

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 : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIEL

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**ETUDE PAR SIMULATION D'UN SYSTEME PV CONNECTE
AU RESEAU**

Présenté par :

- LARBAOUI Ala Eddine
- DJEDI Aya

Encadrant : MERABET LEILA

MCA

Université : UBMA

Jury de Soutenance :

KELAIAIA Mounia Samira	Prof	Université	Président
MERABET Leila	MCA	Université	Encadrant
BENAMIMOUR Tariq	MCB	Université	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

*Nous tenons à la fin de ce travail à remercier **ALLAH** de nous avoir guider vers le droit chemin, de nous avoir aider tout au long de nos années d'étude.*

*Un grand merci à notre encadreur de Mémoire : **Mme MERABAT LAILA** qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.*

Nous tenons également à remercier le président du jury, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicace

*Avant tout je dédie ce travail à mon père **RABAH** et ma mère **NADIA**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*Et grande dédicace à ma sœur **IMEN** pour l'encouragement et la soutenir tout au long de ma carrière d'étude,*

*A mes frères **MOHAMED FOAD** , **ABD RAOUFE** et à ma tante **NAJAT** et mon ami **AYA** , pour leur soutien et leurs encouragements en faveur de moi et de leur soutien moral .*

A toute mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

*Merci d'être toujours là pour moi. A ma binôme **AYA** Merci pour ton soutien sans limite, pour ta présence et ton amitié sincère.*

ALA EDDINE

Dédicace

قبل كل شيء أنا فخورة بنفسي و أود شكر نفسي أولاً

*Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie
ma remise de diplôme et ma joie*

*A mon paradis à la prunelle de mes yeux à la source de ma vie et mon bonheur, ma lune et le
fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman (SOUAB)*

*A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection, a mon support qui
était toujours à mes cotes pour me soutenir et m'encourage, à mon prince papa (DJEDI)*

*A mon bouclier dans ma vie, le deuxième support de ma vie après mon père qui m'encourage
à chaque étape de mes études, mes frères*

(OUSSAMA et JOUD YASSINE)

*A mes sœurs (ZAINEB et MARYEM MALAK), l'amie de ma vie, qui m'a partagée tous mes
sentiments dans ce travail*

A tout les membres de ma grande famille (famille SOUAB) et (famille DJEDI)

A Mes grandes mères

اكتفيت بعائلتي

*Sans oublier mon binôme (ALA EDDINE) pour son soutien moral sa patience
compréhension tout au long ce projet*

AYA DJEDI

Résumé : Ce travail propose l'intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique via un onduleur de tension. La commande proposée à un seul étage utilise une commande MPPT (P&O) afin de pouvoir extraire le maximum de puissance du système PV. Une commande DQ découplée pour gérer les puissances actives et réactive a été proposée. Une validation par simulation sous matlab- simulink a été faite afin de juger la performance de la configuration globale proposée.

Mots clés : Système PV, onduleurs, réseau, P&O MPPT, commande DQ, THD.

Abstract: This work proposes the integration of a photovoltaic system into the electrical network via a voltage inverter. The proposed single-stage control uses MPPT (P&O) control to be able to extract maximum power from the PV system. A decoupled DQ control to manage active and reactive powers has been proposed. A validation by simulation under matlab-simulink was carried out in order to judge the performance of the proposed overall configuration.

Keywords: PV system, inverters, grid, P&O MPPT, DQ control, THD.

ملخص: يقترح هذا العمل دمج النظام الكهروضوئي في الشبكة الكهربائية عن طريق عاكس الجهد. يستخدم التحكم المقترح أحادي المرحلة التحكم MPPT P&O ليتمكن من استخلاص أقصى قدر من الطاقة من النظام الكهروضوئي. تم اقتراح عنصر تحكم DQ منفصل لإدارة القوى النشطة والتفاعلية. تم إجراء التحقق من الصحة عن طريق المحاكاة باستخدام matlab-simulink من أجل الحكم على أداء التكوين العام المقترح.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، العاكسون، الشبكة، P&O MPPT ، التحكم DQ ، THD.

Table de matière

Liste des figures	7
Liste des tableaux.....	9
Liste des symboles et notations.....	10
Symboles :	10
Notations	11
Chapitre 1.....	14
Généralités sur les systèmes photovoltaïque.....	14
1. Introduction	15
1.1 Généralités sur les systèmes solaires.....	15
1.2 Spectre solaire	16
1.3 Rayonnement solaire.....	17
1.4 Energie solaire photovoltaïque.....	18
1.5 Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	19
1.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	21
1.7 Caractéristiques électriques d'une cellule	23
1.8 Association de cellule photovoltaïque	24
1.9 Influence de la variation de l'éclairement et la température.....	26
1.10 Protection des modules photovoltaïques	27
1.11 Types d'installations photovoltaïques	29
1.12 Normes pour la connexion des systèmes photovoltaïques au réseau	31
1.13 Protection du système photovoltaïque raccordé au réseau	32
1.14 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	33
1.15 Conclusion:	33
Chapitre 2.....	34
Commande DQ du système PV connecté au réseau.....	34
2.1 Introduction	35
2.2 Architectures de conversion photovoltaïque.....	35
2.3 Topologies de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau	36
2.4 Modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau.....	37
2.5 Stratégie de commande DQ du système proposé	37
2.6 Modélisation de l'onduleur (convertisseur DC/AC).....	40
2.7 Modélisation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	43
2.8 Boucle de régulation des courants directs et quadratique.....	46
2.9 Boucle de régulation de la tension de bus continue.....	49
2.10 Boucle à verrouillage de phase (PLL)	49
2.11 Dimensionnement des paramètres du filtre LC.....	51
Conclusion	52
Chapitre 3.....	53
Simulation du système PV connecté au réseau.	53
3.1 Introduction.....	54
3.2 Simulation du générateur photovoltaïque	54

3.3 Simulation de l'influence des changements climatiques sur les caractéristiques électriques du générateur PV.....	56
3.4 Simulation du système PV connecté au réseau électrique.....	57
3.5 Résultats de simulation de la commande DQ appliquée au système PV connecté au réseau : ..	59
3.7 Etude harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur et du courant de ligne.....	62
3.8 Conclusion	64
Références	66

Liste des figures

Figure 1.1 Energie solaire thermique [2].....	15
Figure 1.2 Energie solaire photovoltaïque [2]	16
Figure 1.3 Analyse du rayonnement solaire [3]	16
Figure 1.4 Composantes du rayonnement solaire [5].....	17
Figure 1.5 Effet photovoltaïque [8]	19
Figure 1.6 Cellule photovoltaïque [9]	19
Figure 1.7 Module photovoltaïque [11]	20
Figure 1.8 Panneau photovoltaïque [12]	21
Figure 1.9 Schéma équivalent électrique d'une cellule idéale.	21
Figure 1.10 Schéma électrique d'une cellule réelle	22
Figure 1.11 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	23
Figure 1.12 Schéma de groupement de cellule en parallèle	24
Figure 1.13 Caractéristique I-V de groupement de N_p cellules en parallèle	24
Figure 1.14 Schéma de N_s cellules en série	25
Figure 1.15 Caractéristique I-V d'un groupement de cellule en série	25
Figure 1.16 Caractéristiques I(V) et P(V) avec différentes valeurs d'éclairement	26
Figure 1.17 Caractéristiques P(V) et I(V) avec température variable	27
Figure 1.18 Protection d'un module par diode by-pass	28
Figure 1.19 Protection d'un module par diode anti-retour	28
Figure 1.20 Installation photovoltaïque autonome	29
Figure 1.21 Injection totale d'énergie	30
Figure 1.22 Injection de surplus	31
Figure 1.23. Protection du système photovoltaïque raccordé au réseau	32
Figure 2.1 Schéma bloc d'une chaîne de conversion mono étage	35
Figure 2.2 Schéma bloc d'une chaîne de conversion double étage	36
Figure 2.3 Schéma topologique d'onduleur centrale	36
Figure 2.4 Schéma topologique de l'onduleur shunt	36
Figure 2.5 Topologie de l'onduleur multi-string	37
Figure 2.6 Schéma topologique d'onduleur modulaire	37
Figure 2.7 Schéma synoptique d'une chaîne photovoltaïque à un étage connectée au réseau	37

Figure 2.8.a Schéma synoptique de la commande DQ du système PV raccordé au réseau	39
Figure 2.8.b Circuit de puissance du système PV connecté au raccordé au réseau	39
Figure 2.9 Structure d'un onduleur triphasé classique en pont	40
Figure 2.10 Principe de la MLI bipolaire.	41
Figure 2.11 Commande en demi- pont	43
Figure 2.12 Caractéristique de puissance maximum pour différentes irradiations	44
Figure 2.13 Schéma synoptique de la technique P&O MPPT	44
Figure 2.14 Caractéristique de la puissance en fonction de la tension [23]	45
Figure 2.15 Organigramme de la méthode P&O	46
Figure 2.16 Schéma bloc du contrôle des courants de lignes dans le repère de Park	46
Figure 2.17 Schéma en monophasé de la connexion au réseau	48
Figure 2.18 Schéma bloc de la boucle de régulation du courant	48
Figure 2.19 Schéma bloc de régulation de la tension du bus continue	49
Figure 2.20 Schéma fonctionnel d'une PLL triphasé	49
Figure 2.21 Schéma simplifié de la PLL	50
Figure 2.22 Schéma monophasé équivalent du filtre LC	51
Figure 3.1 Bloc du module Sun Power SPR-315-WHT dans Simulink	54
Figure 3.2.a Caractéristiques I(V) et P(V) du module photovoltaïque ZYTEC SOLAR ZT-310P dans les conditions standards.	54
Figure 3.2.b Caractéristiques I(V) et P(V) du générateur photovoltaïque ZYTEC SOLAR ZT-310P dans les conditions standards	55.
Figure 3.3.a Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV sous température variable	56
Figure 3.3.b Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV pour éclairage variable	57
Figure 3.4.a Schéma de puissance de l'ensemble système PV-réseau	58
Figure 3.4.b Schéma de commande de l'ensemble système PV-réseau	57
Figure 3.5 Variation de l'éclairage	59
Figure 3.6. Tensions alternatifs du réseau	59
Figure 3.7. Courants alternatifs du réseau	60
Figure 3.8 Tension du bus continu de l'onduleur et tension de référence à suivre	60
Figure 3.9 Puissance active et réactive	61
Figure 3.10 Courant quadratique réel et de référence	61
Figure 3.11 Courant direct réel et de référence	61
Figure 3.12 Synchronisation du système par la PLL	62
Figure 3.13 Spectre de la tension à la sortie de l'onduleur (avant le filtre)	63
Figure 3.14 Spectre de la tension à la sortie de l'onduleur (après le filtre LC)	63
Figure 3.15 Spectre harmonique du courant de ligne	64

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 Tableau comparatif des différentes technologies des cellules [10]</i>	20
<i>Tableau 2 Normes pour les systèmes PV raccordés au réseau.</i>	31
<i>Tableau 3 donne les huit combinaisons possibles des trois interrupteurs</i>	42
<i>Tableau 4 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Sun Power SPR-315E- WHT-D dans les conditions standards de test (CST).</i>	54
<i>Tableau 5 Paramètre du système</i>	59

Liste des symboles et notations

Symboles :

ΔI : Ondulation de courant dans l'inductance (A)

ΔV_s : Ondulation de la tension de sortie (V)

A : Facteur d'idéalité de la jonction P-N

dV/dT : Gradient temporel de tension

E : Eclairement (W/m^2)

f_r : Fréquence du signal de référence (Hz)

I_{ph} : Courant photonique (A)

I_{sat} : Courant de saturation de la diode (A)

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

I_d : Composante directe du courant dans le repère du Park (A)

I^* : Référence du courant direct dans le repère de Park (A)

I_q : Composante en quadrature du courant dans le repère du Park (A)

I_q : Référence du courant en quadrature dans le repère de Park (A)

I_{sc} : Courant de court-circuit de N_s cellule (A)

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ j/k)

N : Nombre de niveau de tension de sortie

η : Rendement de la cellule [%]

N_p : Nombre de cellules en parallèle

N_s : Nombre de cellules en série

P_m : Puissance maximale produite (W)

q : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ c)

r : Coefficient de réglage en amplitude

R_s : Résistance série de la cellule (Ω)

R_{sh} : Résistance parallèle la cellule (Ω)

S : surface de la cellule (m^2)

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin. V : Tension aux bornes de la cellule (V)

V_{ab} : Tension entre la phase a et la phase b (V)

V_{an} : Tension entre le point a et le neutre (V)

V_{co} : Tension de circuit-ouvert (V)

V_d : Composante directe de la tension de référence (non découplée) dans le repère de Park (V)

V^* : Composante directe de la tension de référence découplée dans le repère de Park (V)

V_{dc} : Tension d'entrée d'un onduleur (V)

V_e : Tension d'entrée d'un convertisseur (V)

V_p : Tension de signal de porteuse (V), Tension de signal de porteuse (V)

V_{pco} : Tension en boucle ouvert de N_p cellules en parallèle (V)

V_q : Composante en quadrature de la tension de référence (non découplée) dans Park (V)

V^* : Composante en quadrature de la tension de référence découplée dans le repère de Park (V)

V_{ref} : Tension de signal de référence (V)

V_s : Tension de sortie d'un convertisseur (V)

α : Rapport cyclique du convertisseur

Notations

AC : Courant alternatif

APOD : Alternate Phase Opposition Disposition

CHB : Onduleurs multi-niveaux en pont H cascades (Cascade H-Bridge)

DC : Direct Current (Courant continu)

FC : Onduleur de tension à condensateur flottant (Flying Capacitor Multilevel Inverter)

FF : Facteur de forme

GPV : Générateur Photovoltaïque

MLI : modulation par largeur d'impulsions

MPPT : Maximum Power Point Tracking

NPC : Onduleur de tension clampée par le neutre (Neutral Point Clamped)

P&O : Perturbation et Observation (Perturb and Observe (Ang))

PD : Phase Disposition

PI : Proportionnel Intégral

PLL : Boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop)

POD : Phase Opposition Disposition

PPM : Point de Puissance Maximale PV

PWM : Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation)

THD : Taux de distorsion harmonique

FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée du système

FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte du système

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie électrique a considérablement augmenté ces dernières années. Cela est dû aux changements développement de nouvelles technologies et à la croissance des pays émergents. La majorité des systèmes actuels de production d'énergie électrique sont basés sur les combustibles fossiles (pétrole, gaz et leurs dérivés) ou l'énergie nucléaire. De plus, la conversion des combustibles fossiles en électricité entraîne le rejet de dioxyde de carbone, ce qui a un impact important sur l'effet de serre et le changement climatique. Il est donc essentiel de passer à une source d'énergie plus sûre qui nous permet de continuer à vivre normalement sans dégrader notre environnement ou poser des risques pour nos populations.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus attrayantes. En fait, l'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie propre et renouvelable dont la source, le soleil, est gratuit.

L'énergie photovoltaïque raccordée au réseau représente un système solaire photovoltaïque qui est connecté au réseau électrique public. Cela signifie que l'électricité produite par les panneaux solaires peut être directement utilisée dans le bâtiment où ils sont installés, et tout excès d'électricité peut être injecté dans le réseau pour être utilisé par d'autres consommateurs.

Ce type de système peut être une bonne option pour les propriétaires qui veulent réduire leur facture d'électricité et contribuer à la transition vers une énergie propre.

La connexion de cette source d'énergie solaire à un réseau électrique n'est pas une chose aisée. En effet, la présence d'harmoniques de courant ou de tension provoque des perturbations dans les réseaux électriques. Les effets négatifs les plus connus de la pollution harmonique se résume dans : L'échauffement des conducteurs, les interférences avec les réseaux de télécommunications et les phénomènes de résonance avec les éléments de réseau entraînent tous la défaillance d'équipements électriques spécifiques. Pour résoudre ce problème, les chercheurs dans le domaine n'ont pas hésité à renforcer leurs efforts pour trouver des solutions efficaces et peu coûteuses qui réduiraient les émissions harmoniques. Un choix judicieux de topologie d'onduleur est donc nécessaire pour fournir une onde sinusoïdale pure avec un contenu harmonique presque nul, ainsi que par conséquent, une qualité d'énergie supérieure adaptée aux applications complexes est obtenue.

En raison de l'implémentation simplifiée de leurs commandes et du nombre réduit de composants, les onduleurs à deux niveaux sont très répondus dans une variété d'applications.

Le premier chapitre décrit la production d'énergie photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques, la constitution d'un générateur PV (GPV) et les principales caractéristiques de l'énergie solaire. Nous rappelons le modèle d'une cellule PV et ses caractéristiques I-V et P-V et nous terminons ce chapitre par les avantages et les inconvénients des systèmes PV.

Le chapitre deux abordera une étude descriptive de la chaîne du système photovoltaïque connecté au réseau électrique. On a étudié l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant la méthode Perturbe & Observe (P&O) ainsi que la commande découplé DQ du système PV connecté au réseau.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation de tous les éléments constituant l'ensemble système PV réseau, suivi d'interprétation des résultats ainsi qu'une étude harmonique des tensions et courants de lignes. L'étude par simulation est réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink. Enfin, une conclusion générale et des perspectives seront proposées.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes photovoltaïque

1. Introduction

La technologie photovoltaïque est l'un des meilleurs moyens d'exploiter l'énergie solaire où l'énergie solaire photovoltaïque est créée en convertissant directement l'énergie contenue dans les photons dans le rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques, qui sont faites de matériaux sensibles aux longueurs d'onde. Les matériaux les plus utilisés dans l'industrie sont les matériaux à base de silicium [1].

Dans ce chapitre nous nous aborderons le domaine photovoltaïque dans sa généralité. Nous rappellerons brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique. Après, nous développerons les caractéristiques des cellules photovoltaïques et leur modélisation afin de définir leurs modes de fonctionnement et nous avons aussi cité l'influence des paramètres météorologiques (température et éclairage) sur le comportement d'une cellule PV. Nous terminons ce chapitre par les types des systèmes photovoltaïques qui sont les systèmes PV isolés et connectés au réseau électrique ainsi les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque en générale.

1.1 Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie solaire est une énergie générée grâce aux rayonnements électromagnétiques produits par le soleil. Il existe deux principaux types de d'énergie solaire [2] :

- **L'énergie solaire thermique** : qui consiste à produire la chaleur grâce à des panneaux sombres et on peut aussi produire avec la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.



Figure 1.1 Energie solaire thermique [2]

- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire l'électricité grâce à des panneaux photovoltaïques.



Figure 1.2 Energie solaire photovoltaïque [2]

1.2 Spectre solaire

C'est la répartition en fonction de la longueur d'onde de l'énergie lumineuse émise par le soleil. Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$, L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose grossièrement comme suit [3] :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($\mu < 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible (μ de $0,4 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($\mu > 0,8 \mu\text{m}$)

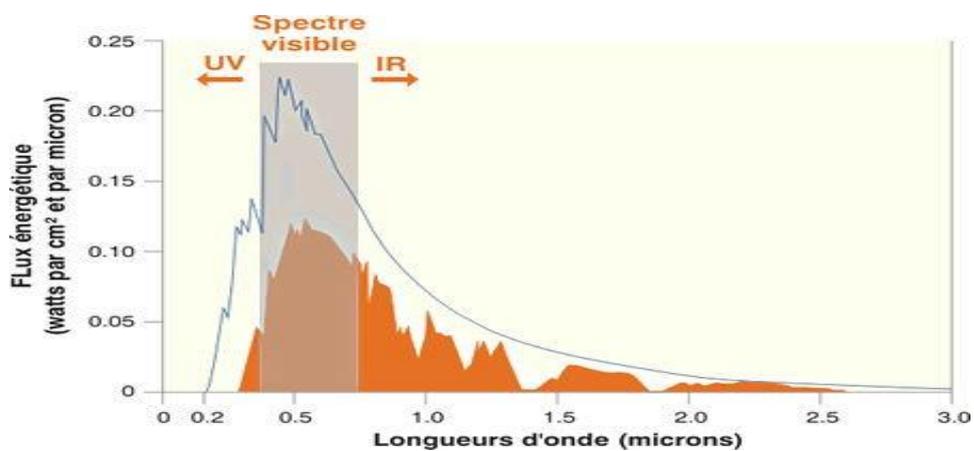


Figure 1.3 Analyse du rayonnement solaire [3]

1.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la ressource énergétique la plus uniformément distribuée sur terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (capturée par la terre) pendant une heure peut être suffisante pour couvrir les besoins énergétiques du monde pendant un an [4]. Une partie de ce rayonnement peut être utilisée directement pour produire de la chaleur (solaire thermique) ou l'électricité appelée énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de distribution en réseau, car il permet de produire de l'électricité et peut être consommé dans des endroits comme des villages, des maisons individuelles, des pompes à eau, des refuges...

