

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**N° :**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : Électrotechnique**

**OPTION : Energies renouvelables en  
Électrotechnique**

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

Belaid talha abdeldjabar

Ahmed gueye mohamad vall

**Intitulé**

**Modélisation et commande par courant d'un  
générateur photovoltaïque raccordé au réseau**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Prof. SAIGAA Djamel	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Mr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. DRIF Mahmoud	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examinateur

**Année universitaire : 2019/ 2020**

## Résumé

Ce travail présente une étude sur les systèmes photovoltaïques de moyennes puissance et qui sont raccordées aux réseaux électriques monophasés. Nous avons commencé ce travail par une généralité sur les systèmes photovoltaïques, puis sur les différentes topologies des systèmes PV connecté au réseau, notamment les systèmes monophasés sans transformateur. S'ensuit la modélisation et le dimensionnement des différents composants du système qui associe un GPV, un Boost, un onduleur monophasé et un filtre LCL. Nous avons, par la suite, choisi les éléments de commande qui s'y intègre, alors nous avons choisi un algorithme MPPT P&O pour l'optimisation de la puissance, régulateur de courant PR pour le contrôle de la quantité et de la qualité du courant injecté, et enfin une PLL pour la synchronisation avec la tension du réseau. Les différents résultats de simulation ont montré l'efficacité du système qui est traduit par la quantité élevée de la puissance active injectée et par le THD minimal du courant.

## Abstract

This work presents a study on photovoltaic systems with low level power that are connected to single-phase electrical grid. We started this work with a generality on the photovoltaic systems, then on the different topologies of PV systems connected to the grid, in particular single-phase systems without transformer. Modeling and sizing of the various components of the system follows, which combines a GPV, a Boost, a single-phase inverter and an LCL filter. Then, we chose the involved control elements that, so we chose an MPPT P&O algorithm for power optimization, PR current regulator for the control of the quantity and quality of the current injected, and finally a PLL for synchronization with the grid voltage. The different simulation results have shown the efficiency of the system which is reflected by a high amount of active power injected and by a minimum THD of the current.

## ملخص

يقدم هذا العمل دراسة حول الأنظمة الكهروضوئية ذات الطاقة المنخفضة والمرتبطة بشبكة كهربائية أحادية الطور. بدأنا هذا العمل بشكل عام على الأنظمة الكهروضوئية، ثم على الهياكل المختلفة للأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة، ولا سيما الأنظمة أحادية الطور بدون محول. من ثم قمنا بنمذجة وتحجيم المكونات المختلفة للنظام، والتي تجمع بين GPV و محول الطاقة Boost وعاكس أحادي الطور ومرشح LCL. بعد ذلك، اخترنا عناصر التحكم المرافقة، لذلك اخترنا خوارزمية MPPT P&O لتحسين الطاقة، ومنظم تيار للتحكم في كمية ونوعية التيار المحقون، وأخيراً PLL للالتزام مع جهد الشبكة. أظهرت نتائج المحاكاة المختلفة كفاءة النظام والتي تظهر من خلال الكمية العالية للطاقة النشطة الناتجة والحد الأدنى من THD للتيار المحقون.

## *Remerciements*

*Nous remercions avant tous ALLAH qui'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail.*

*Mes sincères remerciements et ma plus grande reconnaissance à mon encadreur monsieur Benhamadouche Abdelouahab doctor en électronique. Nos remerciements vont aussi à ceux qui m'ont fait l'honneur de juger notre travail, le président de jury et les examinateurs.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département de génie électrique pour leurs contributions à notre formation durant nos années d'étude.*

*Merci à tous ce qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents symboles d'affection et d'amour, qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents sans oublié mes très chères frères et ma soeur.  
mon cher ami Aimeur Noureddine tous ceux que j'aime.*

# Table des matières

Remerciements

Dédicace

Table des matières

Liste des figures

Intrudocion générale ..... 1

## Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes PV

1.1 Intrudocion .....	3
1.2 La cellule photovoltaïque .....	3
1.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin.....	3
1.2.2 Les différentes technologies des cellules.....	4
1.2.3 Schéma équivalent d'une cellule .....	5
1.2.4 Caractéristique Courant-Tension .....	5
a) Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	6
b) Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	7
c) Influence de la résistance shunt : .....	7
1.3 Générateur photovoltaïque .....	8
1.3.1 Association série des cellules PV .....	8
1.3.2 L'association en parallèle des cellules.....	10
1.4 Types d'installations photovoltaïques .....	11
1.4.1 Installations autonomes.....	11
1.4.2 Installations raccordées aux réseaux.....	11
1.5 Système de conversion .....	12
1.5.1 Convertisseur DC-DC.....	12
1.5.2 Convertisseur DC-AC.....	13
1.5.2.1 l'onduleur unique générateur (OUG).....	13

1.5.2.2 l'onduleur par groupe de panneaux (OGP) .....	13
1.5.2.3 l'onduleur intégré par panneau (OIP).....	14
1.5.2.4 L'onduleur couplé au réseau .....	14
1.6 Réseau électrique.....	15
1.7 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau .....	16
1.8 Conclusion.....	16

## **Chapitre 2 : Topologies des systèmes PV monophasés connectés aux réseaux**

2.1 Introduction .....	17
2.2 Technologies des convertisseurs de puissance pour les systèmes PV en monophasé.....	17
2.3 Onduleurs AC-Module sans transformateur (Convertisseurs PV intégrés au module).....	19
2.4 Onduleurs à cordes en un seul étage sans transformateur (string inverter).....	19
2.4.1. Structures d'onduleurs dérivées de la topologie d'H-Bridge.....	20
2.4.1.1 Première topologie de full-bridge .....	20
2.4.1.2. Onduleur H5 (SMA).....	20
2.4.1.3 Onduleur HERIC (Sunways).....	21
2.4.1.4 Onduleur REFU.....	22
2.4.2 Structures d'onduleurs dérivées de la topologie de NPC .....	22
2.4.2.1 Point neutre clampé (NPC) Demi-pont Onduleur .....	22
2.4.2.2 Onduleur conergy NPC .....	23
2.5 Onduleurs à cordes en deux étages avec transformateur (string inverter) .....	24
2.5.1 H-Bridge Basé sur un convertisseur survolteur avec transformateur HF .....	24
2.5.2 H-Bridge Basé sur un convertisseur boost avec Transformateur base fréquence.....	24
2.6 Onduleurs photovoltaïques en trois phases .....	25
2.7 Conclusion.....	25

## Chapitre 3 : Modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

3.1 Introduction .....	26
3.2 Système photovoltaïque Proposé.....	26
3.3 Dimensionnement des composants du système.....	28
3.3.1 Générateur photovoltaïque.....	28
3.3.2 Convertisseur de puissance Boost.....	29
Sélection de l'inductance L .....	29
Sélection de la capacité d'entrée .....	30
Sélection de la capacité de sortie.....	30
3.3.3 Filtre LCL .....	31
3.4 Conclusion : .....	33

## Chapitre 4 : Simulation et résultats

4.1 Introduction .....	34
4.2 Structures du système .....	34
4.2. Conception de la commande.....	35
4.2.1. La synchronisation au réseau .....	35
4.2.2 Le contrôleur de courant PR .....	36
4.2.3 Le contrôleur de tension du bus continu .....	38
4.2.4. La commande MPPT .....	39
4.3. Résultats de simulation.....	40
4.3.1. Simulation avec irradiance constante de 1000w/m <sup>2</sup> .....	40
4.3.1.1. Simulation de GPV et du hacheur Boost.....	40
4.3.1.2 Simulation de l'onduleur monophasé avec filtre LCL de sortie .....	43
4.3.2 Résultats de simulation avec changement d'irradiance (G).....	47
4.4. Conclusion .....	52
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>
<b>Références.....</b>	<b>55</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 : Principe de fonctionnement d'une cellule.....	3
Figure 1.2 : Les différentes technologies photovoltaïques .....	4
Figure 1.3 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque .....	5
Figure 1.4 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle.....	6
Figure 1.5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ . .....	6
Figure 1.6 : Influence de la chaleur sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ [5].....	7
Figure 1.7 : L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V. ....	7
Figure 1.8 : Composantes d'un champ de modules photovoltaïques. ....	8
Figure 1.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série. ....	9
Figure 1.10 : Caractéristique résultante du regroupement de ns cellules en série.....	9
Figure 1.11 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle. ....	10
Figure 1.12: Caractéristique résultante du regroupement de $N_p$ cellules en parallèle .....	10
Figure 1.13 : Installation autonome.....	11
Figure 1.14 : Installations raccordées au réseau. ....	12
Figure 1.15 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	12
Figure 1.16 : Symbole d'un convertisseur DC-AC.....	13
Figure 1.17 : Modularité des couplages par onduleurs.....	14
Figure 1.18 : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie. ....	15
Figure 2.1 : Concepts de systèmes photovoltaïques connectés au réseau. ....	18
Figure 2.2 : Les systèmes photovoltaïques connectés monophasés .....	18
Figure 2.3 : Un onduleur universel de module AC connecté avec un filtre LCL.....	19
Figure 2.4 : Onduleur FB de base.....	20
Figure 2.5 : Topologie des onduleurs H5 (SMA).....	21
Figure 2.6 : Topologie HERIC (Sunways).....	21
Figure 2.7 : Topologie de l'onduleur REFU.....	22
Figure 2.8 : Demi-pont serré neutre.....	23
Figure 2.9 : Point neutre de Conergy serré onduleur.....	23

Figure 2.10 : Onduleur avec transformateur HF basé sur H-Bridge .....	24
Figure 2.11 : Onduleur avec transformateur BF basé sur un convertisseur boost.....	25
Figure 3.1 : Schéma synoptique d'un système PV relié au réseau électrique monophasé. ....	25
Figure 3.2 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont complet.....	27
Figure 3.3 : Caractéristiques du GPV choisi à différentes valeurs d'éclairement.....	28
Figure 3.4 : Structure de convertisseur Boost .....	28
Figure 3.5 : Structure d'un filtre LCL .....	30
Figure 4.1 : Schéma de simulation globale du système PV raccordé au réseau.....	34
Figure 4.2 : Structure d'un s-PLL monophasé .....	36
Figure 4.3 : Schéma bloc sous Simulink de la PLL monophasée .....	36
Figure 4.4 : Le contrôleur de courant en boucle fermée .....	37
Figure 4.5 : Le contrôleur de courant PR sous MATLAB/Simulink. ....	38
Figure 4.6 : Contrôleur de tension du bus continu. ....	38
Figure 4.7 : Algorithme de poursuite du point maximum de puissance MPPT/P&O .....	39
Figure 4.8 : Modèle de simulation pour l'algorithme 'perturbation et observation (P&O). ....	40
Figure 4.9 : La forme d'onde de la tension $V_{pv}$ .....	41
Figure 4.10 : La forme d'onde du courant $I_{pv}$ .....	41
Figure 4.11 : La puissance maximisée produite par le GPV .....	41
Figure 4.12 : La tension du bus continue.....	42
Figure 4.13 : Schéma de l'onduleur et du filtre LCL. ....	43
Figure 4.14 : Courant généré par l'onduleur avant filtrage .....	43
Figure 4.15 : THD du courant généré par l'onduleur avant filtrage.....	44
Figure 4.16 : La tension de sortie de l'onduleur avant filtrage et celle du réseau électrique ...	44
Figure 4.17 : Courant généré par l'onduleur après filtrage .....	45
Figure 4.18 : THD du courant généré par l'onduleur après filtrage.....	45
Figure 4.19 : La tension de sortie de l'onduleur après filtrage.....	46
Figure 4.20 : Courant de référence $i_{gref}$ .....	46
Figure 4.21 : La puissance active injectée dans le réseau électrique.....	47
Figure 4.22 : Profils de test pour la variation de l'éclairement solaire. ....	48
Figure 4.23 : Tension à la sortie du générateur PV. ....	48

Figure 4.24 : Courant à la sortie du générateur PV .....	49
Figure 4.25 : La puissance produite par le générateur PV.....	49
Figure 4.26 : L'allure de la tension à la sortie du hacheur Boost. ....	50
Figure 4.27 : L'allures du courant à la sortie de l'onduleur avant filtrage.....	50
Figure 4.28 : THD du courant à la sortie de l'onduleur avant filtrage. ....	51
Figure 4.29 : L'allures de courants à la sortie de l'onduleur après filtrage avec THD .....	51
Figure 4.30 : La puissance injectée au réseau .....	52

## **INTRODUCTION GENERALE**

La consommation et le besoin d'énergie électrique sont en nette croissance dans le monde, l'épuisement progressif des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon...) caractérisées par des émissions du gaz carbonique produit lors de leurs combustions d'une part, et le risque des centrales nucléaires (les radiations d'uranium) avec une production de déchets radioactifs difficiles à traiter d'autre part, sont des problèmes bien réels qui ont poussés les chercheurs à développer d'autres sources d'énergies durables et plus respectueuses de l'environnement. Ces moyens de substitutions dont on parle, sont bien sûr les « énergies renouvelables ».

Plusieurs pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.

Parmi les énergies renouvelables les plus répondu vient en tête l'énergie photovoltaïque, elle offre une des meilleures solutions pour la production d'électricité propre, mais son gros défaut est qu'elle est tributaire aux changements des conditions climatiques et à la présence du soleil. Aussi, l'utilisation de cette énergie passe le plus souvent à travers le raccordement des installations photovoltaïque au réseau électrique, ceci engendre d'autres problématiques d'adaptation et de qualité d'énergie.

Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif principal est l'étude de l'adaptation en puissance d'un générateur photovoltaïque (GPV) au réseau électrique. Le système photovoltaïque connecté au réseau désigne l'ensemble des éléments nécessaires à la production d'énergie d'origine photovoltaïque, sa transformation et son utilisation. Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau.

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur l'énergie photovoltaïque, nous présentons ainsi les définitions qui se rapportent au domaine de l'énergie photovoltaïque ainsi que les différents composants qui constituent un système PV typique.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons une étude plus détaillée sur les configurations et les architectures utilisés dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique monophasé.

Le troisième chapitre sera consacré au dimensionnement et à la modélisation du système, ceci décrit les différentes parties de notre système d'énergie photovoltaïque à travers l'utilisation de modèle mathématique.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par un quatrième chapitre où nous présenterons les différents tests de validation du système conçu, à travers l'utilisation de d'un ensemble de scénarios de simulation.

Nous terminerons le mémoire par une conclusion qui situ le travail effectué ainsi que les perspectives futures des travaux présentés.



**CHAPITRE 1**

**GÉNÉRALITÉS SUR LES  
SYSTÈMES PV**

## 1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Le présent chapitre s'intéresse aux généralités des systèmes photovoltaïques, nous commencerons par la définition de l'énergie solaire, puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet, ainsi que leur principe de fonctionnement. Puis nous présentons les différents types des cellules photovoltaïques. Enfin les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque.

## 1.2 La cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité, ce phénomène dépend du matériel semi-conducteur et de la longueur d'onde de la lumière incidente. Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [1].

Le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, alors la cellule photovoltaïque utilise principalement cette source où la plupart des applications sont en plein air.

### 1.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du principalement du soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes [2].

- Absorption des photons.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

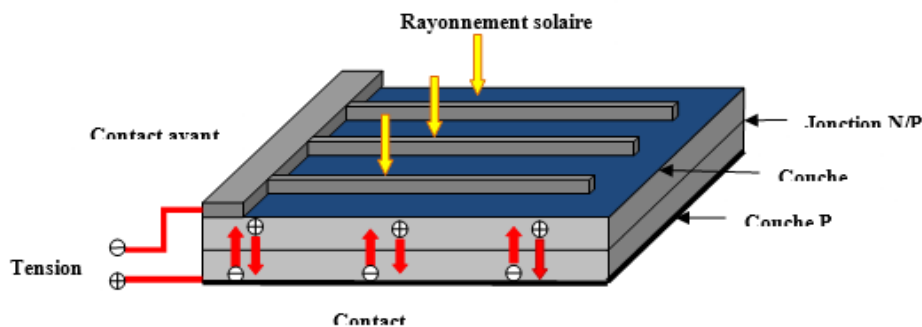


Figure 1.1 : Principe de fonctionnement d'une cellule.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque

### 1.2.2 Les différentes technologies des cellules

Les différentes technologies de cellules dépendent des matériaux semi-conducteurs utilisés. Les principaux types sont présentés dans le schéma ci-dessous. Beaucoup sont toujours en phase de recherche et de développement.

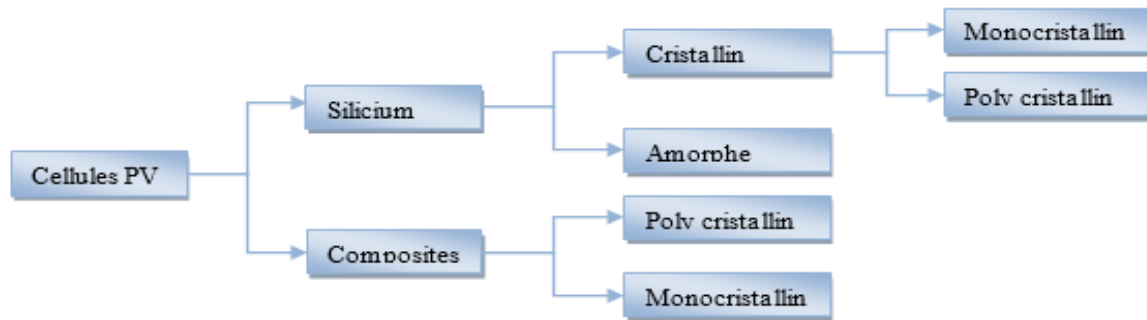


Figure 1.2 : Les différentes technologies photovoltaïques

#### ➤ Filière du silicium

Cette filière représente aujourd'hui près de 99% de la production mondiale en termes de matériaux photovoltaïques et comporte [3].

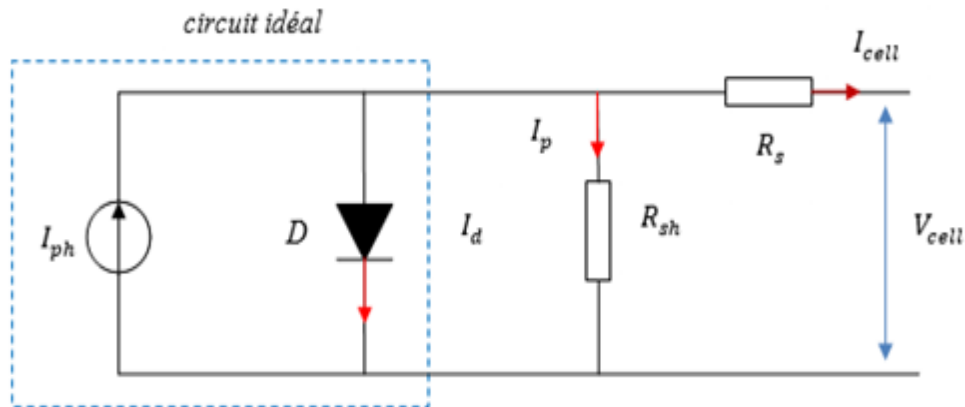
- **Le silicium monocristallin :**  
Représente environ 29% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 17% pour les cellules et de 14,5% pour les modules.
- **Le silicium poly cristallin :**  
Représente environ 62% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 14,5% pour les cellules et de 12,5 pour les modules.
- **Le silicium amorphe :**  
Avec une épaisseur plus petite, et un coefficient d'absorption plus grand que les filières présentées ci-dessus, le coût du silicium amorphe est réduit mais avec un rendement (pour les produits commerciaux) de 8% ce qui le limite aux applications de très faibles puissances.

#### ➤ Filière non silicium (composite)

Cette filière comporte deux catégories distinctes, à savoir les composites monocristallins (GaAs) et polys cristallins. Mais deux technologies se sont imposées progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (noté CdTe), et l'autre sur les alliages Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, (cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelées filières CIS pour les rendements records qu'elles présentent de 16,5 % pour CdTe et de près de 20 % pour CIS (19,5 %) [3].

### 1.2.3 Schéma équivalent d'une cellule

Technologiquement, un capteur PV est proche à la structure d'une diode PN de par sa construction, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre.



**Figure 1.3** : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque présentée comporte en réalité une résistance série  $R_s$  et une résistance shunt  $R_{sh}$ . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

➤ **La résistance série**

Elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [4].

➤ **La résistance shunt**

Elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

### 1.2.4 Caractéristique Courant-Tension

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ .

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit  $I_{CC}$  et dépend.

Une cellule PV peut fonctionner en source de tension ou en source de courant selon le point de fonctionnement. Ainsi, la caractéristique I-V se divise en trois zones (voir Figure 1.4) :

- La zone « **a** » : où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'éclairement (le courant est constant alors que la tension est variable).
- La zone « **b** » : où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{OC}$  (la tension est constante alors que le courant est variable).

- La zone « c » : où l'impédance interne du générateur varie rapidement. L'intervalle où la cellule n'est considéré ni source de tension ni source de courant (intervalle où le courant et la tension sont variables). Le point  $M_0$  représente le point de puissance maximale.

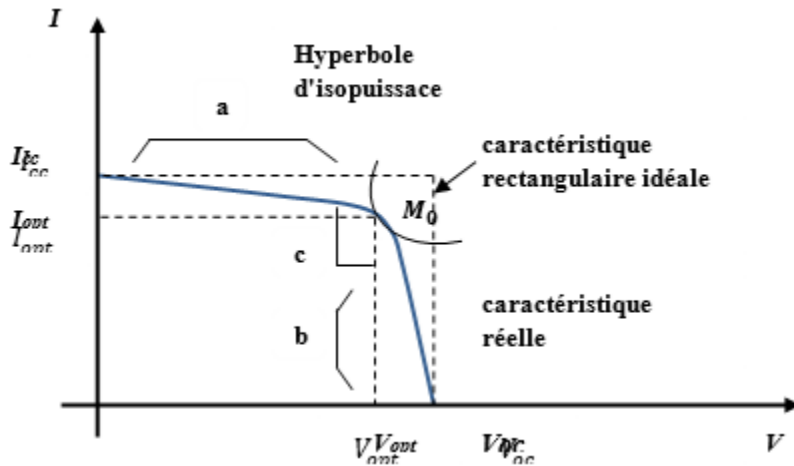


Figure 1.4 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle.

### a) Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

L'énergie lumineuse permet la séparation des paires électron-trou, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraîne une augmentation de paires électron-trous éparées.

Le courant produit reste proportionnel à l'ensoleillement avec un courant d'obscurité inchangée et une légère augmentation de la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). Au final, le point de puissance maximum de la cellule se décale vers les puissances supérieures [1].

