

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE.

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE.

Spécialité : ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Étude comparative entre un système PV à un étage et double étage
connecté au réseau électrique triphasé**

Présenté par : *Hamdaoui Mohamed Ali*
Amara Aymen

Encadrant : *ZERZOURI Nora*

Grade : *MCA*

Université d'Annaba

Jury de Soutenance :

LAKHDARA Amira	MCB	Université d'Annaba	Président
ZERZOURI Nora	MCA	Université d'Annaba	Encadrant
BAHI Tahar	Prof	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Nous tenons d'abord à remercier infiniment notre promoteur, « ZERZOURI Nora », pour ses encadrements et ses constantes orientations de notre recherche en y accordant une méticuleuse attention, ainsi que pour ses judicieux conseils, concernant l'aspect rédactionnel, qui ont contribué à alimenter notre réflexion, leurs disponibilités et leurs extrêmes amabilités malgré leurs grandes charges de travail.

On tient à remercier aussi La présidente de jury Mr « BAHY Tahar », aussi que Madame « LAKHDARA Amira » Pour avoir accepté de traiter et d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont permis que ce travail voie le jour de près ou de loin. Qu'elles soient rassurées de notre profonde reconnaissance

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents, qui sont la source de lumière

qui

m'éclaire depuis ma naissance

Ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes

les étapes de ma vie.

Mon cher père, à qui j'exprime mes sincères et éternelles

gratitudes pour son attention et son soutien

Hamdaoui Mohamed Ali

DEDICACES

*Avec une pensée profonde que je dédie ce travail
A mes très chers parents qui m'ont vivement soutenu et
encouragé tout au long de mon parcours d'études et
toute ma vie.*

*Ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes
les étapes
de ma vie.*

*Mon cher père, à qui j'exprime mes sincères et éternelles
gratitudes pour son attention et son soutien.*

A mes très précieux grands-parents, et toute ma famille.

A mes chers sœurs et frères.

A ma grand-mère que j'aime.

A mon grand-père que j'aime.

Amara Aymen

Résumé

Ce travail porte sur l'étude et le contrôle d'un générateur photovoltaïque connecté sur le réseau électrique triphasé à un étage, un composant essentiel pour l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans le réseau électrique. La topologie à un seul étage présente des avantages en termes de complexité réduite et de rendement accru par rapport aux configurations à plusieurs étages.

Le fonctionnement de ce système repose principalement sur le contrôle des puissances à injecter dans le réseau triphasé.

Des résultats de simulation sont souvent présentés pour valider l'efficacité de la commande PV- Onduleur pour assurer une connexion au réseau stable et fiable, optimiser le transfert de puissance et minimiser les impacts négatifs sur le réseau.

Mots clé : Photovoltaïques, MPPT, Onduleur, MLI, Réseau électrique.

ملخص

يركّز هذا العمل على تصميم وتحكم عاكس ثلاثي الطور مع الطاقة الكهروضوئية متصل بالشبكة الكهربائية أحادي المرحلة، وهو مكون بالغ الأهمية لدمج أنظمة الطاقة الكهروضوئية (PV) في الشبكة الكهربائية. توفر البنية أحادية المرحلة مزايا من حيث تقليل التعقيد وزيادة الكفاءة مقارنة بالأنظمة متعددة المراحل.

يعتمد تشغيل هذا النظام بشكل أساسي على تقنيات تعديل عرض النبضة (PWM) للتحكم في العاكس ثلاثي الطور. غالبًا ما يتم عرض نتائج محاكاة أو تجارب عملية للتحقق من فعالية استراتيجية PWM في تحقيق اتصال مستقر وموثوق مع الشبكة، وتحسين نقل الطاقة، وتقليل الآثار السلبية على الشبكة.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، تتبع نقطة القدرة القصوى، العاكس، تقنيات تعديل عرض النبضة، الشبكة الكهربائية.

Abstract

This work focuses on the design and control of a single-stage three-phase grid-connected solar inverter, a crucial component for integrating photovoltaic (PV) systems into the electrical grid. The single-stage topology offers advantages in terms of reduced complexity and higher efficiency compared to multi-stage configurations.

The core of this system's operation relies on Pulse Width Modulation (PWM) techniques to control the three-phase inverter.

Simulation or experimental results would often be presented to validate the effectiveness of the PWM strategy in achieving stable and reliable grid connection, optimizing power transfer, and minimizing adverse impacts on the grid.

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Inverter, PWM, Power Grid

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I - Généralités sur les systèmes photovoltaïques.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 L'énergie solaire.....	4
I.2.1 Pour quoi l'énergie solaire	4
I.2.2 L'énergie solaire en Algérie.....	5
I.3 L'énergie photovoltaïque	6
I.3.1 Définition	6
I.4 Principe de la conversion PV.....	7
I.4.1 La cellule photovoltaïque.....	8
I.5 Module photovoltaïque.....	9
I.6 Association des modules photovoltaïques.....	10
I.6.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	10
I.6.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle	11
I.6.3 Le module photovoltaïque (Association mixte).....	11
I.7 Système de conversion.....	12
I.7.1 Convertisseur continu-continu (DC-DC).....	13
I.7.2 Convertisseur continu-alternatif (DC-AC).....	13
I.7.2.1 Commande de l'onduleur	14
I.8 Classification des systèmes photovoltaïque	15
I.8.1 Système autonome	15
I.8.2 Système hybride.....	16
I.8.3 Système PV raccordée au réseau	18
I.9 Classification des Centrales photovoltaïques connectés au réseau.....	19
a) Centrales de petite taille ($P_v = 1-10 \text{ kW}$).....	19
b) Centrales de taille moyenne ($P_v = 10-100 \text{ kW}$)	19
c) Grandes centrales ($P_v \geq 500 \text{ kW}$)	19
I.10 Structure générale d'un système photovoltaïque :	19
I.10.1 Systèmes PV connecté directement au réseau :	20
I.11 Conclusion	21
Chapitre II -Modélisation de la chaine photovoltaïque	22
II.1 Introduction	23
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	23
II.2.1 Courant de court-circuit (I_{cc}).....	24
II.2.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	25
II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	25

Table des matières

II.3.1 Simulation du module	25
II.3.2 Caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	27
II.3.3 Influence de l'éclairement	27
II.3.4 Influence de la température	28
II.3.5 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV.....	29
II.3.5.1 Influence de l'association série des cellules PV.....	29
II.3.5.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV	30
II.3.5.3 Influence de l'association série / parallèle des cellules PV.....	31
II.4 Algorithmes pour le suivi de transfert maximum puissance (MPPT)	32
II.4.1 Algorithme P&O	32
II.4.2 Algorithme de conductance incrémentale.....	34
II.5 Raccordement au réseau du système de production photovoltaïque	35
II.5.1 Liaison de tension continue (DC-Link).....	35
II.5.2 Modélisation d'onduleur.....	36
II.5.3 Commande de l'onduleur.....	38
II.5.3.1 Commande par hystérésis	38
II.5.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion sinus.....	39
II.6 Filtre LR.....	39
II.7 Principes fondamentaux du contrôle vectoriel appliqué au photovoltaïque connecté au réseau	40
II.7.1 Transformée de Clarke	40
II.7.2 Transformée de Park	41
II.7.3 Contrôle vectoriel de la tension.....	42
II.7.3.1 Contrôle de phase (PLL).....	42
II.7.3.2 Contrôle des tensions.....	44
II.8 Conclusion	44
Chapitre III - Simulation global pv et reseau électrique.....	45
III.1 Introduction :.....	46
III.2 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé.....	46
III.2.1 Générateur photovoltaïque :	47
III.2.2 Bloc de maximisation de maximum de puissance :	47
III.2.3 Convertisseur DC-AC :	47
III.2.4 Filtre LC :.....	47
III.2.5 Le réseau électrique :	48
III.4 Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	54
Bibliographie.....	55

Liste des figures

Figure I. 1 taux d'ensoleillement moyen mondial, remarquablement élevé dans le nord de l'Afrique y compris l'Algérie.....	5
Figure I. 2 Panneaux photovoltaïques.....	6
Figure I. 3 Présentation schématique d'une cellule solaire.....	8
Figure I. 4 Module photovoltaïque.....	9
Figure I. 5 Câblage des cellules dans un module.....	10
Figure I. 6 Cellules identiques en série.....	11
Figure I. 7 Cellules identiques en parallèle.....	11
Figure I. 8 Groupement mixte de cellules PV.....	12
Figure I. 9 Module photovoltaïque.....	12
Figure I. 10 Structure d'un système PV autonome.....	16
Figure I. 11 structure d'un système PV hybride.....	17
Figure I. 12 Structure d'un système PV raccordé au réseau.....	18
Figure I. 13 Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur.....	20
Figure I. 14 bus à basse tension alternative.....	21
Figure II. 1 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	23
Figure II. 2 Schéma d'un champ photovoltaïque réelle.....	25
Figure II. 3 Schéma bloc du générateur photovoltaïque.....	26
Figure II. 4 Simulation de la caractéristique (I-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$).....	27
Figure II. 5 Simulation de la caractéristique (P-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$).....	27
Figure II. 6 Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairement et une Température $T=25^{\circ}C$	28
Figure II. 7 Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$	28
Figure II. 8 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série.....	29
Figure II. 9 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série.....	30
Figure II. 10 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.....	30
Figure II. 11 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.....	31
Figure II. 12 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en Série / parallèle....	31
Figure II. 13 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en Série / parallèle...	32
Figure II. 14 Diagramme de bloc algorithme Perturbe et Observe.....	33
Figure II. 15 Algorithme Perturber et Observer.....	34
Figure II. 16 Algorithme de conductance incrémentale.....	35
Figure II. 17 Figure Schéma de principe de l'onduleur.....	36
Figure II. 18 Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	37
Figure II. 19 Schéma de la commande de l'onduleur par hystérésis.....	39
Figure II. 20 Schéma de l'interface de connexion d'un onduleur au réseau électrique	40
Figure II. 21 Représentation graphique transformée de Clarke.....	40
Figure II. 22 Représentation graphique transformée de Park.....	41
Figure II. 23 Schéma de control vectoriel de la tension.....	42
Figure II. 24 Schéma de commande PLL.....	43
Figure III. 1 simulation de système PV connecté au réseau.....	46
Figure III. 2 Profil de l'Irradiation.....	48
Figure III. 3 Profil de la température.....	48
Figure III. 4 Tension du bus continue et la référence.....	49

Liste des figures

<i>Figure III. 5 Courants d'axe direct I_d et I_{dref}.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III. 6 Courants d'axe en quadrature I_q et I_{qref}.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III. 7 Puissance PV et active injectée au réseau électrique.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III. 8 Puissance réactive injectée au réseau électrique.</i>	<i>50</i>
<i>Figure III. 9 Tension à la sortie de l'onduleur.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III. 10 Tension et courant injecté au réseau électrique.</i>	<i>51</i>

Liste des tableaux

Tableau I. 1 *Radiation solaire moyenne dans les trois régions principales de l'Algérie (Ministère de l'Energie 2016).*6

Tableau II. 1 *Caractéristique électrique de module photovoltaïque.*26

Introduction générale

Introduction générale

Au cours du XX^e siècle, la consommation énergétique mondiale a connu une croissance exponentielle, principalement alimentée par une industrialisation massive. Cette expansion s'est appuyée en grande partie sur les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), dont l'exploitation intensive épuise les réserves disponibles. Parallèlement, elle engendre une importante pollution et contribue au réchauffement climatique via l'effet de serre.

Face à ces enjeux, la réduction des émissions polluantes est devenue une priorité mondiale. Pour y parvenir, il est essentiel :

1. **De favoriser les énergies renouvelables** (solaire, éolien, hydraulique, biomasse) en les intégrant massivement dans nos systèmes énergétiques.
2. **D'investir dans les innovations technologiques**, notamment dans le stockage d'énergie, l'usage de l'hydrogène vert, et les réseaux intelligents (smart grids).
3. **De sensibiliser les citoyens** et promouvoir des modes de consommation plus responsables, impliquant chacun dans la lutte contre le changement climatique.

Les énergies renouvelables constituent une réponse prometteuse à la réduction de la pollution. Parmi elles, le photovoltaïque (PV) se distingue par son niveau de maturité technologique et sa pertinence pour la production d'électricité domestique, en comparaison avec l'éolien ou l'hydraulique. Un système PV raccordé au réseau peut produire des quantités d'énergie significatives. L'électricité excédentaire injectée sur le réseau, générant des crédits qui atténuent la facture générale. La longévité des systèmes (25 à 30 ans) permet aux foyers de réduire substantiellement leurs dépenses énergétiques, souvent au-delà du coût initial d'installation. De plus, la libéralisation du marché de l'électricité entraîne des changements significatifs dans le secteur de l'énergie, ouvrant la voie à une adoption accrue de ces solutions.

Malgré ses nombreux atouts, l'énergie solaire présente quelques limites : son intensité fluctue, son fonctionnement est intermittent et son coût reste élevé. Ces caractéristiques exigent une modélisation rigoureuse visant à optimiser la production et à améliorer la performance globale du système.

Introduction générale

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier la connexion d'un générateur photovoltaïque au réseau électrique. Cette étude se décline en trois chapitres, suivis d'une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats.

Chapitre 1 – Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Dans ce premier chapitre, nous décrirons les composants typiques des systèmes photovoltaïques connectés au réseau (panneaux PV, onduleur, filtre, compteur, etc.) et expliquerons le principe de fonctionnement : conversion de l'énergie solaire en courant continu (DC), transformation en courant alternatif (AC) synchronisé avec le réseau, et injection d'une puissance adaptée selon la réglementation.

Chapitre 2 – Modélisation et commande de l'onduleur

Ce chapitre présente la modélisation dynamique du générateur photovoltaïque (courbes I-V/P-V, dépendances en température et irradiation) et l'étude de l'onduleur de tension. On détaillera la commande par modulation de largeur d'impulsions (MLI), de manière à ce que la puissance injectée dans le réseau corresponde à celle fournie par le PV. Nous aborderons également le contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking), permettant de maximiser la puissance extraite du PV en conditions variables.

Chapitre 3 – Simulation globale PV et réseau électrique

Ce dernier chapitre se concentre sur la simulation du système complet (PV, onduleur MLI et réseau électrique) sous Matlab/Simulink : mise en œuvre du contrôle MLI pour produire un courant sinusoïdal synchronisé, intégration du MPPT, et évaluation de la performance du système injecté au réseau (stabilité, réponse dynamique).

Conclusion générale

Synthèse des résultats obtenus, validation de la fiabilité de la commande adoptée, et perspectives d'amélioration technique, telles que l'optimisation des algorithmes MPPT, l'étude de topologies multi-niveaux ou l'intégration de stockage d'énergie.

Chapitre I - Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire de l'électricité par la conversion directe du rayonnement solaire en courant électrique, grâce à des cellules semi-conductrices exploitant l'effet photovoltaïque. Ce phénomène se produit lorsque les photons solaires, en frappant une jonction PN, génèrent des paires électron-trou, induisant un déplacement de charges et créant ainsi un courant continu. Les cellules sont assemblées en modules, puis en systèmes photovoltaïques de plus grande envergure, capables d'alimenter des installations variées : industrielles, collectives ou résidentielles. Le photovoltaïque se distingue nettement des autres usages de l'énergie solaire, tels que le solaire thermique qui utilise la chaleur captée pour produire de la chaleur, de l'eau chaude ou du froid et les systèmes à concentration thermodynamique (CSP), où les rayons sont focalisés sur un fluide pour produire de l'électricité via un cycle thermique. Cette diversité technologique illustre la capacité de l'énergie solaire à couvrir un large spectre de besoins énergétiques, depuis la chaleur domestique jusqu'à l'électricité industrielle, en passant par l'alimentation de réseaux intelligents ou des sites isolés. [1].

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire provient des rayons du soleil, composés de photons qui transportent l'énergie lumineuse. L'expression "énergie solaire" désigne aujourd'hui l'énergie lumineuse et thermique captée à partir du rayonnement solaire qui atteint la Terre. Considérée comme une ressource inépuisable et faisant partie des énergies renouvelables, l'énergie solaire est utilisée pour chauffer des bâtiments ou de l'eau via des capteurs thermiques, ainsi que pour produire de l'électricité. Actuellement, ses principales applications sont l'énergie solaire thermique et l'énergie photovoltaïque.

I.2.1 Pour quoi l'énergie solaire

La production d'électricité photovoltaïque trouve ses origines dans des utilisations autonomes, notamment pour alimenter des satellites et des habitations isolées. Progressivement, le photovoltaïque s'est démocratisé et intégré dans de nombreuses applications quotidiennes : calculatrices, montres, lampes solaires, pompes ou systèmes de télécommunication. Une seule cellule photovoltaïque suffit souvent à alimenter de faibles charges en courant continu. Plus récemment, l'essor des installations photovoltaïques raccordées au réseau a permis à cette technologie de passer d'un usage

marginal à une source d'électricité à grande échelle, rentable et intégrée, grâce à l'interconnexion des onduleurs au réseau de distribution.

