



École nationale polytechnique  
Département  
d'Électrotechnique



## Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

---

# Étude et modélisation d'un onduleur photovoltaïque On-Grid

---

*Réalisé par :*

M. BENEDDINE Nassim  
M. DJEDI Khaled

*Encadré par :*

Pr. NEZLI Lazhari  
Dr. BOUSSIALA Boubakr

*Soutenu le 25 JUIN 2024, Devant le jury composé de :*

Pr. MO. MAHMOUDI :	ENP	- Président
Pr. K. SEBAA :	ENP	- Examineur
Pr. L. NEZLI :	ENP	- Promoteur
Dr. B. BOUSSIALA :	USTHB	- Promoteur

ENP 2024

10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie.

www.enp.edu.dz





École nationale polytechnique  
Département  
d'Électrotechnique



## Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

---

# Étude et modélisation d'un onduleur photovoltaïque On-Grid

---

*Réalisé par :*

M. BENEDDINE Nassim  
M. DJEDI Khaled

*Encadré par :*

Pr. NEZLI Lazhari  
Dr. BOUSSIALA Boubakr

*Soutenu le 25 JUIN 2024, Devant le jury composé de :*

Pr. MO. MAHMOUDI :	ENP	- Président
Pr. K. SEBAA :	ENP	- Examineur
Pr. L. NEZLI :	ENP	- Promoteur
Dr. B. BOUSSIALA :	USTHB	- Promoteur

# Dédicace

“

*À mes chers parents, aucune dédicace ne pourrait exprimer toute ma reconnaissance, mon respect et mon amour. Sans vos sacrifices, prières, amour et encouragements, je ne serais pas là aujourd'hui. Que ce modeste travail soit l'accomplissement de vos vœux et le fruit de vos innombrables sacrifices. Je prie Allah le tout-puissant de vous préserver, de vous accorder longue vie, santé et bonheur,*

*À Ma chère sœur Kamilia, tu m'as toujours encouragé, soutenu et réconforté. Merci infiniment. À mon frère Adel et à ma petite sœur Ikram, merci pour votre compréhension face à mon anxiété durant les examens. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite. Que ce travail reflète ma profonde affection pour vous,*

*À mes amis Imed Eddine, Salah Eddine et Abdenour, vous êtes pour moi des frères sur qui je peux compter. Je dédie également ce travail à tous mes amis, en particulier aux étudiants du département d'électrotechnique. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble,*

*À tous ceux qui me sont chers, à vous tous*

*Merci.*

”

**- Nassim**

# Dédicace

“

*À mon père et à ma chère mère,  
À mes frères, Amine et Zine eddine,  
À toute ma famille,  
À mes amis les plus proches,  
Et à tous mes camarades.*

”

**- Khaled**

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.

Nos remerciements les plus sincères vont tout d'abord à **M. BOUSSIALA Boubakr** et **M. NEZLi Lazhari**, de nous avoir encadré et suivie durant la réalisation de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de toute notre reconnaissance et notre profond respect pour la confiance qu'il nous a accordée, merci pour ses précieux conseils pendant toute la durée de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **M. MO. MAHMOUDI** qui nous fait l'honneur de présider ce jury. Nous tenons également à la remercier pour la qualité de ses enseignements pour la filière d'électronique de puissance.

nous exprimons notre reconnaissance à **M. K. SEBAA** , un grand merci d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous adressons nos remerciements à nos professeurs du département d'Electrotechnique. Ils nous ont transmis leur savoir et leurs expériences, mais surtout, ils nous ont accompagnés avec leur sagesse et leur sens du dévouement. Nous ne les remercierons jamais assez.

Pour finir, je souhaite remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

---

## ملخص

يعتبر العاكس من نوع dirg-nO VP عنصراً أساسياً لحقن الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الشبكة العامة. فهو لا يسمح فقط بتحويل CA/CD، ولكنه يقوم أيضاً بالعديد من الوظائف مثل تتبع نقطة القدرة القصوى (TPPM) ومزامنة الشبكة، وإدارة القدرة النشطة والقدرة غير النشطة... إلخ. يقدم هذا البحث دراسة شاملة لسلسلة VP المتصلة بالشبكة، بما في ذلك مولد VP عاكس VP والشبكة. تم إجراء النمذجة والمحاكاة باستخدام BALTAM وKNILUMIS. وكانت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها مرضية للغاية.

---

### كلمات مفتاحية :

العاكس VP تتبع نقطة الطاقة القصوى TPPM dirG-nO .

---

## Abstract

The photovoltaic (PV) On-grid inverter is a fundamental component for injecting photovoltaic solar energy into the public grid. It not only enables DC/AC conversion but also performs numerous functions such as maximum power point tracking (MPPT), grid synchronization, active and reactive power management, etc. This thesis presents a comprehensive study of the grid-connected PV system, including a PV generator, a PV inverter, and a distribution network. The modeling and simulation are conducted using MATLAB/SIMULINK. The obtained simulation results are very satisfactory.

---

**Keywords :** PV Inverter, MPPT, On-Grid.

---

## Résumé

L'onduleur de type photovoltaïque (PV) On-grid est un élément fondamental pour l'injection de l'énergie solaire photovoltaïque sur le réseau public. il permet non seulement la conversion DC/AC, mais il réalise également de nombreuses fonctions comme la poursuite du point de puissance maximale (MPPT), la synchronisation avec le réseau, la gestion des puissances active et réactive...etc. Ce mémoire présente une étude complète de la chaîne PV connectée au réseau, comprenant un générateur PV, un onduleur PV et un réseau de distribution. La modélisation et la simulation sont réalisées à l'aide de MATLAB/SIMULINK. Les résultats des simulations obtenus sont très satisfaisants.

---

**Mots clés :** Onduleur PV, MPPT, On-Grid.

---

# Table des matières

Table des figures . . . . .	
Liste des tableaux . . . . .	
Liste des sigles et acronymes . . . . .	
<b>Introduction générale . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>1 Étude de la chaîne photovoltaïque connecté au réseau . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1 Introduction . . . . .	17
1.2 Généralités sur les systèmes photovoltaïques . . . . .	17
1.2.1 Fonctionnement des cellules PV . . . . .	17
1.3 caractéristiques de la cellule photovoltaïque . . . . .	19
1.4 Configuration d'un système solaire photovoltaïque . . . . .	21
1.4.1 Système autonome avec batterie . . . . .	21
1.4.2 système solaire photovoltaïque hybride . . . . .	21
1.4.3 système solaire photovoltaïque raccordé au réseau . . . . .	22
1.5 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau . . . . .	23
1.5.1 Les systèmes multi-étages . . . . .	23
1.5.2 Les systèmes à deux étages . . . . .	24
1.5.3 Les systèmes à un seul étages . . . . .	25
1.6 Les convertisseurs électriques statiques . . . . .	25
1.6.1 Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs) . . . . .	25
1.6.2 Les convertisseurs DC/AC (Onduleurs) . . . . .	26
1.7 Maximisation de la production des systèmes solaires photovoltaïques . . . . .	27
1.7.1 Techniques de poursuite du point de Puissance maximale MPPT . . . . .	28
1.8 La stratégie Boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop (PLL)) . . . . .	30
1.9 Conclusion . . . . .	32
<b>2 modélisation et simulation d'un système photovoltaïque muni d'une commande MPPT . . . . .</b>	<b>33</b>
2.1 Introduction . . . . .	34
2.2 Modélisation du champ PV . . . . .	34
2.3 Simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV) . . . . .	36
2.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque . . . . .	37
2.4.1 Courbe I-V (Intensité-Tension) . . . . .	37
2.4.2 Courbe P-V (Puissance-Tension) . . . . .	38
2.5 Influence de la température et de l'éclairement . . . . .	38

2.5.1	Influence de la température . . . . .	38
2.5.2	Influence de l'éclairage . . . . .	39
2.6	Modélisation du convertisseur boost . . . . .	40
2.6.1	Principe de fonctionnement . . . . .	41
2.6.2	Dimensionnement des paramètres d'un hacheur boost . . . . .	43
2.7	Le suivi du point de puissance maximale MPPT . . . . .	45
2.7.1	Méthode perturbation et observation ( <i>P&amp;O</i> ) . . . . .	45
2.8	Simulation du système muni d'une commande MPPT avec un hacheur boost . . . . .	48
2.8.1	Démensionnement des paramètres du hacheur boost . . . . .	48
2.8.2	Simulation du système . . . . .	51
2.9	Conclusion . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Les onduleurs photovoltaïques et Stratégies de commande . . . . .</b>	<b>54</b>
3.1	Introduction . . . . .	55
3.2	Topologies des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau . . . . .	55
3.2.1	Onduleur Central . . . . .	55
3.2.2	Onduleur chaîne . . . . .	56
3.2.3	Onduleur multi-chaîne . . . . .	57
3.2.4	Onduleur modulaire . . . . .	57
3.3	Onduleurs dans les Systèmes Photovoltaïques à Deux Étages . . . . .	58
3.4	Onduleurs Multi-niveaux . . . . .	59
3.5	Topologies des onduleurs multi-niveaux . . . . .	59
3.6	Onduleur de tension à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped NPC) . . . . .	60
3.6.1	Principe de fonctionnement des onduleurs NPC à trois niveaux . . . . .	60
3.6.2	Avantages de la topologie NPC . . . . .	61
3.6.3	Inconvénients de la topologie NPC . . . . .	61
3.7	Modulation de largeur d'impulsion (MLI) . . . . .	62
3.7.1	La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale) . . . . .	62
3.8	Paramètres de performance de l'onduleur . . . . .	65
3.9	modélisation des filtres . . . . .	66
3.10	les résultats de simulation . . . . .	67
3.11	Conclusion . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1	Introduction . . . . .	72
4.2	Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau électrique . . . . .	72
4.3	Stratigies de commande . . . . .	73
4.3.1	Synchronisation avec le réseau . . . . .	73
4.3.2	Régulation du courant . . . . .	75
4.3.3	régulation de la tension du bus continu . . . . .	79
4.4	Simulation du système et resultats . . . . .	81
4.5	Conclusion . . . . .	87
	<b>Conclusion et perspectives . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliography . . . . .</b>	<b>92</b>

**Table des matières**

---

**Annexes . . . . . 95**

**A Simulation du systeme . . . . . 96**

# Table des figures

1.1	La jonction PN . . . . .	18
1.2	Jonction PN sous éclairement . . . . .	19
1.3	Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension . . . . .	20
1.4	Les caractéristiques d'un générateur PV avec représentation des zones . . . . .	20
1.5	Systeme solaire photovoltaïque autonome [4] . . . . .	21
1.6	Systeme solaire photovoltaïque hybride [4] . . . . .	22
1.7	Systeme solaire photovoltaïque raccordé au réseau [4] . . . . .	22
1.8	Système photovoltaïque multi-étages connecté au réseau [4] . . . . .	24
1.9	Système photovoltaïque à deux étages connecté au réseau [4] . . . . .	24
1.10	Système photovoltaïque à un seul étage connecté au réseau [4] . . . . .	25
1.11	Symbole d'un convertisseur DC-DC . . . . .	26
1.12	Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé . . . . .	27
1.13	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT . . . . .	29
1.14	Structure générale d'une PLL[19] . . . . .	31
1.15	Modèle de la PLL [19] . . . . .	31
2.1	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [20] . . . . .	35
2.2	modèle équivalent d'un champ PV sous Simulink . . . . .	37
2.3	caractéristique I-V d'une cellule . . . . .	37
2.4	caractéristique P-V d'une cellule . . . . .	38
2.5	Influence de température sur les caractéristiques I-V . . . . .	39
2.6	Influence de température sur les caractéristiques P-V . . . . .	39
2.7	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V . . . . .	39
2.8	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques P-V . . . . .	40
2.9	Schéma bloc d'une chaîne de conversion à deux étages . . . . .	40
2.10	Schéma de simulation d'un hacheur boost . . . . .	41
2.11	Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé . . . . .	41
2.12	Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert . . . . .	42
2.13	le principe de fonctionnement de <i>P&amp;O</i> . . . . .	46
2.14	Organigramme de l'algorithme <i>P&amp;O</i> . . . . .	47
2.15	Simulation de la commande <i>P&amp;O</i> . . . . .	47
2.16	Rendement des hacheurs Boost et Buck en fonction du rapport cyclique . . . . .	48
2.17	Systeme PV, BOOST et MPPT . . . . .	51
2.18	Profil de l'irradiation . . . . .	51
2.19	La tension d'entrée du Hacheur BOOST . . . . .	52
2.20	Le courant d'entrée du Hacheur BOOST . . . . .	52
2.21	La tension de sortie du Hacheur BOOST . . . . .	52
2.22	Le courant de sortie du Hacheur BOOST . . . . .	53

2.23	La variation de puissance du panneau . . . . .	53
3.1	Topologie d'onduleur central . . . . .	56
3.2	Topologie d'onduleur chaîne . . . . .	56
3.3	Topologie d'onduleur multi-chaîne . . . . .	57
3.4	Topologie d'onduleur modulaire . . . . .	58
3.5	Schéma d'une branche de phase d'un onduleur à (a) 2 niveaux, (b) 3 niveaux (c) 9 niveaux et leurs formes d'onde correspondantes . . . . .	59
3.6	Circuit d'une phase d'un onduleur NPC . . . . .	60
3.7	Séquence de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux . . . . .	61
3.8	Principe de la technique MLI triangulo-sinusoïdale . . . . .	62
3.9	Forme d'onde des signaux PD pour 7 niveaux . . . . .	63
3.10	Forme d'onde des signaux POD pour 7 niveaux . . . . .	64
3.11	Forme d'onde des signaux APOD pour 7 niveaux . . . . .	64
3.12	Circuits de configuration des filtres . . . . .	67
3.13	La tension simple de la sortie de NPC 3-niveaux . . . . .	67
3.14	La tension composée de la sortie de NPC 3-niveaux . . . . .	68
3.15	Tension de sortie de NPC 3-niveaux apres filtrage . . . . .	68
3.16	Le courant de sortie de NPC 3-niveaux . . . . .	68
3.17	Le spectre harmonique de la tension simple de NPC 3-niveaux . . . . .	69
3.18	Le spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ avant filtrage de NPC 3-niveaux . . . . .	69
3.19	Le spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ apres filtrage de NPC 3-niveaux . . . . .	69
3.20	Le spectre harmonique du courant avant filtrage de NPC 3-niveaux . . . . .	69
3.21	Le spectre harmonique du courant apres filtrage de NPC 3-niveaux . . . . .	70
4.1	Structure générale d'un système PV raccordé au réseau . . . . .	72
4.2	Structure générale d'une PLL . . . . .	74
4.3	Concept de la synchronisation PLL . . . . .	74
4.4	Modèle de la PLL. . . . .	74
4.5	Représentation de la connexion Onduleur- Réseau . . . . .	76
4.6	Boucle de régulation du courant de l'axe direct . . . . .	77
4.7	Boucle de régulation réduite du courant . . . . .	77
4.8	Boucle de régulation de la tension du bus continu . . . . .	79
4.9	Le Profil d'irradiation utilisé . . . . .	81
4.10	Régulation de la tension du bus continu . . . . .	82
4.11	Courbe de la composante quadratique $V_q$ . . . . .	82
4.12	Courbe de La composante direct $V_d$ . . . . .	83
4.13	Courbe de la fréquence de sortie de la PLL . . . . .	83
4.14	Courbe d'Angle de sortie de la PLL . . . . .	84
4.15	Régulation du courant $i_d$ . . . . .	84
4.16	Régulation du courant $i_q$ . . . . .	85
4.17	Caractéristiques des Puissances active et réactive . . . . .	85
4.18	Courbes de courant de l'onduleur et la tension du réseau . . . . .	86
4.19	Caractéristiques des Puissances active et réactive avec injection de puissance réactive . . . . .	87
4.20	Régulation du courant $i_q$ . . . . .	87

**Table des figures**

---

1.1 La simulation du systeme final . . . . . 96

# Liste des tableaux

2.1	Les caractéristiques du module PV . . . . .	48
2.2	Paramètres du hacheur . . . . .	49
2.3	Les valeurs des paramètres du boost . . . . .	50
3.1	Séquences de fonctionnement pour le NPC à trois niveaux . . . . .	61
3.2	Comparaison des méthodes MLI sinusoïdale PD, POD, et APOD . . . . .	65

# Liste des sigles et acronymes

<b>PV</b>	<i>Photovoltaïque</i>
<b>PLL</b>	<i>Boucle à verrouillage de phase (en anglais, phase-locked loop)</i>
<b><math>V_{PV}</math></b>	<i>Tension du panneau photovoltaïque</i>
<b><math>I_{PV}</math></b>	<i>Courant du panneau photovoltaïque</i>
<b><math>I_{CC}</math></b>	<i>Courant de court-circuit d'un panneau photovoltaïque</i>
<b><math>V_{CO}</math></b>	<i>Tension de circuit-ouvert du panneau photovoltaïque</i>
<b>MPP</b>	<i>Point de puissance maximale</i>
<b>DC/DC</b>	<i>continu-continu</i>
<b>DC/AC</b>	<i>continu-alternatif</i>
<b>MPPT</b>	<i>Le suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)</i>
<b>GPV</b>	<i>Générateur photovoltaïque</i>
<b>D</b>	<i>Rapport cyclique pour la commande d'un convertisseur</i>
<b><math>V_{dc}</math></b>	<i>Tension de bus continu</i>
<b>MLI</b>	<i>Modulation de largeur d'impulsion</i>
<b>THD</b>	<i>Taux distorsion harmonique</i>
<b>PI</b>	<i>Proportional-Integral</i>
<b>NPC</b>	<i>Onduleur de tension à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped NPC)</i>
<b>PD</b>	<i>Phase Disposition</i>
<b>POD</b>	<i>Phase Opposition Disposition</i>
<b>APOD</b>	<i>Alternate Phase Opposition Disposition</i>

# Introduction générale

La plupart des sources d'énergie renouvelable, qu'elles soient solaires ou éoliennes, sont disponibles sur l'ensemble du territoire national, avec un potentiel variable selon les zones climatiques considérées. Il est donc possible d'envisager des installations spécifiques pour la conversion de chacune de ces ressources. On peut utiliser ces installations pour alimenter une charge électrique particulière de manière autonome, être hybridées avec une source conventionnelle ou les connecter au réseau électrique. Dans cette situation particulière, l'un des principaux problèmes à résoudre avec une grande prudence est la conversion de la puissance continue en puissance alternative. Cette conversion nécessite la mise en œuvre d'une stratégie de commande et de contrôle électronique pour interconnecter ce type de sources d'énergie au réseau électrique.

**L'énergie solaire photovoltaïque (PV)** est une source d'énergie propre et renouvelable qui convertit la lumière du soleil en électricité. L'Algérie se trouve dans l'une des zones les plus ensoleillées de la planète, ce qui lui confère une capacité significative pour le besoin local en électricité ou pour l'exportation. Les panneaux solaires, constitués de cellules photovoltaïques, produisent de l'électricité sans bruit ni pollution, et ne nécessitent aucune pièce mobile, ce qui les rend très fiables. Cette électricité peut être utilisée immédiatement, stockée dans des batteries, ou injectée dans **le réseau électrique**. Les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau aident à réduire les dépenses énergétiques des utilisateurs en permettant la vente de l'excédent d'électricité produite au réseau. Cette pratique offre un rendement financier, contribuant ainsi à la transition vers des sources d'énergie plus durables.

Les systèmes photovoltaïques (PV) reliés au réseau doivent relever plusieurs défis techniques pour optimiser leur performance et s'intégrer de manière efficace dans le réseau électrique.

L'un de ces défis consiste à maximiser la puissance générée, une tâche complexe en raison des fluctuations météorologiques qui affectent la production d'électricité solaire. Pour résoudre ce problème, des techniques avancées de commande appelées Maximum Power Point Tracking (MPPT) sont utilisées. Elles ajustent en temps réel les paramètres des panneaux solaires pour capturer le maximum de puissance disponible à tout moment. En outre, la synchronisation précise avec le réseau électrique est primordiale pour garantir un approvisionnement stable et fiable en électricité. Des dispositifs de contrôle sophistiqués sont nécessaires pour assurer que l'électricité produite par les systèmes PV soit

synchronisée avec les exigences du réseau, minimisant ainsi les fluctuations de tension et de fréquence. En surmontant ces défis, les systèmes PV connectés au réseau peuvent jouer un rôle crucial dans la transition vers une infrastructure énergétique durable et décarbonisée.

Cette étude vise à examiner une chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau, ainsi que toutes les stratégies de contrôle qui lui sont liées. En utilisant le logiciel MATLAB / Simulink pour réaliser la modélisations et les simulations, nous examinons les méthodes de maximisation de la puissance et de synchronisation avec le réseau électrique, afin de mieux comprendre leur impact et leur efficacité dans le contexte des systèmes photovoltaïques.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre explore les fondamentaux des systèmes photovoltaïques, en commençant par une explication détaillée de l'effet photovoltaïque et du fonctionnement des cellules solaires. Nous examinons les principales caractéristiques techniques des cellules PV, suivies d'une analyse des diverses architectures et classifications des systèmes PV connectés au réseau. Nous abordons également les différents systèmes de conversion énergétique utilisés et les stratégies pour maximiser l'efficacité des systèmes PV, notamment par l'application des techniques de Phase-Locked Loop (PLL).

Le deuxième chapitre approfondit la modélisation des panneaux solaires, examinant les impacts des variations de température et d'irradiation sur leur performance. Il met en lumière l'utilisation d'un hacheur DC/DC, essentiel pour adapter la tension produite par les panneaux à la charge tout en maintenant le système au point de puissance maximale (PPM) grâce à la méthode de Perturbation et Observation (P & O).

Dans le troisième chapitre, nous analysons les différentes topologies des onduleurs solaires, leur fonctionnement, et les avantages de chaque configuration. Ce chapitre aborde également les méthodes de contrôle d'un onduleur triphasé et l'utilisation de filtres pour améliorer la qualité de l'énergie en réduisant les harmoniques.

Le dernier chapitre se concentre sur l'intégration des systèmes PV au réseau électrique, étudiant leur impact et présentant diverses stratégies de commande. Nous exposerons une modélisation de la boucle à verrouillage de phase (PLL), ainsi que les techniques de régulation des courants et de la tension au niveau du bus continu, indispensables pour assurer le fonctionnement optimal du système.

Chapitre **1**

Étude de la chaîne photovoltaïque connecté  
au réseau

### 1.1 Introduction

Dans le contexte actuel, caractérisé par une augmentation significative de l'électrification et une préoccupation croissante concernant les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que par la crise écologique et les limites des combustibles non renouvelables, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau jouent un rôle essentiel dans la transition vers une économie énergétique durable et dans le remplacement des sources d'énergie fossiles par des sources renouvelables. Ces systèmes, qui utilisent des cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs, se sont imposés comme une solution efficace pour convertir directement l'énergie solaire en électricité, offrant ainsi une alternative propre et abondante. Néanmoins, leur intégration au réseau électrique soulève encore des questions quant à leur impact sur sa stabilité et sa fiabilité, ce qui requiert des solutions innovantes pour optimiser leur performance et leur rentabilité [1].

Dans ce chapitre, nous explorerons les fondamentaux des systèmes photovoltaïques. Nous commencerons par une explication de l'effet photovoltaïque et du fonctionnement des cellules solaires. Nous examinerons ensuite les principales caractéristiques des cellules PV, puis nous nous pencherons sur les différentes architectures des systèmes PV et classifications des systèmes PV connectés au réseau électrique. Par la suite, nous étudierons les divers systèmes de conversion utilisés dans ces systèmes. Enfin, nous aborderons les méthodes de maximisation de la production des systèmes PV, ainsi que les stratégies PLL.

### 1.2 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

#### 1.2.1 Fonctionnement des cellules PV

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui convertit l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement optique par les matériaux semi-conducteurs. La sélection des matériaux utilisés pour construire les cellules solaires repose sur les propriétés physiques des électrons susceptibles d'être émis par les atomes lorsqu'ils sont excités par des photons du spectre solaire [2].

- **La jonction PN** : Les jonctions PN sont créées grâce à un processus de dopage dans lequel certaines impuretés sont spécifiquement introduites dans le matériau semi-conducteur. Du côté p, les atomes dopants ajoutent des « trous » à la bande de valence, et du côté n, ils ajoutent des électrons libres à la bande de conduction. Lorsque ces deux régions entrent en contact, une zone déplétion (transition) se forme à la jonction où les porteurs de charge diffusent et les charges opposées sont neutralisées. Le champ électrique créé dans la zone déplétion est conduit des charges positives aux charges négatives, créant une force qui s'oppose le mouvement des porteurs de charge à travers la jonction. Cela donne à la jonction PN la capacité de réguler le flux de courant [3].