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie rayonnante dans le système solaire. La terre intercepte une petite partie de cette énergie rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts par mètre carré atteint le bord en dehors de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre soleil 150 millions kilomètres), cette quantité est appelée la constante solaire. L'énergie reçue par la surface de la terre dépend de l'épaisseur de la traversée atmosphérique. C'est la fonction de la masse d'air [5].

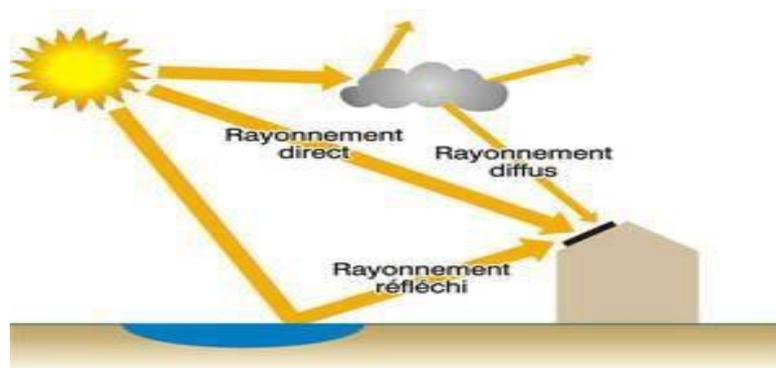


Figure 1.4 Composantes du rayonnement solaire [5]

On distingue trois composantes de rayonnement solaire :

a-Rayonnement direct: Le terme "rayonnement directe du soleil" fait référence au rayonnement du soleil qui est reçue directement du soleil sans être diffusée par l'atmosphère.

b-Rayonnement diffus: L'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (molécules d'air, gouttelettes d'eau, poussières, etc.) et sa réflexion par les nuages sont responsables du rayonnement diffusé.

c-Rayonnement réfléchi:

Le terme « rayonnement réfléchi » désigne le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets sur sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol (environnement du site), et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neiges, eau, etc.).

d-Rayonnement global:

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus.

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi

1.4 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue en convertissant la lumière solaire en électricité à l'aide d'une technologie basée sur l'effet photoélectrique. C'est un type d'énergie renouvelable, inépuisable et non polluante qui peut être produite dans des installations allant de petits générateurs à de grandes centrales photovoltaïques.

1.4.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Cette conversion se réalise grâce à la production et au transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet du rayonnement [6].

Un matériau semi-conducteur comporte deux couches : La première couche qui est de type-n- a une abondance d'électrons, et elle est chargée négativement. L'autre couche qui est de type-p- a une abondance de trous, et il est chargé positivement. Comme le silicium de type-n- a un excès d'électrons et que le silicium de type p a un excès de trous, le contact de ces couches ensemble crée une jonction p-n à leur interface, créant ainsi un champ électrique [6].

Dans ce contact, les électrons excédentaires se déplacent du côté de type n vers le côté de type p. En conséquence, une charge positive est construite le long du côté type-n de l'interface et la charge négative le long du côté type-p. Ainsi, un champ électrique est créé à la surface où les couches se rencontrent, appelé la jonction p/n. Ce champ électrique est dû au flux d'électrons et de trous. Ce champ électrique fait que les électrons se déplacent du semi-conducteur vers la surface négative pour transporter le courant. Dans le même temps, les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive, où ils attendent les électrons entrants [7].

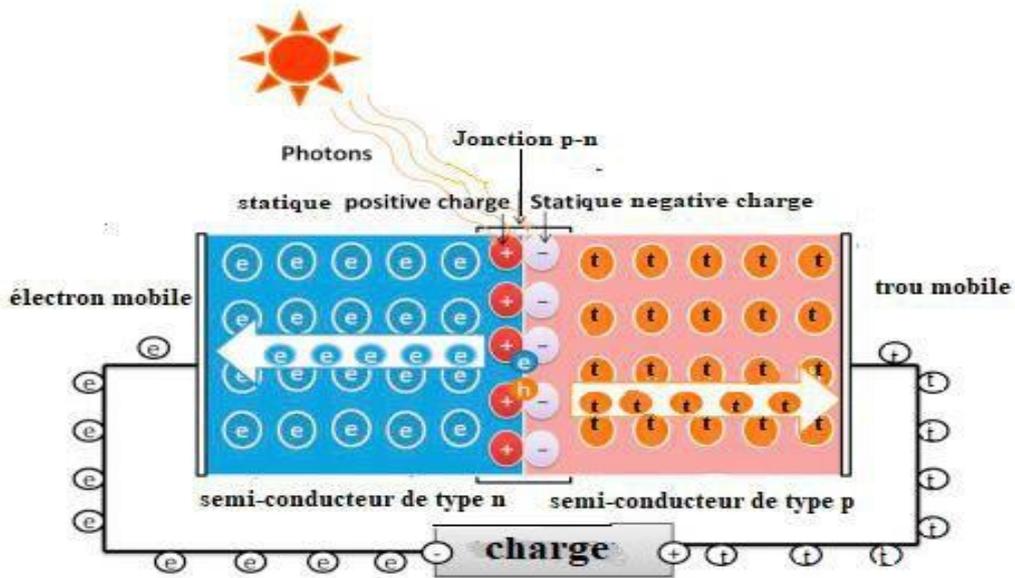


Figure 1.5 Effet photovoltaïque [8]

1.5 Constitution d'un générateur photovoltaïque

- Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques convertissent directement la lumière du soleil en électricité. Les cellules sont assemblées en systèmes à plaques plates qui peuvent être montées sur les toits ou d'autres zones ensoleillées. Ils produisent de l'électricité sans pièces mobiles, fonctionnent tranquillement sans émissions et nécessitent peu d'entretien. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium [9].



Figure 1.6 Cellule photovoltaïque [9]

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques comme montre le tableau 1.1. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres.

Tableau 1.1 Tableau comparatif des différentes technologies des cellules [10]

Matériau	Rendement	Caractéristiques
Silicium mono Cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	-le meilleur rendement -coût très élevé -fabrications complexe
Silicium poly Cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	-Un rendement plus faible - Leur conception est plus facile.
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)	-Elles sont utilisées dans de petits produits : (calculatrices, des montres)
Composite Monocristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)	- Lourd, fissure facilement
Composite poly- cristallin (CdS, CdTe...	8% (16% en laboratoire)	Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes

- **Module photovoltaïque**

Les modules photovoltaïques sont composés d'un groupe de cellules. Celles-ci sont connectées les unes aux autres en série ou en parallèle. La connexion série permet d'augmenter la tension globale, tandis que la connexion parallèle permet d'augmenter le courant.



Figure 1.7 Module photovoltaïque [11]

- **Panneau photovoltaïque**

Les panneaux photovoltaïques sont composés d'un groupe de modules connectés en série et en parallèle pour avoir la puissance de sortie souhaitée.



Figure 1.8 Panneau photovoltaïque [12]

1.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques ou circuits électriques équivalents sont développés pour représenter le comportement.

1.6.1 Cas d'une cellule idéale

Dans ce cas la cellule photovoltaïque est représentée par un circuit électrique constitué d'une source de courant qui contrôle le flux lumineux, d'une résistance en série qui représente les pertes et d'une diode parallèle (voir figure I. 9), [13].

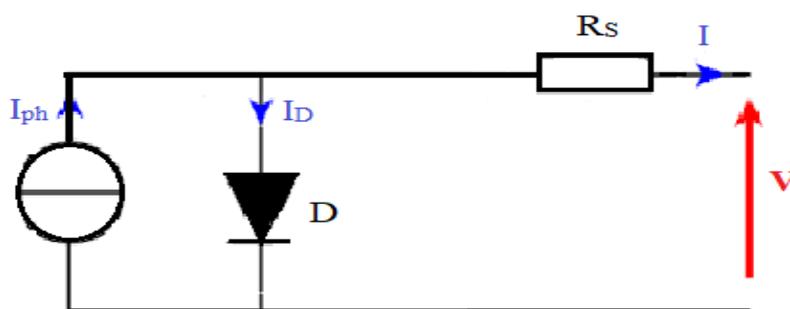


Figure 1.9 Schéma équivalent électrique d'une cellule idéale.

1.6.2 Cas d'une cellule réelle

Le circuit équivalent dans ce cas contient une jonction p-n appelée diode, un générateur de photo courant et deux résistances, l'une est disposée en série et l'autre est en parallèle [14].

Le modèle électrique équivalent à la cellule réelle est représenté par la figure 1.10 :

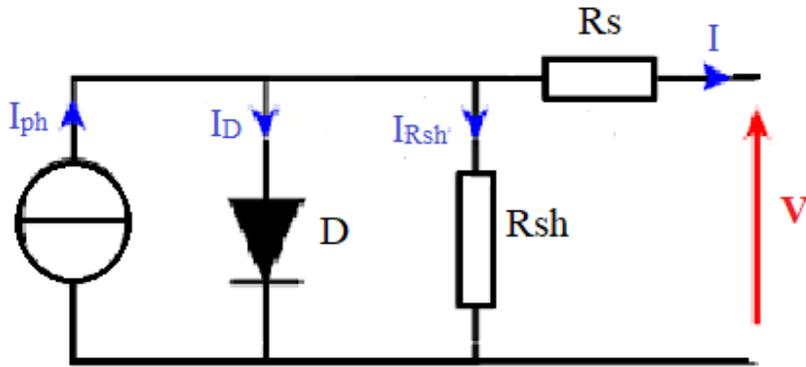


Figure 1.10 Schéma électrique d'une cellule réelle

D'après la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \tag{1.1}$$

L'expression résultante qui représente la caractéristique courant-tension (I-V) est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V+(I \cdot R_s)}{nvt}\right) - 1 \right] - \frac{V+(I \cdot R_s)}{R_{sh}} \tag{1.2}$$

Avec :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \tag{1.3}$$

$$I_{sat} = \left(I_s * \exp\left[\left(\frac{V_{co}}{n \cdot vt}\right)\right] - 1 \right) * \left(\left(\frac{T}{298}\right)^3 * \exp\left[\frac{q * E_g * \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot K}\right] \right) \tag{1.4}$$

Avec ;

I_{ph}: Photo courant produit.

I_{sat}: Courant de saturation de la diode

R_{sh}: La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$Vt = \frac{Kt}{q}$ = Tension thermique à la température T.

q : Charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19}c$)

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} j/k$)

K_i : Constante ($1.2A /cm^2 K^3$)

n : Facteur de non idéalité de la jonction

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin

E_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

G : l'ensoleillement en W/m^2

1.7 Caractéristiques électriques d'une cellule

Les caractéristiques principales qui représentent le comportement d'un générateur photovoltaïque sont les caractéristiques courants tensions et puissance tension.

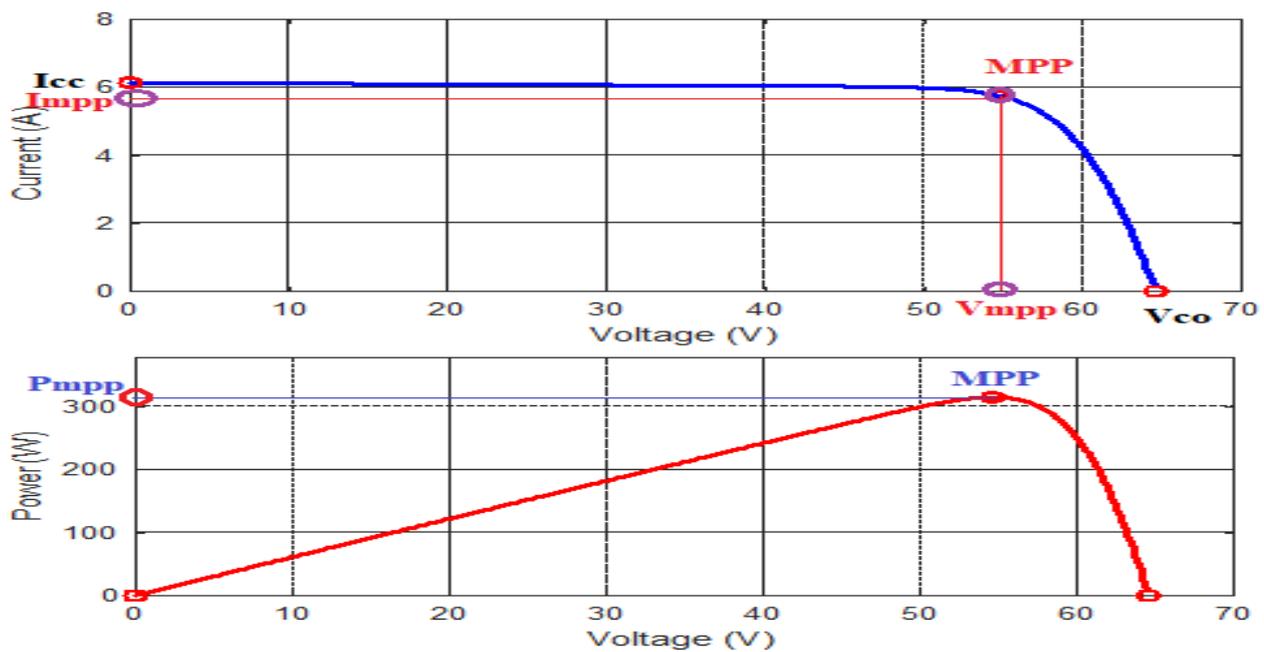


Figure 1.11 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Trois points sont importants sur cette courbe :

- Le point de fonctionnement à vide : V_{CO} pour $I = 0A$
- Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{CC} pour $U = 0V$
- Le point de puissance maximale P_{mpp} : c'est le point qui correspond à la puissance maximale que délivre le PV.

1.7.1 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. Il est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert V_{CO} par le courant de court-circuit I_{CC} .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{CC}} \quad (1.5)$$

1.7.2 Rendement de la cellule

Le rendement de conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident [15].

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

S : surface de la cellule (m^2).

E : l'éclairement (W/m^2).

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot E} \quad (1.6)$$

1.8 Association de cellule photovoltaïque

1.8.1 Association parallèle

L'association parallèle de cellules permet d'augmenter le courant de sortie du générateur PV. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont toutes soumises à la même tension comme illustre la figure 1.12. La caractéristique équivalente à N_p cellule parallèle est déterminée par la figure 1.13.

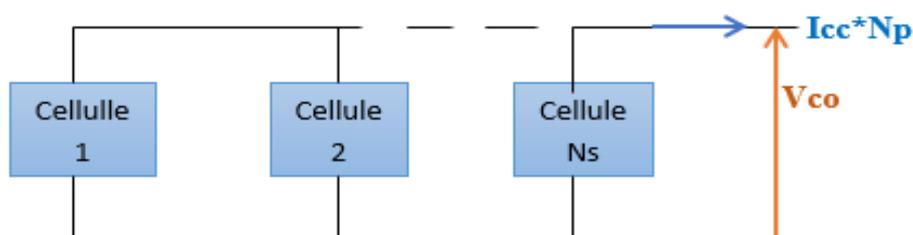


Figure 1.12 Schéma de groupement de cellule en parallèle

Caractéristique I-V d'un groupement de cellule en série

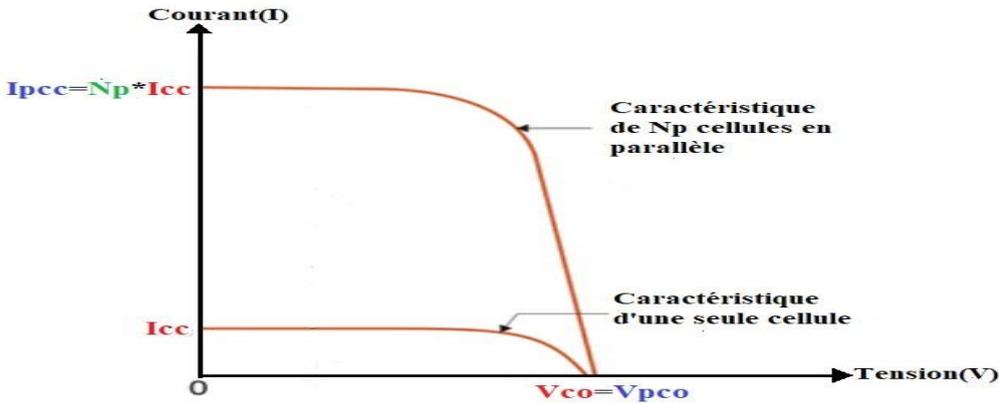


Figure 1.13 Caractéristique I-V de groupement de N_p cellules en parallèle

1.8.2 Association série

L'association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont traversées par le même courant comme illustre la figure 1.14, et la caractéristique correspondante est obtenue en ajoutant les tensions élémentaires de chaque cellule.

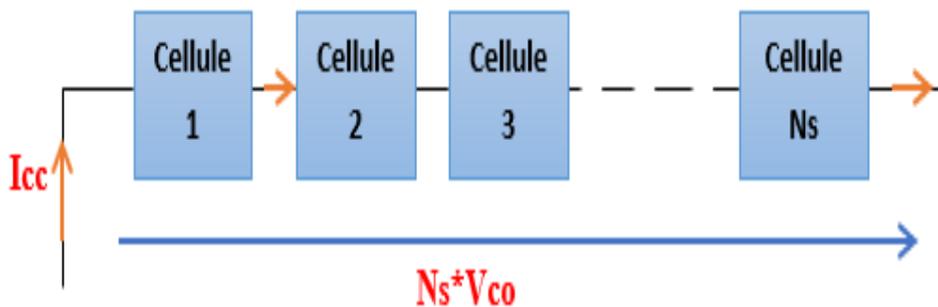


Figure 1.14 Schéma de N_s cellules en série

La figure ci-dessous représente l'effet de la connexion de N_s cellules en série :

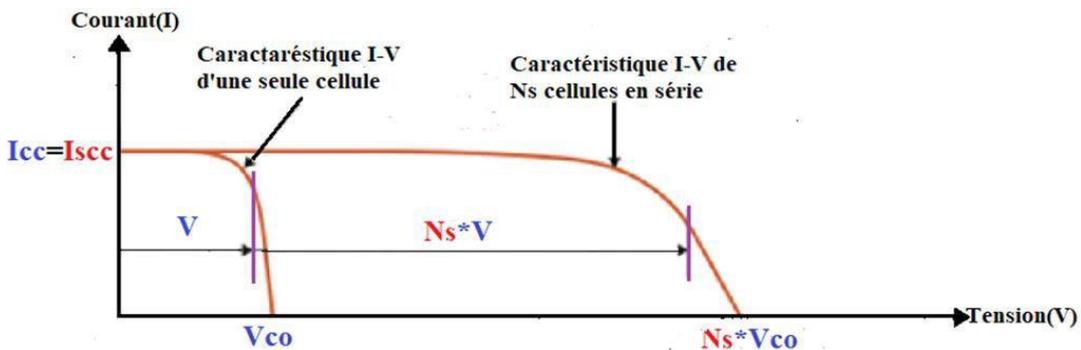


Figure 1.15 Caractéristique I-V d'un groupement de cellule en série

1.9 Influence de la variation de l'éclairement et la température

1.9.1 Influence de l'éclairement

La figure 1.16 présente les caractéristiques photovoltaïque $P=f(V)$ et $I=f(V)$ pour des valeurs variables d'éclairement variables et une température fixée à 25°C.

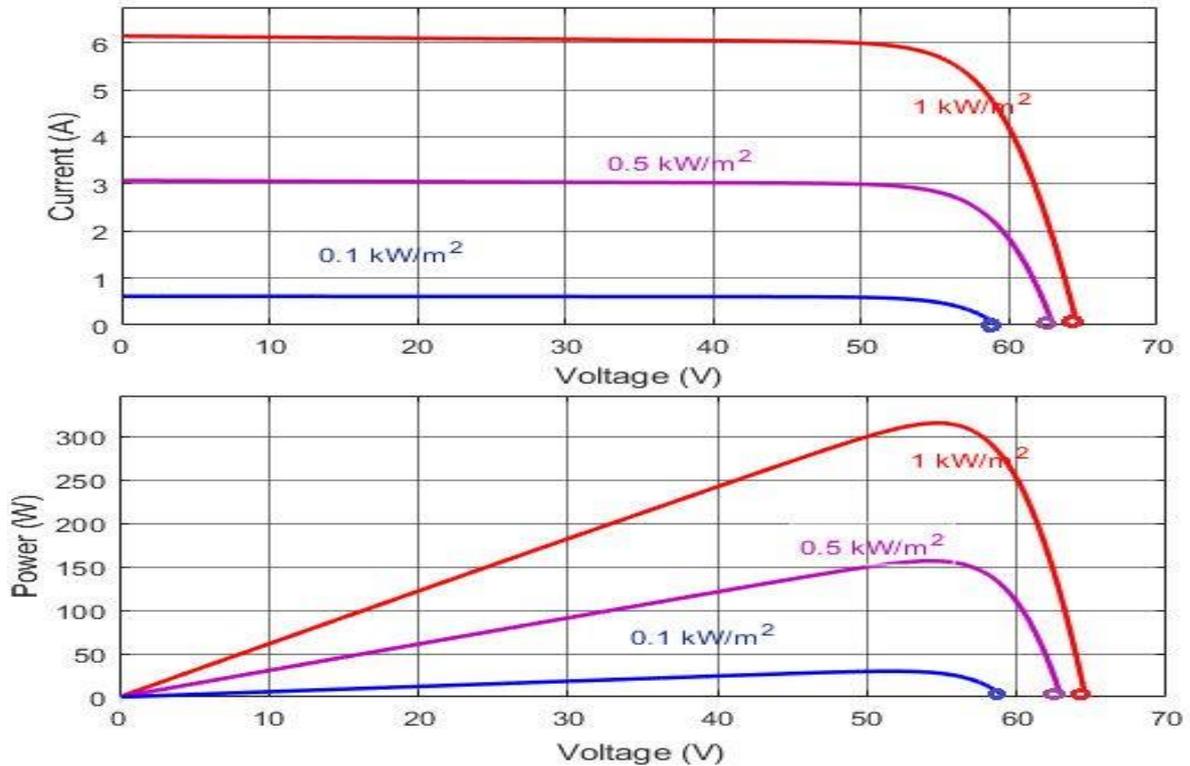


Figure 1.16 Caractéristiques I(V) et P(V) avec différentes valeurs d'éclairement

On remarque que d'après la figure 1.16 lorsque l'intensité de l'éclairement augmente avec une température constante, le courant du court-circuit I_{CC} augmente proportionnellement avec l'irradiation et la tension en circuit ouvert varie très peu et reste quasi constante.