I.2.2 L'énergie solaire en Algérie

L'Algérie, grâce à sa position géographique en Afrique du Nord et à son immense superficie de 2,4 millions de km², bénéficie d'un gisement solaire exceptionnel. Avec un ensoleillement annuel moyen de plus de 2 600 heures sur les côtes et pouvant excéder 3 500 heures dans le sud, ce potentiel représente une opportunité majeure pour le développement des énergies renouvelables. Pour exploiter ce potentiel, le ministère de l'Énergie a confié à la SONELGAZ la réalisation d'un projet de fourniture d'énergie photovoltaïque pour les zones isolées. Ce projet vise à améliorer l'accès à l'électricité des populations rurales non desservies par le réseau national. Depuis 2019, la capacité installée de kits solaires photovoltaïques dans ces zones a doublé, atteignant 23,06 MW à la fin de 2023. Ces installations comprennent des systèmes pour l'éclairage public, le pompage solaire et des mini-réseaux hybrides PV/diesel. En 2023, la capacité installée d'éclairage public solaire a augmenté de 447 %, atteignant 14,4 MW, tandis que la capacité des kits solaires photovoltaïques a augmenté de 19,3 %, avec 3,73 MW installés cette année-là. Parallèlement, la SONELGAZ a lancé des projets de grande envergure pour développer l'énergie solaire à l'échelle nationale. En 2023, l'entreprise a ouvert les plis pour un projet de 2 000 MW d'électricité solaire photovoltaïque, répartis sur 15 centrales dans 12 wilayas, avec des puissances unitaires variant entre 80 et 220 MWc. Ce projet s'inscrit dans un programme plus large visant à atteindre 15 GW d'énergie solaire photovoltaïque d'ici 2035. [2]

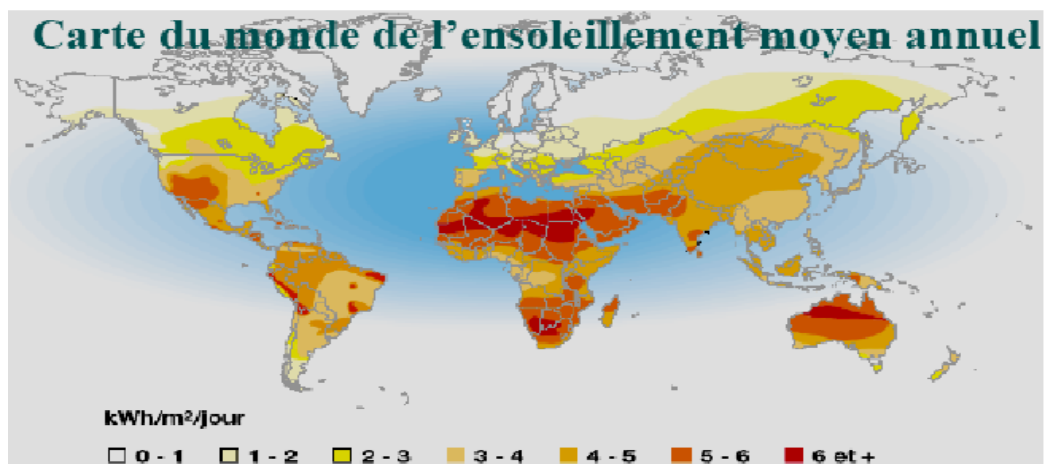


Figure I. 1 taux d'ensoleillement moyen mondial, remarquablement élevé dans le nord de l'Afrique y compris l'Algérie.

Région	Sahara	Nord	Hauts plateaux
Radiation solaire moyenne ($kW\ h/m^2an$)	3000	1800	2200

Tableau I. 1 Radiation solaire moyenne dans les trois régions principales de l'Algérie (Ministère de l'Energie 2016).

I.3 L'énergie photovoltaïque

I.3.1 Définition

Un système photovoltaïque intègre des modules solaires et divers composants du "balance du système" (BOS) pour adapter l'énergie générée aux besoins de l'utilisateur. Le BOS comprend notamment la structure de montage (fixe ou mobile), le câblage, le stockage sur batterie avec son régulateur de charge, et un onduleur pour les applications en courant alternatif. Ces éléments, connectés aux bornes des modules, forment un "système photovoltaïque" dont la conception est flexible selon l'application, permettant d'utiliser de multiples façons l'énergie continue produite par les modules [3].



Figure I. 2 Panneaux photovoltaïques.

L'histoire du photovoltaïque est marquée par des découvertes scientifiques fondamentales et des avancées technologiques majeures. Voici une chronologie des étapes clés :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, phénomène selon lequel la lumière génère de l'électricité dans les matériaux solides.

Chapitre I - Généralités sur les systèmes Photovoltaïques

- **1873** : Willoughby Smith observe la photoconductivité du sélénium, un matériau qui deviendra essentiel pour les premières cellules solaires.
- **1877** : W.G. Adams et R.E. Day confirment l'effet photovoltaïque sur le sélénium solidifié.
- **1905** : Albert Einstein explique le phénomène de l'effet photoélectrique, pour lequel il recevra le prix Nobel de physique en 1921.
- **1954** : Les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller des Bell Labs développent la première cellule solaire en silicium avec un rendement de 6 %, marquant le début de l'ère moderne du photovoltaïque. **1958** : Le satellite Vanguard I devient le premier satellite à être alimenté par des cellules photovoltaïques.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

Ces étapes illustrent l'évolution du photovoltaïque, passant d'une curiosité scientifique à une technologie clé pour la production d'énergie renouvelable.

I.4 Principe de la conversion PV

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore). [5]

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). [5]

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés Figure (I.3). [5]

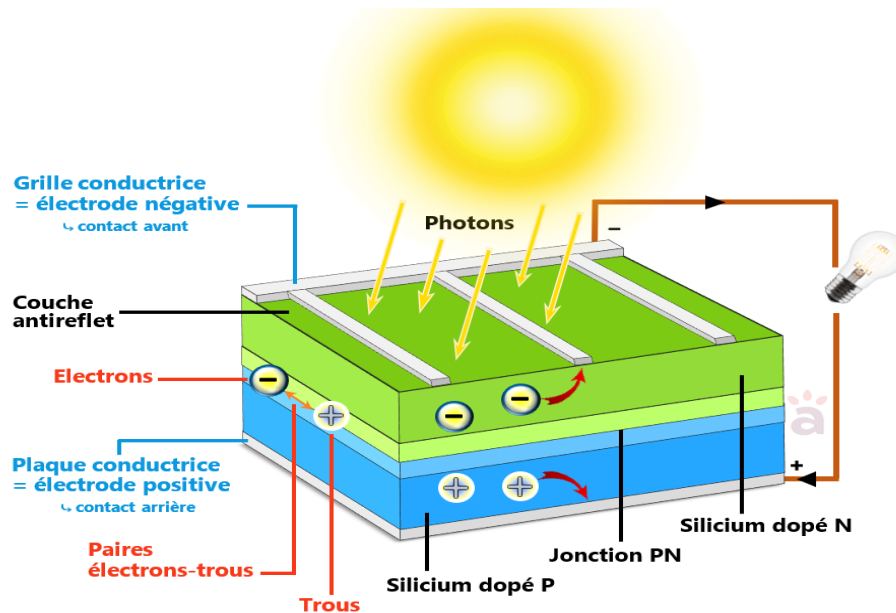


Figure I. 3 Présentation schématique d'une cellule solaire.

I.4.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui convertit directement l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elle repose sur trois mécanismes fondamentaux, lorsque la lumière solaire frappe la cellule, les photons (particules de lumière) pénètrent dans le matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Si l'énergie d'un photon est suffisante pour dépasser le "gap" énergétique du matériau, il peut exciter un électron, le libérant ainsi de son atome et créant une paire électron-trou. Les électrons excités se déplacent librement dans le matériau, tandis que les trous (manques d'électrons) se comportent comme des charges positives mobiles. Cette génération de porteurs de charge est essentielle pour la production d'électricité. Pour extraire efficacement l'énergie générée, un champ électrique est nécessaire pour séparer les électrons et les trous c'est là qu'intervient la jonction p-n. La jonction entre ces deux couches crée un champ électrique interne qui dirige les électrons vers l'électrode négative et les trous vers l'électrode positive, générant ainsi un courant électrique continu. [5]

I.5 Module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque individuelle génère une faible puissance, généralement inférieure à 1 watt, avec une tension d'environ 0,5 à 0,6 V. Pour répondre aux besoins énergétiques domestiques ou industriels, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont connectées entre elles de deux manières :

- **En série** : Les tensions des cellules s'ajoutent, tandis que le courant reste constant. Par exemple, une série de 36 cellules peut fournir une tension de 12 V, adaptée aux applications domestiques.
- **En parallèle** : Les courants des cellules s'ajoutent, tandis que la tension reste constante. Cette configuration est utilisée pour augmenter le courant disponible tout en maintenant une tension stable.

Ces modules sont ensuite encapsulés entre des couches de verre et de polymère pour les protéger des intempéries et des dommages mécaniques. Ils sont également équipés de boîtiers de jonction avec des diodes de dérivation pour prévenir les effets de surchauffe en cas d'ombrage partiel. Plusieurs modules photovoltaïques sont connectés entre eux pour former un champ photovoltaïque. Ces modules peuvent être disposés en série et en parallèle pour obtenir la puissance et la tension souhaitées. Par exemple, une installation résidentielle typique peut comporter des modules de 60 à 72 cellules, produisant entre 250 et 400 watts-crête (Wc) chacun, selon les conditions d'ensoleillement et de température [6].



Monocrystallines

Multi cristallines

Couche mince

Figure I. 4 Module photovoltaïque.

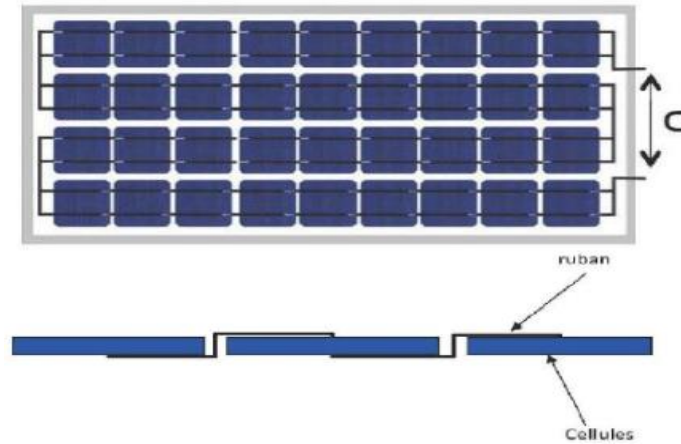


Figure I. 5 Câblage des cellules dans un module.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

I.6 Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent en dommage les cellules de façon permanente [7].

Ainsi, pour n_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes n_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (I.1)$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV, V_{pv} : la tension à la sortie du GPV, I_{pv} : le courant de sortie du GPV.

I.6.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Une association de n_s cellule en série figure (I.6) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la

caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de n_s cellules [8].

$$V_{sco} = n_s V_{co} I_{scc} = I_{cc} (I.2)$$

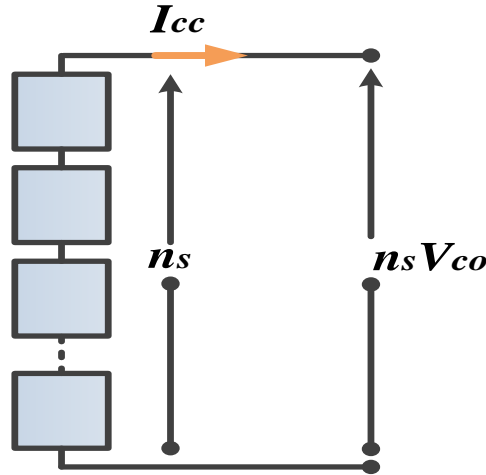


Figure I. 6 Cellules identiques en série.

I.6.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Une association parallèle de n_p cellule figure (I.7) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [9].

$$V_{pco} = V_{co} I_{pcc} = n_p I_{cc} (I.3)$$

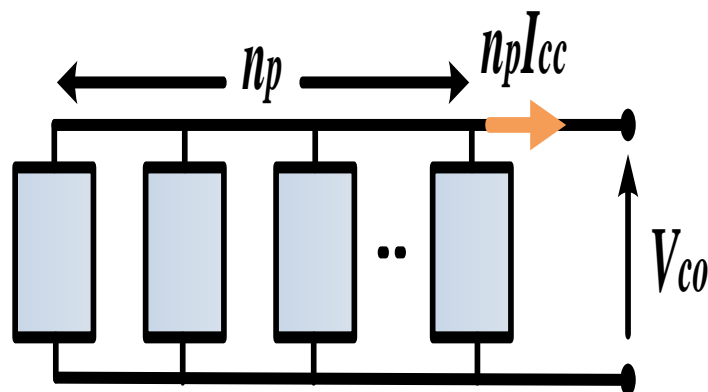


Figure I. 7 Cellules identiques en parallèle.

I.6.3 Le module photovoltaïque (Association mixte)

Chapitre I - Généralités sur les systèmes Photovoltaïques

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque.

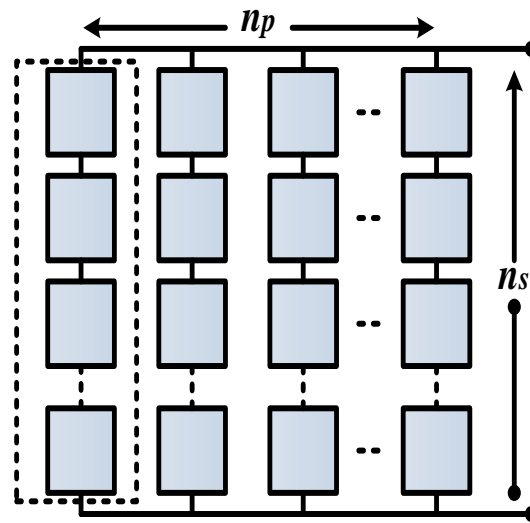


Figure I. 8 Groupement mixte de cellules PV.

L'association mixte de plusieurs cellules photovoltaïques forme un module (appelé aussi panneau solaire).



Figure I. 9 Module photovoltaïque.

I.7 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de

convertisseur continu-continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif). [10]

L'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.

I.7.1 Convertisseur continu-continu (DC-DC)

Le convertisseur continu-continu est utilisé pour ajuster la tension du courant continu (CC) produit par les panneaux solaires ou stocké dans les batteries. Il permet d'optimiser la compatibilité avec les équipements alimentés ou de préparer l'énergie pour une conversion ultérieure en courant alternatif. Ce type de convertisseur est couramment employé dans les installations photovoltaïques autonomes, où l'énergie est stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure

Ce système a deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges. [5]

I.7.2 Convertisseur continu-alternatif (DC-AC)

L'onduleur est un dispositif clé dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ou pour l'autoconsommation. Il transforme le courant continu (CC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA), adapté aux besoins domestiques ou au réseau électrique. Cette conversion est cruciale, car la majorité des appareils électriques et du réseau fonctionnent en courant alternatif.

- Conversion CC-CA : L'onduleur utilise des composants électroniques, tels que des transistors ou des thyristors, pour inverser la polarité du courant continu, produisant ainsi un courant alternatif.

Chapitre I - Généralités sur les systèmes Photovoltaïques

- Suivi du point de puissance maximale (MPPT) : Pour maximiser la production d'énergie, l'onduleur ajuste en temps réel le point de fonctionnement des panneaux solaires afin d'extraire la puissance maximale disponible, en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.
- Protection et sécurité : L'onduleur intègre des mécanismes de sécurité pour éviter l'injection d'électricité dans le réseau en cas de coupure, protégeant ainsi les techniciens intervenant sur les lignes électriques.

Dans les systèmes avec stockage, un redresseur est utilisé pour convertir le courant alternatif (CA) en courant continu (CC), permettant ainsi de charger les batteries. Ce processus est essentiel pour stocker l'énergie excédentaire produite pendant la journée, afin de l'utiliser pendant la nuit ou lors de périodes nuageuses. [11]

L'ensemble du système de conversion, comprenant le convertisseur continu-continu, l'onduleur et le redresseur, forme un maillon essentiel dans une installation photovoltaïque. Il assure non seulement la conversion efficace de l'énergie, mais aussi la sécurité, la gestion de l'énergie et l'optimisation des performances du système.

I.7.2.1 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées : [12]

- commande par hystérésis
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

a) Commande par hystérésis : Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence.

Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation. En pratique, on utilise la différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur : [12]

b) Commande MLI : L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques

de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. [6]

I.8 Classification des systèmes photovoltaïque

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir :

- Autonome
- Hybride
- Raccordée au réseau

I.8.1 Système autonome

Une installation photovoltaïque autonome est un système de production d'électricité indépendant, conçu pour fournir de l'énergie dans des zones non raccordées au réseau électrique. Ces installations sont particulièrement adaptées aux régions isolées, aux habitations secondaires, aux infrastructures rurales, ainsi qu'aux applications professionnelles ou humanitaires.

