires de grande puissance connectées au réseau moyenne tension (HTA). Toutefois, l'intégration massive de ces installations au réseau électrique pose plusieurs problématiques techniques : gestion bidirectionnelle des flux de puissance, stabilité de la tension, coordination des protections, qualité de l'énergie injectée, ou encore planification du réseau [3 ,4].

De plus, les caractéristiques du réseau de distribution – telles que la topologie, les charges, ou les perturbations locales – peuvent influencer le comportement et le rendement des systèmes photovoltaïques. Il devient donc essentiel de concevoir des systèmes de conditionnement d'énergie capables d'assurer un couplage efficace, stable et fiable entre les générateurs PV et le réseau électrique [3,5].

Objectif du mémoire :

L'objectif principal de ce mémoire s'inscrit dans le cadre des énergies renouvelables liées au domaine du génie électrique est d'étudier un système d'énergie solaire photovoltaïque relié au réseau électrique de distribution notamment une étude de performance de la centrale de production d'électricité à partir de l'énergie solaire PV de Ain- Skhouna de notre wilaya de Saida de capacité de 30 MW.

Structure du mémoire

Pour atteindre cet objectif, ce travail est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude générale des ressources solaires et le principe de fonctionnement de la conversion photovoltaïque. Il présente également les différentes technologies de modules PV et leurs caractéristiques.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation de la chaîne de conversion PV : module PV, les convertisseurs d'énergie, DC/DC et DC/AC. Une attention particulière est portée à leurs topologies, leurs principes de fonctionnement et leurs modèles mathématiques ainsi qu'aux stratégies de commande associées.
- Le troisième chapitre aborde le contrôle de système PV connecté dans le réseau électrique, où les différentes techniques de contrôle du système sera présentés. Tels que, le suivi du point de puissance maximale (MPPT), ainsi que le contrôle de l'onduleur PV

par la technique VOC, et la synchronisation de ce système avec le réseau par la méthode PLL.

- Dans le quatrième chapitre un exemple d'application d'un système PV connecté au réseau électrique sera présenté, il s'agit d'étudier la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna installée dans de notre wilaya connectée au réseau de distribution. Une Analyse des performances de cette centrale PV durant les mois de Mai et Juin de l'année 2025 sera aussi présenté. Cette analyse repose sur des indicateurs normalisés permettant d'évaluer le rendement et l'efficacité du système.

Une conclusion générale conclura notre mémoire.

Chapitre I : Généralités sur le système PV connecté au réseau électrique

I.1. Introduction

Le soleil constitue la principale source d'énergie de notre planète et alimente diverses ressources énergétiques renouvelables, qui se régénèrent naturellement et dont l'exploitation n'est pas limitée dans le temps [6]. L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales : l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique.

La première repose sur la conversion directe de la lumière du soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques, tandis que la seconde consiste à transformer le rayonnement solaire en chaleur à l'aide de collecteurs solaires thermiques. La technologie photovoltaïque (figure I.1) représente une solution propre et respectueuse de l'environnement, ne générant aucune émission de gaz polluants dans l'atmosphère, tout en contribuant à répondre à la demande énergétique mondiale croissante.



Figure.I.1. L'énergie solaire Photovoltaïque

I.2. Potentiel solaire en Algérie :

En termes de position géographique, l'Algérie bénéficie de l'un des plus grands potentiels solaires au monde. La plupart des régions du pays reçoivent plus de 2000 heures d'ensoleillement par année, avec des chiffres pouvant aller jusqu'à 3900 heures dans les régions des hauts plateaux et du Sahara. Chaque année, une surface horizontale de 1m^2 reçoit environ 3 kWh/m^2 dans le nord du pays, tandis qu'à Grand Sud, ce chiffre dépasse les $5,6\text{ kWh/m}^2$ Comme montre dans la figure 2 [8].

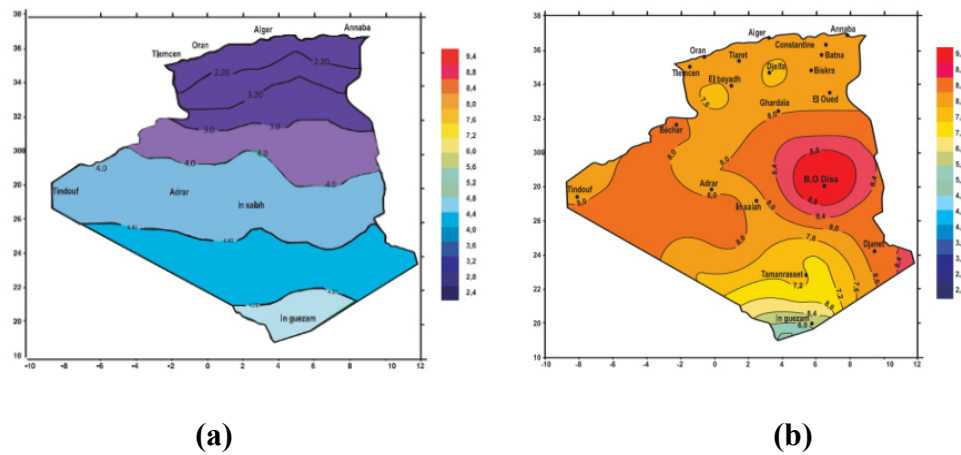


Figure.I.2. Ensoleillement globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Décembre (a) et Juillet (b).

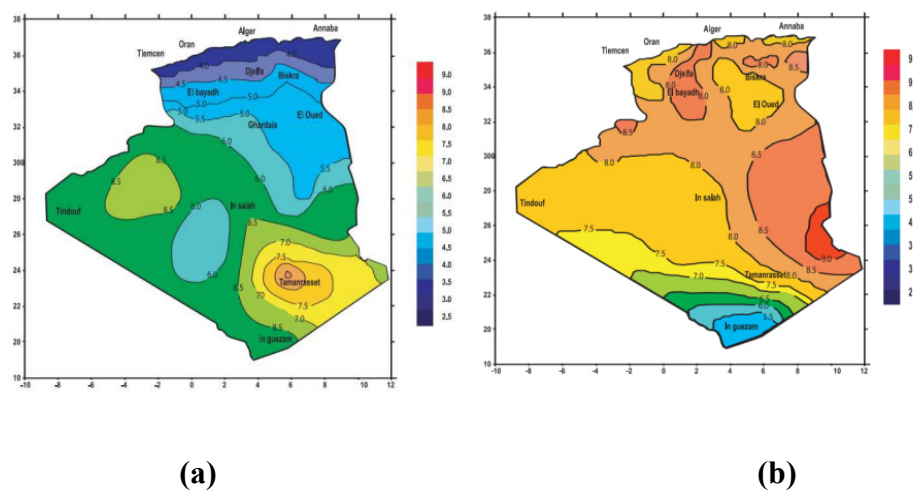


Figure.I.3. Irradiation globale journalière reçue sur plan normale au mois de Décembre (a) et Juillet (b).

I.3. Cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques transforment directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité sous forme de courante continue basse tension. Elles sont également appelées cellules solaires[9].

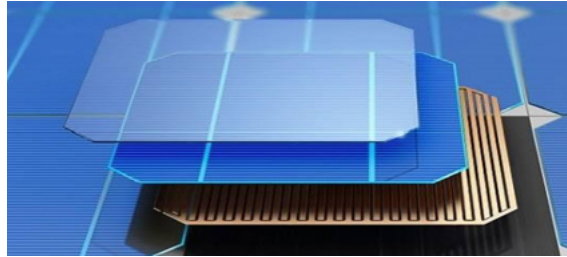


Figure.I.4. Cellule PV

I.3.1. Normalisation :

Les conditions standards de qualification des cellules photovoltaïques sont :

- Un spectre AM 1.5 ; Un éclairement de 1000W/m^2 ; Une température de 25°C .

Les constructeurs des panneaux solaires spécifient les performances de leurs matériels dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C : Standard Test Condition)

I.4. Effet photovoltaïque :

En 1839, le physicien français **Edmond Becquerel** fait la découverte de l'effet photovoltaïque[9]. Cet effet désigne la capacité de certains matériaux, principalement des semi-conducteurs à transformer directement la lumière solaire en électricité [10].

I.4.1. Construction d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque représente le composant de base essentiel dans un système PV. Elle est fabriquée à partir des matériaux semi-conducteurs qui permettent la conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité [11].

Une cellule solaire typique se compose d'une couche supérieure dopée N (comme le phosphore) et une couche inférieure dopée P (comme le bore) créant une jonction PN formée dans un matériau semi-conducteur similaire à une diode classique [6], la face supérieure de la cellule subit un traitement spécifique pour maximiser la quantité de lumière captée. Ce traitement de surface inclut l'application d'une couche anti-réflexion.

De plus, une couche de verre est ajoutée pour assurer l'étanchéité et la protection de la cellule. Enfin, les deux faces, supérieure et inférieure, sont équipées d'électrodes chargées de collecter les électrons et établir un circuit électrique [12],[13].

I.5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque repose sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque la figure I.5 représente le fonctionnement d'une cellule PV.

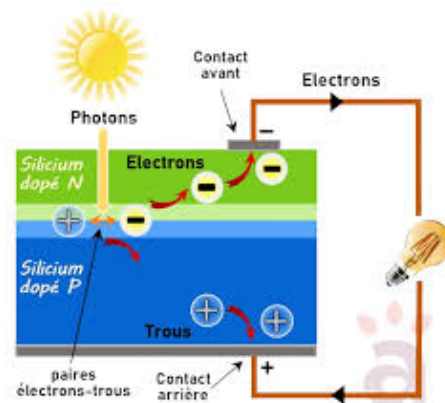


Figure.I.5. Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

Lorsque les photons de lumière heurtent la surface de ce matériau la jonction PN établit une barrière de potentiel, ils transfèrent leur énergie aux atomes du matériau. Ce transfert d'énergie libère des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons, les deux couches de la cellule photovoltaïque présentent une différence de potentiel.

Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV. Donc on peut résumer le principe de conversion photovoltaïque en quatre étapes [11] :

- Absorption de la lumière et création de paire électron/trou.
- Séparation des paires électron/trous sous l'effet d'un champ induit.
- Transport de charge vers les électrodes.
- Collection des charges [10].

I.5.1.1. Technologie des cellules photovoltaïques :

Actuellement, plus de 90 % des cellules solaires produites sont composées de silicium cristallin (un semi-conducteur) [12]. De plus Il existe plusieurs technologies de cellules solaires offre une efficacité différente et a un coût différent en fonction des matériaux utilisés on trouve [6] :

- ✓ La cellule au silicium monocristallin (**figure.I.6. a**), C'est le matériau de cellule le plus largement disponible. Son efficacité est limitée en raison de plusieurs facteurs. L'efficacité la plus élevée de la cellule solaire en silicium est d'environ 23 %, tandis que d'autres matériaux semi-conducteurs peuvent atteindre jusqu'à 30 %, ce qui dépend de la longueur d'onde et du matériau semi-conducteur. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.
- ✓ La cellule au silicium polycristallin(**figure.I.6. b**). Dans ce cas, le silicium fondu est coulé en lingots. Ensuite, il forme plusieurs cristaux d'aspect bleuté, mais pas uniforme Ces cellules ont une efficacité de conversion légèrement inférieure par rapport

aux cellules monocristallines. Les modules en silicium monocristallin et polycristallin sont très fiables pour les applications de puissance en extérieur[13].

- ✓ La cellule au silicium amorphe (**figure.I.6. c**) est constituée d'un silicium ayant une structure atomique désordonnée, non-cristallisé. Ce matériau absorbe la lumière beaucoup plus qu'un silicium cristallin. Il fait partie de la technologie « couche mince », sont gris foncé.

De façon plus marginale, certaines cellules sont composées d'un autre matériau semi-conducteur comme le tellure de cadmium (Cd Te) ou le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et l'arséniure de gallium (GaAs). Qui ont l'avantage d'absorber fortement la lumière, mais leur manipulation est difficile, et certains matériaux comme le cadmium pose des problèmes de toxicité [6, 13, 14].



Figure.I.6. Technologies des cellules PV les plus courantes.

I.6. Association des cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est capable de générer environ 1 à 2 W de puissance sous approximativement une tension de 0.3 V à 0.6 V, selon le type de matériau semi-

conducteur utilisé. Pour une production de puissance plus élevée, les cellules photovoltaïques peuvent être connectées ensemble pour former des modules de puissance supérieure [16].

Un panneau est composé d'un ou de plusieurs modules regroupés sur une structure de support commune, formant un champ ou un système photovoltaïque comme montre la **figure I.7**.

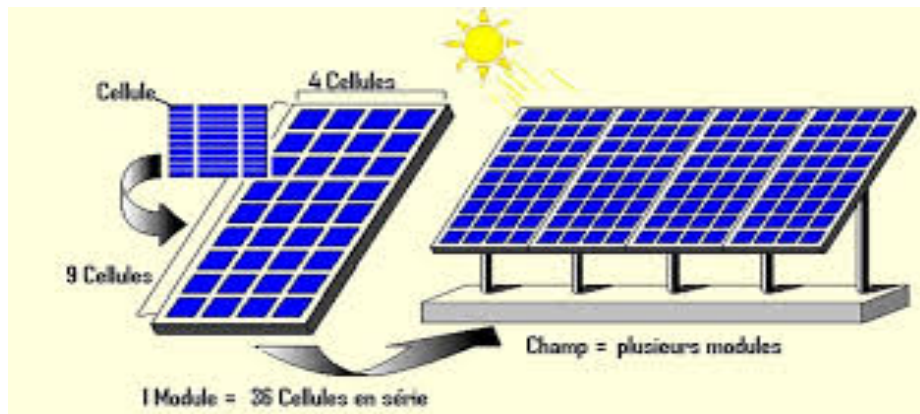


Figure.I.7. Le passage d'une cellule à module à un panneau à un champ.

En ajoutant N_S des cellules identiques en série, le courant reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules en série.

En ajoutant N_P des cellules identiques en parallèle, la tension reste la même mais le courant augmente proportionnellement au nombre des cellules en parallèle. Donc nous obtenons les caractéristiques présentées dans la **figure I.8**, Ces caractéristiques sont déterminées pour des cellules identiques qui reçoivent la même irradiation [6, 16].

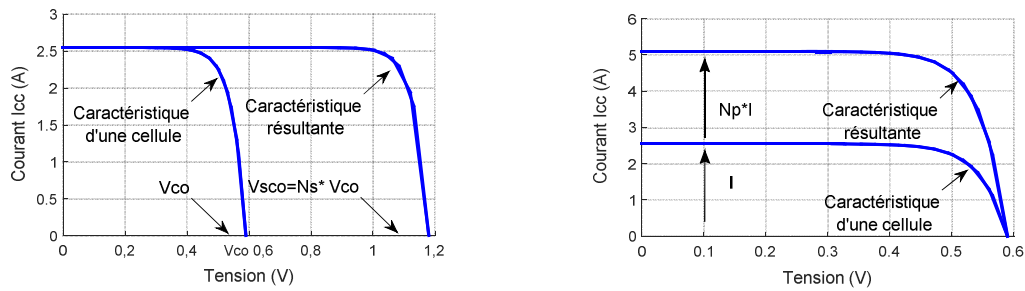


Figure.I.8. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïques associant N_s cellules en série et N_p cellules en parallèles.