1.9.2 Influence de la température

Dans ce cas on varie la température entre 25 °C et 75 °C avec un pas de 25 °C et on fixe l'éclairement à $G=1000 \text{ W/m}^2$.

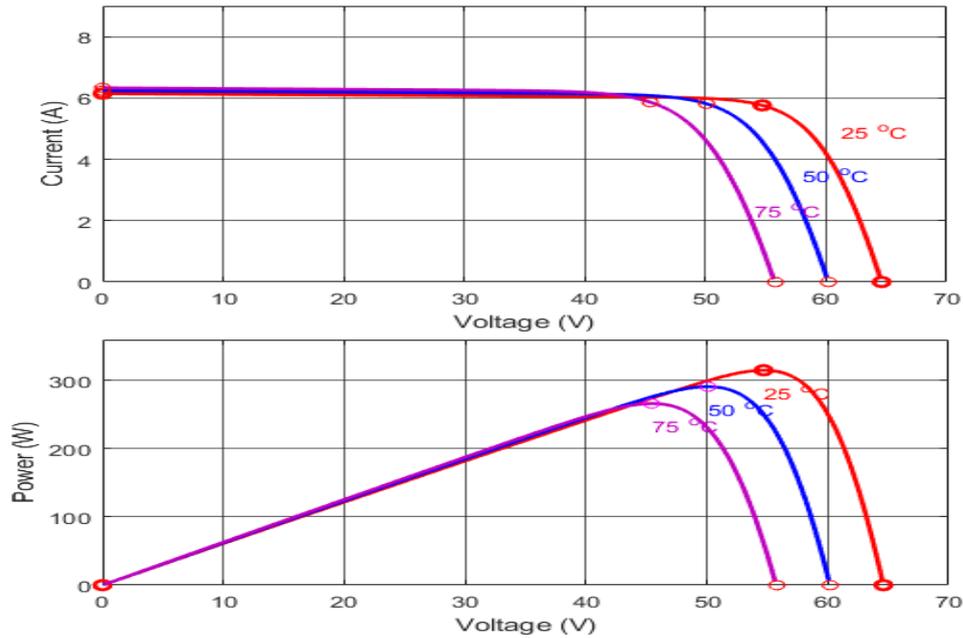


Figure 1.17 Caractéristiques P(V) et I(V) avec température variable

Nous remarquons à partir de la figure 1.17 que lorsque la température augmente, la tension du circuit ouvert V_{CO} diminue, et que le courant I_{CC} reste presque constant. Ainsi l'augmentation de la température entraîne une réduction de la puissance maximale fournie par le module PV.

1.10 Protection des modules photovoltaïques

• Diode by-pass

L'un des problèmes les plus courants rencontrés dans les centrales photovoltaïques survient lorsque les cellules solaires reçoivent un éclairage non uniforme ou partiellement ombragée.

Toutes les cellules photovoltaïques du module produisent leur puissance maximale lorsqu'il fonctionne normalement, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'effet d'ombrage. Lorsque l'une des cellules est ombragée, on dit qu'elle est sous-irradiée. Il en résulte une diminution de courant dû par la cellule ombragée, la tension aux bornes de cette cellule augmente, d'où l'apparition de points chauds [16].

La cellule qui débite le moins de courant impose ce courant aux autres. Pour supprimer ce problème et protéger les cellules, on place des diodes « by-pass » en antiparallèles de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

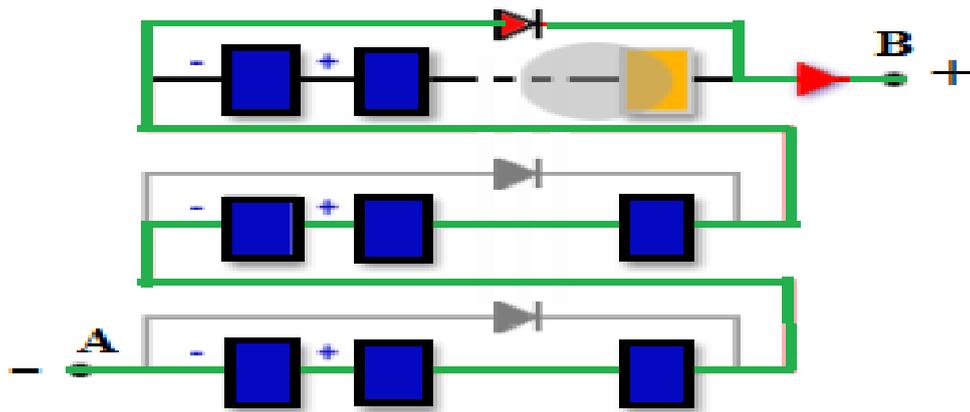


Figure 1.18 Protection d'un module par diode by-pass

- **La Diode anti-retour**

Les diodes anti-retours sont utilisées pour empêcher le retour des courants. Ce apparaît lorsque plusieurs cellules sont connectées en parallèle et pour éviter qu'ils débitent les uns dans les autres s'ils ont une puissance différente, ou s'ils ne reçoivent pas la même irradiation, ou lorsqu'une charge directe peut passer du mode de réception au mode de génération, comme une batterie pendant la nuit.

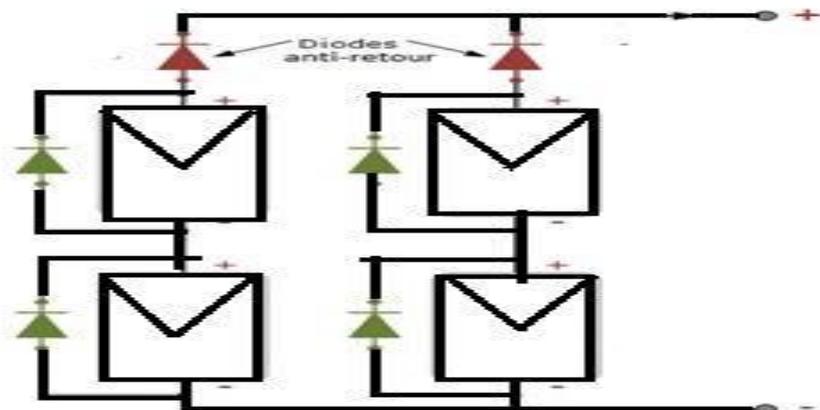


Figure 1.19 Protection d'un module par diode anti-retour

1.11 Types d'installations photovoltaïques

1.11.1 Installation autonome (isolée)

Ce type d'installation convient aux cotes isolées. Pour satisfaire les consommateurs, l'énergie produite doit être consommée immédiatement et/ou stockée dans des accumulateurs. Cette installation est constituée de :

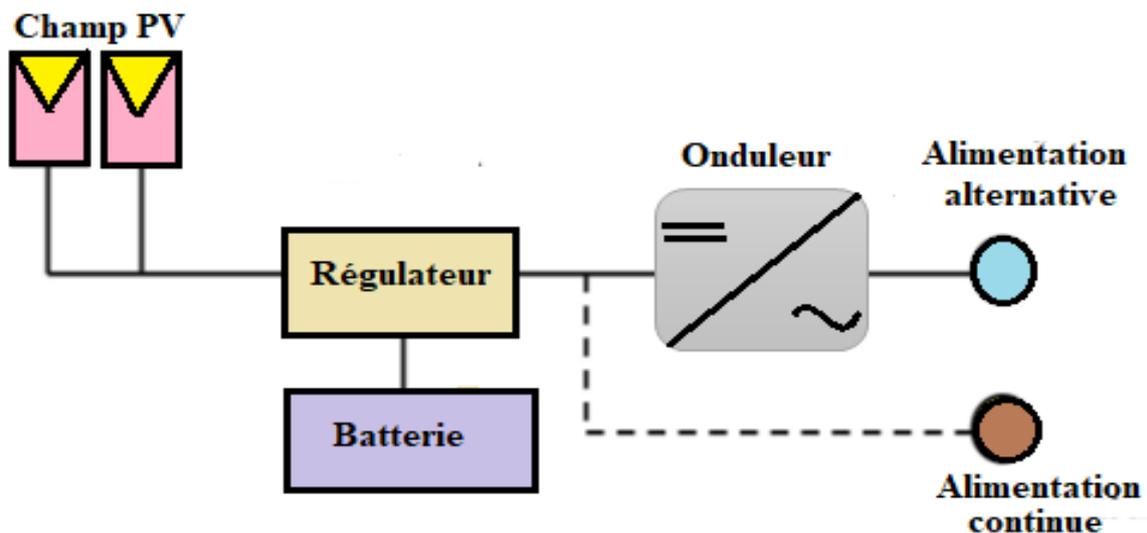


Figure 1.20 Installation photovoltaïque autonome

- **panneaux photovoltaïques** qui génèrent un courant électrique continu.
- **régulateur** qui optimise la charge et la décharge de la batterie en fonction de sa capacité et assure sa sécurité.
- **onduleur** qui convertit le courant continu en courant alternatif.
- **batteries** qui sont chargées quotidiennement afin de fournir de l'électricité pendant la nuit ou en absence de l'éclairage.

1.11.2 Installation raccordée au réseau

- **Injection totale de l'énergie électrique**

Toute l'énergie électrique générée par le champ photovoltaïque est envoyée au réseau de distribution. Pour cela deux compteurs sont utilisés comme montre la figure :

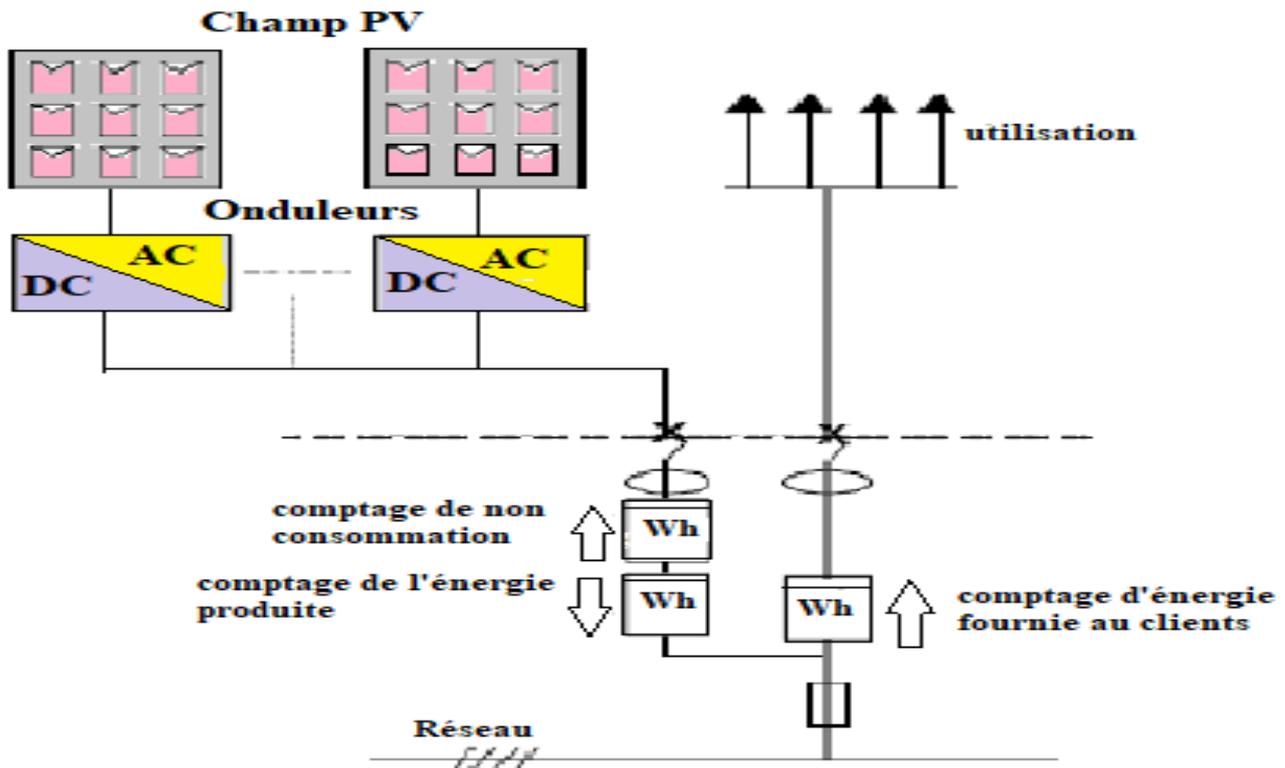


Figure 1.21 Injection totale d'énergie

- **Compteur de consommation** : Pour compter l'énergie que vous soutirez à partir du réseau.
- **Compteur de production** : Pour compter l'énergie totale produite par la centrale photovoltaïque.
- **Compteur de non-consommation** : Il permet au réseau public de distribution, ou "le consommateur", de s'assurer qu'aucun soutirage n'est effectué de manière frauduleuse.

- **Injection de surplus**

Cette approche utilise une connexion point à point au réseau public : l'utilisateur consomme l'énergie produite par le système solaire, et l'excédent est introduit dans le réseau.

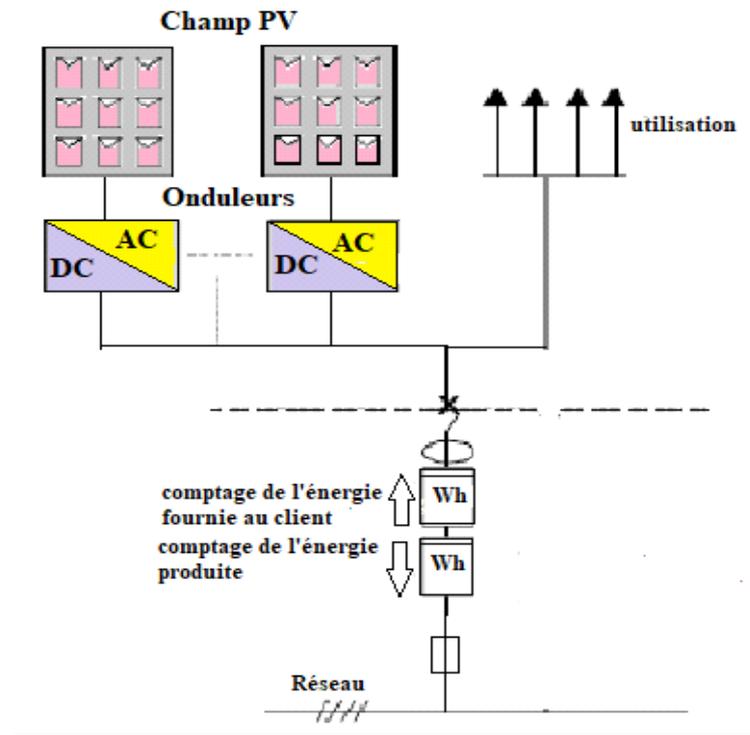


Figure1.22 Injection de surplus

- **Compteur de consommation** : Pour compter l'énergie soutirée à partir du réseau.
- **Compteur de production** : Ne compte que l'énergie injectée dans le réseau.

1.12 Normes pour la connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Pour un fonctionnement ininterrompu dans les limites spécifiées dans les normes, certains termes importants tels que distorsion harmonique totale, injection de composante continue de courant (CC), l'isolement galvanique, le facteur de puissance, plage de fréquence. Les normes les plus pertinentes, IEC 61727 et IEEE 1547-2003, sont présentées dans le tableau 1.2 [17].

Tableau 1.2 Normes pour les systèmes PV raccordés au réseau.

Paramètres	IEC 61727	IEEE 1547
THD	< 5 %	< 5 %
Facteur de puissance	0.90	0.90
Injection du composante continue de courant	Moins de 1 % du courant de sortie nominal	Moins de 0.5 % du courant de sortie nominal
Plage de tension pour un fonctionnement normal	85 % à 110 %	88 % à 110 %
Plage de fréquence pour un fonctionnement normal	49 Hz à 51 Hz	59.3 Hz à 60.5 Hz

Ainsi, dans les systèmes solaires connectés au réseau, l'onduleur doit effectuer un certain nombre de tâches, y compris la régulation du courant provenant du champ des modules photovoltaïques et de la puissance injectée dans le réseau conformément aux normes applicables. Le contrôle de puissance, la gestion du facteur de puissance, la réduction du taux de distorsion harmonique, la suppression de la composante continue du courant injecté dans le réseau, et surtout, l'utilisation de la commande numérique sont autant de moyens d'améliorer les onduleurs connectés au réseau [17]. Les critères suivants doivent être remplis par les onduleurs connectés au réseau :

- Maintenir la fonctionnalité de l'onduleur tout en garantissant la meilleure connexion possible à partir des modules solaires.
- Améliorer l'efficacité de commande de l'onduleur connecté au réseau par rapport aux méthodes actuellement utilisées dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.
- Améliorer la qualité de l'électricité produite et injectée au réseau [17].

1.13 Protection du système photovoltaïque raccordé au réseau

Du côté continu, il faut protéger l'installation contre les courts-circuits et les surtensions atmosphériques. Il faut également prévoir la mise en place d'un interrupteur général permettant la coupure de l'ensemble des panneaux solaires en cas d'urgence.

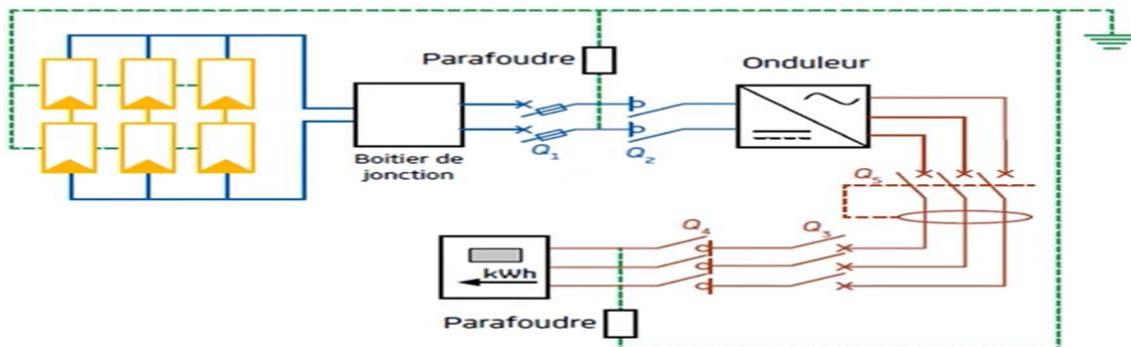


Figure 1.23. Protection du système photovoltaïque raccordé au réseau

Du côté alternatif, de l'installation, il faut protéger l'installation contre les surintensités, les surtensions atmosphériques. Il faut prévoir la mise en place d'un interrupteur sectionneur afin de déconnecter l'installation ainsi que la mise en place de la protection des personnes.

1.14 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

✓ Avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie propre inépuisable et disponible. Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables, facile à installer et nécessitent peu d'entretien.

✓ Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Le coût d'investissement est très élevé et le rendement de conversion est faible. L'installation utilise une grande surface en plus du problème d'intermittence.

1.15 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons exposé quelques notions sur le rayonnement solaire, circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque, la conception d'un module, sa protection, et l'influence des changements climatiques sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$. Les modules peuvent également être connectés en série et/ou en parallèle pour construire un champ photovoltaïque afin d'augmenter la puissance. Nous avons présenté aussi les différents types des systèmes photovoltaïques isolés et connectés au réseau. La configuration du système PV connecté au réseau sera traité en détail dans le chapitre 2.