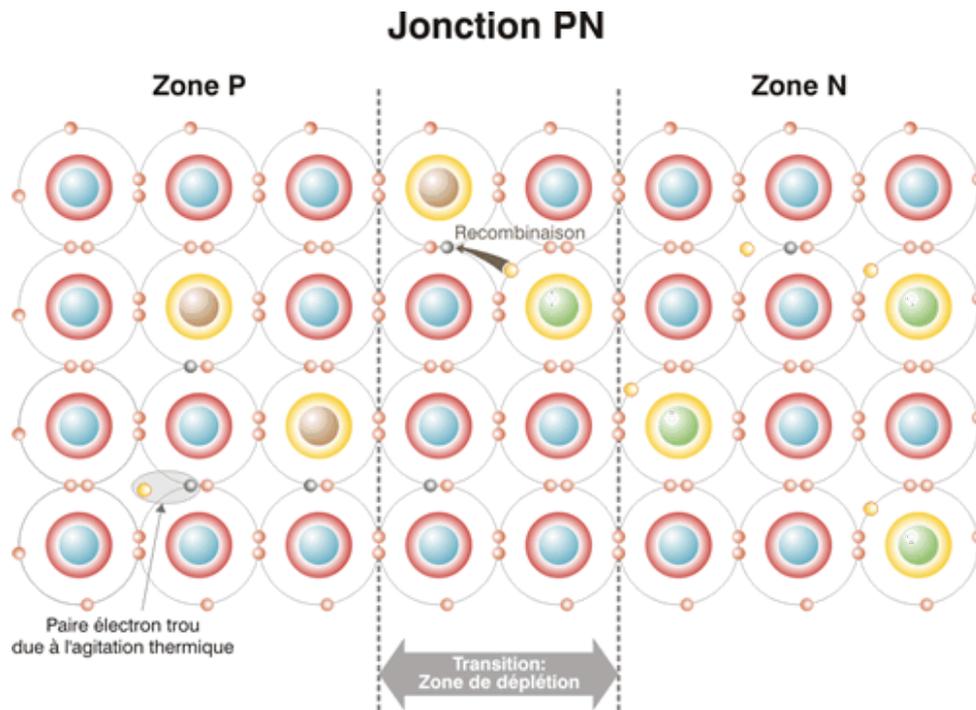


FIG. 1.1 : La jonction PN

- **L'effet photovoltaïque** : L'effet photovoltaïque se définit comme étant la base du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques à base de matériaux semi-conducteurs qui génèrent des porteurs de charge (trous d'électrons) en absorbant des photons [4].

Lorsque on expose la jonction PN à une source de lumière, Un photon incident produit une paire électron-trou. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou générées par les photons sont dissociées par un champ électrique dirigé de la région n vers la région p, créant une différence de potentiel. Ce phénomène dépend du matériau semi-conducteur et de la longueur d'onde de la lumière incidente [5] [4].

La tension interne de la jonction représente la source de tension et les photoporteurs générés par le rayonnement solaire représentent la source de courant. Ce courant photovoltaïque circule de la zone n vers la zone p et est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairage, il doit donc être collecté en établissant un contact avant-arrière [5].

La tension produite peut varier entre 0,3 V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, ainsi que des conditions de température et de vieillissement de la cellule [1].

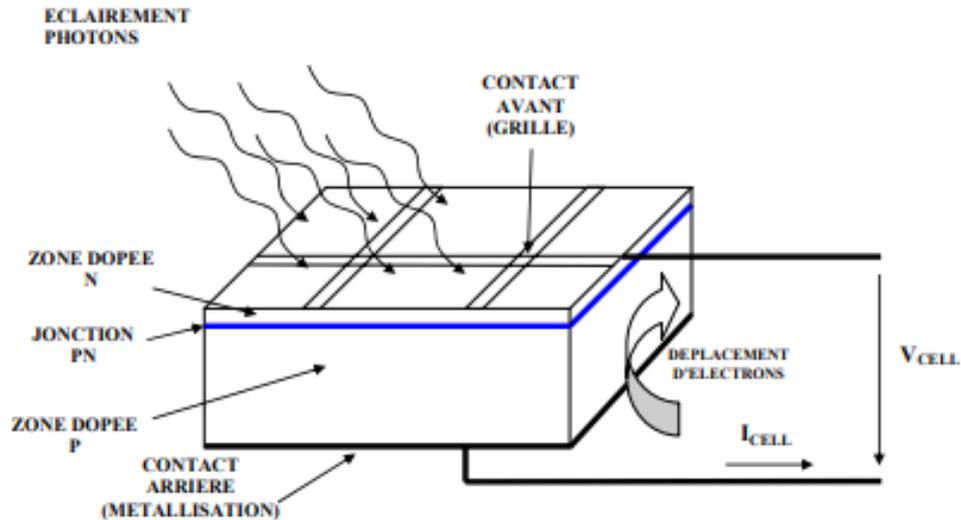


FIG. 1.2 : Jonction PN sous éclairnement

### 1.3 caractéristiques de la cellule photovoltaïque

La Figure 1.3 , montre les caractéristiques non linéaires des cellules solaires PV ( $I_{pv}$  en fonction de  $V_{pv}$ ) qui sont principalement dues à la dépendance du rendement électrique au rayonnement solaire et à la température (figure 1.3) [6] [7]. Les paramètres électriques qui définissent cette courbe et décrivent le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sont :

- **Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )** : C'est le courant maximal pour lequel la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque est nulle, atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Ce courant augmente de manière linéaire avec le rayonnement incident sur la cellule [7] [8].
- **La tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ )** : Il s'agit de la tension à laquelle aucun courant n'est délivré par la cellule photovoltaïque (L'orsque l'un des bornes de la cellule PV est ouvert au circuit de la charge ).
- **Point a puissance maximale (MPP)** : Tout utilisateur d'un générateur photovoltaïque aspire à une production d'énergie optimale. Pour un niveau d'éclairément donné, le point ( $P_{max}$ ) représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, appelé puissance maximale, correspond à une tension optimale ( $V_{mpp}$ ) et à une intensité optimale ( $I_{mpp}$ ) [7].

$$P_{max} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$$

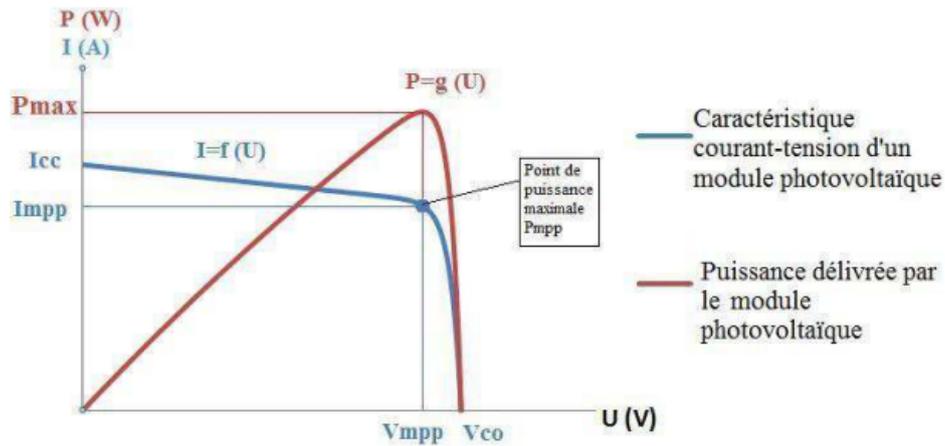


FIG. 1.3 : Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension

La caractéristique peut être subdivisée en trois intervalles distincts [9] :

- **Zone 1** : Cet intervalle représente la phase où la cellule solaire est perçue comme une source de courant. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.
- **Zone 2** : Ce segment correspond au point de flexion de la caractéristique, c'est la région où le point caractérisé par une puissance maximale peut être identifié.
- **Zone 3** : le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées, donc elle est considérée comme une source de tension.

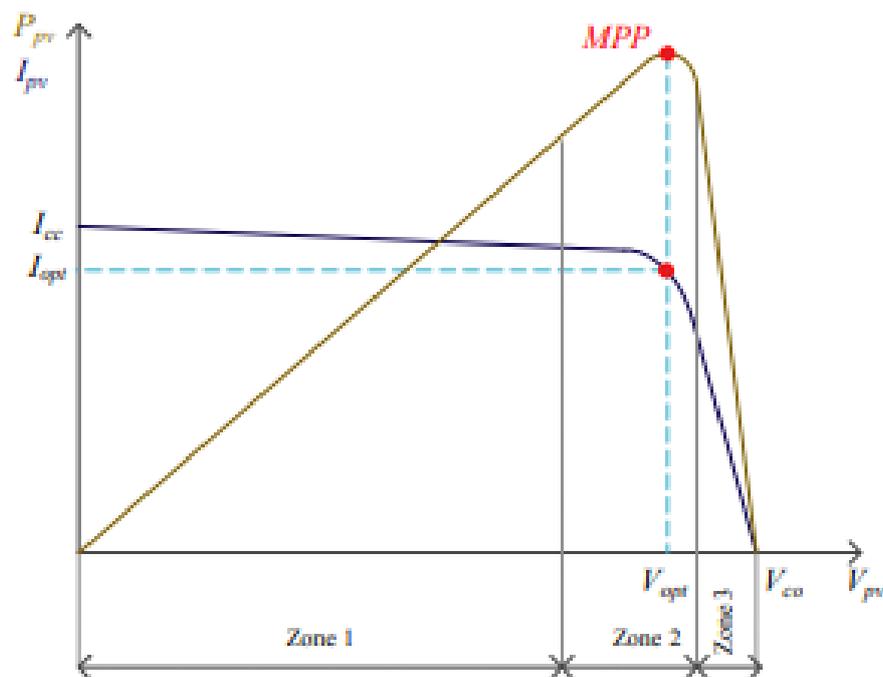


FIG. 1.4 : Les caractéristiques d'un générateur PV avec représentation des zones

## 1.4 Configuration d'un système solaire photovoltaïque

Les modules photovoltaïques sont les éléments de base de tout système solaire. La connexion en série augmentera la tension de fonctionnement et la connexion en parallèle augmentera le courant. La connexion d'un ensemble de modules PV en série et/ou en parallèle est appelée " champ photovoltaïque ". On Peut exploiter l'énergie fournie par le champ pour charger la batterie afin de la restituer en cas de besoin. Il peut également être utilisé en connectant le module directement à une charge sans batterie (comme une pompe solaire utilisant l'eau comme source de stockage), ou en connectant le module au réseau. Il est également possible de combiner l'énergie d'un champ solaire avec d'autres sources d'énergie, comme des générateurs électrogènes ou des éoliennes, qui peuvent servir de source de secours lorsque le rayonnement solaire est insuffisant [4].

Il existe de nombreux types de systèmes d'énergie solaire, mais ils peuvent être divisés en trois catégories [4] [10].

### 1.4.1 Système autonome avec batterie

Dans ce système, le champ photovoltaïque agit comme un chargeur de batterie lorsqu'un surplus d'énergie est disponible et contribue à l'alimentation en cas d'insuffisance du PV (l'énergie stockée sera restituée). Ce système d'énergie solaire, le plus courant, est utilisé pour alimenter les charges isolées. Il offre une solution cruciale pour les régions où le réseau électrique est absent [10].

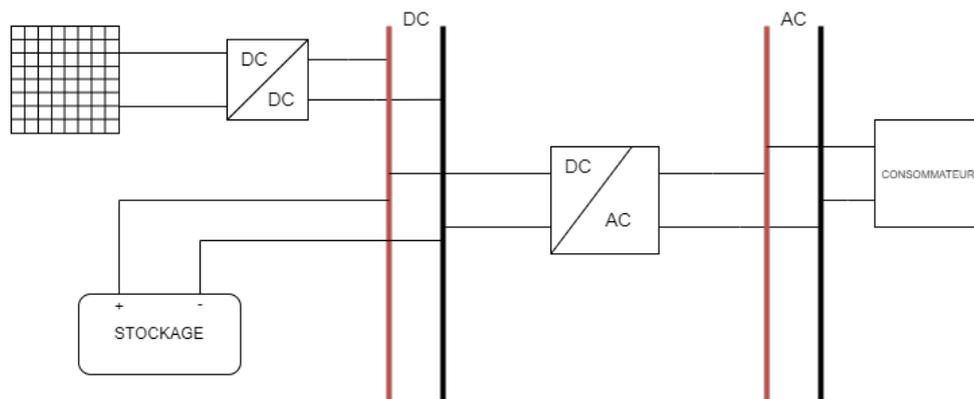


FIG. 1.5 : Systeme solaire photovoltaïque autonome [4]

### 1.4.2 système solaire photovoltaïque hybride

Ce système est principalement utilisé dans les communautés et villages éloignés. Les générateurs photovoltaïques sont connectés en parallèle aux générateurs diesel du réseau villageois et alimentent ce réseau lorsque le soleil brille. Cela réduit la consommation de carburant diesel très coûteux dans les endroits éloignés et réduit la durée de fonctionnement des générateurs [10].

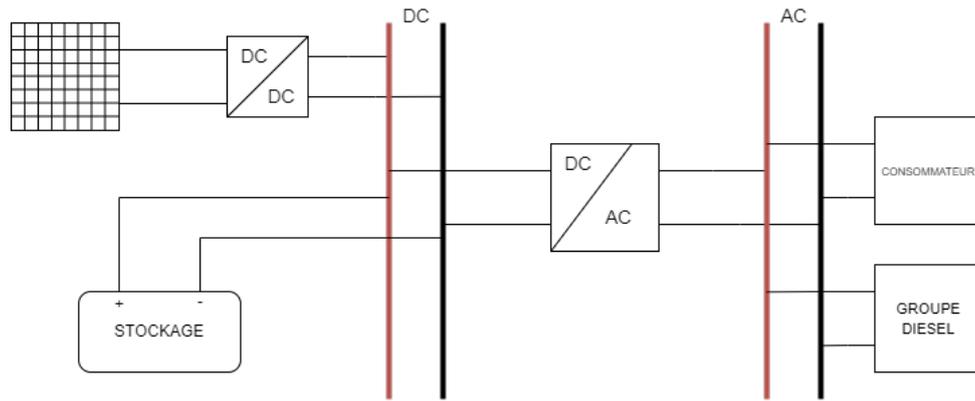


FIG. 1.6 : Systeme solaire photovoltaïque hybride [4]

Ce type de système s'applique particulièrement bien aux endroits éloignés où il est important d'avoir de l'électricité disponible à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où la consommation d'électricité est limitée aux systèmes photovoltaïques dont les batteries ne sont pas encore rentables. Les systèmes hybrides photovoltaïque/générateur sont couramment utilisés pour les tours de communication ainsi que pour les abris et les camps forestiers dans les zones reculées. Elles peuvent également être combinées avec d'autres sources d'énergie telles que les éoliennes et les petites centrales hydroélectriques, où il existe une complémentarité dans la production d'électricité.

### 1.4.3 système solaire photovoltaïque raccordé au réseau

Le système fonctionne comme une centrale électrique conventionnelle mais doit tenir compte des fluctuations de production d'énergie liées à la lumière du soleil et la charge locale. Ce système nécessite un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif [4].

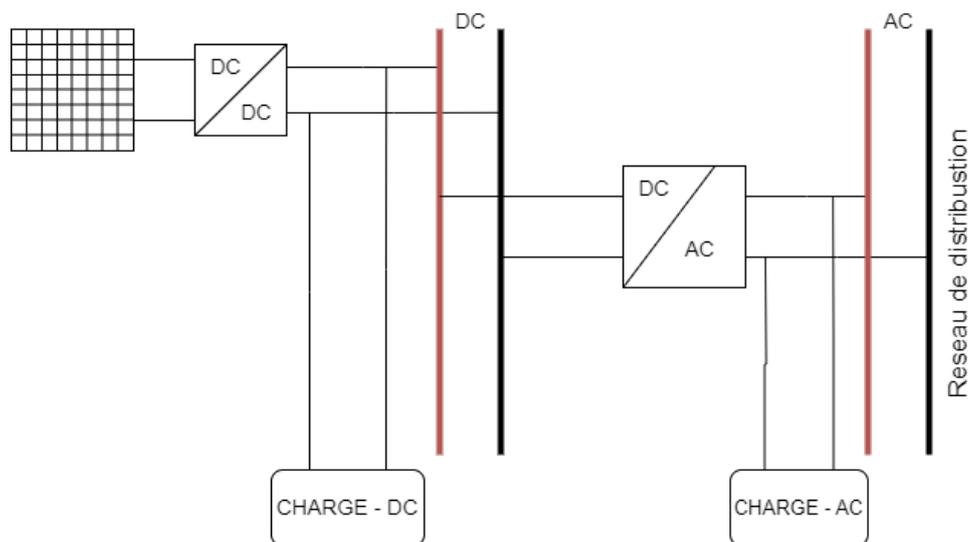


FIG. 1.7 : Systeme solaire photovoltaïque raccordé au réseau [4]

### 1.5 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

La conception des systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux de distribution crée une variété de topologies, chacune présentant ses propres avantages en termes d'efficacité, de fiabilité et de coût. Cette classification permet d'identifier les changements dans les modèles de conversion d'énergie, qui peuvent avoir un impact significatif sur les performances globales du système. De ce point de vue, l'exploration des topologies en termes de nombre d'étages de conversion utilisés offrira des options précieuses aux concepteurs de systèmes photovoltaïques connectés au réseau [4].

- Les systèmes multi-étages
- Les systèmes à deux étages
- Les systèmes à un seul étage

#### 1.5.1 Les systèmes multi-étages

Les systèmes à multi-étages (Figure 8) utilisent plus de deux étages pour convertir l'énergie produite par un champ photovoltaïque. De tels systèmes sont généralement divisés en deux parties distinctes : la partie DC/DC, qui optimise la production d'électricité à partir du générateur photovoltaïque et régule la tension de sortie, et une partie DC/AC pour amener l'énergie solaire dans le réseau électrique de manière efficace et fiable [4].

La partie DC/DC comprend deux étapes de conversion :

- étage adaptative avec contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking), permettant de maximiser la puissance produite par le générateur PV en ajustant en continu les paramètres de fonctionnement pour suivre le point de puissance maximale quelles que soient les conditions météorologiques telles que la température, l'humidité, le rayonnement solaire. Cette étape garantit une utilisation optimale de l'énergie disponible du générateur photovoltaïque [4].
- Le deuxième étage de la section DC/DC est dédié à l'amplification de la basse tension générée par le premier étage jusqu'au niveau de tension souhaité. Cette étape permet d'ajuster la tension de sortie du système aux exigences spécifiques de l'application, que la charge soit connectée ou le système de distribution d'énergie [4].

La partie DC/AC est responsable de la conversion de la tension DC en tension AC, adaptée à l'entrée dans le réseau électrique. Cette étape est essentielle pour intégrer efficacement l'énergie solaire dans le réseau, en fournissant une tension alternative propre et stable. Pour ce faire, il intègre des dispositifs de synchronisation et de filtrage permettant de réduire les harmoniques indésirables, garantissant ainsi la qualité de l'énergie injectée dans le réseau [4].

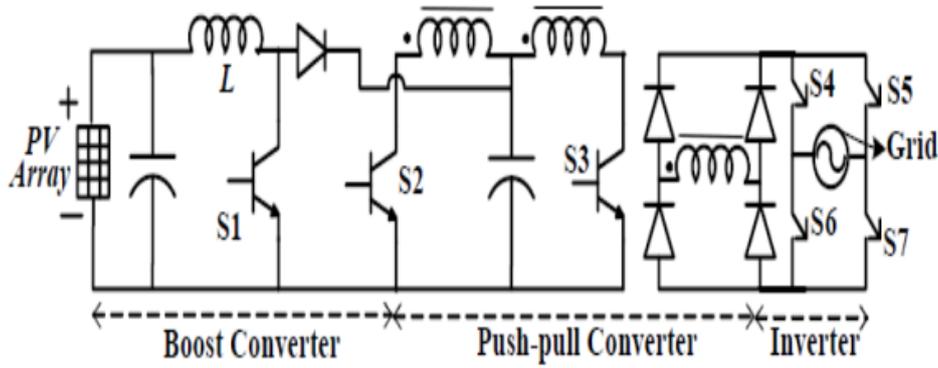


FIG. 1.8 : Système photovoltaïque multi-étages connecté au réseau [4]

### 1.5.2 Les systèmes à deux étages

Les systèmes à deux étages, également connus sous le nom de systèmes à deux niveaux, sont l'une des classifications les plus utilisées dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Ils se composent de deux étapes de conversion distinctes, chacune ayant un rôle spécifique dans la production d'électricité solaire.

- **Premier étage (Conversion DC/DC) :** Ce premier étage est conçu pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque (PV) au point de puissance maximale à l'aide du contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cela garantit que les panneaux solaires fonctionnent avec une efficacité optimale, même dans des conditions d'ensoleillement variables. De plus, la tâche du convertisseur DC/DC est d'augmenter la tension de l'installation photovoltaïque jusqu'au niveau requis en vue de la conversion ultérieure de la tension continue en tension alternative [4] [11].
- **Deuxième étage (Conversion DC/AC) :** Le deuxième étage est chargé de convertir la sortie du premier étage en une forme alternative désirée pour être injectée dans le réseau électrique. Il s'agit de convertir une tension continue régulée en courant alternatif (AC) compatible avec les normes du réseau. Ce convertisseur complète le processus de conversion de l'énergie solaire en une forme utilisable par le réseau électrique, en préparant le courant continu généré par les panneaux solaires pour une injection efficace dans le réseau [11].

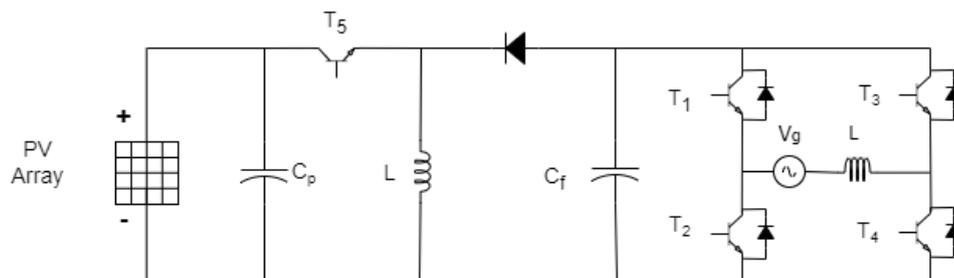


FIG. 1.9 : Système photovoltaïque à deux étages connecté au réseau [4]

### 1.5.3 Les systèmes à un seul étages

Cette configuration (Figure 10) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques reliés au réseau et constitue une méthode simple pour injecter de l'énergie solaire dans le réseau de distribution. Cet étage unique assure le suivi du point de puissance maximale (MPPT) du générateur photovoltaïque et la conversion de la tension de sortie en courant alternatif pour injection dans le réseau [4] [11].

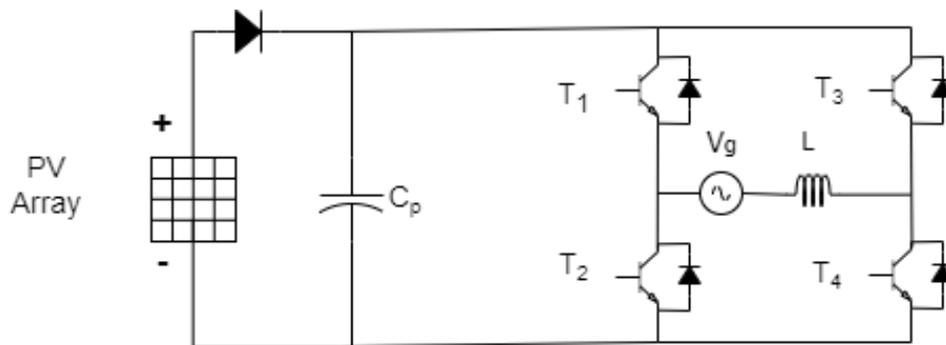


FIG. 1.10 : Système photovoltaïque à un seul étage connecté au réseau [4]

## 1.6 Les convertisseurs électriques statiques

Les convertisseurs électriques statiques sont des dispositifs constitués de semi-conducteurs qui, avec un contrôle approprié, convertissent l'énergie électrique d'une forme à une autre. Ils sont largement utilisés dans divers domaines du génie électrique pour des applications telles que la conversion de type de tension, de fréquence ou de courant.

Les convertisseurs statiques sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour ajuster et convertir la puissance continue générée afin d'alimenter des charges fonctionnant à différentes tensions continue ou pour générer une puissance alternative répondant aux exigences du réseau [4].

Ces convertisseurs sont également utilisés avec une commande pour résoudre des problèmes tels que la transaction de puissance maximale. Il existe deux types de convertisseurs (hacheur DC-DC, Onduleur DC-AC).