I.7. Protection des modules photovoltaïques :

Pour garantir une durée de vie optimale d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur plusieurs années, il est crucial d'intégrer des dispositifs de protection aux modules. Ces dispositifs permettent d'éviter les défaillances pouvant résulter de l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Actuellement, deux types de protections classiques sont couramment utilisés dans les installations photovoltaïques, comme illustré dans la **figure I.9** :

➤ Diode anti-retour :

Cette diode empêche le passage du courant inverse dans le générateur photovoltaïque (GPV) (figure I.8). Ce problème peut se produire lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou lorsqu'une charge en connexion directe, comme une batterie ou un moteur, passe du mode récepteur au mode générateur.

➤ Diodes by-pass :

Les cellules d'un module sont organisées en plusieurs ensembles, chacun étant connecté en antiparallèle à une diode, appelée diode de by-pass ou diode de dérivation (figure I.10). Cette diode a pour rôle de protéger les cellules contre un fonctionnement en régime inverse[2].

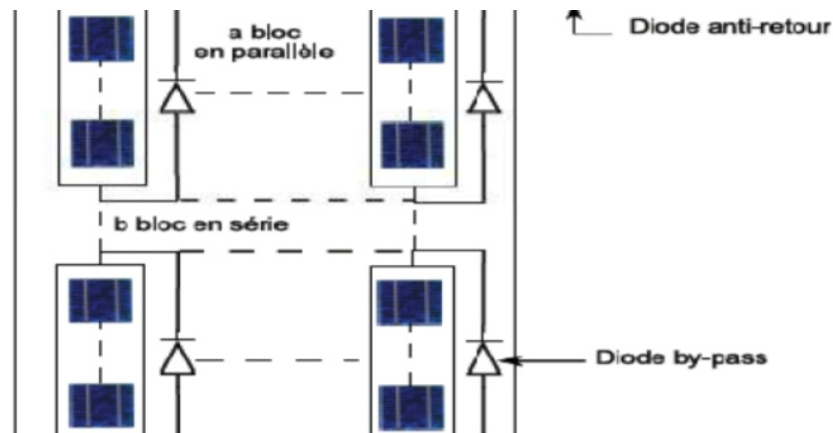


Figure.I.9. Association série- parallèle des modules photovoltaïques avec leurs protections.

I.8. Type des systèmes photovoltaïques :

Les systèmes solaires photovoltaïques sont généralement classés en fonction de leurs besoins fonctionnels et opérationnels, ainsi que de leurs configurations de composants. On peut les classer en systèmes autonomes et en systèmes connectés au réseau électrique [16].

I.8.1. Systèmes photovoltaïques autonomes :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont conçus pour fonctionner indépendamment du réseau électrique et sont généralement dimensionnés pour alimenter certains équipements électriques en courant continu (CC) et/ou alternatif (CA). Il existe deux types de systèmes photovoltaïques autonomes [6] :

I.8.1.1. SystèmePV autonome à entraînement direct :

C'est le type le plus simple de système photovoltaïque autonome est un système à couplage direct, où la sortie en courant continu d'un module photovoltaïque est directement connectée à une charge en courant continu le comme montre la **figure I.10**.



Figure.I.10. Système PV autonome à entraînement direct.

I.8.1.2. Système PV autonome avec batterie de stockage alimentant des charges à CC et CA :

Dans ce système, l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques peut être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure, notamment la nuit, lors des périodes d'ombrage ou en cas d'insuffisance de l'énergie solaire. De plus, grâce à l'utilisation d'un onduleur, ce système permet également d'alimenter des charges en courant alternatif, comme illustré à la **figure I.11** [15].

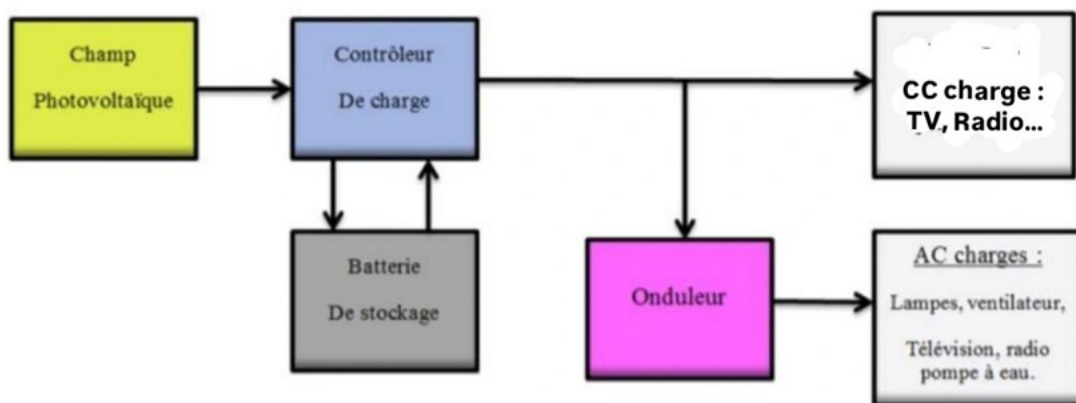


Figure.I.11. Système autonome avec batteries de stockages

Divers types de batteries peuvent être utilisés avec ce type de système photovoltaïque, notamment les batteries au plomb-acide, au nickel-cadmium, au lithium-bromure de zinc, au chlorure de zinc, au sodium-soufre, au nickel-hydrogène, ainsi que les batteries redox et au Kivanadium [6].

I.8.2. Systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont conçus pour fonctionner en parallèle avec celui-ci. En plus d'injecter de la puissance active, ils peuvent également fournir de l'énergie réactive et contribuer au maintien de la tension du réseau. Par ailleurs, ces systèmes ne nécessitent pas de batteries de stockage, puisque le réseau électrique joue lui-même le rôle de réserve d'énergie [14].

I.9. Chaîne de conversion du système photovoltaïque connecté au réseau :

Une vue d'ensemble sur les composants d'un système PV connecté au réseau électrique, la **figure I.12** donne un aperçu :

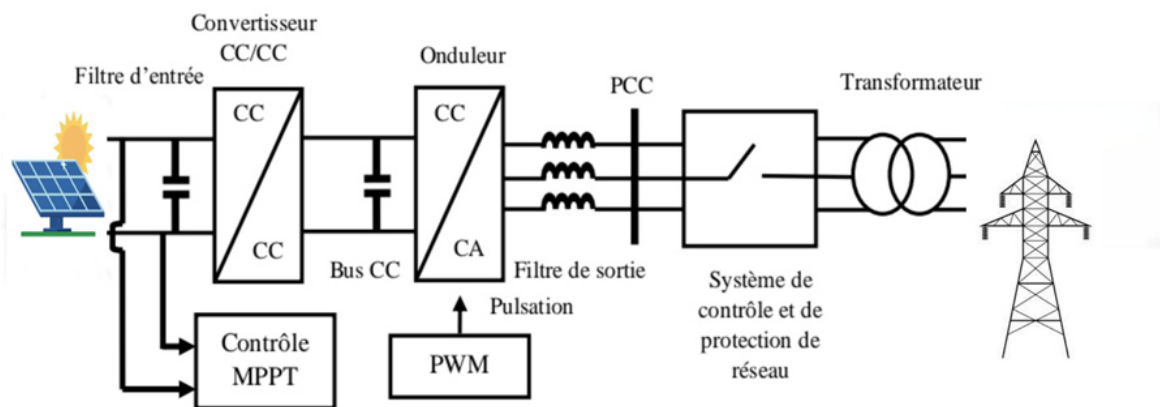


Figure.I.12. Chaîne de conversion d'un système PV connecté au réseau électrique.

Bien que le noyau d'un système PV soit la cellule PV également appelé un générateur PV, les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance jouent un rôle essentiel en tant que technologie permettant un contrôle et une interface efficaces du système PV pour transférer la puissance générée au réseau électrique et assurer une utilisation optimale de notre système [17, 18].

Un générateur PV qui est en général un champ PV. Un filtre d'entrée passif généralement un condensateur utilisé pour découpler la tension et le courant entre le champ PV et de l'entrée du convertisseur CC-CC en réduisant l'ondulation de courant et de tension de champ PV. Dans certaines topologies des systèmes photovoltaïques, si l'hacheur n'utilise pas le filtre d'entrée passif est utilisé comme un bus continu. On peut suivre le filtre d'entrée avec un convertisseur CC-CC de type élévateur de tension (boost), qui est généralement utilisé pour augmenter la tension de sortie du panneau PV et effectuer le MPPT[10]. Le bus continu CC est utilisé pour connecter l'hacheur à l'onduleur photovoltaïque, comme le montre la **figure I.12**.

En règle générale, Les onduleurs photovoltaïques transforment l'énergie continue des panneaux solaires en énergie alternative qui est adaptée aux tensions et aux fréquences du réseau électrique. De plus, ils permettent un contrôle efficace du système photovoltaïque. La connexion de l'onduleur-PV au réseau électrique se fait par l'intermédiaire d'un filtre de sortie habituellement composé d'une combinaison d'inductances (L) et de condensateurs ©, généralement en configurations L, LC ou LCL. Ce filtre contribue à réduire les harmoniques générées par l'onduleur[10].

Ensuite il existe différentes structures et topologies d'onduleurs PV pour connecter les panneaux PV au réseau électrique, nous citons après cette partie. Et on utilise également un transformateur à basse fréquence afin d'augmenter la tension de sortie de l'onduleur [16].

I.10. Différentes configurations des systèmes solaires PV connectés au réseau électrique :

Il existe quatre configurations des onduleurs pour connecter le système PV au réseau électrique, généralement classées en fonction de la structure et du nombre d'étages d'adaptation de puissance utilisés, on trouve :

- Configuration à onduleur centralisée pour les grandes installations photovoltaïques (triphasées) est la plus utilisée.
- Configuration à onduleur string pour les petites installations photovoltaïques.
- Configuration à onduleur multi string pour les systèmes de petite à grande taille (monophasée et triphasée).
- Configuration à onduleur intégré aux panneaux pour les petits systèmes (généralement monophasé)[17].

I.10.1. Configuration à onduleur centralisé :

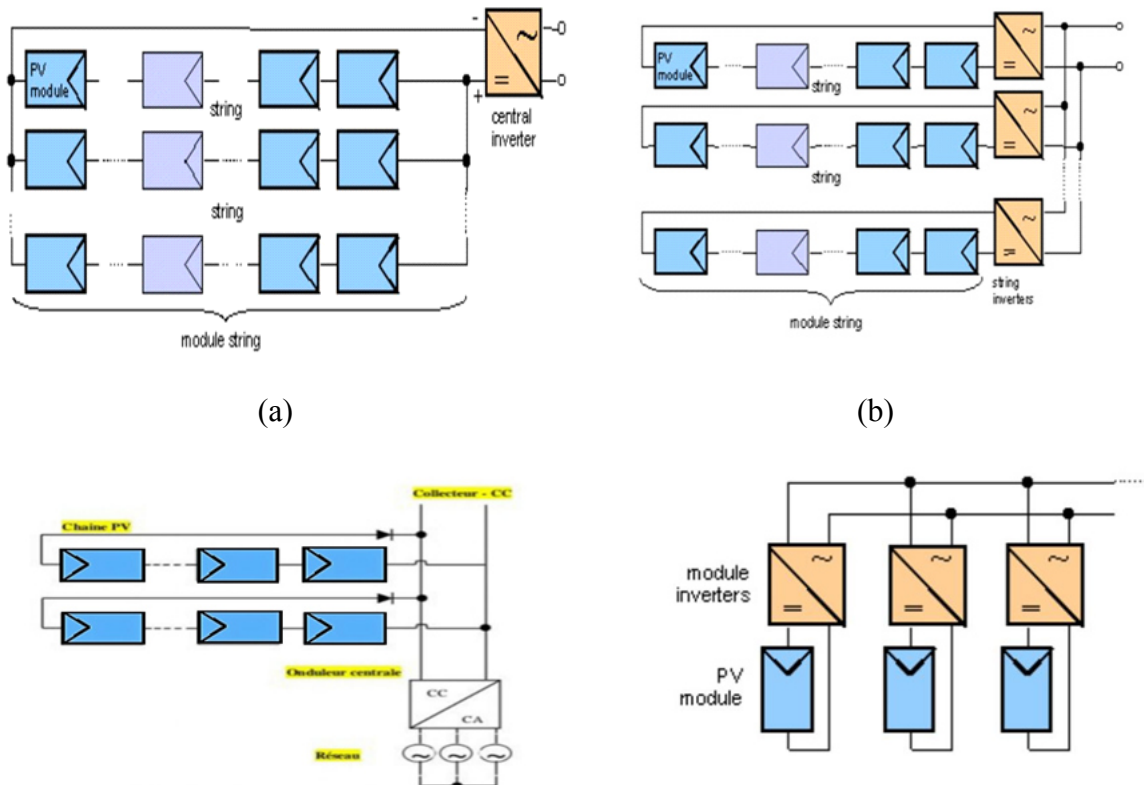
La topologie centralisée (**Figure I.13.a**) a comme caractéristique principale l'utilisation d'un seul convertisseur DC/DC et d'un onduleur DC/AC triphasé de grande capacité typiquement entre (100 kW à 1,5 MW) pour connecter l'ensemble de la centrale photovoltaïque au réseau électrique. Le système photovoltaïque est formé par la connexion de plusieurs branches parallèles et chaque branche est composée de nombreux modules en série, ce qui est appelé « configuration centralisée » [18]. Les avantages de cette configuration résident dans sa structure simple, son transformateur de basse fréquence unique et son système de contrôle unique.

Cependant, en raison d'un seul algorithme MPPT pour l'ensemble du système photovoltaïque, vient au détriment de la production de puissance réduite en cas des ombrages,

des salissures, au vieillissement. En outre, les diodes de blocage en série de la chaîne introduisent des pertes de conduction. Actuellement, la configuration centralisée est la topologie la plus largement utilisée pour les centrales photovoltaïques à grande échelle [17, 18].

I.10.2. Configuration à onduleur strings :

La configuration en chaîne (**Figure I.13.b**) repose sur l'utilisation d'un onduleur par string photovoltaïque, éliminant ainsi le besoin d'une diode de blocage en série. Grâce à une tension d'entrée suffisamment élevée, l'ajout d'un convertisseur CC-CC devient inutile. Par ailleurs, dans une centrale photovoltaïque dotée de plusieurs onduleurs de chaîne au lieu d'un unique onduleur central, la présence de multiples points de suivi de puissance maximale (MPPT) permet d'optimiser le rendement énergétique global par rapport à une configuration centralisée.



(c)

(d)

Figure.I.13. Différentes configurations des systèmes PV connecté au réseau : **(a)** configuration à onduleur centralisé, **(b)** configuration à onduleur strings, **(c)** configuration à onduleur multi strings, **(d)** configuration à onduleur intégré aux panneaux.

De plus, l'utilisation de la configuration string permet également d'accroître la modularité du système PV. Malgré toutes ces caractéristiques bénéfiques, cette configuration nécessite l'utilisation de plusieurs éléments par rapport à la précédente (onduleur central), tels que des transformateurs à basse et à haute fréquence si une isolation est requise, ainsi que la nécessité de plusieurs systèmes de commande individuelle de réseau, ce qui entraîne une augmentation du coût total de l'installation. Ainsi, on utilise fréquemment la topologie string comme solution pour les systèmes PV monophasés et triphasés de petite échelle [15-17].

I.10.3. Configuration à onduleur multi-strings

La configuration à onduleur multi-strings (**Figure I.13.c**) combine les avantages des systèmes centralisés et en chaîne. Dans cette architecture, chaque string est équipé de son propre convertisseur CC-CC et est relié à un onduleur central via un bus continu commun. Grâce à l'étage d'adaptation CC-CC, chaque string peut fonctionner à son propre Point de Puissance Maximale (PPM), optimisant ainsi la performance globale du système. Ce concept confère aux générateurs photovoltaïques (GPV) une plus grande modularité par rapport aux configurations précédentes.