Chapitre 2

Commande DQ du système PV connecté au réseau

2.1 Introduction

Dans les systèmes PV connectés au réseau, les exigences pour la connexion du convertisseur comprennent : point de puissance maximum, rendement élevé, puissance injectée dans le réseau, et faible distorsion harmonique totale des courants injectés dans le réseau. Par conséquent, la performance des onduleurs connectés au réseau dépend largement de la stratégie de contrôle appliquée. Ce chapitre présente une modélisation de chaque élément intervenant dans le système PV connecté au réseau ainsi qu'une explication détaillée de la commande DQ.

2.2 Architectures de conversion photovoltaïque

Il existe deux types d'architectures : les applications à un étage avec conversion directe DC/AC et les applications à deux étages avec une première conversion DC/DC et une deuxième conversion DC/AC.

- **Conversion mono étage (single stage)**

Dans ce cas il n'y a pas d'étape d'amplification de la tension, donc la conversion se fait en une seule étape. En conséquence, la tension du champ PV doit être suffisante pour que l'onduleur puisse reconstituer la tension du réseau. Dans cette configuration, le convertisseur doit fournir toutes les fonctions requises par une application PV connectée au réseau (MPPT, commande des impulsions, etc.) [18].

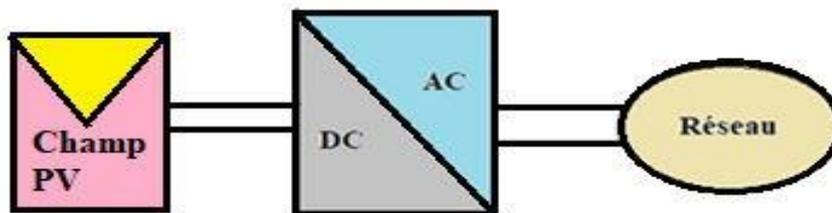


Figure 2.1 Schéma bloc d'une chaîne de conversion mono étage

- **Conversion double étage (double stage)**

La conversion dans ce cas se fait en deux étapes, la première étant DC/DC et la seconde étant DC/AC. Dans cette conception, le rôle du convertisseur DC/DC est généralement d'augmenter la tension de sorte que l'onduleur peut générer un courant sinusoïdal à la sortie raccordée au réseau. Les convertisseurs sont connectés par un bus continu. Dans ce cas, les fonctions requises par les applications PV peuvent être réparties entre les deux convertisseurs [18].

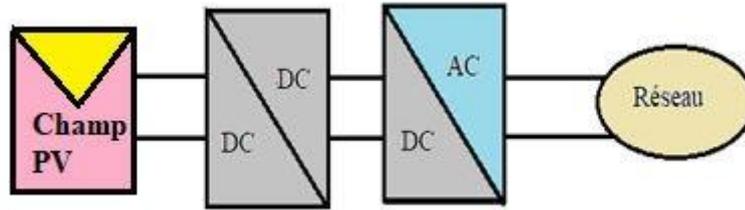


Figure 2.2 Schéma bloc d'une chaîne de conversion double étage

2.3 Topologies de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Les topologies des réseaux photovoltaïques varient selon la façon dont le générateur PV est connecté au réseau électrique. En général, on distingue quatre types de systèmes photovoltaïques connectés au réseau [19] :

2.3.1 Onduleur centrale

Dans cette configuration un seul onduleur est relié à la sortie des modules PV qui sont connectés en série et en parallèle à l'aide de diodes [20].

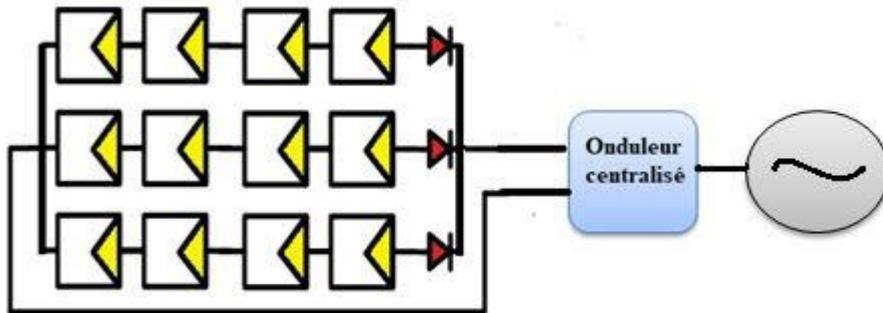


Figure 2.3 Schéma topologique d'onduleur centrale

2.3.2 Onduleur shunt (String inverter)

Dans cette configuration chaque rangée est liée à un onduleur [21].

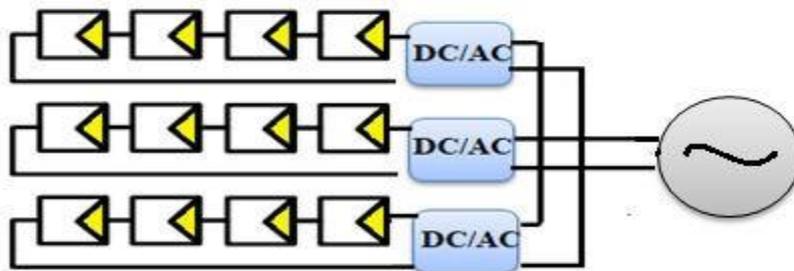


Figure 2.4 Schéma topologique de l'onduleur shunt

2.3.3 Onduleur multi-shunt (multi-string)

Le principe d'un onduleur mixte multi-string est basé sur l'association de nombreux hacheurs modulables DC-DC à un onduleur central à travers un bus continu, voir figure 2.5. Chaque hacheur possède sa propre technique MPPT, ce qui permet à chaque rangée de fonctionner à sa propre PPM.

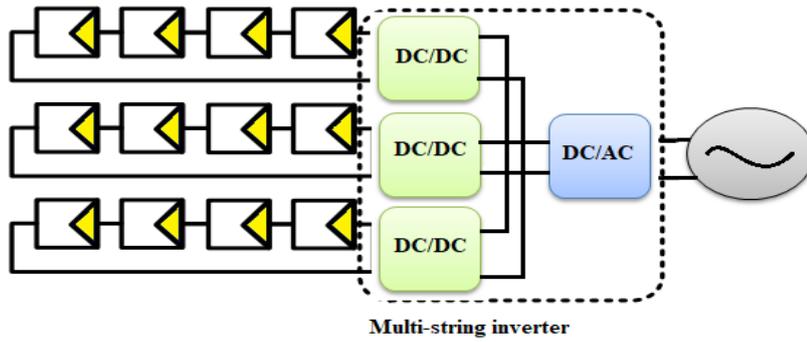


Figure 2.5 Topologie de l'onduleur multi-string

2.3.4 Onduleur modulaire

Selon cette notion, chaque module solaire possède son propre onduleur, comme le montre la figure 2.6

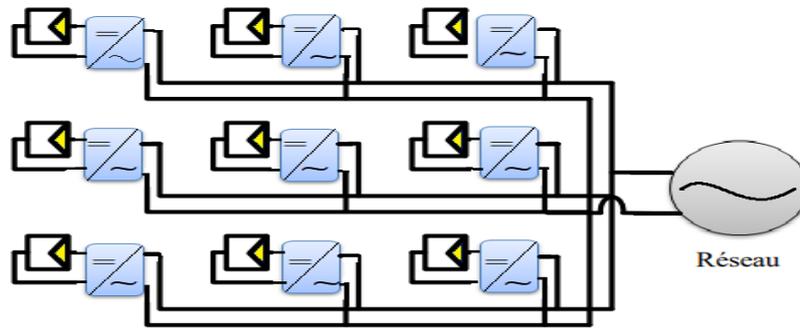


Figure 2.6 Schéma topologique d'onduleur modulaire

2.4 Modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau

Notre système est constitué d'un générateur photovoltaïque commandé par MPPT, un onduleur de tension triphasée, commandé par la stratégie de la modulation de largeur d'impulsion connectée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un filtre LC comme montre la figure 2.7.

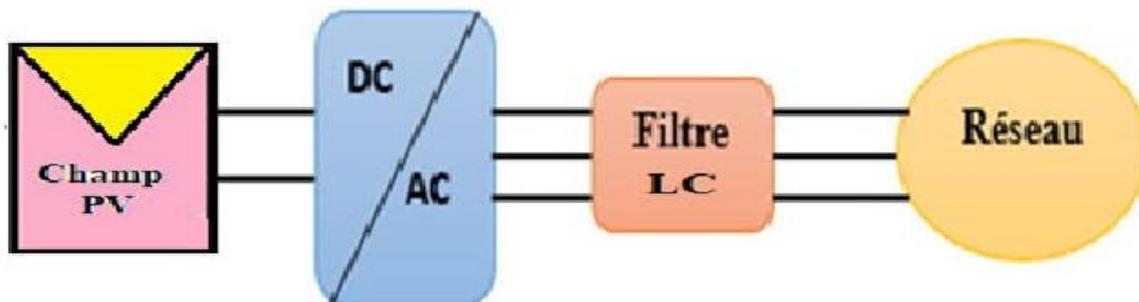


Figure 2.7 Schéma synoptique d'une chaîne photovoltaïque à un étage connectée au réseau

2.5 Stratégie de commande DQ du système proposé

La commande par les courants directe et quadratique des puissances également connue sous le nom de commande DQ, est une technique de commande largement utilisée dans les systèmes de commande électrique pour contrôler les puissances active et réactive délivrées par un convertisseur de puissance. La

commande DQ est couramment utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie tels que les contrôles de moteurs électriques, les onduleurs de puissance et les systèmes de distribution d'énergie. Cette commande permet de minimiser les interactions entre les différents composants du système, et d'optimiser la performance et la stabilité du système.

En utilisant cette technique, les courants de ligne triphasés alternatifs sont transformés dans le système de Park tournant d'axes d et q orthogonaux en deux composantes directe I_d et quadratique I_q (figure 2.8.a). Cela permet de contrôler de manière indépendante la puissance active P par action sur la composante de courant directe I_d et la composante réactive q par action sur la composante en quadrature I_q .

L'ensemble du système comprend une partie puissance composée d'un générateur photovoltaïque muni d'une commande MPPT (P&O) connecté à un onduleur de tension à deux niveaux raccordé au réseau basse tension via un filtre LC qui sert à améliorer la qualité de la tension alternative à la sortie de l'onduleur (figure 2.8.b). La partie commande sert à produire les impulsions de commande des semi-conducteurs (IGBT) constituant l'onduleur en considérant un éclairement variable.

Afin de commander les impulsions de commande des interrupteurs constituant l'onduleur ; les tensions et les courants de lignes sont convertis dans le repère de Park tournant en composantes directe et quadratique. Pour ce faire une PLL (phase locked Loop) est conçue afin de produire la phase instantanée $\theta (\omega t)$ nécessaire pour le calcul des composantes directes et en quadrature via la matrice de Park. Les courants réels dans le système de Park seront par la suite comparés aux courants de références directe (I_{dref}) et quadratique (I_{qref}) maintenu à zéro. Le courant de référence directe est issu d'une boucle de régulation de tension du bus continu de l'onduleur qui est maintenue à une tension de référence produite par le block MPPT. La tension de référence générée par le block MPPT varie au fur et mesure que l'éclairement solaire varie afin de générer la valeur du point MPP (point de puissance maximale). Le courant de référence en quadrature est maintenu nul afin d'assurer une consommation nulle de puissance réactive ce qui rend le facteur de puissance unitaire.

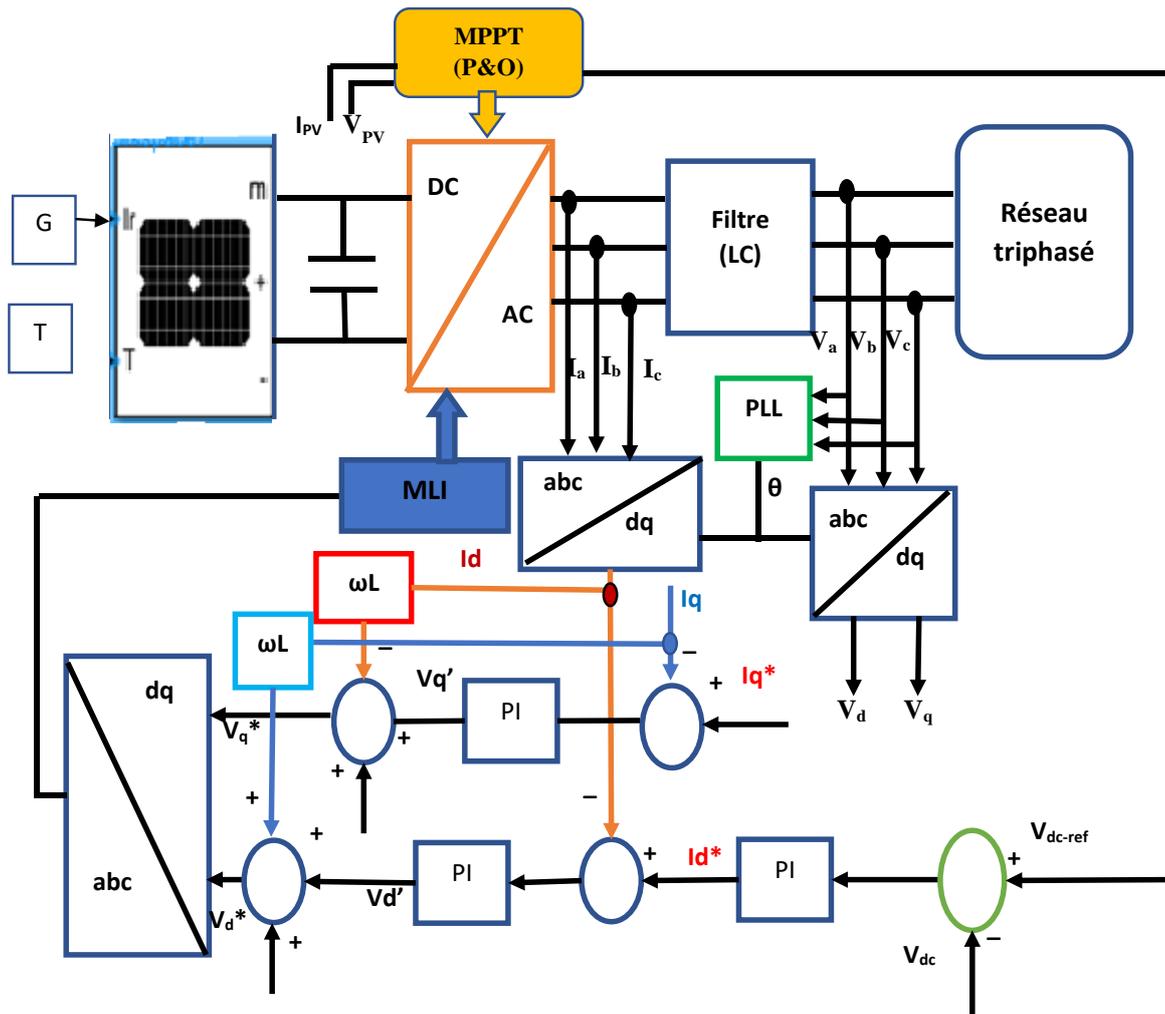


Figure 2.8.a Schéma synoptique de la commande DQ du système PV raccordé au réseau

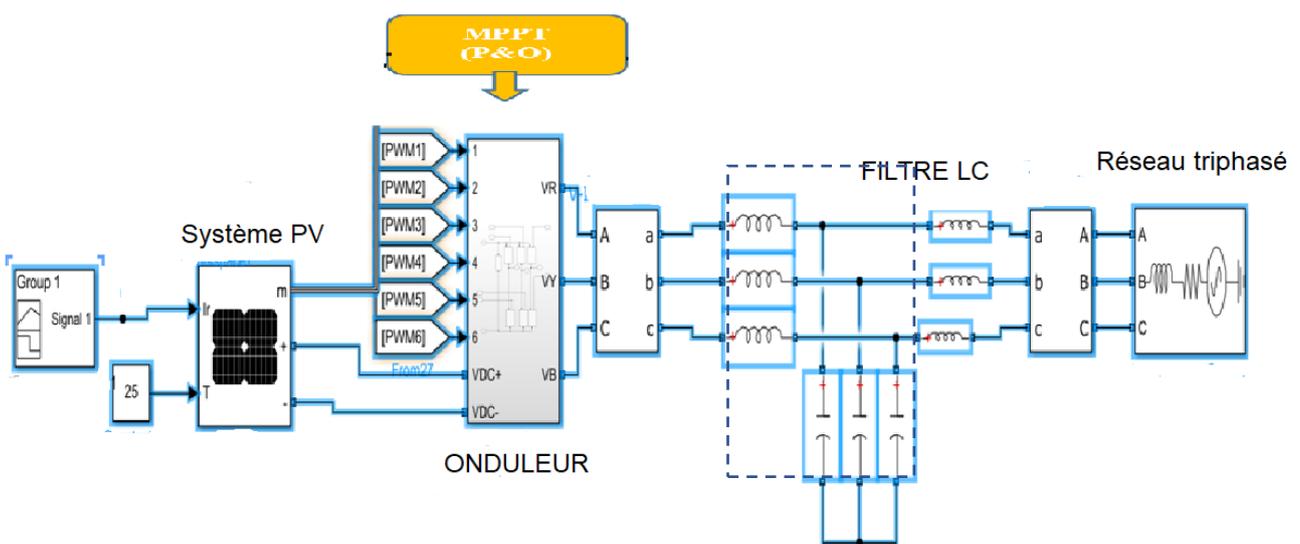


Figure 2.8.b Circuit de puissance du système PV raccordé au réseau

Avec :

V_d, V_q : composantes directe et quadratique de la tension du réseau dans le repère de Park.

I_d, I_q : composantes directe et quadratique du courant à la sortie du convertisseur DC-AC dans le repère de Park.

V'_d, V'_q : composantes directe et quadratique de la tension à la sortie du régulateur PI dans le repère Park.

La commande du convertisseur DC/AC comprend deux boucles de régulations :

- Une boucle de commande de tension de bus continu à l'entrée de l'onduleur.
- Une boucle de commande des courants directs et quadrature (I_d, I_q)

2.6 Modélisation de l'onduleur (convertisseur DC/AC)

Pour obtenir trois phases de tensions à la sortie de l'onduleur, on utilise un onduleur triphasé. Trois bras sont contrôlés pour produire trois tensions de sortie déphasées de 120° , l'une par rapport à l'autre. Chaque bras contient deux transistors avec des diodes en antiparallèle.

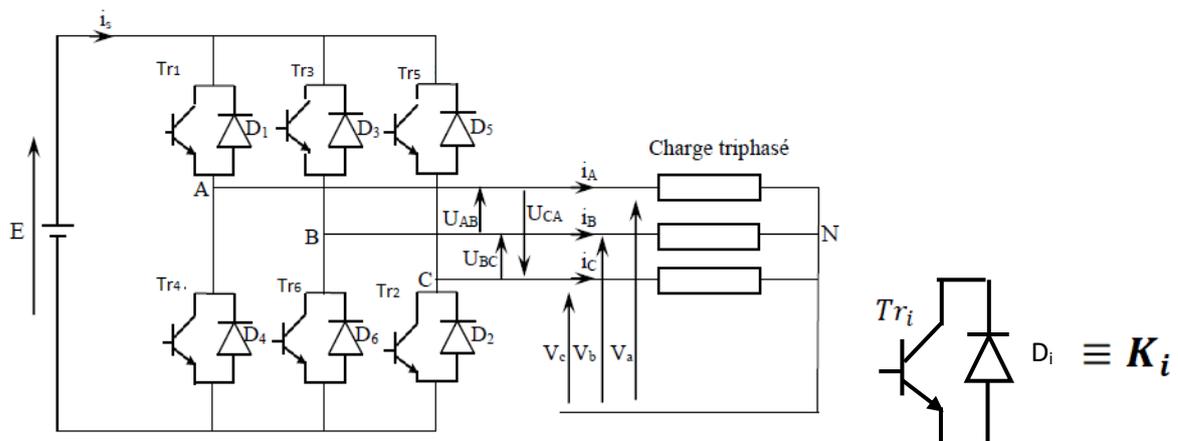


Figure 2.9 Structure d'un onduleur triphasé classique en pont

- **La commande à MLI**

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse With Modulation ou **Modulation de la Largeur d'Impulsion**) est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois référence sinusoïdales sont déphasées de 120° à la même fréquence f

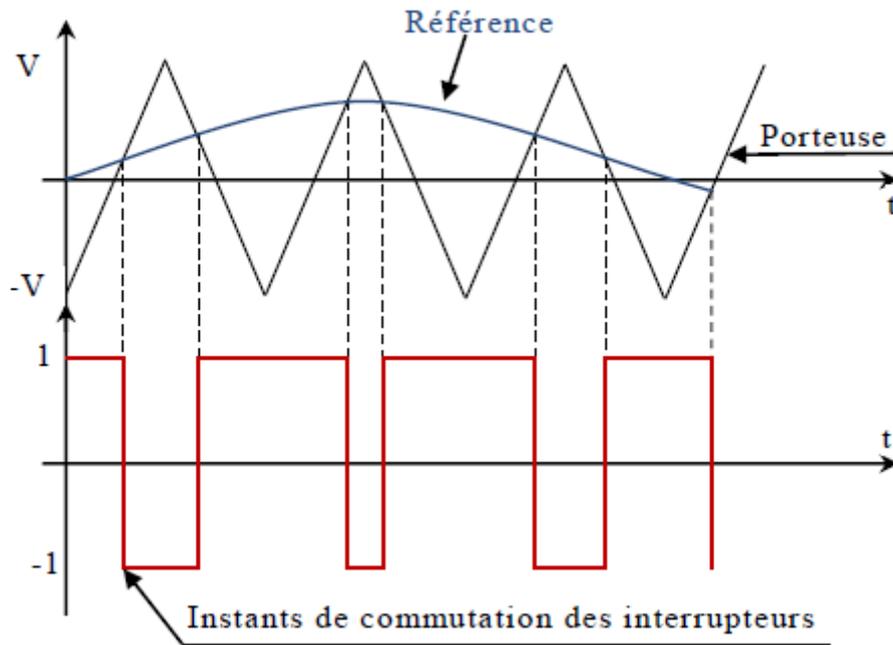


Figure 2.10 Principe de la MLI bipolaire.