### 1.6.1 Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs)

Les hacheurs sont des dispositifs de conversion directe qui fonctionnent en mode continu-continu. Leur utilisation permet un contrôle flexible de la puissance électrique dans les circuits à courant continu. Ils sont constitués de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui contribue aux bons rendements des hacheurs [12] [13].

Le commutateur, généralement un transistor MOSFET, agit en mode bloqué-saturé, minimisant la dissipation de puissance lorsqu'il est bloqué et réduisant la chute de tension lorsqu'il est saturé. La régulation de la tension de sortie est assurée en ajustant le rapport cyclique de l'élément interrupteur. Ainsi, la conversion de puissance se concentre principalement autour des composants de stockage d'énergie tels que les inductances et les condensateurs, en plus des commutateurs eux-mêmes [12].

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, ce convertisseur vise à exploiter le générateur PV à son point de puissance maximal en utilisant une commande MPPT. Il permet également de réguler la valeur moyenne de la tension, puis fournit cette puissance au bus continu, qui constitue l'entrée de l'onduleur [4].

Il existe plusieurs types d'hacheurs, nous citons les plus utilisés couramment [4] [12] :

- Les hacheurs abaisseurs (ou Buck).
- Les hacheurs éleveurs (ou boost).
- Les hacheurs éleveurs- abaisseurs (Buck-boost) capable de fonctionner en mode Buck ou Boost selon le rapport cyclique  $\alpha$  .

Le convertisseur "Boost" présente une diode en série avec le générateur PV, pouvant servir de diode de protection (diode anti-retour). Il est souvent utilisé dans les systèmes alimentés par batterie nécessitant des tensions d'alimentation élevées. Cette configuration permet de réduire le nombre de composants nécessaires pour atteindre la tension requise [4] [12].

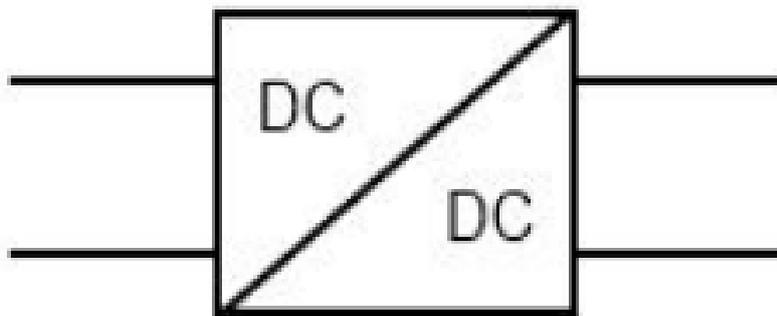


FIG. 1.11 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

### 1.6.2 Les convertisseurs DC/AC (Onduleurs)

Un convertisseur statique (DC/AC) réalise la conversion de l'énergie continue en une forme alternative. L'objectif est d'obtenir une tension de sortie qui ressemble davantage à une sinusoïde, avec un taux d'harmoniques très faible. Ce résultat dépend principalement de la technique de commande appliquée [14].

Les convertisseurs (DC/AC) se distinguent principalement par la configuration de leur étage continu et par le nombre de phases de la source alternative. Lorsque l'étage continu est interprété comme une source de courant, les convertisseurs DC/AC correspondants sont appelés des onduleurs de courant. En revanche, lorsque l'étage continu est perçu comme une source de tension, ils sont nommés des onduleurs de tension. Ces convertisseurs continu-alternatif sont intrinsèquement réversibles en puissance instantanée, ce qui signifie qu'ils peuvent fonctionner dans les deux sens, soit en tant qu'onduleurs lorsque la source continue fournit une puissance moyenne non nulle à la source alternative, soit en tant que redresseurs dans le cas contraire [14].

Ce dispositif est employé dans les systèmes photovoltaïques pour transformer le courant continu produit par le générateur PV en courant alternatif. Il utilise des interrupteurs électroniques capables de commuter des valeurs élevées de courant et de tension à des fréquences de découpage allant jusqu'à plusieurs dizaines de kHz, tout en étant capables de conduire le courant dans les deux sens. Ce jeu de commutation des interrupteurs est réalisé par des commandes MLI [4].

Les onduleurs de tension connectés au réseau se divisent principalement en deux catégories en fonction de la puissance à injecter : l'onduleur monophasé et l'onduleur triphasé.

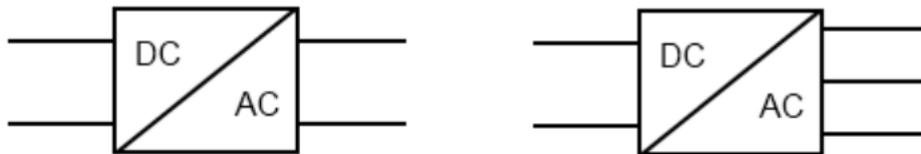


FIG. 1.12 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

## 1.7 Maximisation de la production des systèmes solaires photovoltaïques

La puissance produite par les panneaux photovoltaïques dépend en grande partie du niveau d'ensoleillement, de l'ombre, de la nature de la charge fournie et, dans une moindre mesure, de la température des cellules. Le comportement du système et la position du point de puissance maximale (MPP) sont fortement influencés par les variables, ce qui n'est jamais constant dans le temps [15][16].

Afin de toujours faire fonctionner les panneaux photovoltaïques à la puissance maximale disponible à ces bornes, des tensions et courants spécifiques et bien définis sont nécessaires, et une étape d'adaptation (convertisseur statique) doit être utilisée entre le panneau photovoltaïque et la charge [15] [16].

C'est dans ce contexte que le suivi du point de puissance maximale (MPPT) joue un rôle essentiel. En ajustant continuellement les paramètres de fonctionnement, le système est maintenu au point de puissance maximale, garantissant ainsi une efficacité de

conversion de puissance maximale et convertissant l'énergie solaire en énergie électrique [15].

### 1.7.1 Techniques de poursuite du point de Puissance maximale MPPT

L'optimisation du point de fonctionnement des systèmes photovoltaïques pose un défi majeur en raison de la forte dépendance des caractéristiques des cellules solaires à l'irradiation et à la température. Par conséquent, une méthode de contrôle capable de maintenir en permanence le point de fonctionnement optimal est cruciale. Cette approche est souvent appelée Maximum Power Point Tracking (MPPT) dans la littérature [15].

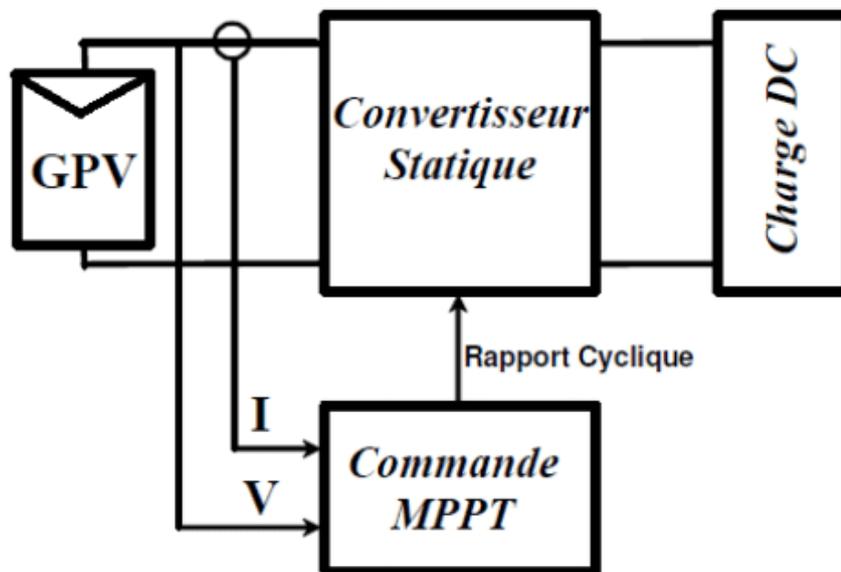


FIG. 1.13 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

La commande MPPT, associée à une phase d'adaptation intermédiaire, permet de fonctionner les générateurs photovoltaïques à produire en permanence une puissance maximale quelles que soient les conditions météorologiques (température et éclairage) et la charge. Ces méthodes de maximisation de la puissance se répartissent en deux catégories :

\* Les méthodes directes.

\* Les méthodes indirectes.

- **Les méthodes directes** : méthodes directes dans le Maximum Power Point Tracking (MPPT) sont en effet basées sur l'utilisation de mesures en temps réel pour ajuster les paramètres de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (tension, courant, etc ..) afin de maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en puissance électrique. Ces méthodes sont conçues pour être rapides, efficaces et qui s'appuient sur des algorithmes qui s'adaptent aux différentes conditions d'éclairage solaire et ne nécessitent pas de connaissance préalable des caractéristiques spécifiques du GPV. On peut citer parmi ces méthodes [16] :

\* Méthode Perturbation et Observation (P & O).

\* L'incrément de conductance.

- **Les méthodes indirectes** : Les méthodes indirectes de la technologie MPPT consistent à utiliser des équations mathématiques empiriques pour aider à estimer le point de puissance maximale d'un panneau solaire. Ces équations sont généralement spécifiques à chaque type de panneau solaire, prenant en compte des paramètres tels que la résistance interne du panneau, la température, l'irradiation solaire, etc. Cela

signifie que ces méthodes sont souvent adaptées individuellement à chaque type de panneau solaire et sont difficiles à généraliser à un usage général[14][20]. On peut citer parmi ces méthodes :

- \* Méthode d'ajustement de courbe.
  - \* Méthode « look-up table ».
  - \* Méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
  - \* Méthode de courant de court-circuit.
- **Les méthodes d'intelligence artificielle** : Les deux types de méthodes les plus utilisées sont [17] :
    - \* **L'utilisation des réseaux de neurones artificiels** : Cette méthode est capable de suivre efficacement le maximum global dans toutes les conditions d'ensoleillement. Son avantage réside dans sa capacité à adapter l'utilisation de ses paramètres d'entrée en fonction des conditions environnementales, ce qui lui permet d'optimiser sa performance.
    - \* **L'utilisation des contrôleurs de logique floue** : La méthode utilisant les contrôleurs de logique floue assure une convergence rapide et précise même en cas de variations abruptes de l'ensoleillement. Son principal avantage réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas de modélisation mathématique préalable du système.
  - **L'approche méta heuristique** : Cette approche propose diverses techniques, telles que l'Adaptive Perceptive PSO, qui est une amélioration du Particle Swarm Optimization (PSO) permettant de réduire l'erreur. La méthode Fibonacci Search, basée sur la séquence de Fibonacci, est reconnue pour sa rapidité, mais peut échouer dans les cas de courbes comportant plusieurs maximums. Le Modified Firefly Algorithm permet de réduire significativement le temps de suivi du maximum global, bien que son efficacité soit légèrement inférieure à celle de l'algorithme Firefly. D'autres techniques citées dans la littérature comprennent l'Evolutionary Algorithm, le Genetic Algorithm et le Differential Evolution [17] [18].

### 1.8 La stratégie Boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop (PLL))

Le fonctionnement efficace du réseau électrique public repose sur des normes strictes régissant ses caractéristiques fondamentales telles que l'amplitude, la fréquence et la phase. Toutefois, pour injecter de l'énergie photovoltaïque dans le réseau, il faut que la tension de sortie de l'onduleur (AC) soit synchronisée avec celle du réseau. Cela implique que la tension de sortie de l'onduleur doit avoir le même déphasage et la même fréquence que celle du réseau. Cette synchronisation est généralement réalisée en déterminant l'angle de phase de la tension à partir d'une mesure du réseau. Un des algorithmes couramment utilisés à

cette fin est la **Boucle de Verrouillage de Phase (PLL)**, qui permet d'extraire cet angle de phase de la tension du réseau. Cet angle est ensuite utilisé dans les boucles de contrôle du courant et de la tension de sortie de l'onduleur. En plus de la PLL, d'autres algorithmes comme la détection de passage par zéro peuvent être employés pour cette synchronisation [4] [19].

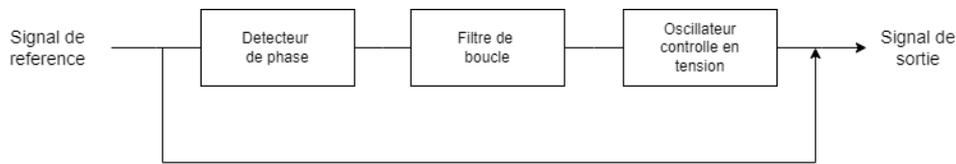


FIG. 1.14 : Structure générale d'une PLL[19]

la boucle à verrouillage de phase, ou boucle à phase asservie est un outil puissant pour stabiliser et synchroniser la phase instantanée de sortie sur la phase instantanée d'entrée, La PLL comprend trois composants principaux [4] [19] :

- Le détecteur de phase : Il utilise la fonction arctangente et la transformation des tensions dans le repère dq pour déterminer la différence de phase entre le signal de référence et le signal de sortie. Cette différence de phase peut également être déduite indirectement lorsque la composante en quadrature de la tension est nulle, ce qui signifie que la différence de phase est nulle.
- Le filtre de boucle : Ce composant agit comme un régulateur, ajustant l'erreur de phase entre la phase du réseau et celle estimée par le PLL à zéro. Généralement, il s'agit d'un régulateur PI, mais dans certains cas nécessitant une dynamique accrue, des régulateurs d'ordre supérieur peuvent être utilisés.
- L'oscillateur contrôlé en tension : Il s'agit essentiellement d'un simple intégrateur qui calcule la pulsation et l'angle estimés du signal d'entrée à partir de la pulsation du réseau.

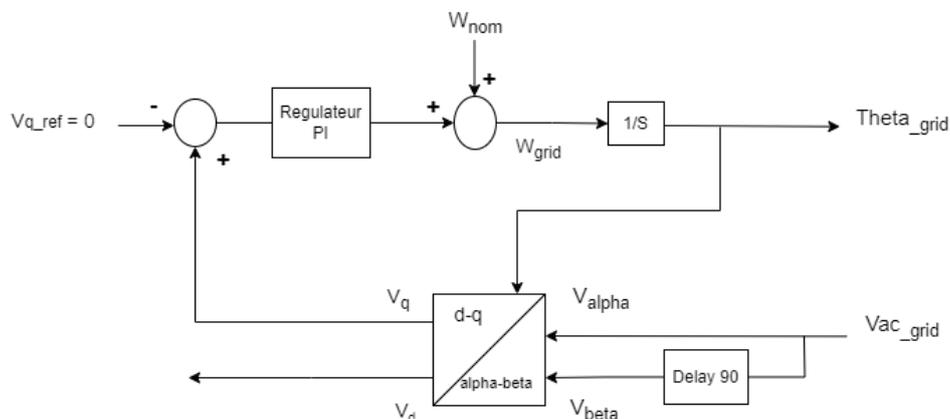


FIG. 1.15 : Modèle de la PLL [19]

### 1.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a constitué une exploration des bases essentielles des systèmes photovoltaïques. Nous avons entamé notre parcours en analysant l'effet photovoltaïque ainsi que le fonctionnement intrinsèque des cellules solaires, suivi d'une étude des caractéristiques fondamentales des cellules PV. Par la suite, nous avons abordé les différentes architectures et topologies des systèmes PV connectés au réseau électrique, puis les divers systèmes de conversion utilisés dans ces installations, notamment les convertisseurs DC/DC (hacheurs) et les convertisseurs DC/AC (onduleurs). Enfin, nous avons également abordé les stratégies de maximisation de la production des systèmes PV et les méthodes de synchronisation de phase PLL. Ce chapitre nous fournit ainsi une base solide pour comprendre en profondeur les systèmes photovoltaïques et nous prépare à approfondir nos connaissances dans les chapitres à venir.

# Chapitre 2

modélisation et simulation d'un système  
photovoltaïque muni d'une commande MPPT

## 2.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques présentent des caractéristiques IV non linéaires, leur point de puissance maximale (PPM) dépendant des niveaux d'irradiation solaire et de la température des cellules. Cependant, lorsqu'un GPV est directement connecté à une charge, il peut y avoir un écart important entre la puissance potentielle du générateur et la puissance réellement délivrée à la charge en raison de ces caractéristiques non linéaires.

Afin de surmonter ce problème et extraire la puissance maximale disponible du GPV, la technologie consiste à utiliser un étage adaptatif, généralement contrôlé par la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette approche vise à optimiser en permanence les conditions de fonctionnement du GPV pour le maintenir à PPM quels que soient les changements des conditions environnementales et des caractéristiques de charge.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail la modélisation des panneaux solaires en analysant les effets de divers paramètres tels que la température et l'irradiation. Nous nous concentrerons également sur l'utilisation d'un hacheur DC/DC comme composant clé de l'étage d'adaptation, qui convertit efficacement la tension GPV en une tension adaptée à la charge tout en maintenant le système en PPM. Enfin, nous passerons en revue la méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) telle que la méthode de perturbation et d'observation (P&O), qui est largement utilisée pour ajuster dynamiquement les paramètres du hacheur DC/DC afin de maintenir le GPV à son PPM et d'optimiser la production d'énergie solaire.

## 2.2 Modélisation du champ PV

Le champ photovoltaïque (PV) est constitué de plusieurs modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance requise. Chaque module est composé de cellules photovoltaïques individuelles. Ainsi, afin de modéliser avec précision un champ photovoltaïque, nous devons commencer par examiner l'élément fondamental, à savoir la cellule photovoltaïque [20].

Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule : on a le modèle à une diode, à deux diodes, et à trois diodes [20].

Le modèle à une diode présente un équilibre idéal entre simplicité et précision, ce qui le rend particulièrement adapté à notre analyse. Il est composé de plusieurs éléments, notamment le photo-courant, la diode, la résistance en parallèle et la résistance en série, comme l'indique (la figure 2.1) .

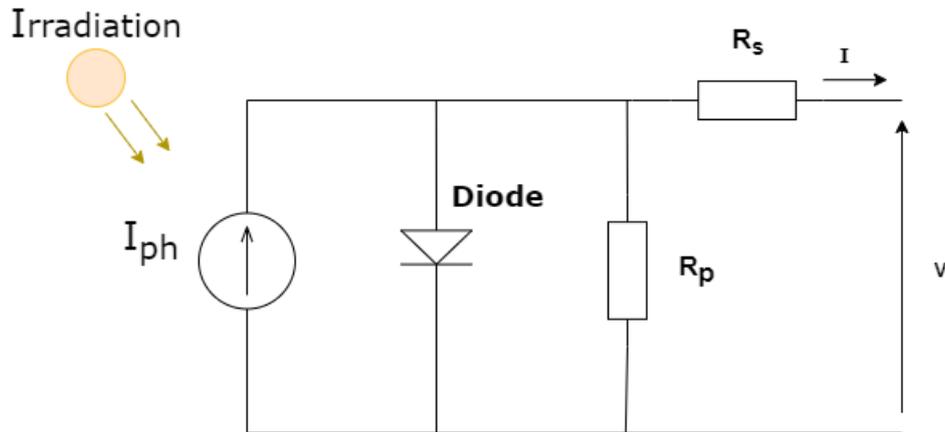


FIG. 2.1 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [20]

Ce modèle permet de déterminer le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque en utilisant l'équation suivante :

$$I = I_{Ph} - I_D - I_p \quad (2.1)$$

Avec :

- \*  $I$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque.
- \*  $I_{Ph}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
- \*  $I_D$  : le courant qui circule à travers la diode.
- \*  $I_p$  : le courant qui circule à travers la résistance shunt.

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{K \cdot T \cdot \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.2)$$

Avec :

- \*  $I_0$  : le courant de saturation.
- \*  $K$  : constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J / K).
- \*  $q$  : charge d'électrons ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).
- \*  $\alpha$  : le facteur d'idéalité de la diode.

Les expressions du photo-courant et du courant de saturation sont données par les équations (2.3) et (2.4).

$$I_{Ph} = (I_{sc} + K_i \cdot (T - T_{ref})) \cdot \frac{G}{G_n} \quad (2.3)$$

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left( \frac{q \cdot E_g \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{K \cdot \alpha} \right) \quad (2.4)$$

- \*  $I_{sc}$  : le courant de court-circuit de la cellule à 25 C° et 1000W/m<sup>2</sup>.
- \*  $K_i$  : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule.
- \*  $E_g$  : L'énergie de bande interdite du matériau semi-conducteur (en électron-volts, eV).
- \*  $T_{ref}$  : t la température de référence de la cellule, en Kelvin ( $K$ ) (= 25C° + 273).
- \*  $G$  : l'irradiance solaire en watt /mètre carré ( $W/m^2$ ).
- \*  $G_n$  : l'irradiance solaire nominale.

Le courant de saturation inverse est donné par l'équation suivante :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot K \cdot T \cdot \alpha} \right) - 1}$$

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV est donnée par l'équation (2.5).

$$I = N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + (R_s N_{ss}/N_{pp})I)}{KT\alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + (R_s N_{ss}/N_{pp})I}{R_p N_{ss}/N_{pp}} \quad (2.5)$$

- \*  $N_{ss}$  : Le nombre de cellules photovoltaïques connectées en série.
- \*  $N_{pp}$  : Le nombre de cellules photovoltaïques connectées en parallèle.

## 2.3 Simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Nous avons exploité le module photovoltaïque APOS Energy AP 215M, comprenant 60 cellules solaires en silicium polycristallin connectées en série, offrant une capacité de production maximale de 222.39 watts.

Nous avons effectué une simulation de générateur photovoltaïques (GPV) pour analyser et comprendre son fonctionnement. Pour ce faire, nous avons programmé les équations du modèle à l'aide de Matlab Simulink. À l'aide du module mathématique de la cellule photovoltaïque à cinq paramètres, nous avons développé un schéma fonctionnel Simulink pour montrer en détail les différents aspects d'un générateur photovoltaïque.

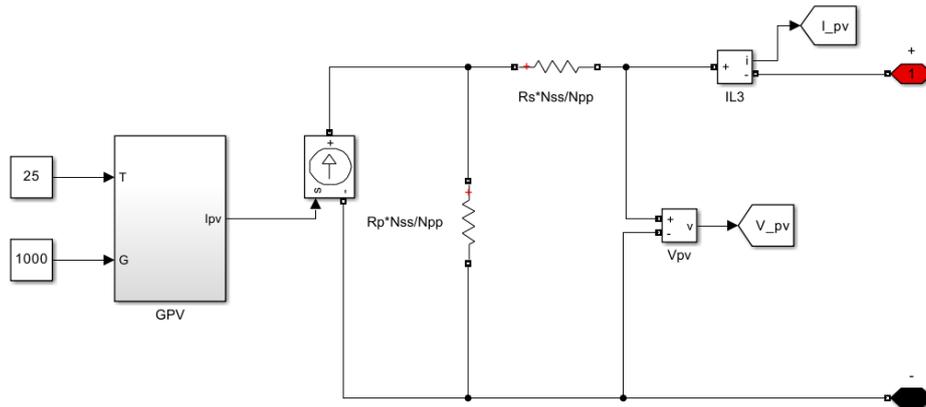


FIG. 2.2 : modèle équivalent d'un champ PV sous Simulink

## 2.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Généralement représentées par sa courbe I-V (intensité-tension) et sa courbe P-V (puissance-tension).

### 2.4.1 Courbe I-V (Intensité-Tension)

La courbe I-V montre comment l'intensité change avec la tension et elle permet de déterminer le point de fonctionnement de la cellule.

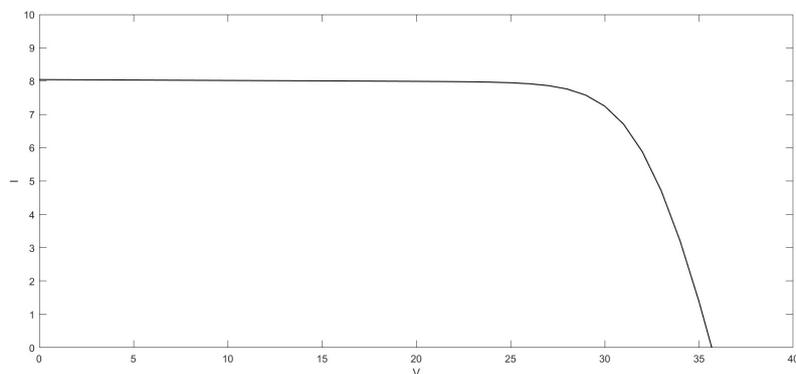


FIG. 2.3 : caractéristique I-V d'une cellule

Le modèle simule le courant et la tension générés par le module dans des conditions de température constante de  $25C^{\circ}$  et d'éclairage solaire de  $1000W/m^2$ . En analysant les caractéristiques courant-tension des cellules photovoltaïques, nous avons observé une étape initiale où le courant reste constant jusqu'à un certain point de tension. Ensuite, le courant diminue rapidement jusqu'à atteindre zéro. Cette propriété souligne l'importance de comprendre le comportement non linéaire des cellules photovoltaïques pour une utilisation efficace de l'énergie solaire.