Un tel système repose sur les éléments suivants :

- Panneaux photovoltaïques : ils captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité en courant continu (CC).
- Régulateur de charge : il gère le flux d'énergie vers les batteries, protégeant ces dernières contre les surcharges et les décharges profondes.
- Batteries de stockage : elles emmagasinent l'énergie excédentaire produite pendant la journée pour une utilisation nocturne ou lors de périodes de faible ensoleillement.
- Onduleur : il transforme le courant continu stocké en courant alternatif (CA), compatible avec les appareils électriques domestiques.

En cas de faible production solaire, un générateur de secours peut être intégré pour assurer une alimentation continue. En Algérie, les systèmes photovoltaïques autonomes

sont particulièrement adaptés aux régions désertiques et montagneuses, où le raccordement au réseau est difficile ou coûteux. Des projets tels que la centrale solaire de Béchar illustrent l'engagement du pays dans le développement de l'énergie solaire.

Une installation photovoltaïque autonome offre une solution fiable, écologique et économique pour fournir de l'électricité dans des zones non raccordées au réseau, en s'appuyant sur l'énergie solaire et des technologies de stockage adaptées.[13]

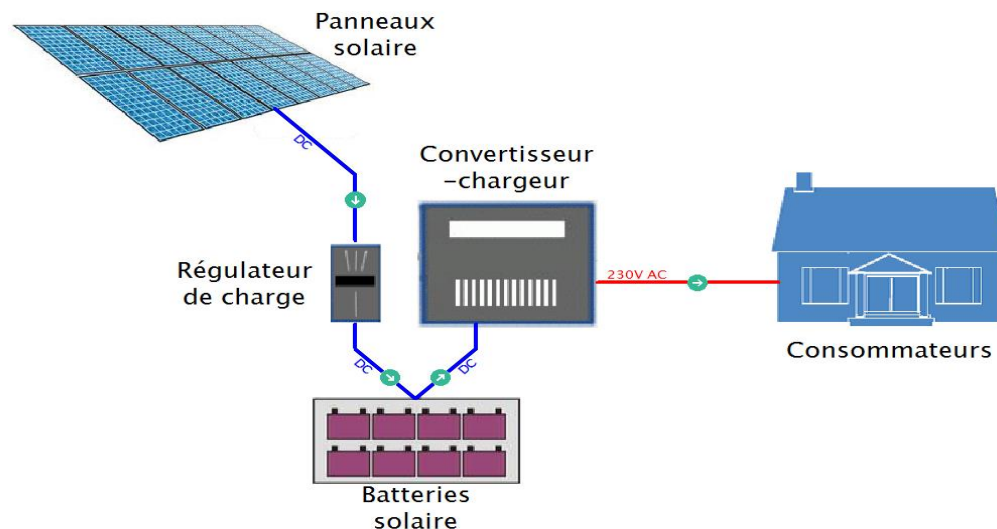


Figure I. 10 Structure d'un système PV autonome.

I.8.2 Système hybride

Un système hybride combine plusieurs sources d'énergie indépendantes du réseau électrique pour assurer une alimentation continue, fiable et optimisée. Typiquement, un tel système associe un générateur photovoltaïque (PV) à une ou plusieurs autres sources, telles que :

- Éolienne : exploite l'énergie cinétique du vent.
- Groupe électrogène à combustible fossile : utilise des carburants comme le diesel ou l'essence.
- Réseau public d'électricité : en cas de disponibilité.
- Microcentrale hydraulique : exploite l'énergie de l'eau en mouvement.

Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant une alimentation continue de puissance élevée, telles que les hôpitaux, les écoles, les infrastructures de télécommunication, les installations industrielles ou les villages

isolés. Le principe de fonctionnement repose sur la complémentarité des différentes sources d'énergie :

- Production d'énergie : chaque source génère de l'électricité selon sa disponibilité (ensoleillement, vent, etc.).
- Stockage : l'énergie excédentaire est stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure.
- Gestion intelligente : un système de contrôle (souvent basé sur un microcontrôleur ou un automate programmable) régule la distribution de l'énergie, priorisant les sources renouvelables et activant les sources fossiles ou le réseau en cas de besoin.

Cette gestion optimise l'efficacité énergétique, réduit les coûts opérationnels et prolonge la durée de vie des équipements. L'Algérie, avec ses vastes zones désertiques et rurales, bénéficie d'un fort potentiel en énergies renouvelables. Des projets tels que la centrale hybride de Hassi R'Mel, combinant énergie solaire et thermique, illustrent l'engagement du pays vers une diversification énergétique. De plus, des études menées par des institutions algériennes, comme l'Université de Béjaïa, ont exploré l'optimisation de systèmes hybrides éolien-photovoltaïque pour des sites isolés, mettant en évidence les avantages techniques et économiques de telles configurations.

Les systèmes hybrides représentent une solution efficace et durable pour répondre aux besoins énergétiques des zones non raccordées au réseau, en combinant intelligemment diverses sources d'énergie renouvelables et fossiles.

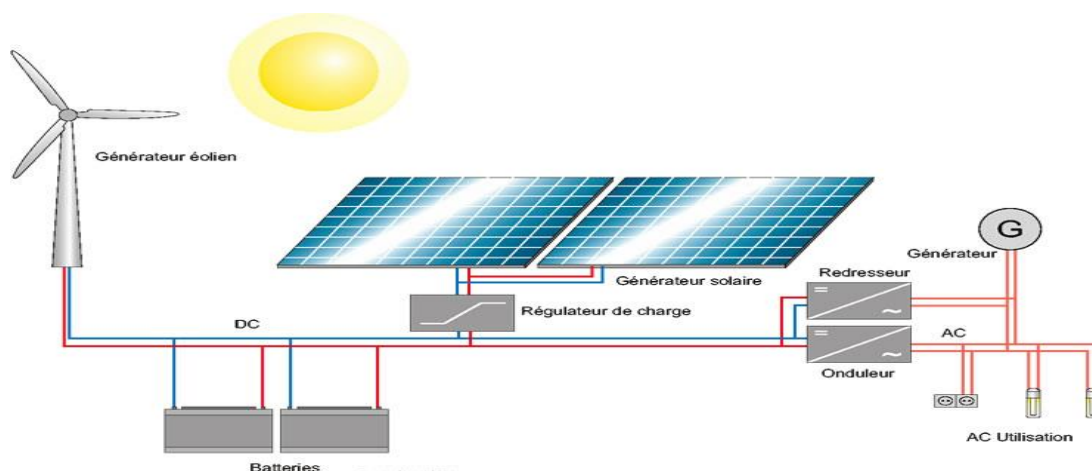


Figure I. 11 structure d'un système PV hybride.

I.8.3 Système PV raccordée au réseau

Les modules PV sont reliés en série pour créer des strings, puis plusieurs strings peuvent être connectés en parallèle pour ajuster courant et tension. Chaque string est connecté à un onduleur, adapté en puissance pour dissocier le courant continu (CC) en courant alternatif (CA) synchronisé avec le réseau. L'onduleur à plusieurs rôles :

- Il convertit la tension continue des panneaux en 230 V CA ou 400 V triphasé, selon la taille de l'installation.
- Il intègre un suivi MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour optimiser la production solaire selon les conditions d'ensoleillement et température.
- Il assure la sécurité : en cas de panne du réseau, il s'arrête automatiquement pour éviter tout retour de courant vers le réseau, protégeant ainsi les intervenants.

Un système PV raccordé au réseau permet :

- de produire et consommer localement la quantité d'électricité solaire générée ;
- de revendre facilement l'éventuel surplus via comptage net ou injection ;
- de réduire les coûts d'installation et d'entretien grâce à l'absence de stockage par batterie ;
- mais il reste dépendant du réseau : il ne fournit pas d'énergie en cas de coupure et sa performance est soumise à l'ensoleillement.

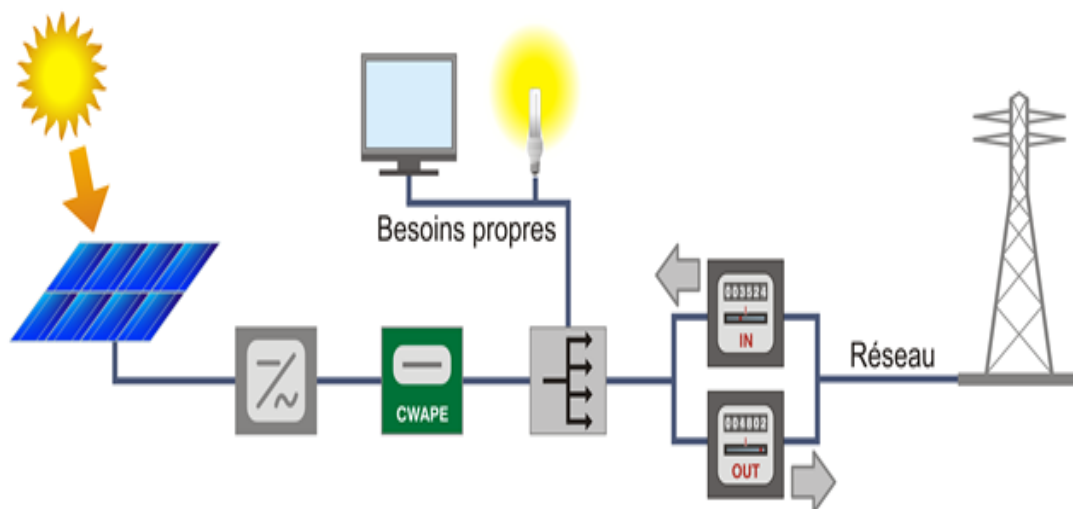


Figure I. 12 Structure d'un système PV raccordé au réseau.

I.9 Classification des Centrales photovoltaïques connectés au réseau

La classification des centrales PV connectées au réseau peut être réalisée selon leur puissance installée (P_v) :

a) Centrales de petite taille ($P_v = 1\text{--}10\text{ kW}$)

- Destinées aux habitations, écoles, parkings, etc.
- Raccordées au réseau basse tension (BT).
- Typiquement intégrées sur toits ou façades de petits bâtiments

b) Centrales de taille moyenne ($P_v = 10\text{--}100\text{ kW}$)

- Installées sur toits ou façades d'immeubles publics, industriels ou commerciaux.
- Raccordement possible en basse ou moyenne tension (BT/MT), selon la puissance et la configuration du réseau.

c) Grandes centrales ($P_v \geq 500\text{ kW}$)

- Implémentées à grande échelle sur le sol, souvent par des compagnies d'électricité.
- Raccordées en moyenne ou haute tension (MT/HT).
- Ces systèmes centralisés peuvent être équipés avec ou sans stockage par batteries

I.10 Structure générale d'un système photovoltaïque :

En plus la structure d'un système PV connecté au réseau avec batterie et sans batterie, on peut classer deux types de structure générale :

- **Systèmes de connexion réseau directe** : ce système se compose de générateur Photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur réseau électrique.
- **L'intermédiaire système de bus continu intermédiaire** : Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC. Un onduleur délivre une tension modulée, elle est filtrée pour réduire le taux d'harmoniques, on obtient alors en sortie de ce dispositif une puissance utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

Il existe différentes architectures pour les dispositifs permettant de convertir de la tension continue issue du générateur PV à une tension sinusoïdale utilisable (230V). Dans le reste de cette section, différentes dispositions seront décrites en précisant leurs avantages et leurs inconvénients.

I.10.1 Systèmes PV connecté directement au réseau :

a) Structure à convertisseur unique

Les modules PV sont directement reliés à un onduleur DC-AC (connecté au réseau), sans passage par un convertisseur intermédiaire. Un seul onduleur, adapté à la puissance totale des strings PV (central ou string inverter). L'avantage de ce type de connexion est qu'il y a moins de composants, donc coût réduit, simplicité et rendement élevé. Les inconvénients sont que la tension du lien CC doit être au moins égale à la tension réseau (350–450 V CC, voire >600 V pour 400 V AC) et moins de flexibilité face aux ombrages ou disparités entre strings : chaque string suit le même MPPT. [12]

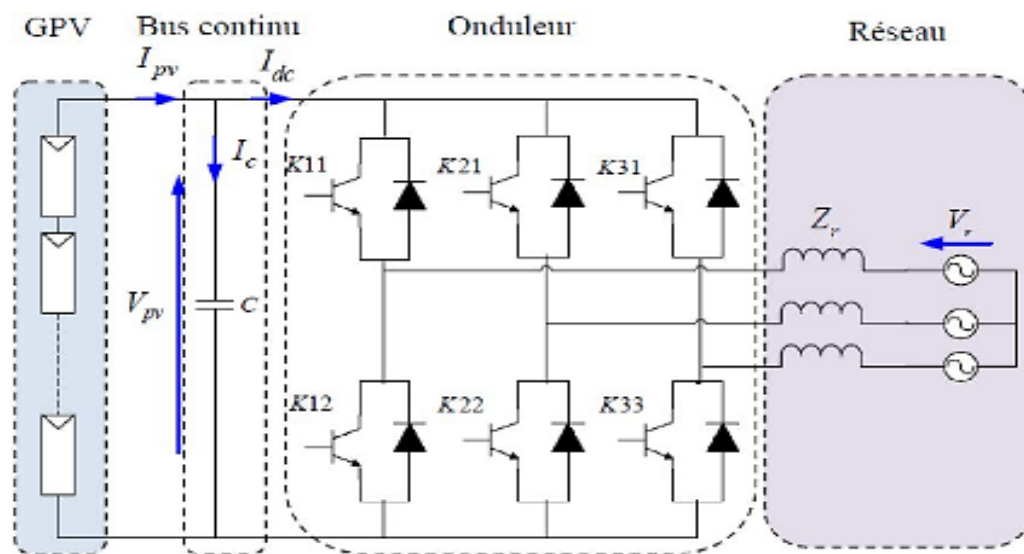


Figure I. 13 Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur.

b) Structure avec bus à basse tension alternatif

La figure (I.14) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est connecté directement au module photovoltaïque. La tension de sortie de ce dernier est transformée en une tension de fréquence 50 Hz alternatif. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V - 50 Hz, par exemple de schéma) vers un transformateur central qui élève le niveau désiré.

Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, car elle assure la sécurité du personnel. Toutefois, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joule. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternative.

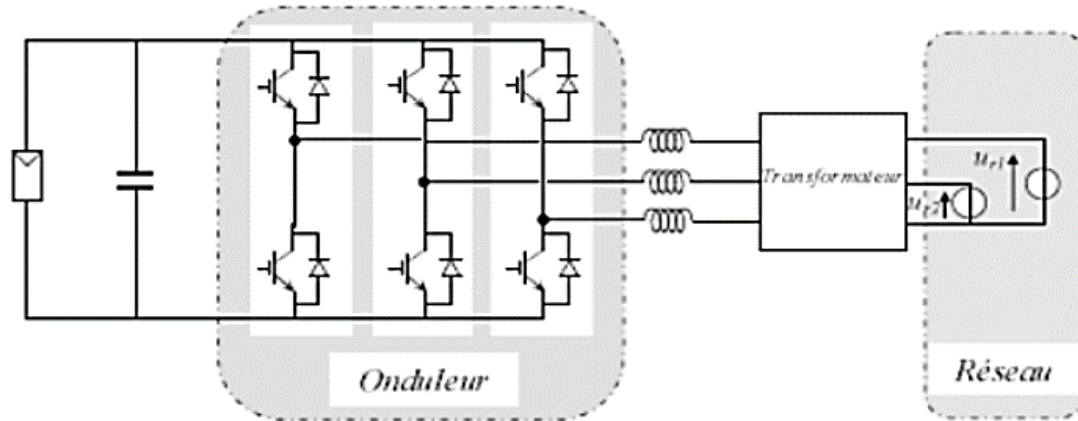


Figure I. 14 bus à basse tension alternative.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un aperçu sur les différentes notions de l'énergie photovoltaïque et de la constitution d'un système photovoltaïque connecté au réseau, ainsi que les principes de fonctionnement de chaque élément ce système. Ce qui permet d'introduire à la modélisation et l'analyse de notre système, ce qui on va voir dans le 2ème chapitre.

Chapitre II - Modélisation de la chaîne photovoltaïque

II.1 Introduction

La modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles pour évaluer la caractéristique de chaque élément de la chaîne PV ainsi les paramètres constitutants, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite. Dans ce chapitre, nous représentons les convertisseurs DC-AC (onduleurs), en particulier l'onduleur triphasé utilisé dans ce travail.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistif parasite dû à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances figure (II.1) [16].