- **Caractérisation de la modulation**

Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :

L'indice de modulation m , égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) sur la fréquence de la référence (modulante).

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad \text{avec } m > 1 \quad (2.1)$$

On choisit généralement m supérieure à l'unité parce que l'augmentation mène au déplacement des harmoniques vers des fréquences élevés. En réalité les valeurs très élevées de m provoquent une augmentation des déchets de tension, ce qui nous oblige à optimiser la valeur de m .

$$r = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (2.2)$$

Le coefficient de réglage en tension ' r ', égal au rapport de l'amplitude de la tension de la référence sur celle de la porteuse.

D'ordinaire la modulation est **synchrone**, c'est-à-dire f_p est un multiple entier de f_m . La tension de sortie u est alors vraiment périodique et a une période T égal à $1/T_m$.

Pour une modulation synchrone suffisamment importante ($m \geq 15$), les raies des harmoniques se répartissent par groupe au rang : 1, ($m-2, m, m+2$), ($2m-5, 2m-3, 2m-1, 2m+1, 2m+3, 2m+5$),

L'augmentation de m rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées et facilite donc le filtrage. Mais, m est limité par les temps des commutations des semi-conducteurs des convertisseurs et donc par la largeur minimale des impulsions.

- **MLI bipolaire**

Elle est présentée à la figure 2.10; le signal de sortie vaut $\pm E$. Le spectre de la tension de sortie comporte des raies autour de la fréquence de découpage et de ses multiples. La commande des six interrupteurs est complémentaire. Selon l'état de commutation des semi-conducteurs la tension composée à la sortie de l'onduleur aura deux niveaux ; ainsi pour la tension V_{AB} on aura :

$$V_{AB} = E \text{ si } K_1 \text{ est fermé et } K_2 \text{ est ouvert ;}$$

$$V_{AB} = 0 \text{ si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermés}$$

$$V_{AB} = -E \text{ si } K_1 \text{ est ouvert et } K_2 \text{ est fermé}$$

$$V_{AB} = 0 \text{ si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ ouverts}$$

Si le récepteur est équilibré, on peut passer des tensions composées aux tensions simples par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{1}{3}(V_{AB} - V_{CA}) \\ V_{BN} = \frac{1}{3}(V_{BC} - V_{AB}) \\ V_{CN} = \frac{1}{3}(V_{CA} - V_{BC}) \end{cases} \quad (2.3)$$

Tableau1.3 donne les huit combinaisons possibles des trois interrupteurs

	K_1	K_2	K_3	V_A	V_B	V_C
1	1	0	0	$2/3 E$	$-1/3 E$	$-1/3 E$
2	1	1	0	$1/3 E$	$1/3 E$	$-2/3 E$
3	0	1	0	$-1/3 E$	$2/3 E$	$-1/3 E$
4	0	1	1	$-2/3 E$	$1/3 E$	$1/3 E$
5	0	0	1	$-1/3 E$	$-1/3 E$	$2/3 E$
6	1	0	1	$1/3 E$	$-2/3 E$	$1/3 E$
7	1	1	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0

On peut utiliser une onde de modulation unique. Ses interactions avec les trois tensions de référence, une par demi-pont, donnent les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs K_1 et K_4 , K_3 et K_6 , K_5 et K_2 .

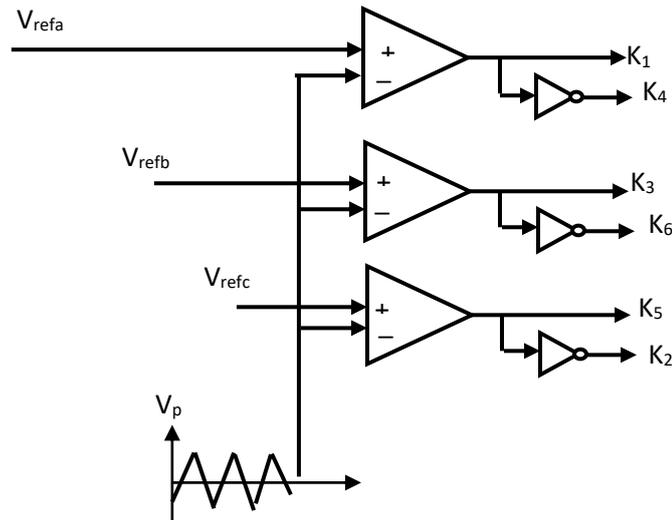


Figure 2.11 Commande en demi- pont

Pour que les trois tensions de sortie soient identiques, à un tiers de leur période près, en modulation synchrone on adopte un indice de modulation m multiple de 3.

- **Etude harmonique de la tension à la sortie de l'onduleur**

Le taux de distorsion harmonique THD est un meilleur indice qui permet de juger la qualité de la tension alternative produite. Ce taux de distorsion harmonique définit la déformation globale de la grandeur alternative par rapport à l'onde fondamentale. Il est donné par l'équation suivante :

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{neff}^2}{V_{1eff}^2}} \quad (2.4)$$

Avec ;

U_{1eff} : Valeur efficace du fondamental de la tension.

U_{neff} : Valeur efficace de la tension harmonique de rang n

Dans notre travail, nous nous intéressons aux harmoniques de la tension et de courant. L'objectif sera de réduire autant que possible l'amplitude des harmoniques de rangs faibles.

2.7 Modélisation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking)

La caractéristique de puissance d'un panneau photovoltaïque est non linéaire et varie en fonction du rayonnement et de la température. En conséquence, on doit extraire la puissance maximale afin d'assurer le bon fonctionnement du panneau photovoltaïque PV quelques soit les changements climatiques [22].

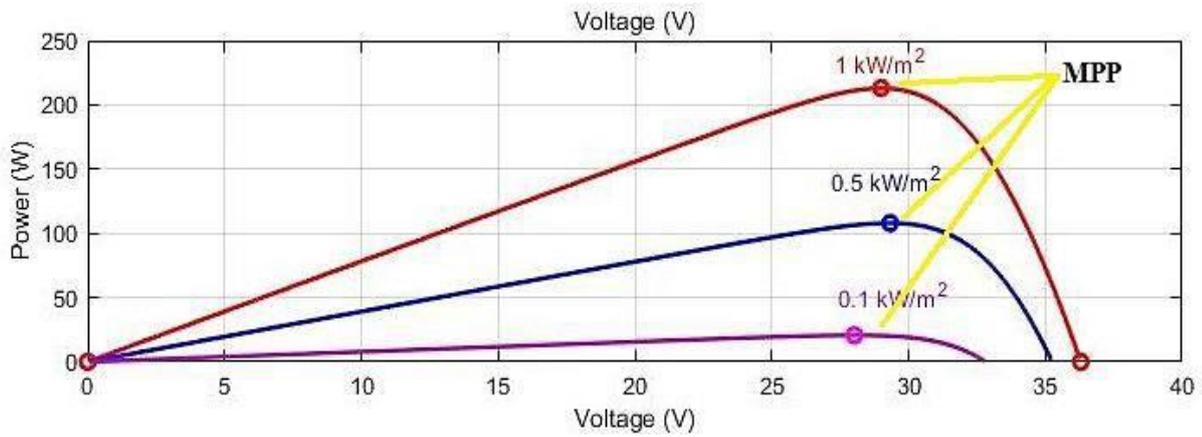


Figure 2.12 Caractéristique de puissance maximum pour différentes irradiations

Pour résoudre ces problèmes, des lois de commande spécifiques ont été conçues et mises en œuvre pour permettre à ces dispositifs de fournir leur puissance électrique maximale, quelle que soit l'éclairement. Ce type de commande est appelé "Maximum Power Point Tracking" qui signifie la poursuite de point maximum de puissance.

Plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'obtenir la puissance maximale du générateur photovoltaïque. Parmi ces techniques on trouve les techniques classiques suivantes:

- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe).
- Conductance incrémentale (IncCond, incrémental Conductance).
- Hill climbing.

Et d'autres méthodes plus évoluées à base de méthodes intelligentes comme la logique floue, PSO, les réseaux neurones...etc.

Dans de travail, nous avons choisi la commande MPPT avec la méthode P&O (Perturb and observe) qui est simple et très efficace.

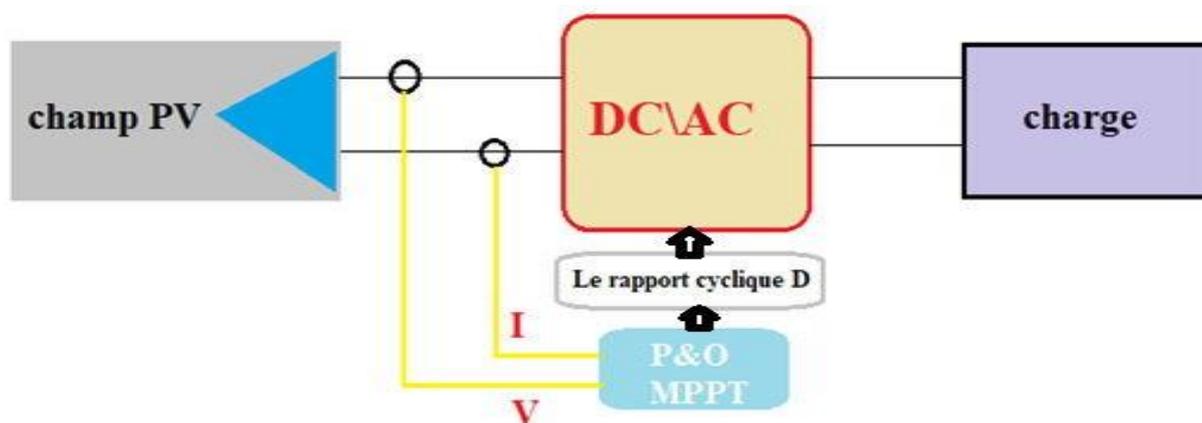


Figure 2.13 Schéma synoptique de la technique P&O MPPT

En raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre, la méthode P&O est la plus couramment utilisée. Cette méthode fonctionne en perturbant la tension et en observant la variation de la puissance de sortie du GPV. A partir de la figure 2.14 ; on remarque que :

- Si la tension de fonctionnement est perturbée dans une certaine direction et que la puissance augmente ($dP/dV > 0$), alors le point de fonctionnement a été déplacé vers le MPP, donc l'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction [23].
- Cependant, si la puissance diminue ($dP/dV < 0$), la perturbation a déplacé le point de fonctionnement du MPP plus loin, donc l'algorithme inverse la direction de la perturbation.

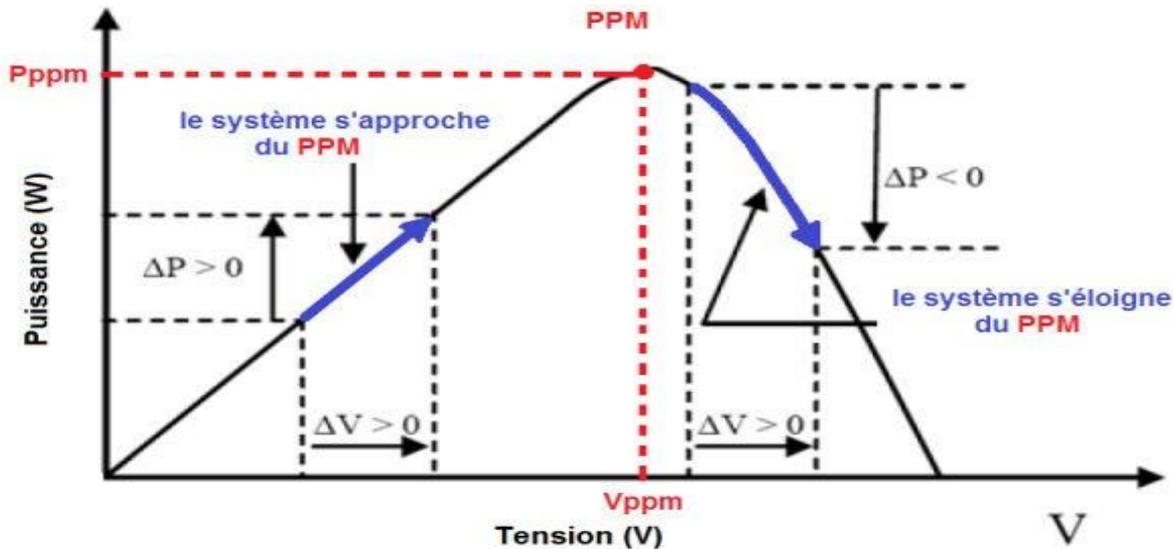


Figure 2.14 Caractéristique de la puissance en fonction de la tension [23]

On peut résumer le fonctionnement de l'algorithme (figure 2.15) en quatre points principaux :

Cas 1 : Si $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$, Alors le rapport cyclique D doit diminuer ceci implique l'augmentation de la tension du module PV.

Cas 2 : Si $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$, Alors le rapport cyclique doit être augmentée de façon que la tension du module PV diminue.

Cas 3 : Si $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$, Alors le rapport cyclique D doit diminuer ceci implique l'augmentation de la tension du module PV.

Cas 4 : Si $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$, Alors le rapport cyclique doit être augmentée de façon que la tension du module PV diminue.

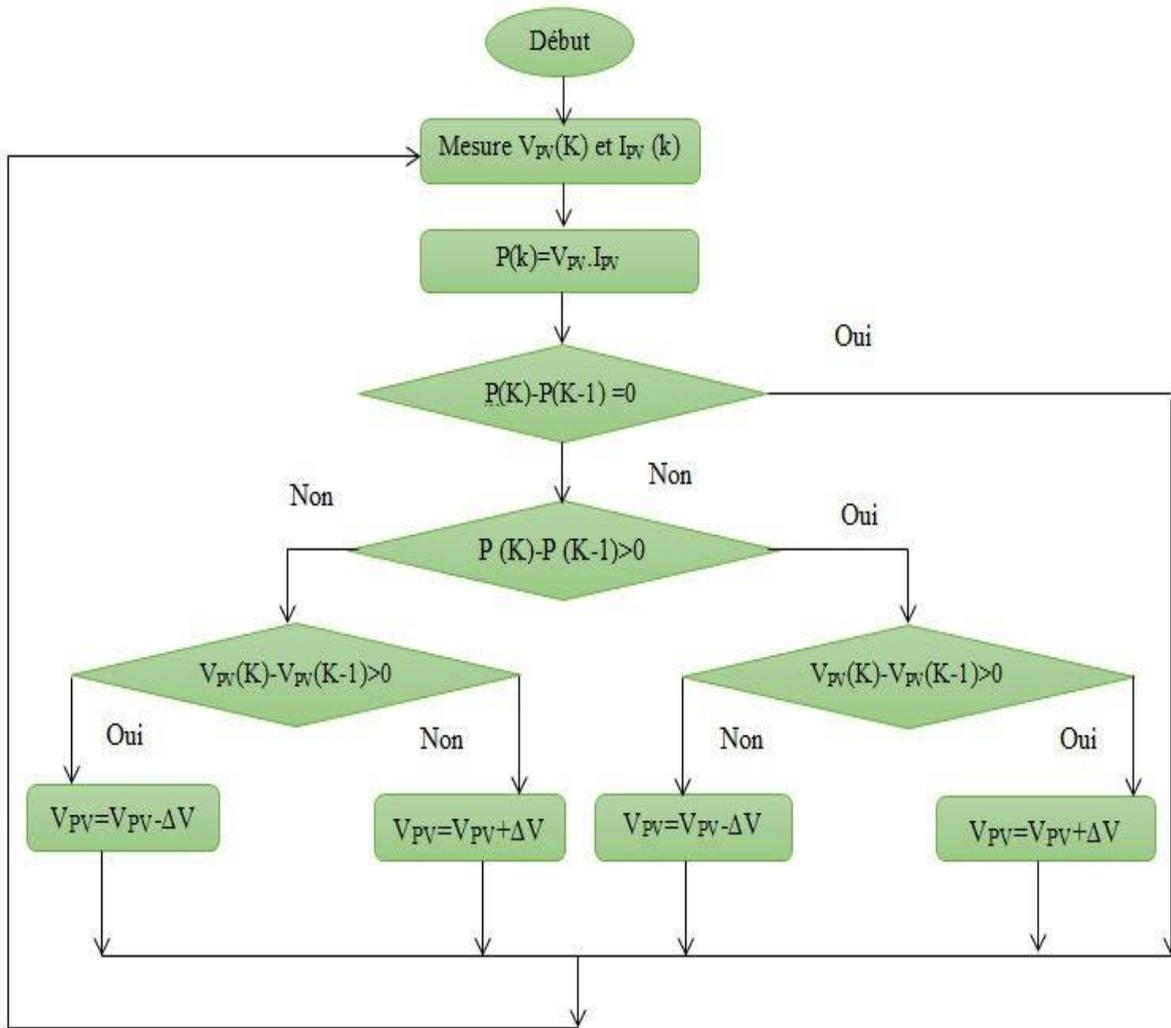


Figure 2.15 Organigramme de la méthode P&O

2. 8 Boucle de régulation des courants directs et quadratique

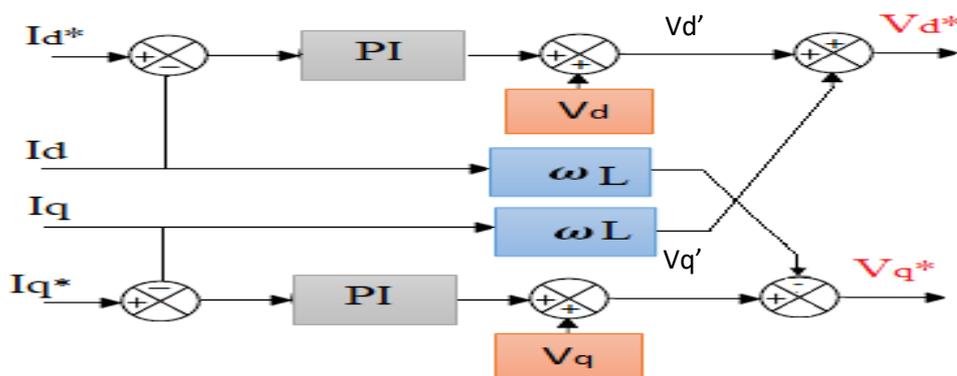


Figure 2.16 Schéma bloc du contrôle des courants de lignes dans le repère de Park

D'après la figure 2.16, on peut conclure l'expression suivante :

$$\begin{cases} v_d^* = v_d' + L\omega I_q + v_d \\ v_q^* = v_q' - L\omega I_d + v_q \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec ; V_d, V_q : composantes directe et quadratique de la tension à la sortie du régulateur PI dans le repère Park.

La transformé de Park est un outil mathématique qui permet de passer du repère (a, b, c) vers le repère tournant (d, q) [24].

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ 0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La composante homopolaire est nulle car le système triphasé est équilibré.

Cette transformation est définie par une matrice de passage au référentiel de Park tel que :

$$[P(\hat{\theta})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\hat{\theta} - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Où l'angle $\hat{\theta}$ présente la phase estimée du repère de Park et ω la vitesse de rotation du repère.

La matrice inverse de Park permet de passer du repère mobile (d, q) vers le repère triphasé fixe (a, b, c). Ce système est présenté par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [P(\hat{\theta})]^{-1} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\text{Avec : } [P(\hat{\theta})]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\hat{\theta} - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

On utilise un filtre RL (figure 2.17) pour la connexion de la sortie de l'onduleur au réseau. Le schéma équivalent est donné par la figure ci-dessous.