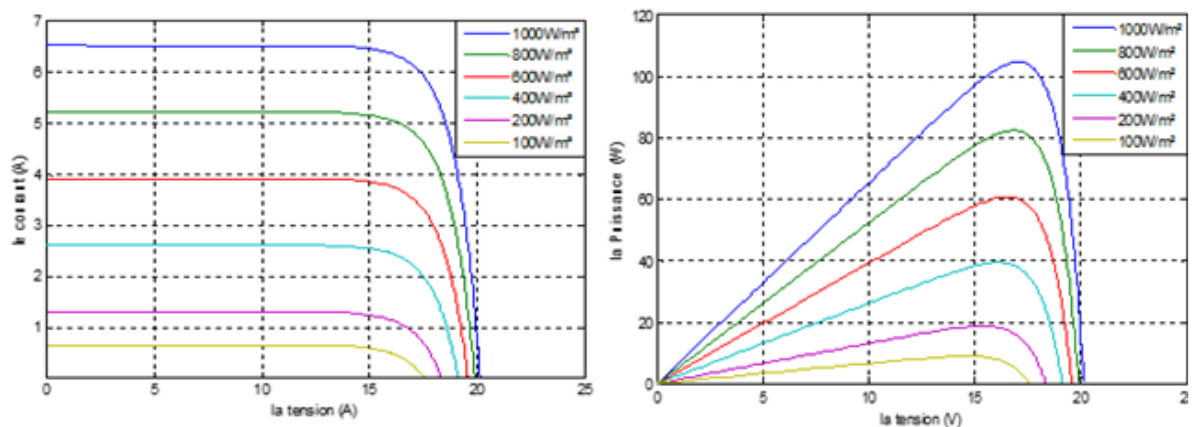
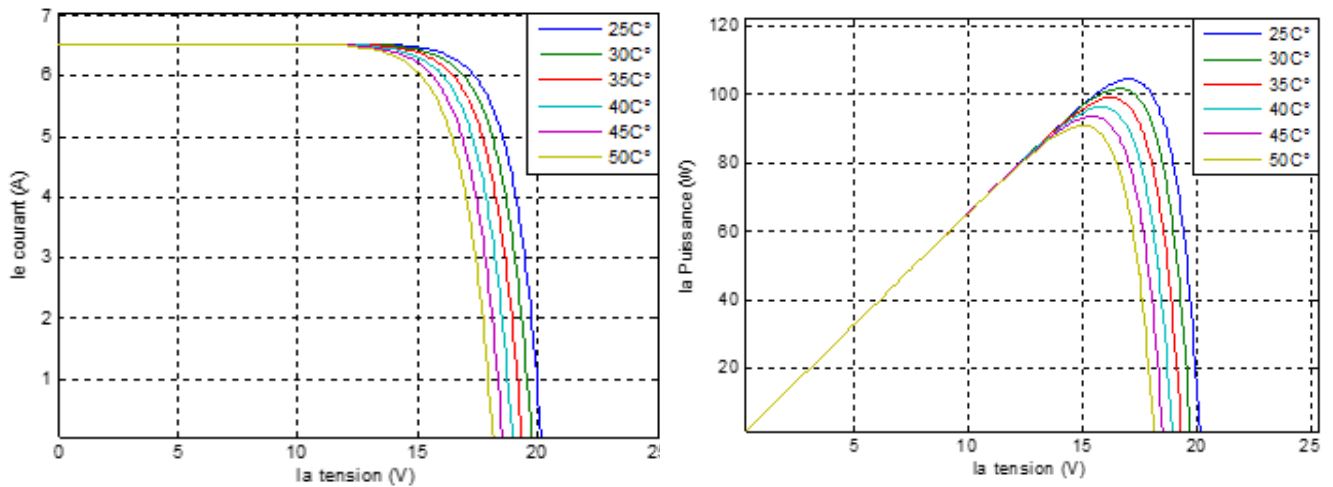


Figure 1.5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  [1].

**b) Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$**

Bien qu'importante dans le comportement des cellule photovoltaïques, la température est souvent négligée, à savoir que sur 100% d'énergie incidente, une très faible proportion est réfléchi sur la surface du capteur, 10 à 15% en est extraite sous forme d'énergie électrique mais le reste de l'énergie incidente (soit plus de 80%) sera dissipé sous forme de chaleur. Ainsi, on peut déduire qu'un générateur PV fonctionne mieux à basse température et à flux lumineux important.

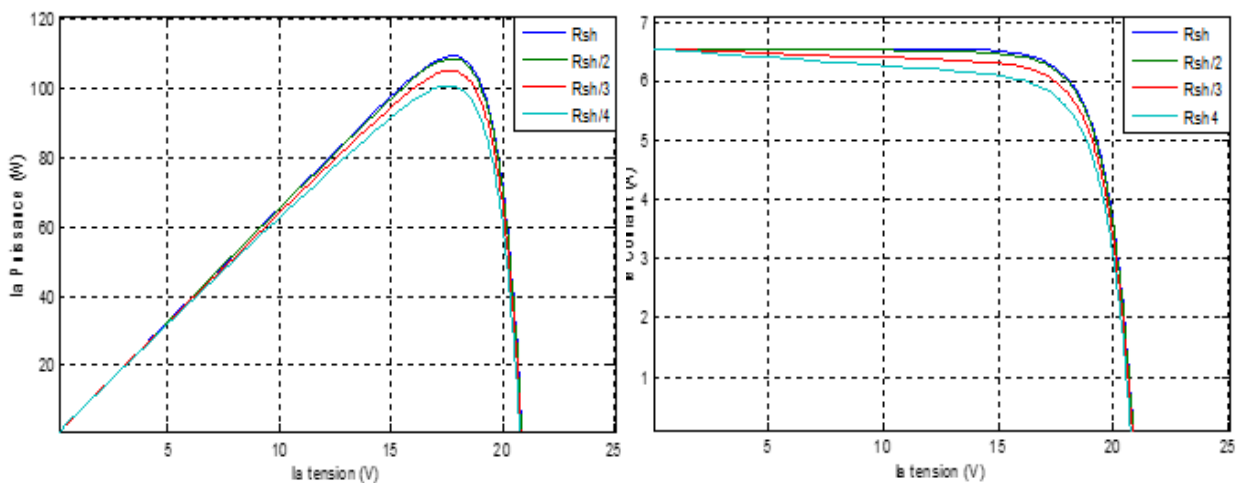
Quand la température augmente, la tension en circuit ouvert de la cellule diminue alors que le courant de court-circuit n'augmente que légèrement, ce qui provoquera une baisse de la puissance maximale générée par la cellule [5].



**Figure 1. 6 :** Influence de la chaleur sur la caractéristique  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  [5].

**c) Influence de la résistance shunt :**

La figure (I.7) montre l'influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V de la cellule qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance P-V dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension constante.

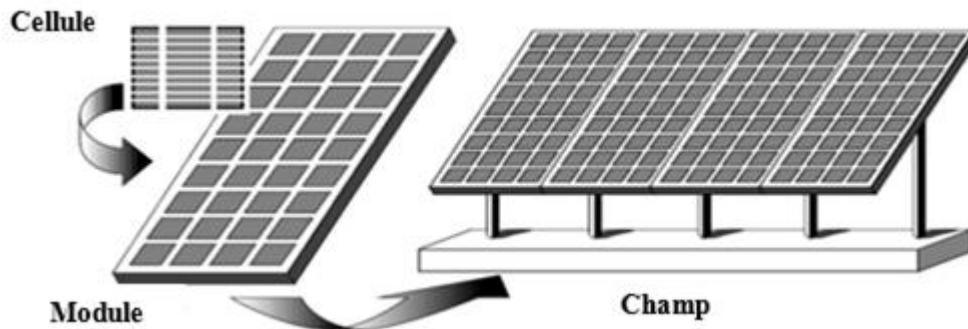


**Figure 1.7 :** L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V.

### 1.3 Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque constitue l'élément fondamental d'un générateur électrique. Elle délivre une puissance très faible pour la majorité des applications domestiques ou industrielles.

L'assemblage d'un nombre important de cellule est nécessaire pour une exploitation pratique de cette puissance. Les cellules sont triées afin qu'elles aient toutes à peu près les mêmes caractéristiques, puis assemblées en série, parallèle, ou en série-parallèle pour constituer le générateur électrique, appelé aussi le module photovoltaïque.



**Figure 1.8:** Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.

#### 1.3.1 Association série des cellules PV

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi-conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre [7].

En termes d'équations on aura :  $I_{SCC} = I_{CC}$  et  $V_{SCO} = N_s \times V_{CO}$

Avec :

$V_{CO} \cdot N_s$  : Tension aux bornes de  $N_s$  cellules en série

$N_s$  : Nombre de cellules en série

$V_{CO}$  : Tension aux bornes d'une seule cellule

$I_{SCC}$  : Courant traversant une cellule.

$I_{SCC} \cdot N_s$  : Courant traversant  $N_s$  cellules en série

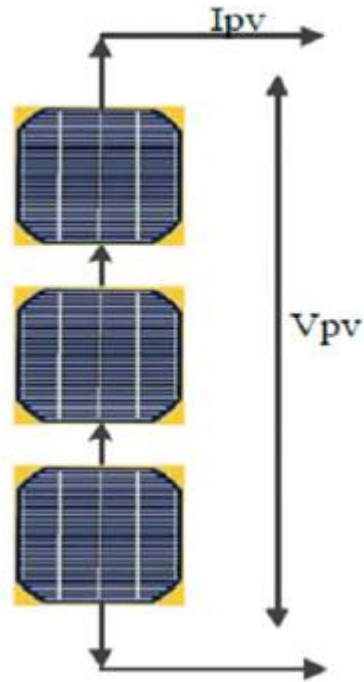


Figure 1.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

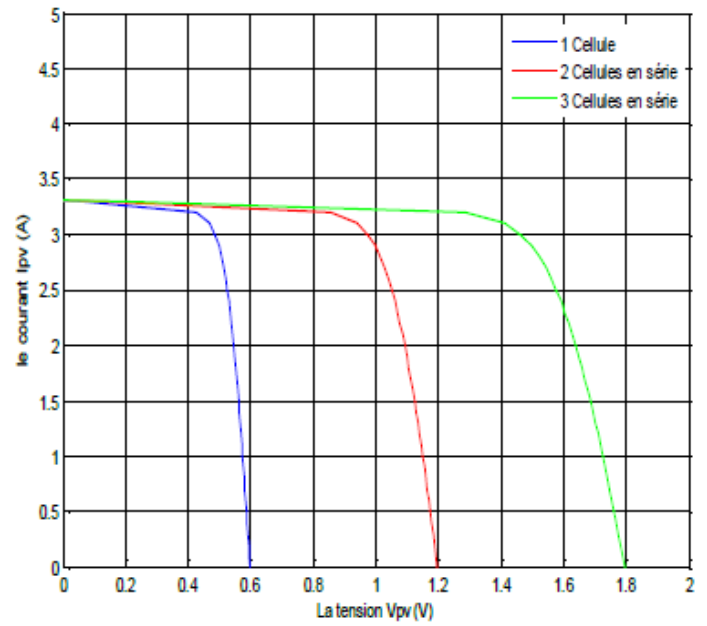
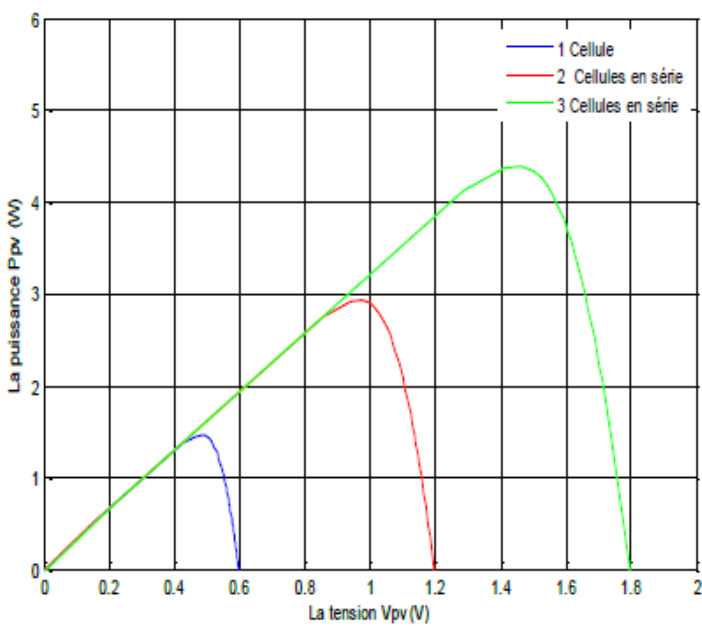


Figure 1.10: Caractéristique résultante du regroupement de ns cellules en série.

La caractéristique I-V représentée par la figure I.10 du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

### 1.3.2 L'association en parallèle des cellules

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même.

$$I_{PCC} = N_P \times I_{CC} \text{ et } V_{PCO} = V_{CO}$$

Avec :

$I_{PCC} \cdot N_P$  : Courant traversant  $N_P$  cellules en parallèle

$N_P$  : Nombre de cellules en parallèle

$V_{CO} \cdot N_P$  : Tension aux bornes de  $N_P$  cellules en parallèle

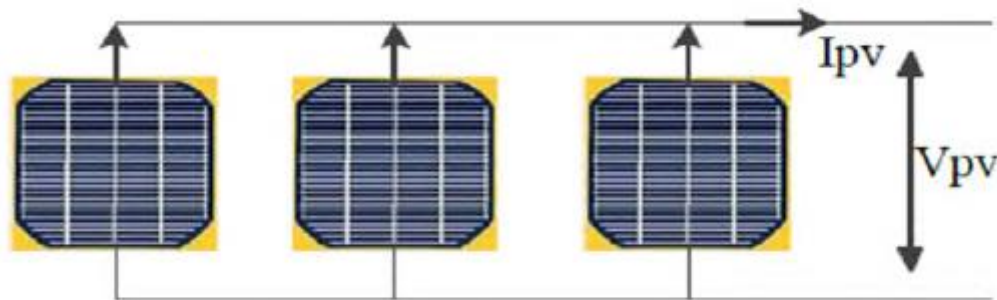


Figure 1.11: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

La caractéristique suivante représente le groupement parallèle. On voit bien que le courant est proportionnel au nombre de photopiles.

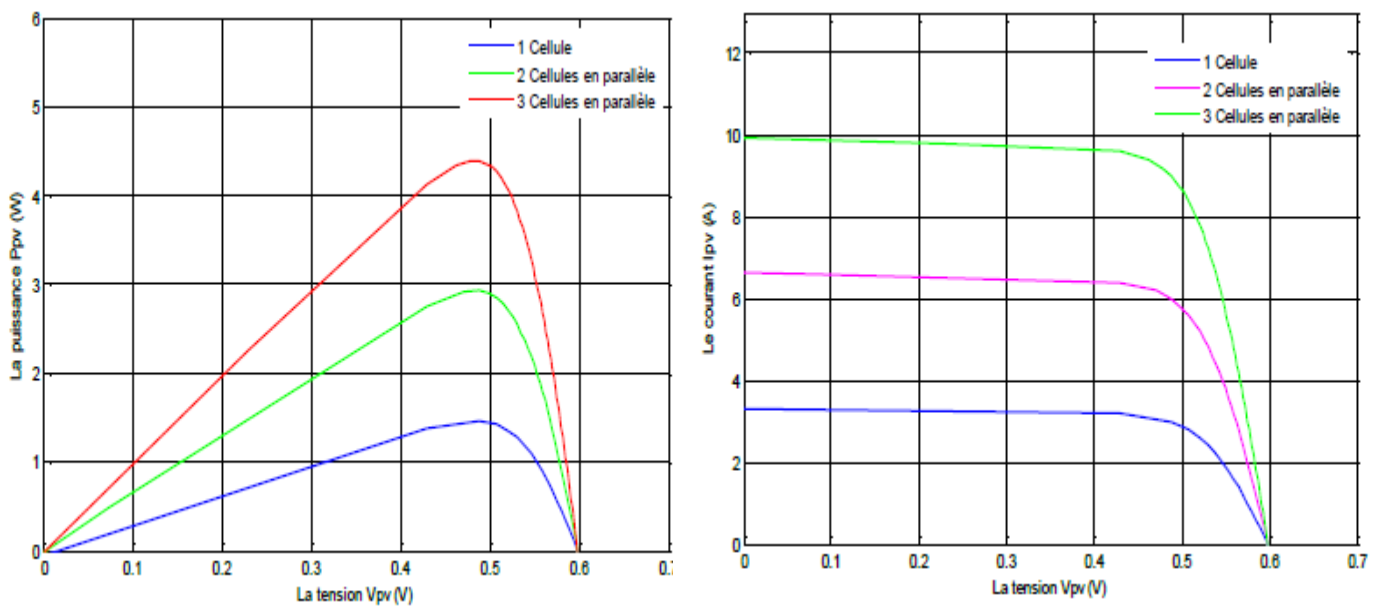


Figure 1.12: Caractéristique résultante du regroupement de  $N_P$  cellules en parallèle

## 1.4 Types d'installations photovoltaïques

Il existe deux types de mise en œuvre d'une installation photovoltaïque selon qu'elle fonctionne de manière autonome ou qu'elle soit raccordée à un réseau public de distribution d'électricité.

### 1.4.1 Installations autonomes

Les installations autonomes sont des installations qui produisent de l'électricité pour un bâtiment ou un autre consommateur qui n'est pas relié au réseau. La plupart de ces installations alimentent des sites éloignés de tout réseau public.

Elles comprennent des étages d'adaptation afin d'adapter la puissance aux besoins du consommateur. Ces étages d'adaptations sont constitués d'éléments suivant :

- **Hacheur** : il permet d'adapter le niveau des tensions continues et d'optimiser la puissance tirée du générateur PV.
- **Onduleur** : il permet de transformer l'énergie électrique d'une forme continue vers une forme alternative.
- **Batteries** : elle permet le stockage de l'énergie électrique pour subvenir aux besoins du consommateur à cause des problèmes d'intermittence de l'énergie PV.

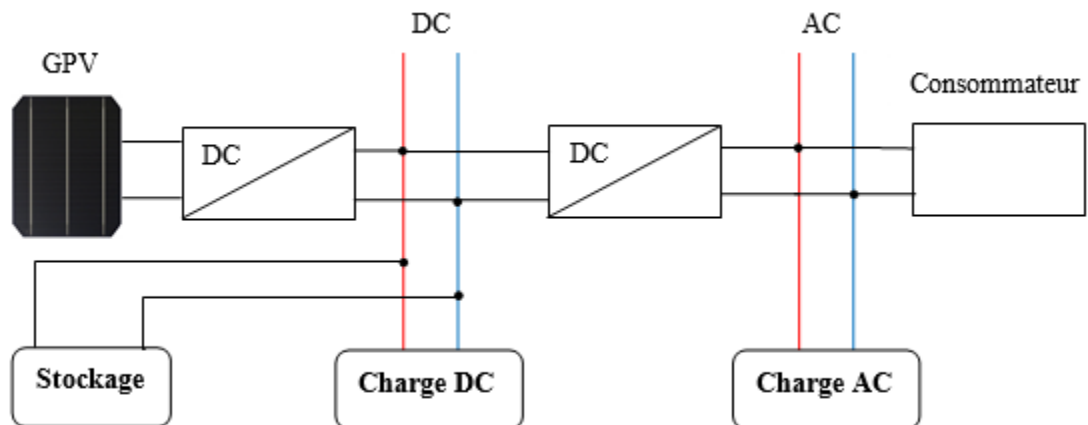


Figure 1.13 : Installation autonome.

### 1.4.2 Installations raccordées aux réseaux

Ce raccordement ne peut se faire qu'après transformation du courant pour courant pour qu'il soit adapté aux caractéristiques du réseau. Ces installations produisent de l'électricité qui peut être vendue en totalité ou en partie. Ainsi, on distingue deux modes.

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau permet de produire de l'électricité pour l'envoyer sur le réseau électrique nationale. Ainsi la totalité de la production électrique est utilisée par les consommateurs proches.

➤ **Injection de la totalité de la production au réseau**

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est directement injectée dans le réseau électrique. Les périodes d'injection correspondent aux périodes de production photovoltaïque

➤ **Injection de la totalité de la production au réseau**

L'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté dans le réseau.

L'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

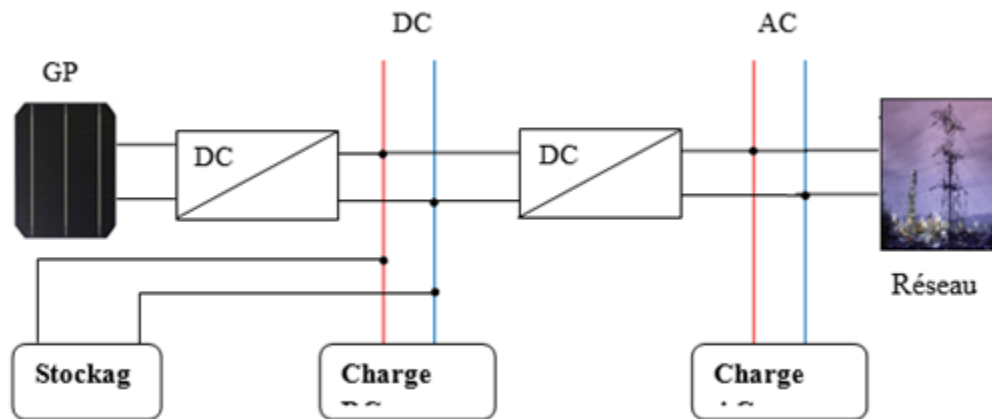


Figure 1.14 : Installations raccordées au réseau.

## 1.5 Système de conversion

Dans notre travail, le plus important des systèmes de conversion de puissance est la conversion DC/DC et la conversion DC/AC.

### 1.5.1 Convertisseur DC-DC

Les hacheurs ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ou de réguler une tension de sortie à partir d'une tension d'entrée variable.

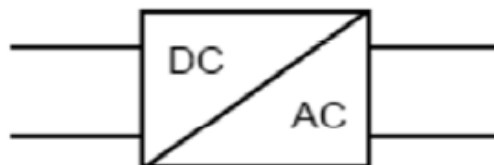


Figure 1.15. Symbole d'un convertisseur DC-DC

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV pour générer les courants et les tensions souhaités sont :

- Les convertisseurs de type BUCK (abaisseurs) dans lesquels  $V_o < V_i$
- Les convertisseurs de type BOOST (élevateurs) dans lesquels  $V_o > V_i$
- Les convertisseurs de type BUCK-BOOST qui peuvent fonctionner en BUCK ou en BOOST en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .

Le convertisseur de puissance DC/DC dans le système PV a pour rôle d'optimiser le transfert d'énergie du générateur PV vers la charge. Ceci se fait via la commande de l'interrupteur en utilisant un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui recherche le point de puissance maximale et fait fonctionner le système en ce point.

### 1.5.2 Convertisseur DC-AC

Actuellement l'utilisation des onduleurs, prennent de plus en plus du terrain dans les domaines d'applications les plus variés, devient incontournable.

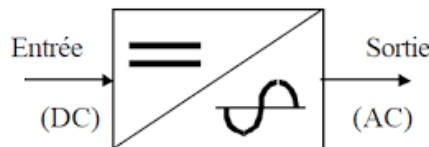


Figure 1.16 : Symbole d'un convertisseur DC-AC

Le développement des semi-conducteurs entièrement commandable rapides et robustes d'une part, et le perfectionnement des techniques de commande d'autre part ont eu un énorme rôle dans l'évolution de ces convertisseurs. Ces progrès ont permis d'intégrer les onduleurs dans les systèmes photovoltaïques dans diverse application

Actuellement, il existe principalement trois modes d'utilisation d'onduleurs en réponse à des compromis technico-économiques : l'onduleur général, les onduleurs par réseau de panneaux et les onduleurs intégrés par panneau. Nous décrivons brièvement leur caractéristique ci- dessous.

#### 1.5.2.1 l'onduleur unique générateur (OUG)

Dans le cas d'onduleur central, Les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres. Toute la production serait défaillante si l'onduleur centralisé tombait en panne [2], Figure 1.17(a)

#### 1.5.2.2 l'onduleur par groupe de panneaux (OGP)

Ce schéma est le plus utilisé pour les installations allant jusqu'à 3 KW de puissance. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs strings en parallèle, coté courant alternatif.