Dans cette configuration, ce qui permet de repérer et de localiser rapidement la défaillance d'un GPV. En outre, la défaillance d'un seul module PV ne perturbera pas le bon fonctionnement de l'ensemble du champ PV, ce qui améliorera l'efficacité et le rendement énergétique global de l'installation. Néanmoins, cette configuration entraîne des pertes si-

gnificatives de câbles à courant continu indispensables pour connecter les petites parties du système photovoltaïque et les convertisseurs CC-CC à l'onduleur principal. De plus, la détection de la PPM se complique lorsque la caractéristique P-V d'un string présente plusieurs pics.

La configuration multi-strings est plus couramment utilisée dans les systèmes photovoltaïques de petite et moyenne puissance [15-17].

I.10.4. Configuration à onduleur intégré aux panneaux

Le micro-onduleur, ou onduleur intégré aux panneaux (Figure I.13.d), associe un système photovoltaïque et un onduleur en un seul dispositif. Chaque module PV dispose de son propre onduleur, synchronisé avec le réseau électrique, offrant une détection optimale du point de puissance maximale (MPPT) et améliorant l'efficacité et le rendement énergétique. Cette configuration évite également les pertes dues aux différences de puissance entre les modules, quel que soit le défaut. Cependant, la connexion au réseau nécessite une élévation de tension, impliquant souvent un convertisseur CC-CC élévateur et un transformateur d'isolation. La répartition des composants électroniques de puissance entre les modules réduit l'efficacité du convertisseur et augmente les coûts globaux de l'installation [16, 17].

I.11. Conclusion

Ce chapitre a offert une vue d'ensemble du système photovoltaïque, en débutant par une introduction générale et une analyse du potentiel solaire en Algérie. Le principe de fonctionnement du système photovoltaïque y a été expliqué, ainsi que les différents types de systèmes PV et leurs configurations.

Par ailleurs, les diverses configurations des onduleurs photovoltaïques, permettant de connecter ces systèmes aux réseaux électriques, ont été abordées. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi une configuration multi string adopté dans la centrale de Ain-Skhouna. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque intégrée au réseau électrique.

Chapitre II : Modélisation du système PV connecté au réseau électrique.

II.1. Introduction

La modélisation est essentielle pour analyser en profondeur le comportement global d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique. Ce chapitre est consacré à la présentation des modèles mathématiques des différents composants de la chaîne de conversion photovoltaïque de la topologie centralisée. Nous y explorerons les modèles du générateur photovoltaïque, du convertisseur CC-CC, avec un accent particulier sur le convertisseur survolteur utilisé dans cette étude, ainsi que de l'onduleur photovoltaïque triphasé et de son filtre, tout en prenant en compte les éléments clés des installations photovoltaïques connectées au réseau électrique [18].

II.2. Modélisation du générateur PV

La modélisation du générateur photovoltaïque a pour objectif de déterminer les caractéristiques électriques courant/tension (I-V) et puissance/tension (P-V) fournies au bus continu, en fonction des conditions environnementales, telles que l'irradiation solaire et la température. Cette approche permet de mieux comprendre les phénomènes physiques influençant le comportement des cellules photovoltaïques [19]. De nombreux modèles existent dans la littérature pour décrire le fonctionnement et les caractéristiques du générateur photovoltaïque [6].

Le modèle étudié dans cette section est le modèle d'une diode (**figure.II.1**) il se compose d'une seule diode et deux résistances (série et shunt), Ce modèle est le plus simple et le plus classique qui donne une bonne précision [17].

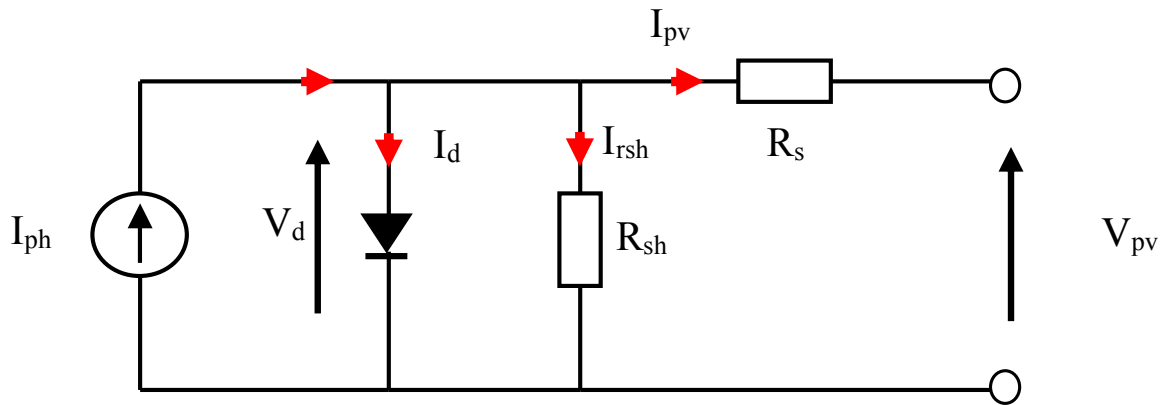


Figure.II.1. Modèle électrique d'une cellule PV.

La cellule PV peut être modélisée électriquement par un circuit équivalent tel que celui présenté dans la figure II.1, avec une source de courant photovoltaïque I_{ph} en parallèle avec une diode D caractérisant la jonction P-N, une résistance R_s en série représentant les pertes par l'effet joule, et une deuxième résistance de dérivation R_{sh} caractérisant un courant de fuite entre la grille et le contact arrière, elle est très supérieure à R_s [20].

L'équation caractéristique I_{pv} en fonction V_{pv} de ce modèle et déduite de manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{II.1})$$

Le courant de polarisation de la diode I_d est donné par l'expression suivante :

$$(\text{II.2})$$

Le courant de résistance shunt I_{rsh} est donné par l'expression suivante :

$$I_{rsh} = \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

On développe les termes I_d et I_{rsh} :

$$(\text{II.4})$$

Le photo-courant I_{ph} Courant PV généré par les rayonnements solaires Gen Ampère qui est en fonction de l'irradiation solaire et la température est exprimé par :

$$I_{ph} = [I_{sc-ref} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (II.5)$$

Avec : A le facteur d'idéalité de la diode, q la charge élémentaire de l'électron ($1.602 \times 10^{-19}C$), K constant de BOTZMAN ($1.381 \times \frac{10^{-23}J}{K}$), T la température ambiante de la cellule ($^{\circ}K$), V_{pv} la tension à travers la cellule photovoltaïque l'irradiation solaire (W/m^2), I_{sc-ref} . Le courant de court-circuit tandis que la température et l'irradiation de référence est dans les conditions d'essai standard (STC) ($25^{\circ}C$, $1000 W/m^2$), K_i Le coefficient de température du courant de court-circuit (A/K).

Le courant de saturation de la diode I_s , qui change avec la température de la cellule, est donnée par :

$$I_s = I_{rr} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{KA} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (II.6)$$

Avec I_{rr} le courant inverse de saturation dans les conditions standards, E_g l'énergie de gap, qui dépend de matériaux semi-conducteurs.

Pour obtenir une tension et un courant plus élevés adaptés aux applications nécessitant une puissance plus importante, plusieurs modules photovoltaïques doivent être connectés pour former un champ photovoltaïque (GPV). Qui contient N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle, le courant de sortie de l'ensemble, I_{pv} sera [20-22] :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(\exp \left[\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{N_s A K T} \right] - 1 \right) - \frac{N_p V_{pv}}{N_s (R_{sh} + R_s)} \quad (II.7)$$

II.3. Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque (I-V) (P-V)

Les caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque sont généralement représentées par les courbes I-V (courant/tension) et P-V (puissance/tension), qui varient en fonction des conditions de température et d'irradiation solaire[6].

Nous avons choisi d'étudier le panneau solaire de type **CS6P-250P** (Silicium polycristallin) installé dans la centrale PV de **Ain-Skhouna**. Les paramètres électriques du module sont présentés dans le **tableau.II.1** suivant :

Tableau.II.1 Paramètres électriques d'un module PV (**CS6P-250P**) [22, 23].

Type de module PV	CS6P-250P
Données électriques	
Puissance maximale (P_{max})	250 W
Tension pour puissance maximale (V_{mp})	30.1 V
Courant pour puissance maximale (I_{mp})	8.30 A
Tension à l'ouverture (V_{oc})	37.2 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	8.87 A
Coefficient de température de V_{oc}	-0.34%/°C
Coefficient de température de (I_{sc})	0.065 %/°C
Coefficient de température de (P_{max})	-0.43 %/°C
NOCT	47 °C
Réduction du rendement de 1000 W/m ² à 200 W/m ²	+ 96.5 %
Dimensions	
Longueur	1.638 m
Largeur	0.982 m
Poids	18.5 kg
Cellules	
Nombre par module	60
Technologie de cellule	poly-cristalline
Taille de cellule (carré)	(0.163*0.163) m ²
Rendement de cellule	15.54 %
Liaison des cellules	3 busbars

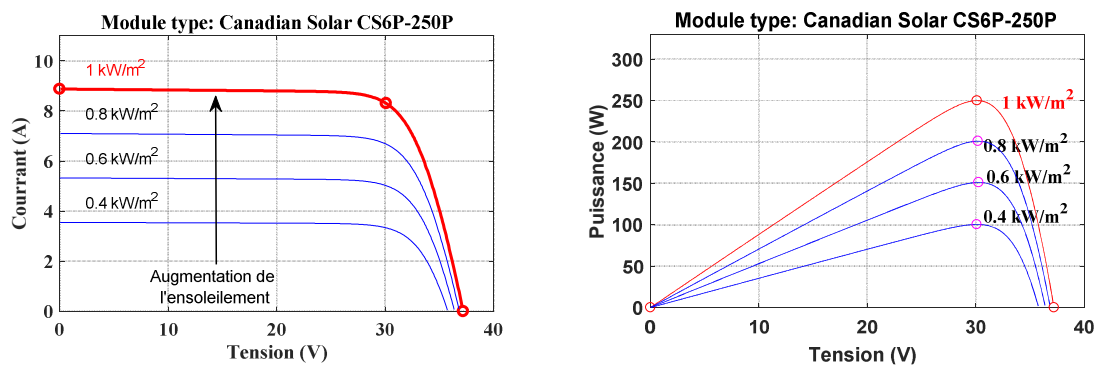
Les caractéristiques électriques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un GPV sont représentées dans la **figure II.2**.

A) Effet d'irradiation

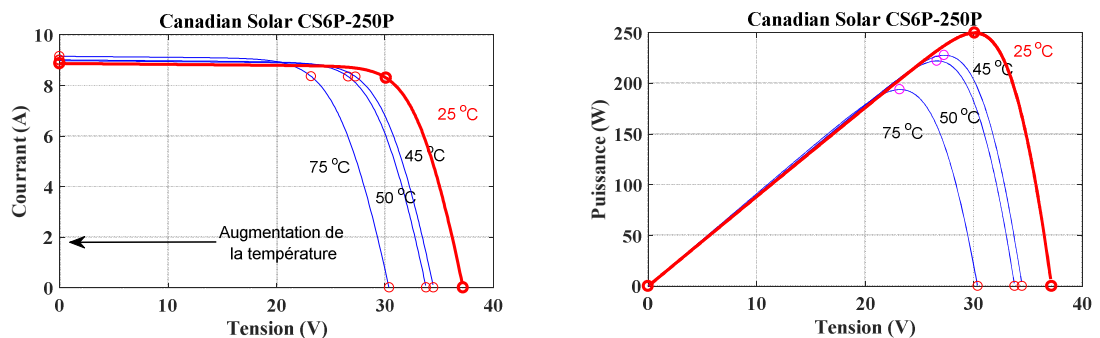
La **figure II.2.a** présente les caractéristiques courant-tension I_{pv} - V_{pv} et puissance-tension P_{pv} - V_{pv} pour différents niveaux de rayonnement, et pour une température constante de 25 °C en conditions standards. Nous notons que le courant de court-circuit I_{sc} connaît une augmentation plus que la tension de circuit ouvert V_{oc} qui augmente légèrement.

La puissance électrique maximale P_{MPP} (représentée par la courbe P-V) augmente également avec l'augmentation de l'ensoleillement, c'est-à-dire que l'efficacité est meilleure pour un ensoleillement élevé.

Les conditions de référence sont généralement choisies avec une irradiancie de 1000 W/m². En pratique, l'irradiance sur les cellules photovoltaïques sans concentration de lumière est inférieure, et donc l'efficacité est plus basse que sa valeur nominale[20].



(a) Caractéristique électrique I-V P-V pour différents niveaux d'ensoleillement



(b) Caractéristique électrique I-V P-V pour différents niveaux de températures

Figure.II.2. Caractéristiques du générateur PV sous différents éclairagements et différentes températures

B) Influence de la température

Lorsque la température augmente, avec une irradiation constante dans les conditions standards de 1000W/m^2 , le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement en raison d'une meilleure absorption de la lumière, mais la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue fortement avec l'augmentation de la température ambiante. La puissance électrique maximale P_{MPP} diminue rapidement et présente une caractéristique non linéaire avec l'accroissement de la température. Comme montre la **figure II.2.b**.

Les conditions standards sont généralement choisies pour une valeur de température interne T égale à 25°C . Sous l'ensoleillement, la température interne est souvent plus élevée et donc l'efficacité est plus basse[6].

On peut dire que, les caractéristiques électriques d'un module PV ou d'une cellule PV sont non linéaires et dépendent fortement de l'irradiation solaire et de la température.

II.4. Modélisation de la partie d'électronique de puissance :

La modélisation de la partie d'électronique de puissance consiste à représenter mathématiquement et/ou via des schémas de simulation le comportement d'un circuit d'électronique de puissance, souvent dans le but de concevoir, analyser ou contrôler des systèmes de conversion d'énergie (DC/DC, DC/AC, AC/DC, etc.) Cette discipline permet de traiter l'énergie électrique de manière statique, offrant ainsi plusieurs avantages :

- Une utilisation plus flexible et optimisée de l'énergie électrique.
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie.
- Une réduction de la taille et du poids des dispositifs, accompagnée d'un fonctionnement quasi silencieux grâce à l'utilisation de technologies à haute fréquence.

II.5. Convertisseurs électroniques de puissance utilisés :

Les convertisseurs sont des dispositifs permettant de transformer la tension électrique afin de l'adapter à des récepteurs nécessitant une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude des convertisseurs est particulièrement pertinente, car ils sont utilisés dans la plupart des nouvelles sources d'énergie distribuée connectées au réseau, telles que les éoliennes, les panneaux photovoltaïques ou les piles à combustible.

Les panneaux photovoltaïques produisent une tension continue, pour l'adapter à nos besoins, deux types de convertisseurs sont utilisés : les hacheurs DC-DC, qui ajustent la tension continue, et les onduleurs DC-AC, qui transforment la tension continue en tension alternative [21].

II.5.1. Les Hacheurs :

Un hacheur permet de contrôler le transfert d'énergie d'une source continue vers une charge tout en assurant un rendement élevé. Selon sa configuration, il peut abaisser ou élever la tension et, dans certaines situations, restituer de l'énergie à la source d'alimentation. Il est couramment utilisé dans les systèmes d'alimentation et pour le contrôle des moteurs [24], la figure.II.3 illustre le symbole d'un convertisseur DC-DC.