### 2.4.2 Courbe P-V (Puissance-Tension)

La courbe P-V montre comment la puissance varie en fonction de la tension, et elle permet de déterminer le point de puissance maximale ( $P_{max}$ ) de la cellule.

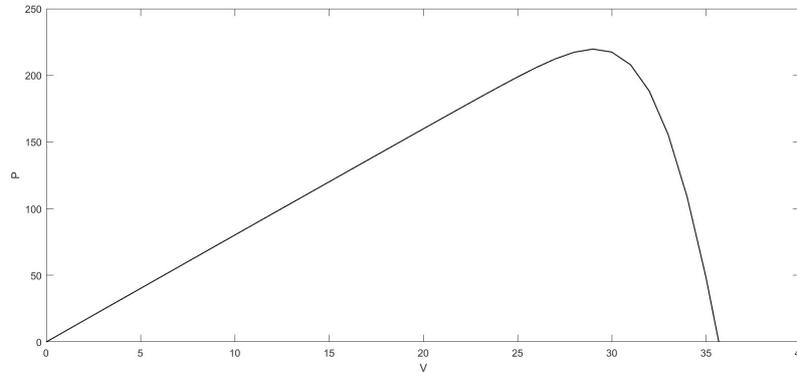


FIG. 2.4 : caractéristique P-V d'une cellule

Le module simule la relation entre la puissance produite par le module et la tension, toujours à la même température et éclairage fixes. En analysant les caractéristiques puissance-tension (P-V) des cellules photovoltaïques, nous avons observé que la puissance augmente initialement linéairement avec la tension, atteignant un pic maximum. Au-delà de ce point, la puissance chute rapidement jusqu'à atteindre zéro. Cette propriété met en évidence l'importance de comprendre la relation entre la tension et la puissance pour optimiser l'efficacité du système photovoltaïque.

## 2.5 Influence de la température et de l'éclairement

La température et l'irradiation solaire sont des facteurs clés affectant les performances des panneaux solaires. Il est essentiel de les prendre en compte lors de la conception et de l'installation des systèmes photovoltaïques afin d'optimiser leurs performances.

### 2.5.1 Influence de la température

Une augmentation de la température entraîne généralement une diminution de la tension en circuit ouvert et une légère augmentation du courant de court-circuit (Figure 2.5), ce qui peut avoir un impact négatif sur la puissance maximale produite par une cellule photovoltaïque (Figure 2.6).

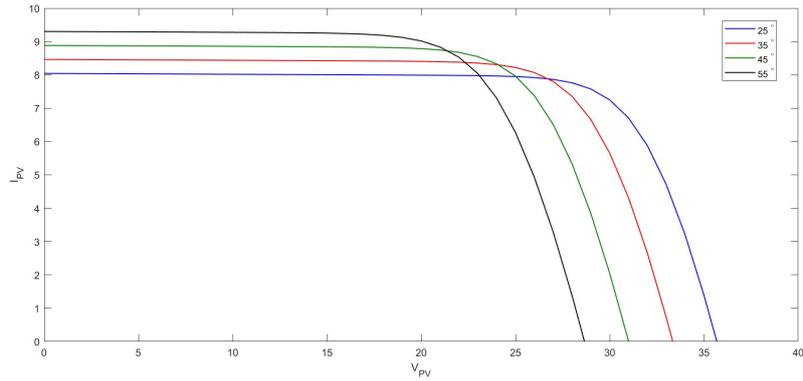


FIG. 2.5 : Influence de température sur les caractéristiques I-V

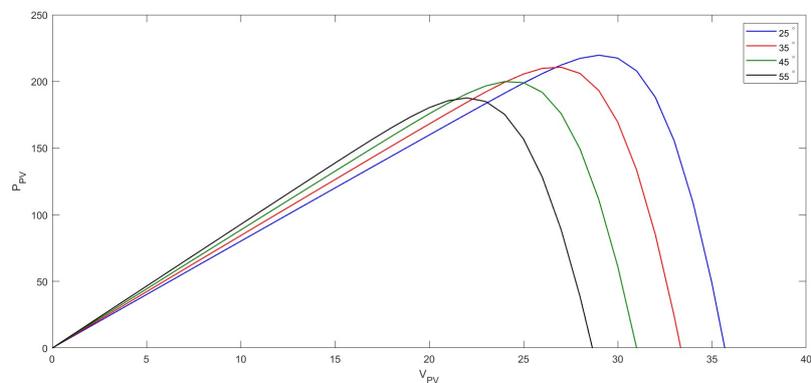


FIG. 2.6 : Influence de température sur les caractéristiques P-V

### 2.5.2 Influence de l'éclairement

L'éclairement solaire affecte directement le processus de génération de courant et de tension au sein d'une cellule photovoltaïque en affectant le nombre de photons absorbés, et donc la génération de porteurs de charge. Ces facteurs déterminent les caractéristiques électriques de la cellule, telles que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et la puissance maximale produite.

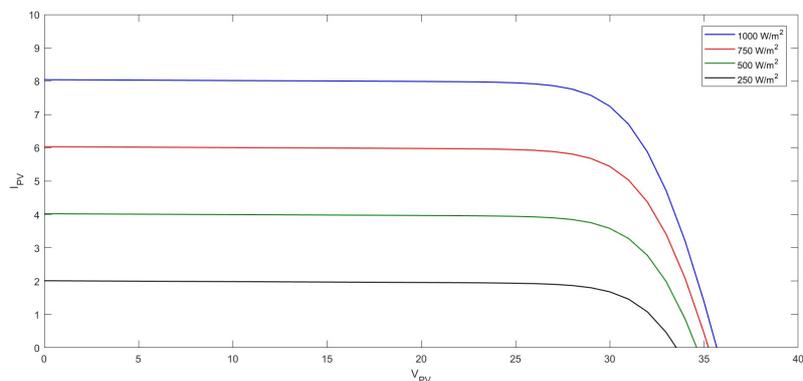


FIG. 2.7 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V

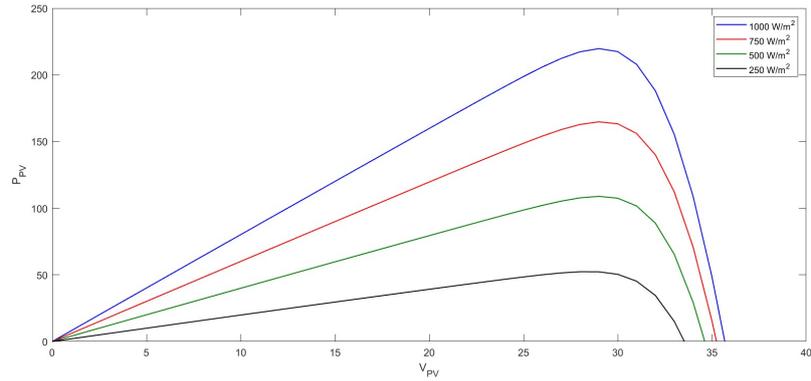


FIG. 2.8 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques P-V

## 2.6 Modélisation du convertisseur boost

Les convertisseurs DC/DC jouent souvent le rôle d'augmenter la tension du courant continu généré par les panneaux solaires. Cette augmentation de tension est nécessaire pour que l'onduleur puisse produire un courant sinusoïdal à la tension du réseau, permettant un transfert d'énergie efficace entre les deux étages de conversion [11].

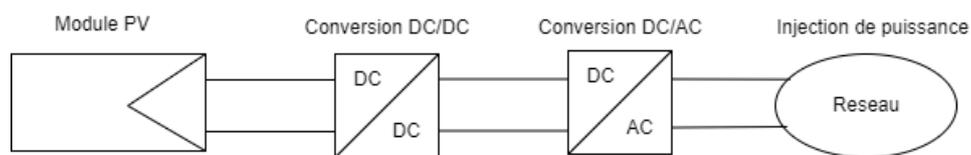


FIG. 2.9 : Schéma bloc d'une chaîne de conversion à deux étages

La topologie qui répond efficacement à ce besoin est la topologie BOOST. Cette configuration est couramment utilisée pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [21].

Le convertisseur BOOST est connu par le nom d'élévateur de tension, Il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute, peut être représenté par le circuit donné par la Figure 2.10 [22].

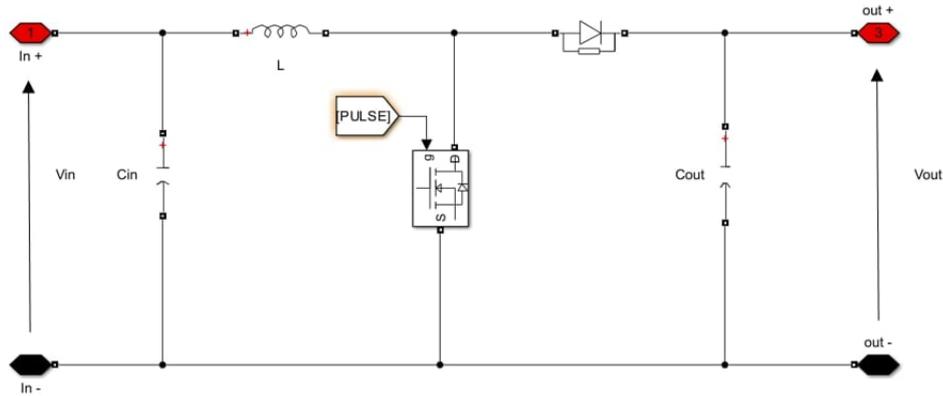


FIG. 2.10 : Schéma de simulation d'un hacheur boost

### 2.6.1 Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement du convertisseur boost, il est nécessaire de présenter le schéma de circuit équivalent pour chaque position du commutateur K.

- État passante : Mosfet : ON , Diode : OFF :

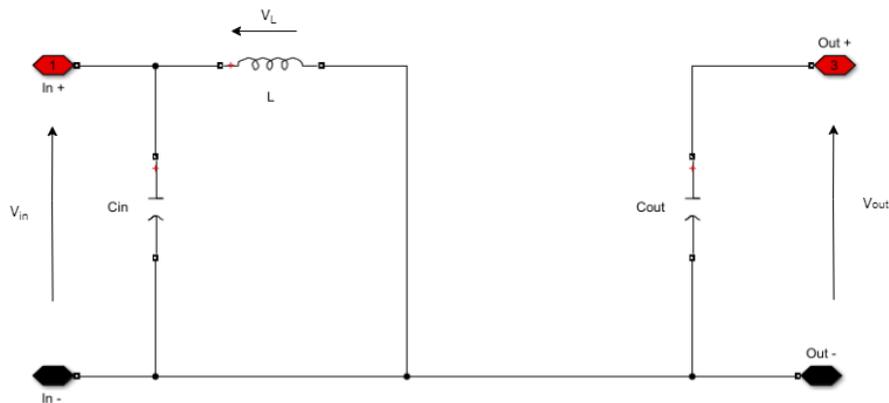


FIG. 2.11 : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé

$$V_{in} - V_L = 0$$

$$V_{in} = V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2.6)$$

$$V_{out} - V_{Cout} = 0$$

$$i_{C_{out}} = C_{out} \cdot \frac{dV_{out}}{dt} = -\frac{V_{out}}{R}$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = -\frac{V_{out}}{R \cdot C_{out}} \quad (2.7)$$

- État bloqué : Mosfet : OFF , Diode : ON :

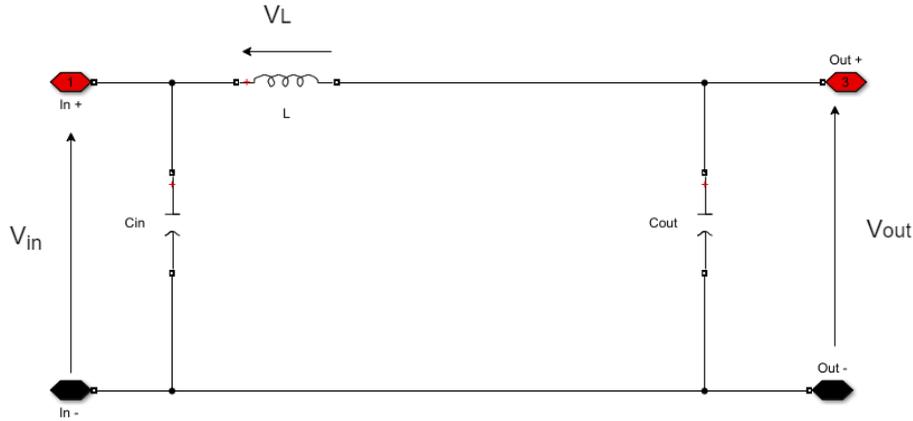


FIG. 2.12 : Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert

$$V_{in} - V_L - V_{out} = 0$$

$$V_L = V_{in} - V_{out}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (2.8)$$

$$i_{C_{out}} = i_L - i_R$$

$$C_{out} \cdot \frac{dV_{out}}{dt} = i_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (2.9)$$

Nous avons appliqué le principe de Balance des Volts au niveau de l'inductance :

$$\frac{V_{in}}{L} D \cdot T_s + \frac{V_{in} - V_{out}}{L} (1 - D) \cdot T_s = 0$$

ou :

\*  $D$  : le rapport cyclique.

\*  $T_s$  : la durée totale d'un cycle de commutation.

$$V_{in} \cdot D + (V_{in} - V_{out}) \cdot (1 - D) = 0$$

$$V_{in} - V_{out} \cdot (1 - D) = 0$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (2.10)$$

## 2.6.2 Dimensionnement des parametres d'un hacheur boost

- **L'inductance  $L$**  : L'inductance  $L$  joue un rôle essentiel dans le convertisseur élévateur, assurant le stockage de l'énergie électrique et lissant le courant qui le traverse. Cependant, ce courant a généralement des ondulations, et represente par l'équation suivante :

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (2.11)$$

à  $t = DT_s$  :

$$I_{Lmax} = \frac{V_{in}}{L} \cdot DT_s + I_{Lmin}$$

Donc l'expression de  $\Delta I_L$  est donnée par equation (2.12) :

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot V_{in}}{L \cdot f_s} \quad (2.12)$$

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot (1 - D) \cdot V_{out}}{L \cdot f_s} \quad (2.13)$$

Cette expression souligne que l'ondulation du courant dans le convertisseur élévateur diminue à mesure que la fréquence de commutation  $f$  ou la valeur de l'inductance  $L$  augmente. En d'autres termes, une augmentation de la fréquence de commutation ou de l'inductance contribue à réduire la variation du courant circulant dans le circuit. Cela contribue à améliorer la stabilité et l'efficacité du convertisseur élévateur, en réduisant les pertes d'énergie et en garantissant un fonctionnement plus fluide [23]. Pour déterminer la valeur de l'inductance  $L$ , nous commencerons par évaluer la valeur minimale de l'ondulation du courant, En résolvant  $\frac{d\Delta I_L}{dD} = 0$ . Nous trouvons que la valeur maximale de  $\Delta I_L$  est pour  $D = \frac{1}{2}$ .

Donc la valeur de l'inductance  $L$  est déterminé par l'inegalité (2.14)

$$L \geq \frac{V_{out}}{4 \cdot f_s \cdot \Delta I_L} \quad (2.14)$$

- **Le condensateur  $C_{out}$**  :Le but du condensateur est d'atténuer l'ondulation du courant et de maintenir une tension relativement stable, produisant ainsi une tension de sortie sinusoïdale. En effet, en absorbant les changements de courant, le condensateur contribue à stabiliser la tension, assurant une sortie plus régulière et plus proche d'une forme sinusoïdale.

$$I_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} \quad (2.15)$$

à  $0 \leq t \leq DT_S$  :  $I_C = I_{out}$ , donc :

$$I_{out} = C \cdot \frac{\Delta V_{out}}{DT_S}$$

$$V_{out} = -\frac{I_{out}}{C} \cdot t + V_{outmax} \quad (2.16)$$

$$V_{out}(DT_S) = V_{outmin} = -\frac{I_{out}}{C} \cdot DT_S + V_{outmax}$$

$$V_{outmax} - V_{outmin} = \frac{I_{out}}{C} \cdot DT_S \quad (2.17)$$

La valeur maximale de l'ondulation de tension est pour la valeur  $D = \frac{1}{2}$  Donc la valeur du condensateur est donnée par l'ingalité (2.18), sachant que :

$$I_{out} = I_{in} \cdot (1 - D)$$

$$C \geq \frac{I_{out}}{4 \cdot f_s \cdot \Delta V_{out}} \quad (2.18)$$

Cette expression souligne que l'ondulation de tension dans le système diminue à mesure que la fréquence de commutation augmente  $f$  ou la valeur du condensateur  $C$  augmente. En d'autres termes, une augmentation de la fréquence de commutation ou de la valeur de capacité contribue à réduire les changements de tension dans le circuit. La réduction de l'ondulation de tension est bénéfique car elle améliore la stabilité et l'efficacité du système. Il contribue également à réduire les pertes d'énergie et garantit un bon fonctionnement et plus efficace du convertisseur élévateur [24].

- **Le condensateur  $C_{in}$**  : un condensateur doit être connecté en parallèle générateurs photovoltaïques qui permettent à la source de fonctionner dans des conditions Semblable à un générateur de tension.

L'évolution de la charge  $Q$  du condensateur change avec le temps. Pendant le processus de charge, la charge  $Q$  augmente progressivement. Ce courant de charge correspond à l'intensité du courant  $I$  circulant dans le circuit. Selon le principe de conservation de la charge, l'intégrale du courant traversant le condensateur pendant toute la durée de commutation est nulle. Cela signifie que la quantité totale de charge entrant et sortant du condensateur pendant la durée de commutation est équilibrée.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s} \quad (2.19)$$

La relation tension charge-tension :

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V \quad (2.20)$$

Donc la valeur de  $C_{in}$  est donnée :

$$C_{in} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_{in} \cdot f_s} \quad (2.21)$$

## 2.7 Le suivi du point de puissance maximale MPPT

La chaîne de conversion d'un GPV se compose d'un système composé de deux étages. Dans la première étage, un convertisseur équipé d'une commande MPPT évalue la tension du GPV à un niveau optimal pour le processus de conversion. Dans la deuxième étage, la puissance continue obtenue est convertie en puissance alternative (voir chapitre 1).

Afin d'atteindre le point de puissance maximale, l'algorithme MPPT peut être complexe, mais il repose généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction des fluctuations des paramètres d'entrée du convertisseur statique (courant photovoltaïque et tension photovoltaïque). Grâce à ce processus, la puissance fournie par le GPV est constamment optimisée, ce qui assure un rendement élevé et stable du système global de conversion de puissance **pastorConceptionRealisationModules**.

L'algorithme MPPT le plus utilisé est la méthode *P&O* (perturbe and observe) que nous allons traiter en détails.

### 2.7.1 Méthode perturbation et observation (*P&O*)

Les commandes MPPT de type Perturb and Observe (*P&O*) fonctionnent en perturbant la tension  $V_{PV}$  d'une petite amplitude autour de sa valeur initiale, puis en analysant la variation de la puissance  $P_{PV}$  qui en découle. Grâce à cette approche, il est possible de déterminer la direction dans laquelle la tension doit être ajustée afin de se rapprocher du point de puissance max (PPM) [20].

De manière concrète, si la tension  $V_{PV}$  augmente de façon croissante, si cela entraîne une augmentation de la puissance  $P_{PV}$ , cela indique que le système est situé du côté gauche du PPM. D'autre part, lorsque la puissance diminue, cela signifie que le système a dépassé la limite de PPM. On applique un raisonnement similaire lorsque la tension  $P_{PV}$  diminue [25].

L'étude des fluctuations de tension et de leur influence sur la caractéristique de puissance  $P_{PV}(V_{PV})$  permet donc de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le faire converger vers la valeur maximale de puissance grâce à une commande adéquate. Grâce à cette méthode, il est possible d'améliorer constamment la production d'énergie du générateur photovoltaïque en surveillant les variations des conditions environnementales.

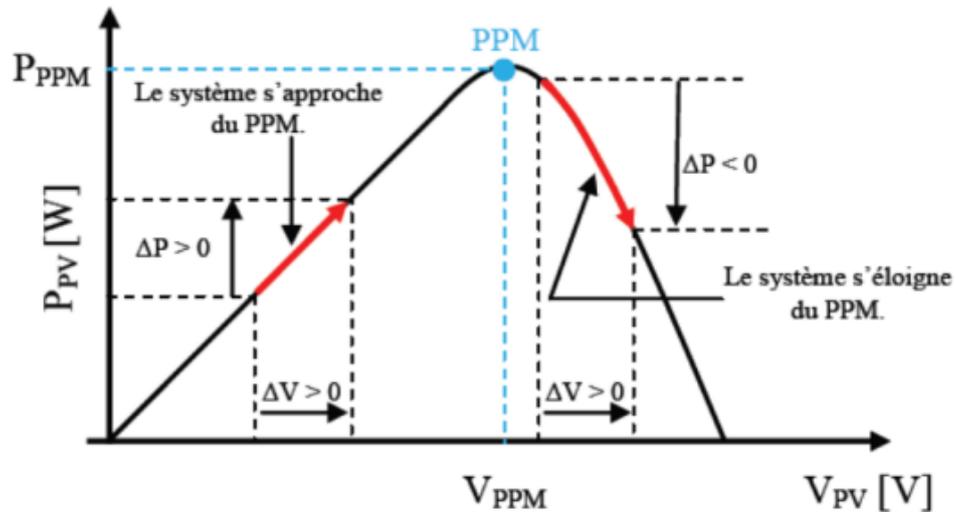


FIG. 2.13 : le principe de fonctionnement de  $P\&O$

Pour ajuster le paramètre de référence du point de puissance maximale (D) en fonction de la variation de la puissance générée par le système, l'algorithme PO utilise deux règles :

- En cas de dérivée positive de la puissance par rapport à la tension ( $\delta P/\delta V$ ), le système se dirige vers un point de puissance maximale. Ainsi, nous ajoutons une certaine valeur ( $\Delta D$ ) au paramètre de référence du point de puissance maximale (D).
- En cas de dérivée négative de la puissance par rapport à la tension ( $\delta P/\delta V$ ), le système s'éloigne du point de puissance maximale. Dans cette situation, on réduit le paramètre de référence du point de puissance maximale (D) en supprimant une valeur spécifique ( $\Delta D$ ).

Le pas d'incrémation est le paramètre D qui gère la variation du paramètre de référence du point de puissance maximale à chaque itération de l'algorithme.

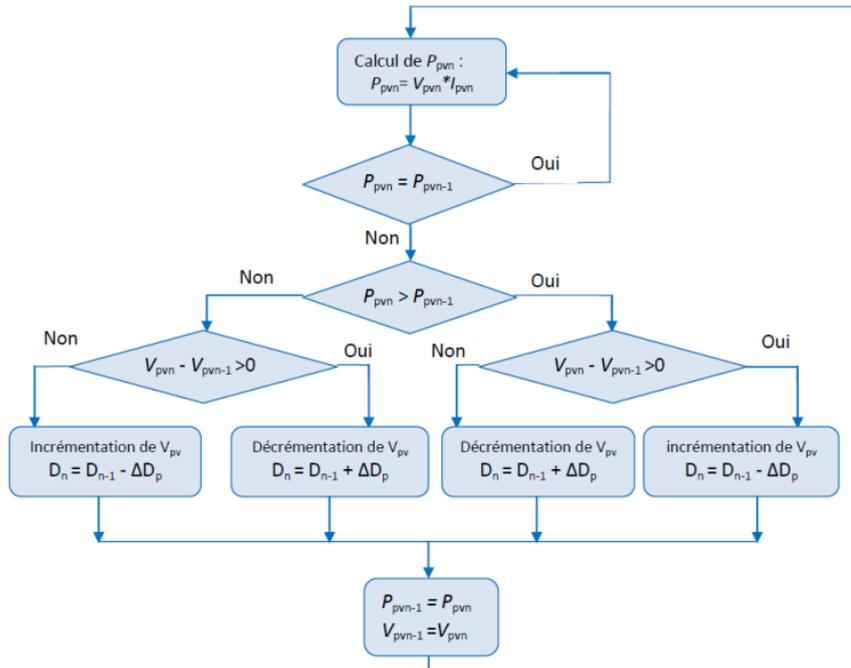


FIG. 2.14 : Organigramme de l'algorithme  $P\&O$

Cette méthode présente de nombreux inconvénients. Parmi les problèmes rencontrés, on retrouve des pertes de puissance causées par les oscillations de l'algorithme autour du point de fonctionnement optimal. De surcroît, elle n'est pas efficace dans des conditions atmosphériques évoluant rapidement, comme les fluctuations de température et d'ensoleillement, ce qui nuit à sa capacité à suivre efficacement la puissance maximale.