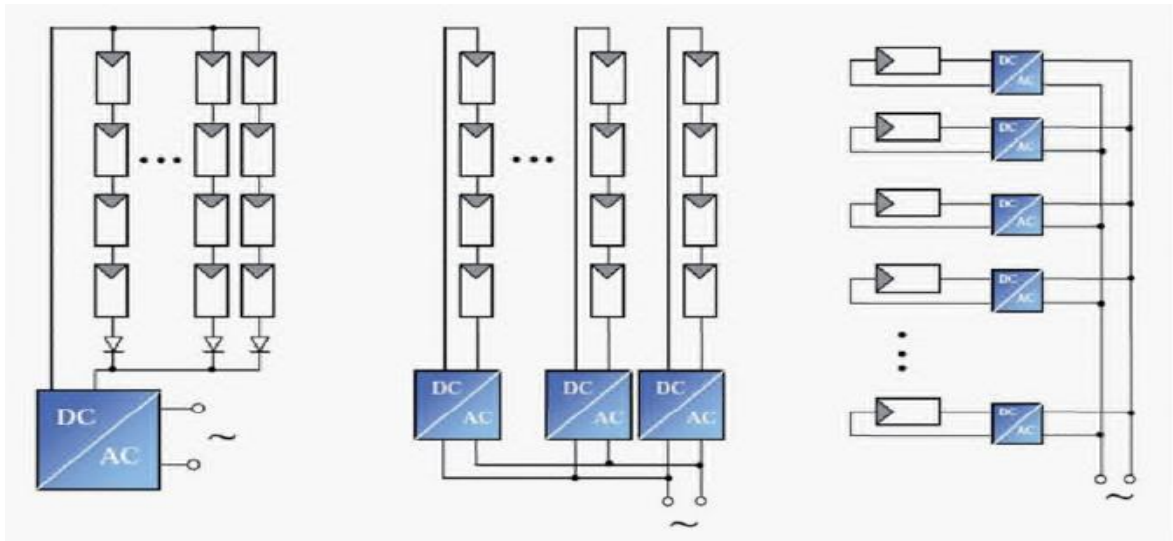
L'intérêt de ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante [2], Figure 1.17(b).

### 1.5.2.3 l'onduleur intégré par panneau (OIP)

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur Figure 1.17(c), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut [2].

Les configurations OGP et OIP sont reconnues pour leur meilleure réponse aux variations d'ensoleillement et aux inhomogénéités lumineuses mais aussi pour leur facilité d'installation. La configuration OUG est souvent moins chère en termes d'équipement électronique nécessaire. Elle conduit à un

meilleur rendement global et une meilleure fiabilité [2].



a) Onduleur central

b) Onduleur string

c) Onduleur intégré au PV

**Figure 1.17** : Modularité des couplages par onduleurs

### 1.5.2.4 L'onduleur couplé au réseau

Les applications photovoltaïques les plus valorisantes actuellement sont les installations PV destinées à alimenter les réseaux électriques publics par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de conversion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le générateur PV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum [2].

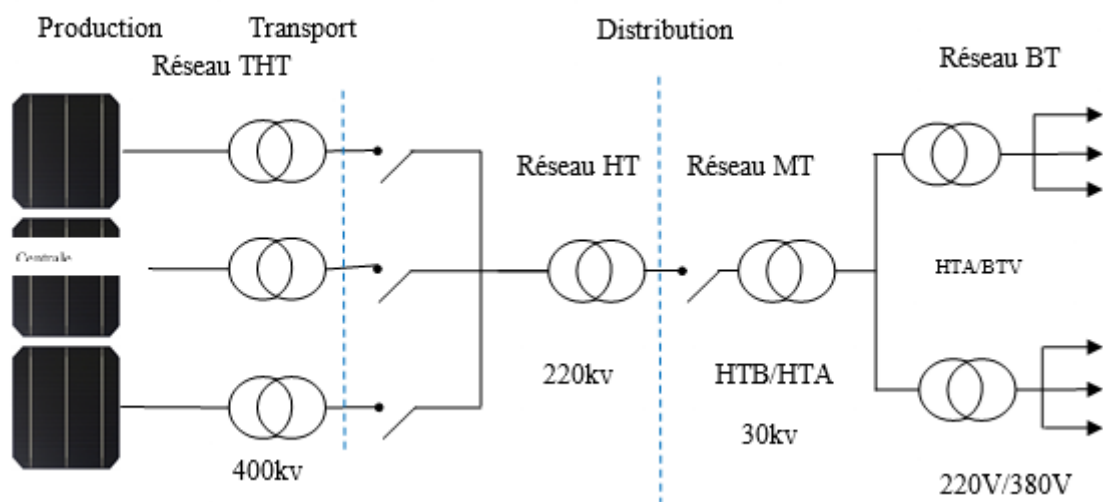
De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompe l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de

l'installation. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau.

## 1.6 Réseau électrique

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs (voir Figure 1.18) [5].



**Figure 1.18** : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie.

Les réseaux de transport à très haute tension (THT.400kV). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.

Les réseaux de répartition à haute tension (HT, de 60 kV à 220 kV) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers la zone de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci. Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à moyenne tension (MT, de 5,5 kV à 30 kV) et les réseaux à basse tension (BT, de 110 V à 220 V). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse. Les réseaux basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie [1-6].

## 1.7 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont [7].

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

## 1.8 Conclusion

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des technologies photovoltaïques. Le contexte nous a permis de présenter le principe de la conversion photovoltaïque, la modélisation d'une cellule photovoltaïque, les propriétés du générateur photovoltaïque, le rendement de conversion des cellules photovoltaïque, les limitations et les comportements en température et en fonction de divers éclairagements.

Nous avons, également décrit les différentes associations possibles de cellules photovoltaïques pour fabriquer un module PV. Dans la dernière partie du chapitre, nous avons abordé les différentes architectures d'installations photovoltaïques qui existent, à savoir autonomes et connectées au réseau électrique.



**CHAPITRE 2**

**TOPOLOGIES DES**  
**SYSTÈMES**

**PHOTOVOLTAÏQUES**  
**MONOPHASÉS CONNECTÉS**  
**AUX RÉSEAUX**

### 2.1 Introduction

La croissance des systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques systèmes au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement influer sur la production d'énergie électrique annuelle et donc sur la rentabilité financière d'un système.

Dans notre travail, nous nous intéressons aux systèmes PV raccordés au réseau monophasé. Et dans ce chapitre on s'intéresse principalement aux principales topologies de ces onduleurs.

### 2.2 Technologies des convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques en monophasé

Il existe principalement cinq types de configuration [3, 4, 5,6] pour organiser et transférer l'énergie photovoltaïque au réseau, comme le montre **la figure 2.1**. Chaque configuration se compose d'une série de panneaux photovoltaïques ou de chaînes PV parallèles, ils sont reliés par des convertisseurs d'électronique de puissance (convertisseurs DC-DC et onduleurs DC-AC) en fonction de la tension de sortie des panneaux photovoltaïques ainsi que de la puissance.

Les principales configurations utilisées dans les centrales PV, sont celles qui utilisent un onduleur triphasé ou monophasé, ces configurations permettent d'injecter la puissance générée dans le réseau avec une grande efficacité et un moindre coût. Cependant, ces solutions sont sensibles aux défauts qui apparaissent dans le champ PV, telle que les défauts de mismatch ou de point-chaud, c'est pour cette raison que les dispositifs MPPT sont de plutôt mis à l'extrémité de chaque chaîne PV, pour un meilleur rendement.

Comme il est montré dans **la figure 2.2(a) et 2.2(b)** dans le système PV monophasé, traditionnellement, un transformateur d'isolement peut être adopté soit du côté du réseau en basse fréquence ou comme transformateur à haute fréquence dans les convertisseurs photovoltaïques. Ces deux technologies photovoltaïques connectées au réseau sont disponibles sur le marché avec une efficacité globale de 93-95% [13] Pour améliorer le rendement global des installations PV, des convertisseurs sans-transformateur ont été développés, ils seront discutés dans les prochains paragraphes.

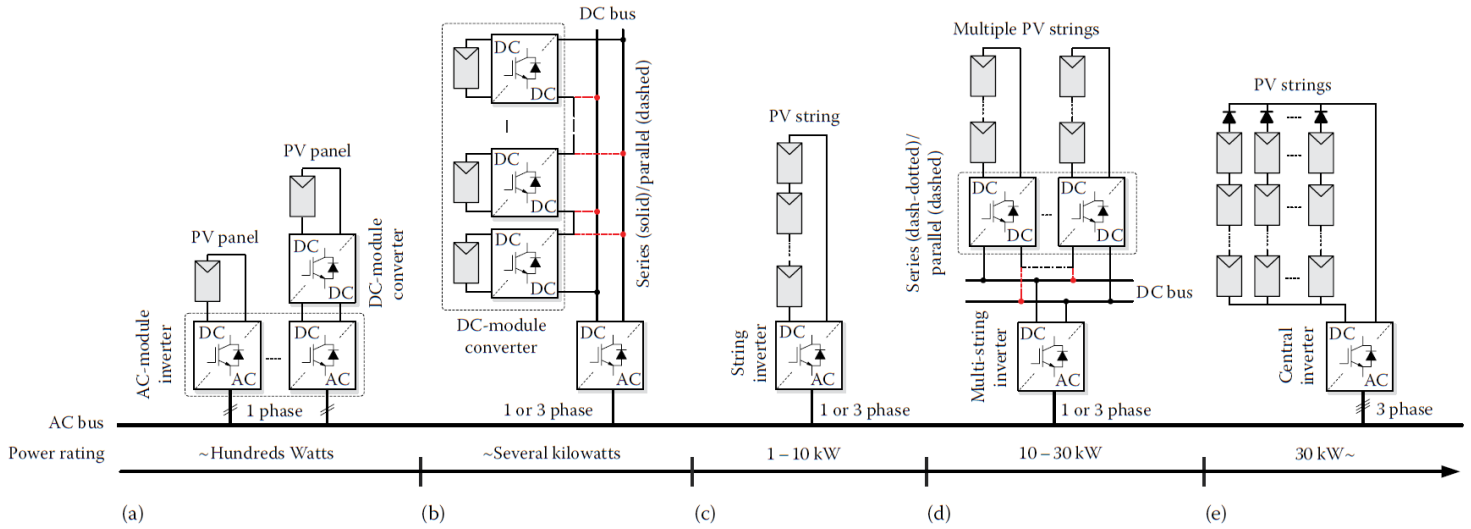


Figure 2.1 : Concepts de systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

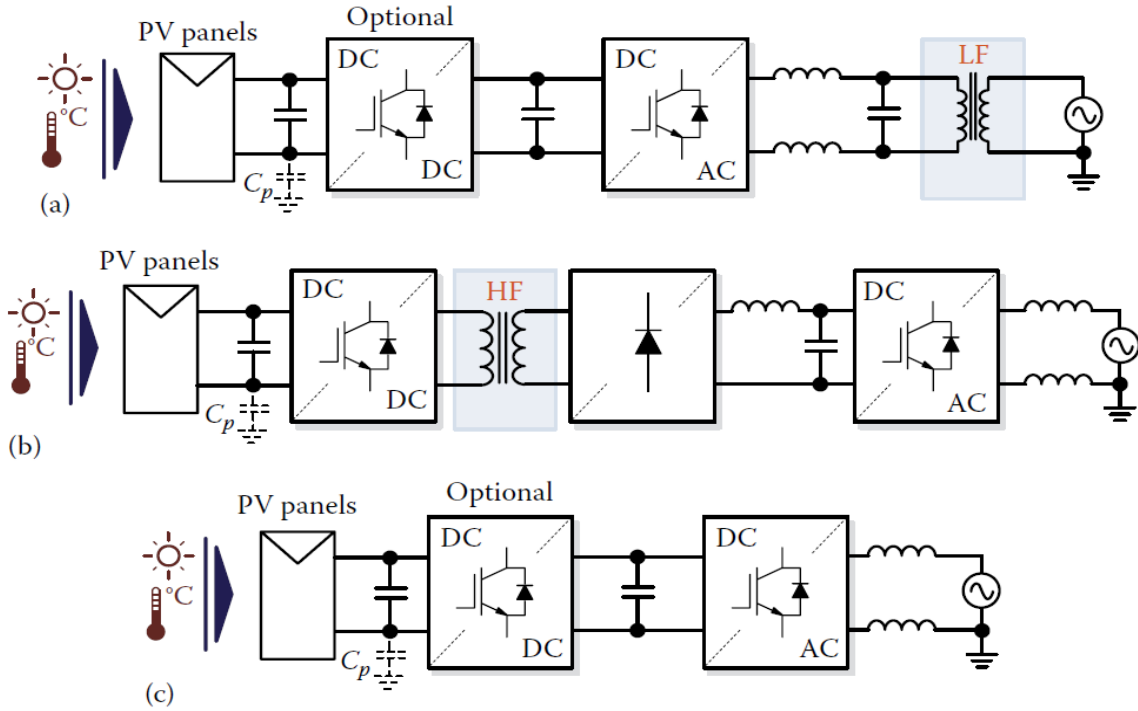
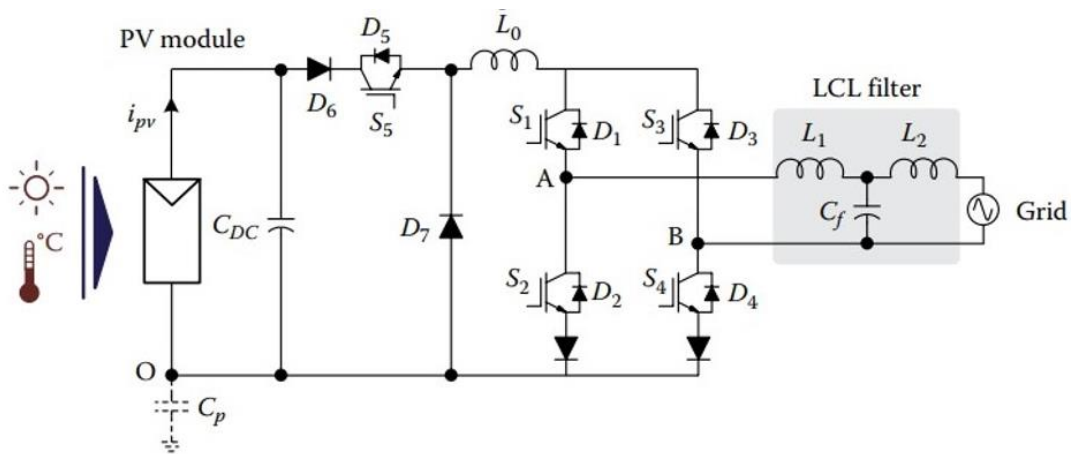


Figure 2.2 : Les systèmes photovoltaïques connectés monophasés : (a) avec un transformateur à basse fréquence, (b) avec un transformateur à haute fréquence et (c) sans transformateur. [1]

### 2.3 Onduleurs AC-Module sans transformateur (Convertisseurs photovoltaïques intégrés au module)

Un convertisseur photovoltaïque intégré au module à un étage peut fonctionner en mode buck-boost avec un large éventail de tensions de sortie de panneaux photovoltaïques. Cet onduleur du module AC est indiqué dans la **figure 2.3**, où un filtre LCL est utilisé pour atteindre un THD satisfaisant du courant injecté à la grille. Une variante de l'onduleur du module AC a été introduite, qui est en fait un mélange d'un convertisseur de boost et d'un onduleur FB. Le principal inconvénient de l'onduleur intégré boost AC-module est qu'il peut introduire une distorsion de courant zéro croisement. Afin de résoudre ce problème, les onduleurs du module AC sont préférables.



**Figure 2.3 :** Un onduleur universel de module AC connecté à une seule étage avec un filtre LCL.

### 2.4 Onduleurs à cordes en un seul étage sans transformateur (string inverter)

Aujourd'hui, il existe de nombreux fabricants d'onduleurs photovoltaïques sur le marché, tels que les sociétés SMA, Sunways, Conergy, Ingeteam, Danfoss Solar, Refu, etc., offrant une large gamme de PV sans-transformateur onduleurs à très haut rendement européen (97 %) et l'efficacité maximale jusqu'à 98 %. [2]

Le développement topologique pour les onduleurs photovoltaïques sans transformateur a pris le départ point dans deux « bien prouver » familles de convertisseurs :

- H-pont.
- Point neutre serré (NPC). [2]

Dans ce parti nous sommes intéressés à l'étude de topologie full-bridge ou H-pont et l'évolution de cette topologie pendant quelques années.

### 2.4.1. Structures dérivées d'onduleur de la topologie H-Bridge

La famille des convertisseurs H-bridge ou full-bridge (FB), développée pour la première fois par W. McMurray en 1965 [3], a été une référence importante dans le développement de la technologie de convertisseur électronique de puissance.

Il s'agissait de la première structure capable de tirer parti des premiers semi-conducteurs commués par la force disponibles (thyristors). La topologie H-bridge est très polyvalente, pouvant être utilisée pour la conversion DC-DC et DC-AC et peut également être implémenté sous forme FB (avec deux branches de commutation) ou sous forme de demi-pont (avec un bras de commutation).

#### 2.4.1.1 Première topologie full-bridge

La topologie la plus pratique des onduleurs photovoltaïques basée sur l'onduleur à pont complet (FB) est indiquée dans la **figure 2.4**.

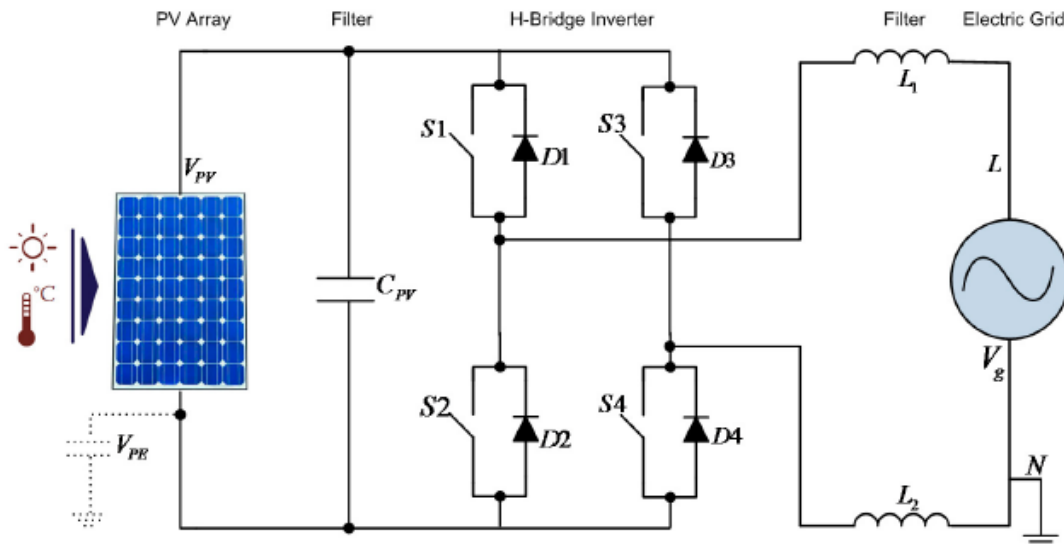


Figure 2.4: Onduleur full-bridge FB de base.

#### 2.4.1.2. Onduleur H5 (SMA)

En 2005, la société SMA a breveté une nouvelle topologie d'onduleur appelée H5 [5]. Cette topologie est représentée dans la **Figure 2.5**, et comme son nom l'indique, il s'agit d'un pont H classique avec un cinquième commutateur supplémentaire dans le bus positif de la liaison DC qui fournit deux fonctions vitales :

- Empêche l'échange de puissance réactive entre  $L1(2)$  et  $C_{PV}$  pendant que la tension est nulle, augmentant ainsi l'efficacité de l'onduleur jusqu'à 98%. [2]
- Isole le module PV du réseau pendant l'état de tension nulle, et éliminant ainsi le contenu haute fréquence de  $V_{PE}$ .

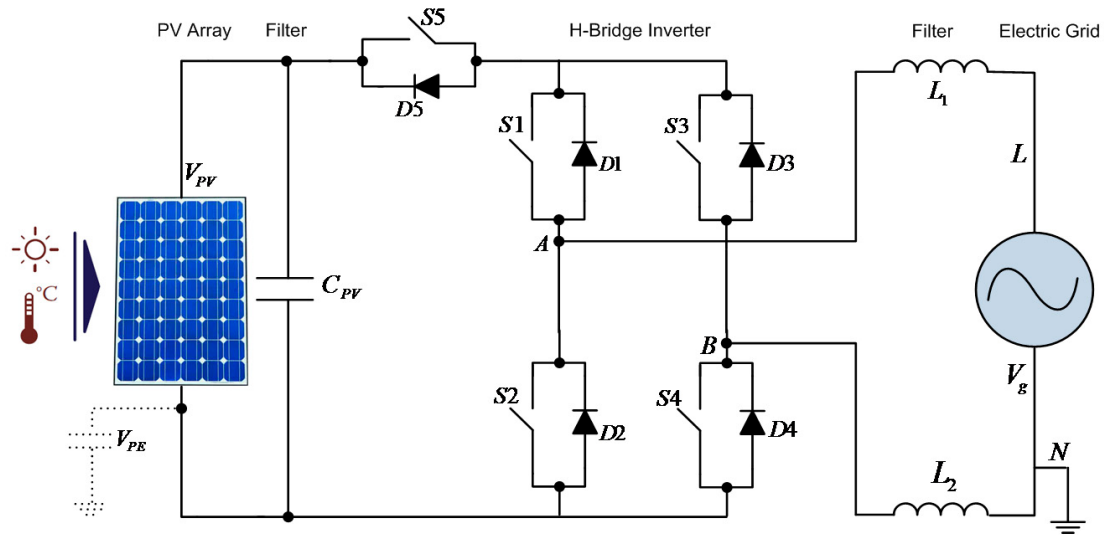


Figure 2.5: Topologie onduleur H5 (SMA)

### 2.4.1.2 Onduleur HERIC (Sunways)

En 2006, la société Sunways a breveté une nouvelle topologie également dérivée du pont H classique appelé HERIC, ce concept d'onduleur est très efficace et très fiable. Cette topologie consiste en l'ajout d'une branche de déviation dans le côté AC à l'aide de deux IGBT dos à dos, comme le montre la **figure 2.6** [9].

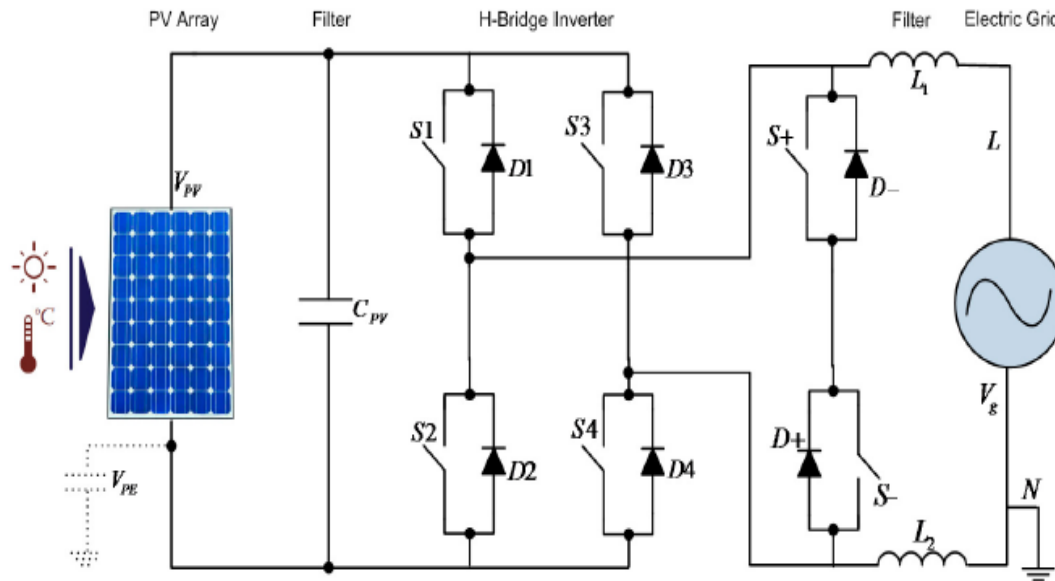


Figure 2.6: Topologie d'onduleur HERIC (Sunways)

### 2.4.1.2 Onduleur REFU

En 2007, la société REFU Solar a breveté une nouvelle topologie également dérivée du pont H classique. La topologie utilise en fait un demi-pont à l'intérieur de la voie de contournement latérale AC et un DC-DC contournable convertisseur comme le montre la **figure 2.7** [10].