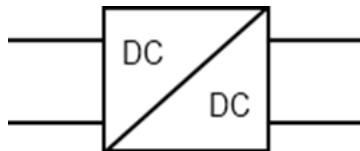


Figure.II.3. Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.5.1.1. Type des hacheurs :

Dans cette section, nous abordons les convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela signifie que le transfert d'énergie à l'intérieur du convertisseur ne peut se faire que dans un seul sens. Ce concept inclut également [25] :

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

Cela nous conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples. Dans ce contexte, on distingue trois types de convertisseurs statiques (ou hacheurs) [25] :

- ✓ Hacheur abaisseur (ou buck),
- ✓ Hacheur élévateur (ou boost),
- ✓ Hacheur abaisseur-élévateur (ou buck-boost).

II.5.2. Hacheur élévateur de tension (boost):

L'hacheur boost est un convertisseur DC-DC direct. Il utilise une source d'entrée en courant continu, composée d'une inductance en série avec une source de tension, et fournit une sortie sous forme de tension continue, avec un condensateur en parallèle avec une charge résistive. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor, car le courant est toujours positif, et les commutations nécessitent un contrôle (à la fois pour l'arrêt et le démarrage) [26].

La **figure II.4** présente le schéma équivalent du convertisseur élévateur CC-CC. Ce dispositif est constitué d'une source de tension d'entrée continue symbolisée par V_e , qui correspond à la tension de sortie du module PV. Un filtre d'entrée passif, généralement désigné par C_e , est souvent utilisé pour réduire les ondulations de courant et de tension du module PV.

En outre, il comprend une inductance en série avec la source de tension V_e , un commutateur électronique de type transistor K , contrôlé à l'amorçage et le blocage (MOSFETS ou IGBT), une diode (l'amorçage et le blocage spontanés) et un condensateur de sortie C_s connecté en parallèle. Ce dernier est placé entre le module photovoltaïque et le circuit d'élévation pour diminuer les harmoniques à haute fréquence[18].

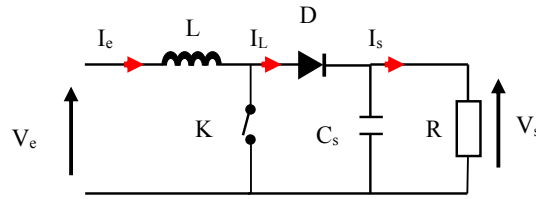


Figure.II.4. Circuit équivalent de convertisseur boost

Ce convertisseur est une alimentation à découpage contrôlée par un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI) ayant une période de découpage fixe T_d et un rapport cyclique variable α . Pendant chaque période, l'interrupteur K est fermé de l'instant 0 à αT_d , puis ouvert de αT_d à T_d [27]. Donc l'état de commutation de l'interrupteur K détermine le mode de fonctionnement du convertisseur élévateur :

A) K est fermé (figure II.5.A) :



Figure.II.5. État de commutation d'interrupteur K .

Durant l'intervalle $[0, \alpha T]$ l'interrupteur K est fermé tandis que D ouvert, le courant à travers l'inductance augmente de manière linéaire, et la tension à travers l'interrupteur K est maintenue à zéro $V_k = 0$, et le circuit équivalent présenté dans, donc on obtient :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (II.8)$$

$$i_L = i_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad (II.9)$$

i_{min} :la valeur minimale de courant dans l'inductance.

A l'instant $t=\alpha T$, le courant dans l'inductance atteint son pic i_{max} suivant la formule suivante :

$$i_{max} = i_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T d \quad (II.10)$$

B) K est ouverte (figure II.5.b) :

Dans l'intervalle $[\alpha T, T]$, l'interrupteur K s'ouvre permettant de l'énergie stockée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D .

On a alors $V_K = V_S$ en notant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle $V_L=0$, on arrive :

$$V_s = V_e + L \frac{di_L}{dt} \quad (II.11)$$

$$V_s - V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (II.12)$$

$$i_L = i_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T d) \quad (II.13)$$

Au moment où $t = Td$, le courant dans l'inductance rétablit à sa valeur minimale i_{min} :

$$i_{min} = i_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T d \quad (II.14)$$

$$\Delta_i = i_{max} - i_{min} \quad (II.15)$$

Δ_i :Les ondulations du courant dans l'inductance,La figure II.6, montre la forme d'onde du courant I_s .

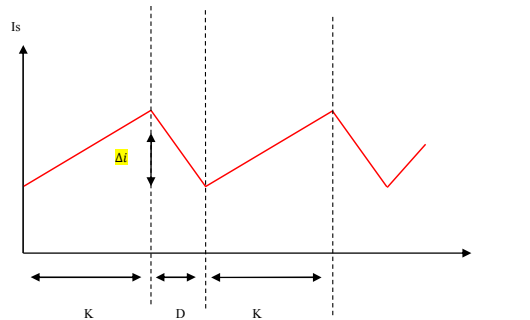


Figure.II.6. Forme d'onde du courant I_s .

La valeur moyenne de la tension de sortie V_s est calculée en utilisant l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.14) et (II.10) on obtient :

$$V_s = \frac{V_e}{(1 - \alpha)} \quad (\text{II.16})$$

Avec V_e la tension d'entrée d'hacheur, V_s tension sortie d'hacheur et α le rapport cyclique qu'est compris entre $0 < \alpha < 1$

Donc il est possible de réguler la tension de sortie V_s du convertisseur en modifiant sa tension d'entrée V_e ou son rapport cyclique α [25].

Alors on peut déterminer les équations électriques du convertisseur par les relations suivantes :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_e - (1 - \alpha) \cdot V_s \quad (\text{II.17})$$

$$C \cdot \frac{dV_s}{dt} = (1 - \alpha) \cdot I_L \frac{V_s}{R} \quad (\text{II.18})$$

II.5.2.1. Détermination des paramètres de convertisseur élévateur

- **Le rapport cyclique α :**

On peut déduire le rapport cyclique α à partir de l'équation (II-16)

$$\alpha = 1 - \frac{V_e}{V_s} \quad (\text{II.19})$$

- **L'inductance :**

$$L = \frac{\alpha \cdot V_e}{f_s \cdot \Delta_i} \quad (\text{II.20})$$

Avec f_s Fréquence de commutation du convertisseur en (Hz), Δ_i les ondulations du courant dans l'inductance $\Delta_i = 1\%$ du courant de la charge

- **Capacité :**

$$C = \frac{\alpha \cdot I_s}{f_s \cdot \Delta V_s} \quad (\text{II.21})$$

Les ondulations de tension de sortie $\Delta V_s = 2\%$ de la tension de sortie V_s [15].

II.5.3. Modélisation de l'onduleur :

Un onduleur est un dispositif statique qui convertit l'énergie continue en énergie alternative. La forme de la tension de sortie de l'onduleur doit être proche d'une sinusoïde,

avec des harmonies réduites au minimum. Cela dépend principalement de la technique de commande employée[27].

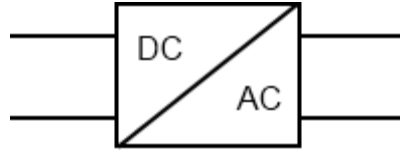


Figure.II.7. Symbole de convertisseur DC-AC monophasé triphasé

Dans les systèmes photovoltaïques, les onduleurs doivent assurer une connexion optimale avec les modules PV, améliorer l'efficacité du contrôle par rapport aux topologies traditionnelles utilisées dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, et garantir une meilleure qualité de l'électricité produite et injectée. Plusieurs topologies d'onduleurs-PV sont couramment utilisées dans ces systèmes. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser un onduleur de tension triphasé à deux niveaux [16].

II.5.3.1. Classification des onduleurs :

Les onduleurs peuvent être classés selon leur mode de commutation :

- ✓ Onduleurs autonomes : Ces onduleurs génèrent eux-mêmes la fréquence et la tension alternative. La commutation dans ces appareils est forcée
- ✓ Onduleurs non autonomes : Dans ce type d'onduleur, la fréquence et la tension alternative sont déterminées par le réseau qu'ils alimentent. La commutation est dite naturelle, car ce sont les tensions alternatives du réseau qui assurent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre

En fonction de la nature de la source continue :

- ✓ Onduleur de tension : Ici, la source continue impose la tension, tandis que la charge en courant alternatif impose le courant sinusoïdal.
- ✓ Onduleur de courant : Dans ce cas, la source continue impose le courant, et la charge en courant alternatif impose la tension sinusoïdale [27].

II.5.3.2. Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés sont constitués de trois bras, chaque bras étant composé de deux interrupteurs. Ces interrupteurs forment ensemble une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin d'éviter tout court-circuit de la source continue. Par conséquent, les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant. Ils sont généralement composés soit d'un thyristor avec une diode en antiparallèle, soit d'un transistor accompagné d'une diode en antiparallèle [27- 30].

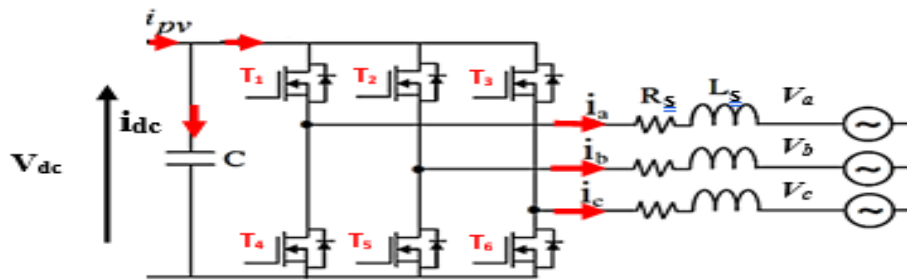


Figure.II.8. Onduleur triphasé à deux niveaux et son filtre.

Le convertisseur présenté dans la **figure II.8** se compose d'une source de tension continue V_{dc} représentée par un condensateur V_{dc} et de trois bras, chacun comprenant deux interrupteurs. Ces interrupteurs forment une cellule de commutation dont le fonctionnement doit être parfaitement complémentaire afin d'éviter tout court-circuit avec la source continue. Par conséquent, les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et sont constitués soit d'un GTO, d'un transistor bipolaire, d'un MOSFET ou d'un IGBT, associés à une diode en antiparallèle. De plus, un filtre RL est connecté à la fois au réseau et à l'onduleur, dans le but de réduire l'amortissement des harmoniques générées par l'onduleur [26].

- En posant que les tensions du réseau V_a , V_b , V_c sont sinusoïdales et symétriques, et déphasé par $\frac{2\pi}{3}$ et que la fréquence est constante, donc les trois tensions sont données par l'expression (II-22).

- Les interrupteurs sont considérés comme parfaits bidirectionnels en courant, unidirectionnel en tension.
- Les pertes de conduction sont modélisées par trois résistances symétriques R comme schématiser la **figure II.8**.
- Les inductances L sont linéaires et équilibrées[15].

$$\begin{cases} V_a = V_m \cos(\omega t) \\ V_b = V_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ V_c = V_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Selon la loi de Kirchhoff, on peut décrire le comportement de l'onduleur dans le repère fixe abc en utilisant les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + V_{in} v_a \\ V_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + V_{in} v_b \\ V_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + V_{in} v_c \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - I_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Il est mentionné que la méthode de fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux a été caractérisée par une fonction de commutation (II-24) employée pour représenter le convertisseur en termes de valeurs moyennes, afin de développer sa stratégie de contrôle[30].

$$T_i(i = 1,2,3) = \begin{cases} 1 \text{ si } T_i \text{ on et } T_{i+1} \text{ est off} \\ 0 \text{ si } T_i \text{ off et } T_{i+1} \text{ est on} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Donc on peut écrire le modèle complet de l'onduleur-PV dans le repère abc de la manière suivante :

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = V_a - Ri_a + \frac{V_{dc}}{3} (2T_1 - T_2 - T_3) \\ L \frac{di_b}{dt} = V_b - Ri_b + \frac{V_{dc}}{3} (T_1 - 2T_2 - T_3) \\ L \frac{di_c}{dt} = V_c - Ri_c + \frac{V_{dc}}{3} (T_1 - T_2 - 2T_3) \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - (i_a T_1 + i_b T_2 + i_c T_3) \end{cases} \quad (II.25)$$

Comme le montre l'équation (II-25), ce système est un système non linéaire variant dans le temps en raison des fonctions de commutation (T_1 , T_2 et T_3) et du courant de diode I_{pv} . Quelques transformations et techniques utiles pour faciliter le contrôle de ce système non linéaire variant dans le temps seront discutées dans la section suivante [30].

II.5.3.3. Modèle mathématique de l'onduleur-PV dans le repère de Park (d, q)

La transformation de Park permet de convertir un système triphasé en un système biphasé en deux dimensions. Comme nous l'avons précédemment observé, le modèle de l'onduleur-PV présente une non-linéarité marquée et une variabilité temporelle dues aux fonctions de commutation et au courant des diodes. Pour simplifier ce système, il est donc nécessaire d'appliquer la transformation de Park.

En appliquant cette transformation au système décrit dans l'équation (II-25), on obtient un modèle mathématique de l'onduleur-PV dans le repère (d-q), permettant ainsi une représentation plus claire et plus pratique pour l'analyse est établi par [30] :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}I_d + \omega I_q - \frac{1}{L}V_{rd} + \frac{V_{dc}}{L}S_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}I_q + \omega I_d - \frac{1}{L}V_{rq} + \frac{V_{dc}}{L}S_q \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}I_{pv} - \frac{1}{C}I_d S_d - \frac{1}{C}I_q S_q \end{cases} \quad (II.26)$$

Les composantes I_d et I_q représentent respectivement les courants de sortie de l'onduleur sur les axes direct et quadrature. De même, les composantes V_{rd}

et V_{rq} correspondent aux tensions du réseau sur les axes direct et quadrature. Les entrées de commande associées aux axes d et q sont notées S_d et S_q . Ainsi, la puissance active et réactive fournie au réseau peut être exprimée en fonction de ces variables sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (V_{rd} I_d + V_{rq} I_q) \\ Q = \frac{3}{2} (V_{rd} I_q - V_{rq} I_d) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Si l'on suppose que la tension triphasée du réseau est idéalement sinusoïdale et ne contient pas d'harmoniques, alors dans le repère (d-q) le vecteur de tension du réseau s'exprime comme suit [18] :

$$\begin{cases} V_{rd} = V \\ V_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En réalité la tension du réseau électrique n'est pas parfaitement sinusoïdale en raison de la présence d'harmoniques. Les composantes V_{rd} et V_{rq} , qui représentent les tensions dans les axes direct et quadrature du réseau ne restent pas constantes. Elles présentent plutôt des ondulations légères dont les fréquences et les amplitudes dépendent des harmoniques présents dans le réseau.

En état d'équilibre, la valeur moyenne de V_q reste toujours nulle. Ainsi, l'équation (II-27) peut être reformulée comme l'équation (II-29)[19].

La puissance active est influencée par le courant dans l'axe d , tandis que la puissance réactive dépend du courant dans l'axe q . De plus, pour parvenir à un facteur de puissance unitaire, la composante q du vecteur de commande du courant est ajustée à zéro[26].

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (V_{rd} I_d) \\ Q = \frac{3}{2} (V_{rq} I_q) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

II.6. Conclusion

Dans cette section de notre travail, nous avons présenté la modélisation détaillée de la chaîne de conversion d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Cette modélisation inclut le modèle du générateur photovoltaïque, essentiel pour étudier l'impact de la température et de l'irradiation sur son fonctionnement. Par la suite, nous avons étudié et modélisé les convertisseurs statiques utilisés dans cette chaîne de conversion, en commençant par le convertisseur DC-DC de type élévateur (Boost), en reconstruisant son modèle mathématique. Ensuite, nous avons analysé le comportement de l'onduleur triphasé de type (DC-AC) et de son filtre, tout en élaborant leur modèle mathématique dans le repère (d-q) afin de faciliter leur contrôle.