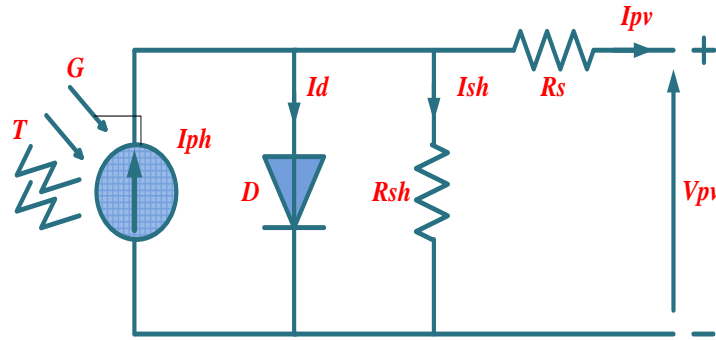


Figure II. 1 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

Dans la figure (III.1) la source de courant génère un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement G [W/m^2]. La résistance shunt R_{sh} caractérise le courant de fuite au niveau de la jonction et la résistance R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion.

Le courant I_{pv} fourni par la cellule est la différence entre le courant I_{ph} et le courant de la diode I_d

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

A partir de ce circuit, on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{n K T} \right) - 1 \right] \quad (II.2)$$

Le courant dans la résistance R_{sh} est donné par :

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

A partir de l'équation (III.1), on obtient l'expression de la caractéristique courant-tension I-V du modèle choisi [5] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{n K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A).

n : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque.

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

q : Charge d'électron.

T : Température absolue de la cellule (K).

V_{pv} : la tension aux bornes de la cellule.

Le photo-courant I_{ph} est donné par :

$$I_{ph} = [I_{ccr} + K_i(T - T_r)] \frac{G}{G_r} \quad (II.5)$$

I_{cc} : courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_r et

l'éclairement de référence G_r , T : Température de la jonction des cellules PV [K].

K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit, G : Rayonnement solaire.

II.2.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou au générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension ($V_{pv} = 0$) dans l'équation (II.5), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(R_s I_{cc})}{n K T} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} \cong I_{ph}$).

II.2.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photocourant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$) quand $I_{pv} = 0$ elle reflète la tension de la cellule en absence de la lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_{cc}} + 1 \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_{cc}} + 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

$V_t = \frac{nKT}{q}$: est la tension thermique et T_c est la température absolue.

II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Le circuit équivalent pour un module solaire disposé d'un nombre n_s des cellules montées en série et d'un nombre n_p des cellules montées en parallèle est représenté sur la figure (II.2) :

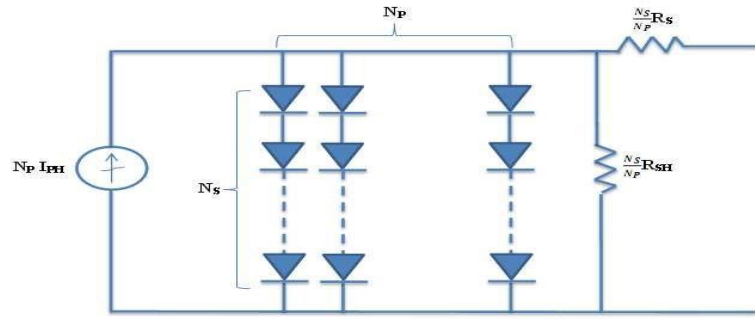


Figure II. 2 Schéma d'un champ photovoltaïque réelle.

L'équation caractéristique de champ est donnée par :

$$I_{pv} = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s (n_s/n_p) I_{pv})}{n \cdot n_s \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s (n_s/n_p) I_{pv}}{R_{sh} \cdot n_s / n_p} \quad (\text{II.7})$$

Avec : n_s : les nombre des modules en séries , n_p : les nombre des modules en parallèle.

II.3.1 Simulation du module

Pour réaliser cette modélisation, Nous avons choisi le module photovoltaïque. Le module est composé de 60 cellules solaires multi cristallines en silicone de 36.3 V connectées en série pour produire une puissance maximale de 213.15Wc.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque dans les conditions STC sont données dans le tableau suivant :

1Soltech 1STH-215P	
Température aux conditions standards, T	25°C
Eclairement aux conditions standard, E	1000W/m ²
Tension de circuit ouvert, V_{co}	36.3 V
Courant de court-circuit, I_{cc}	7.84 A
Puissance maximale, P_m	213.15W
Tension au point de la puissance maximale, V_m	29 V
Courant au point de la puissance maximale, I_m	7.35 A
Nombres des cellules	60

Tableau II. 1 Caractéristique électrique de module photovoltaïque.

On peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc figure (II.3) comportant quatre paramètres.

Deux variables d'entrées qui sont :

L'irradiation G (W/m²) et la température de jonction des cellules T_j (°C) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV I_{PV} (A), tension aux bornes du GPV V_{PV} (V).

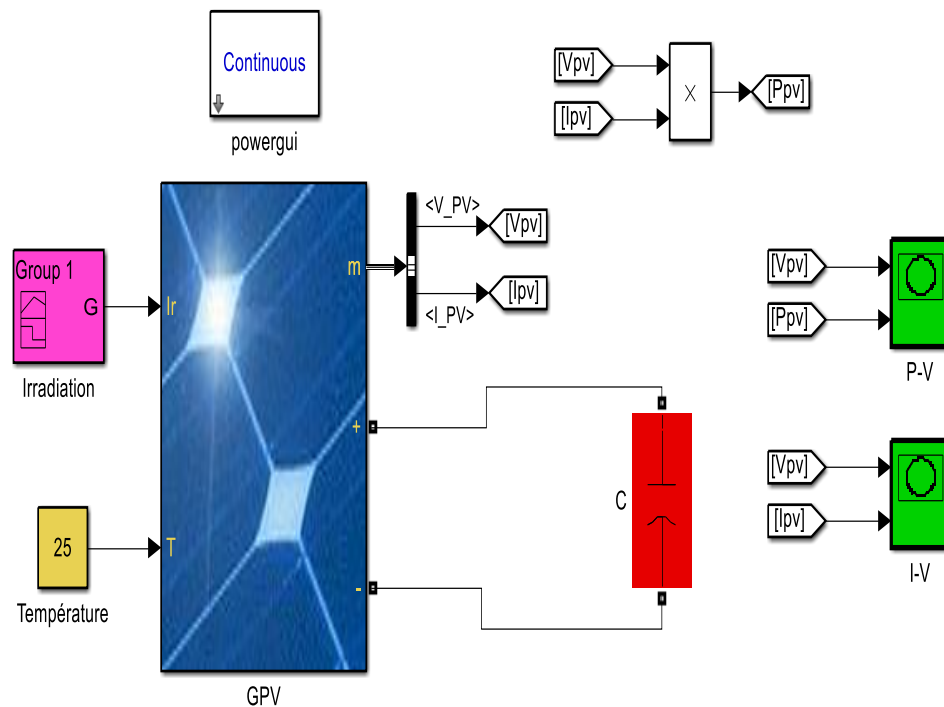


Figure II. 3 Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

II.3.2 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

a. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque à l'allure de la figure (II.4)

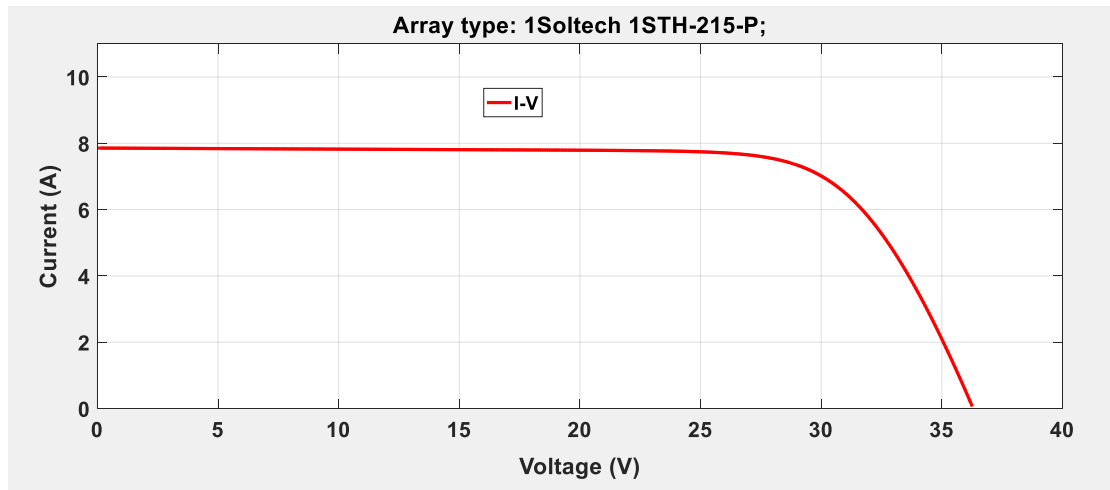


Figure II. 4 Simulation de la caractéristique (I-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

b. Caractéristique Puissance-tension

La caractéristique puissance- tension d'un module solaire à l'allure de la figure (II.5)

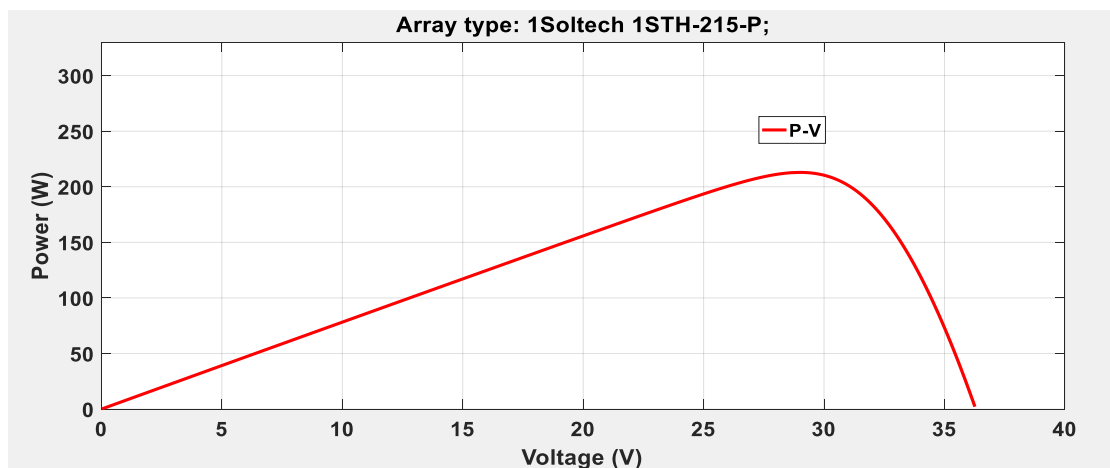


Figure II. 5 Simulation de la caractéristique (P-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

II.3.3 Influence de l'éclairement

La figure (II.6) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V. A une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) en fonction de la variation de l'éclairement ($G=1000, 800, 600, 300\text{ W/m}^2$).

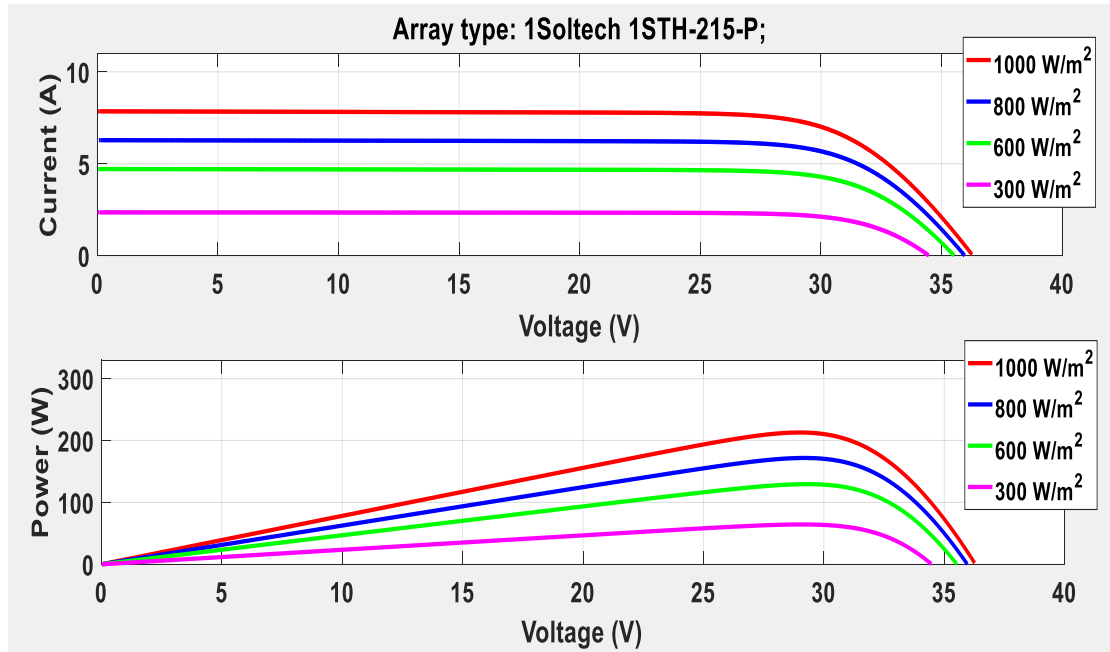


Figure II. 6 Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairement et une Température $T=25^{\circ}\text{C}$.

II.3.4 Influence de la température

La figure (II.7) ci-dessous représentent la caractéristique I-V et P-V dans la même condition de l'éclairement ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et pour différents température ($T=10, 25, 45, 60^{\circ}\text{C}$).

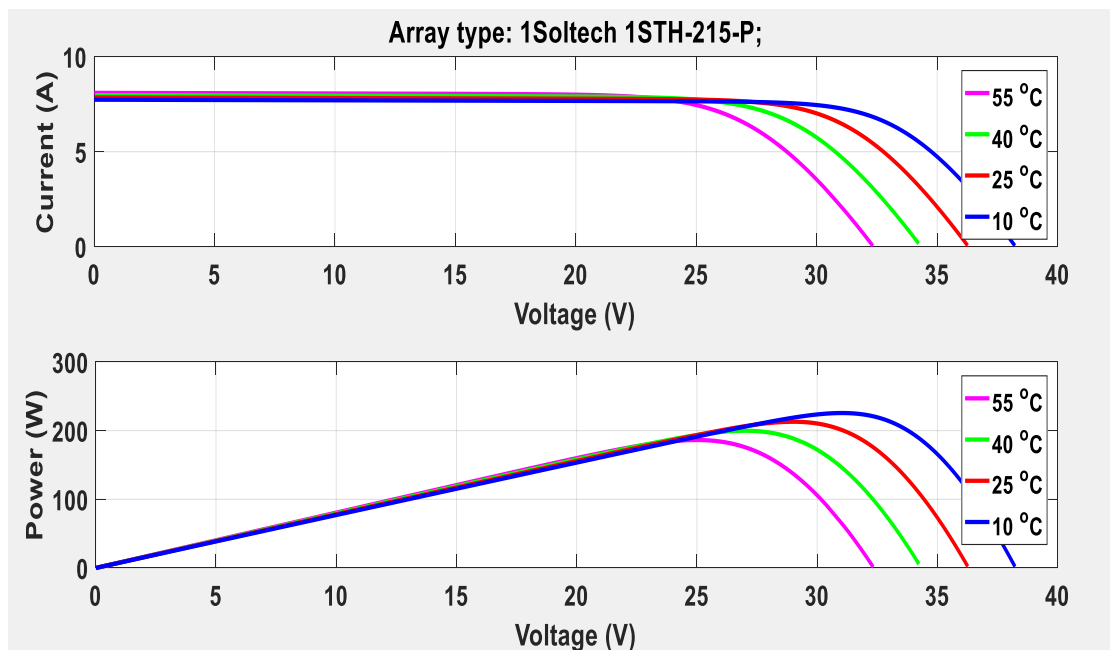


Figure II. 7 Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$.

Interprétations des Résultats : Les figures (II.6) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension.

- On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle au rayonnement, par contre la tension varie légèrement et l'augmentation de l'éclairement se traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale. Les figures (II.7) montrent l'influence de la température sur les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension.
- On remarque que la tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

II.3.5 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV

La cellule tout de seule ne produit qu'une très faible puissance avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un générateur. Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et /ou parallèle des cellules.

II.3.5.1 Influence de l'association série des cellules PV

Les figures (II.8) et (II.9) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série :

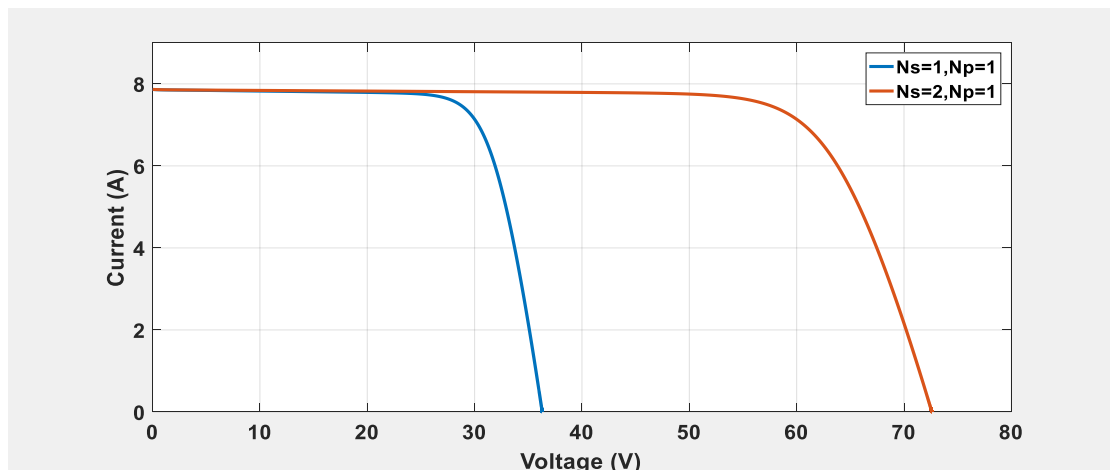


Figure II. 8 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série.