Le contournement d'AC fournit les deux mêmes fonctions vitales que dans le cas de HERIC :

- Empêche l'échange de puissance réactif entre L et CPV pendant l'état de tension zéro, augmentant ainsi l'efficacité jusqu'à 98%.
- Isole le module PV du réseau pendant l'état de tension nulle, éliminant ainsi les composante haute fréquence de  $V_{PE}$ .

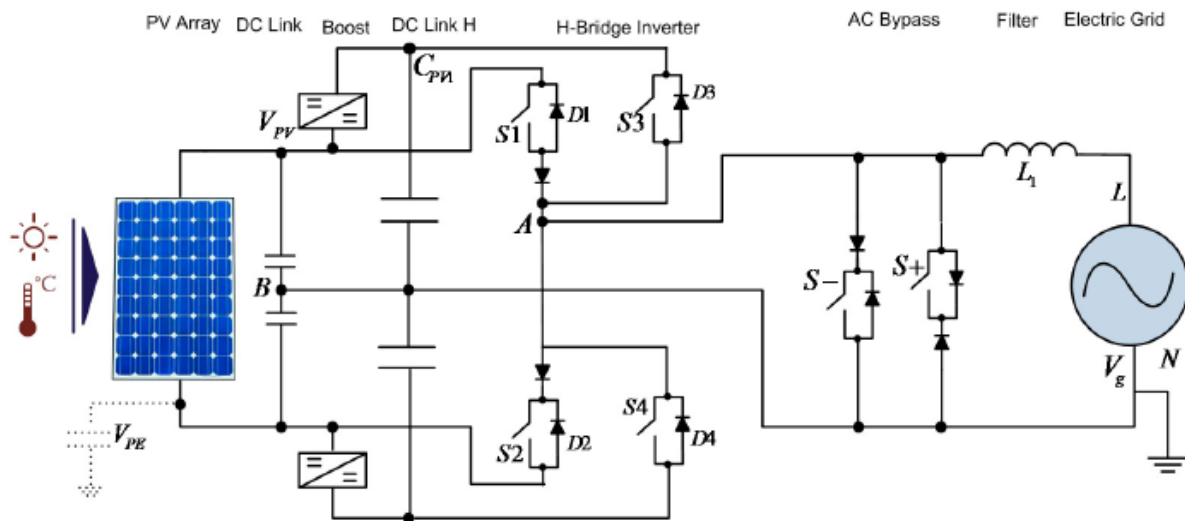


Figure 2.7: Topologie onduleur REFU

### 2.4.2 Onduleurs dérivées de la topologie NPC (Neutral Point Clamping)

La topologie du NPC a été introduite par Nabae, Magi et Takahashi en 1981 [14] montrant de grandes améliorations en termes de réduction de  $dV/dt$  et de stress de commutateur par rapport à Classique onduleur à deux niveaux. La topologie NPC est également très polyvalente et peut être utilisée dans les deux onduleurs en phase unique (pont complet ou demi-pont) et en trois phases.

#### 2.4.2.1 Onduleur Demi-pont à structure NPC

Le concept principal est que la tension zéro peut être atteinte en « serrant »; la sortie « point intermédiaire » de l'autobus DC à l'aide de D+ ou de D- selon le signe du courant (**figure 2.8**).

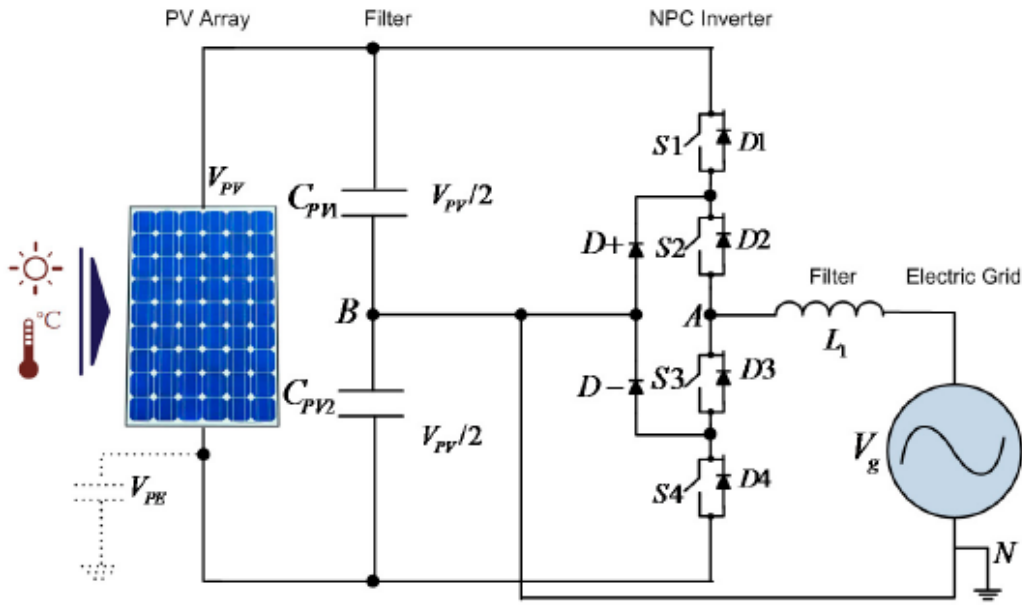


Figure 2.8 : Demi-pont serré neutre

### 2.4.2.2 Onduleur NPC de Conergy

Une « variante » du NPC classique est un demi-pont avec la sortie serrée au neutre à l'aide un commutateur bidirectionnel réalisé avec deux séries dos à dos IGBTs tel que breveté par Iz société Conergy [11] (voir la **figure 2.9**). Une réalisation alternative du même concept est présentée en référence [12], où les commutateurs de serrage unidirectionnels sont connectés en parallèle plutôt qu'en série et un pont complet est utilisé au lieu d'un demi-pont.

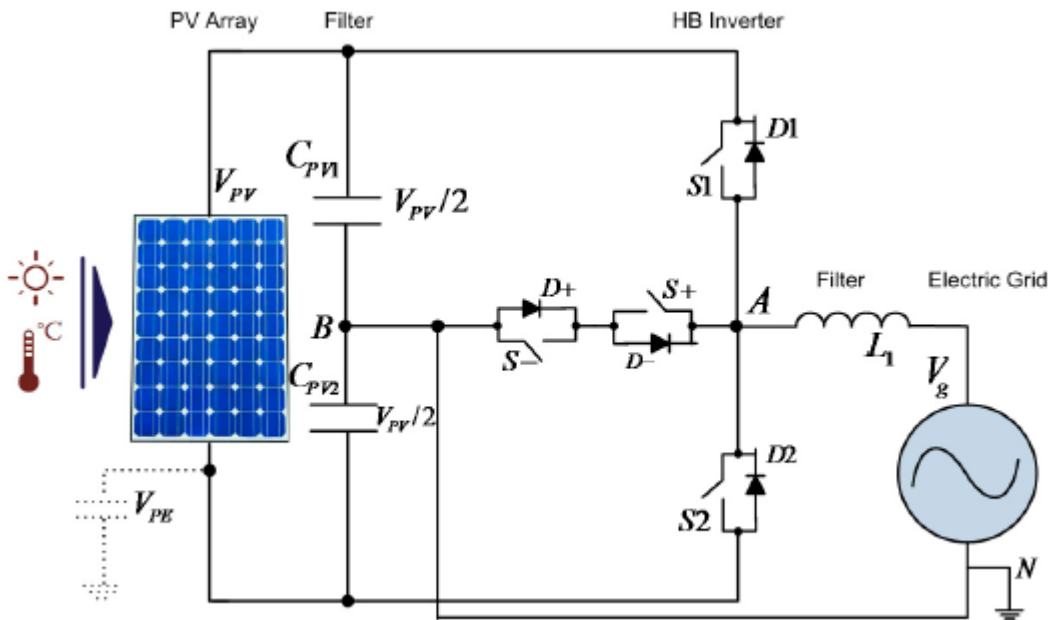


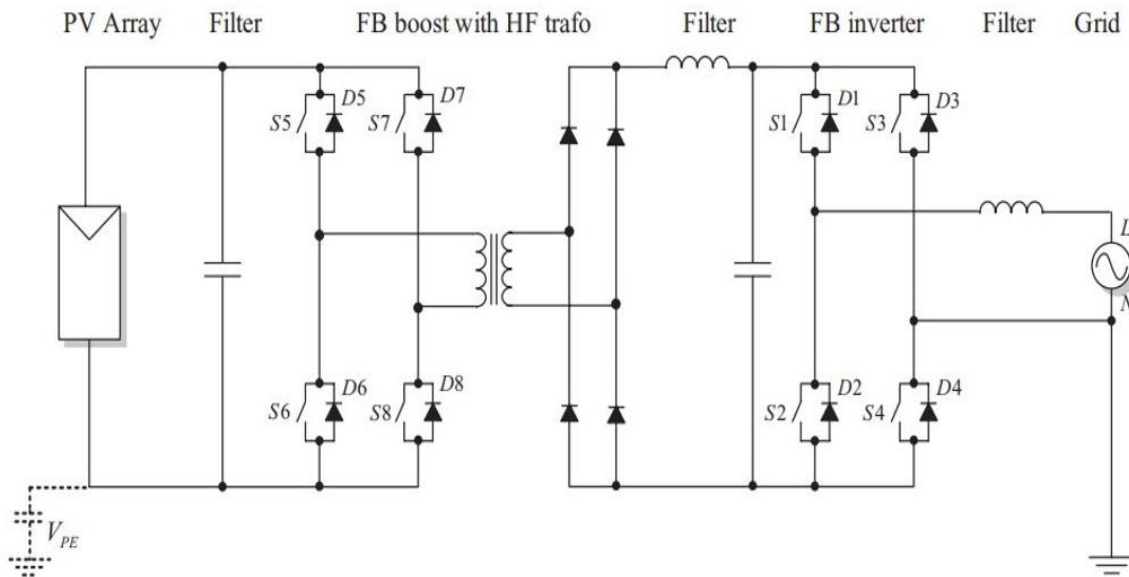
Figure 2.9: Point neutre de Conergy serré onduleur

## 2.5 Onduleurs string en deux étages avec transformateur

### 2.5.1 H-Bridge basé sur un convertisseur survolteur avec transformateur haute fréquence

Une structure typique d'un onduleur PV basé sur le pont H est indiquée dans la **figure 2.10**. Le facteur d'appoint du convertisseur FB DC-DC est contrôlé en déplaçant la phase de commutation entre les deux branches [2].

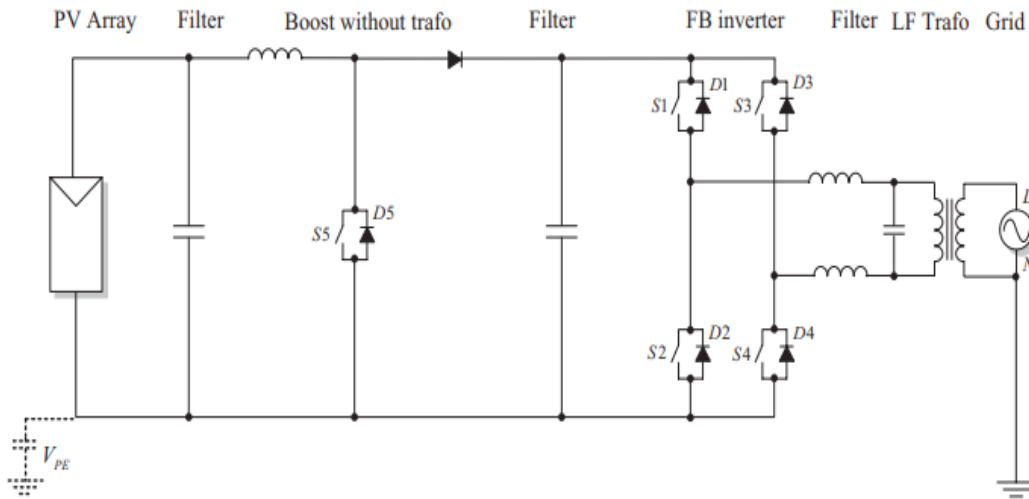
L'onduleur FB peut être facilement remplacé par des versions à plus haut rendement (H5 ou HERIC).



**Figure 2.10** Onduleur avec transformateur HF basé sur H-Bridge

### 2.5.2 H-Bridge Basé sur un convertisseur boost avec transformateur basse fréquence

Une structure typique utilisant un convertisseur de puissance classique DC-DC de type élévateur est indiquée dans la **figure 2.11**. Le transformateur est placé sur le côté basse fréquence. [2]



**Figure 2.11:** Onduleur avec transformateur BF basé sur un convertisseur boost

## 2.6 Onduleurs photovoltaïques en trois phases

La plupart des onduleurs photovoltaïques en trois phases ne sont généralement pas de véritables onduleurs à trois phases à trois fils mais plutôt trois phases à quatre fils. En fait, ils fonctionnent comme trois onduleurs indépendants à une seule phase.

Cette solution présente deux avantages :

- Il permet d'utiliser les onduleurs existants en phase unique.
- Il permet d'utiliser les spécifications de la norme allemande VDE- 0126-1-1 (2006), qui stipule que la surveillance de l'impédance peut être remplacée par une ligne à l'autre surveillance de la tension si le contrôle de chaque courant de phase est effectué indépendamment. [2]

Des entreprises, comme la société SMA, font la promotion du concept selon lequel des systèmes en trois phases peuvent être en utilisant un bloc de construction en une seule phase, les onduleurs sont dits mini-central comme, par exemple, Sunny Mini Central 8000TL.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité les topologies d'onduleur utilisés dans les systèmes photovoltaïque monophasé connectés au réseau, ou nous avons décrit deux principales familles ; les H-bridges et les structure NPC.

La topologie H-bridge est la plus connue dans le domaine photovoltaïque et la plus performante, de ce fait nous avons discuté en détail cette structure qui est une référence importante dans le développement de la technologie de convertisseur électronique de puissance.



## CHAPITRE 3

# MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU RÉSEAU

### 3.1 Introduction

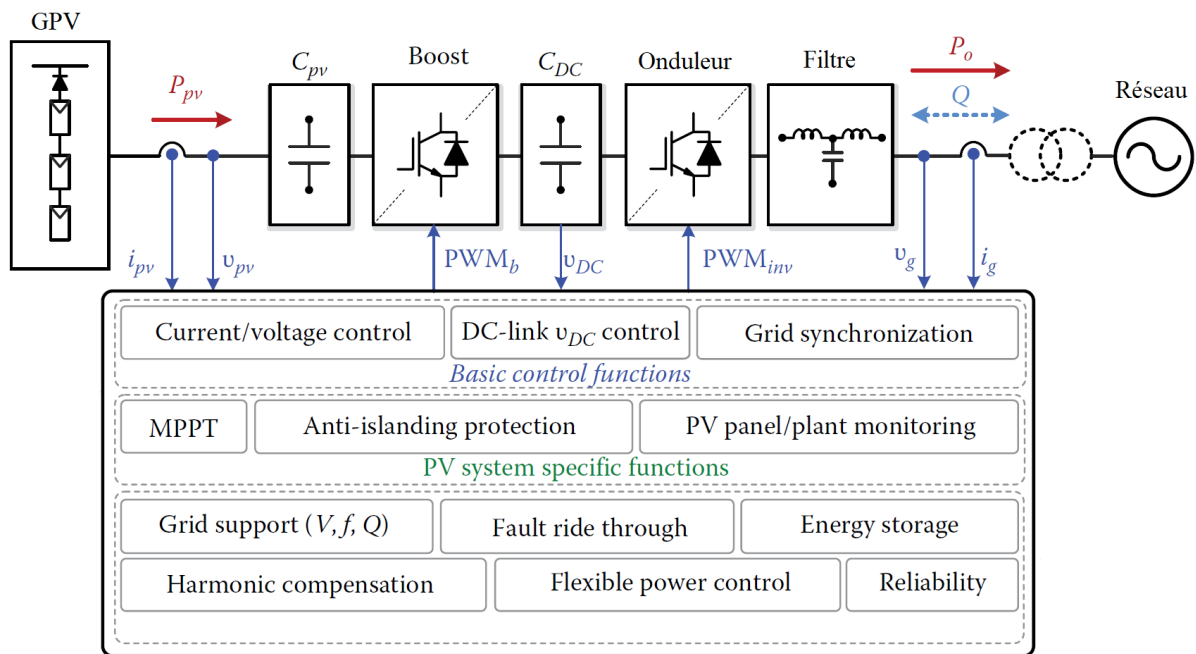
Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, il existe une variété importante de systèmes photovoltaïques monophasés. Dans ce chapitre, nous allons présenter le type de topologie que nous avons choisi pour accomplir notre travail. Cependant, nous avons ainsi choisi une structure à deux étages avec filtre LCL.

Ce chapitre présente un modèle de simulation de l'ensemble des éléments du système raccordée au réseau. Le modèle contient une représentation détaillée des composants principaux du système, le générateur photovoltaïque, le convertisseur (DC-DC) (boost), l'onduleur de tension (DC-AC), un filtre (LCL), et le réseau électrique monophasé.

La commande des convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC) est développée dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. L'onduleur transfère l'énergie produite des modules (PV) dans le réseau en gardant la tension alternative constante avec un taux d'harmonique minimal.

### 3.2 Système photovoltaïque Proposé

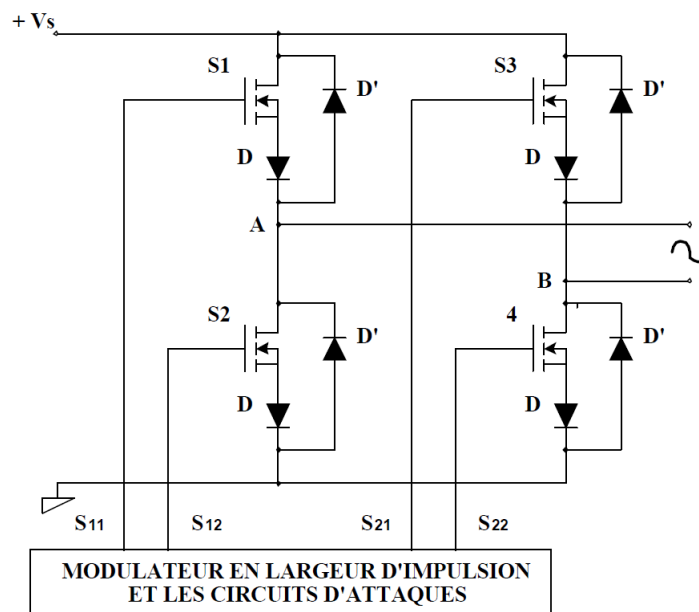
Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est représenté dans la Figure 3.1. Cette figure représente de façon générale les éléments constituant un système PV à deux étages raccordés au réseau monophasé, ainsi que les différents types possibles d'algorithme de contrôle qui peuvent être incorporé dans la commande globale de ce système [1].



**Figure 3.1 :** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique monophasé.

Les éléments clés du modèle global du système photovoltaïque représenté par la Figure 3.1 sont :

- **Un générateur photovoltaïque (GPV) :** Formé de 16 modules photovoltaïque de type Trina Solar TSM-315PA14A.08. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance tension). Ce générateur PV peut produire une puissance crête de 5100 Watt avec une tension au point MPP de 300V.
- **Convertisseur continu/continu (Boost) :** Ce convertisseur est connu par le nom d'élevateur de tension, qui fait office d'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie. Cette structure permet de tirer le maximum de puissance du GPV à travers des algorithmes bien adaptés, qui lui permettent de rechercher le point de puissance maximum (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.
- **Convertisseurs Continu-Alternatif (Onduleur) :** concernant l'onduleur utilisé, c'est un onduleur monophasé en pont complet tel qu'il est montré dans la figure 3.2. Il se compose de deux bras, chacun des bras contient deux transistors IGBT et des diodes « D » pour bloquer les diodes interne des IGBT ainsi que les diodes « D' » remplaçant ainsi celles qui sont propre au IGBT. Pour le bon fonctionnement de ce montage, il faut assurer deux fonctions essentielles :
  - Eviter que les paires des transistors dans le même bras qui fonctionnent en opposition, conduisent en même temps, ce qui provoquerait un court-circuit de l'alimentation ( $V_s$ ) et leurs propres destructions.
  - Séparer galvaniquement le circuit de commande de celui de puissance.



**Figure 3.2 :** Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont complet.

- **Un filtre LCL :** Un filtre harmonique passe-bas est placé directement à la sortie du convertisseur, entre le pont et les charges / le réseau. Son utilité est de filtrer la fréquence de commutation (et les fréquences avoisinantes), ainsi que de protéger le convertisseur contre des transitoires.

La meilleure alternative correspond au filtre LCL. C'est ce choix qui a été retenu ici. Il s'agit donc d'un filtre passe-bas du troisième ordre, qui offre une bonne atténuation même avec de faibles valeurs de L1,2 et C, ainsi qu'une faible ondulation du courant de sortie [2].

- **Le réseau électrique :** Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude  $V = 220V$  et de fréquence  $f = 50Hz$ .

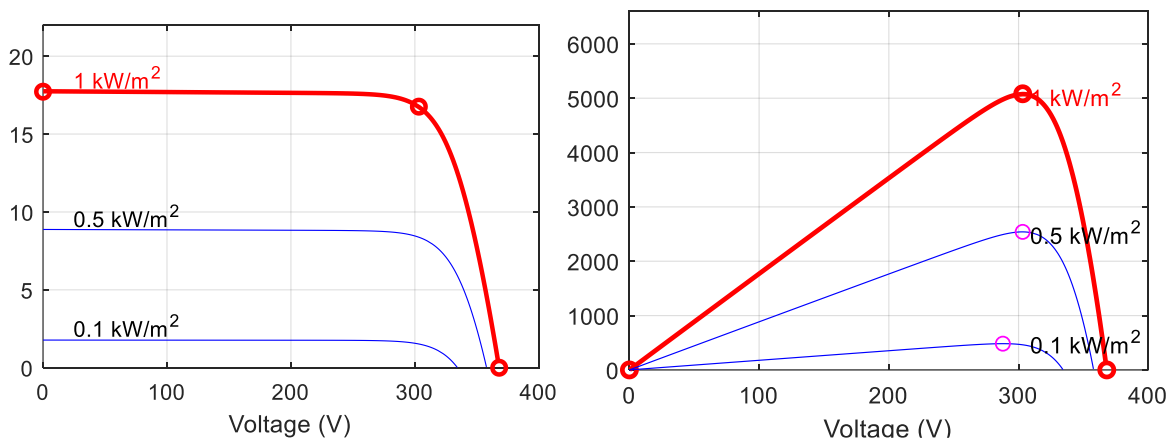
### 3.3 Dimensionnement des composants du système

#### 3.3.1 Générateur photovoltaïque

Pour garantir un fonctionnement réel du système, nous avons choisi d'injecter une puissance moyenne de 5000 watts, pour cela nous avons choisi une chaîne de 16 modules répartie en 2 séries parallèles.