Dans le cadre de notre analyse, la figure (2.17) illustre le schéma bloc de la commande MPPT que nous prévoyons de mettre en œuvre

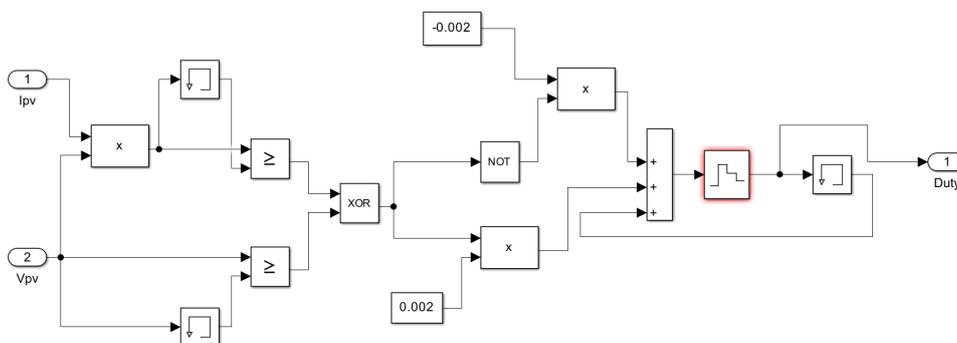


FIG. 2.15 : Simulation de la commande  $P\&O$

## 2.8 Simulation du système muni d'une commande MPPT avec un hacheur boost

Nous entamons une simulation du système afin de vérifier si la maximisation de la puissance est réalisée en utilisant la méthode Perturb and Observe (*P&O*) avec un hacheur boost. Afin de rendre la visualisation des processus de changement d'énergie plus simple et plus facile, nous avons opté pour la simulation du système avec une charge R.

Ci-dessous nous présentons les caractéristiques du module photovoltaïque (APOS Energy AP 215M) équipé de 60 cellules solaires en silicium polycristallin connectées en série dans le tableau suivant :

Caractéristiques électriques	Valeur	Unité
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	222.3972	[W]
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	35.94	[V]
Tension a puissance maximale ( $V_{mpp}$ )	29.34	[V]
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	8.05	[A]
Courant à Puissance maximale ( $I_{mpp}$ )	7.58	[A]

TAB. 2.1 : Les caractéristiques du module PV

### 2.8.1 Dimensionnement des paramètres du hacheur boost

Le rendement du hacheur boost est supposé être de 100 %, de sorte que la puissance de sortie est égale à la puissance maximale du panneau photovoltaïque, comme indiqué à la figure (2.18).

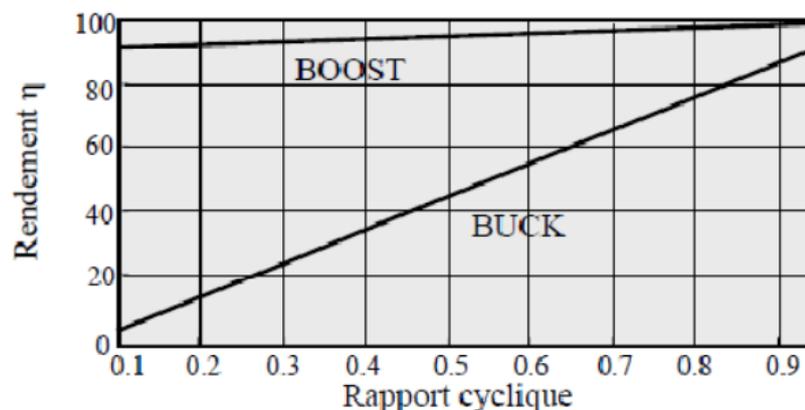


FIG. 2.16 : Rendement des hacheurs Boost et Buck en fonction du rapport cyclique

Nous utilisons les caractéristiques du module photovoltaïque pour évaluer les paramètres du hacheur en présence d'une charge résistive R.

Paramètres	Valeur	unité
$P = P_{PV}$	222.3972	[W]
$V_{in} = V_{mpp}$	29.34	[V]
R	20	[ $\Omega$ ]
$f_s$	1000	[Hz]

TAB. 2.2 : Paramètres du hacheur

- **Le courant de source :**

$$I_L = I_{mpp} = \frac{P_{pv}}{V_{in}}$$

$$I_L = I_{mpp} = 7.58A$$

- **L'ondulation du courant :** Il est important de prendre en considération la valeur d'ondulation autorisée du courant. En général, cette valeur est d'environ 10% du courant nominal.

$$\Delta I_L = 0.1 \cdot I_L$$

$$\Delta I_L = 0.1 \cdot 7.58$$

$$\Delta I_L = 0.758A$$

- **La tension de charge :**

$$V_{out} = \sqrt{R \cdot P_{ch}}$$

$$V_{out} = 66.69V$$

- **L'ondulation de tension :** l'ondulation de tension admissible. Habituellement, cette valeur est estimée à environ 10 % de la tension nominale, cependant dans ce cas, l'ondulation de tension est de 3 % .

$$\Delta V_{out} = 0.03 \cdot V_{out}$$

$$\Delta V_{out} = 0.03 \cdot 66.69$$

$$\Delta V_{out} = 2V$$

- **Le courant de sortie :**

$$I_{out} = \frac{P_{pv}}{V_{out}}$$

$$I_{out} = 3.33A$$

- Le rapport cyclique :

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

$$D = 0.56 = 56\%$$

- L'inductance L :

$$L \geq \frac{V_{out}}{4 \cdot f_s \cdot \Delta I_L}$$

$$L \geq \frac{66.69}{4 \cdot 1000 \cdot 0.758}$$

$$L \geq 21.9mH$$

- Le condensateur de sortie  $C_{out}$  :

$$C_{out} \geq \frac{I_{out}}{4 \cdot f_s \cdot \Delta V_{out}}$$

$$C_{out} \geq \frac{3.33}{4 \cdot 1000 \cdot 2}$$

$$C_{out} \geq 416\mu F$$

- Le condensateur d'entrée  $C_{in}$  :

$$C_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot V_{in}}$$

$$C_{in} \geq 107.64\mu F$$

Nous avons pris les valeurs des composants du boost représenté dans le tableau (2.3) pour assurer un fonctionnement optimal.

Paramètres	Valeur	Unité
$C_{in}$	110	$\mu F$
L	21,9	mH
$C_{out}$	820	$\mu F$

TAB. 2.3 : Les valeurs des paramètres du boost

Nous avons effectué une simulation du système pour observer l'impact des fluctuations d'irradiation sur celui-ci. Il s'agit de s'assurer que le système fonctionne toujours à sa puissance maximale. Afin d'accomplir cela, nous faisons appel à un hacheur boost, qui permet de faire fonctionner le PV à sa puissance maximale et d'augmenter la tension.

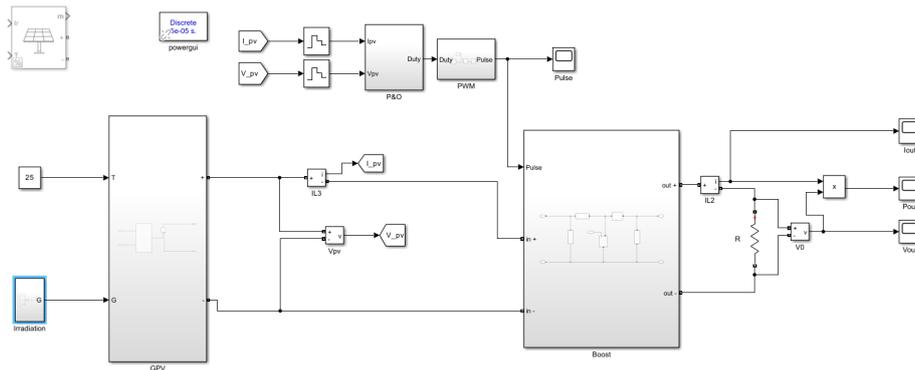


FIG. 2.17 : Systeme PV, BOOST et MPPT

### 2.8.2 Simulation du système

- Grâce à la simulation, nous pouvons constater l'impact des fluctuations d'irradiation sur le système photovoltaïque. L'irradiation solaire fluctue en fonction de facteurs tels que les conditions météorologiques et l'heure de la journée, ce qui a un impact direct sur la production d'énergie des panneaux solaires.

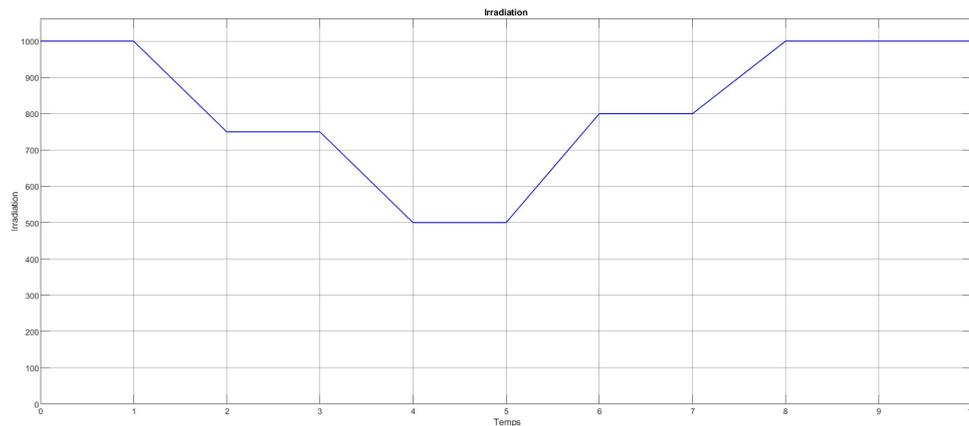


FIG. 2.18 : Profil de l'irradiation

- Le hacheur boost fonctionne grâce à la commutation rapide du MOSFET, ce qui permet de régler de manière précise le rapport cyclique et ainsi d'adapter la tension de sortie en fonction des exigences du système.
- Le hacheur boost est un dispositif qui transforme la tension d'entrée des panneaux solaires en une tension plus élevée. L'amplification de la tension est essentielle afin de garantir une utilisation efficace de l'énergie produite par les panneaux solaires par le reste du système électrique, que ce soit pour le stockage dans des batteries ou pour l'alimentation d'appareils électriques. Les figures (2.21-22) représentent les variations de tension et de courant du panneau en fonction de l'irradiation. On observe clairement que la tension varie légèrement en fonction de l'irradiation, Au contraire Quand l'irradiation baisse, le courant baisse aussi, et quand elle augmente, le courant augmente aussi. En conclu que sous une irradiance plus élevée, le panneau photovoltaïque est capable de générer plus de courant.

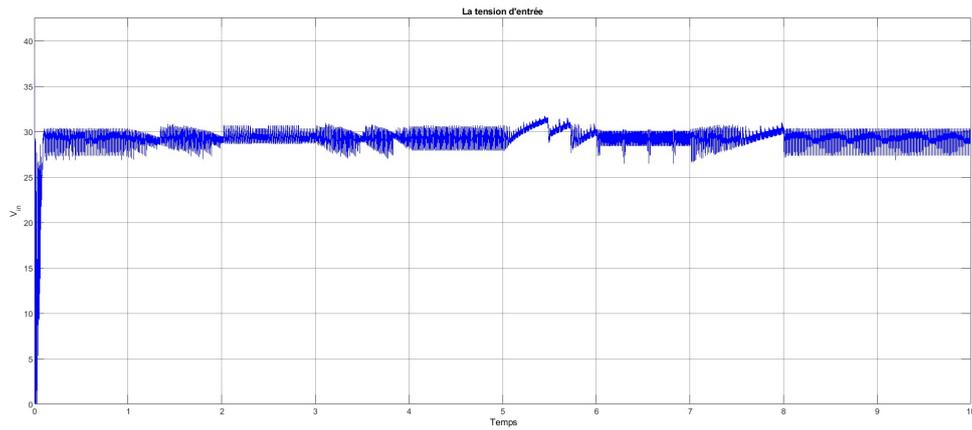


FIG. 2.19 : La tension d'entrée du Hacheur BOOST

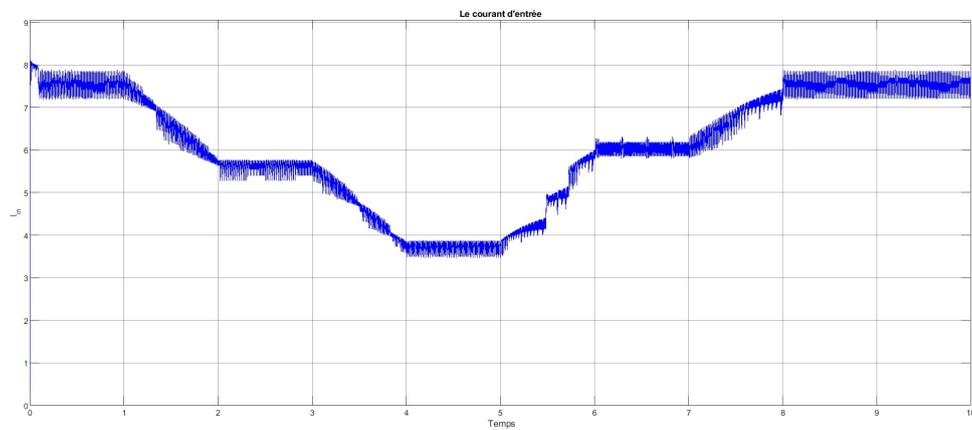


FIG. 2.20 : Le courant d'entrée du Hacheur BOOST

- Les figures (2.23-24) montrent clairement que l'augmentation de l'irradiance entraîne des modifications, Cette modification se traduit par une augmentation de courant et de tension, assurant que le système photovoltaïque reste à son niveau de puissance maximal.

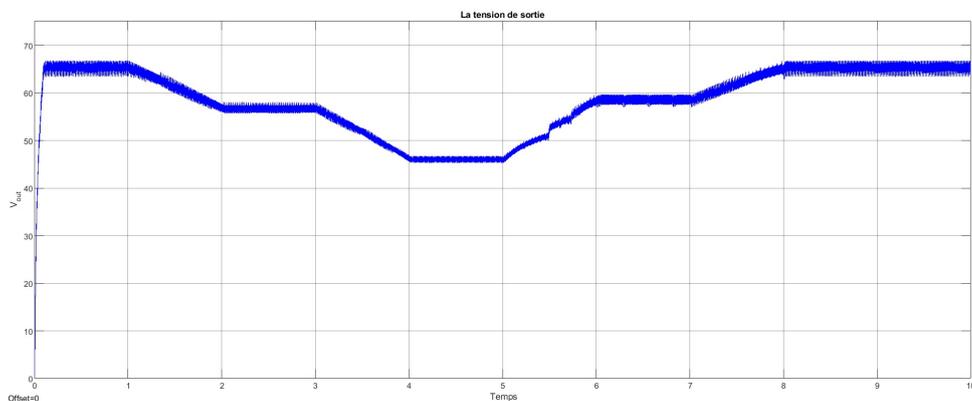


FIG. 2.21 : La tension de sortie du Hacheur BOOST

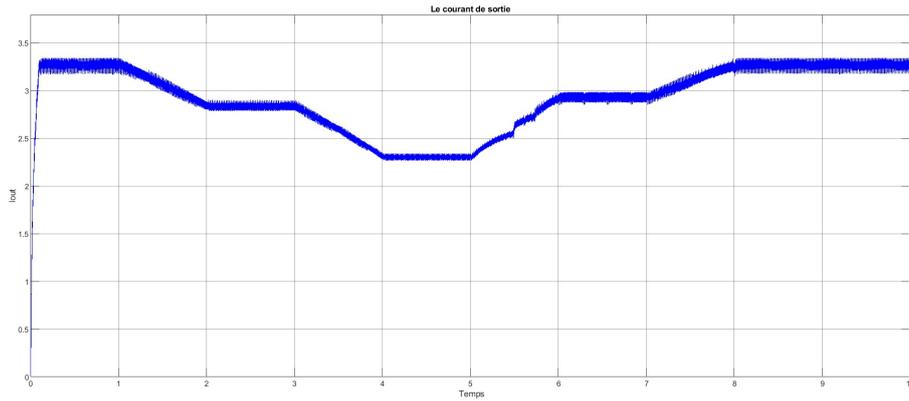


FIG. 2.22 : Le courant de sortie du Hacheur BOOST

- L'objectif du système est de fonctionner à son maximum de puissance (Maximum Power Point - MPP). Cela implique que, même si l'irradiation varie, le système ajuste automatiquement ses paramètres afin d'extraire le plus d'énergie possible, comme illustré par la figure (2.25).

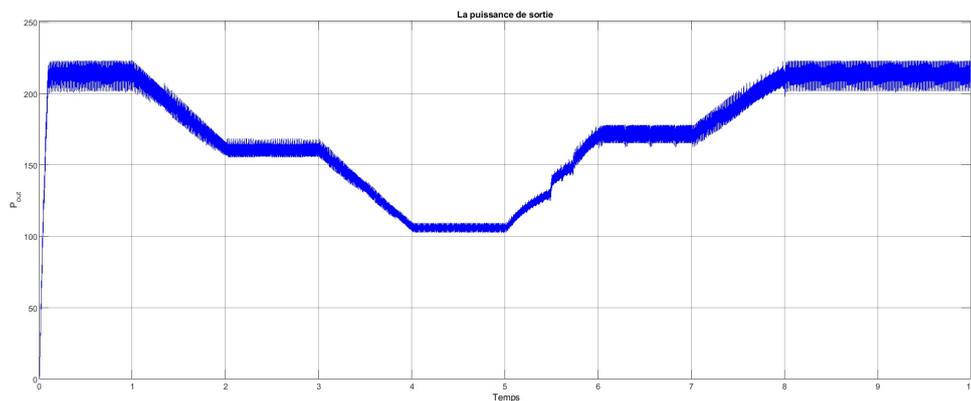


FIG. 2.23 : La variation de puissance du panneau

## 2.9 Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons commencé par représenter une chaîne de conversion qui comprend un panneau solaire et un hacheur boost équipé d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Nous présentons également une méthode pour déterminer les paramètres optimaux du hacheur boost. Finalement, toutes les étapes précédentes sont confirmées et validées à l'aide de simulations effectuées sur MATLAB/Simulink.

# Chapitre 3

## Les onduleurs photovoltaïques et Stratégies de commande

### 3.1 Introduction

La sortie du hacheur boost fournit une tension continue augmentée. Grâce à la commande MPPT, cette tension continue est optimisée afin de maximiser l'extraction d'énergie du panneau solaire.

Afin de transmettre l'énergie générée par un panneau solaire au réseau public, il est essentiel de transformer la puissance continue (DC) en puissance alternative (AC). Il est crucial de procéder à cette conversion car le réseau public utilise uniquement du courant alternatif. Dans cette perspective, il est essentiel d'avoir un onduleur [26].

L'onduleur permet de convertir cette puissance continue en puissance alternative. L'énergie ne pourrait pas être synchronisée avec le réseau public sans cette conversion, ce qui signifie qu'elle ne pourrait pas y être injectée [27].

Dans ce chapitre, nous débuterons par la présentation des différentes topologies des onduleurs solaires, en examinant leurs principaux avantages et inconvénients. Ensuite, nous aborderons le principe de fonctionnement d'un onduleur multi-niveaux dans un système à deux étages. Nous continuerons en exposant les différentes stratégies de commande d'un onduleur NPC (Neutral Point Clamped) à 3 niveaux. Enfin, nous expliquerons le rôle des filtres et leur utilisation pour atténuer les harmoniques, améliorant ainsi la qualité de l'énergie.

### 3.2 Topologies des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau

On peut distinguer quatre types principaux de topologies en fonction de la connexion du générateur photovoltaïque (PV) avec le réseau électrique. Ces structures ont été conçues de la façon suivante :

- \* Onduleur central
- \* Onduleur chaîne
- \* Onduleur multi-chaîne
- \* Onduleur modulaire

#### 3.2.1 Onduleur Central

La configuration la plus courante dans les installations photovoltaïques consiste à utiliser un seul onduleur pour connecter le générateur photovoltaïque au réseau électrique, comme le montre la figure 3.1. Dans cette représentation, les panneaux solaires sont regroupés en chaînes, chaque chaîne générant une tension adéquate pour éviter une amplification supplémentaire. Ensuite, ces chaînes sont connectées en parallèle afin d'obtenir des niveaux de puissance élevés [28].

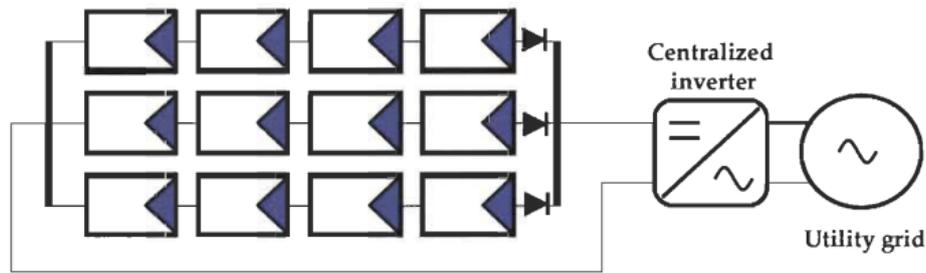


FIG. 3.1 : Topologie d'onduleur central

Cette topologie présente plusieurs avantages, tels qu'un rendement élevé avec des pertes minimales lors de la conversion de puissance, ainsi qu'un coût réduit grâce à l'utilisation d'un seul onduleur. Cependant, elle présente également des désavantages importants. Les pertes de conversion solaire, qui se produisent lorsque les conditions lumineuses changent, et la possibilité d'une interruption de service en cas de panne de l'onduleur [28].

### 3.2.2 Onduleur chaîne

L'installation d'un onduleur de chaîne nécessite l'emploi d'un onduleur pour chaque chaîne de modules photovoltaïques. Par la suite, ces onduleurs sont reliés en parallèle au réseau électrique, comme le montre la figure 3.2 [28].

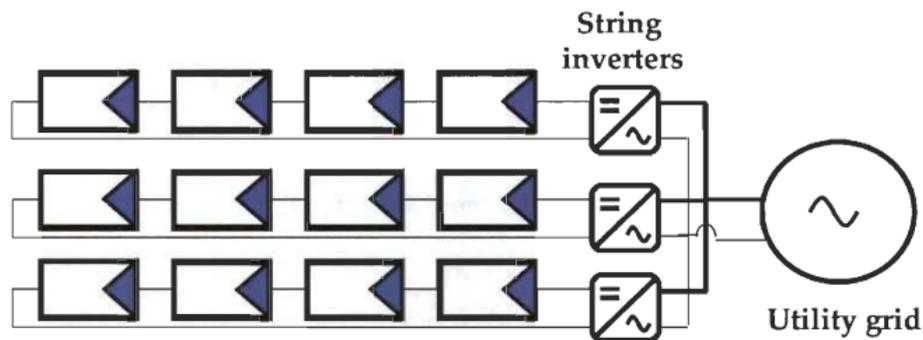


FIG. 3.2 : Topologie d'onduleur chaîne

L'onduleur chaîne est conçu de manière à suivre individuellement le point de puissance maximale (MPPT) pour chaque chaîne de modules PV, ce qui améliore la fiabilité du système par rapport à la configuration de l'onduleur central. Si un onduleur de chaîne tombe en panne, les autres peuvent continuer à alimenter le réseau, ce qui garantit une plus grande résistance. Il est également facile d'adapter cette configuration : l'ajout d'onduleurs de chaîne permet d'accroître la puissance de l'installation. Néanmoins, elle comporte des désavantages, tels qu'un coût initial plus élevé en raison de la nécessité d'installations supplémentaires, une problématique de couplage entre les modules et les onduleurs, ainsi qu'une efficacité diminuée en cas de production d'énergie solaire faible [29].

### 3.2.3 Onduleur multi-chaîne

Comme le montre la figure 3.3, l'onduleur multi-chaînes mixte utilise plusieurs convertisseurs DC-DC reliés à un onduleur central à travers un bus continu. La commande MPPT de chaque convertisseur permet à chaque chaîne de fonctionner à son point de puissance maximale (PPM), ce qui améliore les performances de chaque chaîne. Grâce à cette configuration hybride, les onduleurs de chaîne et les onduleurs centraux sont combinés, ce qui permet de diminuer le coût global tout en maintenant un contrôle individuel du flux d'énergie pour chaque chaîne. Néanmoins, le système perd de sa fiabilité en raison de la topologie de l'onduleur de chaîne, et les pertes des convertisseurs DC-DC sont ajoutées aux pertes globales du système[29].