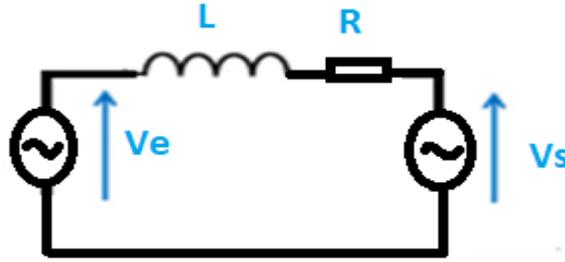


Figure 2.17 Schéma en monophasé de la connexion au réseau

Notons que l'inductance L représente le regroupement de l'ensemble des inductances du côté réseau BT et du filtre du côté réseau ($L = L_f + L_r$) et R représente sa résistance interne ($R = R_f + R_r$). Donc, la fonction du transfert du filtre est donnée par la relation suivante :

$$F(s) = \frac{1}{R+L \cdot s} \tag{2.10}$$

D'autre part, la fonction de transfert du contrôleur PI est donnée par la relation suivante :

$$c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \tag{2.11}$$

A partir des expressions (2.10) et (2.11) la boucle de régulation de courant est présentée comme

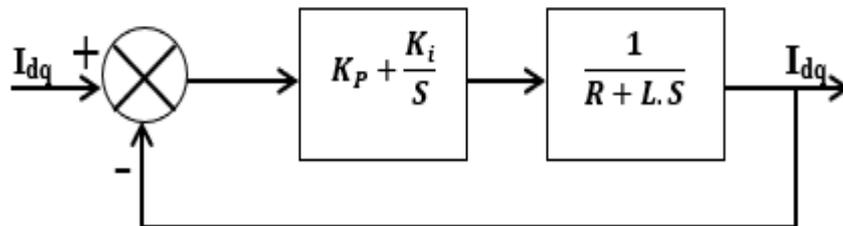


Figure 2.18. Schéma bloc de la boucle de régulation du courant

La fonction de transfert du système en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF = \frac{(k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot (\frac{1}{R+Ls})}{1 + (k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot (\frac{1}{R+Ls})} \tag{2.12}$$

Après le développement de l'expression (2.12) on obtient :

$$FTBF = \frac{\frac{k_i + k_p \cdot s}{s}}{s^2 + \frac{R + k_p \cdot s}{L} + \frac{k_i}{L}} \tag{2.13}$$

Par identification, on obtient :

$$k_p = 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot L - R \text{ et } k_i = L \cdot \omega_n^2 \tag{2.14}$$

2.9 Boucle de régulation de la tension de bus continue

La figure 2.19, représente le schéma de régulation de la tension continu V_{dc}

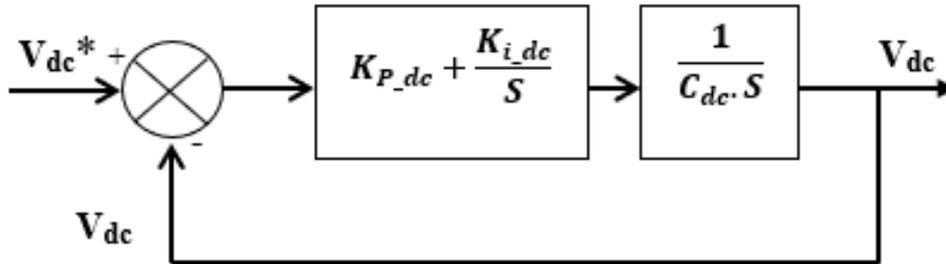


Figure 2.19 Schéma bloc de régulation de la tension du bus continue

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donnée par :

$$FTBF = \frac{\frac{k_{pdc}}{c_{dc}} \cdot s + \frac{k_{idc}}{c_{dc}}}{s^2 + \frac{k_p}{c_{dc}} \cdot s + \frac{k_{idc}}{c_{dc}}} \tag{2.15}$$

Par identification entre la relation (2.16) et la relation générale d'un système de deuxième ordre, on

obtient : $k_{pdc} = 2\varepsilon\omega_c C_{dc}$ et $k_{idc} = C\omega_c^2$ (2.16)

On choisit un amortissement $\varepsilon = 0.707$ et une pulsation de coupure $\omega_c = 2\pi f_c$ avec $f_c = 20 \text{ Hz}$ [25].

2.10 Boucle à verrouillage de phase (PLL)

Les boucles à verrouillage de phase PLL (Phased Locked Loop) sont des dispositifs électroniques utilisés pour faire correspondre la phase d'un oscillateur local à celle d'un signal externe. Ils sont largement utilisés dans le traitement de l'information et les processus de transfert de données [26]. Afin de raccorder le système PV au réseau électrique, la tension alternative du convertisseur DC/AC doit être synchronisée avec celle du réseau en termes de phase et de fréquence tout en maintenant le contrôle du réseau. La synchronisation du convertisseur sur le réseau est faite par une PLL comme montre la figure 2.20 :

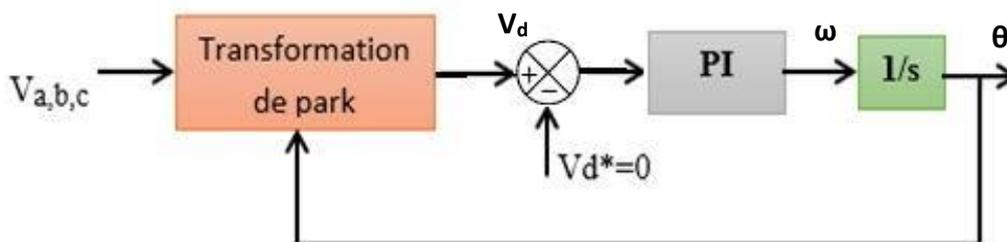


Figure 2.20 Schéma fonctionnel d'une PLL triphasé

Lors de la détermination de la phase instantanée du terme fondamental de la tension ; les tensions simples $V_a, V_b, V_c(\theta)$ sont transformées en composantes biphasés dans le repère fixe de Concordia (α, β) , qui s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(\theta) \\ V_b(\theta) \\ V_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

avec, $\theta = \omega t$

Ainsi on aura :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}V \sin\theta \\ -\sqrt{3}V \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Les tensions V_d et V_q dans le référentiel de Park tournant seront obtenues en appliquant l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot V \begin{bmatrix} \sin(\theta - \hat{\theta}) \\ -\cos(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La P.L.L. sera synchronisée lorsque l'angle estimé $\hat{\theta}$ sera égal à θ , donc à partir de cette condition :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = -\sqrt{3}V \end{cases} \quad (2.21)$$

Donc, il est possible de contrôler θ en réglant V_d à zéro.

- **Calcul des paramètres (k_p et k_i) du régulateur PI de la PLL :**

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par la formule :

$$c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (2.22)$$

Le synoptique de la PLL peut être simplifié pour déterminer les paramètres du régulateur PI, comme le montre la figure (2.21) :

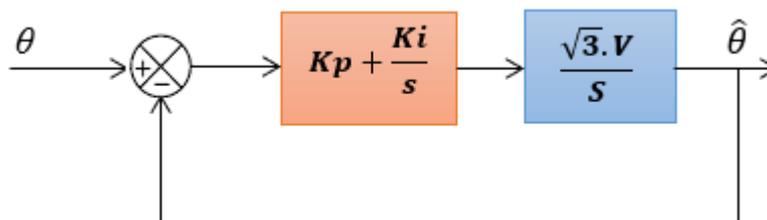


Figure 2.21 Schéma simplifié de la PLL

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = (k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot (\frac{\sqrt{3} \cdot V}{s}) \quad (2.23)$$

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{FTBO}{1+FTBO} = \frac{(k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V}{s}}{1 + (k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V}{s}} \quad (2.24)$$

La fonction de transfert précédente peut être présentée par la fonction de transfert d'un système de second ordre suivante :

$$G(s) = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (2.25)$$

Avec ; $k_p = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n}{\sqrt{3} \cdot V}$ et $k_i = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{3} \cdot V}$ (2.26)

2.11 Dimensionnement des paramètres du filtre LC

Afin d'améliorer la qualité de la tension alternative à la sortie de l'onduleur on insère un filtre LC au point de raccordement de l'onduleur avec le réseau. Le schéma équivalent en monophasé de ce filtre est donnée par la figure 2.22.

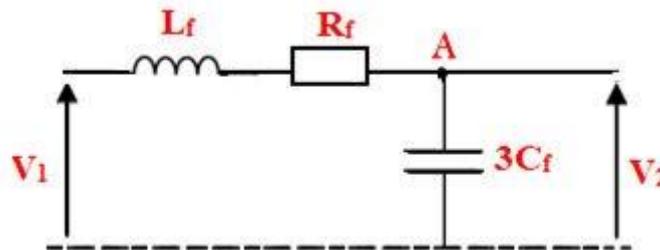


Figure 2.22 Schéma monophasé équivalent du filtre LC

La fonction de transfert du circuit ci-dessus est donnée par l'expression suivante :

$$FTBF = \frac{1}{s^2 + \frac{R_f}{L_f} \cdot s + \frac{1}{s \cdot L_f \cdot C_f}} \quad (2.27)$$

Par identification du numérateur avec la fonction de transfert du système, on obtient :

$$\frac{R_f}{L_f} = 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \quad \text{et} \quad \omega_n = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot L_f \cdot C_f}} \quad (2.28)$$

En choisissant une bonne fréquence de coupure qui va nous permettre d'éliminer les fréquences non désirées (généralement inférieur à 50Hz) et en considérant le coefficient d'amortissement adéquat ($\varepsilon = 0.707$), on attribue un dimensionnement correct à l'inductance et à la capacité du filtre utilisé.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la chaîne de conversion connectée au réseau électrique. Dans un premier temps, nous avons détaillé la configuration de conversion à un seul étage, suivi de la modélisation de l'onduleur, la technique MPPT P&O visant à extraire la puissance maximale d'un générateur PV. De plus, on a identifié tous les paramètres des régulateurs PI intervenant dans les boucles de régulation des courants de lignes et la boucle de régulation de la tension du bus continu de l'onduleur. En fin nous avons dimensionné les paramètres du filtre LC. Le chapitre suivant fera l'objet de validation par simulation du système PV raccordé au réseau.

Chapitre 3

Simulation du système PV connecté au réseau.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on procède à la simulation de l'ensemble système PV connecté au réseau via un onduleur. On fera l'acquisition de tous les signaux à l'entrée et la sortie de chaque block afin de juger l'efficacité de la commande DQ. La simulation est validée sous l'environnement MATLAB-simulink 2021a.

3.2 Simulation du générateur photovoltaïque

Dans cette étude, le module photovoltaïque utilisé est du type ZYTEC SOLAR ZT-310P qui se compose de 72 cellules monocristallines connectées en série. Il peut fournir une puissance de 310 W (figure 3.2.a) dans des conditions standards (un éclairement de 1000W/m^2 et une température de $T=25^\circ\text{C}$). Le générateur connecté au réseau est composé de 25 rangées en parallèle dont chaque rangée contient 18 modules en série. La puissance totale à la sortie du générateur est de 100 kW (figure 3.2.b). Les caractéristiques électriques d'un seul module sont indiquées dans le tableau (3.1).

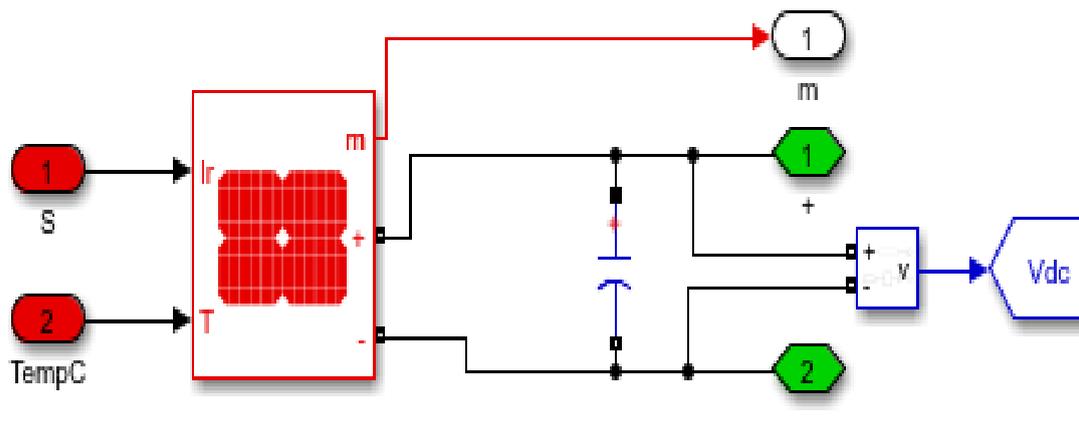


Figure 3.1 Bloc du module Sun Power SPR-315-WHT dans Simulink

Tableau 1.4 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque ZYTEC SOLAR ZT-310P dans les conditions standards de test (CST).

Puissance maximale	310 w
Courant de court-circuit I_{cc}	8.9 A
Tension à circuit ouvert V_{co}	46.28 V

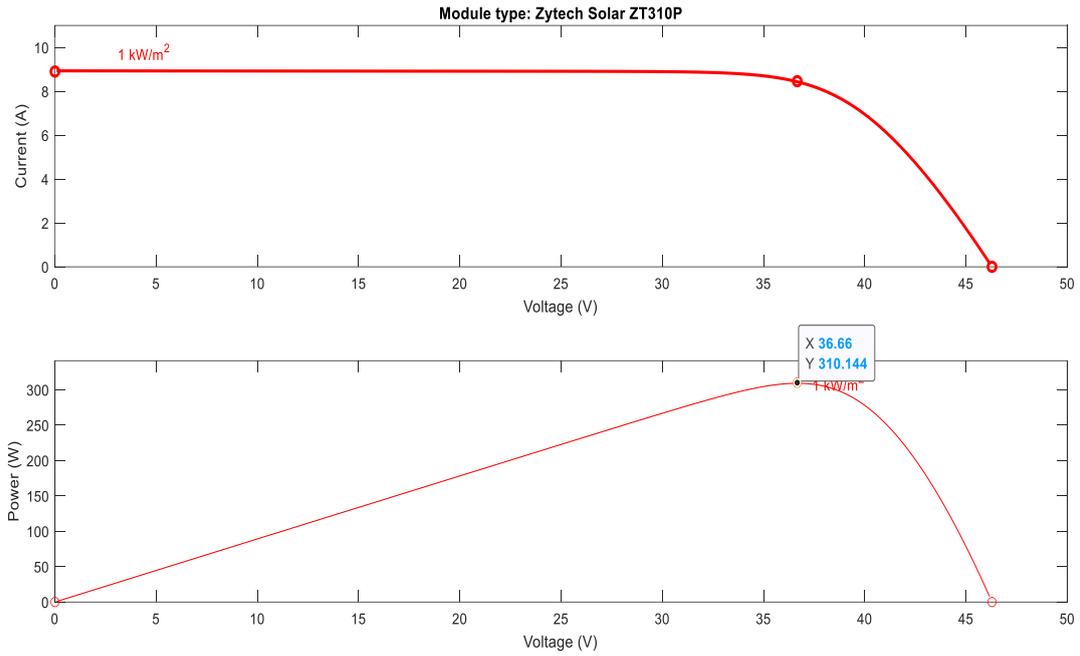


Figure 3.2.a Caractéristiques I(V) et P(V) du module photovoltaïque ZYTEC SOLAR ZT-310P dans les conditions standards.

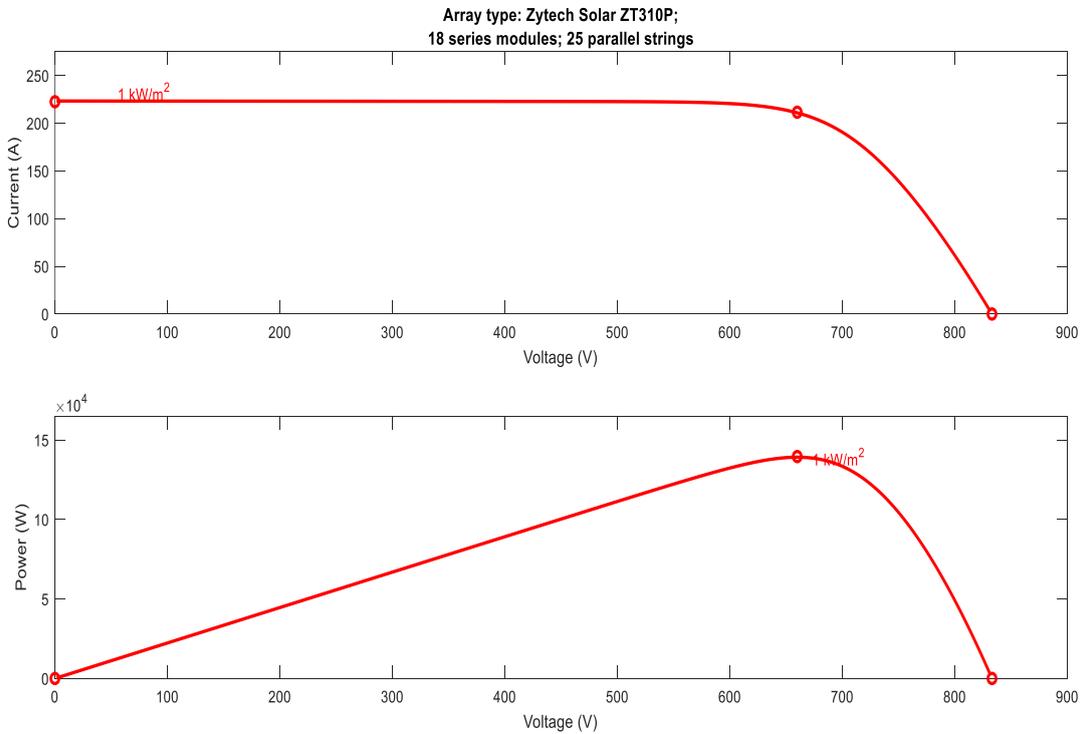


Figure 3.2.b Caractéristiques I(V) et P(V) du générateur photovoltaïque ZYTEC SOLAR ZT-310P dans les conditions standards.

3.3 Simulation de l'influence des changements climatiques sur les caractéristiques électriques du générateur PV.

- **Influence de la variation de la température**

Pour tester l'influence de la température sur les caractéristiques électriques de notre générateur photovoltaïque nous maintenant l'éclairement solaire à $1000\text{W}/\text{m}^2$ et nous prenant trois valeurs de températures 10° , 25° et 45° degrés Celsius. Les résultats de simulation (figure 3.3.a) montrent que le courant de court-circuit est quasiment constant, la tension du circuit ouvert est proportionnelle à la température et la puissance maximale diminue avec l'augmentation de la température.

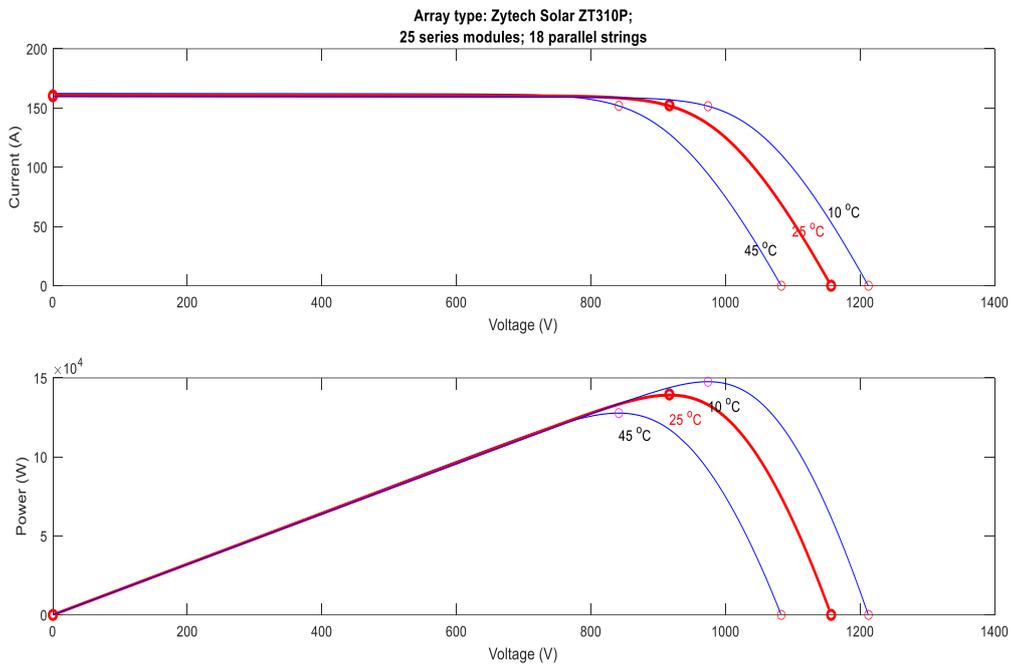


Figure 3.3.a Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV sous température variable

- **Influence de la variation d'éclairement**

La figure (3.3.b) montre les caractéristiques électriques du générateur après simulation sous MATLAB / SIMULINK pour différentes valeurs d'éclairement ($1000\text{w}/\text{m}^2$, $600\text{w}/\text{m}^2$ et $300\text{w}/\text{m}^2$) et une température fixe de 25°C . Nous remarquons que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement et la puissance diminue au fur et mesure que l'éclairement diminue.