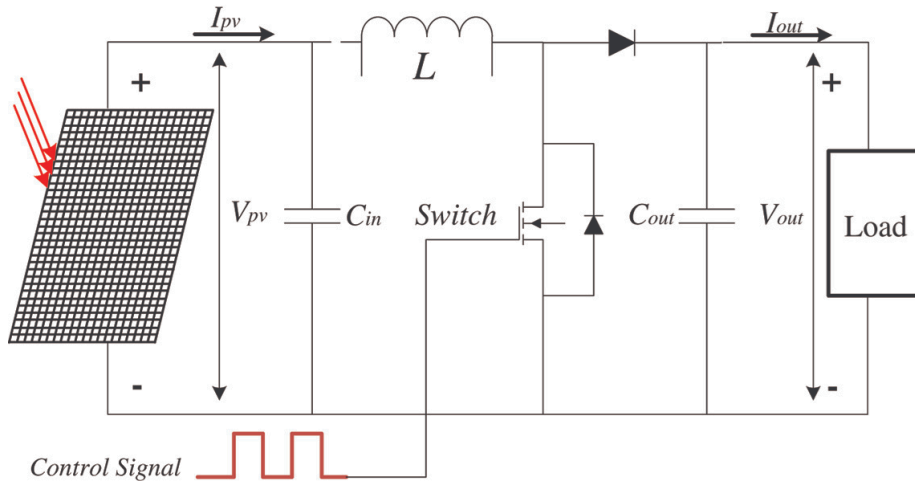
Le module photovoltaïque Trina Solar TSM-315PA14A.08 est choisi pour la modélisation puis la simulation. Il contient (72) cellules solaires de silicium multi cristallines et fournit une puissance maximum nominale de 315W, une tension en circuit ouvert de 46V et un courant en court-circuit de 8.86A [3].

Le système est constitué de 16 panneaux solaires connectés en série, ce qui génère une puissance de 5.08kW, et une tension de circuit ouvert de 303V avec un courant de court-circuit de 16.65 A. les courbes I(V) et P(V) du GPV pour 3 valeurs d'éclairement sont données dans figure 3.3, comme suit :



**Figure 3.3 :** Caractéristiques {I(V) à gauche et P(V) à droite} du GPV choisi à différentes valeurs d'éclairement

### 3.3.2 Convertisseur de puissance Boost



**Figure 3.4 :** Structure de convertisseur Boost

#### A. Sélection de l'inductance L

L'inducteur détermine la stabilité de la boucle du capteur de courant et l'ondulation du courant de l'inducteur. Le courant d'ondulation de l'inductance crête à crête est inversement proportionnel à la valeur de l'inducteur. Pour calculer l'inductance, l'ondulation du courant  $\Delta I_L$  est supposé égale à 5% du courant d'entrée nominal du convertisseur élévateur DC-DC.

Avec un courant  $I_{pv} = 16.65A$  on a  $\Delta I_L = 0.838$ .

L'inductance,  $L_{DC}$  est calculé en utilisant la formule (1) :

$$L_{DC} = \frac{V_{PV} (V_{DC_{avg}} - V_{PV})}{\Delta I f_{DC} V_{DC_{avg}}} \quad (1)$$

Avec :

$V_{DC_{avg}} = 400 \text{ V}$  est la tension moyenne du bus continue qui alimente l'onduleur monophasé.

$f_{DC} = 10 \text{ KHz}$  est la fréquence de commutation du convertisseur Boost

$V_{PV} = 280 \text{ V}$  est la tension d'entrée vers le convertisseur Boost, c'est-à-dire tension de sortie du générateur photovoltaïque.

$\Delta I_L = 0.838$  est l'ondulation de courant. Ici, le système PV fonctionne à la puissance nominale.

De plus, la puissance nominale du convertisseur élévateur DC-DC est de 5 KW.

Nous avons alors la valeur calculée de  $L_{DC} = 10 \text{ mH}$ .

### B. Sélection de la capacité d'entrée

Le découplage du générateur PV se fait à travers une commande adéquate, et le condensateur permet de minimiser les ondulations du courant qui est tiré du générateur PV. C'est pourquoi une plus petite valeur de condensateur a été utilisée.

L'équation utilisée pour calculer  $C_{PV}$  est donnée par :

$$C_{PV} = \frac{V_{PV} D}{4 \Delta V_{PV} f_{DC}^2 L_{DC}} \quad (2)$$

Avec :

$D = 1 - (280 / 400) = 0.3$  : Rapport cyclique du convertisseur Boost.

$V_{PV} = 280V$  : Tension moyenne aux bornes du générateur photovoltaïque,

$\Delta V_{PV} = 28V$  : On suppose que l'ondulation de la tension du générateur photovoltaïque est à 10%.

$L_{DC} = 10 \text{ mH}$

$f_{DC} = 10 \text{ kHz}$ .

La valeur de la capacité du condensateur  $C_{PV} = 0.75 \mu F$  est utilisé pour le découplage du GPV afin de limiter  $V_{PV}$  à  $\Delta V_{PV}$ .

### C. Sélection de la capacité de sortie

La tension du bus continu  $V_{DC}$  est constitué d'une composante continue moyenne,  $V_{DC\text{moy}}$ , ainsi que d'une ondulation de tension à 100 Hz.

L'expression pour l'ondulation de tension crête à crête de 100 Hz,  $\Delta V_{DC}$ , du bus continu est donnée en (3).

$$\Delta V_{DC} = \frac{P_g}{C_{DC} V_{DC\text{avg}} \omega} \quad (3)$$

Avec :

$P_g$  est la puissance active injectée dans le réseau,

$C_{DC}$  est le condensateur du bus continue,

$\omega$  est la pulsation du fondamentale de la tension du réseau

$V_{DC\text{moy}}$  est de 400 V, c'est la tension nécessaire pour pouvoir injecté un courant dans le réseau électrique.

Dans le système PV modélisé, le  $C_{DC}$  est calculé à **1990  $\mu\text{F}$**  pour limiter  $\Delta V_{DC}$  à environ 5% de  $V_{DC\text{moy}}$  lorsque l'onduleur injecte 5 kW de puissance active dans le réseau de distribution électrique.

### 3.3.3 Filtre LCL

Le filtre LCL comprend deux inductances et un condensateur, tous connectés en parallèle, c'est-à-dire par phase. Dans les filtres LCL ci-dessus,  $R_f$  et  $L_g$  sont la résistance et l'inductance côté réseau. Et  $R_i$  et  $L_i$  représente l'inducteur côté onduleur. Aussi, nous avons un condensateur parallèle  $C_f$  et sa résistance de et  $R_d$  est la résistance l'amortissement passif [4].

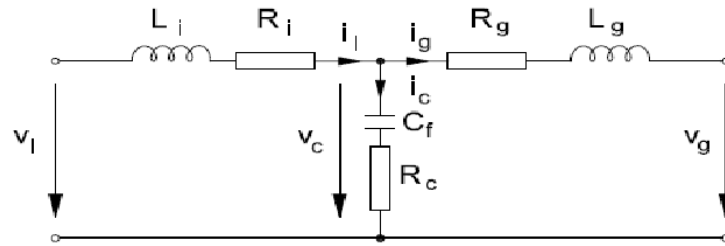


Figure 3.5 : Structure d'un filtre LCL

La première étape du calcul des composants du filtre est la conception de l'inductance côté onduleur  $L_i$ , qui peut limiter l'ondulation du courant de sortie jusqu'à 20% de l'amplitude nominale :

$$L_i = \frac{V_{DC}}{8\Delta I_{max} f_s} \quad (4)$$

Où  $\Delta I_{max}$  est l'ondulation du courant à 10%.

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{\sqrt{2}P_n}{V_r} \quad (5)$$

Avec :

$$V_{DC} = 400$$

$$V_{réseau} = 230 \text{ V}, 50 \text{ Hz}$$

$$S = P = 5 \text{ KVA}$$

$$f_s = 10 \text{ kHz}$$

$$I_{ond} = 20 \% \text{ de } I_{max} \text{ avec } I_{max} = 70\text{A} \text{ alors } \Delta I_{max} = 14\text{A}$$

Pour les valeurs choisies, nous avons :

$$L_i = \frac{400}{4 * 10000 * 14} = 0.71\text{mH}$$

L'inductance du côté réseau  $L_g$ , est déterminée par la valeur acceptable d'ondulation de commutation dans le réseau :

L'inductance totale ( $L_i + L_g$ ) est sélectionnée en fonction de la chute de tension maximale à travers l'inductance, la chute maximale est limitée à 10% de la tension nominale :

$$V_{L_i+L_g} = I * X_{L_i+L_g} = I * 2\pi f * (L_i + L_g)$$

$$I * 2\pi f * (L_i + L_g) = 10\% \text{ de } V$$

D'où :

$$L_i + L_g = \frac{0.1 V}{(S/V) 2\pi f}$$

$$L_i + L_g = \frac{0.1 * 230^2}{5000 * 2 \pi 50} = 3.36mH$$

$$L_2 = 3.36mH - 0.71mH = 2.65mH$$

La conception de la capacité de filtrage découle du fait que la variation maximale du facteur de puissance acceptable par le réseau est de 5 %. La capacité du filtre peut donc être calculée comme une multiplication de la capacité de base du système  $C_b$ .

$$C_f = 0.05 \times C_b$$

La capacité de base  $C_b$  se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C_b = \frac{P_n}{\omega_n V_r^2} = \frac{5000}{2 \pi f 230^2}$$

$$C_f = 30.1\mu F$$

La dernière étape de la conception est le contrôle de la fréquence de résonance du filtre. La fréquence de résonance doit être éloignée de la fréquence du réseau et doit être au minimum égal à la moitié de la fréquence de commutation, car le filtre doit avoir une atténuation suffisante de la fréquence de découpage du convertisseur. La fréquence de résonance du filtre LCL peut être calculée comme suit :

$$f_{res} = \sqrt{\frac{(L_i + L_g)}{L_i L_g C_f}}$$

La plage de fréquences de résonance du filtre LCL doit satisfaire la condition de l'équation suivante :

$$10f_r \leq f_{res} \leq f_s$$

Afin de réduire les oscillations et les états instables du filtre, il convient d'ajouter le condensateur avec une résistance connectée en série. Cette solution est parfois appelée « amortissement passif ». C'est simple et fiable, mais l'inconvénient c'est elle va augmenter

les pertes de chaleur dans le système et cela diminue considérablement l'efficacité du filtre. La valeur de la résistance d'amortissement peut être calculée comme suit :

$$R_d = 0.1 \frac{1}{3 \omega_{res} C_f}$$

Avec :

$$\text{La pulsation de résonance } \omega_{res} = 2 \pi f_{res} = 2 \pi 20000 = 125663 \text{ rad/s}$$

D'où :

$R_d = 0.1 \frac{1}{3 \cdot 2 \pi \cdot 20000 \cdot 30e-6} = 9m\Omega$  qui est une valeur non-significatif lors de la conception.

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré au dimensionnement et à la modélisation de tous les composants représentant le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, tels que, le GPV, le convertisseur survolteur, l'onduleur et le filtre (LCL).

Le dimensionnement est une étape essentielle lors de la conception d'un système de puissance, ceci permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que ces paramètres constitutants, ensuite nous utilisons les valeurs établies pour la simulation du système. Cette dernière phase de conception est présentée dans le chapitre suivant.



**CHAPITRE 4**

**SIMULATION ET  
RÉSULTATS**

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons essentiellement les simulations réalisées du système étudié, ainsi que les résultats obtenus. Mais dans un premier temps, nous allons présenter le système dans sa globalité, puis nous présentons en détail les éléments de commande qui permettent d’accomplir les différentes tâches de ce système. A savoir, l’optimisation de puissance du champ photovoltaïque, la régulation du bus continu, la régulation du courant injecté dans le réseau monophasé.

### 4.2 Structures du système

Ce chapitre présente les résultats de simulation d’un système PV connecté au réseau monophasé. Ce système est composé d’un générateur photovoltaïque (GPV) de 5kW, de deux étages de puissance avec un convertisseur Boost et onduleur à deux bras, et enfin un filtre LCL. Cette structure (voir Figure 4.1) est commandée par un algorithme MPPT numérique « perturbation et observation », ainsi qu’une commande de courant pour l’onduleur.

La commande est composée de plusieurs partie, la première permet de tirer le maximum de puissance du GPV, la deuxième est un régulateur de tension pour maintenir la tension du bus continu à un niveau acceptable pour l’injection du courant dans le réseau électrique. Et enfin ; une commande qui permet de réguler le courant à travers un contrôleur PR aidé par une PLL, ceci permet de synchroniser le courant avec la tension du réseau en maintenant la puissance active maximale et en éliminant les harmoniques du courant.

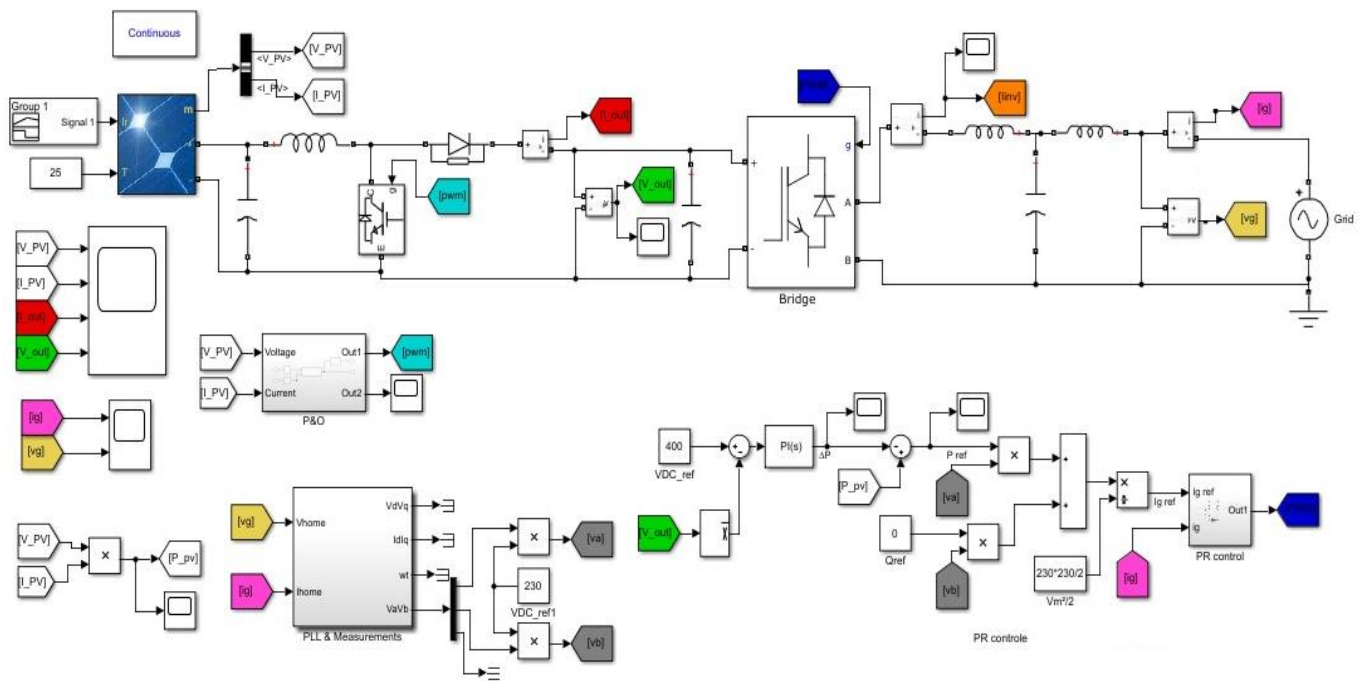


Figure 4.1 : Schéma de simulation globale du système PV raccordé au réseau.

Les paramètres du système sont donnés dans le tableau 4.1 tel que :

**Tableau 4.1 :** Valeurs des paramètres du champ photovoltaïque.

Les paramètres du système	La valeur de chaque paramètre
La tension GPV	303,2 V
Le courant GPV	16,76 A
Puissance nominale	5000 Watt
La tension d'hacheur	400 V
Réseau de distribution	230 V, 50Hz.
Hacheur Boost	L= 10mH, C1=800μF, C2 =2200μF
Filtre LCL	Li=0.71mH, C <sub>f</sub> =22μF, Lg=2.65 mH

## 4.2. Conception de la commande

La commande du système PV comprend un mécanisme de synchronisation au réseau, un contrôleur de courant, un régulateur de tension du bus continue, et un contrôleur du facteur de puissance. Les procédures de conception de ces sous-systèmes de contrôle sont décrites dans cette section.

### 4.2.1. La synchronisation au réseau

La boucle à verrouillage de phase du cadre de référence synchrone (sPLL) d'un système monophasé nécessite la génération d'un signal orthogonal imaginaire à partir de la tension mesurée du réseau  $v_g$ . Une structure basée sur un intégrateur généralisé du second ordre (SOGI) est utilisé pour créer un signal orthogonal imaginaire à partir du signal de la tension  $v_g$ .

La structure proposée crée non seulement un signal orthogonal imaginaire sans aucun retard, mais filtre également les harmoniques de la tension  $v_g$ . La fonction de transfert du filtre passe-bande standard du second ordre est donné par la formule (1) [19].

Dans la formule (1),  $\omega_0$  est la fréquence centrale du filtre passe-bande, Q est le facteur de qualité et H est le gain en courant continu souhaité pour un signal de la fréquence  $\omega_0$ . La largeur de bande BW du filtre passe-bande du second ordre est donnée par la formule (2).

$$G_{bp}(s) = \frac{H(\omega_0/Q)_s}{s^2 + H(\omega_0/Q)_s + \omega_0^2} \quad (1)$$

$$BW = \frac{\omega_0}{Q} \quad (2)$$

La structure de la sPLL monophasée est telle que représentée sur la figure 4.2. Où  $V_\alpha$  et  $V_\beta$  sont respectivement le signal filtré de la tension et le signal imaginaire,  $P(s)$  est un compensateur, et enfin  $\omega_e$  et  $\vartheta$  sont la fréquence angulaire estimée et la phase de  $v_g$ .



Figure 4.2: Structure d'un s-PLL monophasé

Dans ce travail,  $Q$  est choisi égal à 1,25, de sorte que le  $BW = 40$  Hz pour un signal de  $\omega_0 = 100\pi$  rad/s. Puisque ni atténuation ni gain ne sont souhaités pour le fondamentale de la tension  $v_g$  alors  $H = 1$ . Le temps de stabilisation du filtre passe-bande conçu est de 30 ms. Un régulateur PI est choisi comme compensateur  $P(s)$ . Les gains du compensateur PI sont réglés tel que :  $k_p = 115$  et  $k_i = 6600$ .

Le schéma block de la PLL monophasé sous MATLAB/Simulink est donnée par la figure 4.2 :

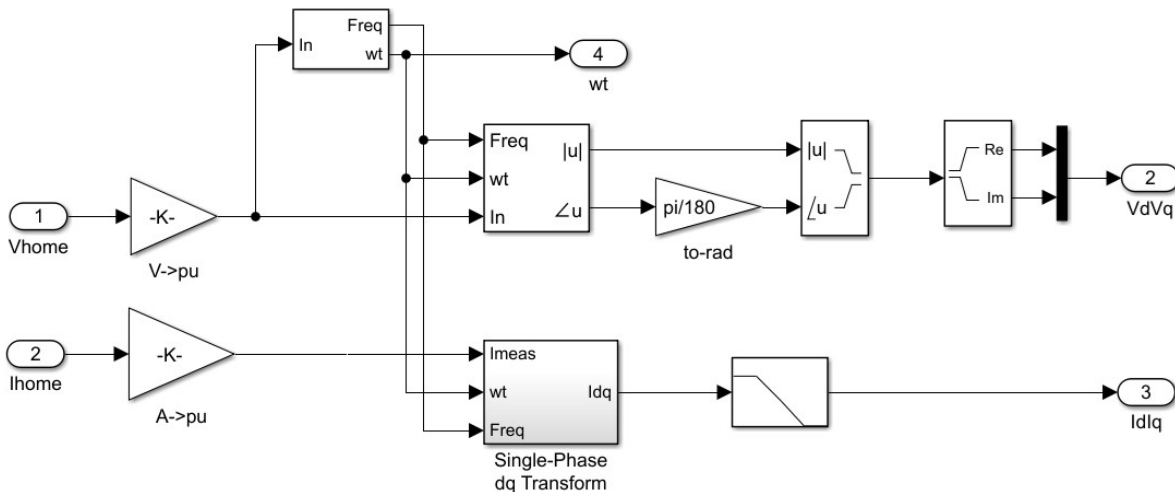


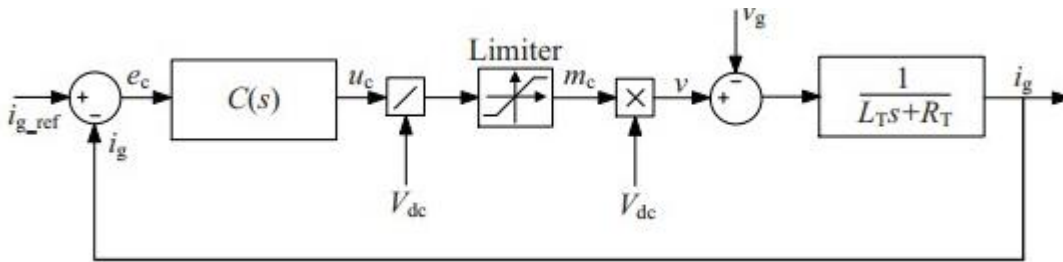
Figure 4.3 : Schéma bloc sous Simulink de la PLL monophasée

### 4.2.2 Le contrôleur de courant PR

Pour le contrôle du courant, on utilise un contrôleur à résonance proportionnelle (PR). La fonction de transfert du contrôleur PR non idéal avec compensateur de fréquence fondamentale et compensateurs d'harmoniques impaires d'ordre inférieur (HC), est donnée par la formule (3) [21]. Dans ce cas,  $k_{pc}$  est le gain proportionnel,  $k_{ich}$  est le gain intégral et  $\omega_c$  est la fréquence de coupure à 3 dB.

$$C(s) = K_{pc} + \sum_{h=1,3,5,7} \frac{2k_{ich}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_c)^2} \quad (3)$$

Le contrôleur de courant en boucle fermée est représenté sur la figure 4.4. Le signal d'erreur  $e_c$  traité par ce contrôleur représente la différence entre le courant du réseau mesuré  $i_g$  et le courant de référence  $i_{gref}$ , ce dernier est donné par l'équation (5).  $V_m$  et  $\vartheta$  sont obtenus à partir de la s-PLL monophasée,  $P_{ref}$  et  $Q_{ref}$  sont respectivement des références de puissance active et réactive.



**Figure 4.4 :** Le contrôleur de courant en boucle fermée [22].

Avec :

$$i_{gref} = \frac{\sqrt{P_{ref}^2 + Q_{ref}^2}}{V_m} \cos(\vartheta + \arctan(Q_{ref}/P_{ref})) \quad (5)$$

Dans le régulateur PR conçu,  $k_{pc} = 4$  est calculé pour obtenir une bande passante de 500 Hz pour le contrôleur de courant en boucle fermée,  $k_{icl} = 100$  pour avoir une erreur en régime permanent nulle.

Pour la compensation des harmonique impaire, les gains intégraux du HC sont  $k_{ich} = 80$  ( $h = 3; 5; 7$ ). La fréquence de coupure de 3 dB  $\omega_c$  est sélectionnée égale à 5 rad/s [21].