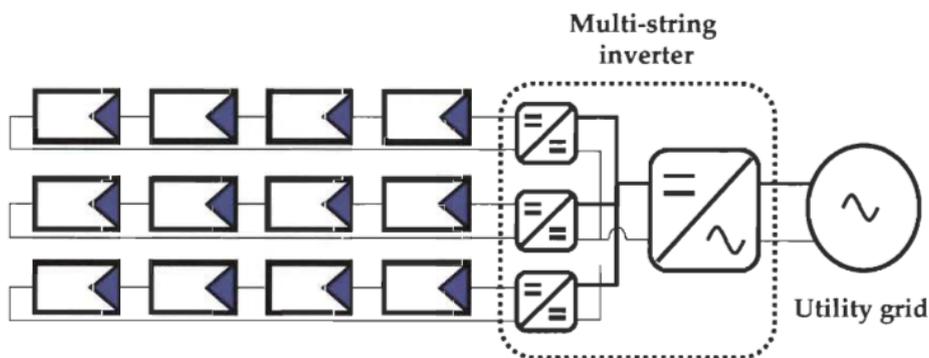


FIG. 3.3 : Topologie d'onduleur multi-chaîne

### 3.2.4 Onduleur modulaire

chaque module solaire est muni d'un onduleur individuel. Tous ces onduleurs sont reliés en parallèle sur le côté du courant alternatif dans les installations de grande envergure, comme le montre la figure 3.4. L'installation des onduleurs modulaires près de chaque module solaire permet d'optimiser localement la conversion de puissance et de diminuer les pertes liées au transport de l'énergie en courant continu sur de longues distances. La fiabilité du système global est également améliorée grâce à cette disposition, car une panne d'un onduleur n'a pas d'impact sur le fonctionnement des autres modules[30].

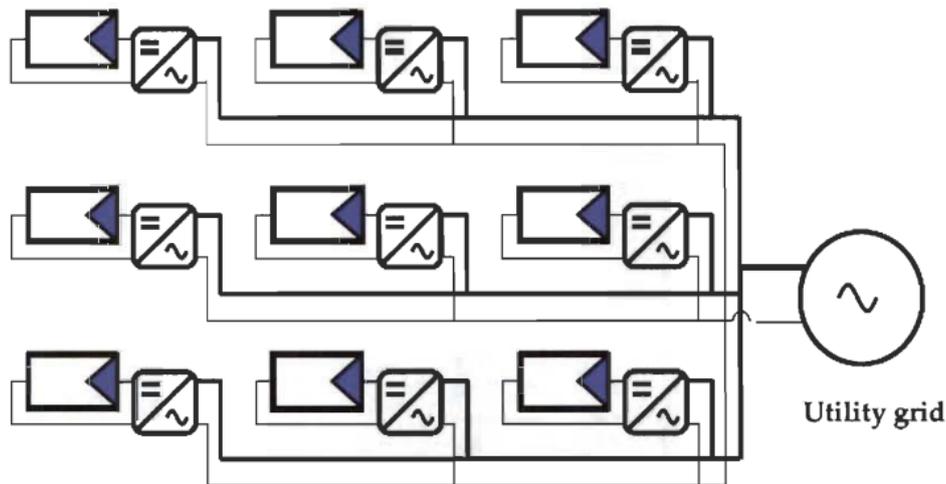


FIG. 3.4 : Topologie d'onduleur modulaire

Le rendement de cette configuration est supérieur à celui de l'onduleur de chaîne, car chaque module solaire possède son propre MPPT, ce qui permet d'optimiser les performances de chaque module individuellement. Toutefois, cette configuration ne convient qu'aux applications de faible puissance (jusqu'à 500 W) et a un coût assez élevé [30].

### 3.3 Onduleurs dans les Systèmes Photovoltaïques à Deux Étages

Dans un système photovoltaïque à deux étages, le premier étage est conçu pour optimiser la performance du module PV en le faisant fonctionner à sa puissance maximale, grâce à un convertisseur DC-DC (chapitre 2). Cependant, nous nous concentrerons sur le deuxième étage, l'onduleur, dont la principale fonction consiste à transformer le courant continu (DC) produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif (AC). Cette conversion est essentielle pour l'intégration de l'énergie solaire dans le réseau électrique.

Les onduleurs peuvent être monophasés, triphasés ou multi-niveaux. Les onduleurs monophasés sont adaptés aux petites installations résidentielles ou commerciales, tandis que les onduleurs triphasés sont utilisés dans les applications industrielles pour gérer des charges plus élevées et offrir une meilleure efficacité énergétique. Les onduleurs multi-niveaux sont particulièrement efficaces pour les systèmes de grande puissance, car ils réduisent les distorsions harmoniques et améliorent la qualité de la tension. Dans notre travail, nous avons choisi un onduleur triphasé 3-niveaux pour mieux refléter les conditions réelles d'intégration au réseau électrique et répondre aux exigences des grandes installations photovoltaïques.

### 3.4 Onduleurs Multi-niveaux

Un onduleur est dite "multi-niveaux" lorsqu'il produit une tension de sortie avec au moins trois niveaux distincts, cette architecture devient particulièrement importante pour les applications de tension moyenne et de puissance élevée. Dans ces contextes, la connexion directe d'un seul commutateur à semi-conducteur de puissance est difficile en raison des contraintes électriques élevées. Les onduleurs multi-niveaux résolvent ce défi en utilisant un ensemble de semi-conducteurs de puissance et de sources de tension à base de condensateurs, avec  $(N - 1)$  sources de tension de valeur  $\frac{V_{DC}}{N-1}$  (où  $N$  est le nombre de niveaux du convertisseur) [30].

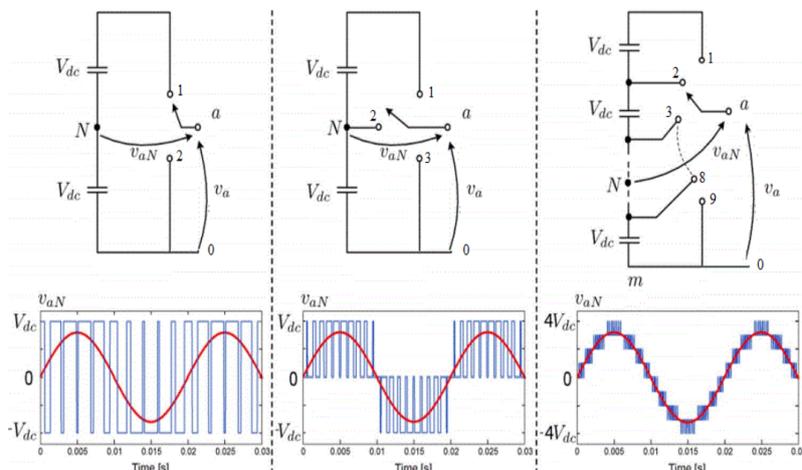


FIG. 3.5 : Schéma d'une branche de phase d'un onduleur à (a) 2 niveaux, (b) 3 niveaux (c) 9 niveaux et leurs formes d'onde correspondantes

Avec l'augmentation du nombre de niveaux de tension utilisés dans les onduleurs multi-niveaux, on peut constater deux avantages importants :

- **Diminution de la distorsion de la tension de sortie** : Les formes d'onde deviennent plus proches d'une sinusoïde idéale, ce qui entraîne une consommation de courant moins polluée [31].
- **Réduction du gradient de tension ( $dV/dt$ )** : Les transitions de tension deviennent plus douces [31].

Il existe diverses méthodes pour combiner des semi-conducteurs de puissance et des sources DC capacitatives afin de générer des tensions de sortie multi-niveaux. Cependant, seules quelques-unes de ces méthodes se sont avérées significatives en pratique, et elles seront analysées dans la section suivante.

### 3.5 Topologies des onduleurs multi-niveaux

Les topologies d'onduleurs multi-niveaux les plus récentes sont [30] :

- La topologie à diodes de bouclage (en anglais diode clamp).
- la topologie à condensateurs flottants (en anglais Flying Capacitor).
- la topologie en pont H cascades (en anglais Cascaded H-bridge).

### 3.6 Onduleur de tension à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped NPC)

La topologie d'onduleur de tension multi-niveaux la plus couramment utilisée est le NPC (Neutral Point Clamped). Le convertisseur NPC à trois niveaux, illustré dans la figure 3.6, utilise la mise en série d'interrupteurs commandables. Le bus continu d'entrée est constitué de deux condensateurs en série ( $C_1$  et  $C_2$ ), qui divisent la tension d'entrée en deux niveaux. De plus, deux diodes de clamp sont utilisées pour obtenir un niveau de tension supplémentaire, le niveau zéro volt. Ce niveau supplémentaire offre un avantage par rapport aux convertisseurs conventionnels à deux niveaux [31] [32].

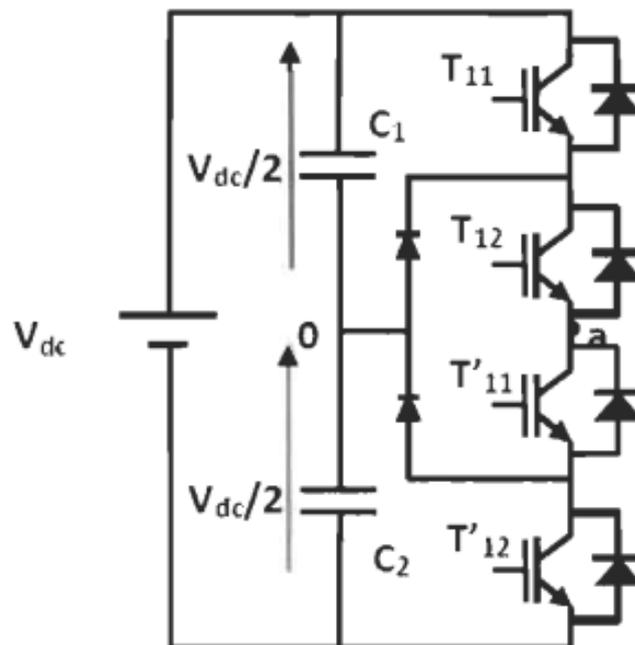


FIG. 3.6 : Circuit d'une phase d'un onduleur NPC

#### 3.6.1 Principe de fonctionnement des onduleurs NPC à trois niveaux

Pour le NPC à trois niveaux, trois séquences de fonctionnement distinctes sont identifiées. En considérant la symétrie de l'onduleur triphasé à trois niveaux, sa modélisation peut être simplifiée en se concentrant sur un seul bras. Pour éviter tout court-circuit du

bus continu, les deux interrupteurs de chaque bras sont commandés de manière complémentaire [32].

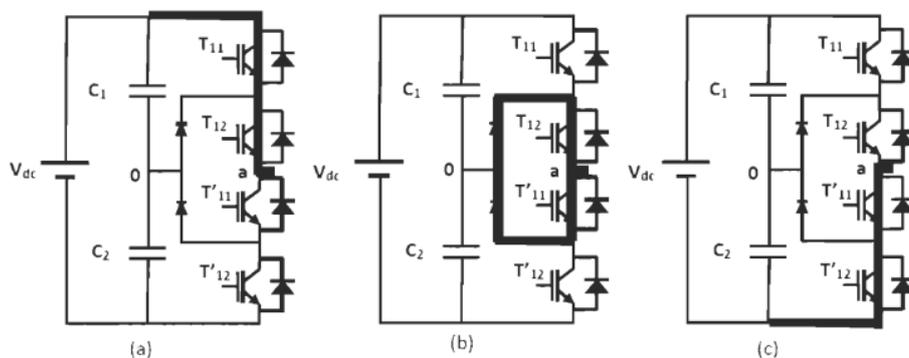


FIG. 3.7 : Séquence de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux

Les trois états de commutation possibles sont résumés au tableau 3.1, l'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert [32].

Séquences	T11	T12	T'11	T'12	Tension de sortie
Génération du niveau maximum	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
Génération du niveau intermédiaire	0	1	1	0	0
Génération du niveau minimum	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

TAB. 3.1 : Séquences de fonctionnement pour le NPC à trois niveaux

### 3.6.2 Avantages de la topologie NPC

- Les pertes globales dans les différents interrupteurs sont réduites, chaque interrupteur ne supportant que la moitié de la tension du bus continu.
- La topologie NPC est généralisable à N niveaux, permettant d'étendre les principes utilisés dans un onduleur à trois niveaux à des nombres plus élevés.
- La méthode de commande est relativement simple.

### 3.6.3 Inconvénients de la topologie NPC

- Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe.
- la structure NPC est employée pour trois niveaux seulement en raison de la complexité de maintenir l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs du bus et de l'augmentation de la complexité de la commande.

## 3.7 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Cette méthode consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à celle des grandeurs de sortie. La manipulation du nombre d'impulsions par alternance de la tension de sortie d'un onduleur à MLI permet de repousser les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées, facilitant ainsi leur filtrage. De plus, elle offre la possibilité de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

Le principe fondamental de la modulation de largeur d'impulsion repose sur le découpage d'une onde rectangulaire complète. Ainsi, la tension de sortie de l'onduleur est composée d'une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation continue, mais de largeur variable. La technique la plus couramment utilisée pour reproduire un signal MLI consiste à comparer un signal triangulaire de haute fréquence, appelé porteuse, avec un signal de référence, appelé modulatrice [28].

### 3.7.1 La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale)

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale est la plus couramment utilisée pour la commande des onduleurs multi-niveaux. Elle exploite le décalage de phase pour réduire les harmoniques dans la tension de sortie. Pour générer les impulsions de commande MLI sinusoïdale d'un convertisseur à N niveaux de tension, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont toutes la même fréquence  $f_p$  et la même amplitude  $V_p$ . Chaque comparaison entre une porteuse et la référence produit un signal de commande 1 si la porteuse est inférieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire [33].

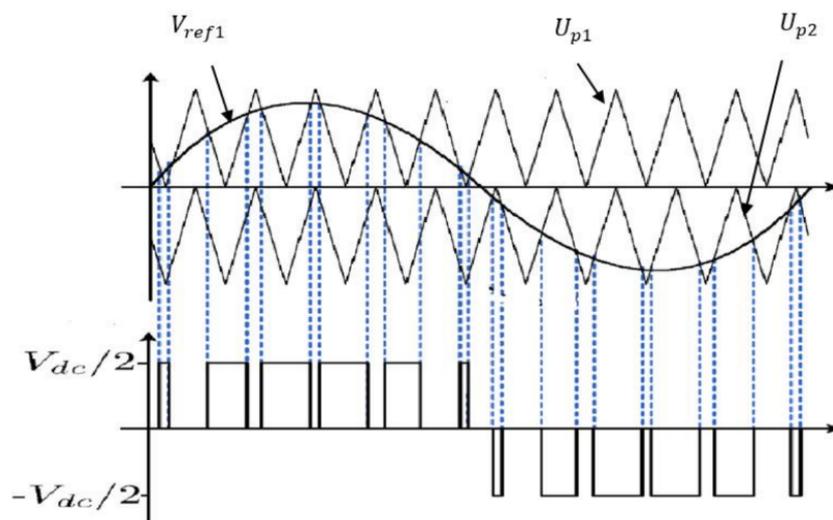


FIG. 3.8 : Principe de la technique MLI triangulo-sinusoïdale

Deux paramètres principaux déterminent le réglage de l'amplitude et de la fréquence de la tension de sortie de l'onduleur :

- **L'indice de modulation** : : C'est le rapport entre les fréquences de la porteuse

sur celle de la modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_m} \tag{3.1}$$

- **Le taux de modulation** : C'est le rapport entre l'amplitude de la tension du signal de référence (modulante) sur la tension continue  $V_{dc}$

$$r = \frac{2 \cdot V_m}{V_{dc}} \tag{3.2}$$

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de diminuer le taux de distorsion harmonique du courant de la charge en augmentant la fréquence de la porteuse. Afin de supprimer les harmoniques de rang pair et les harmoniques de rang 3, il est nécessaire que l'indice de modulation  $m$  soit impair et multiple de 3. La fréquence de la porteuse n'affecte pas l'amplitude des harmoniques supérieures. Lorsque les fréquences de porteuses sont plus élevées, le filtre de sortie réduit considérablement les harmoniques de sortie de l'onduleur, ce qui permet aux formes d'onde de tension et de courant de sortie de se rapprocher d'une sinusoïde [34].

La classification des méthodes de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale est basée sur la disposition des porteuses triangulaires. Les plus fréquemment employées sont :

- **Phase Disposition (PD)** : Toutes les porteuses ont la même amplitude, fréquence et phase Cette approche est la plus facile à mettre en œuvre, ce qui en fait la plus couramment employée. La méthode PD a le taux de distorsion harmonique (TDH) le plus bas par rapport aux autres méthodes de MLI sinusoïdale pour des valeurs du taux de modulation proches de 1.

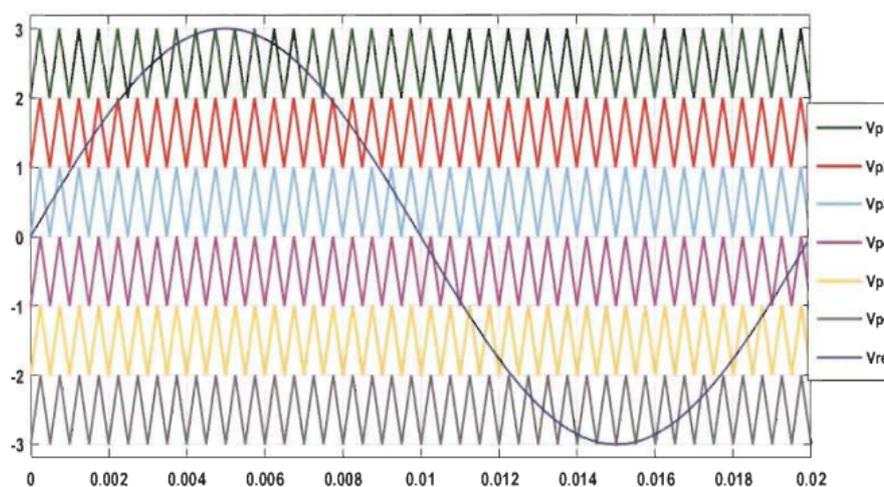


FIG. 3.9 : Forme d'onde des signaux PD pour 7 niveaux

- **Phase Opposition Disposition (POD)** : Les porteuses du côté négatif sont en phase opposée à celles du côté positif, mais elles ont les mêmes fréquences et

amplitudes. Les harmoniques à la fréquence porteuse et à ses multiples sont éliminées par cette méthode, et les harmoniques se dispersent autour de ces fréquences.

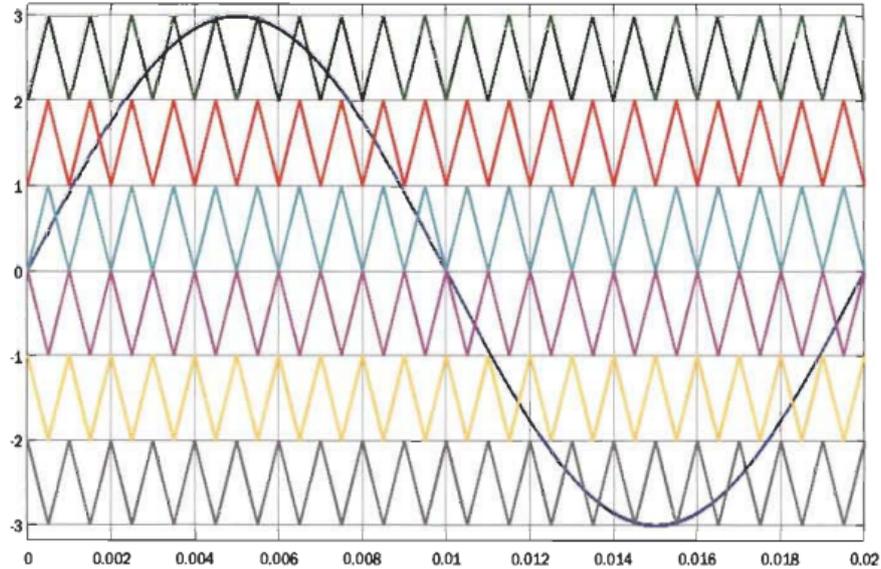


FIG. 3.10 : Forme d'onde des signaux POD pour 7 niveaux

- **Alternate Phase Opposition Disposition (APOD)** : Chaque porteuse est parallèle de  $180^\circ$  à ses voisines, mais avec des fréquences et des amplitudes équivalentes. Les formes d'onde de tension de phase et de ligne présentent des harmoniques significatives autour de la fréquence porteuse.

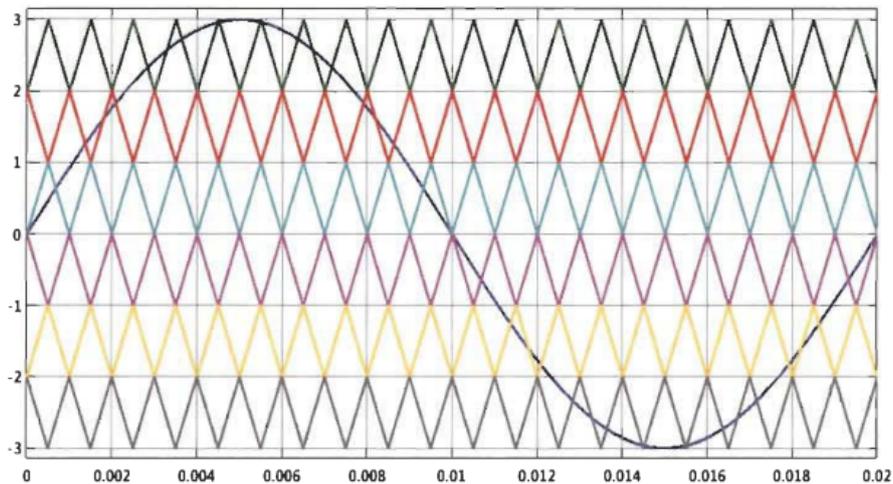


FIG. 3.11 : Forme d'onde des signaux APOD pour 7 niveaux

Caractéristique	Phase Disposition (PD)	Phase Opposition Disposition (POD)	Alternate Phase Opposition Disposition (APOD)
<b>Disposition des Porteuses</b>	Toutes les porteuses sont en phase.	Les porteuses de la partie négative sont en opposition de phase avec celles de la partie positive.	Chaque porteuse est déphasée de $180^\circ$ par rapport à ses adjacentes.
<b>Amplitude des Porteuses</b>	Identique pour toutes les porteuses.	Identique pour toutes les porteuses.	Identique pour toutes les porteuses.
<b>Fréquence des Porteuses</b>	Identique pour toutes les porteuses.	Identique pour toutes les porteuses.	Identique pour toutes les porteuses.
<b>Réduction des Harmoniques</b>	Faible taux de distorsion harmonique (THD) pour des valeurs de l'indice de modulation proches de 1.	Élimine les harmoniques à la fréquence porteuse et ses multiples. Dispersion des harmoniques autour de ces fréquences.	Les harmoniques significatives se situent autour de la fréquence porteuse pour les formes d'onde de tension de phase et de ligne.
<b>Implémentation</b>	La plus simple à implémenter.	Modérément complexe.	Plus complexe en raison du déphasage de chaque porteuse.
<b>Applications Typiques</b>	Utilisée pour des applications nécessitant une faible distorsion harmonique et une implémentation simple.	Utilisée pour des applications nécessitant une réduction des harmoniques spécifiques.	Utilisée pour des applications nécessitant une dispersion harmonique efficace.

TAB. 3.2 : Comparaison des méthodes MLI sinusoïdale PD, POD, et APOD

### 3.8 Paramètres de performance de l'onduleur

Le contenu harmonieux des tensions et des courants dans le système électrique est un élément essentiel de la qualité de l'énergie. Le fonctionnement non linéaire de dispositifs tels que les convertisseurs de puissance, est souvent à l'origine des harmoniques, de la source et de la charge. Ces harmoniques peuvent causer la surchauffe des transformateurs et des moteurs. En ce qui concerne la source, les harmoniques sont principalement causées par des alimentations avec des formes d'onde de tension ou de courant non sinusoïdales, ce qui entraîne des pertes de puissance, des interférences électromagnétiques et des couples pulsatoires dans les moteurs à courant alternatif. La fréquence de chaque harmonique est un multiple de la fréquence fondamentale [35].

Les sorties d'un onduleur, à savoir le courant et la tension, se présentent sous forme de signaux créneaux qui contiennent certaines harmoniques. Pour pouvoir se connecter au réseau, il est indispensable que l'énergie fournie par l'onduleur respecte les exigences de ce dernier. La qualité de l'énergie délivrée par l'onduleur est généralement évaluée à l'aide des paramètres suivants [4] :

- **Distorsion totale d'harmonique THD :**

Mesure le contenu harmonique du signal de sortie par rapport au fondamental. Une valeur faible de THD indique une meilleure qualité de l'énergie (ne doit pas dépasser 5 % selon la norme IEEE).

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} 100\% \quad (3.3)$$

où  $V_n$  est la valeur efficace de la n-ième harmonique et  $V_1$  est la valeur efficace de la composante fondamentale.