Cette étape de modélisation de la chaîne de conversion PV connectée au réseau électrique est essentielle et nous prépare à aborder la section suivante, qui est dédiée à l'analyse de son contrôle dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Contrôle du système PV connecté au réseau électrique.

III.1. Introduction

Dans le prolongement des sections précédentes, il est important de rappeler que les systèmes photovoltaïques connectés au réseau peuvent comporter une ou deux étapes de conversion de puissance (CC-CC et CC-CA), ainsi que diverses topologies d'onduleurs PV. En conséquence, les stratégies de commande et les schémas de modulation varient selon la topologie adoptée [15]. Après avoir détaillé, dans le chapitre précédent, le modèle de chaque composant de la chaîne de conversion d'un système PV raccordé au réseau, ce chapitre s'intéresse à la synthèse des lois de commande de cette chaîne de conversion d'énergie.

Nous aborderons tout d'abord les aspects fondamentaux du contrôle, tels que le suivi du point de puissance maximale (MPPT), la gestion de la puissance active et réactive, la synchronisation avec le réseau, ainsi que le contrôle de la tension au niveau du bus continu et du point de connexion commun (PCC). La surveillance de l'installation photovoltaïque, incluant la détection de l'îlotage, sera également traitée dans ce chapitre afin d'assurer un fonctionnement optimal du système [04].

III.2. Contrôle optimal de la puissance par la méthode MPPT

En raison de la nature intermittente des sources d'énergie renouvelable telles que les cellules photovoltaïques (PV) et les éoliennes, qui dépendent entièrement des conditions météorologiques, la puissance électrique générée varie fortement. Lorsqu'elles sont connectées à une charge, des problèmes apparaissent, car la puissance transférée ne correspond que rarement à la puissance maximale que peut fournir le générateur. Ces variations entraînent une baisse de l'efficacité du système global de conversion électrique [18]. Le suivi du point de puissance maximale (MPPT – Maximum Power Point Tracking)

dans les systèmes photovoltaïques (PV) repose sur l'exploitation des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) des panneaux solaires, étudiées dans la section précédente. Ces caractéristiques présentent un point critique, appelé point de puissance maximale (MPP), où la puissance générée est maximale. La tension correspondante est appelée tension au point de puissance maximale.

Le principe du MPPT repose sur la variation du rapport cyclique (α) d'un hacheur, contrôlé grâce à des algorithmes spécifiques. Ce rapport est ajusté en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques propres aux panneaux solaires, afin d'atteindre une valeur optimale qui maximise la puissance produite par le générateur photovoltaïque [3].

Pour déterminer ce point de fonctionnement optimal, diverses techniques ont été proposées dans la littérature [3,13]. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve la méthode de Perturbation et Observation (P&O – Perturb and Observe) et celle de la conductance incrémentale. D'autres approches plus avancées ont également été développées, telles que l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (ANN), des algorithmes d'essaim particulaire (PSO), du contrôleur logique flou, ainsi que des algorithmes évolutionnaires [7].

III.2.1. La méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O – Perturb and Observe) est l'une des techniques classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Elle est la plus largement utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son efficacité pour suivre le point de puissance maximale (MPP).

Le principe de cette méthode consiste à ajuster la tension du générateur photovoltaïque (V) en l'augmentant ou en la diminuant, afin d'atteindre le MPP. Cette action se fait en modifiant directement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC (perturbation), puis en observant la variation de la puissance (P). Si la puissance augmente, la perturbation continue dans le même sens ; sinon, la direction est inversée. Ainsi, les ajustements de la tension de référence sont faits dans le sens qui permet d'augmenter la puissance produite[14].

La figure III.1 présente le principe de cette méthode [16] :

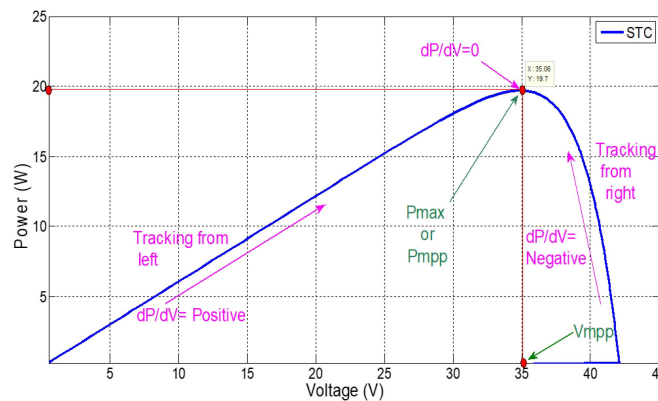


Figure.III.1. Principe de l'algorithme 'Perturbe and Observe'.

La force de tension du panneau est sélectionnée volontairement modifiée, soit qu'elle augmente, soit qu'elle se réduit, puis la nouvelle force est comparée à la mesure avant perturbation. Exactement, si l'augmentation de la force est due au fait de la perturbation, la dernière sera poursuivie dans le même sens. En revanche, si elle se réduit, la perturbation sera initiée dans un sens contraire.

III.2.2. La méthode de la conductance incrémentale

Cette approche, qui est très similaire à l'algorithme P&O, a été proposée pour gérer les conditions météorologiques d'une grande variation. Elle repose directement sur les

variations de puissance, utilisant la tension et le courant de sortie du panneau photovoltaïque pour le calcul de la conductance et de la conductance incrémentielle ki .

Le principe de cette méthode repose sur la comparaison entre la conductance instantanée (I_{pv}/V_{pv}) et la conductance incrémentielle (dI_{pv}/dV_{pv}) afin de déterminer s'il faut augmenter ou diminuer la tension du panneau photovoltaïque (V_{pv}). L'objectif est d'atteindre le point de puissance maximale (MPP), où la dérivée de la puissance par rapport à la tension (dP_{pv}/dV_{pv}) est nulle, comme l'illustre la figure.III.2.

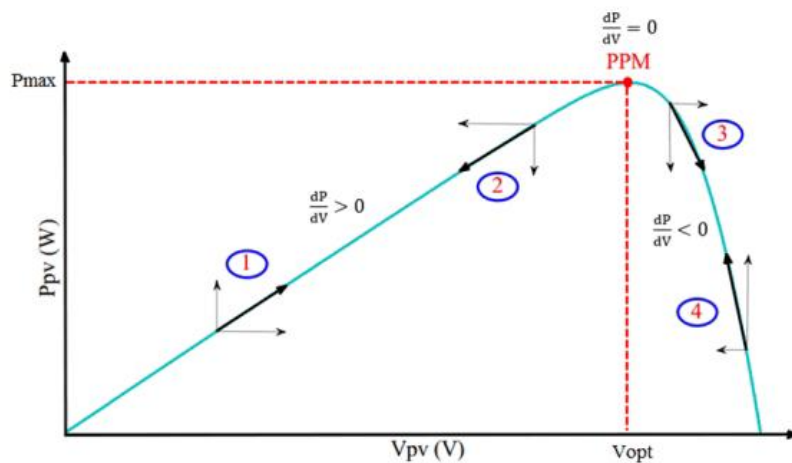


Figure.III.2. Principe de l'algorithme 'conductance incrémentale'.

La méthode de conductance incrémentielle offre généralement une précision supérieure par rapport à l'approche P&O. Toutefois, sa mise en œuvre est souvent plus complexe et requiert une importante capacité de calcul, ce qui peut allonger le temps de contrôle du système[27].

III.2.3. La méthode de tension de circuit ouvert (Open circuit voltage)

Il s'agit d'une méthode simple qui consiste à comparer la tension du panneau photovoltaïque à une tension de référence, correspondant à la tension optimale de fonctionnement. L'écart entre ces deux tensions, appelé erreur de tension, est utilisé pour

ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique. La tension de référence est déterminée à partir de la relation suivante :

$$V_{opt} = K_1 \times V_{co} \quad (III.1)$$

K_1 est une constante de proportionnalité dépendant des caractéristiques du système photovoltaïque. Elle est déterminée en mesurant V_{opt} et V_{co} dans différentes conditions de température et d'irradiance, avec k_1 inférieur à 1.

Après avoir déterminé la valeur de k_1 , V_{opt} peut être calculé en utilisant l'équation (III-1). Cela nécessite que le système mesure la tension V_{opt} à chaque période. La tension de référence, correspondant à la tension optimale, est ainsi obtenue directement. Bien que cette méthode soit simple à mettre en œuvre, la sélection d'une valeur optimale pour k_1 demeure difficile [34].

III.3. Contrôle de l'onduleur PV connecté au réseau

L'onduleur photovoltaïque (PV) connecté au réseau a plusieurs fonctions importantes. Il synchronise le système avec le réseau, contrôle la puissance active (P) et réactive (Q), régule les courants envoyés dans le réseau, et maintient une tension stable sur le condensateur de liaison DC.

Dans certains systèmes photovoltaïques, où il n'y a pas de convertisseur DC-DC, l'onduleur utilise la gestion de la tension du condensateur DC pour effectuer le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cela permet d'ajuster la tension de référence du système pour extraire la puissance maximale des panneaux solaires.

Le modèle mathématique de l'onduleur montre qu'il y a un couplage entre les deux courants I_d et I_q ce qui peut rendre le contrôle plus complexe. Il est donc important de séparer ces courants pour améliorer la stabilité et les performances du régulateur[12].

Une méthode courante pour résoudre ce problème est le contrôle à tension orientée (Voltage-Oriented Control, VOC). Ce type de contrôle permet une réponse rapide et de bonnes performances sur le long terme. Il utilise des boucles de contrôle internes qui rendent les courants I_d et I_q indépendants.

Le VOC fonctionne en transformant les grandeurs AC du réseau en grandeurs DC, ce qui simplifie la conception du système. Cela permet d'utiliser des régulateurs simples, comme les régulateurs PI, pour contrôler efficacement le système[26].

Le courant du réseau est décomposé en deux parties : i_d et i_q . Le courant i_d est lié à la puissance active et i_q qui est lié à la puissance réactive. Le contrôle à tension orientée utilise deux boucles de régulation : la première règle la tension du bus DC, et la deuxième règle les courants i_d et i_q pour contrôler la puissance injectée dans le réseau.

D'après la figure III.3, le contrôle de tension orienté repose sur deux boucles de contrôle en cascade. La tension de bus continu (condensateur de liaison continue) V_{dc} est contrôlée par une boucle externe qui utilise un contrôleur PI dont la sortie est proportionnelle à la puissance active et donc à la valeur désirée (i_d).

En revanche, la boucle interne qui contrôle les courants du réseau (i_d , i_q), tandis que la puissance réactive est contrôlée avec la composante quadrature de courant(i_q)[16].

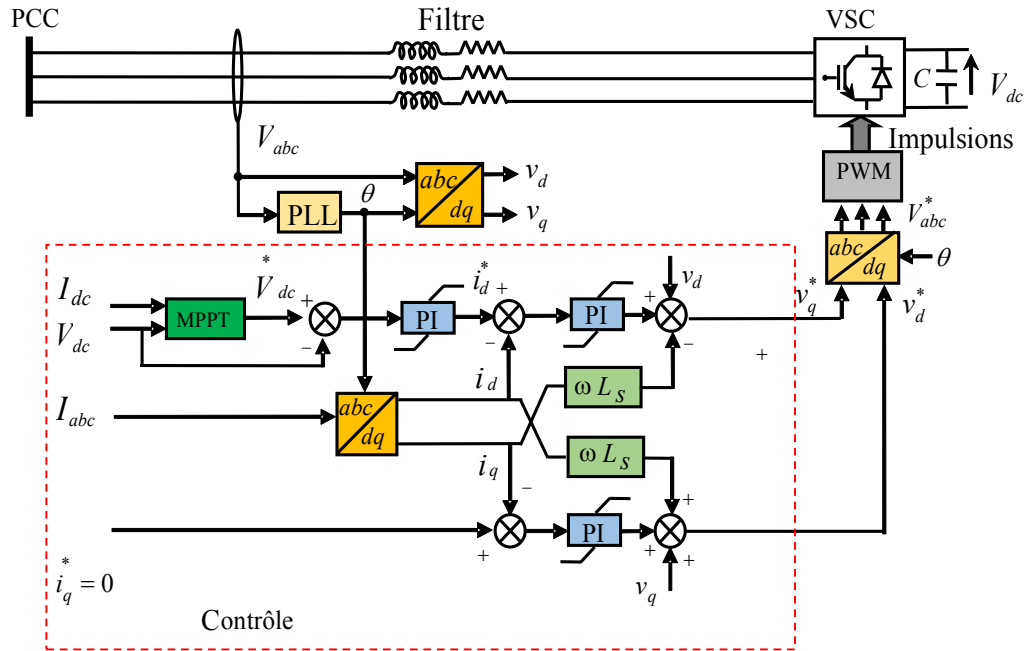


Figure.III.3. Commande de tension orientée VOC pour l'onduleur PV.

Le régulateur PI contrôle les courants i_d et i_q en ajustant leurs tensions de référence v_d^* et v_q^* , qui sont ensuite converties en valeurs de phase pour être modulées par l'onduleur via la modulation de largeur d'impulsion (MLI). En général i_q est réglé à zéro pour maintenir un facteur de puissance unitaire, bien qu'il puisse être ajusté en cas de besoin, par exemple pour injecter de la puissance réactive lors de chutes de tension. Le système PV est synchronisé avec le réseau en utilisant une boucle de verrouillage de phase (PLL) pour aligner correctement le repère dq avec le vecteur de tension du réseau. Ainsi, le contrôle à tension orientée (VOC) permet de gérer efficacement les courants du réseau et de contrôler la puissance active et réactive dans les systèmes photovoltaïques [21].

III.3.1. Régulation des courants

En considérant que:

(III.2)

(III.3)

Avec ω représentant la fréquence angulaire du réseau électrique, Donc nous pouvons réécrire le modèle dans le repère de Park que nous avons mentionné dans la section précédente (II.26) de la manière suivante :

$$(III.4)$$

Ainsi, on peut commander les courants i_d et i_q de manière distincte en agissant sur les entrées V_d et V_q , respectivement. Par ailleurs, l'utilisation de régulateurs de type PI permet d'obtenir une réponse dynamique rapide et des erreurs d'état constantes nulles [14].

III.3.2. Régulation de la tension

Pour un facteur de puissance unitaire i_q doit ajuster à zéro et en se basant sur l'hypothèse précédente, la troisième équation du modèle dans le repère de Park (II.26) peut être écrite de la manière suivante :

$$C \frac{V_{dc}}{dt} = I_{pv} - S_d i_d \quad (III.5)$$

On peut maintenir la tension du bus continu V_{dc} constante en commandant la composante directe du courant i_d , comme le montre l'équation (III.5)[14].

III.3.3. Commande de l'onduleur par MLI (Sinus-Triangle)

La Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est une méthode couramment utilisée pour contrôler les onduleurs. Dans cette étude, nous avons examiné la méthode Sinus-Triangle.

Cette méthode consiste à comparer un signal sinusoïdal de basse fréquence (appelé modulante) avec un signal triangulaire de haute fréquence (appelé porteuse). La fréquence de la porteuse est supérieure à celle de la modulante [21].

Tout en respectant l'inégalité sur les fréquences ($f_p > f_{ref}$).