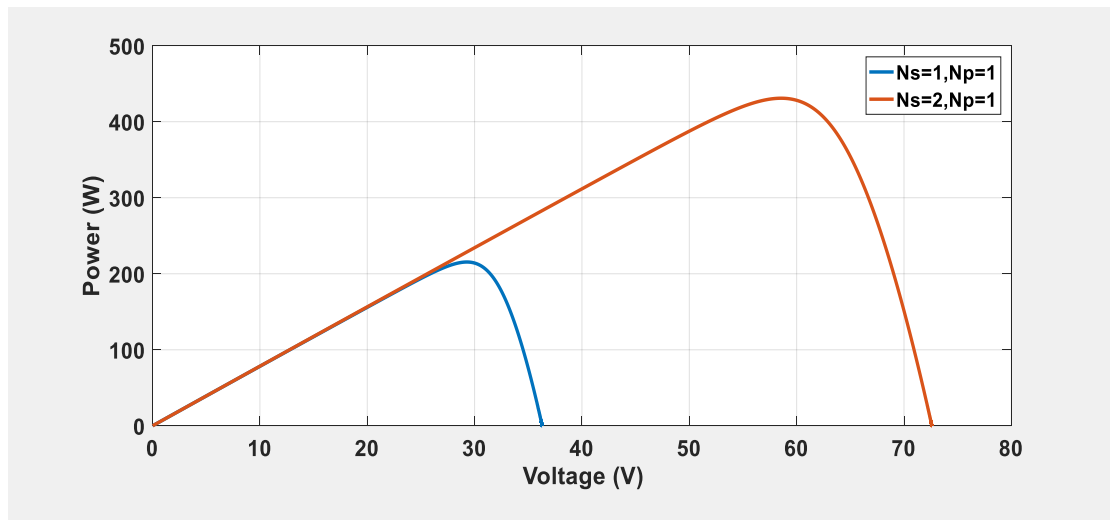


Figure II. 9 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série.

La tension de circuit ouvert augmente quand le nombre de cellule en série augmente, la valeur de courant de court-circuit n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en série alors que la puissance augmente.

II.3.5.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV

Les figures (II.10) et (II.11) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en parallèle :

Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de La tension de circuit ouvert n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente.

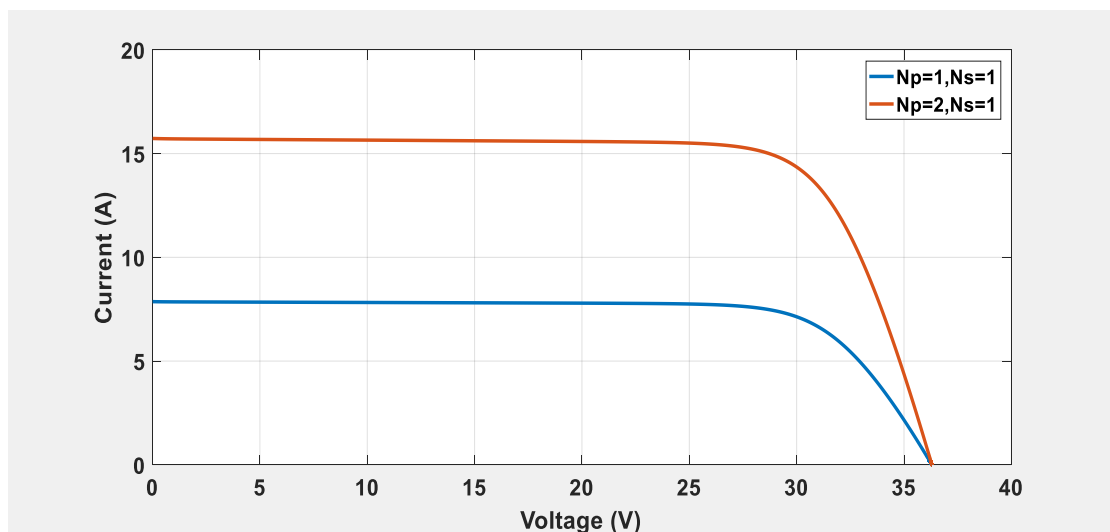


Figure II. 10 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

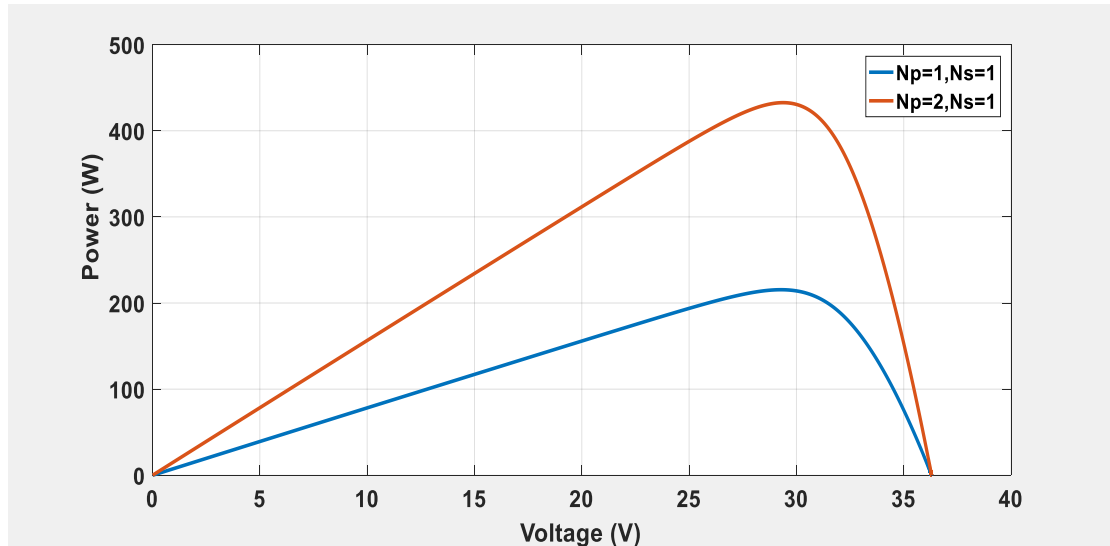


Figure II. 11 Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

II.3.5.3 Influence de l'association série / parallèle des cellules PV

Les figures (II.12) et (II.13) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série/parallèle :

Le courant de court-circuit et La tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

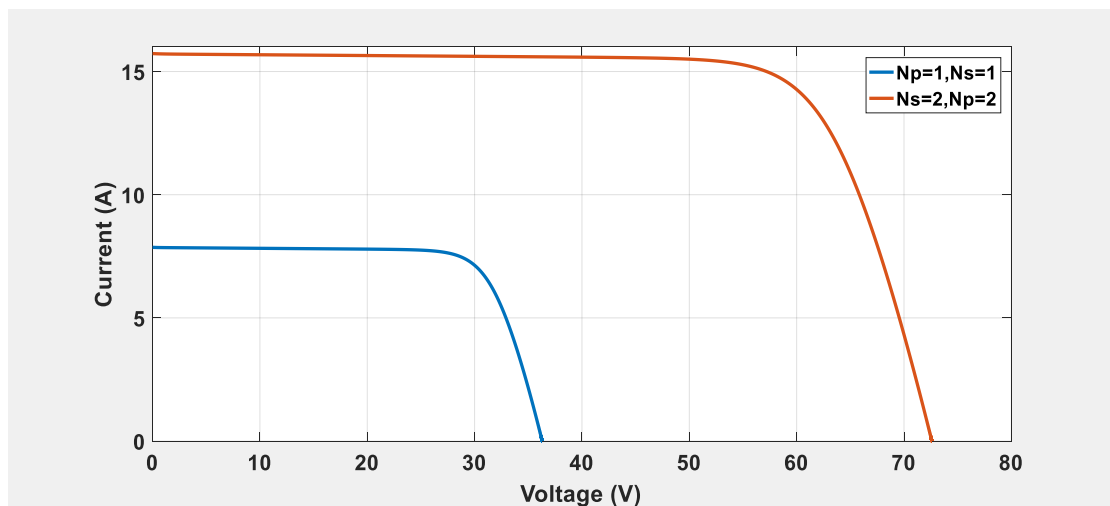


Figure II. 12 Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en Série / parallèle.

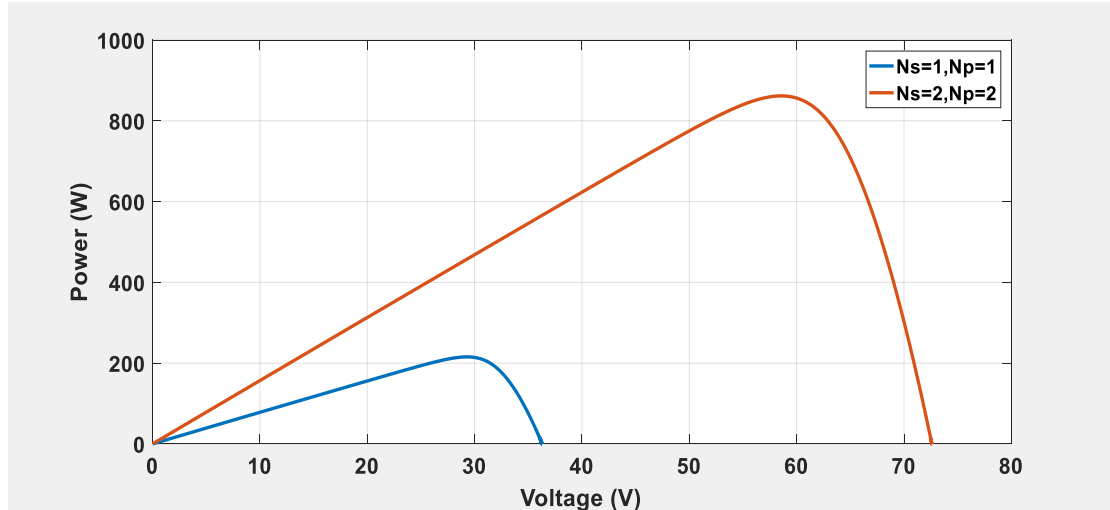


Figure II. 13 Caractéristique $P(V)$ pour différents nombre de cellule en Série / parallèle.

II.4 Algorithmes pour le suivi de transfert maximum puissance (MPPT)

Les principaux problèmes posés par les modules photovoltaïques sont leur faible efficacité dans la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en puissance électrique (généralement entre 9 et 16 %), ce qui ajoute la dépendance aux conditions atmosphériques changeantes.

L'objectif des algorithmes MPPT est de trouver le point d'opération où se trouve le niveau de tension maximale V_{MPP} et de courant maximal I_{MPP} . Dans lequel le transfert de puissance maximum P_{MPP} se produit sous un certain rayonnement solaire et une certaine température.

Avec cette considération, il est possible de contrôler ainsi le point d'opération par un convertisseur statique. La connexion directe entre un module photovoltaïque et la charge conduit à un point de travail donné par l'intersection des caractéristiques $I-V$.

II.4.1 Algorithme P&O

L'algorithme de Perturb and Observe (P&O) est utilisé pour le suivi du point de puissance maximale d'un panneau solaire. Il agit en modifiant la tension du panneau et en observant la variation de la puissance en résultant. Si la puissance mesurée augmente par rapport à celle du cycle précédent, la perturbation de la tension (augmentation ou diminution) est maintenue dans le même sens. En revanche, si la puissance diminue, la direction de la variation de tension est inversée. En répétant ces étapes, l'algorithme

parvient à localiser le point de puissance maximale. Une fois ce point atteint, l'algorithme induit de légères oscillations autour de celui-ci. Le fonctionnement de cet algorithme est illustré dans le diagramme en blocs de la figure (II.14).

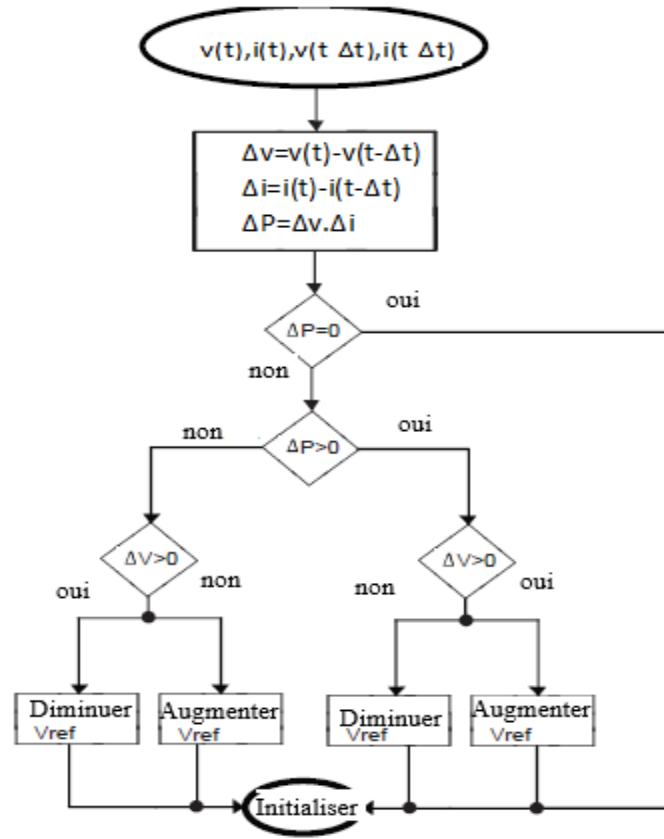


Figure II. 14 Diagramme de bloc algorithme Perturbe et Observe.

Le principal inconvénient de l'algorithme P&O réside dans sa dépendance à la fréquence d'échantillonnage des variables telles que la tension et le courant. En effet, un échantillonnage trop lent peut entraîner une instabilité dans l'atteinte du point de puissance maximale (MPP). Il est possible de réduire les oscillations autour du MPP en diminuant l'amplitude de la perturbation, mais cela ralentit également la convergence vers ce point. Plusieurs variantes ont été proposées pour améliorer cette méthode, notamment l'utilisation d'une perturbation de taille variable, qui diminue à mesure que l'on s'approche du MPP, ou encore l'emploi d'une moyenne sur plusieurs mesures de puissance. Dans la méthode P&O classique, la perturbation appliquée est fixe, généralement de l'ordre de 0,37 % de la tension en circuit ouvert (V_{oc}).

Lorsque des variations brusques des conditions atmosphériques surviennent, les méthodes de type P&O peuvent être induites en erreur. En effet, une augmentation soudaine de la puissance causée, par exemple, par une hausse du rayonnement solaire, peut être interprétée à tort comme un effet positif de la perturbation appliquée. Ce comportement est illustré à la figure (II.15) : le point A représenté le point de fonctionnement initial, tandis que le point B correspond au nouveau point après une augmentation de tension (perturbation), en supposant des conditions atmosphériques constantes.

À ce point B, la puissance mesurée est inférieure à celle du point A, ce qui devrait logiquement inciter l'algorithme à inverser la direction de la perturbation pour revenir vers le MPP. Toutefois, si une augmentation soudaine du rayonnement intervient, le point de fonctionnement se déplace vers le point C, passant de la courbe de puissance P_1 à une nouvelle courbe P_2 . L'algorithme, trompé par cette hausse de puissance, l'attribue à la perturbation et poursuit dans la même direction, éloignant ainsi davantage le point de fonctionnement optimal, ce qui entraîne une perte de puissance.

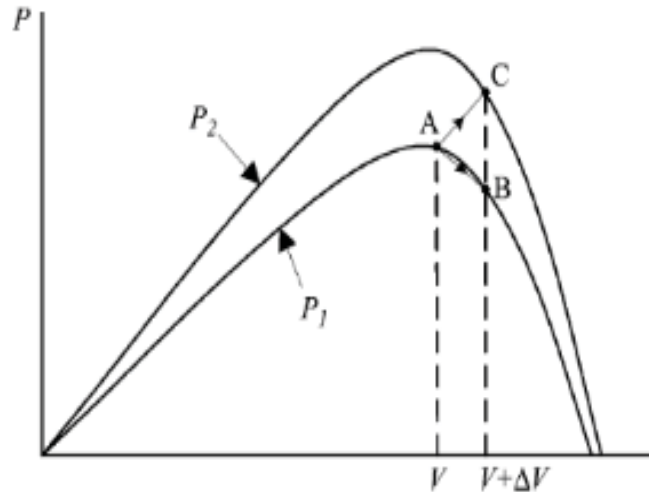


Figure II. 15 Algorithme Perturber et Observer.