- **Le facteur d'harmonique HF :**

Indicateur de la proportion des harmoniques spécifiques par rapport à la composante fondamentale, utilisé pour mesurer la contribution individuelle de chaque harmonique. Il est défini par :

$$\text{HF} = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.4)$$

Ces paramètres sont calculés pour chaque phase de sortie de l'onduleur.

### 3.9 modélisation des filtres

Les onduleurs, en convertissant la tension continue (DC) en tension alternative (AC), génèrent des harmoniques en raison de la commutation des semi-conducteurs. La fréquence fondamentale est composée de nombreuses harmoniques, dont certaines sont de rang impair et pair. Les onduleurs modernes utilisent des techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour éliminer les harmoniques de rang pair et de rang 3. Cependant, les harmoniques de rang impair restants peuvent encore causer des distorsions significatives. Il est donc fréquent d'avoir besoin de filtres supplémentaires afin d'atteindre les normes de qualité de l'énergie [35].

Le rôle des filtres est de filtrer les harmoniques, et pour faire fonctionner l'onduleur comme une source de courant pour pouvoir injecter le courant dans le réseau électrique. Cependant, si les éléments du filtre passif ne sont pas correctement conçus, la plupart des avantages du système peuvent être perdus. Pour garantir une haute qualité de puissance et une faible distorsion, le filtre doit atténuer les harmoniques à des niveaux spécifiés. Un filtre surdimensionné peut inutilement augmenter les coûts, le volume, le poids et les pertes de puissance du système [4] [35].

Les principaux types de filtres utilisés pour le raccordement des onduleurs photovoltaïques au réseau ou pour alimenter une charge sont les suivants :

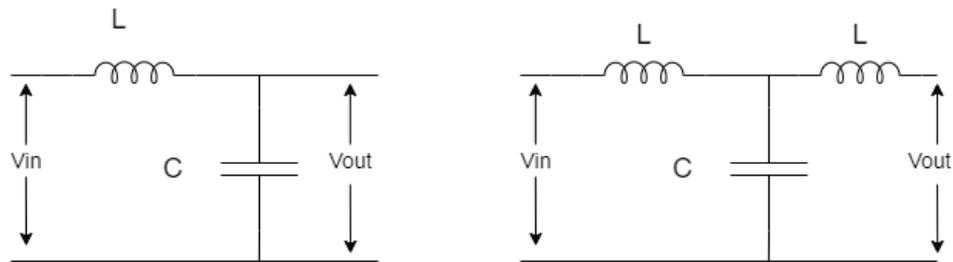


FIG. 3.12 : Circuits de configuration des filtres .

Le filtre LCL est le plus couramment utilisé car il offre un meilleur découplage entre le filtre et l'impédance du réseau, et peut réduire les niveaux de distorsion harmonique à des fréquences de commutation plus basses[35].

Les filtres LC utilisent les propriétés réactives des inductances et des capacités pour atténuer les fréquences indésirables. Lorsqu'on utilise un filtre LC parallèle, l'inductance et la capacité sont ajustées de manière à ce qu'elles présentent une impédance minimale aux fréquences harmoniques élevées, les court-circuitant et empêchant leur transition vers la charge. En fonction de la fréquence de résonance, calculée par  $f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$ . Le filtre a une impédance maximale, ce qui lui permet de bloquer efficacement cette fréquence. On atténue considérablement les fréquences au-delà de la résonance, ce qui diminue la distorsion harmonique totale (THD) et améliore la qualité de la forme d'onde de sortie.

### 3.10 les résultats de simulation

Un système photovoltaïque connecté au réseau a été simulé en utilisant un onduleur à trois niveaux qui est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale de type Phase Disposition (PD). La commande a été réalisée à un indice de modulation de 1 et à une fréquence de porteuse de 1650 Hz ( $m = 33$ ). Les résultats concernant le rôle de l'onduleur ont été obtenus.

La figure 3.13 illustre la tension simple  $V_{an}$  de l'onduleur NPC à 3-niveaux. Nous remarquons que la forme d'onde présente trois niveaux distincts, variant entre  $(+\frac{V_{dc}}{2}, 0, -\frac{V_{dc}}{2})$ . Cette variation est due à la structure de l'onduleur NPC à 3 niveaux, qui utilise des condensateurs de découplage pour diviser la tension d'alimentation  $V_{dc}$  en deux moitiés.

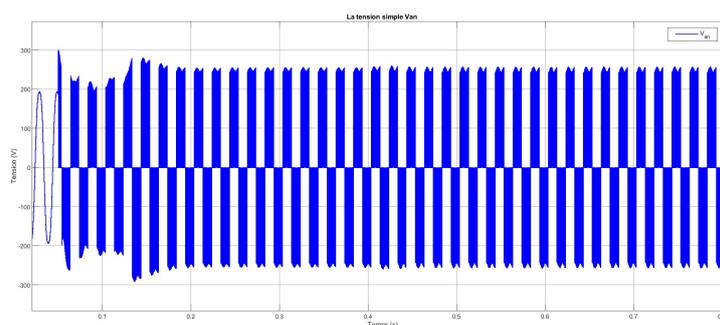


FIG. 3.13 : La tension simple de la sortie de NPC 3-niveaux

La figure 3.14 et figure 3.15 montrent la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie d'un onduleur NPC 3-niveaux avant et après filtrage. Le fonctionnement d'un onduleur NPC à 3 niveaux se caractérise par des niveaux de tension distincts avant le filtrage, ce qui explique les transitions abruptes entre les paliers. La tension devient nettement plus sinusoïdale après filtrage, avec des fluctuations lisses et continues, ce qui confirme le principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à 3 niveaux. Cette amélioration est également perceptible dans le courant de sortie, montré dans la figure 3.16, où l'on observe une transformation d'un courant pulsé à un courant régulier et sinusoïdal après filtrage.

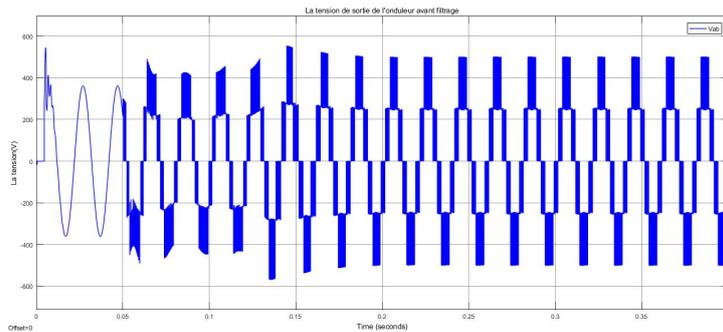


FIG. 3.14 : La tension composée de la sortie de NPC 3-niveaux

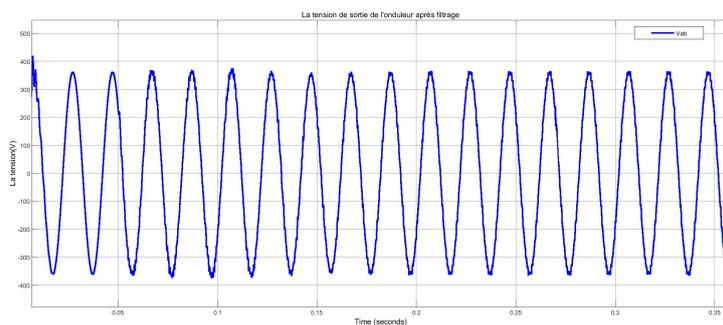


FIG. 3.15 : Tension de sortie de NPC 3-niveaux après filtrage

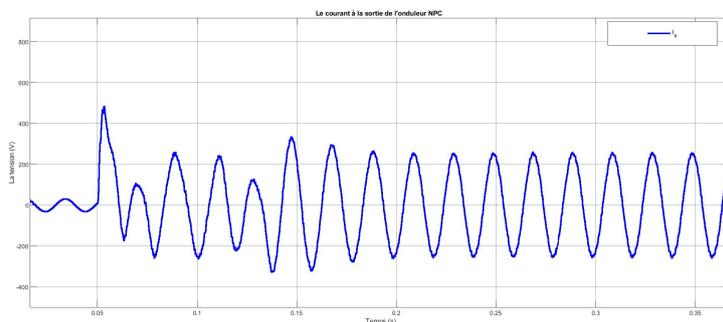


FIG. 3.16 : Le courant de sortie de NPC 3-niveaux

Nous remarquons que la THD (Total Harmonic Distortion) avant filtrage est élevée, indiquant une forte présence d'harmoniques indésirables dans le signal, comme elles montrent les figures figure 3.17, figure 3.18 et figure 3.20. Après filtrage, la THD est significativement réduite, ce qui montre l'efficacité des filtres à atténuer ces harmoniques et à

améliorer la qualité du signal en le rapprochant d'une sinusoïde pure. En observant la modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale, nous constatons que les harmoniques se regroupent en paquets autour de la fréquence de commutation et de ses multiples, avec une amplitude qui diminue à mesure qu'on s'éloigne du rang correspondant à la fréquence de commutation. L'augmentation de l'indice de modulation  $m$  (ou de la fréquence de commutation) présente l'avantage de repousser les harmoniques vers les hautes fréquences, ce qui facilite leur filtrage et améliore la forme d'onde des grandeurs de sortie.

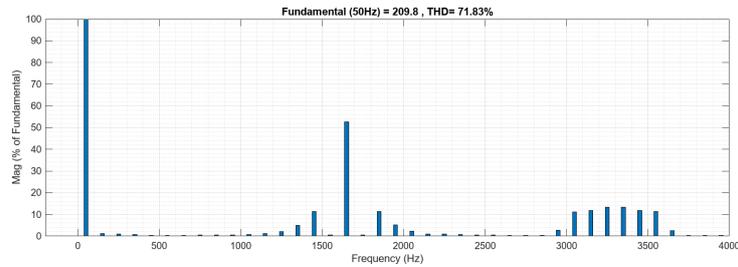


FIG. 3.17 : Le spectre harmonique de la tension simple de NPC 3-niveaux

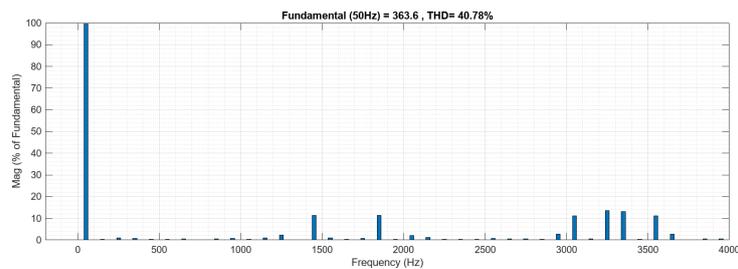


FIG. 3.18 : Le spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  avant filtrage de NPC 3-niveaux

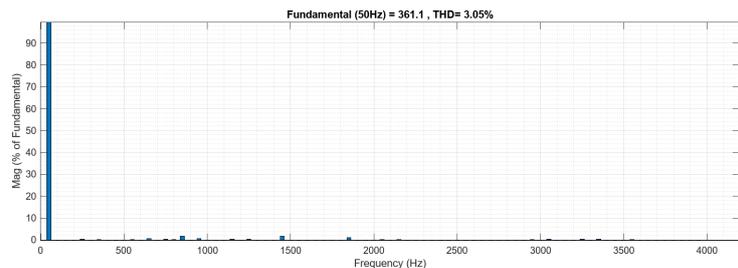


FIG. 3.19 : Le spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  après filtrage de NPC 3-niveaux

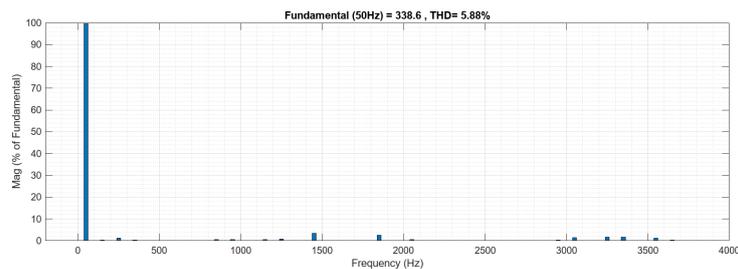


FIG. 3.20 : Le spectre harmonique du courant avant filtrage de NPC 3-niveaux

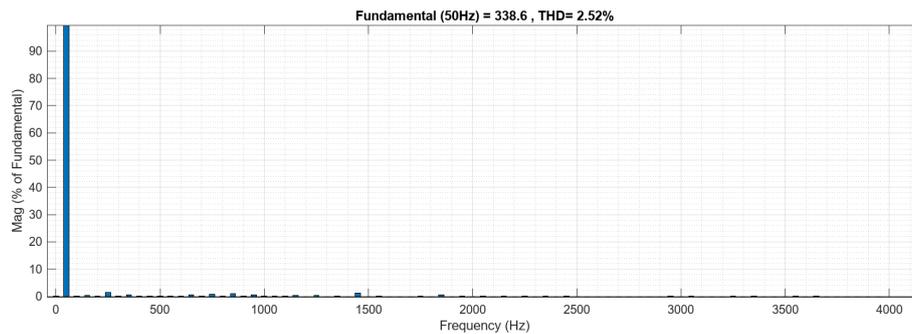


FIG. 3.21 : Le spectre harmonique du courant après filtrage de NPC 3-niveaux

En conclusion, l'application de la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale avec disposition de phase (PD) sur l'onduleur NPC 3-niveaux donne des résultats optimaux. Cette technique permet d'atteindre plusieurs objectifs importants. Premièrement, elle permet de minimiser la distorsion harmonique totale (THD), ce qui améliore considérablement la qualité du signal de sortie. Deuxièmement, elle assure l'absence d'harmoniques de faible rang, qui sont généralement les plus problématiques car elles sont plus difficiles à filtrer et peuvent causer des interférences significatives et des pertes énergétiques. Ainsi, cette combinaison de paramètres de modulation optimise la performance de l'onduleur NPC en termes de qualité du signal et d'efficacité énergétique.

### 3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous aborderons les divers types d'onduleurs solaires. Ensuite, nous aborderons le principe de fonctionnement d'un onduleur dans un système à deux étages et les différentes stratégies de commande associées. Nous discuterons ensuite des filtres utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie en réduisant les harmoniques. Par la suite, nous présenterons les résultats de simulation, montrant les formes de tension et de courant en sortie de l'onduleur, confirmant le principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à 3 niveaux ainsi que le rôle des filtres utilisés. Dans le chapitre suivant, nous appliquerons ces connaissances à l'étude et à la simulation de la connexion d'un onduleur photovoltaïque au réseau public.

Chapitre **4**

Simulation d'un système photovoltaïque  
connecté au réseau

## 4.1 Introduction

Quand on connecte un système photovoltaïque au réseau, il est essentiel de réduire au minimum les problèmes associés à cette connexion, comme les fluctuations d'amplitude et de fréquence de la tension au point de connexion.

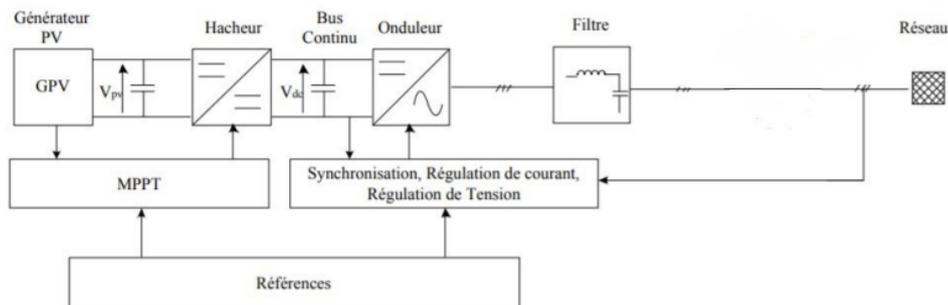


FIG. 4.1 : Structure générale d'un système PV raccordé au réseau

Le fait de connecter les systèmes photovoltaïques au réseau comporte divers avantages et désavantages. Parmi les avantages, on note l'élimination du besoin de stockage d'énergie, ce qui supprime le maillon le plus problématique et coûteux d'une installation autonome, et la possibilité de répondre partiellement ou totalement à ses besoins énergétiques en utilisant le réseau comme réservoir d'énergie. Néanmoins, ce genre de connexion présente des désavantages, comme les perturbations harmoniques causées par les onduleurs.

Dans ce dernier chapitre, nous nous concentrons sur la connexion au réseau de notre chaîne de production photovoltaïque. Nous explorerons l'impact des systèmes photovoltaïques sur le réseau électrique, nous présenterons ensuite les diverses stratégies de commande, une modélisation de la boucle à verrouillage de phase (PLL) sera exposée pour garantir la synchronisation des tensions injectées dans le réseau. Nous aborderons également les différentes méthodes de régulation des courants et de la tension au niveau du bus continu, essentielles pour le bon fonctionnement du système. En conclusion, nous présenterons les résultats de simulation du système PV connecté au réseau.

## 4.2 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau électrique

Auparavant, les réseaux de distribution étaient des éléments passifs qui fournissaient uniquement des flux de puissance unidirectionnels du poste de source vers les consommateurs finaux. Cependant, avec l'intégration des productions décentralisées telles que les systèmes photovoltaïques (PV), les flux de puissance et les tensions sont maintenant déterminés par les sources et les charges. Le fait de connecter les systèmes photovoltaïques au réseau peut avoir des conséquences importantes sur son fonctionnement, en particulier [36] :

- **Influence sur le plan de tension** : La présence de générateurs photovoltaïques (PV) influence le profil de tension et les dispositifs de régulation du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissance active et réactive. Plus précisément, lorsque le soleil est intense et que la consommation est faible, la tension à certains points du réseau peut dépasser le seuil autorisé [36].
- **Influence sur la qualité de l'énergie** : Si les onduleurs ne sont pas équipés de filtres efficaces, les interfaces électroniques de puissance des panneaux solaires peuvent générer des harmoniques de découpage dans le réseau. Les onduleurs, en particulier ceux de faible puissance, augmentent les fluctuations de courant, ce qui entraîne des problèmes de fonctionnement des appareils électroniques [36].

### 4.3 Stratigies de commande

Pour garantir le bon fonctionnement de l'installation photovoltaïque raccordée au réseau, plusieurs boucles de contrôle basées sur des régulateurs PI sont utilisées. Ces régulateurs contrôlent les courants à la sortie de l'onduleur dans une boucle interne et le bus continu dans une boucle externe. Il est également nécessaire de synchroniser les tensions de sortie de l'onduleur avec celles du réseau.

#### 4.3.1 Synchronisation avec le réseau

Le réseau électrique public suit des normes strictes pour assurer son bon fonctionnement en termes de module, fréquence et phase. Cependant, raccorder un système photovoltaïque au réseau peut causer des défauts via la sortie de l'onduleur. Pour un bon contrôle de puissance active et réactive, il faut estimer la phase de la tension du réseau. Le courant de sortie de l'onduleur doit être synchronisé avec la tension du réseau, la tension de sortie de l'onduleur doit correspondre en fréquence et phase pour chacune de ses trois phases [37].

L'algorithme de synchronisation vise à extraire l'angle de phase du réseau pour l'utiliser dans les boucles de contrôle du courant et de la tension de sortie de l'onduleur. Ces algorithmes doivent réagir rapidement aux variations du réseau. La Boucle de verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) est proposée pour cette tâche, en utilisant une boucle de régulation. Toutefois, cette méthode peut entraîner un déphasage, particulièrement lorsque la fréquence de coupure du filtre est basse [37] [4].

- **La Boucle de verrouillage de phase**

La méthode choisie pour notre application est à base de PLL (Phase Locked Loop). Cette technique de régulation génère un signal de sortie synchronisé en phase et en fréquence avec le signal d'entrée triphasé, en utilisant une boucle de retour pour minimiser l'erreur en phase entre les deux signaux. Un circuit PLL de base se compose généralement de trois composants : un détecteur de phase, un filtre de boucle et un oscillateur commandé en tension (expliqués en chapitre 1).

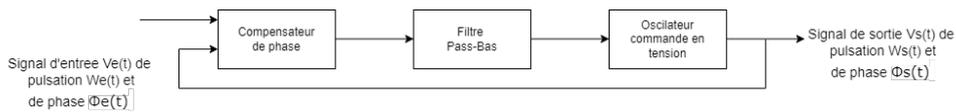


FIG. 4.2 : Structure générale d'une PLL

Le principe de la commande PLL consiste à orienter la tension mesurée par rapport au réseau suivant l'axe direct d, c'est-à-dire à annuler l'angle entre l'axe direct du repère tournant et le vecteur spatial de la tension mesurée. La composante q de la tension du réseau  $V_q$  est égale à zéro lorsque le repère tournant est aligné avec la tension du réseau, et la composante d du vecteur  $V_d$  est égale au pic de la tension du réseau. Pour obtenir cette condition, la composante q de la tension du réseau est régulée à zéro par un régulateur PI, permettant ainsi de trouver un signal qui reproduit fidèlement la phase de la tension du réseau [38].

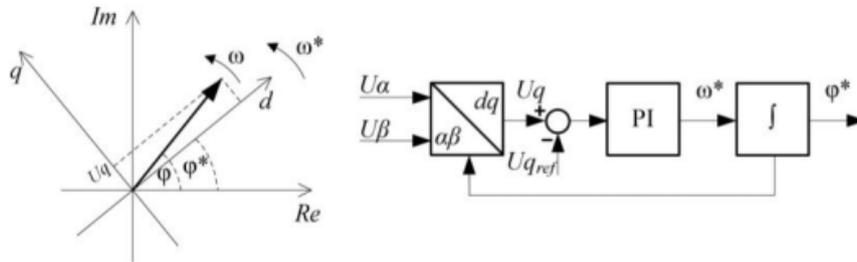


FIG. 4.3 : Concept de la synchronisation PLL

Un régulateur de type PI est idéal pour les onduleurs triphasés connectés au réseau, il permet d'éliminer l'erreur entre la référence et le signal de sortie. La fonction de transfert du régulateur PI est la suivante :

$$H_{pi}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \quad (4.1)$$

$K_p$  : Le gain de l'action proportionnelle.

$T_i$  : La constante de temps de l'action intégrale. La boucle de régulation est donnée par :

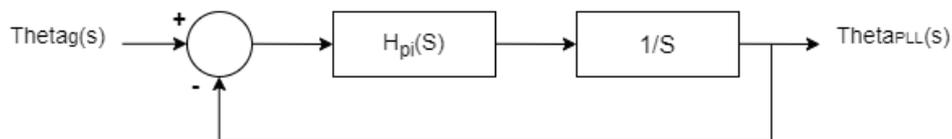


FIG. 4.4 : Modèle de la PLL.

– La fonction de transfert en boucle ouverte :

$$H_{BO}(S) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \cdot \frac{1}{s}$$

$$H_{BO}(S) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s^2} \quad (4.2)$$

– La fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(S)}{1 + H_{BO}(S)}$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_p \frac{1+T_i s}{T_i s^2}}{1 + K_p \frac{1+T_i s}{T_i s^2}}$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_i}}{T_i s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} \quad (4.3)$$

$$G(s) = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_i}}{s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.4)$$

Par l'identification, on trouve :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}}$$

$$\xi = \frac{K_p}{2\omega_n} = \frac{\sqrt{K_p T_i}}{2}$$

Pour avoir un dépassement limité à 5%, nous prenons le coefficient d'amortissement  $\xi$  égal à 0.7 .

Les paramètres de la boucle du second ordre doivent satisfaire :

$$\omega_0 \geq 2\pi f_0$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Le choix d'une basse fréquence de coupure  $\omega_n$  assure un bon filtrage, mais cela peut ralentir le système. En revanche, une valeur élevée de cette fréquence permet de trouver rapidement la phase et d'assurer le suivi.

### 4.3.2 Régulation du courant

La boucle de contrôle du courant interne est essentielle pour réguler le courant injecté dans le réseau et pour maintenir la qualité de l'énergie. L'utilisation de cette boucle permet de réguler de manière précise le courant pour garantir que l'injection respecte les normes de qualité de l'énergie, en particulier en ce qui concerne le facteur de puissance et le coefficient de distorsion harmonique totale (THD) [38].

Les composantes  $I_d$  et  $I_q$  du courant du réseau sont comparées aux composantes de référence respectives  $I_{dref}$  et  $I_{qref}$ , générées par la boucle de contrôle de tension externe. Typiquement, la composante de référence  $I_{qref}$  est fixée à zéro pour maintenir un facteur de puissance unitaire. L'erreur issue de cette comparaison est corrigée par un contrôleur PI, qui génère les signaux de commande ( $V_{convd}$ ) et ( $V_{convq}$ ). Ces signaux sont ensuite retransférés vers le repère «  $\alpha - \beta$  » pour obtenir les signaux de commande alternatifs. La

composante  $V_{conv_d}$  du signal de commande est alors utilisée pour générer les signaux de commande de la MLI sinusoïdale.