Les moments de commutation des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation est donc fixée par la fréquence de la porteuse. La figure III.4 présente le principe de fonctionnement de la MLI sinus triangle [15].

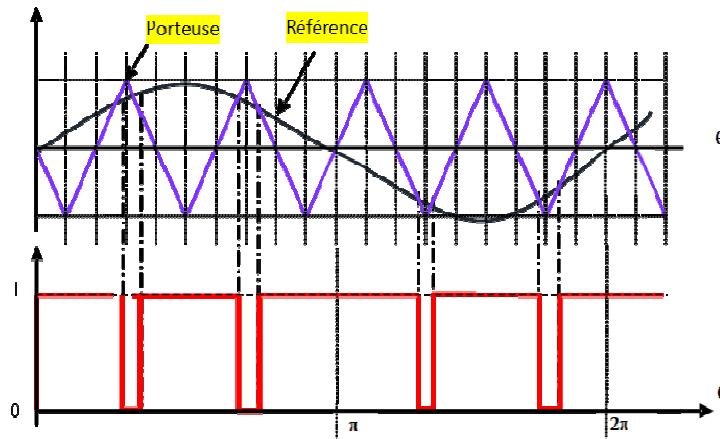


Figure.III.4. Principe de la commande MLI sinus-triangle.

L'équation de porteuse triangulaire est exprimée comme suit :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ x_1(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

L'équation de la référence représente un système de signaux triphasés donné par :

$$\begin{cases} V_{réf,a} = V_{réf} \sin(\omega_{réf} t) \\ V_{réf,b} = V_{réf} \sin\left(\omega_{réf} t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{réf,c} = V_{réf} \sin\left(\omega_{réf} t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

La fonction liée au signal de commande est exprimée dans la figure III.5 de la manière suivante :

$$\begin{cases} 1 & \text{si } V_{réf} \geq V_p \\ 0 & \text{si } V_{réf} \leq V_p \end{cases} \quad (III.8)$$

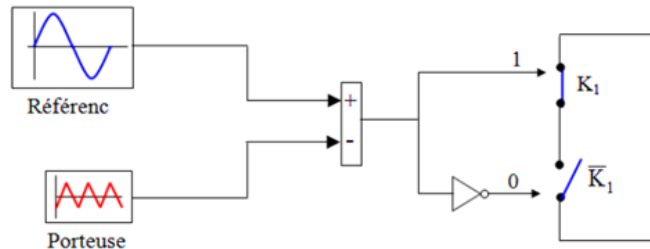


Figure.III.5. Fonction logique du signal de commande de la MLI.

Cette commande vise à minimiser les distorsions harmoniques et à obtenir une tension de sortie aussi proche que possible de la sinusoïde de référence, ce qui est crucial dans de nombreuses applications telles que les alimentations électriques, les systèmes d'énergie renouvelable, etc[28].

Pour améliorer la commande MLI Triangulo-sinusoïdale, on se base sur deux paramètres qui définissent cette méthode :

- **Indice de modulation I_M** : est le rapport entre la fréquence de porteuse f_p sur la fréquence de référence $f_{réf}$.

$$I_M = \frac{f_p}{f_{réf}} \quad (III.9)$$

- **Taux de modulation T_M** : est le rapport entre l'amplitude de tension de la référence $V_{réf}$ sur l'amplitude de la tension de la porteuse V_p .

$$T_M = \frac{V_{réf}}{V_p} \quad (III.10)$$

III.3.4. Synchronisation du système PV avec le réseau électrique

Pour contrôler un système photovoltaïque connecté au réseau, il est important de connaître l'amplitude et la phase de la tension du réseau. Ces données permettent de réguler le courant et la tension, afin de garantir la stabilité du système et de produire un maximum d'énergie. Pour cela, une méthode de synchronisation est nécessaire afin d'aligner la sortie de l'onduleur avec le réseau électrique. Plusieurs méthodes existent, comme la détection du passage par zéro, les techniques de filtrage ou encore les boucles à verrouillage de phase (PLL).

Diverses méthodes sont disponibles, notamment le passage par zéro, les algorithmes de filtrage et les boucles à verrouillage de phase [15, 19].

II.3.4.1. Méthode de verrouillage de phase ou (Phase Locked Loop (PLL))

La structure d'un circuit PLL de base, illustrée dans la figure III.6, est généralement composée de trois éléments principaux :

- **Un détecteur de phase** : compare le signal d'entrée avec le signal de sortie et génère un signal d'erreur
- **Un filtre de boucle** : supprime les composantes indésirables du signal d'erreur.
- **Un oscillateur à tension commandée** : produit un signal dont la fréquence s'ajuste selon le signal filtré.

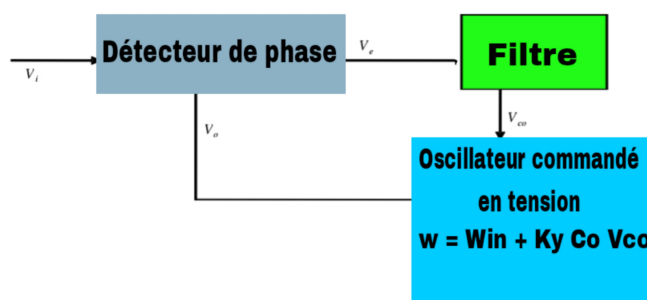


Figure.III.6. Les composants principaux d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

Le PLL (Loop Phase-Locked) utilise une commande non linéaire en boucle fermée pour synchroniser ses signaux de sortie avec un signal d'entrée ou un signal de référence, du point de vue phase et fréquence. Le système ajuste automatiquement la fréquence d'un

oscillateur selon la fréquence et la phase du signal d'entrée et lui assure une synchronisation exacte en phase et en fréquence avec la référence.

Cet algorithme permet des meilleures performances de rejet des harmoniques et des perturbations par rapport aux méthodes classiques comme la détection de passage à zéro ou la transformation $\alpha\beta$ -dq. Cependant, en présence de déséquilibres réseau, des améliorations supplémentaires sont requises pour garantir une performance optimale [33].

Il existe différentes configurations de PLL pour les systèmes triphasés, notamment :

- PLL de repère de référence synchrone (dq PLL).
- PLL de repère de référence stationnaire ($\alpha\beta$ PLL).
- PLL de repère de référence synchrone découplé (DSRF PLL).

Le PLL dq utilise les équations de la transformation de Park, telles qu'elles sont présentées dans l'équation (III-11), pour traduire le repère de référence tournant naturel triphasé abc en repère de référence synchrone diphasé dq [34].

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

On peut effectuer une estimation de la fréquence ou du déphasage de la tension du réseau en prenant en compte soit par la composante de l'axe direct, soit par la composante de l'axe en quadrature de la tension. Ainsi, dans cette étude, on utilise l'orientation en fonction de l'axe (d). Ensuite, il est nécessaire que la composante V_q suive le zéro en utilisant un Régulateur PI [15].

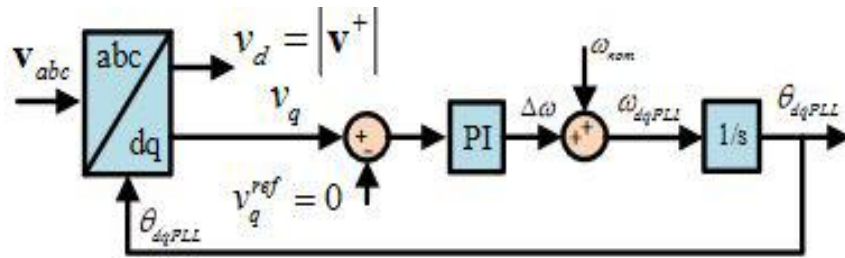


Figure.III.7. structure de PLL de repère de référence synchrone (dq PLL).

La fréquence angulaire indiquée par la sortie du régulateur PI est intégrée pour obtenir l'angle, qui est ensuite utilisé dans la transformation vers le système diphasé. Ce résultat est ensuite utilisé pour recalculer l'erreur, à laquelle une valeur spécifique de la fréquence est ajoutée pour améliorer les performances globales de suivi de la PLL [15].

III.4. Conclusion

Cette partie du mémoire est consacrée à la présentation des différentes techniques de contrôle des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique

Dans un premier temps, nous avons abordé le contrôle du suivi du point de puissance maximale (MPPT), en présentant brièvement les différentes méthodes existantes. Par la suite, nous avons étudié le principe de contrôle de l'onduleur photovoltaïque, en abordant la synchronisation avec le réseau, le contrôle de la tension du bus continu, ainsi que le contrôle du réseau. Ces stratégies de commande jouent un rôle clé dans l'optimisation de l'efficacité, l'amélioration de la fiabilité et la gestion optimale de l'énergie du système photovoltaïque.

Chapitre IV : Application de système PV connecté au réseau électrique : Station de Ain El Skhouna Saida

IV.1. Introduction

L'Algérie, riches d'un vaste potentiel solaire, a embrassé une stratégie de développement des énergies renouvelables. Dans cette perspective, la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque (PV) est primordiale. Le présent chapitre se propose un exemple d'application d'un système PV connecté au réseau électrique il s'agit d'étudier la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna installée dans de notre wilaya connectée au réseau de distribution.

IV.2. Presentation of Ain-Sokhoua Photovoltaic Centre (Saïda)

La centrale photovoltaïque d'Ain-Sokhoua, de puissance **30 MWc**, a été mise en service en 2016[36]. Elle est réalisée dans le cadre du programme national des énergies renouvelables et fait partie d'une série de **23** centrales photovoltaïques éparses sur le territoire national, contribuant à la production de quasi 500 MWc d'ici 2020 et de 22 000 MW d'ici 2030 [36-38]. La centrale injecte directement sa puissance dans le réseau national **60 kV** et est opérée par la société allemande **BELECTRIC**, elle a été réalisée par ShariketKhahrabawaTaketMoutadjadida (**SKTM**). La figure IV.1 présente le schéma général de cette centrale.



Figure.IV.1. Centrale PV de 30 MW de Ain-Skhouna Saida

IV.3. Situation Géographique et Vue d'ensemble de centrale de

Le complexe d'Ain-Sokhoua est situé dans la wilaya de Saïda, à une distance d'environ **80 km** au sud de la capitale de la wilaya et **150 km** au sud de Tiaret [36, 37]. Il couvre une superficie de **42,3 hectares**, pour un coût de réalisation estimé à 50 millions d'euros, soit l'équivalent à l'époque de 480 millions de dinars [40]. La figure.IV.2 présente la carte satellite de la centrale de Ain-Skhouna.



Figure.IV.2. Carte satellite de la centrale de Ain-Skhouna

IV.4. Composition de la centrale PV Skhouna(Saida)

La centrale photovoltaïque de Ain-Skhouna de 30 MWc fait partie de 23 stations similaires construites à travers les hauts plateaux et le sud du pays afin de produire 400 mégawatts et elle était inscrite dans le cadre du programme national des énergies renouvelables.

La centrale PV de Ain-Skhouna est composée par les parties suivantes :

IV.4.1. Champs Solaires Photovoltaïques

La centrale consiste en deux champs solaires distincts, Saïda 1 (Boucle 1) et Saïda 2 (Boucle 2) de puissances respectivement de 15,936 MWc et 13,944 MWc. La centrale a une puissance totale de 30 MWc.

Les champs solaires sont constitués de 119 520 panneaux photovoltaïques type **CS6P-250P** (Silicium poly-cristallin), chaque panneau possède une puissance crête de 250 Wc, leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau.IV.1. Les panneaux sont orientés à 15° de l'horizontale, optimal pour les besoins d'énergie dans la région.

Le champ Saïda 1(Boucle 1) comporte 8 sous champ (Skide) (*1) et le champ Saïda2 (Boucle 2) 7 sous champ photovoltaïques, ce qui fait un total de 15 sous champ.

Les sous-champs de centrale PV Ain-Skhouna sont identiques (chacun avec une puissance crête de 1,992 MWc), chaque sous-champ est composé de deux (2) onduleurs, quatre (4) boîtes centrales et un transformateur.

(*1) : **SKID (ou "Châssis mobile")** : C'est une structure sur laquelle sont fixés et interconnectés des équipements de système photovoltaïque, comme des onduleurs, des transformateurs, des armoires de distribution, etc.

Tableau.IV.1 Caractéristiques de panneau PV utilisé dans la centrale PV de Ain-Skhouna [22, 23]

Type de module PV	CS6P-250P
Données électriques	
Puissance maximale (P_{max})	250 W
Tension pour puissance maximale (V_{mp})	30.1 V
Courant pour puissance maximale (I_{mp})	8.30 A
Tension à l'ouverture (V_{oc})	37.2 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	8.87 A
Coefficient de température de V_{oc}	-0.34%/°C
Coefficient de température de (I_{sc})	0.065 %/°C
Coefficient de température de (P_{max})	-0.43 %/°C
NOCT	47 °C
Réduction du rendement de 1000 W/m ² à 200 W/m ²	+ 96.5 %
Dimensions	
Longueur	1.638 m
Largeur	0.982 m
Poids	18.5 kg
Cellules	
Nombre par module	60
Technologie de cellule	poly-cristalline
Taille de cellule (carré)	(0.163*0.163) m ²
Rendement de cellule	15.54 %
Liaison des cellules	3 busbars

Chaque sous-champ est organisé ainsi :

- Il y a deux (2) onduleurs et quatre (4) boîtes centrales par onduleur dans chaque sous-champ, ce qui signifie il y a 8 boîtes centrales pour un sous-champ.
- Deux boîtes centrales (une avec les bornes positives (+) et l'autre avec les bornes négatives (-)) sont reçues par chaque onduleur.
- Chaque boîte de jonction (appelée aussi Combiner Box) ressemble à un tableau de 11 câbles avec des fusibles de protection (comme indiquer la Figure IV.3.b), les 10 premiers câbles avec des fusibles de protection de 200 A chacun porte huit 8 tables en parallèle et le onzième câble (dernier câble) avec un visible de protection de 100 A porté trois 3 tables en parallèle.
- Une table est composée de deux (2) strings en parallèle et chaque string comprend 24 panneaux photovoltaïques de type CS6P-250P chacune d'une puissance crête de 250 Wc.

Alors chaque onduleur rassemble 3984 panneaux qui sont réparties comme indiqué sur le Tableau IV.2.

Tableau.IV.2 Répartition des panneaux photovoltaïques dans la centrale d'Ain Sokhna

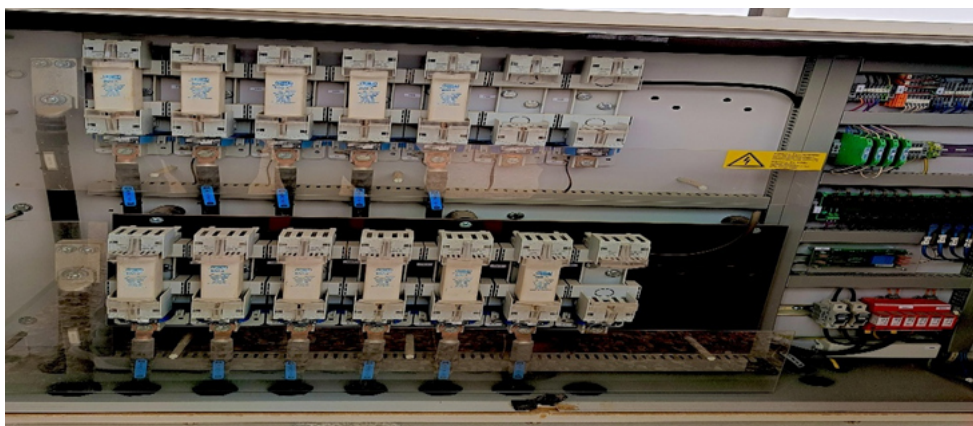
Nomenclature	string	Table	La boîte centrale	
			Le premier câble (x10)	Le dernier câble (1)
Disposition	24 panneaux en série	2 strings en parallèle	8 tables en parallèle	3 tables en parallèle
Nombre de panneaux	24	48	384 (x10)	144
			3984	

IV.4.2. Les Boîtes Centrales (Combiner Boxes)

Les boîtes centrales, ou les boîtes de jonction, sont requises pour la récupération du courant produit par les panneaux solaires. La centrale a 60 boîtes de jonction. La figure.IV.3 illustre la boîte de jonction de l'extérieur et de l'intérieur. Elles sont situées en aval des onduleurs photovoltaïques et font converger les bornes négatives et positives des générateurs PV.