II.4.2 Algorithme de conductance incrémentale

La méthode de conductance incrémentale est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance du panneau solaire est zéro dans le MPP, positive à gauche du MPP et négative à droite. Cette dynamique est présentée à la figure (II.16).

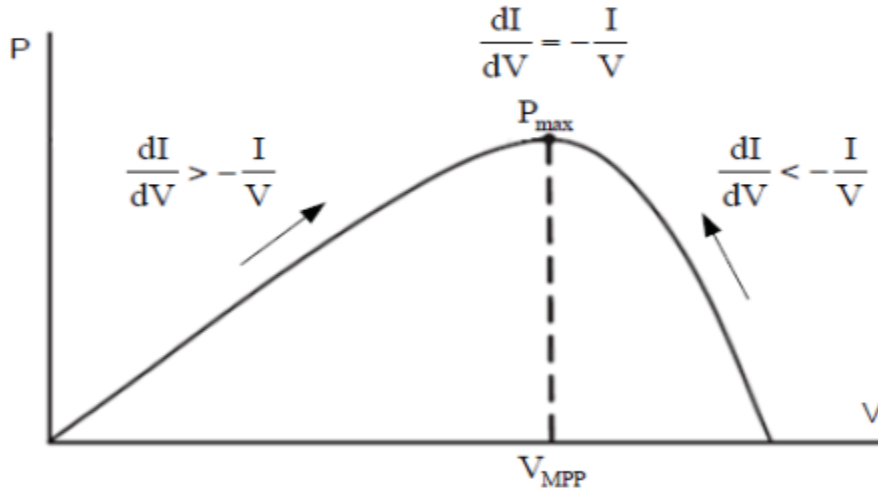


Figure II. 16 Algorithme de conductance incrémentale.

Le point de puissance maximale (MPP) peut être atteint en comparant la conductance instantanée (I/V) à la conductance incrémentielle ($\Delta I/\Delta V$). En fonction du résultat de cette comparaison, le point de fonctionnement du convertisseur est ajusté soit en augmentant, soit en diminuant la tension afin de rapprocher plus rapidement le point d'opération du MPP. Ce principe repose sur les courbes caractéristiques de l'ensemble de panneaux solaires, comme illustré dans la figure (II.16).

II.5 Raccordement au réseau du système de production photovoltaïque

Étant donné que l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est de nature continue (DC), elle doit être convertie avant d'être injectée dans le réseau électrique. Cette conversion nécessite l'utilisation de dispositifs électroniques à semi-conducteurs ainsi que de composants de puissance. Les principaux éléments impliqués dans cette transformation sont les convertisseurs DC-AC (onduleurs), les filtres pour atténuer les harmoniques.

II.5.1 Liaison de tension continue (DC-Link)

Les onduleurs alimentés en tension nécessitent une source de tension stable pour fonctionner correctement. Dans les installations photovoltaïques, cette fonction est assurée par la structure appelée *DC-Link*. Elle se compose d'une grande banque de condensateurs connectés en série ou en parallèle à l'entrée de l'onduleur, côté source. Cette liaison reçoit l'énergie provenant des panneaux solaires et a pour rôle de maintenir une tension aussi stable et continue que possible, que ce soit en conditions normales de

fonctionnement ou lors de variations des conditions atmosphériques. Elle agit ainsi comme une source de tension intermédiaire, essentielle à l'alimentation de l'onduleur.

II.5.2 Modélisation d'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée. La figure (II.17) montre le symbole d'un onduleur [17].

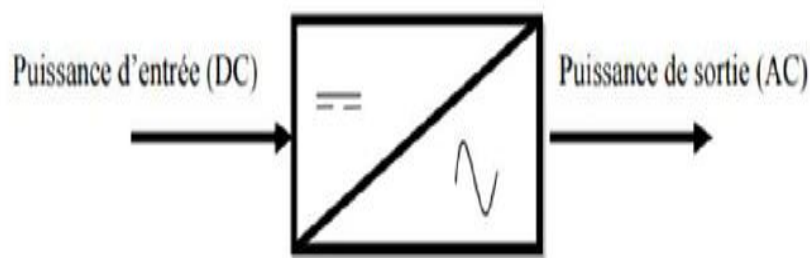


Figure II. 17 Figure Schéma de principe de l'onduleur.

Dans les systèmes PV, les onduleurs doivent assurer une connexion optimale à partir des modules PV, améliorer le rendement du contrôle de l'onduleur par rapport aux techniques obtenues actuellement dans les systèmes PV connectés au réseau et améliorer la qualité de la puissance électrique générée et injectée. Il existe plusieurs types des onduleurs utilisés fréquemment dans les systèmes PV. Parmi les quels, on présente le principe d'onduleur de tension triphasé utilisée dans notre travail.

L'onduleur triphasé de tension est constitué de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc, les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et se compose d'un IGBT et une diode en antiparallèle. L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance sur la figure (II.18).

On doit distinguer d'une part les tensions de branches V_{ao}, V_{bo}, V_{co} , mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue V_{pv} , d'autre part, il y a les tension de phases V_{an}, V_{bn} et V_{cn} , mesurées par rapport à un point neutre flottant représentant

une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées, V_{ab} , V_{bc} ET V_{ca} [17].

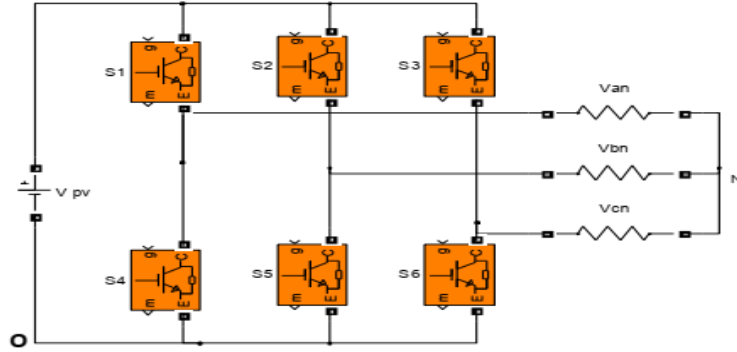


Figure II. 18 Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure (II.18), il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative "O" de la tension du côté continu comme suit :

$$\begin{cases} V_{AO} = S_1 \cdot V_{PV} \\ V_{BO} = S_2 \cdot V_{PV} \\ V_{CO} = S_3 \cdot V_{PV} \end{cases} \quad (II.8)$$

Où S_i ($i=1,2, 3$) désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C.

$S_i=1$ dans ce cas l'interrupteur i est fermée, dans le cas où $S_i=0$, l'interrupteur i est ouverte.

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , et V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AO} + V_{NB} = V_{AO} - V_{BO} = (S_1 - S_2)V_{PV} \\ V_{BC} = V_{BO} + V_{NC} = V_{BO} - V_{CO} = (S_2 - S_3)V_{PV} \\ V_{CA} = V_{CO} + V_{NA} = V_{CO} - V_{AO} = (S_3 - S_1)V_{PV} \end{cases} \quad (II.9)$$

On peut écrire l'équation (II.10) sous la forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_{PV} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Les tensions simples sont exprimées :

$$\begin{cases} V_{AN} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{AO} * \left(\frac{1}{3}\right) (V_{BO} + V_{CO}) \\ V_{BN} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{BO} * \left(\frac{1}{3}\right) (V_{AO} + V_{CO}) \\ V_{CN} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{CO} * \left(\frac{1}{3}\right) (V_{AO} + V_{BO}) \end{cases} (II.11)$$

On peut écrire l'équation (II.12) sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \left(\frac{V_{PV}}{3}\right) \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} (II.12)$$

II.5.3 Commande de l'onduleur

Les transformateurs de tension peuvent être contrôlés selon plusieurs stratégies.

Aux basses fréquences, il est alimenté par une onde pleine, le signal de commande sera à la fréquence de tension de sortie souhaitée et la source CC doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur).

A plus haute fréquence, il est piloté en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet d'ajuster à la fois l'amplitude et la fréquence tout en gardant constante la source continue (pont de diodes).

Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïdale

Le contrôle de l'onduleur a pour but de permettre une meilleure reproduction des courants de référence turbulents, grâce à des commandes de contrôle appliquées aux différents interrupteurs de puissance, et cela ne peut se faire que grâce à une stratégie de contrôle appropriée. Les deux principales méthodes classiques de contrôle des convertisseurs de tension sont :

- La commande par hystérésis
- La commande par modulation de largeur d'impulsion sinus (SMLI)

II.5.3.1 Commande par hystérésis

Cette commande, basée sur le contrôle direct en courant, est très adaptée pour les organes de commande ayant une action à deux positions comme l'IGBT qui peut être soit ouvert ou bloqué, elle consiste principalement à maintenir les courants générés dans une bande enveloppant le courant de référence. Chaque dépassement de cette bande donne un ordre de commutation. La commande de courant par hystérésis est la

technique la plus simple utilisée pour le contrôle des courants dans le système de filtrage actif parallèle ; la simplicité à la mise en œuvre, la robustesse, l'exactitude en poursuite de courant de référence et une dynamique extrêmement bonne.

En supposant que la tension continue V_{dc} de l'onduleur est constante, le modèle de l'onduleur et de filtre de sortie peut être donné par le tableau suivant.

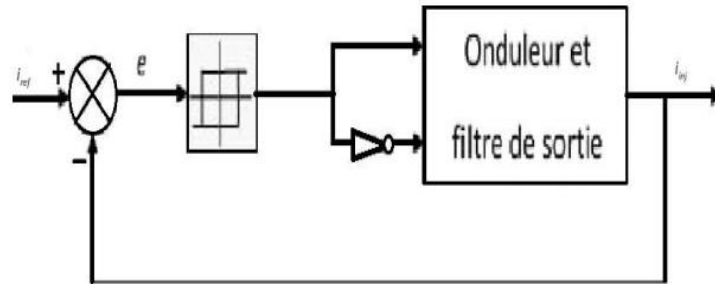


Figure II. 19 Schéma de la commande de l'onduleur par hystérésis.

II.5.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion sinus

La commande MLI sinus (Modulation de Largeur d'Impulsion sinusoïdale) est une technique de commande largement utilisée pour piloter les onduleurs dans les systèmes de conversion d'énergie, notamment dans les applications photovoltaïques. Elle consiste à comparer un signal sinusoïdal de référence, représentant la forme d'onde de tension souhaitée, à un signal triangulaire de fréquence plus élevée appelé porteuse. L'intersection entre ces deux signaux détermine les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur, générant ainsi une série d'impulsions modulées en largeur. Cette méthode permet de synthétiser une tension de sortie alternative proche d'une sinusoïde, avec une bonne qualité de signal et un faible taux de distorsion harmonique. Elle est particulièrement adaptée pour l'injection d'énergie dans le réseau électrique, car elle permet de respecter les normes de qualité de l'énergie.

II.6 Filtre LR

Étant donné que l'onduleur alimenté en tension génère des formes d'onde présentant un taux de distorsion harmonique significatif, tant en tension qu'en courant, il est nécessaire d'intégrer un filtre LR. Ce filtre permet non seulement de réduire la teneur harmonique des signaux délivrés par le convertisseur, mais aussi de présenter à l'onduleur une charge de nature inductive. L'objectif est de garantir que les courants et tensions injectés dans le réseau soient aussi proches que possible de formes

sinusoïdales, conformément aux exigences des normes de qualité de l'énergie en matière de distorsion harmonique.

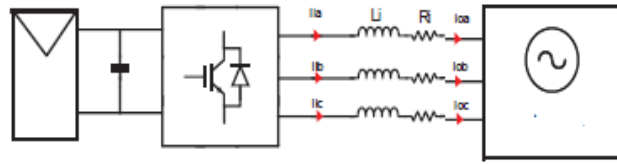


Figure II. 20 Schéma de l'interface de connexion d'un onduleur au réseau électrique

II.7 Principes fondamentaux du contrôle vectoriel appliqué au photovoltaïque connecté au réseau

On aborde les concepts fondamentaux liés à la mise en œuvre du contrôle vectoriel dans les applications d'injection de puissance, en particulier dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. Il montre comment cette méthode de commande permet de simplifier la gestion des systèmes triphasés en courant alternatif. Ainsi, le chapitre débute par la présentation des transformations linéaires qui permettent de représenter un système alternatif sous forme équivalente en régime continu. Cette approche facilite la modélisation du système, ainsi que la conception et la mise en œuvre des contrôleurs nécessaires à son pilotage optimal.

II.7.1 Transformée de Clarke

La transformée de Clarke constitue la première étape dans la conversion d'un système sinusoïdal triphasé en une représentation équivalente constante. Elle permet de transformer un système triphasé équilibré en un système biphasé stationnaire, en quadrature, exprimé dans le plan $\alpha\beta$. Cette représentation repose sur deux composantes principales, alpha (α) et bêta (β), qui suffisent à décrire le comportement du système après transformation, en raison de la somme nulle des trois phases dans un système équilibré. Cette simplification est illustrée dans la figure (II-21).

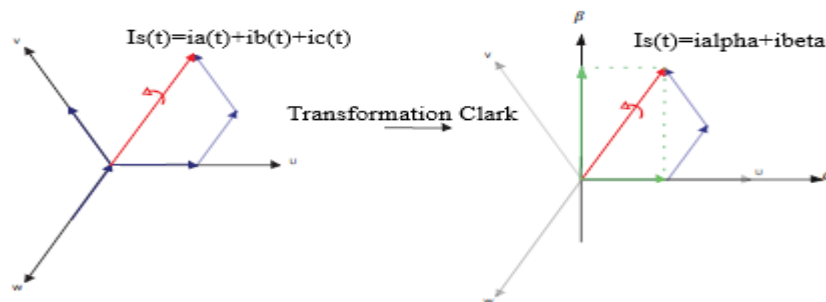


Figure II. 21 Représentation graphique transformée de Clarke.

La transformée de Clarke directe et inverse est donnée par les matrices suivantes décrites par les équations II.22 et II.23 respectivement :

$$T_{\alpha\beta o} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120) & -\sin(\theta + 120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

$$T_{\alpha\beta o}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120) & -\sin(\theta - 120) & 1 \\ \cos(\theta + 120) & -\sin(\theta + 120) & 1 \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

Si l'on considère l'axe α aligné avec la phase **a**, cela permet de simplifier à la fois la transformation directe et la transformation inverse de Clarke, comme le montrent respectivement les équations (II.15) et (II.16).

$$T_{\alpha\beta o} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

$$T_{\alpha\beta o} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

II.7.2 Transformée de Park

À la suite de la transformée de Clarke, une seconde transformation, appelée transformée de Park, est appliquée. Celle-ci permet de convertir le système biphasé stationnaire (axes α et β) en un système biphasé en rotation, également en quadrature. Ce nouveau système est défini par deux axes synchrones : l'axe d (direct) et l'axe q (quadrature). Les composantes d et q représentent les projections du vecteur de tension ou de courant sur les axes α et β , dans un repère tournant à la même fréquence que le système. Cette transformation est illustrée à la figure (II.22).

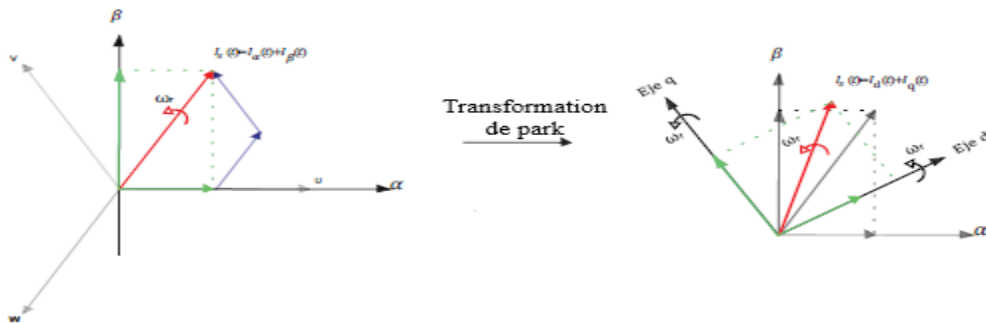


Figure II. 22 Représentation graphique transformée de Park.

La transformée de Park ou transformée d'axes synchrones est représentée dans l'équation (II.17) :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

II.7.3 Contrôle vectoriel de la tension

La stratégie de contrôle vectoriel orientée tension consiste à piloter l'onduleur de manière à ce que la composante **I_d** du courant soit en phase avec la composante **V_d** de la tension, tandis que la composante **I_q** est déphasée de 90° par rapport à **V_d**. Cette référence est obtenue à l'aide d'un système de synchronisation basé sur un asservissement de phase (PLL – *Phase-Locked Loop*), qui permet d'aligner le repère tournant sur la tension du réseau. Cette méthode assure un contrôle précis de la puissance injectée et une meilleure dynamique du système.