Le schéma block du contrôleur de courant PR sous MATLAB/Simulink est donné dans la figure 4.5 :

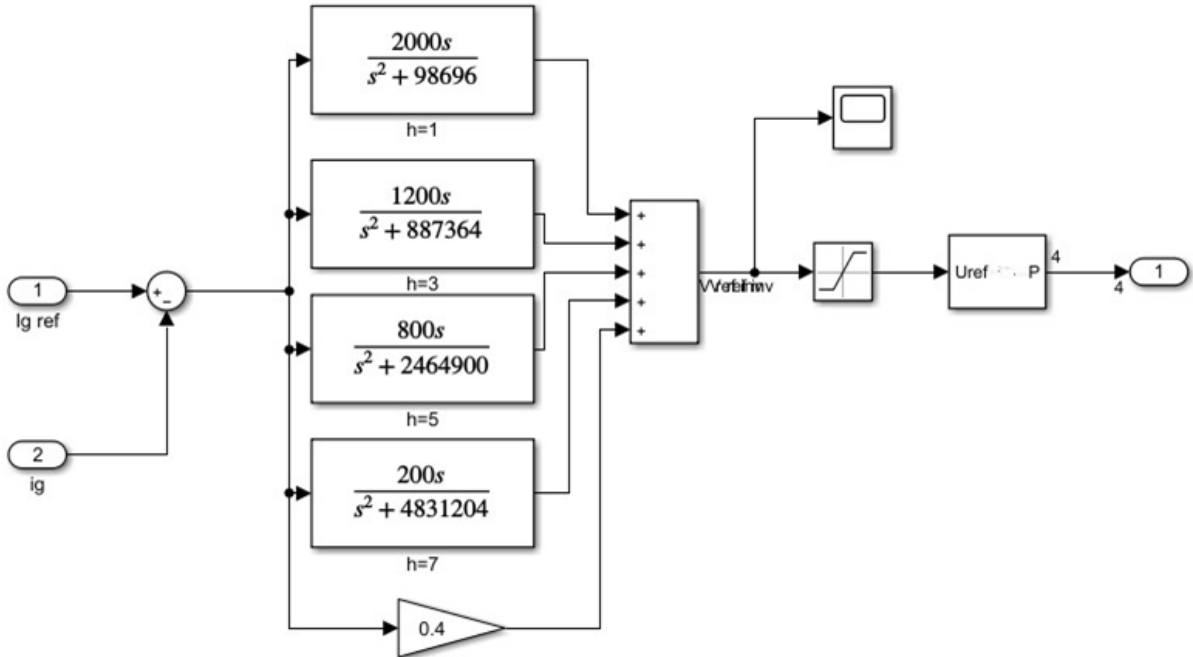


Figure 4.5 : Le contrôleur de courant PR sous MATLAB/Simulink

### 4.2.3 Le contrôleur de tension du bus continu

La tension du bus continu de l'onduleur est régulée à 400 V. La régulation de la tension du bus continu porte l'information relative à l'échange de puissance active entre le système photovoltaïque et le réseau électrique. Un contrôleur proportionnel intégral IP est utilisé dans la boucle de tension de régulation du bus continu afin de réduire les fluctuations de la tension du condensateur et la maintenir à sa valeur souhaitée comme indiqué sur la figure 4.6.

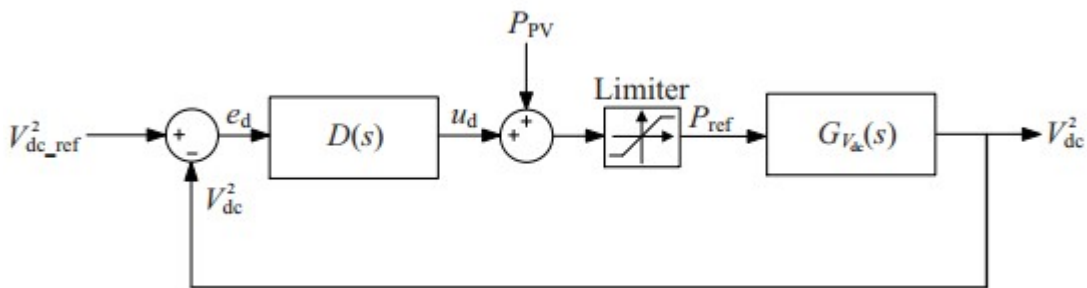


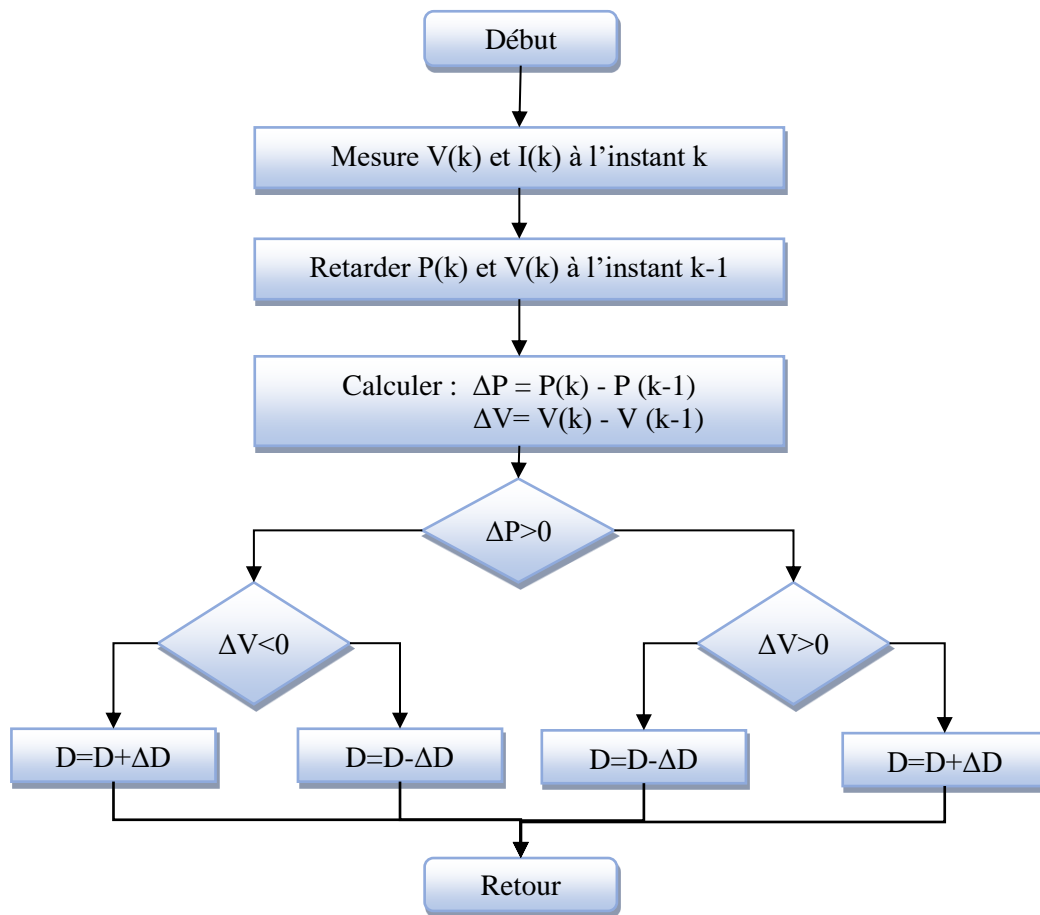
Figure 4.6. Contrôleur de tension du bus continu

Les gains du contrôleur PI sont donnés, qui est représenté par la fonction de transfert  $D(s)$ , sont  $k_{pd} = 40$  et  $k_{id} = 20$ .

#### 4.2.4. La commande MPPT

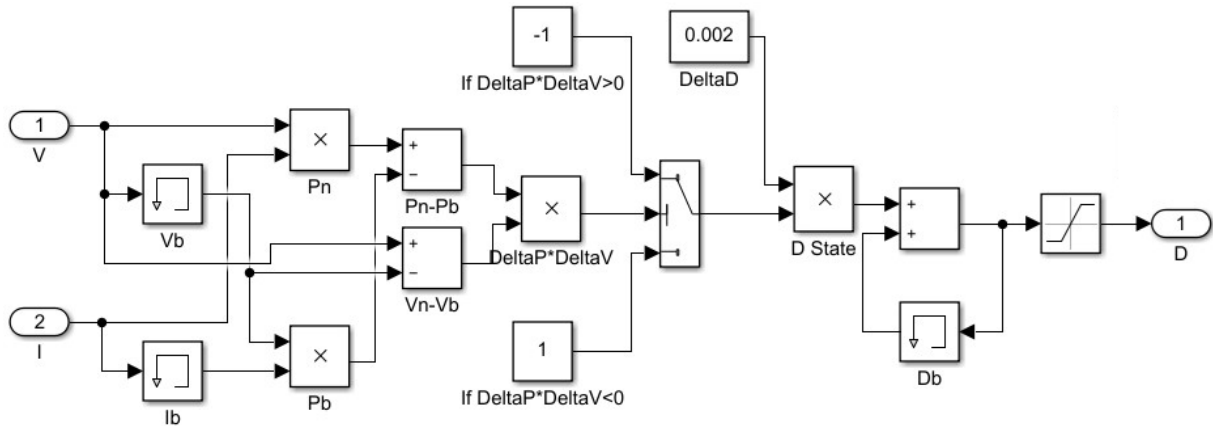
Il existe dans la littérature de nombreuses recherches sur les commandes MPPT. La commande MPPT choisie pour notre étude, est basée sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, L'utilisation d'une commande MPPT permet de rechercher le point de puissance maximale que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque, qui est nécessaire pour la mise en marche de notre système et son bon fonctionnement tout au long de son évolution.

La figure suivante présente l'organigramme de la commande MPPT :



**Figure 4. 7 :** Algorithme de poursuite du point maximum de puissance MPPT/P&O

Le modèle Simulink de l'algorithme MPPT P&O est représenté à la figure 4.8, le taux d'échantillonnage de la tension et du courant du GPV est de 0.1ms, et la plus petite variation de D (variation du rapport cyclique) est de 0.002 :



**Figure 4.8 :** Modèle de simulation pour l’algorithme Perturbation et Observation (P&O).

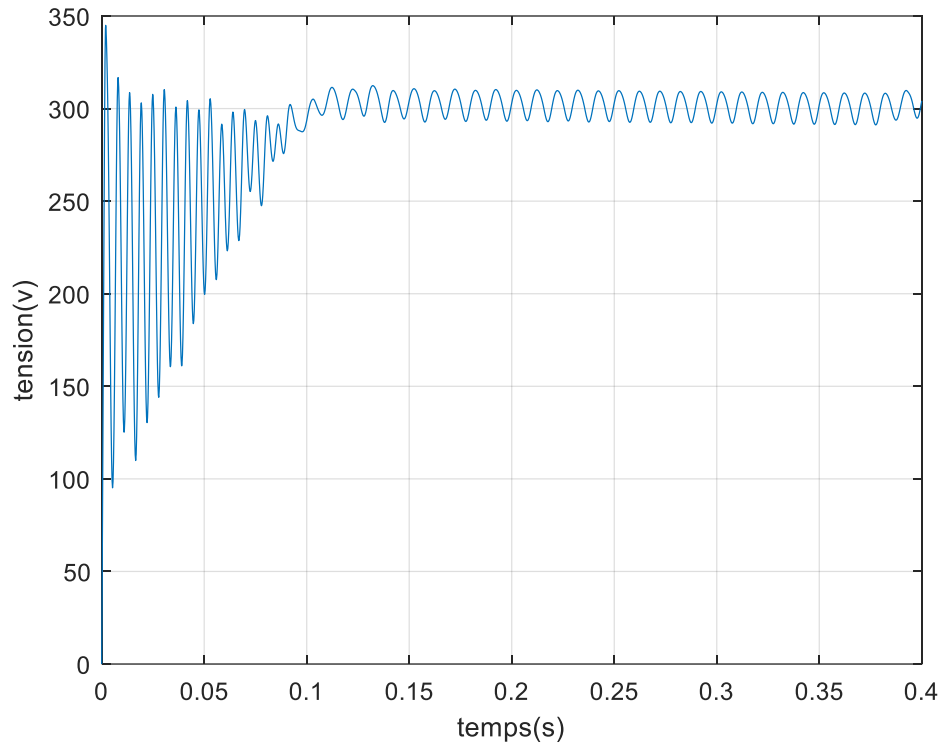
### 4.3. Résultats de simulation

#### 4.3.1. Simulation avec irradiance constante de $1000\text{w/m}^2$

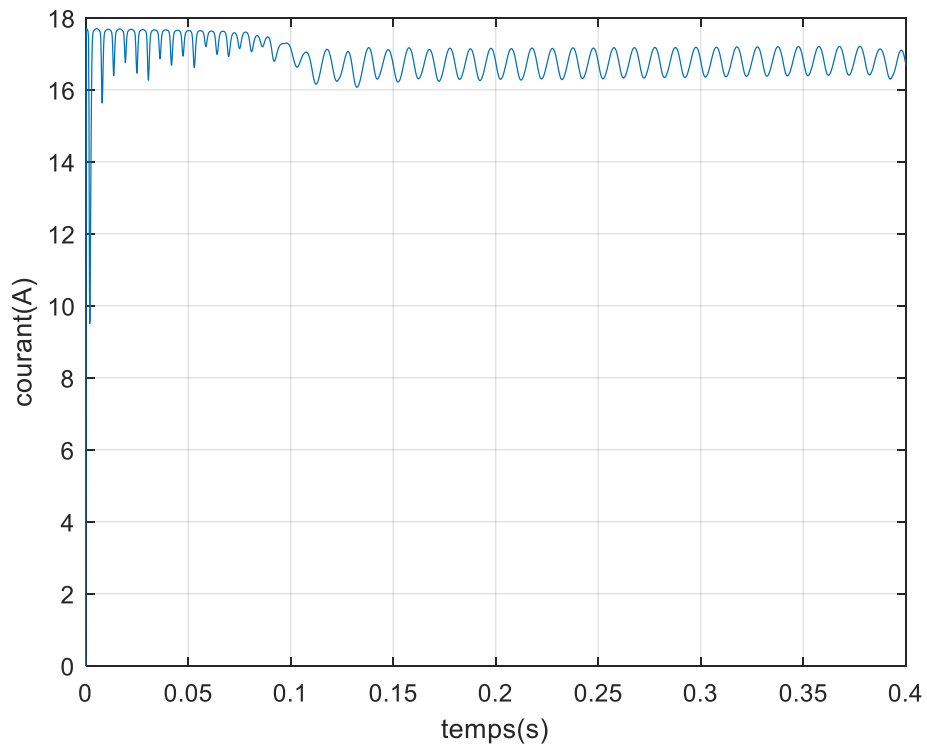
##### 4.3.1.1. Simulation de GPV et du hacheur Boost

Dans cette partie on va discuter les résultats de simulation pour une valeur fixe de la l’éclairement solaire ( $G=1000\text{w/m}^2$ ), les courbes ci-dessous nous montrent l’efficacité de notre système à produire une puissance proche où égale  $5000\text{w/m}^2$ .

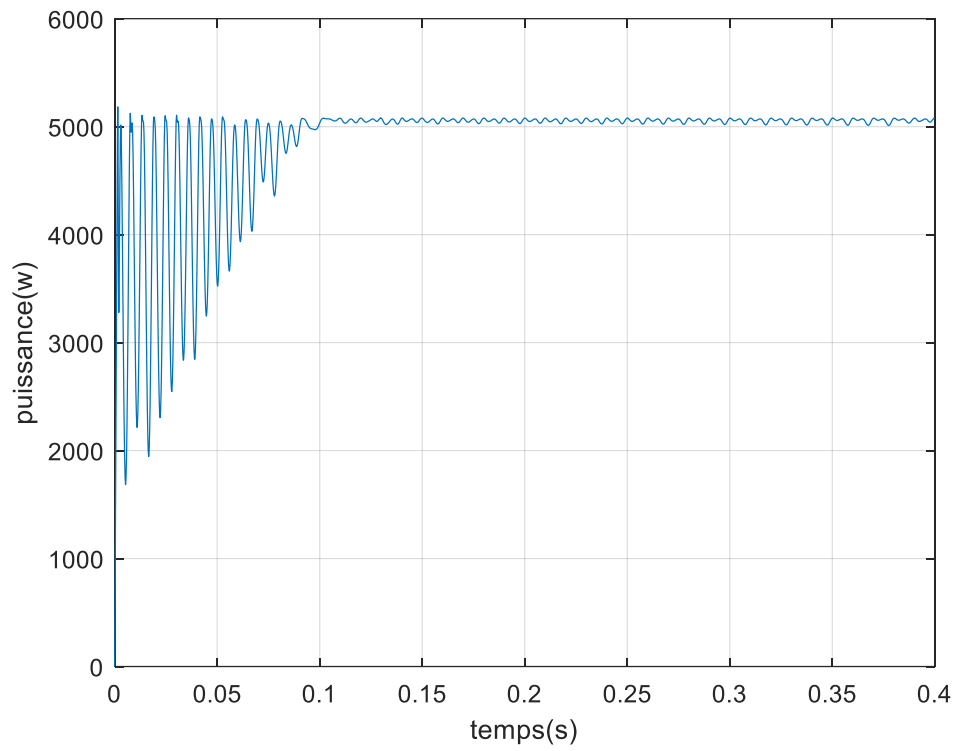
Les figures suivantes représentent la tension (Figure 4.9), le courant (Figure 4.10) et la puissance générée par le générateur photovoltaïque (Figure 4.11), ainsi que la tension de sortie du hacheur (Figure 4.12). Ces figures nous montrent l’efficacité de l’hacheur survolteur et la commande MPPT par la méthode P&O qui accomplissent correctement leurs rôles. Aussi Il est important de jouer sur le rapport cyclique **D** d’une part, et d’autre part, bien dimensionner l’inductance **L** pour avoir un courant lisse, ainsi que la capacité du condensateur **C** pour avoir une tension de sortie constante. Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie proche de  $400\text{V}$  supérieur à celle fournie par le générateur photovoltaïque qui est de  $300\text{V}$ . Aussi, la commande MPPT permet de forcer le générateur PV à produire une puissance maximale.



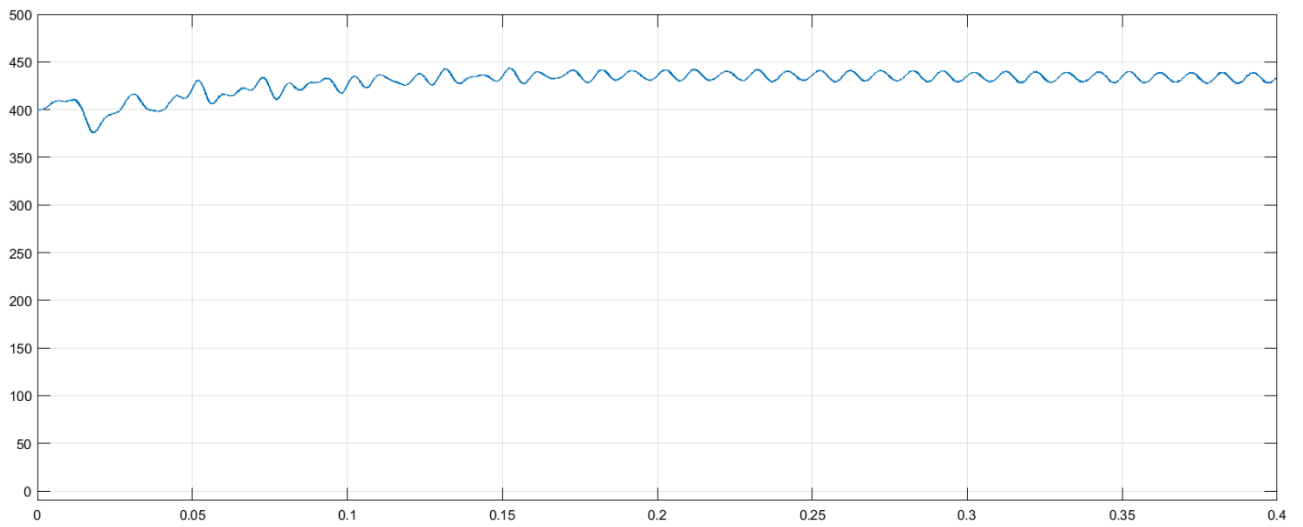
**Figure 4.9 :** La forme d'onde de la tension  $V_{pv}$



**Figure 4.10 :** La forme d'onde du courant  $I_{pv}$



**Figure 4. 11 :** La puissance maximisée produite par le GPV



**Figure 4.12 :** La tension du bus continue

### 4.3.1.2 Simulation de l'onduleur monophasé avec filtre LCL de sortie

Un convertisseur DC/AC est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif, Voici le schéma block d'onduleur monophasé avec le filtre LCL par MATLAB Simulink :

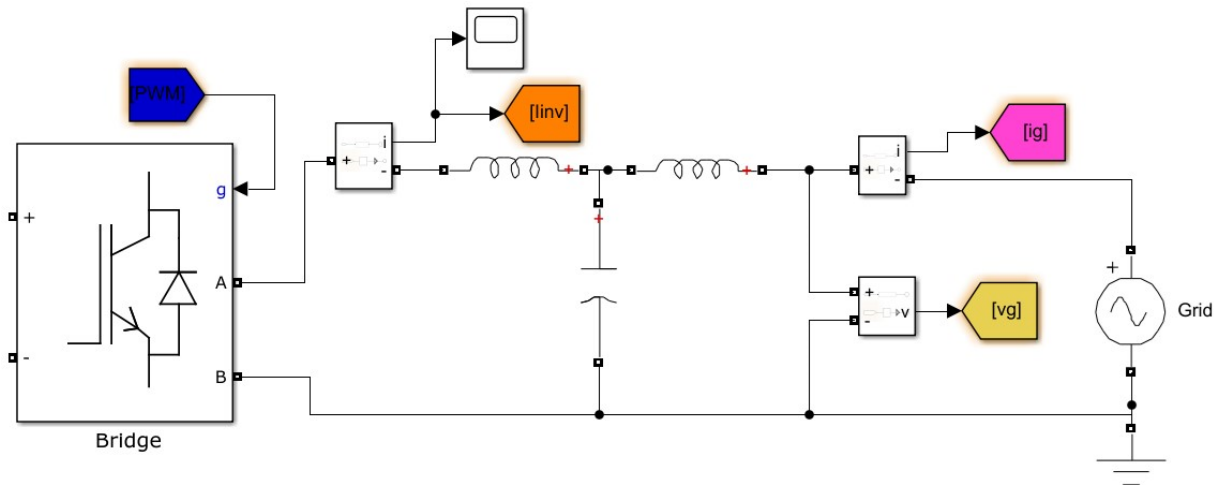


Figure 4.13 : Schéma de l'onduleur et du filtre LCL.

Dans ces résultats, nous nous sommes concentrés sur le courant et la tension de sortie d'onduleur avant et après filtrage avec, nous avons aussi analysé le THD du courant ainsi que le courant de référence  $i_{gref}$  calculé.