(a)



(b)

Figure.IV.3. Images illustrative de la boîte de jonction a) à l'extérieur, b) à l'intérieur

IV.4.3. Les Onduleurs Photovoltaïques – « Power Conditioners »

L'onduleur (ou inverseur de courant) est l'élément fondamental du système photovoltaïque. Son rôle principal est de convertir le courant continu (DC) produit par les modules solaires en courant alternatif (AC), apte au réseau électrique.

La centrale de Ain-Skhouna comporte 30 onduleurs de type Sunny Central 850CP XT. Les spécifications de chaque onduleur sont présentées dans le tableau.IV.3.

Tableau.IV.2. Caractéristiques des onduleurs de la centrale Ain Skhouna

Entrée (DC)	
Puissance DC max. (pour $\cos \varphi = 1$)	954 kW
Tension d'entrée max.	1000 V
U_{MPP_min} pour $I_{MPP} < I_{DCmax}$	568 V
Tension d'entrée assignée	681 V
Courant d'entrée max	1400 A
Courant de court-circuit max.	2500 A
Nombre d'entrées MPP indépendantes	1
Nombre d'entrées DC	9
Sortie (AC)	
Puissance assignée (à 25 °C) / Puissance nominale AC	(à 50 °C) 935 kVA / 850 kVA
Tension nominale AC / Plage de tension nominale AC	386 V / 348 V à 443V
Fréquence du réseau AC / Plage	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz à 63 Hz
Fréquence / tension de réseau assignée	50 Hz / 386 V
Courant de sortie max. / Taux de distorsion harmonique max	1411 A / 0.03
Phases d'injection / Phases de raccordement	3/3
Rendement	
Rendement max. / Rendement européen / Rendement CEC	98,6 % / 98,4 % / 98,5 %
Caractéristiques générales	
Dimensions (L / H / P)	2562 / 2272 / 956 mm
Poids en kg	1900 kg
Désignation de type	SC 880CP-10

Il est important de noter la présence d'un dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT – Maximum PowerPoint Tracking) qui permet de contrôler la tension et le courant de sortie des rangées PV pour maximiser la puissance générée en fonction de l'irradiation et de la température.

La figure.IV.4 illustre une image de l'onduleur PV de type Sunny Central 850CP XT installé de Ain-Skhouna.



Figure.IV.4. Image illustrative de l'onduleur PV de type Sunny Central 850CP XT installé dans la centrale de Ain-Skhouna

IV.4.4. L'Armoire de Communication des Charges

La commune de communication des charges assure l'alimentation en courant de chaque bâtiment et la communication des sources d'énergie entre l'installation PV et le réseau. Elle comprend notamment :

- Des disjoncteurs de distribution pour l'installation PV, le réseau et un groupe électrogène (moteur diesel de 30 kVA).
- Deux compteurs d'énergies : un compteur mesurant l'énergie électrique injectée au réseau par le système solaire PV et un second compteur mesurant l'énergie reçue du réseau ;
- Un serveur bleu pour enregistrer les données respectivement les puissances instantanées : consommées par les différentes charges.

Une image illustrative de cette armoire est présentée dans la figure.IV.5.



Figure.IV.5. Image de l'armoire de communication des charges

IV.4.5. Dispositif de Mesures Environnementales

Les conditions météorologiques telles que la température de l'air, l'irradiation solaire, la vitesse du vent et l'humidité relative jouent un rôle important dans la conception des installations photovoltaïques [14]. Pour cette raison La centrale d'Ain Skhouna est équipée d'une station de surveillance météorologique qui permet d'enregistrer les conditions climatiques dans la zone de l'installation des modules PV (figure.IV.6).



Figure.IV.6. Station de surveillance météorologique d'Ain Skhouna.

Les données collectées sont enregistrées dans un des ordinateurs d'acquisition des données de la centrale installé dans la salle de contrôle.

Les dispositifs de mesures environnementales installés dans cette mini station sont :

- ✓ Des pyromètres de type ISO9060 pour mesurer les rayonnements solaires,
- ✓ Un capteur de température de type DLE120,
- ✓ Un capteur d'humidité de type DMA672.1,
- ✓ Un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent de type WLM KPV).

IV.4.6. La salle de contrôle

Les équipements de la centrale solaire PV (hormis l'armoire de commutation des charges et les panneaux d'affichages) sont connectés à une cabine de type salle de contrôle comme illustrer dans la figure.IV.7, qui est isolée de la chaleur extérieure. De ce fait, elle est équipée de quatre climatiseurs fonctionnant en alternance permettant de garder une température convenable dans la salle de contrôle.



Figure.IV.7. Salle de contrôle de la centrale de Ain-Skhouna

La salle de contrôle contient trois ordinateurs, deux pour l'acquisition des données de la centrale et le contrôle des systèmes (onduleurs, les connecteurs, les panneaux...ect) et l'autre pour la surveillance du réseau électrique GRTE (Société Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Électricité) dans le but d'assurer le bon fonctionnement des onduleurs photovoltaïques.

Le système de surveillances des données a été conçu suivant la norme IEC61724 [39, 40]. Les paramètres tels que : le rayonnement solaire (G), la température ambiante (T_a), la température du module (T_m), la vitesse du vent (v), l'énergie générée DC et AC (EDC et EAC) sont mesurés instantanément chaque 5 minutes durant la journée.

La salle de contrôle respecte la norme standardisée CEI 60529 [22], avec un indice de protection IP 54. Cet indice correspond à une protection contre la pénétration de corps étrangers (tel que le dépôt de poussière) et les effets nuisibles dus à la pénétration de l'eau.

IV.5. Fonctionnement de la centrale PV d'Ain Sokhna

La centrale solaire PV d'Ain Sokhoua fonctionne pour la plupart du temps en mode connecté au réseau. Dès le lever du soleil, les panneaux commencent à produire de l'électricité qui sera convertie à l'aide des onduleurs. Une partie de la production est utilisée pour alimenter la centrale et le reste est injectée directement au réseau de distribution (GRTE – Gestion du Réseau de Transport de l'Électricité).

Lorsque la centrale n'est pas connectée au réseau on parle alors de mode autonome. Les deux différents modes de fonctionnement de la centrale sont commandés par les panneaux de contrôle [22].

IV.6. Actions d'entretien et de maintenance dans la centrale de Ain-Skhouna

La maintenance se définit comme l'ensemble des actions techniques, administratives et de gestion mises en œuvre tout au long du cycle de vie d'un équipement, visant à maintenir ou à le remettre dans un état dans lequel il permettant d'assurer la fonction attendue [22].

IV.6.1. Répartition des tâches de maintenance

La société Allemand (BELECTRIC) a établi un planning qui permet de suivre toute les taches dans les centrales et les représentants de différentes organisations en charge du projet de la centrale solaire photovoltaïque. Il contient certains éléments tels que : le nettoyage, les équipements, l'inspections, les pièces de rechange, le budget... etc.

IV.6.2. Gestion des anomalies et réparations

Au cours de son fonctionnement, la centrale peut être sujette à une défaillance engendrant une panne. Par conséquent, dans le même enregistre du Contrôle périodique et Plan d'entretien annuel on doit enregistre tout répertoriant les anomalies détectées ainsi que les réparations effectuées. Une fiche a été élaborée, elle comprend :

- La date de détection de la panne ;
- Les intervenants (est dirigé par la société BELECTRIC) ;
- Les équipements utilisés ;
- La nature de l'anomalie ;
- Les causes de l'anomalie ;
- La date de réparation ;

Notant bien que toutes ces tâches sont sous la responsabilité de la société allemande ELECTRIC, qui est la société responsable de construction et de maintenance de la centrale solaire PV d'Ain Skhoua de Saïda, elle est toujours sous garantie.

IV.6.3. Le Nettoyage

De manière générale, les méthodes de nettoyage de la surface des modules photovoltaïques n'ont pas constitué une priorité pour les chercheurs. Ce désintérêt peut s'expliquer par l'hypothèse selon laquelle la quantité de pluie dans la région d'installation du système photovoltaïque serait suffisante pour assurer le nettoyage naturel des modules. Les techniques de nettoyage des modules PV peuvent être classées comme suit :

- Nettoyage par la pluie : Cette méthode est peu fiable, car son efficacité dépend directement du niveau de précipitations sur le site. »
- Nettoyage par machine mobile (figure.IV.8) : Cette méthode fait appel à des équipements mobiles équipés d'un système de stockage d'eau ou d'un dispositif d'arrosage. Elle constitue l'une des solutions les plus efficaces pour assurer le nettoyage des surfaces des modules photovoltaïques.



Figure.IV.8. Machine mobile pour le nettoyage

IV.7. Analyse des données météorologiques du site d'Ain Skhouna

L'analyse des performances du champ photovoltaïque Saida 1 d'une puissance de 15,936 MWc raccordée au réseau national durant les mois d'Mai et de Juin de l'année 2025, a révélé une dépendance marquée aux conditions météorologiques locales.

Au-delà de l'irradiation solaire, la température des modules a significativement affecté l'efficacité de conversion, tandis que l'accumulation de poussière et de sable, fréquente dans la région, a engendré des pertes importantes en bloquant la lumière incidente.

La vitesse du vent, en influençant le refroidissement des panneaux, a également joué un rôle. Ces facteurs environnementaux, souvent sous-estimés, ont directement impacté les rendements journaliers et hebdomadaires du champ, soulignant l'importance cruciale d'un suivi métrologique précis pour une évaluation fiable et une optimisation continue de la production énergétique [22].

IV.7.1. Évolution de la production d'énergie solaire en kilowatts : une analyse quotidienne, hebdomadaire, et mensuelle

Dans cette section de ce chapitre l'analyse des performances du centrale PV raccordée au réseau national durant les mois d'Mai et Juin de l'année 2025 (durant notre stage) sera présenté.

La figure.IV.9. Présente l'évolution de la puissance générée quotidien durant un jour de mois de Juindu champs PV Saida 1.On note que la puissance générée par le champs PV est proportionnelle à l'ensoleillement, elle présente une valeur élevée lorsque l'irradiation augmente et une valeur faiblepourune irradiation est faible.

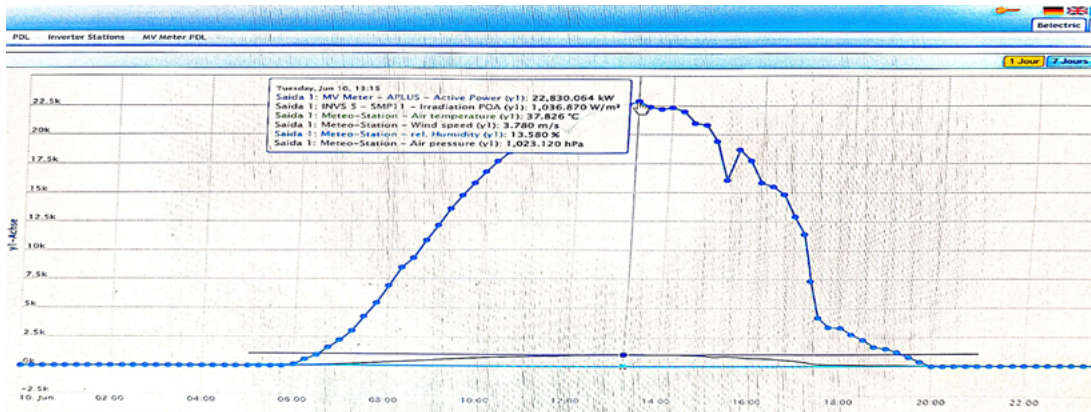


Figure.IV.9. Evolutionde la puissance générée du champs PV Saida 1 durant un jour du mois de Juin

De plus, l'algorithme de base de MPPT suivre correctement le point de puissance maximale pendant le changement rapide des conditions métrologiques et rendre le générateur PV toujours générer la puissance maximale. De ce fait, la puissance générée présente une valeur maximale de 22830.064 kW est enregistrée durant 13h30.

La figure.IV.10 présente l'évolution journalière de l'énergie générédu champs d'une semaine du mois de Juin ainsi que leur rendement.La puissance est toujours proportionnelle au l'ensoleillement solaire.

Le rendement du champs PV varie entre 55.5% noté au 7ème jour du semaine et 85% enregistré le 6ème jour du la semaine.

On constate à partir de ces résultats que la puissance générée et le rendement sont proportionnels à l'irradiation solaire.

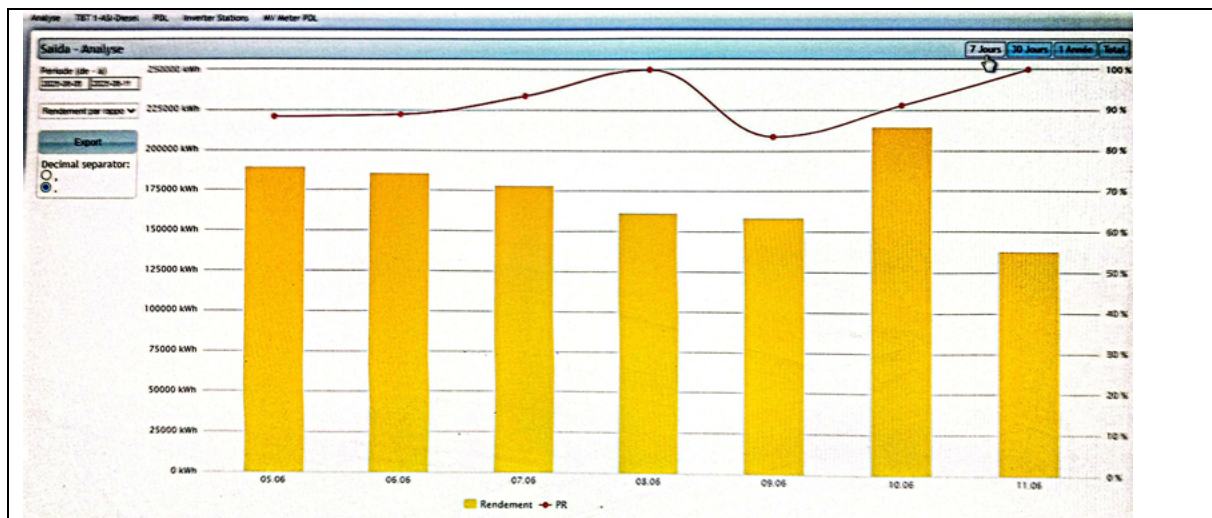


Figure.IV.10. Evolution journalière de la puissance générée et le rendement du champ PV de la centrale de Ain-Skhouna durant la semaine du mois du Juin 2025 .

La figure.IV.11 présente l'évolution Evolution journalière de la puissance générée et le rendement de la centrale PV de Ain-Skhouna durant le mois de Mai 2025. On remarque que la puissance générée et le rendement sont proportionnels à l'irradiation solaire.