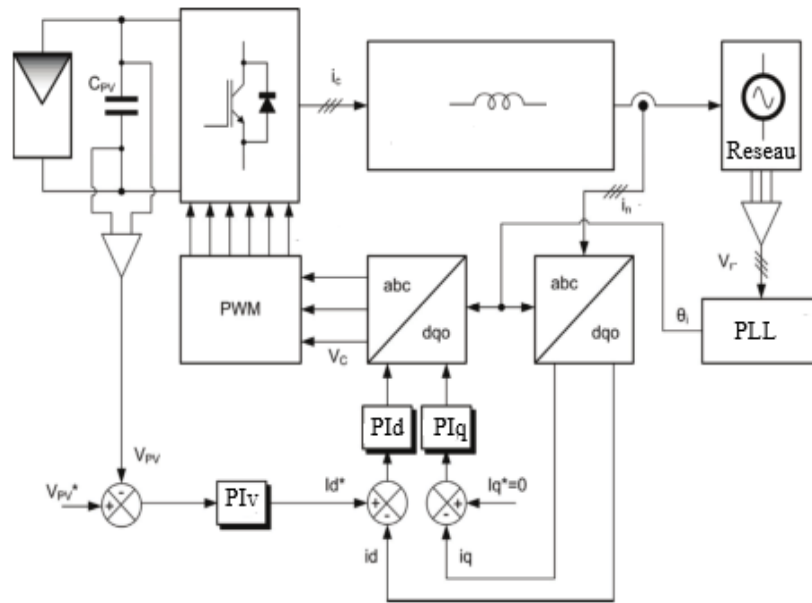


Figure II. 23 Schéma de control vectoriel de la tension.

II.7.3.1 Contrôle de phase (PLL)

Pour répondre aux exigences des normes de qualité et de service liées au raccordement au réseau, le courant injecté dans le réseau doit être parfaitement synchronisé avec la tension du réseau. Cette synchronisation est essentielle au bon fonctionnement des systèmes de distribution d'énergie. Elle repose sur des algorithmes capables de suivre la phase du vecteur de tension du réseau, qui sert ensuite de référence pour le contrôle

des variables du système. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées à cet effet, notamment le détecteur classique de passage par zéro. Toutefois, la méthode la plus répandue aujourd'hui est la boucle à verrouillage de phase (PLL – *Phase-Locked Loop*), qui offre une meilleure précision et une grande flexibilité grâce à sa mise en œuvre logicielle.

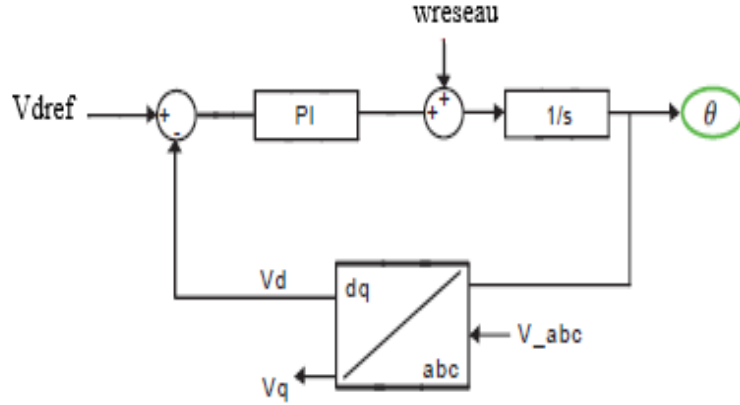


Figure II. 24 Schéma de commande PLL.

En appliquant les transformations de Clarke et Park ensemble, il est possible de représenter la puissance réelle comme indiqué par l'équation (II.18) et (II.19) :

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (II.18)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) \quad (II.19)$$

Lorsqu'on considère un système entièrement synchronisé en phase, c'est-à-dire aligné sur la référence de la phase A, la composante V_q devient nulle. Cela permet de simplifier les expressions de la puissance active et réactive, qui se redéfinissent alors selon les équations (II.20) et (II.21).

$$P = \frac{3}{2}v_d i_d \quad (II.20)$$

$$Q = -\frac{3}{2}v_d i_q \quad (II.21)$$

À partir des équations (II.20) et (II.21), on observe une relation directement proportionnelle entre la composante I_d et la puissance active, ainsi qu'entre la composante I_q et la puissance réactive. En supposant un système équilibré et une tension parfaitement synchronisée avec la phase A ce qui correspond à un scénario courant dans les systèmes de forte puissance, il devient possible de contrôler séparément la puissance active et réactive. Ainsi, la puissance active peut être régulée à l'aide d'une boucle de courant agissant sur la composante I_d , tandis que l'injection ou l'absorption de puissance réactive peut être gérée via une boucle de courant

indépendante sur la composante I_q . Ces deux boucles sont généralement supervisées par l'algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), qui fournit la référence de tension optimale pour maximiser l'énergie extraite des panneaux photovoltaïques.

II.7.3.2 Contrôle des tensions

Le contrôle vectoriel orienté tension repose sur l'utilisation de deux boucles de régulation. La première boucle met en œuvre l'algorithme MPPT afin de déterminer la référence de tension du bus continu (DC). Cette tension de référence permet ensuite de générer la référence de courant pour la seconde boucle, à travers une compensation assurée par un régulateur PI, dont les paramètres sont définis selon le modèle de l'installation décrit par les équations (II.20), (II.21) et (II.22). Le schéma de la boucle de régulation de la tension continue est basé sur le principe d'équilibre de puissance entre la section en courant continu et la section en courant alternatif du système.

$$P_{Dc} = P_{Ac}$$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque. Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Enfin nous avons abordé la partie convertisseur DC-AC, en introduisant l'onduleur T-Type, ainsi qu'en déterminant les techniques de commandes qui peuvent être appliquées sur un onduleur triphasé-type de niveaux de tension. Cette modélisation nous permettra de d'entamer la partie contrôle et régulation de la chaîne dans le chapitre suivant.

Chapitre III - Simulation global pv et reseau électrique

III.1 Introduction :

A l'aide de l'augmentation consommation d'énergie électrique par les différents types des appareils industriels (charge linéaires et charge non-linéaires) avec la demande de bon caleter d'énergie pour le bon rendement et long duré de vais, avec la pollution de l'environnement à cause des sources d'énergie conventionnelle. Ces problèmes forcer les ingénieurs et les chercheurs pour trouver des solutions.

Parmi les solutions est l'injection d'énergie renouvelable dans le réseau électrique avec des norme très définies pour obtenir un bon caleter.

Dans ce chapitre nous allons voir les différents types des charges électrique ainsi que sont impacte sur la qualité d'énergie et nous allons faire une étude avec modulation sous SIMULINK MATLAB d'une source renouvelable interconnectée au réseau électrique.

III.2 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la Figure (III.1)

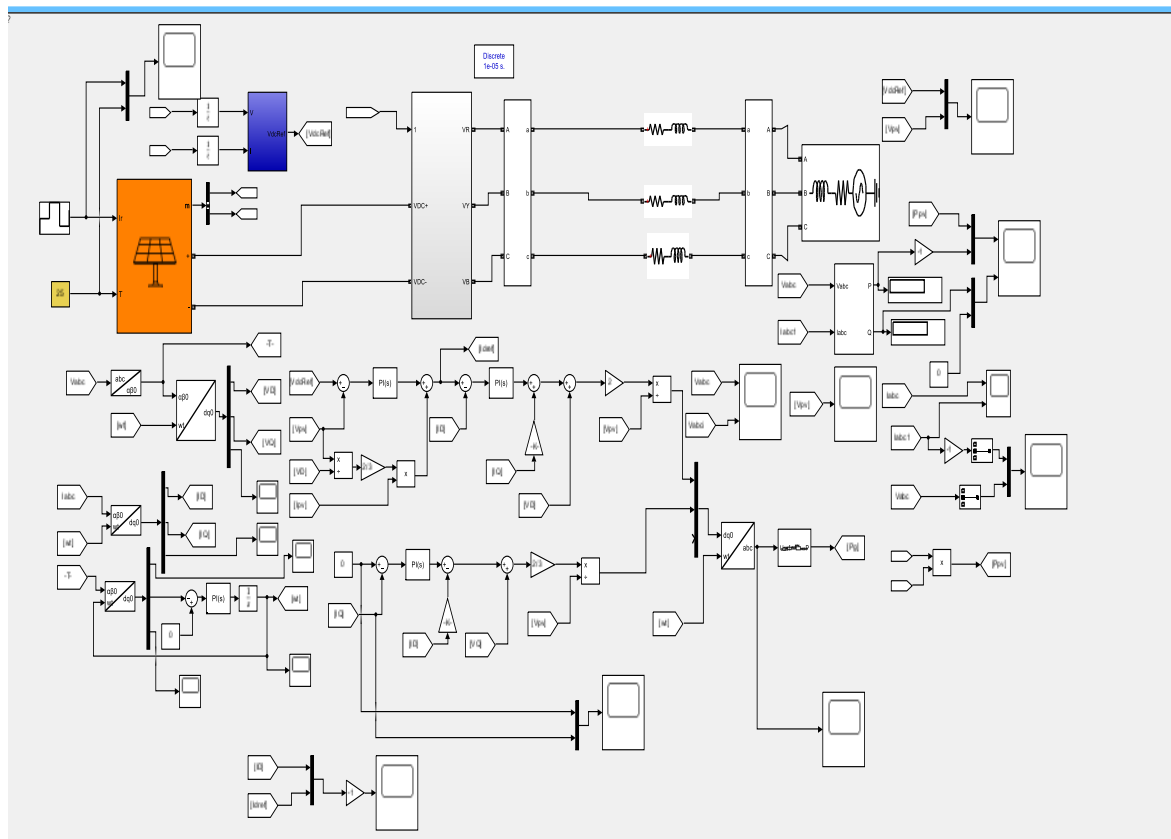


Figure III. 1 simulation de système PV connecté au réseau.

Le modèle global de la centrale photovoltaïque représenté par la Figure (III.1) est constitué de :

III.2.1 Générateur photovoltaïque :

Formé de 4 modules avec un nombre $N_s = 25$ de cellules en série. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension).

III.2.2 Bloc de maximisation de maximum de puissance :

Permet de chercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. Dans les systèmes photovoltaïques, les algorithmes de recherche du point de puissance maximale sont utilisés. Pour notre cas c'est l'algorithme de perturbation et d'observation est incorporé, où la sortie de cet algorithme établit le point de référence pour la boucle de contrôle du bus DC.

III.2.3 Convertisseur DC-AC :

Il y a plusieurs type d'onduleur qui peut installer avec un réseau, sont caractérisés par leur technologie et par la forme d'onde qu'ils génèrent :

- Onduleur à onde sinusoïdale
- Onduleur à onde carrée
- Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale

On va choisir dans ce travail l'onduleur à onde sinusoïdale commandé par MLI.

III.2.4 Filtre LC :

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale [8].

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (L ou LCL). La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part de réduire la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler.

Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée, cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre (LCL) est l'autre alternative de raccordement [8] .

III.2.5 Le réseau électrique :

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 400$ V et de fréquence $f = 50$ Hz.

Afin d'évaluer la performance du modèle proposé, une étude de cas est élaborée afin de valider le comportement dynamique du système photovoltaïque. En particulier, une variation de l'irradiation solaire est simulée à travers les séquences de changement suivantes :

$$G = \begin{cases} 600 \text{ W/m}^2 \Rightarrow 0 < t < 0.5 \\ 800 \text{ W/m}^2 \Rightarrow 0.5 < t < 1 \\ 1000 \text{ W/m}^2 \Rightarrow 1 < t < 1.5 \\ 800 \text{ W/m}^2 \Rightarrow 1.5 < t < 2 \\ 900 \text{ W/m}^2 \Rightarrow 2 < t < 2.5 \end{cases}$$

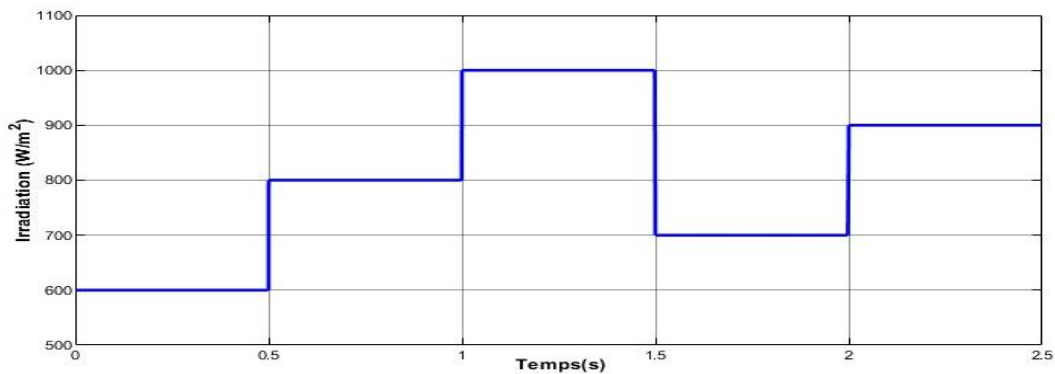


Figure III. 2 Profil de l'Irradiation

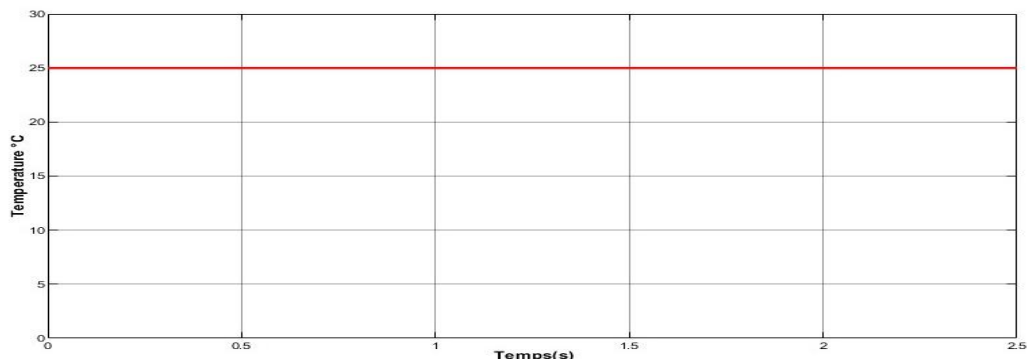


Figure III. 3 Profil de la température.

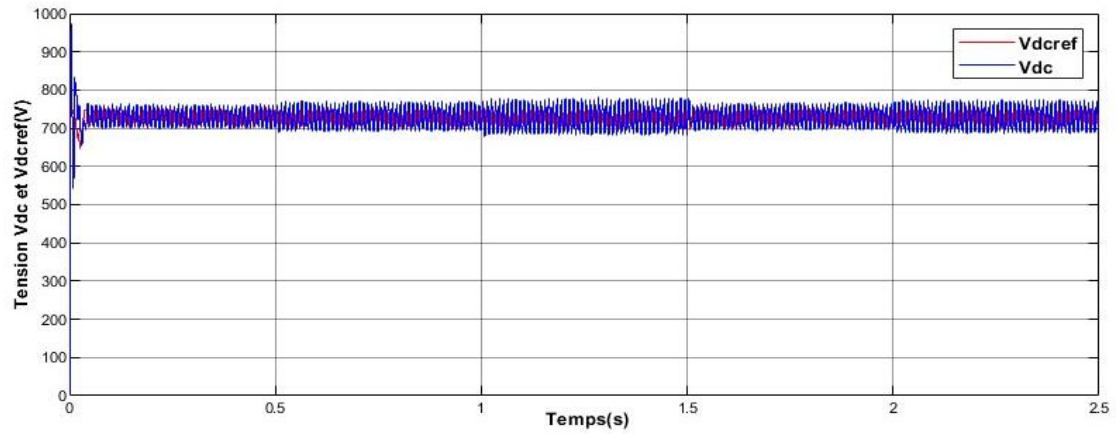


Figure III. 4 Tension du bus continue et la référence.