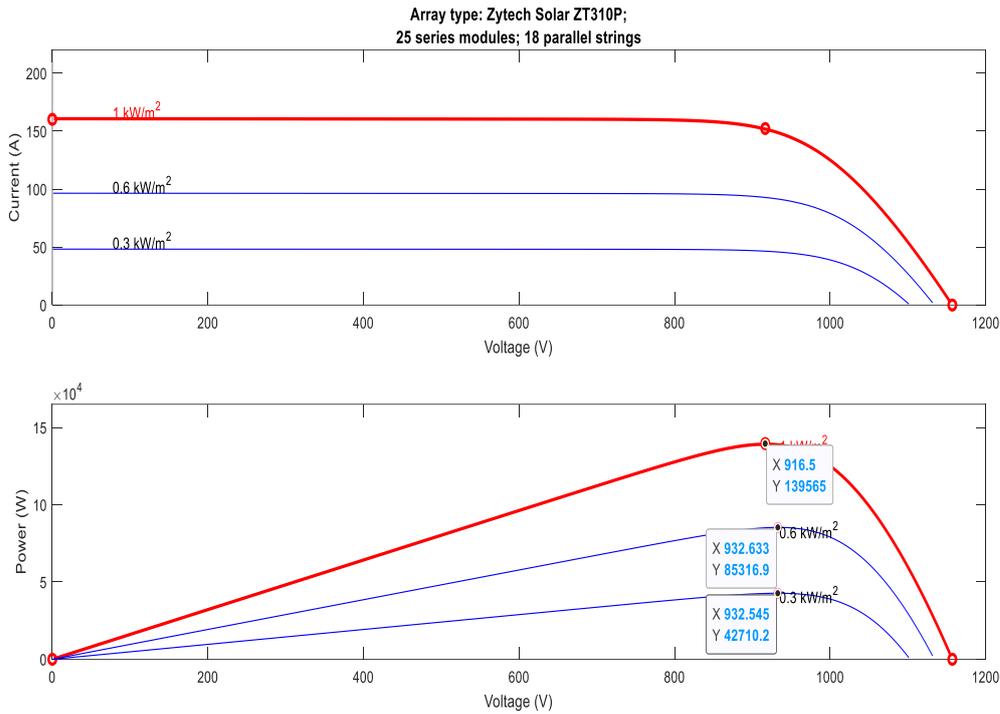


Figure 3.3.b Caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV pour éclairement variable

Ces tests permettent de juger la nécessité d'un système MPPT pour la poursuite de la puissance maximale lors de variation d'éclairement et ou de la température.

3.4 Simulation du système PV connecté au réseau électrique

Dans cette partie, nous simulerons l'ensemble du système, qui comprendra un générateur PV, un convertisseur DC/AC (onduleur), un filtre LC et réseau basse tension, figure 3.4.a. La figure 3.4.b illustre le schéma de commande DQ global qui comprend un régulateur MPPT une PLL et deux boucles de régulation. La première boucle de régulation est destinée au réglage de la tension du bus continu de l'onduleur et la deuxième boucle de régulation des courants directe et quadratique est responsable de la génération des tensions de références nécessaire à la commande MLI responsable de génération des impulsions de commande des IGBT constituant l'onduleur.

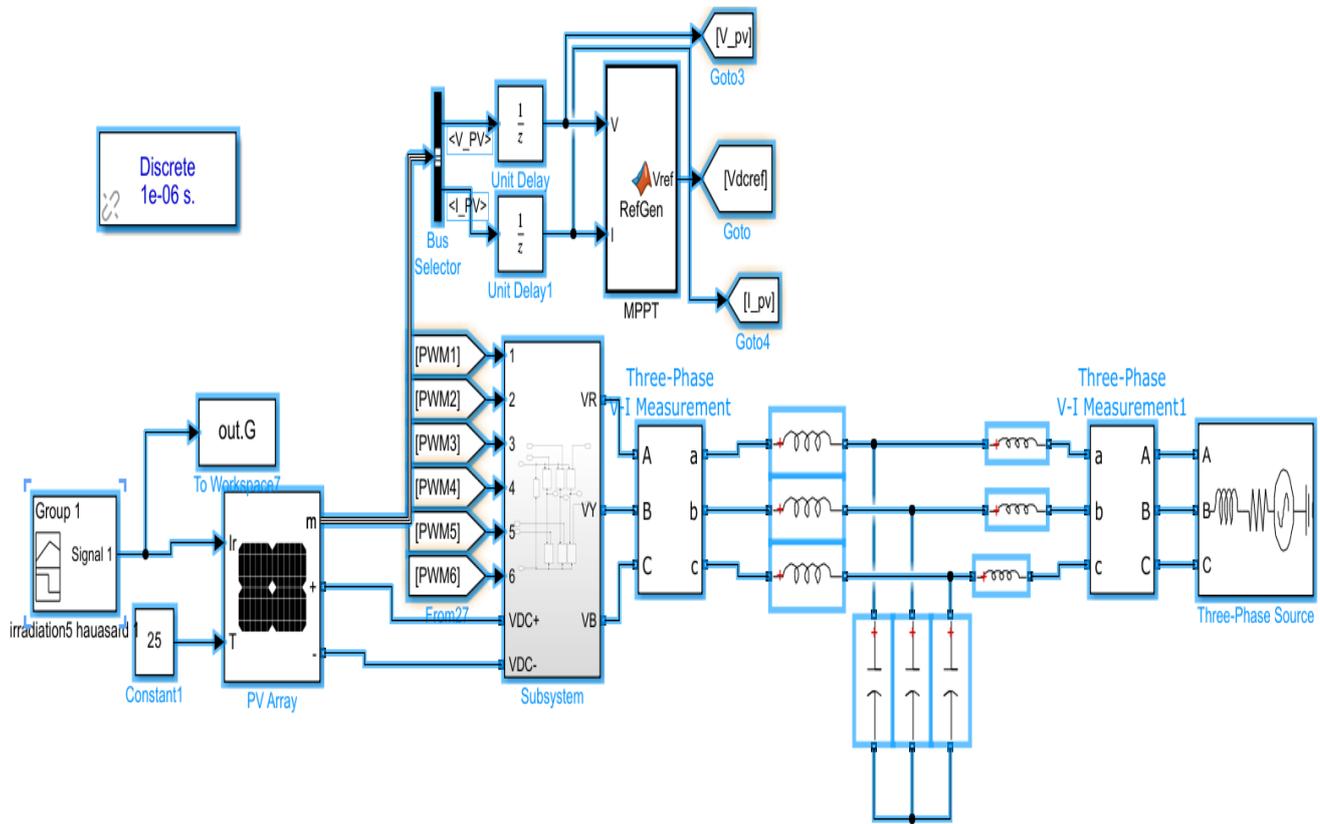


Figure 3.4.a Schéma de puissance de l'ensemble système PV-réseau

Boucle en cascade de régulation de la tension du bus continu et du courant direct

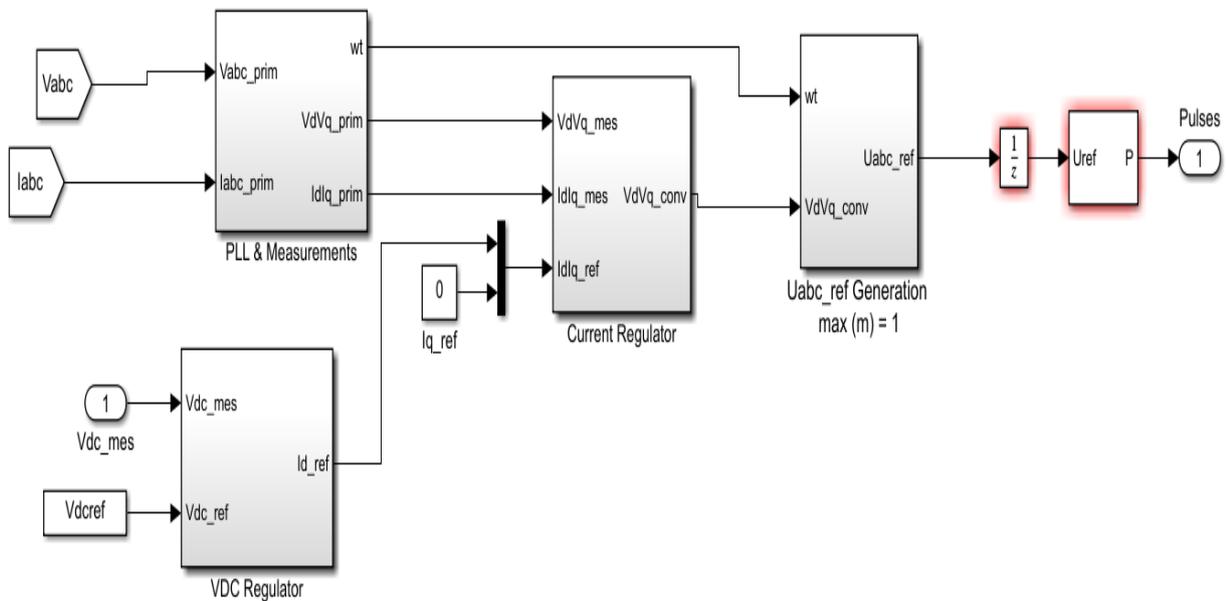


Figure 3.4.b Schéma de commande de l'ensemble système PV-réseau

Les paramètres du système PV connecté au réseau utilisés dans ce travail sont présentés dans le tableau 3.2 comme indiqué ci-dessous :

Tableau 1.5 Paramètre du système PV connecté au réseau

Fréquence de commutation de l'onduleur	10 kHz
Inductance de connexion de l'onduleur au réseau	3 mH
filter LC	C= 100 μ F
	L =1mH
Puissance nominale du générateur	100 kW
Paramètres du réseau	V_{eff} = 220 V
	f=50 Hz

3.5 Résultats de simulation de la commande DQ appliquée au système PV connecté au réseau :

Lors de la simulation, on fixe la température à $T=25^{\circ}\text{C}$ et on fait diminuer l'éclairement à l'instant $t=0.5$ de 1000 w/m^2 à 600w/m^2 et de 600w/m^2 à 300w/m^2 à l'instant $t=1\text{s}$.