Le rendement du champ photovoltaïque présente une valeur maximale de 68% enregistrée le 16ème jour du mois et une valeur minimale de 12%noté le deuxième jour dumois.

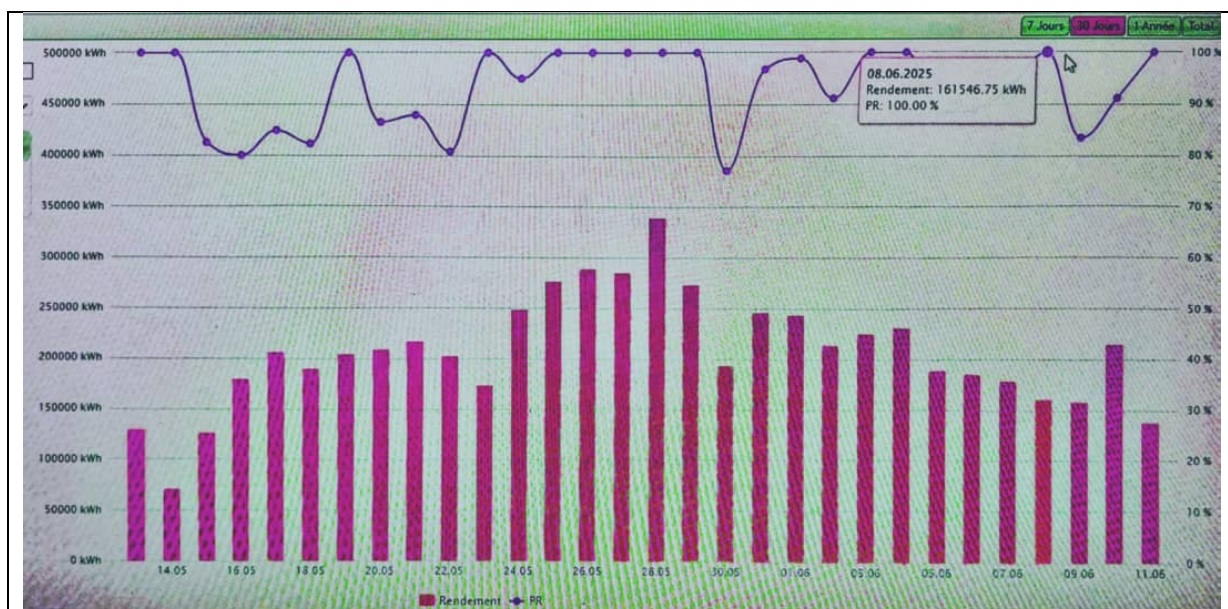


Figure.IV.11. Evolution journalière de la puissance générée et le rendement de la centrale PV de Ain-Skhouna durant le mois de Mai 2025.

On note aussi que l'algorithme de base de MPPT suivre correctement le point de puissance maximale pendant le changement rapide des conditions météorologiques et rendre le générateur PV toujours générer la puissance maximale.

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, un exemple d'application d'un système PV connecté au réseau électrique est présenté.

En effet, un aperçu général de la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna de Saida connecté au réseau de distribution a été présenté à savoir : la situation géographique, la composition (les champs solaires, les boîtes de jonctions, les onduleurs. etc, et le fonctionnement de cette centrale. Faisant le constat qu'une partie sur l'opération d'entretien et de maintenance a été également présentée. Ainsi, une étude d'analyse des performances de cette centrale PV durant les mois de Mai et Juin de l'année 2025 a été aussi effectuée.

L'étude faite de ce chapitre nous permet de noter les points suivants :

- ✓ La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) est un projet d'envergure avec une capacité de 30 MWc qui fait partie d'un programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables visant une production de 22.000MW d'électricité à l'horizon 2030. Son but est de satisfaire la demande nationale face aux besoins croissants de l'énergie électrique et de préserver la ressource en hydrocarbures du pays ;
- ✓ Elle se compose de 119 520 modules photovoltaïques de la marque CS6P-250P (silicium polycristallin) répartis en deux champs (Saïda 1 et Saïda 2) ;
- ✓ La centrale PV de Ain-Skhouna était réalisée par (**SKTM**) et elle reste toujours couverte par la garantie de la société allemande BELECTRIC, qui s'occupe aussi des missions de maintenance et d'entretien ;

D'après l'analyse des performances nous avons constaté que :

- ✓ La puissance générée et le rendement de la centrale sont proportionnels aux conditions météorologiques ce qui présente l'inconvénient majeur des sources des énergies renouvelables qui sont généralement équipées avec des systèmes de stockage ou connectés aux réseaux électriques ;
- ✓ Et que l'algorithme de base de MPPT suivre correctement le point de puissance maximale pendant le changement rapide des conditions climatiques météorologiques et rendre le générateur PV toujours générer la puissance maximale.

Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque, dont l'importance croît face aux enjeux environnementaux et énergétiques actuels.

L'Algérie a adopté programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables visant une production de 22.000MW d'électricité à l'horizon 2030. Son but est de satisfaire la demande nationale face aux besoins croissants du l'énergie électrique et de préserver la ressource en hydrocarbures du pays.

Notre étude a porté sur l'analyse des performances d'une centrale de production de l'électricité à partir de l'énergie PV connecté au réseau électrique il s'agit d'étudier la centrale PV de Ain-Skhouna de capacité de production allée jusque 30MW. La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) d'une capacité de 30 MWc est un mégaprojet qui fait partie d'un programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables. Elle s'étale sur une superficie de 42.3 ha avec 119520 panneaux photovoltaïques de type CS6P-250P (silicium poly-cristallin) réparties en deux champs Saida1 et Saida2. Elle comporte également 60 boîtes de jonctions, 30 onduleurs de type Sunny Central 850CP XT, une armoire de communication des charges et une salle de contrôle. En plus d'une station de surveillance météorologique pour la mesure des données météorologiques.

Dans une première phase, nous avons présenté les généralités sur l'énergie solaire et les principes fondamentaux de la conversion photovoltaïque. Ensuite, nous avons étudié les modèles électriques et mathématiques d'une cellule photovoltaïque, en simulant dans un premier temps une cellule à diode unique, puis un module PV de type **CS6P-250P**

(Silicium poly-cristallin) composé de 60 cellules en série installé dans la centrale de Ain-Skhouna. L'effet des paramètres tels que la température, l'éclairement sur les performances de la cellule et du module a été minutieusement analysé.

La seconde phase de notre travail a porté sur la modélisation complète d'un système photovoltaïque connecté au réseau ainsi que leur contrôle, incluant le générateur PV, les convertisseurs statiques, et le réseau électrique. Nous avons ensuite implémenté une stratégie de contrôle MPPT basée sur l'algorithme P&O pour maximiser la puissance extraite du générateur PV en fonction des conditions climatiques.

Enfin, nous avons étudié les performances de la centrale PV de Ain-Skhouna durant les mois d'Mai et Juin de l'année 2025 a été aussi effectuée, où nous avons présentés sa situation géographique et sa composition (les champs solaires, les boîtes de jonctions, les onduleurs. etc, et le fonctionnement de cette centrale. Faisant le constat qu'une partie sur l'opération d'entretien et de maintenance a été également présentée.

D'après notre étude de cette centrale L'étude faite de ce chapitre nous avons adoptés les remarques suivantes :

- ✓ La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saïda) est un projet d'envergure avec une capacité de 30 MWc qui fait partie d'un programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables visant une production de 22.000MW d'électricité à l'horizon 2030. Son but est de satisfaire la demande nationale face aux besoins croissants de l'énergie électrique et de préserver la ressource en hydrocarbures du pays ;

- ✓ Elle se compose de 119 520 modules photovoltaïques de la marque CS6P-250P (silicium poly-cristallin) répartis en deux champs (Saïda 1 et Saïda 2) ;

✓ La centrale PV de Ain-Skhouna était réalisée par (SKTM) et elle reste toujours couverte par la garantie de la société allemande BELECTRIC, qui s'occupe aussi des missions de maintenance et d'entretien ;

✓ La puissance générée et le rendement de la centrale sont proportionnels aux conditions météorologiques ce qui présente l'inconvénient majeur des sources d'énergies renouvelables qui sont généralement équipées avec des systèmes de stockage ou connectées aux réseaux électriques ;

✓ Le rendement de la centrale atteint approximativement 80% ce qui est supérieur à 80 % correspond à un système dont les performances approchent les performances idéales dans les conditions STC. On peut dire que la centrale d'Ain Skhouna présente un indice de performance très intéressant qui confirme son bon état de fonctionnement (pas de dégradation). Notant que cette centrale est classée la première dans le classement des centrales photovoltaïques en Algérie.

Références Bibliographiques

- [1] Y. Riffonneau, « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau », Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier(France),2009.
- [2] Y. Meddouret Z. Yazı, « Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique », Mémoire deMaster Académique,UniversiteKasdiMerbah Ouargla(Algérie), 2015.
- [3] D. Mohamed, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique » Thèse de Doctorat, Université de Batna(Algérie), 2008.
- [4] O.Benseddik, F. Djaloud, « Etude et optimisation d'un système PV », Mémoire de Master, Université de Ouargla(Algérie), 2012.
- [5] B. Estibals, « Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées », Université Paul Sabatier-Toulouse (France), 2010.
- [6] ADEME, Agence de la transition écologique, « Panorama des énergies renouvelables », <https://www.ademe.fr>, 2021, [consulté le 10.04.2025].
- [7] O. Planas,« Énergie solaire »,<https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/difference-solaire-thermique-photovoltaique>, 2009, [consulté le 10.04.2025].
- [8] Ministère De L'énergie Et Des Mines, « Gisement solaire en Algérie », <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie> ,2019, [consulté le 10.04.2025].
- [9] F. Sofiane et M. Siham, « Etude d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire de MASTER Académique . Université Mouloud Mammeri, Tiziouzou (Algérie), 2015.
- [10] T.Nihed&I.Kouda, « Energie Solaire Photovoltaïque Et SystemePhotovoltaïque Autonome. » Projet Fin D'étude Université Badji Mokhtar -Annaba(Algérie), 2021.
- [11] K. Benyahia, « Contribution à l'étude des performances d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) relié au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Saida (Algérie), 2018.
- [12] B. S. eddine, « Contribution A L'etude D'une Installation Photovoltaïque Avec Stockage Connectée Au Réseau Electrique »,Thèse de Doctorat, Université de Frères Mentouri-Constantine(Algérie), 2018.
- [13] G. Mohamed& K. Ali, « Protection du système photovoltaïque connecté au réseau Electrique contre le phénomène de l'îlotage », Mémoire de MASTER Académique Université de Saida Dr Tahar Moulay(Algérie), 2024.
- [14] Maysun Solar, « Comparatif des panneaux solaires Monocristallins et Polycristallins », <https://www.maysunsolar.fr/blog/monocristallin-ou-polycristallin>, 2022, , [consulté le 10.05.2025].
- [15] N. Afifah Zainal, A. Apen& and A.RazlanYusoff, «Modelling of Photovoltaic Module Using Matlab Simulink», 2nd International Manufacturing Engineering Conference and 3rd Asia-Pacific Conference on Manufacturing Systems (iMEC-APCOMS 2015),

Kuala Lumpur, Malaysia, November 2015.

- [16] A. RAHMANI, and A. Amine, « Modélisation et Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, » Mémoire de Master, Université de Ain-Temouchent-Belhadj Bouchaib(Algérie), 2022.
- [17] T. Lyes et K. Sofiane, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie), 2018.
- [18] A. Labouret et M. Viloz, « Energie solaire Photovoltaïque », Dunod, Paris(France), 2008.
- [19] O. Sidiali, C. Moncef, « Réalisation et commande d'un onduleur triphasé à deux niveaux », Mémoire de Master, Université Amar Telidji de Laghouat(Algérie) ; 2019.
- [20] Cours « Énergie Solaire Photovoltaïque » de l'Université de Bizerte, Tunisie
- [21] M. Pluviose, « Conversion d'énergie par turbomachines : Éoliennes, turbines à gaz, cogénération, cycles combinés gaz-vapeur », Editions Ellipses Paris(France), 2009.
- [22] H. MemaBabe, « Etude de la centrale photovoltaïque de Skhouna (Saida) », Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf – M'sila, 2019.
- [23] Canadian Solar Panels, « Canadian Solar CS6P-250P Solar Panels », <https://www.solarelectricsupply.com/canadian-solar-cs6p-250p-solar-panels>, 2025, , [consulté le 10.06.2025].
- [24] H. Imed, cours, « Les convertisseurs Continu/Continu : Les Hacheurs », Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [25] O. Lassaad, cours, « Les Onduleurs Autonomes », l'I.S.E.T de Bizerte(Tunisie), 2007-2025.
- [26] G. Séguier, P. Delarue et F. Labrique, « Électronique de puissance : Structures, commandes, applications », Dunod, Paris(France), 2015.
- [27] P. Barrade, « électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire », Press polytechnique et universitaires, 1ère édition Paris(France), 2006.
- [28] T. Yang, Z. Cai, and Q. Xun, « Adaptive Backstepping-Based H_{∞} Robust Controller for Photovoltaic Grid- Connected Inverter », IEEE Access, Vol. 8, pp. 17263-17272, 2019.
- [29] S. Sumathi, L. A. Kumar, and P. Surekha, Solar PV and wind energy conversion systems : an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques. Springer, 2015.
- [30] S. Bifaretti, A. Lidozzi, L. Solero, and F. Crescimbeni, « Anti-islanding detector based on a robust PLL, » IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 398-405, 2014.

- [31] I. U. Salam, M. Yousif, M. Numan, K. Zeb, and M. Billah, « Optimizing distributed generation placement and sizing in distribution systems: A multi-objective analysis of power losses, reliability, and operational constraints », *Energies*, vol. 16, no. 16, p. 5907, 2023.
- [32] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*: John Wiley & Sons, 2014.
- [33] D. Rekioua and E. Matagne, *Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control* (*Green Energy and Technology*, no. 1). Springer Science & Business Media, 2012, pp. XII, 284.
- [34] M. R. NEBBALI, M. Rafik BELABED, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque », *Mémoire de Master*, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzo (Algérie), 2017.
- [35] T. Bouguerra, « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en Alternatif », *Thèse de Magister*, Université Mentouri De Constantine 1 (Algérie), 2014.
- [36] Ministère de l'énergie, « Centrale solaire photovoltaïque de Ain Skhouana », <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>, 2019, [consulté le 01-06.2025].
- [37] A. Hebri, « Le Programme Des énergies Renouvelables En Algérie Vers Une Efficacité énergétique D'ici 2030 », *Algerian Scientific Journal Platform (ASJP)*, vol. 8, pp. 929-941, 2014, Vol. 8, Numéro 2, pp. 351-362, 2018 .
- [38] OpenStreetMap, Wikidata et Wikimedia Commons, « Centrale solaire photovoltaïque de Ain Skhouana », <https://mapcarta.com/fr/W441308984>, 2025, [consulté le 10-06.2025].
- [39] Normes nationales et documents normatifs nationaux, « NF EN IEC 61724-1 », <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-iec-617241/performances-des-systemes-photovoltaiques-partie-1-surveillance/fa201216/278067#AreasStoreProductsSummaryView>, 2021, [consulté le 14-06.2025].
- [40] Z.M, « La centrale solaire de Saïda opérationnelle en septembre », <https://www.jeune-independant.net/la-centrale-solaire-de-saïda-operationnelle-en-septembre/>, 2015, [consulté le 13-06.2025].