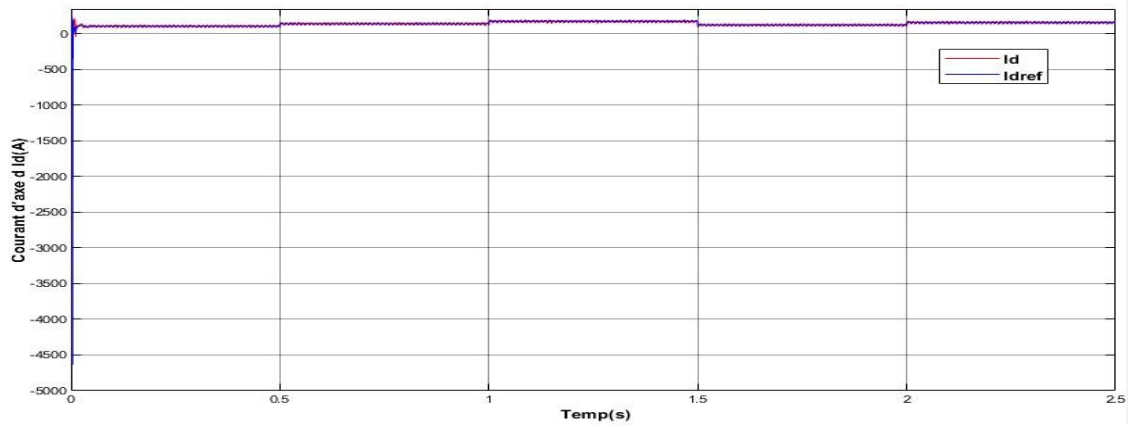


Figure III. 5 Courants d'axe direct I_d et I_{dref}

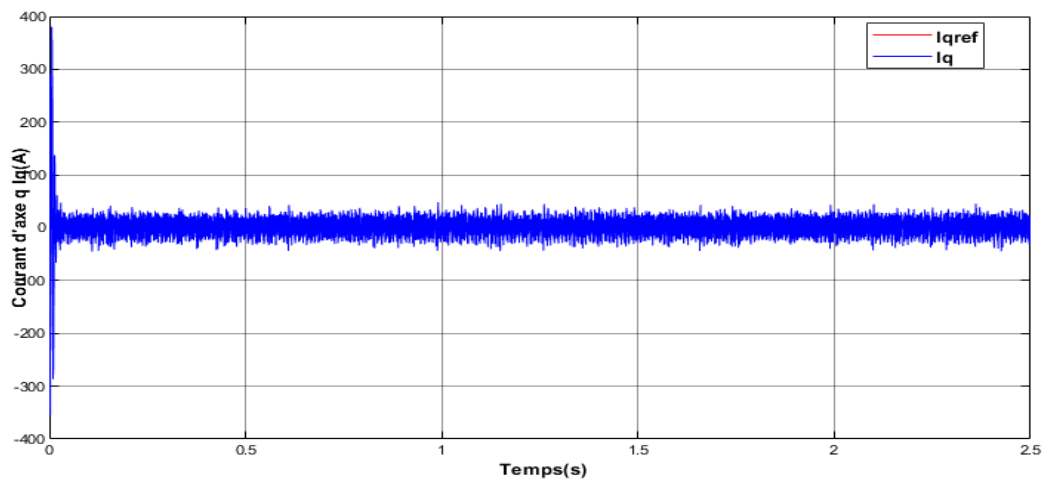


Figure III. 6 Courants d'axe en quadrature I_q et I_{qref} .

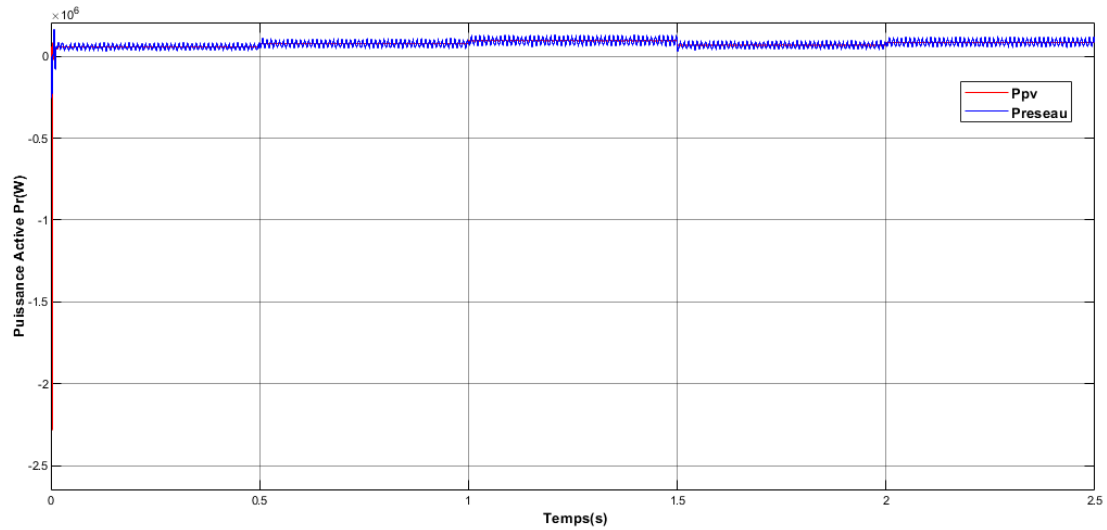


Figure III. 7 Puissance PV et active injectée au réseau électrique.

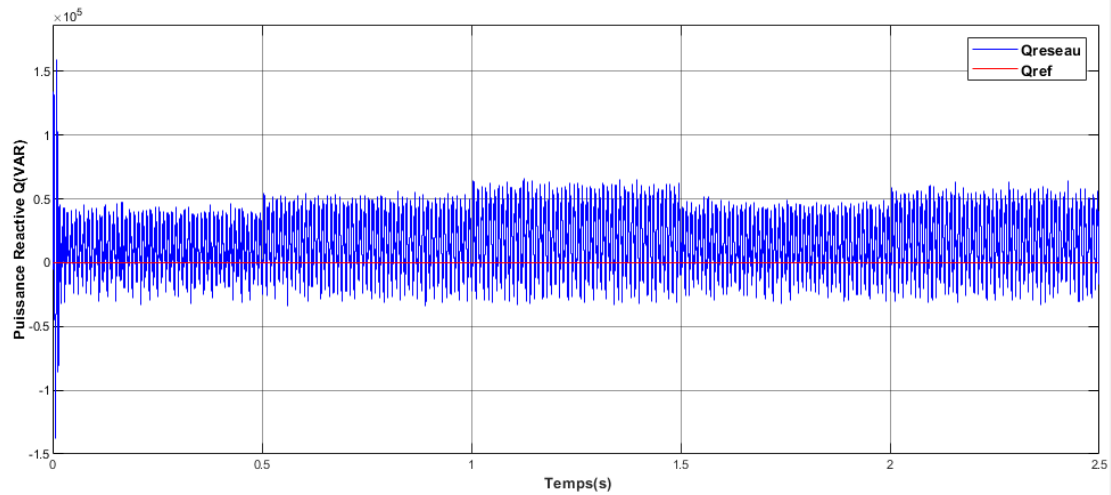


Figure III. 8 Puissance réactive injectée au réseau électrique.

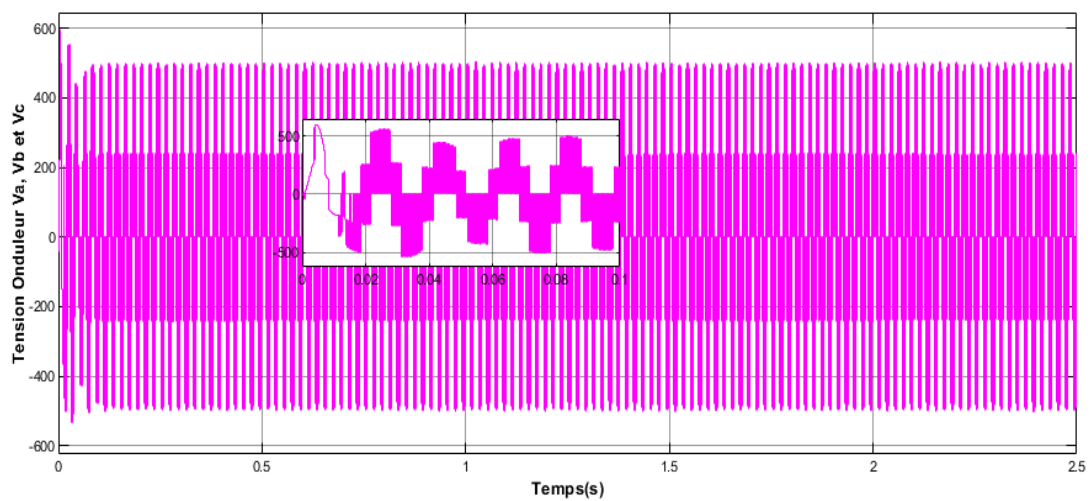


Figure III. 9 Tension à la sortie de l'onduleur.

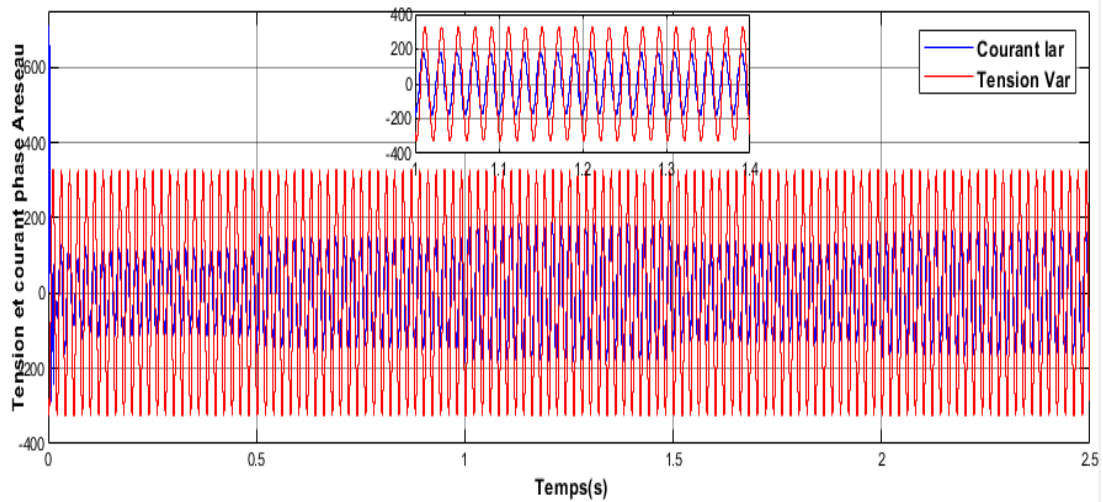


Figure III. 10 Tension et courant injecté au réseau électrique.

Interprétation des résultats

Afin d'évaluer la robustesse de l'algorithme MPPT P&O, une série de variations de l'irradiation a été appliquée, passant successivement de 600 à 800, puis 1000, 700 et enfin 900 W/m². Le système a montré une bonne réactivité à ces changements, avec un ajustement rapide de la tension de référence V_{ref} et un suivi satisfaisant par la tension réelle V_{pv} . Malgré des oscillations caractéristiques du P&O, le convertisseur atteint un régime stable après chaque transition, indiquant un fonctionnement globalement efficace et robuste dans des conditions d'ensoleillement variables.

Les résultats de simulation montrent que la tension réelle du générateur photovoltaïque V_{pv} suit efficacement la tension de référence V_{ref} générée par l'algorithme MPPT P&O. Après un temps de stabilisation d'environ 0,2 seconde, le système atteint un régime quasi permanent. Toutefois, des oscillations persistantes autour de la valeur de référence sont observées, ce qui est typique du P&O classique. Cela peut entraîner une légère déviation du point de puissance maximale, suggérant la possibilité d'optimiser davantage l'algorithme ou le régulateur de tension.

Le profil de courant I_q obtenu avec une consigne $I_{qref} = 0$, a montré que le système parvient à maintenir une moyenne de courant réactif proche de zéro, ce qui est conforme aux objectifs de fonctionnement d'un onduleur PV injectant uniquement de la puissance active. Toutefois, les importantes oscillations observées autour de cette consigne, ainsi que le pic initial élevé, révèlent des lacunes dans la qualité de la commande.

Les deux courbes (P_{pv} et P_{reseau}) sont quasiment confondues à chaque instant. Cela indique que la quasi-totalité de la puissance produite est injectée dans le réseau, ce qui signifie un rendement élevé au niveau de la conversion DC/AC. Le contrôleur MPPT semble fonctionner efficacement, adaptant rapidement le point de fonctionnement du générateur PV à chaque palier d'irradiation. Lors des changements d'irradiation (0.5 s, 1s, 1.5s, 2s), la puissance s'ajuste rapidement. Cela témoigne d'un bon dimensionnement du régulateur de puissance active. Le système est stable même sous variations brutales de l'entrée solaire.

Le système suit bien la référence de Q (zéro) dans l'ensemble : pas de dérive significative. La commande réagit rapidement aux variations d'irradiation sans divergence. La simulation semble stable et cohérente au premier ordre.

La tension de sortie est bien équilibrée entre les trois phases. La forme sinusoïdale est bien reconstituée après le démarrage (~ 0.2 s). La présence de modulation d'impulsions (MLI) est visible dans le zoom : bon comportement de commande.

La synchronisation tension-courant est bonne, démontrant que l'onduleur suit correctement la référence. Le courant injecté est sinusoïdal avec très peu de distorsion visible. Le facteur de puissance est élevé, proche de l'unité, donc conforme aux exigences de qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

III.4 Conclusion

La simulation complète du système photovoltaïque (PV) connecté à un réseau électrique triphasé, incluant le suivi du point de puissance maximale (MPPT) par la méthode Perturb and Observe (P&O), une commande PI, un bus continu (DC link), un onduleur triphasé, ainsi qu'un filtre de sortie, a permis de valider les performances dynamiques et énergétiques du système dans des conditions variables d'irradiation.

Le générateur PV a bien réagi aux variations rapides de l'éclairement solaire. Le MPPT utilisant l'algorithme P&O a montré une capacité efficace à suivre le point de puissance maximale malgré les variations de l'irradiation entre 600 W/m^2 et 1000 W/m^2 . Le système a su s'adapter dynamiquement sans instabilité notable, ce qui prouve la robustesse de l'algorithme dans cette configuration.

Chapitre III - Simulation global pv et reseau électrique

Le bus continu a joué un rôle essentiel dans la régulation de la tension intermédiaire, permettant une alimentation stable de l'onduleur. Aucune oscillation significative de tension n'a été observée sur le DC link, démontrant une bonne gestion de la conversion et un dimensionnement adéquat du condensateur.

L'onduleur triphasé a réussi à injecter une tension équilibrée et proche du sinus dans le réseau. La commande PI, associée à un système de génération de référence en quadrature, a permis un bon suivi des consignes de puissance réactive ($Q = 0$). Cependant, des oscillations réactives ont été observées à chaque transition de l'irradiation.

Le courant injecté dans le réseau est resté quasi sinusoïdal et en phase avec la tension, ce qui reflète un facteur de puissance proche de l'unité, conformément à l'objectif. Le filtre de sortie a permis de limiter les harmoniques, bien que leur présence reste légèrement perceptible au démarrage et lors des variations rapides d'ensoleillement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a porté sur la conception et le contrôle d'un onduleur triphasé à un étage destiné à l'injection d'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique. L'objectif principal était de proposer une architecture simple, efficace et économiquement viable, capable d'assurer une conversion optimale de l'énergie solaire tout en respectant les exigences de qualité de l'énergie injectée et de stabilité du réseau.

Dans un premier temps, une étude approfondie du fonctionnement des systèmes photovoltaïques a permis de mieux comprendre leurs caractéristiques, notamment la variabilité de la production énergétique en fonction des conditions d'ensoleillement. Ensuite, le choix d'un onduleur à un seul étage s'est imposé comme une solution à la fois compacte et efficace, permettant de limiter les pertes de conversion et de réduire la complexité globale du système.

Le développement du contrôle a mis l'accent sur la régulation de la tension, la synchronisation avec le réseau, ainsi que le respect des normes de qualité de l'énergie (harmoniques, facteur de puissance, etc.). Une attention particulière a été portée à la mise en œuvre de techniques de modulation adaptées et à la conception de boucles de contrôle robustes face aux perturbations.

Les résultats obtenus ont démontré que l'onduleur proposé permet une intégration efficace de l'énergie solaire au réseau, avec un fonctionnement stable, un rendement satisfaisant et une conformité aux exigences techniques en vigueur. Ce travail ouvre également la voie à de futures améliorations, notamment en matière de contrôle intelligent, de gestion de l'énergie à l'échelle du bâtiment ou du réseau local, et d'intégration avec le stockage.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Laronde Rémi « Essais Accélérés de Dégradation de Modules photovoltaïques ». Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2009.
- [2] Ministère de l'Energie et des Mines : Guide des Energies Renouvelables Edition 2007
- [3] Edition Masson « Les piles solaires, le composant et ces applications ». (1985)
- [4] BRAHAMI Imen Souhila, Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires ,thèse de doctorat en électrotechnique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES - SIDI-BEL-ABBES - 'ALGERIE, 2018
- [5] : BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.
- [6] : MECHALIKH M.Nadjib,HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.
- [7] Bouguerra.T, «Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 30/06/2014.
- [8] Makhlouf .M «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.
- [9] Saidani.A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015.
- [10] : Mr.MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2012.
- [11] : Violaine Didier «Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l' Art et Etude des Performances » rapport de HESPUL,2007.
- [12] : ABBASSEN LYESS « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE de MOULOUD MAMMERI _ TIZI OUZOU, 2011.
- [13] : Installations photovoltaïques, "Systèmes autonomes", document du constructeur BELPOWER
- [14]: Maouedj Rachid, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister soutenue en 2005.
- [15]: Installations photovoltaïques, "Systèmes raccordés au réseau", document du constructeur BELPOWER.
- [16] Said Chikha « Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques. » Mémoire de magister, université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 14/12/2011.
- [17] A. Bouzid, «Onduleur triphasé commandé par la stratégie d'élimination d'harmonique SHE », Thèse de Magister, Université de Oran, 2010.