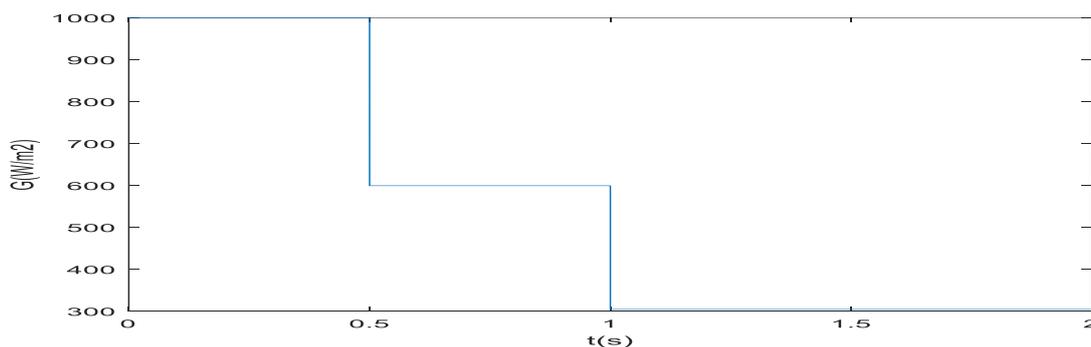


Figure 3.5 Variation de l'éclairement

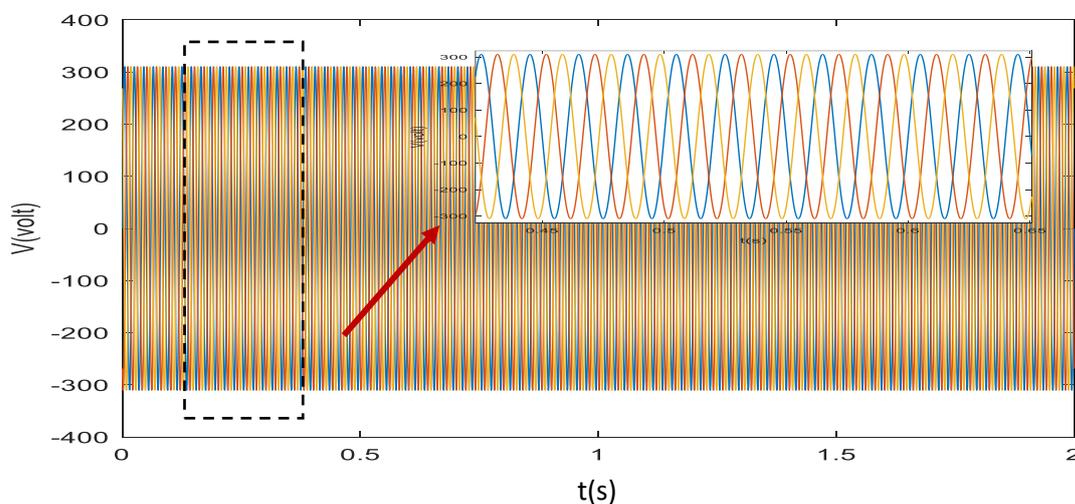


Figure 3.6. Tensions alternatives du réseau

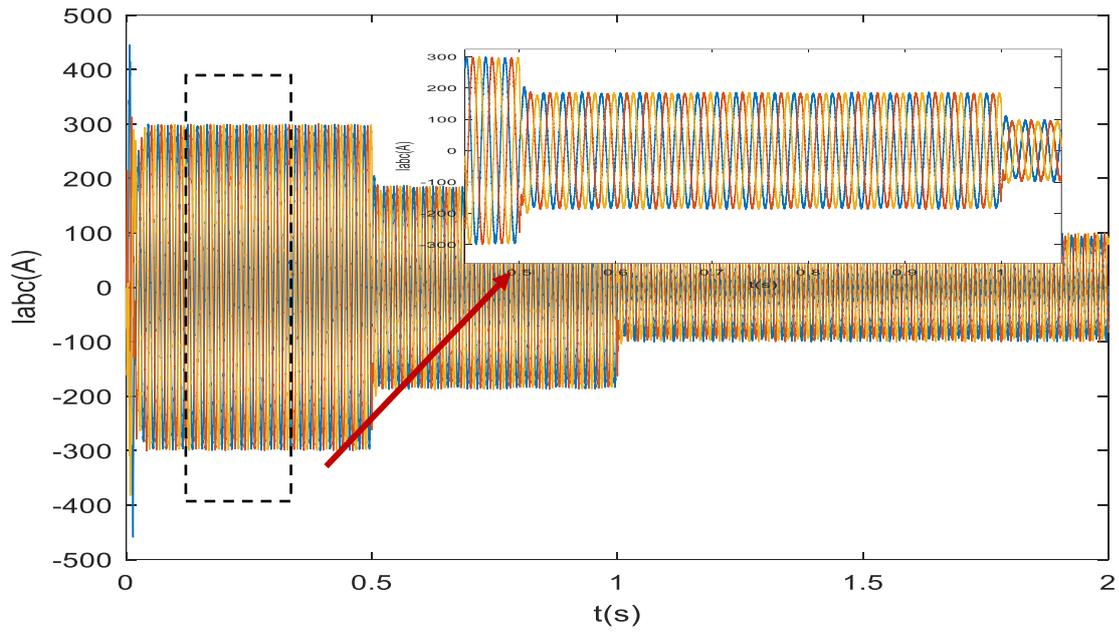


Figure 3.7. Courants alternatifs du réseau

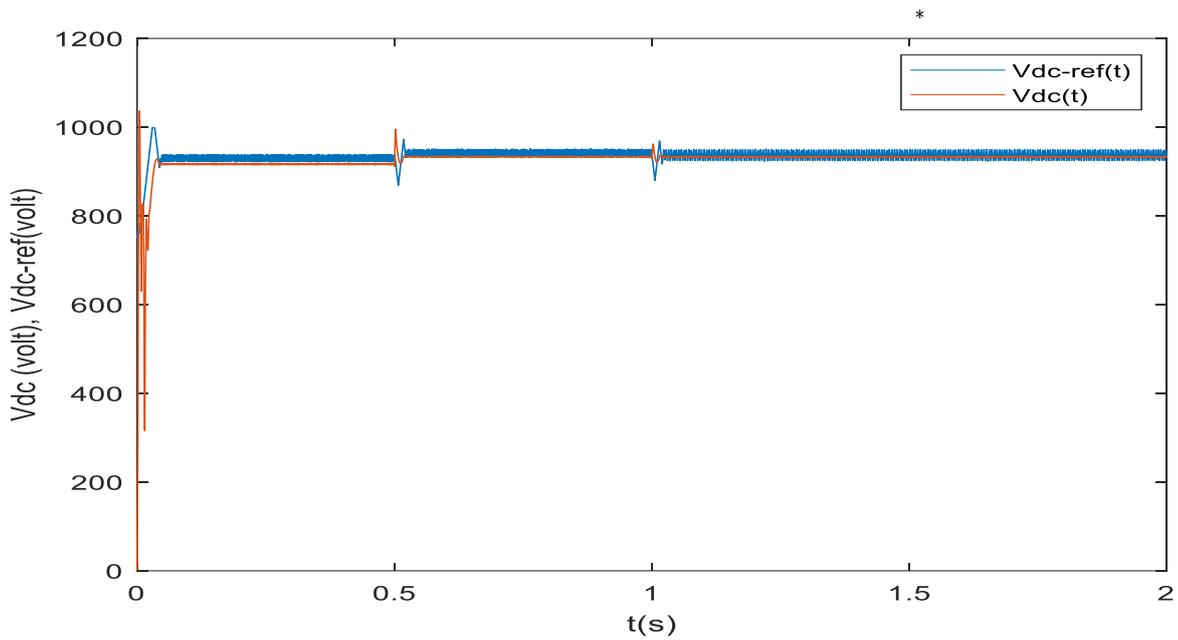


Figure 3.8 Tension du bus continu de l'onduleur et tension de référence à suivre

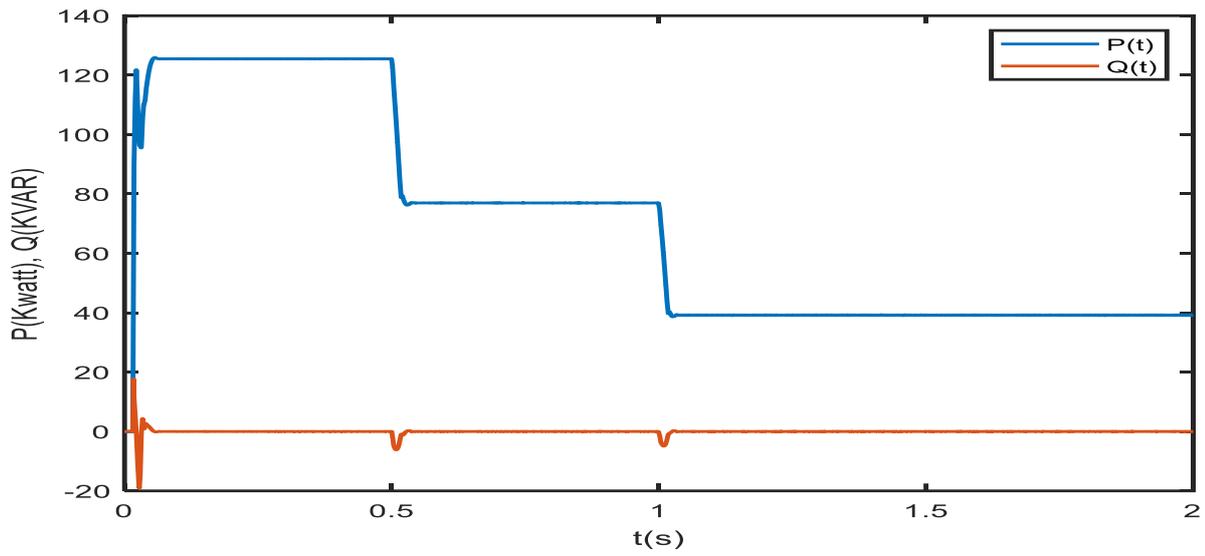


Figure 3.9 Puissance active et réactive

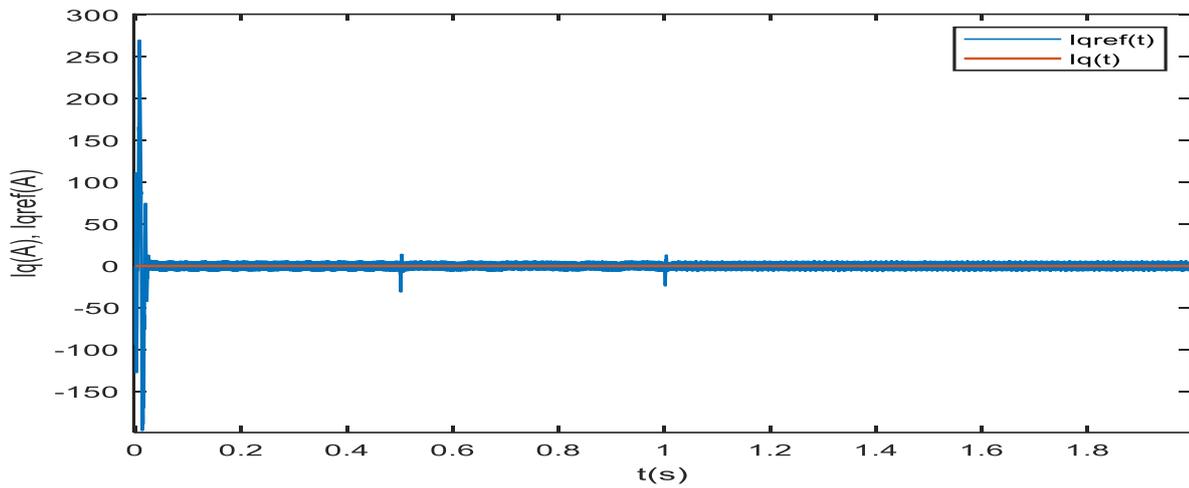


Figure 3.10 Courant quadratique réel et de référence

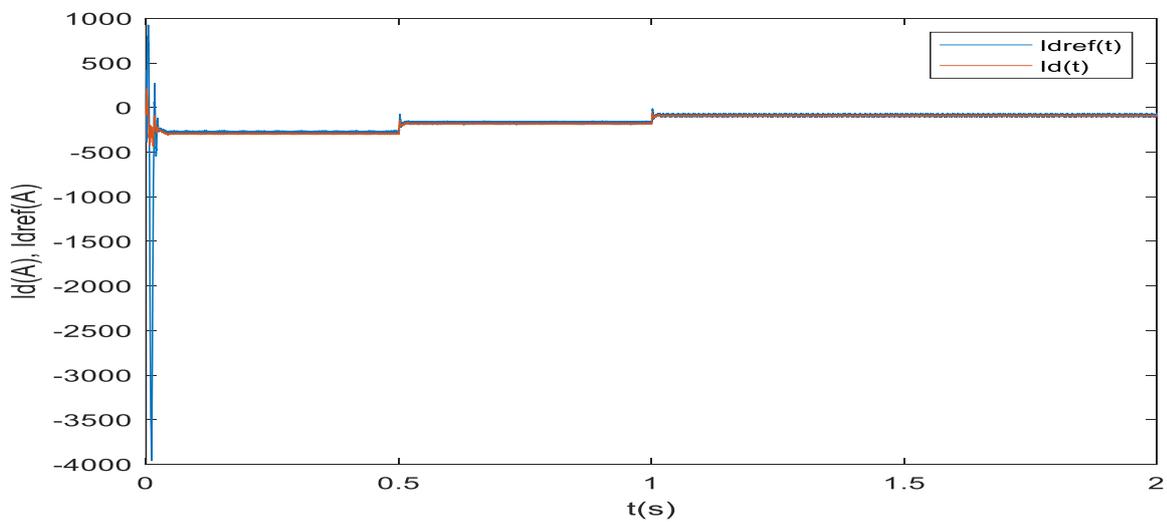


Figure 3.11 Courant direct réel et de référence

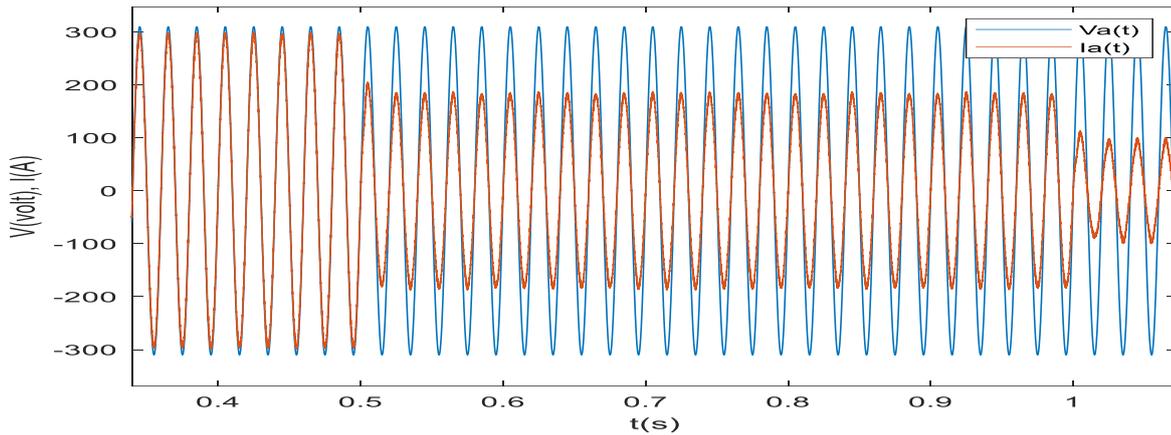


Figure 3.12 Synchronisation du système par la PLL

3.6 Interprétations des résultats

Les tensions alternatives coté réseau sont sinusoïdales de fréquence 50Hz (figure 3.6) et les courants de lignes sont sinusoïdaux et diminuent à chaque fois que l'éclairement diminue (figure 3.7). La tension du bus continue suit parfaitement la tension de référence imposée par le block MPPT (figure 3.8). La figure 3.9 montre que l'algorithme MPPT poursuit le point MPP à chaque fois que l'éclairement change. Les points MPP correspondant aux trois valeurs d'éclairement sont identiques à ceux présentés à la figure 3.3.b. La puissance réactive est maintenue nulle (0KVAR). Le courant I_d suit le courant direct de référence (figure 3.10) et le courant I_q est maintenu à une valeur nulle (figure 3.11). La figure (3.12) montre que la tension et le courant de ligne sont en phase, synchronisés ce qui justifie le bon fonctionnement de la PLL.

3.7 Etude harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur et du courant de ligne

- **Etude harmonique de la tension à la sortie de l'onduleur**

Les spectres des tensions composées avant et après le filtre à la sortie de l'onduleur sont illustrés à la figure 3.13 et 3.14.

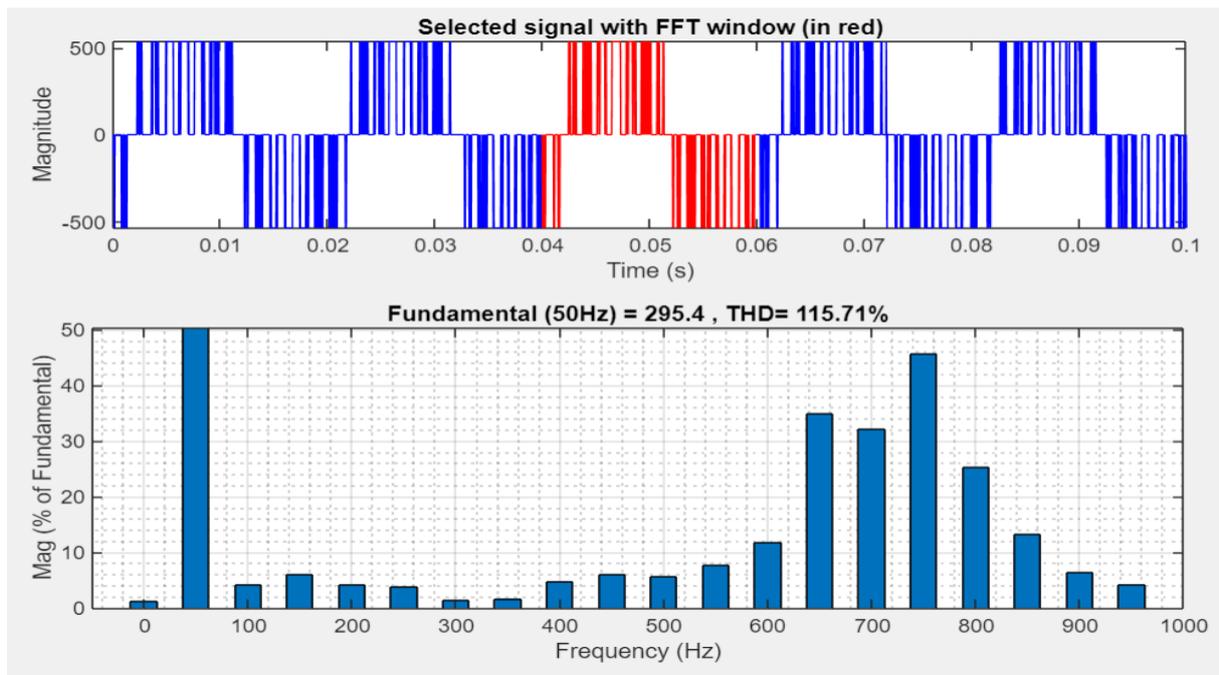


Figure 3.13 Spectre de la tension composée à la sortie de l'onduleur (avant le filtre)

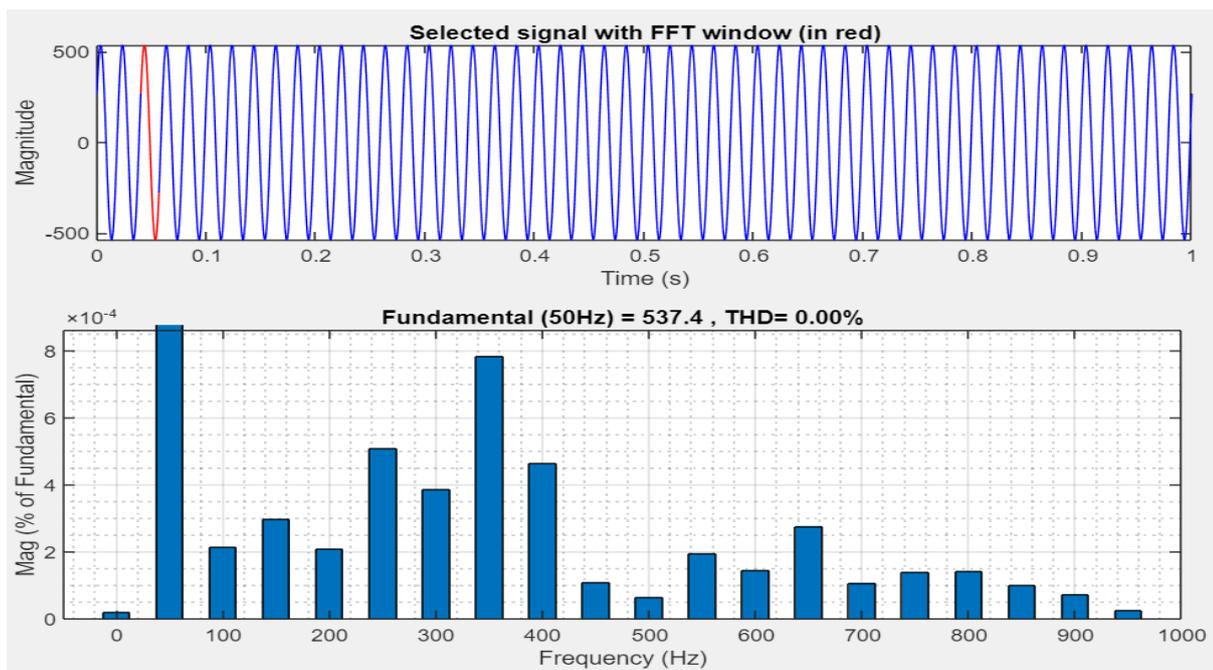


Figure 3.14 Spectre de la tension composée à la sortie de l'onduleur (après le filtre LC)

A partir des spectres harmoniques de la tension composée à la sortie de l'onduleur, avant et après le filtre LC on remarque que le THD est nul après filtrage de la tension composée qui présentait à l'entrée un THD très élevé égale à 115.71 %.

- Etude harmonique du courant de ligne

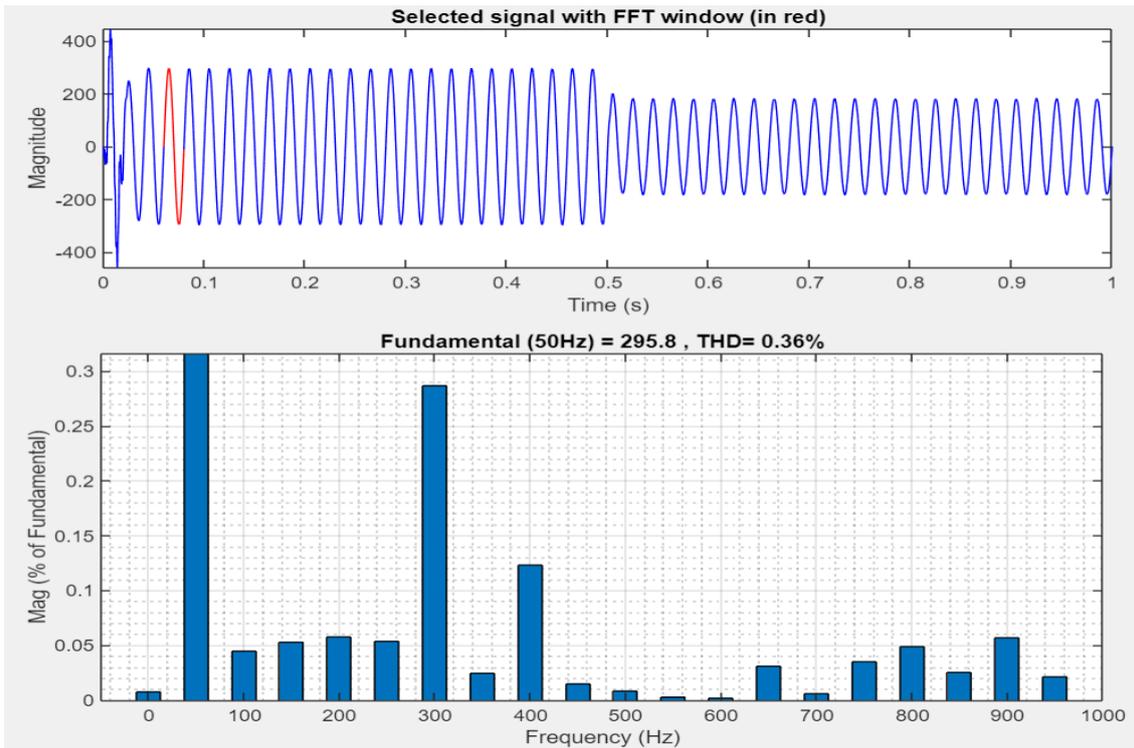


Figure 3.15 Spectre harmonique du courant de ligne

Le courant de ligne (coté réseau) est sinusoïdal possède un THD très faible (0.36%).

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué une validation par simulation des de la commande DQ appliquée au système PV raccordé au réseau. Les résultats montrent l'efficacité de la commande à gérer les puissances active et réactive séparément. La composante directe du courant de ligne commande la puissance active et le courant quadratique maintenu à zéro permet de régler la puissance réactive à zéro ce qui garantit un facteur de puissance unitaire. De plus la technique MPPT permet d'extraire le maximum de puissance à chaque fois que l'éclairement varie.

Conclusion générale

Le travail présenté a pour objectif d'étudier un système de production d'énergie photovoltaïque raccordé au réseau. La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est disponible partout et quasi-inépuisable. L'énergie photovoltaïque raccordée au réseau peut être une bonne option pour les propriétaires qui veulent réduire leur facture d'électricité et contribuer à la transition vers une énergie propre. Lors du raccordement, un choix judicieux de topologie d'onduleur est nécessaire pour fournir une onde sinusoïdale pure avec un contenu harmonique presque nul.

L'ensemble du système étudié comprend une partie puissance composée d'un générateur photovoltaïque muni d'une commande MPPT (P&O) connecté à un onduleur de tension à deux niveaux raccordé au réseau basse tension via un filtre LC. La partie commande sert à produire les impulsions de commande des semi-conducteurs (IGBT) constituant l'onduleur en considérant un éclairage variable.

A partir des résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances du générateur PV sont influencées par les changements climatiques (température et éclairage), et qu'une technique MPPT tel que P&O est nécessaire.
- La structure du système PV raccordé au réseau à un seul étage est très efficace et économique ne nécessite pas un convertisseur DC/DC.
- La commande découplée des puissances à partir des courants directe et quadratique, nous a permis de contrôler les puissances active et réactive séparément et de garantir un facteur de puissance unitaire du côté réseau.

Comme perspective, nous proposons :

- d'utiliser des topologies récentes d'onduleurs multiniveaux afin d'adapter notre système à des niveaux de tensions supérieur et améliorer la qualité de la tension à la sortie,
- ainsi que l'utilisation de techniques MPPT plus avancées à base de techniques d'intelligence artificielle pour gérer le MPP lors de condition climatiques sévère.

Références

- [1] Stéphane PETIBON, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques,” p. 145, 2009.
- [2] Nikolay Belyakov, “Sustainable Power Generation,” 2019. doi: 10.1016/b978-0-12-817012-0.00002-5.
- [3] SALAHEDDINE BENSALAM, “ Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires,” pp. 2010–2011, 2011.
- [4] Bendjellouli Zakaria, “ contribution à la modélisation d’une cellule solaire, ” Université de Bechar, 2009.
- [5] A. Ben Jemaa, S. Rifa, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, F. Hnaïen, and F. Yalaoui, “Estimation of global solar radiation using three simple methods,” *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 406–415, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.11.041.
- [6] S. Karima, “Contribution de la microscopie EBIC et des calculs numériques pour l’étude de cellules photovoltaïques Soutenue,” *Thèse Dr.*, 2016.
- [7] B. Flèche and D. Delagnes, “Production d’énergie électrique : Énergie électrique photovoltaïque.” Ebook, Cours Sti Elt, Juin 2007, pp. 1–18, 2007, [Online]. Available : <http://www.livrespourtous.com/e-books/detail/Energie-solaire- photovoltaïque/onecat/0.html>
- [8] K. Helali, “Modélisation d’une cellule photovoltaïque : Etude comparative,” 2012, [Online]. Available: <https://dl.ummtto.dz/handle/ummtto/607>
- [9] E. B. A. N. Aziza, “Amélioration de l’efficacité des panneaux photovoltaïques par l’installation d’un système de refroidissement par l’eau des modules PV,” 2019.
- [10] Benadla Nadjat, “Étude comparative de différentes cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités,” 2020.
- [11] TAYEBI AZZEDINNE, “ Réalisation d’un Onduleur de Tension Commandé par Microcontrôleur pour un Système Photovoltaïque,” Doctorat en Science Spécialité : Electrotechnique Option : Réseaux électriques ,2021.
- [12] JBILOU Mokhtaria, “ ETUDE, SIMULATION ET REALISATION D’UN ONDULEUR POUR SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE,” 2019.
- [13] F. Z. Zerhouni, M. Zegrar, S. K. Brahim, and A. B. Stambouli, “Optimisation d’un système à énergie verte avec validation pratique,” *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, pp. 41–49, 2008.
- [14] Vinod, R. Kumar, and S. K. Singh, “Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution,” *Energy Reports*, vol. 4, pp. 701–712, 2018, doi: 10.1016/j.egypr.2018.09.008.
- [15] T. Mambrini, “Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologies,” HAL Id : tel-01164783, 2015.

- [16] R. G. Vieira, F. M. U. de Araújo, M. Dhimish, and M. I. S. Guerra, “A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules,” *Energies*, vol. 13, no. 10, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/en13102472.
- [17] N. Tkouti, “Control Flou Génétique d’un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique,” Thèse de doctorat, dép. Electrotech. Université Mohamed Khider., Biskra., Algérie, 2019.
- [18] S. VIGHETTI, “Systèmes Photovoltaïque raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion,” p. 185, 2010.
- [19] Aziz. Amina, “Modélisation optimisation d’un système de production d’énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride,” pp. 41–49, 2019.
- [20] HACHANA Oussama, “ETUDE D’UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE EN VUE DU DIAGNOSTIC,” 2015.
- [21] J. Jana, H. Saha, and K. Das Bhattacharya, “A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. August 2016, pp. 1256–1270, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.049.
- [22] M. Azab, “A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems,” no. 2002, pp. 702–705, 2009.
- [23] J. J. Nedumgatt, K. B. Jayakrishnan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, and D. P. Kothari, “Perturb and observe MPPT algorithm for solar PV systems-modeling and simulation,” *Proc. - 2011 Annu. IEEE India Conf. Eng. Sustain. Solut. INDICON-2011*, no. September 2014, 2011, doi: 10.1109/INDCON.2011.6139513.
- [24] C. Mahamat, “Analyse et commandes des convertisseurs multi-niveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique,” HAL Id : tel-01824681, 2018.
- [25] ABBASSEN Lyes, “Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque,” 2011.
- [26] A. Rennane and D. S. Koussa, “Evaluation des performances de la boucle à verrouillage de phase pour la connexion d’une source d’énergie renouvelable au réseau”. *Revue des Energies Renouvelables* Volume 17, Numéro 2, Pages 227-2432014-06-30