#### A. Avant filtrage

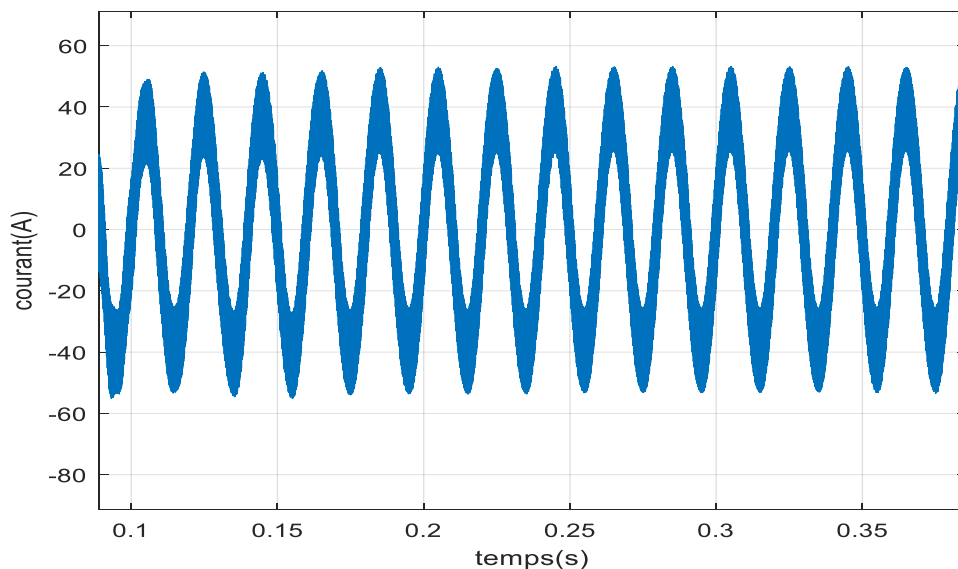


Figure 4.14 : Courant généré par l'onduleur avant filtrage

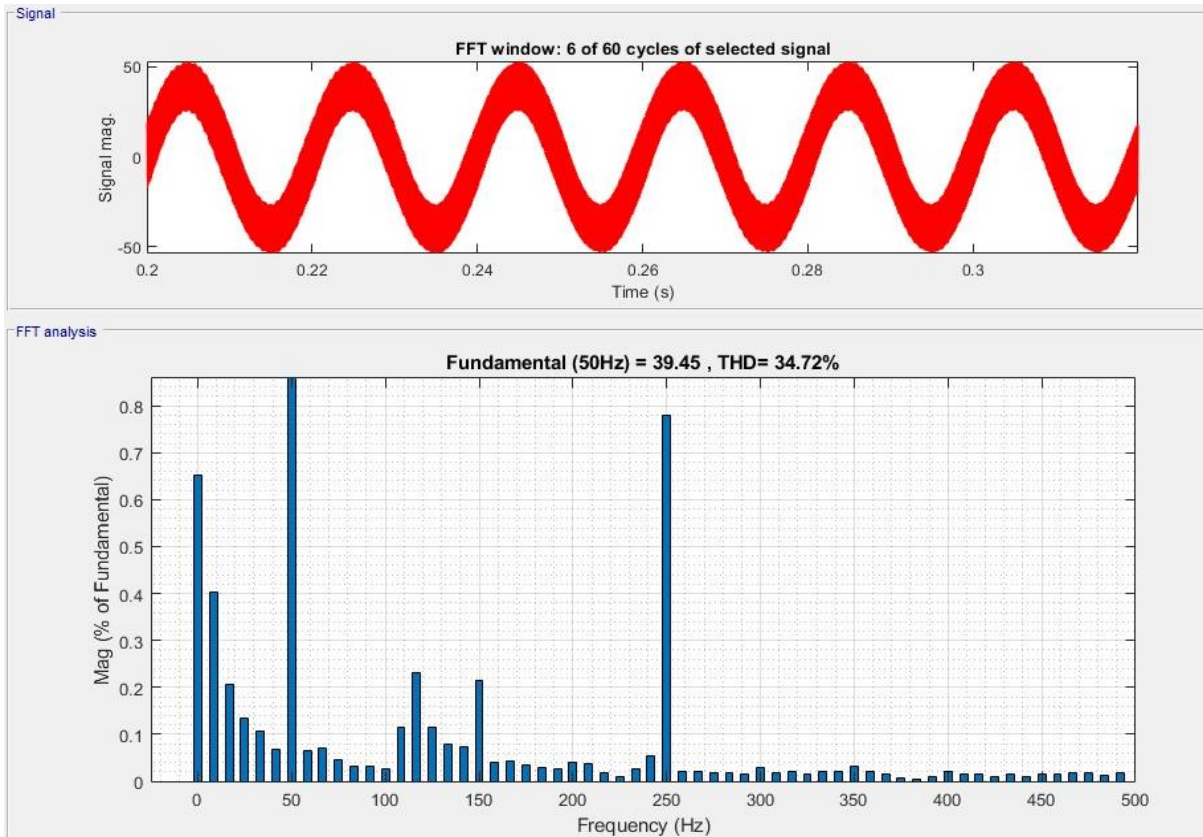


Figure 4.15 : THD du courant généré par l'onduleur avant filtrage

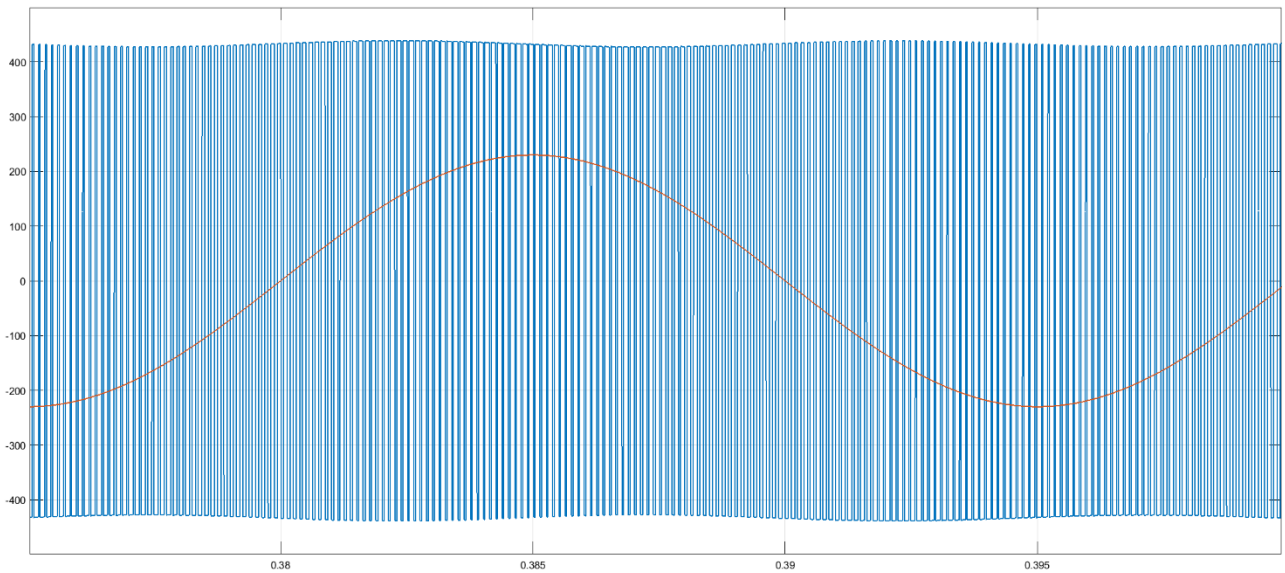
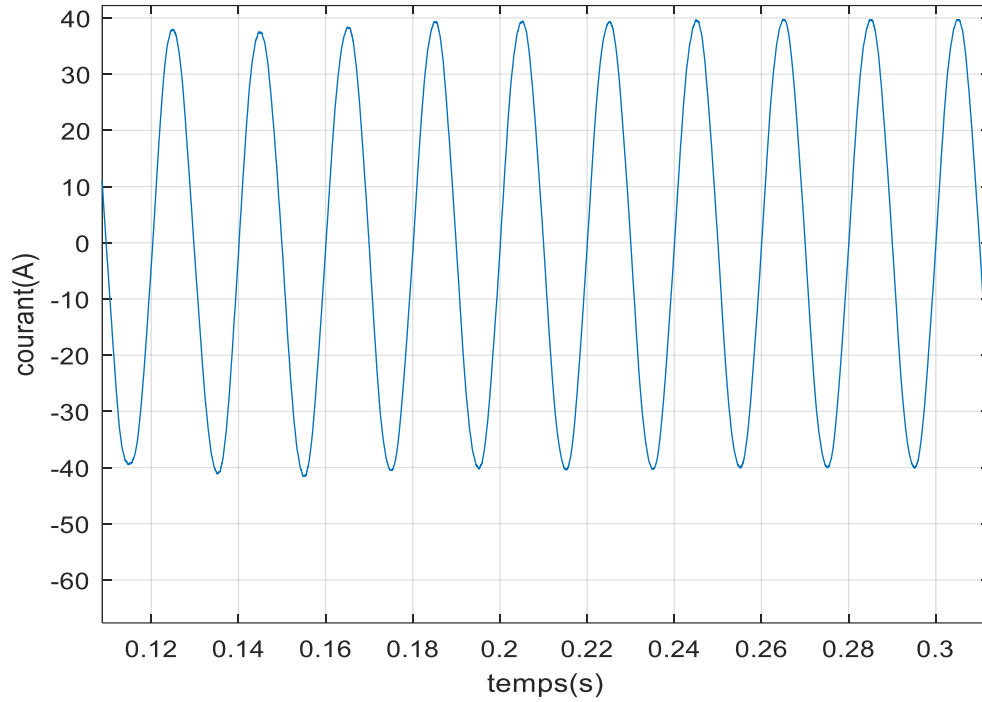
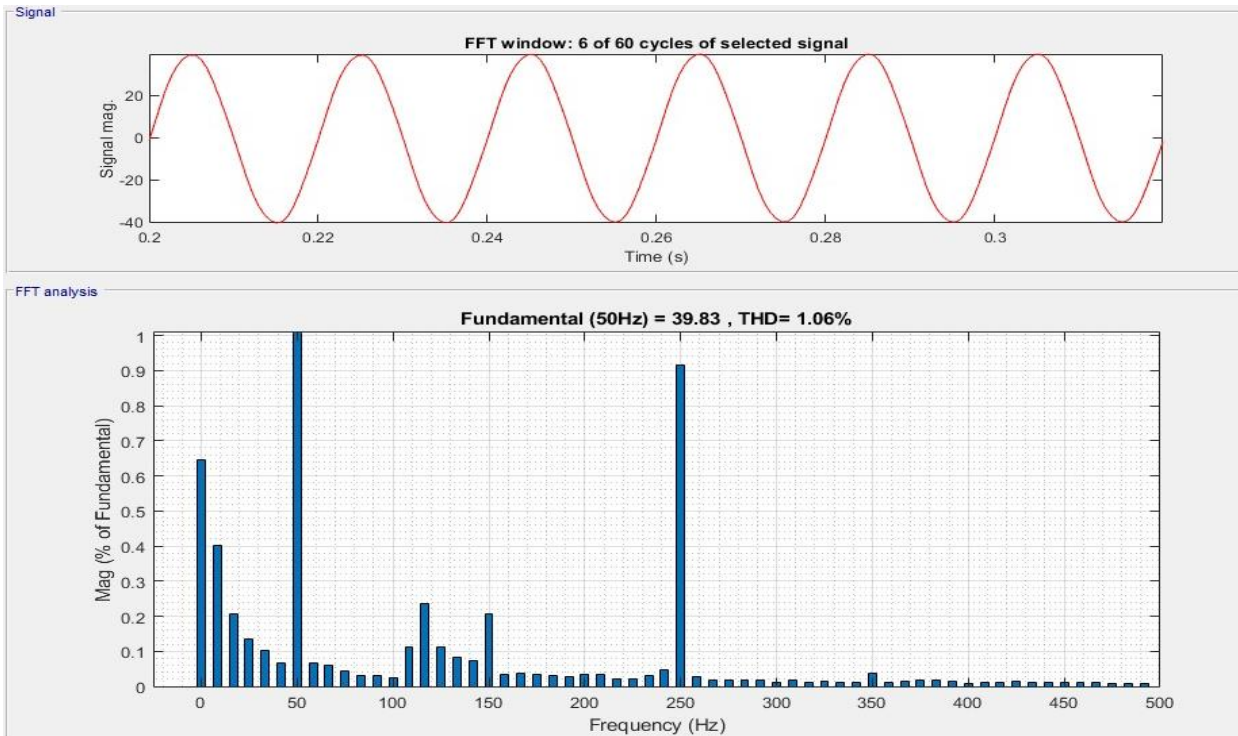


Figure 4.16 : La tension de sortie de l'onduleur avant filtrage (en bleu) et celle du réseau électrique (en rouge).

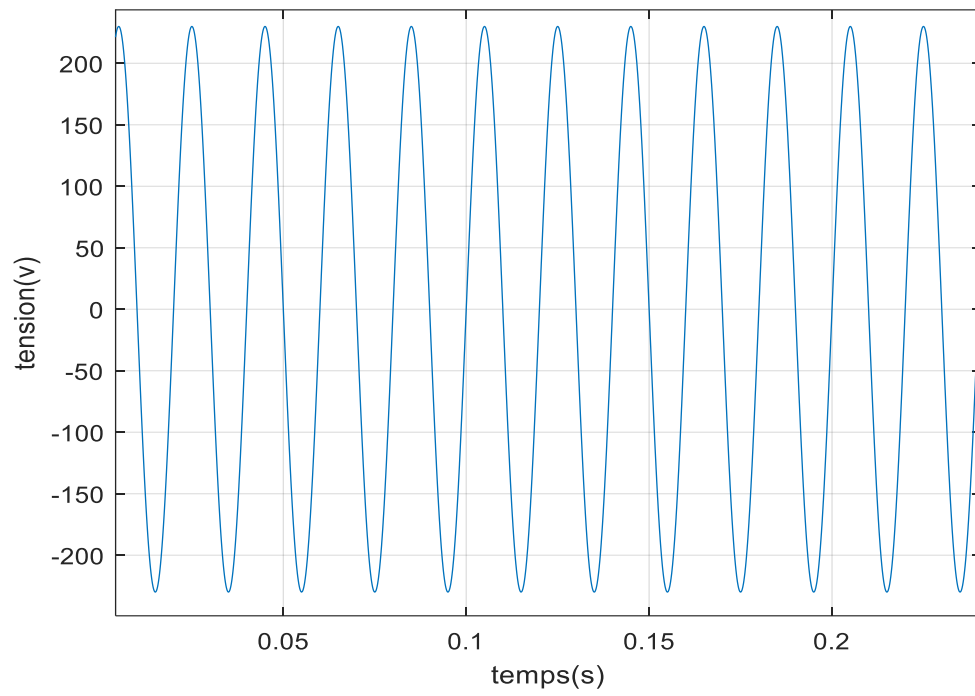
**B. Après filtrage**



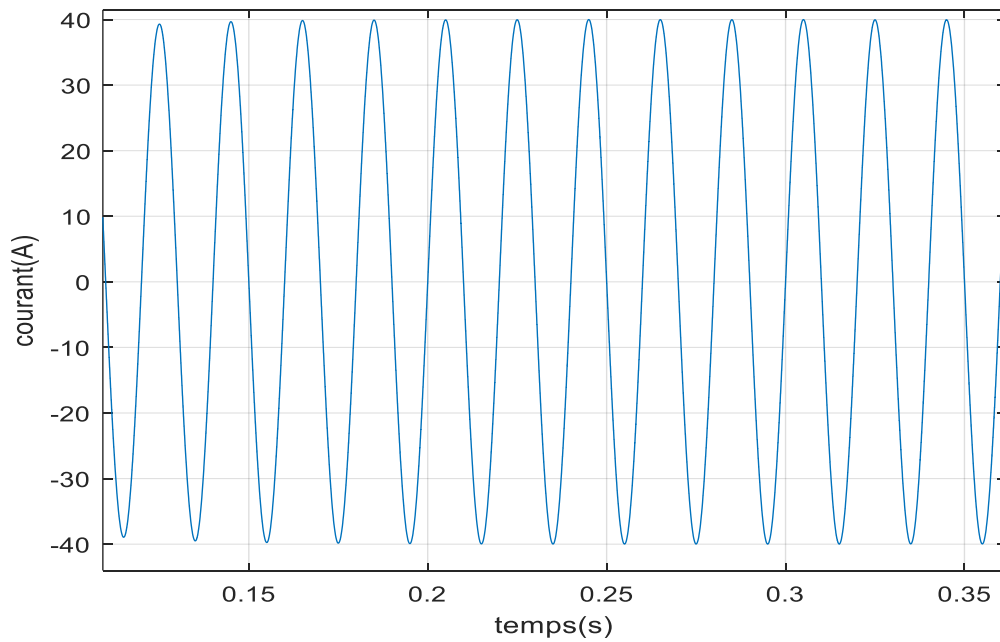
**Figure 4.17 :** Courant généré par l'onduleur après filtrage



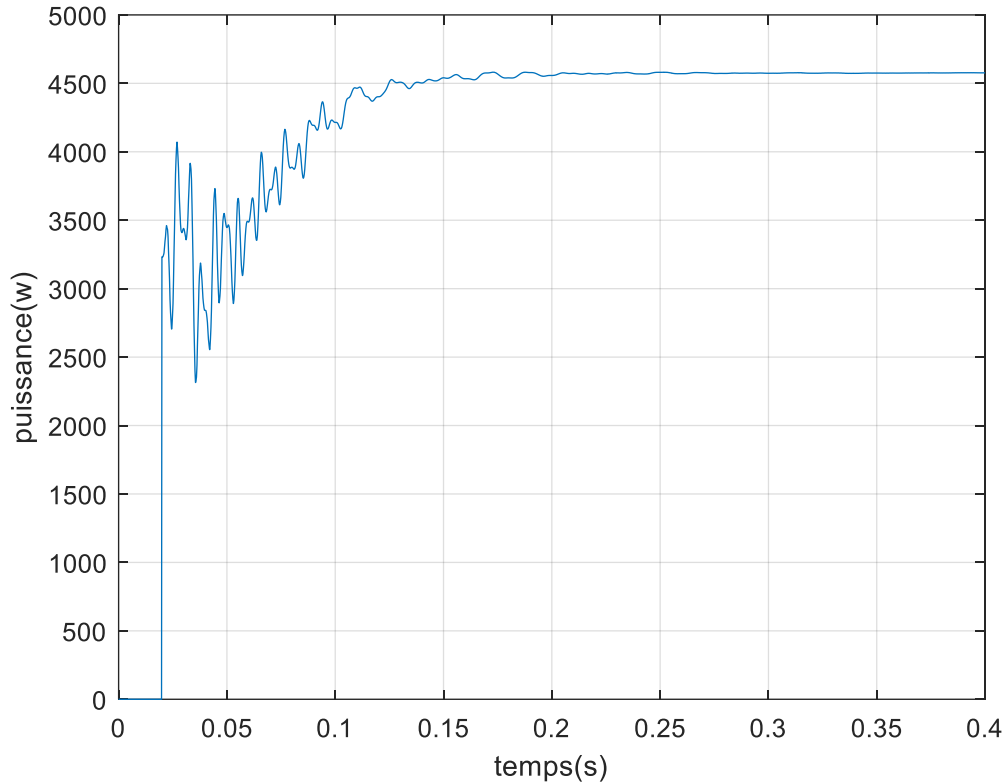
**Figure 4.18 :** THD du courant généré par l'onduleur après filtrage



**Figure 4.19 :** La tension de sortie de l'onduleur après filtrage



**Figure 4.20 :** Courant de référence  $i_{gref}$



**Figure 4.21 :** Puissance active injectée dans le réseau électrique.

Selon les résultats présentés plus haut, nous remarquons que le courant est en phase avec la tension  $v_g$  et que la puissance est injectée dans le réseau. Mais en analysant le courant  $i_g$  on remarque que l'allure du courant obtenue avant le filtrage est pleine d'harmoniques et ceci est illustré par un pourcentage très élevé du THD qui avoisine les 40%. Cependant, le THD du courant après filtrage est en nette amélioration avec un THD minimal, moins de 2%. Ceci montre l'efficacité du filtre LCL et de son dimensionnement.

### 4.3.2 Résultats de simulation avec changement d'irradiance (G)

Pour visualiser l'influence de l'éclairement sur l'efficacité de la commande développée, nous avons fixé la température à ( $T=25^\circ$ ) et nous avons fait varier l'éclairement selon trois niveaux de variation avec  $500\text{W/m}^2$  ;  $800\text{W/m}^2$  ;  $1000\text{W/m}^2$ .

Les profils que nous avons choisis pour le changement de l'irradiance sont donnés dans la figure 4.22. Et les résultats de simulation sont donnés dans les figures 4.22 jusqu'à 4.30.

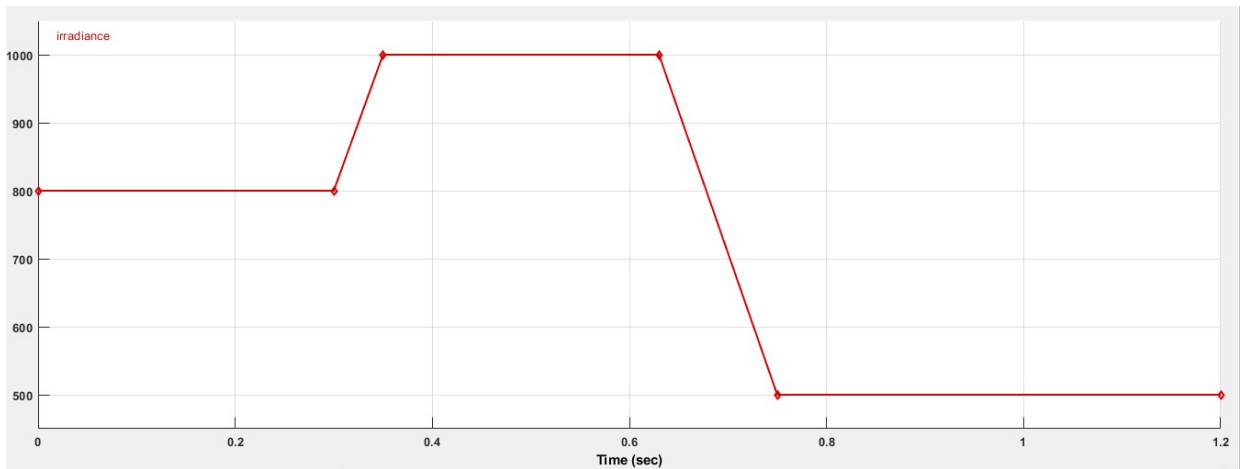


Figure 4.22 : Profils de test pour la variation de l'éclairement solaire.

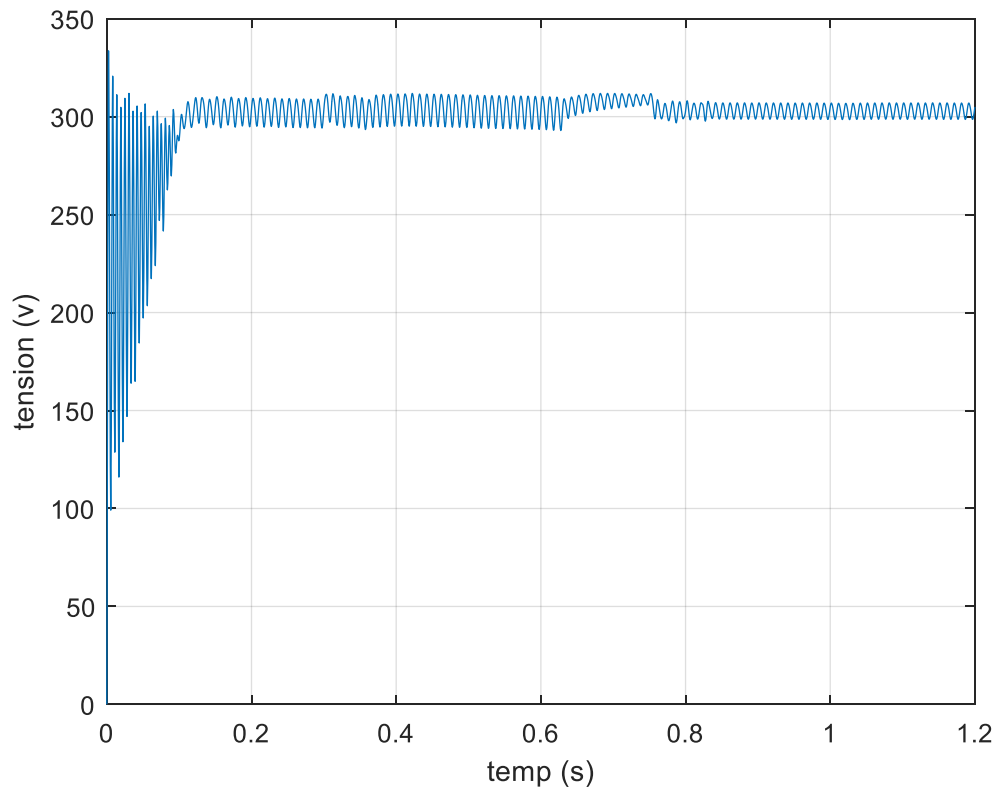
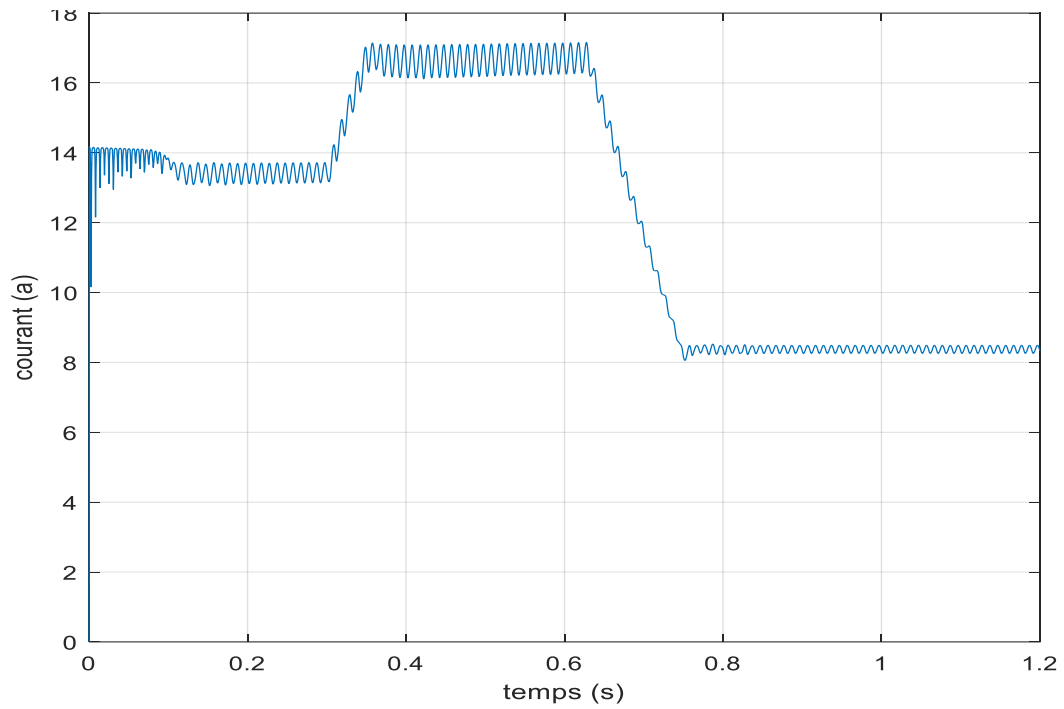
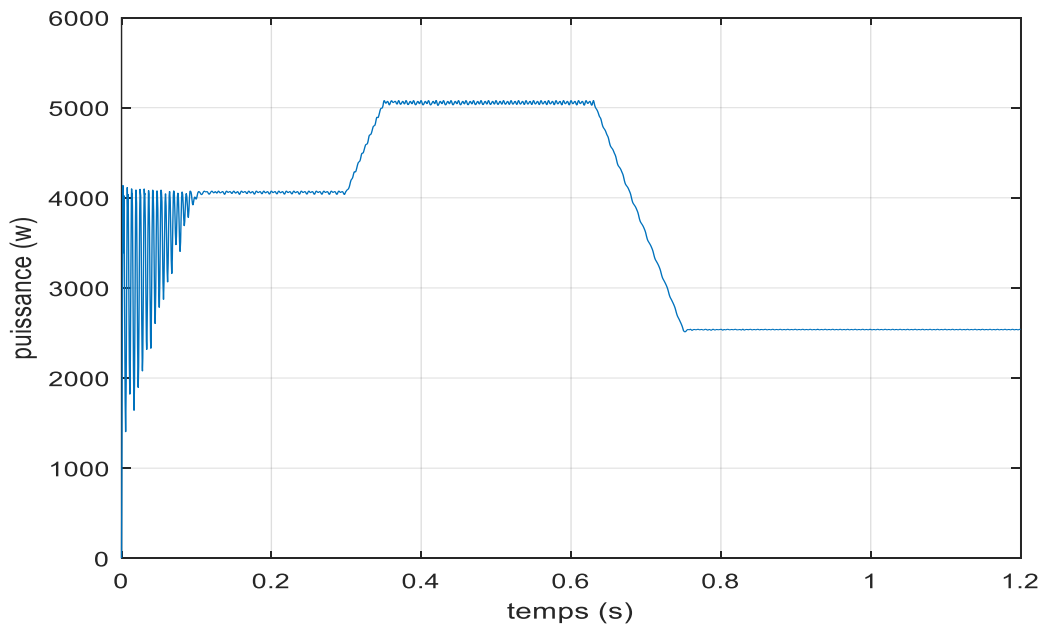


Figure 4.23 : Tension à la sortie du générateur PV.

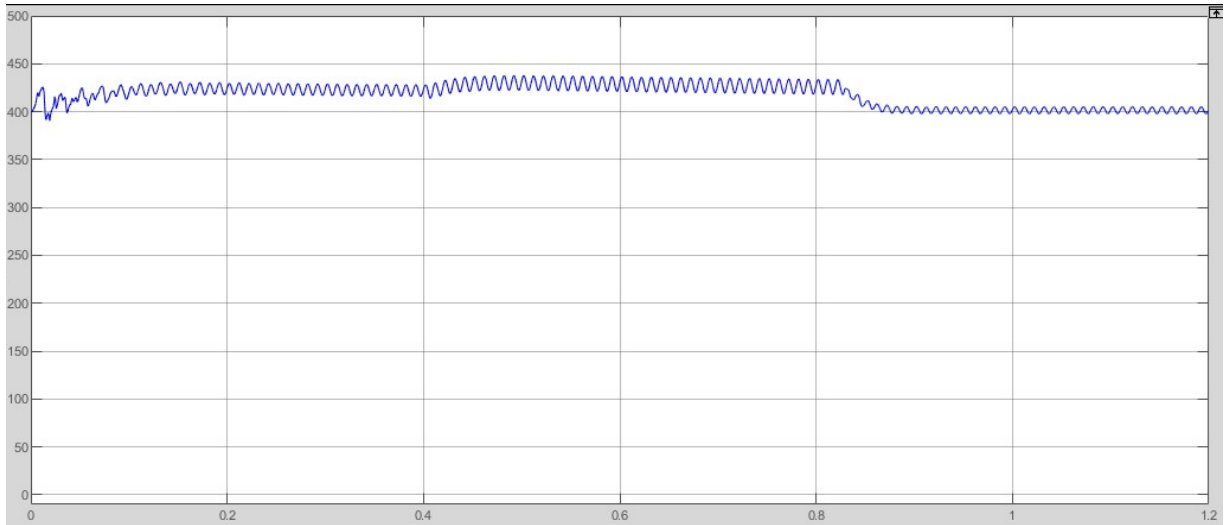


**Figure 4.24 :** Courant à la sortie du générateur PV



**Figure 4.25 :** La puissance produite par le générateur PV.

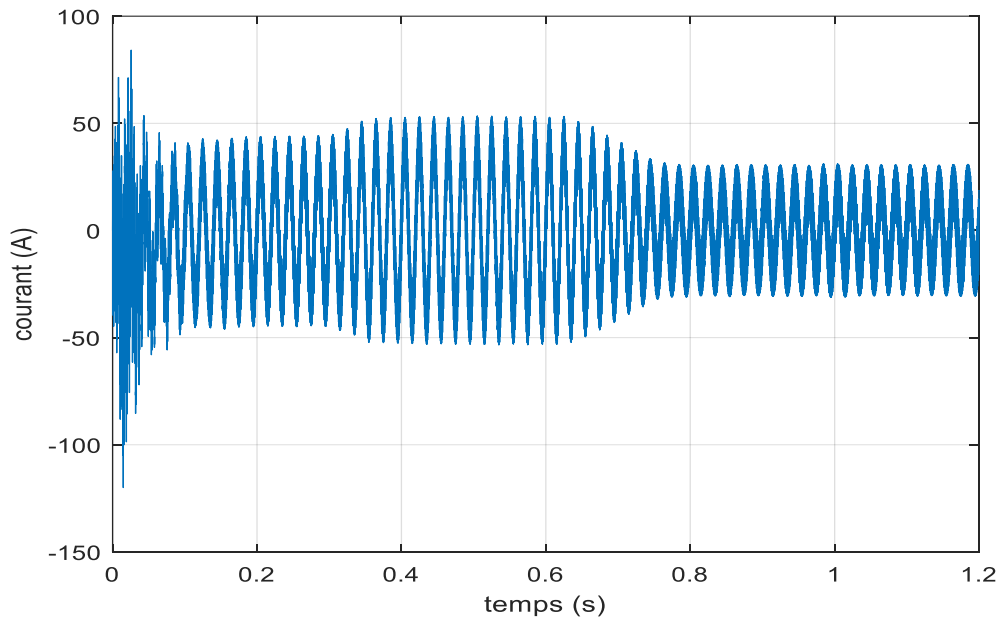
Les figures 4.23, 4.24 et 4.25 montre le courant, la tension et la puissance du GPV lors de la simulation avec éclairment variable, les résultats montrent l'efficacité du dispositif MPPT avec une puissance extraite toujours maximale.



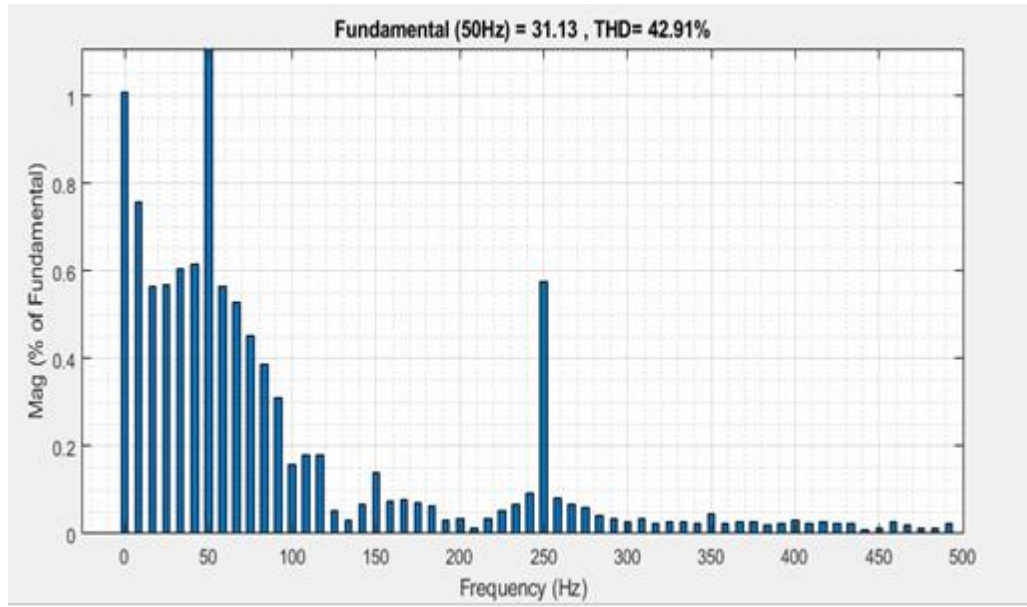
**Figure 4.26 :** L'allure de la tension à la sortie du hacheur Boost.

Aussi, dans la figure 4.26 nous remarquons que la tension à sortie du hacheur Boost, qui est la même que pour le bus continue, cette tension évolue toujours au alentours de 400V, ceci permet à l'onduleur d'injecter du courant dans le réseau.

Dans les figures 4.27 et 4.28 nous montrons le courant à la sortie de l'onduleur, ce courant est plein d'harmonique, avec un taux THD de plus de 42%

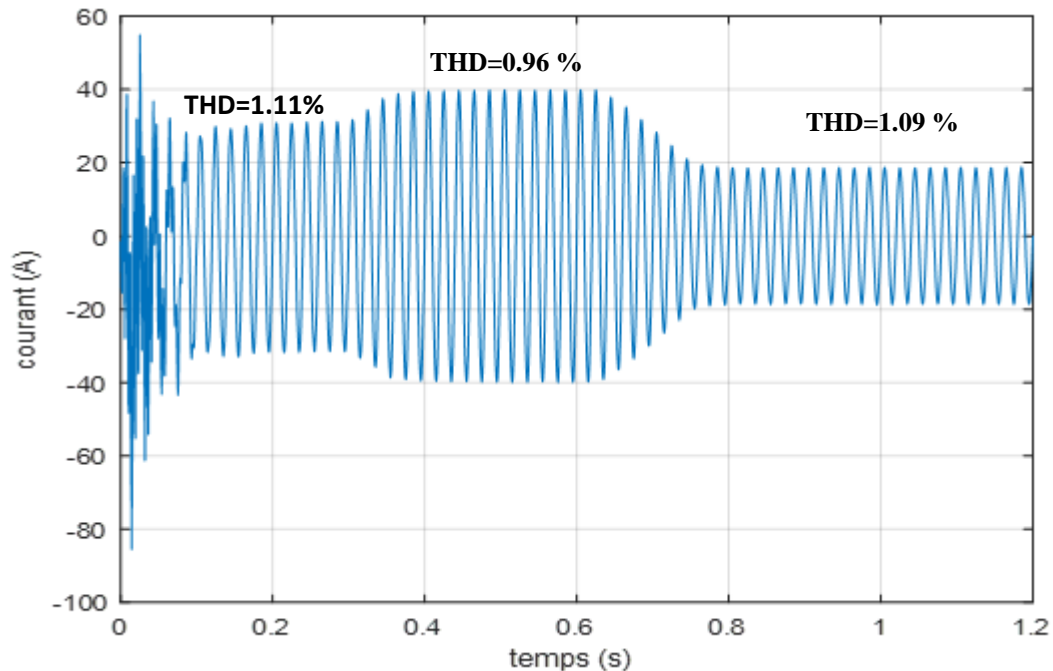


**Figure 4.27 :** L'allures du courant à la sortie de l'onduleur avant filtrage.

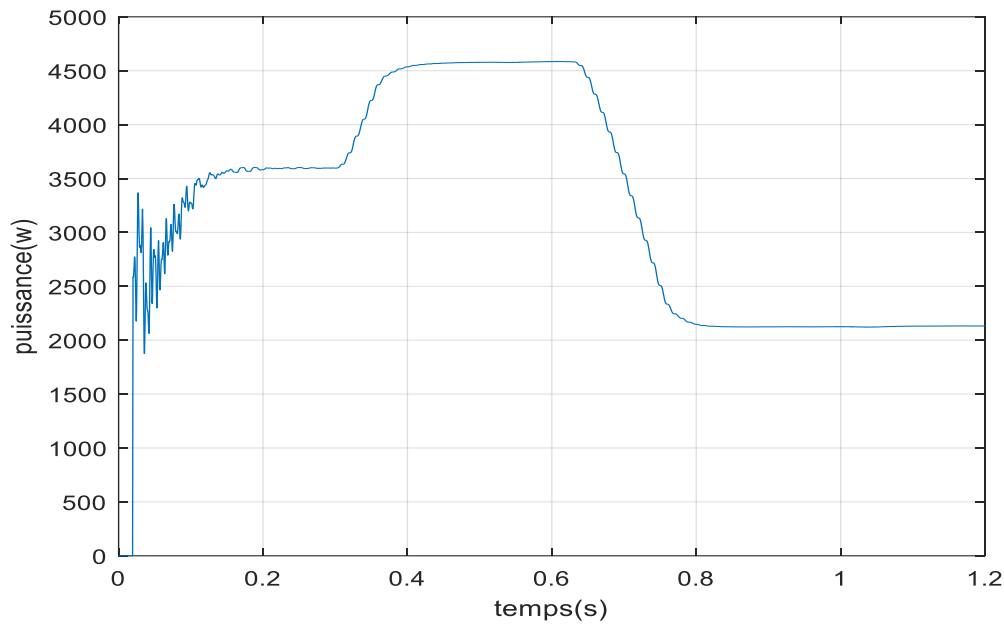


**Figure 4.28 :** THD du courant à la sortie de l'onduleur avant filtrage.

Le courant injecté dans le réseau électrique, et ce après filtrage, est présenté dans la figure suivante. Nous constatons que même si l'éclairage est variable, la qualité du courant est inchangée est comparable à celle avec éclairage invariable. Avec un THD avoisinant le 1%.



**Figure 4.29 :** L'allures de courants à la sortie de l'onduleur après filtrage avec THD



**Figure 4.30** : La puissance injectée au réseau

D'après la comparaison entre le cas d'irradiation constante  $G=1000\text{w/m}^2$  (cas optimal) et cas de changement ( $G=500\text{w/m}^2$ ,  $800\text{w/m}^2$ ,  $1000\text{w/m}^2$ ), il est bien clair que notre système est sensible au changement climatique (Eclairement), cela indique l'efficacité de notre système et de la commande que nous avons réalisé.

#### 4.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation de tous les composants de notre système. Nous avons pu dans ce chapitre modéliser et tester le générateur photovoltaïque GPV, le hacheur survolteur commandé pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT) et l'onduleur commandé par un contrôleur PR et en fin le réseau électrique.

Nous avons aussi, testé les différents groupes de composants et les différents signaux qui entre dans le fonctionnement du système, nous avons pu vérifier l'efficacité des types de commande choisis pour des paramètres de fonctionnement fixes et variable, nous avons ainsi testé l'influence de la variation de l'éclairement sur la puissance injectée et sur la qualité du courant injecté dans le réseau électrique. La qualité du courant est vérifiée avec un THD avoisinant le 1%.

## CONCLUSION GENERALE

Le projet présenté dans ce mémoire s'intéresse à l'une des utilisations de l'énergie photovoltaïque, dans ce projet nous utilisons un champ photovoltaïque de basse puissance qui représente une installation PV individuelle, nous supposons dans ce travail que le surplus de production de cette installation est injecté dans le réseau électrique monophasé.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la simulation de système photovoltaïque monophasé raccordé au réseau électrique, les constituants sont modélisés individuellement puis rassemblés dans un tel modèle globale. Les composants d'un tel système sont : un générateur photovoltaïque (GPV), un convertisseur (DC/DC boost), un élément de commande MPPT, Un onduleur monophasé, un contrôleur de courant PR, un filtre de type LCL, un dispositif de synchronisation PLL et le réseau électrique monophasé.

Nous avons débuté par une présentation des systèmes photovoltaïques et des multiples technologies associées aux constituants d'une chaîne photovoltaïque dans le but d'étudier le fonctionnement de ces systèmes.

Ensuite, nous avons discuté les différentes topologies concernant l'injection de système PV au réseau, où nous avons mis l'accent sur notre choix de topologie qui est une topologie a deux étages sans transformateur, pour pouvoir simulé et testé la topologie choisie, nous avons modélisé et dimensionné les différents composants du système PV. Aussi, nous avons modélisé les différents éléments de commande tel que la commande MPPT, le commande de la tension du bus continu, la commande en courant vie le régulateur PR et la synchronisation par une s-PLL.

Enfin, nous avons présenté les résultats de simulation avec la commande utilisée pour chaque étage, le dispositif de commande MPPT qui permet de faire tirer le maximum de puissance d'un GPV sous des conditions d'éclairement variable. L'injection du courant

est aussi testée dans les mêmes conditions, où nous avons vérifié la véracité de la commande en termes de qualité et de quantité du courant injecté.

D'autres types de commande peuvent être testés en suivant la même méthodologie de travail, où on peut améliorer considérablement le dimensionnement et l'efficacité du système. Aussi, d'autres topologies peuvent être utilisées et qui peuvent être des alternatives moins coûteuses et plus robustes que celle présentée dans ce mémoire.

## Références bibliographiques

### Chapitre 1

- [1] A. Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [2] M.L.Louazane. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla Mémoire de Magister. 16/06/2008
- [3] HANANOU.F, ROUABAH.A, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 09/06/2014.
- [4] : F. SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011
- [5] AYACH KHEDIDJA, Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique
- [7] F. KININGER, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003

### Chapitre 2

- [1] Citation for published version (APA):  
Yang, Y., & Blaabjerg, F. (2015). Overview of Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems. *Electric Power Components & Systems*, 43(12), 1352-1363.  
<https://doi.org/10.1080/15325008.2015.1031296>.
- [2] GRID CONVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC AND WIND POWER SYSTEMS  
Remus Teodorescu Aalborg University, Denmark Marco Liserre Politecnico di Bari, Pedro Rodriguez Technical University of Catalonia, Spain.
- [3] L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero, and V. Salas, Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems, *Renew. Sust. Energy Rev.*, 30, 796–807, February 2014.
- [4] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, and F. Blaabjerg, A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41(5), 1292–1306, September–October 2005.
- [5] Solarpraxis and Sunbeam Communications, Inverter, storage and PV system technology 2013, July 2013. Available: <http://www.pv-system-tech.com/>. Retrieved on March 1, 2016.
- [6] E. Romero-Cadaval, G. Spagnuolo, I. Garcia Franquelo, C.A. Ramos-Paja, T. Suntio, and W.M. Xiao, Grid-connected photovoltaic generation plants: Components and operation, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, 7(3), 6–20, September 2013.

- [9] Fryze, S., 'Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigem Verlauf von " Strom und Spannung'. *ETZ-Arch. Elektrotech*, 53, 1932, 596–599, 625–627, 700–702.
- [10] Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A., 'Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in the Tree-Phase Circuits'. In *Proceedings of the IEEE International Power Electronic Conference (IPEC'83)*, 1983, pp. 1375–1386.
- [11] Kim, H. S. and Akagi, H., 'The Instantaneous Power Theory on the Rotating p-q-r Reference Frames'. In *Proceedings of the IEEE PEDS'99 Conference*, July 1999, pp. 422–427.
- [12] Buchholz, F., *Das Begriffssystem Rechteistung. Wirkleistung, totale Blindleistung*, Munich, Germany: Selbstverlag, 1950 (in German).
- [13] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [14] Nabae, A., Cao, L. and Tanaka, A., 'A Universal Theory of Instantaneous Active Reactive Current and Power Including Zero-Sequence Component'. In *Proceedings of the IEEE ICHQP'96*, October 1996, pp. 90–95.

### Chapitre 3

- [1] F. Blaabjerg "Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS", 2017, CRC Press.
- [2] M. Seddik Bacha, «Les systèmes de l'électronique de puissance dédié à la distribution électrique-application a la qualité de l'énergie». Thèse de doctorat Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble Ikerlan (Mondragon, Espagne), septembre 2003
- [3] Solar Hub, "Datasheet TSM-315PA14A.08", 2016.
- [4] KAHLANE. A.E.W.H, L. Hassaine, M. Kherchi, " LCL filter design for photovoltaic grid connected systems ". *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaia* (2014) 227 – 232

### Chapitre 4

- [18] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator," in *Proc. 37th Annu. IEEE Power Electronics Specialists Conf. PESC'06*, Jun. 2006, pp. 1–6.
- [19] M. E. Van Valkenburg, *Analog Filter Design*. CBS College, 1982.
- [20] D. Zmood and D. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 814–822, May 2003.
- [21] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. Loh, "Proportionalresonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," *Proc. IEE Electric Power Applications*, vol. 153, no. 5, pp. 750–762, Sep. 2006.
- [22] Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Wiley/IEEE, 2010.