Le schéma de la connexion au réseau est le suivant :

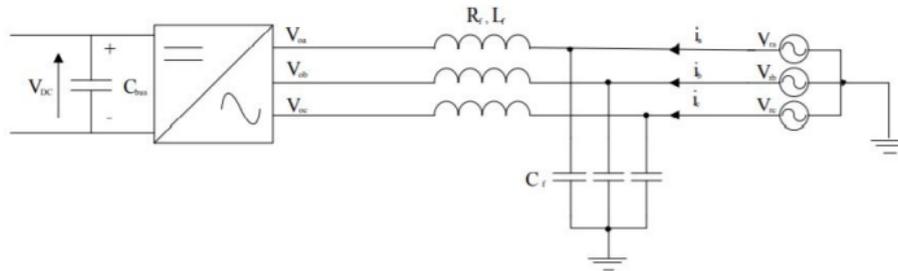


FIG. 4.5 : Représentation de la connexion Onduleur- Réseau

Nous négligeons les courants qui passent dans les capacités du filtre :

$$V_{g,k} = R_f i_k + L_f \frac{di_k}{dt} + V_{o,k} \quad , \quad k = a, b, c \quad (4.5)$$

- $V_{g,k}$  : La tension du réseau.
- $V_{o,k}$  : La tension à la sortie de l'onduleur.
- $i_k$  : Le courant de ligne.
- $R_f, L_f$  : La valeur de l'impédance de la partie inductive du filtre

Nous écrivons équation 4.5 sous forme matricielle

$$\begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f + L_f s & 0 & 0 \\ 0 & R_f + L_f s & 0 \\ 0 & 0 & R_f + L_f s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o3} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Nous utilisons la transformation de Park pour passer au repère synchrone dq :

$$P(\theta) \begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{pmatrix} P(\theta) \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \left( P(\theta) \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \right) + P(\theta) \begin{pmatrix} V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o3} \end{pmatrix}$$

Après calcul nous obtenons le système suivant :

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{do} \\ V_{qo} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f + L_f s & -L_f \omega \\ L_f \omega & R_f + L_f s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

La boucle de commande du courant, suivant l'axe d, peut être modélisée comme suit :

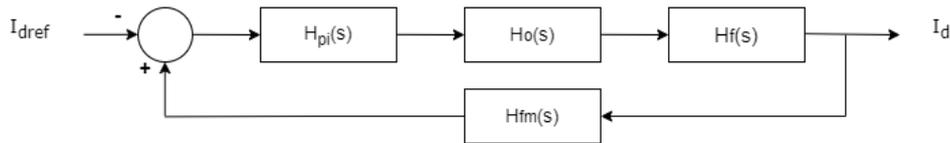


FIG. 4.6 : Boucle de régulation du courant de l'axe direct

La fonction de transfert de chaque bloc de la figure est représentée par :

- $H_0$  : La fonction de transfert de l'onduleur avec un temps de retards  $T_0$ .

$$H_0 = \frac{1}{1 + sT_0} \quad (4.8)$$

- $H_f$  : La fonction de transfert du filtre (partie inductif) de l'onduleur avec un temps de retard avec de retards  $T_f$ .

$$H_f = \frac{1}{R_f(1 + sL_f)} \quad , \quad T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (4.9)$$

- $H_{fm}$  : La fonction de transfert du filtre de mesure avec un temps de retard  $T_{fm}$ .

$$H_{fm} = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (4.10)$$

La constante de temps  $T_f$ , est dominante par rapport aux autres constantes de temps (du filtre de mesure et de l'onduleur). Ainsi, on peut réduire le modèle en additionnant les constantes de temps petites. On obtient le modèle suivant :

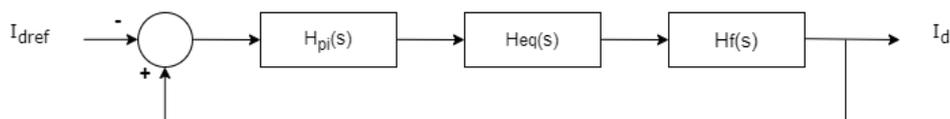


FIG. 4.7 : Boucle de régulation réduite du courant

Avec :

$$H_{eq}(s) = \frac{1}{1 + sT_{eq}} \quad / \quad T_{eq} = T_0 + T_{fm} \quad (4.11)$$

- la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$H_{BO}(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \cdot \frac{1}{1 + sT_{eq}} \cdot \frac{\frac{1}{R}}{1 + sT_f} \quad (4.12)$$

Nous compensons le pôle dominant ( $T_i = T_f$ ). Ce qui donne la fonction de transfert en boucle fermée :

- la fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = \frac{\frac{K_p}{R_f}}{sT_i \cdot (1 + sT_{eq}) + \frac{K_p}{R_f}} \quad (4.13)$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{1}{T_{eq}}s + \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \quad (4.14)$$

$H_{BF}(s)$  est une fonction de 2ème ordre de la forme :

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$

Par identification : 
$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_i R_f}{K_p T_{eq}}} \end{cases}$$

Le facteur d'amortissement  $\xi$  est choisis gal  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  pour obtenir le meilleur temps de réponse tout en minimisant le dépassement, donc :

$$\begin{cases} T_i = T_f = \frac{L_f}{R_f} \\ K_p = \frac{T_i R_f}{2T_{eq}} = \frac{L_f}{2T_{eq}} \end{cases}$$

- **Régulation de la puissance injectée** : La régulation des courants suivant les axes d et q permet de contrôler les puissances active et réactive :

$$P_{ref} = \frac{3}{2}(V_{rd}I_{dref} + V_{rq}I_{qref}) \quad (4.15)$$

$$Q_{ref} = \frac{3}{2}(V_{rq}I_{dref} - V_{rd}I_{qref}) \quad (4.16)$$

Le principe de la boucle à verrouillage de phase (PLL) repose sur l'annulation de la composante quadrature ( $V_{rq} = 0$ ) afin de déterminer la phase du signal de référence.

$$P_{ref} = \frac{3}{2}V_{rd}I_{dref} \quad (4.17)$$

$$Q_{ref} = -\frac{3}{2}V_{rd}I_{qref} \quad (4.18)$$

Sachant que dans notre simulation nous injectons uniquement de la puissance active ( $I_{qref}=0$ ) :

$$P_{ref} = \frac{3}{2}V_{rd}I_{dref} \quad (4.19)$$

$$Q_{ref} = 0 \quad (4.20)$$

### 4.3.3 régulation de la tension du bus continu

La régulation de cette tension s'effectue en absorbant ou en fournissant de l'énergie active au réseau.

En réponse à l'écart entre la valeur de référence  $V_{dcref}$  et  $V_{dc}$  le fonctionnement du régulateur ajoute une puissance active fluctuante à la puissance  $P_{ref}$ , ce qui génère un courant fondamental actif  $I_{dref}$ . Cela permet de corriger la tension  $V_{dc}$ . Le contrôleur de tension est situé dans la boucle externe. La sortie de ce régulateur fournit une référence pour le contrôleur de courant suivant l'axe d [37]. La boucle de commande de la tension peut être modélisée comme suit :

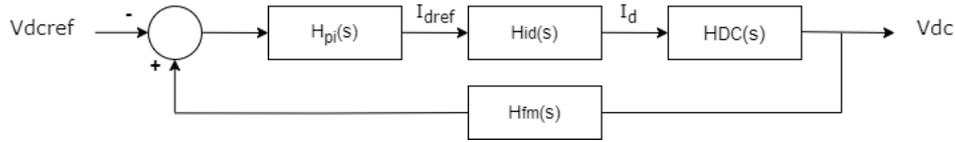


FIG. 4.8 : Boucle de régulation de la tension du bus continu

Un filtre numérique est utilisé pour réduire les bruits indésirables dus à la mesure.

$H_{fm}$  : Représente la fonction de transfert du filtre de mesure.

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (4.21)$$

$H_{id}$  : Représente la fonction de transfert du contrôleur du courant suivant l'axe d.

Pour appliquer le critère du symétrique optimum, le système doit être approximé par un système du premier ordre. Il est également nécessaire que la boucle de contrôle externe soit plus lente que la boucle de contrôle interne. On rappelle la forme de la fonction de transfert de la boucle interne :

$$M(s) = K \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + 1}$$

Pour des fréquences inférieures à  $\omega_0$  :

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 \ll 1$$

Et le système peut être approximé par un système du premier ordre :

$$H_{id}(s) = \frac{1}{\frac{2\xi}{\omega_0} s + 1} = \frac{1}{4\xi^2 T_{eq}s + 1}$$

$$H_{id}(s) = \frac{1}{1 + 2 T_{eq}s}$$

$H_{DC}$  : Représente la fonction de transfert entre le courant d'axe d et la tension du bus continu. Elle est donnée par :

$$H_{DC}(s) = K_{DC} \frac{1}{C_{DC}s}$$

En considérant la conservation de la puissance et la relation entre la tension du bus continu et la tension suivant l'axe d :

$$V_{DC}I_{DC} = \frac{2}{3} V_d I_d \quad (4.22)$$

Et la tension à la sortie de l'onduleur :

$$V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{DC} r \quad (4.23)$$

$$V_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{ab} = \frac{1}{2} V_{DC} r \quad (4.24)$$

r : représente le rapport de modulation.

En combinant les relations(4.14) et (4.14), on trouve :

$$K_{DC} = \frac{I_{DC}}{I_d} = \frac{3 V_d}{2 V_{DC}} = \frac{3}{4} r$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système de commande de la tension (on posons :  $T = 2T_{eq} + T_{fm}$ )est donnée par :

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + T s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i T s^3 + C_{DC} T_i s^2 + K_p K_{DC} T_i s + K_p K_{DC}}$$

Selon le critère de l'optimum symétrique, on a :

$$\begin{cases} T_i = 4 T \\ K_p = \frac{1}{2} \frac{C_{DC}}{K_{DC} T} \end{cases}$$

## 4.4 Simulation du système et resultats

Nous simulons un modèle de 100 kW connecté à un réseau via un convertisseur boost DC-DC et un convertisseur de source de tension triphasé . Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est implémenté dans le convertisseur boost à l'aide d'un modèle Simulink utilisant la technique Perturb and Observe.

Le modèle détaillé contient :

- Le champ photovoltaïque de 100 kW est constitué de 40 chaînes de 12 modules connectés en série, utilisant le même modèle que celui décrit dans le chapitre 2 (APOS Energy AP 215M).
- Le hacheur boost élève la tension jusqu'à 500 V ( $V_{dcref}$ ). Son dimensionnement est effectué en se basant sur le même raisonnement que celui décrit dans le (chapitre 2). Ce convertisseur utilise un système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui ajuste automatiquement le cycle de fonctionnement pour générer la tension nécessaire à l'extraction de la puissance maximale.
- L'onduleur triphasé convertit le 500 V DC en 260 V AC et maintient un facteur de puissance unitaire. Il utilise deux boucles de régulation : une boucle externe qui régule la tension du bus continu et une boucle interne qui régule les courants Id et Iq. La référence de courant Id est fournie par le régulateur de tension DC externe, tandis que la référence de courant Iq est fixée à zéro pour garantir un facteur de puissance unitaire. Les tensions Vd et Vq issues du régulateur de courant sont converties en signaux de modulation  $U_{ref_{abc}}$  pour le générateur d'impulsions PWM.

En temps réel, l'irradiation varie instantanément. Pour cette raison, on utilise un profil d'irradiation correspondant aux conditions atmosphériques réelles sur un intervalle de temps de 4 secondes.

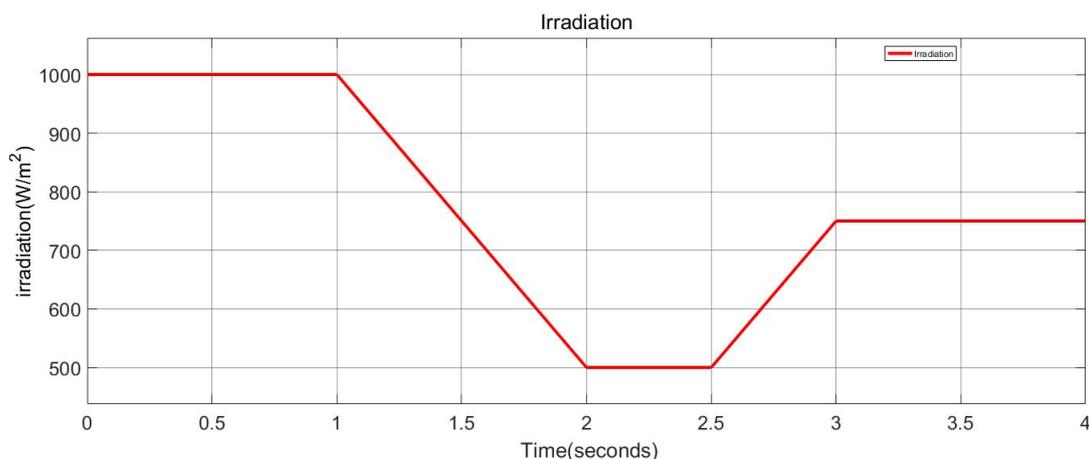


FIG. 4.9 : Le Profil d'irradiation utilisé

- Régulation de la tension du bus continu

D'après la figure 4.10, il est évident que la tension  $V_{dc}$  atteint rapidement la valeur de référence fixée à 500V à  $t = 0.2s$  et reste stable, malgré les variations du rayonnement. Cela confirme que nous avons atteint notre objectif de fournir une tension  $V_{dc}$  constante à l'onduleur.

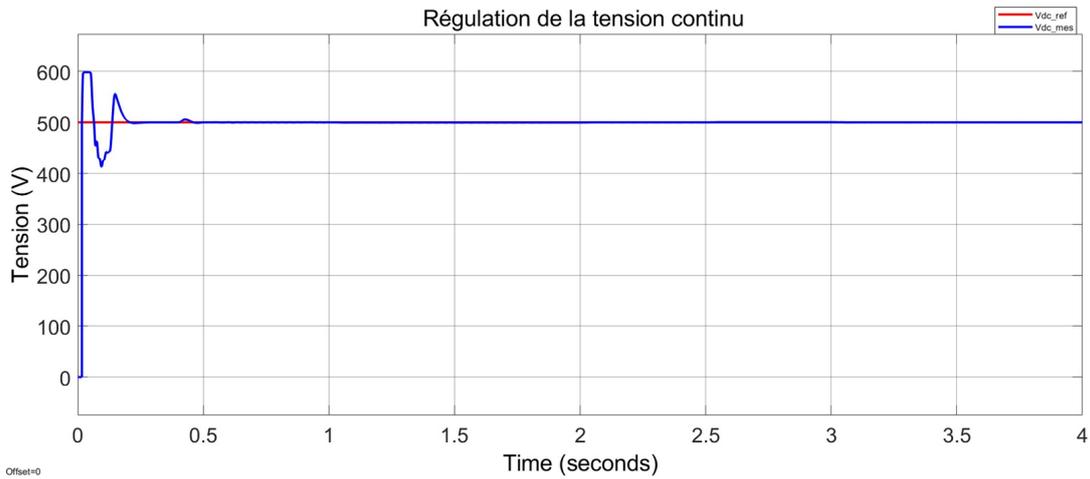


FIG. 4.10 : Régulation de la tension du bus continu

- La PLL

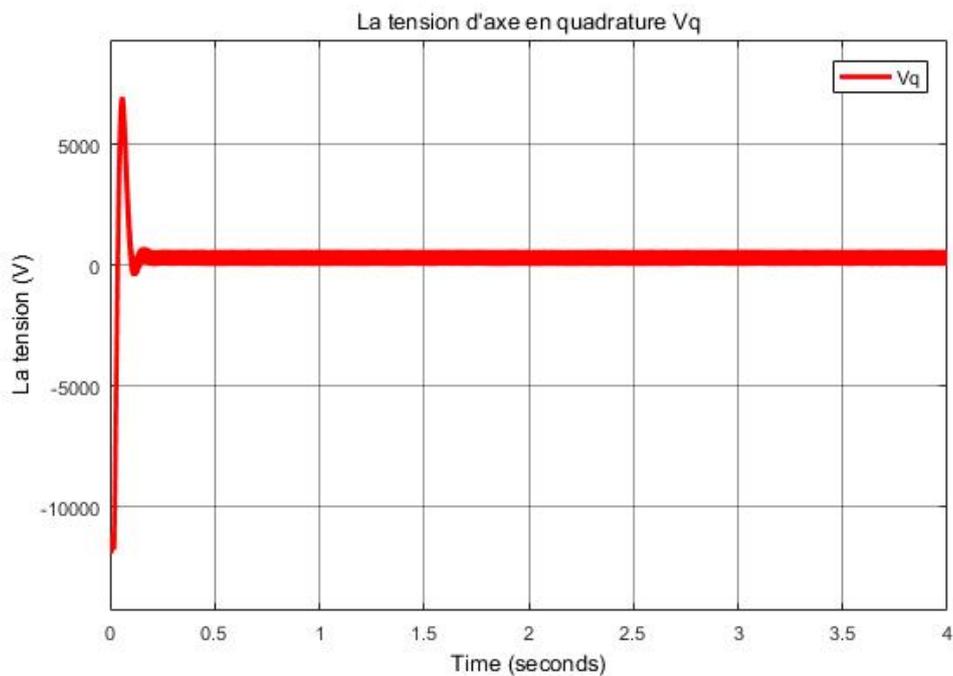


FIG. 4.11 : Courbe de la composante quadratique Vq

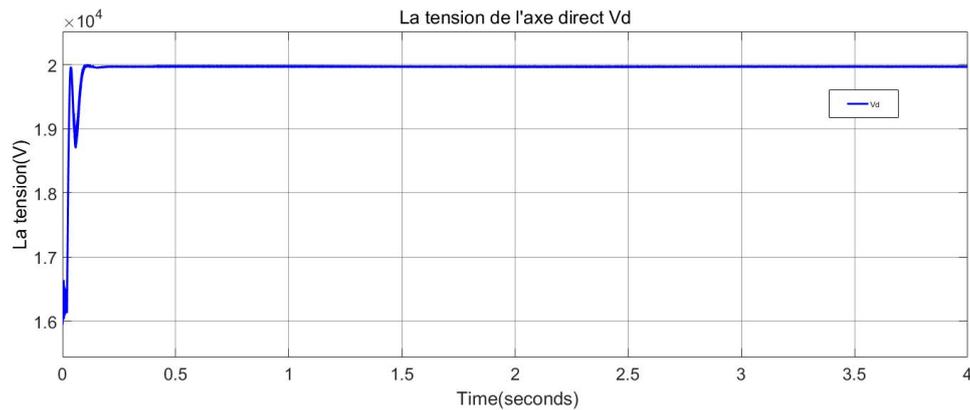


FIG. 4.12 : Courbe de La composante direct Vd

La figure 4.11 et la figure 4.12 montrent la tension à la sortie du réseau dans le repère « d-q » en régime permanent. La composante  $V_q$  est nulle en régime permanent, convergeant vers zéro après un régime transitoire rapide grâce à l'utilisation du régulateur PI de la PLL. En revanche, la composante directe  $V_d$  représente l'amplitude de la tension mesurée et reste constante en régime permanent.

Le référentiel tournant est synchronisé avec la tension du réseau et l'angle entre la composante de la tension sur l'axe direct et la tension mesurée est annulé. Ainsi, on peut produire un signal de sortie qui synchronise en phase et en fréquence le signal d'entrée en utilisant cette boucle de régulation.

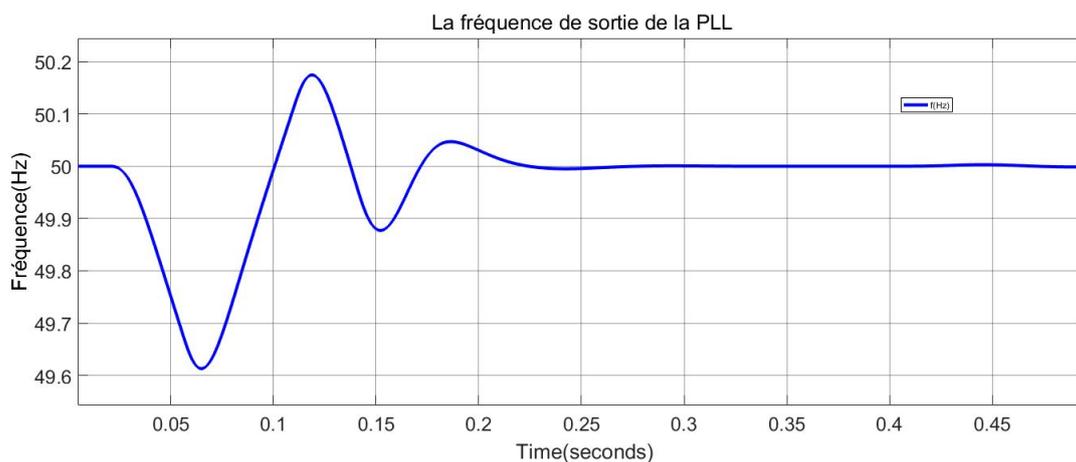


FIG. 4.13 : Courbe de la fréquence de sortie de la PLL

D'après la figure 4.13, nous observons que, après une légère oscillation, la fréquence du système converge vers celle du réseau. Ainsi, la synchronisation de la fréquence de notre système avec celle du réseau a été atteinte.

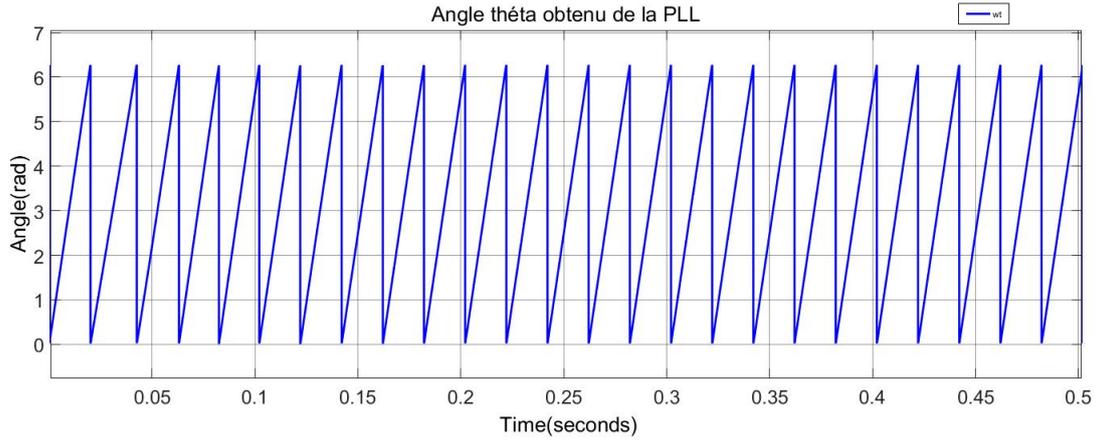


FIG. 4.14 : Courbe d'Angle de sortie de la PLL

Dans la figure 4.14, nous observons la courbe de l'angle estimé par la PLL que nous avons conçue. Cet angle est utilisé pour la transformation de Park, permettant la commande séparée des puissances injectées dans le réseau.

- Régulation du courant

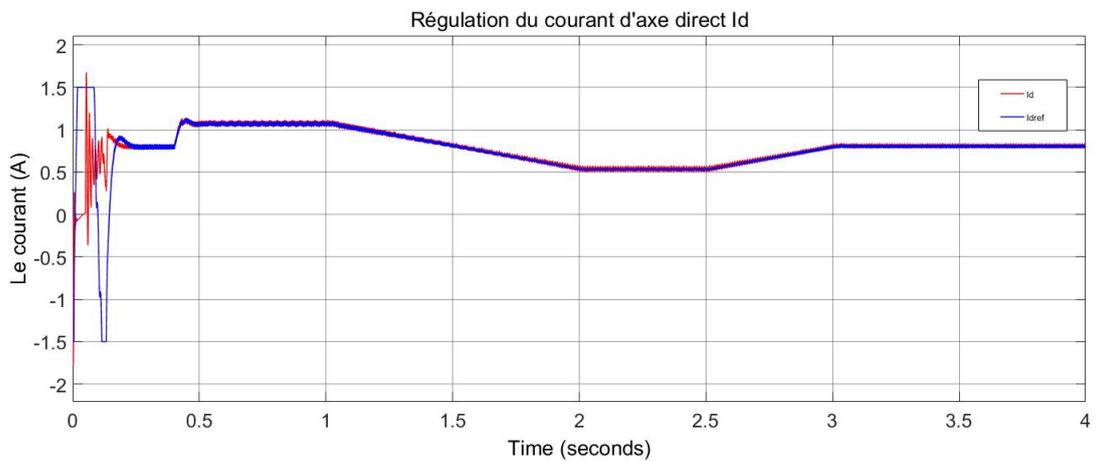


FIG. 4.15 : Régulation du courant  $i_d$

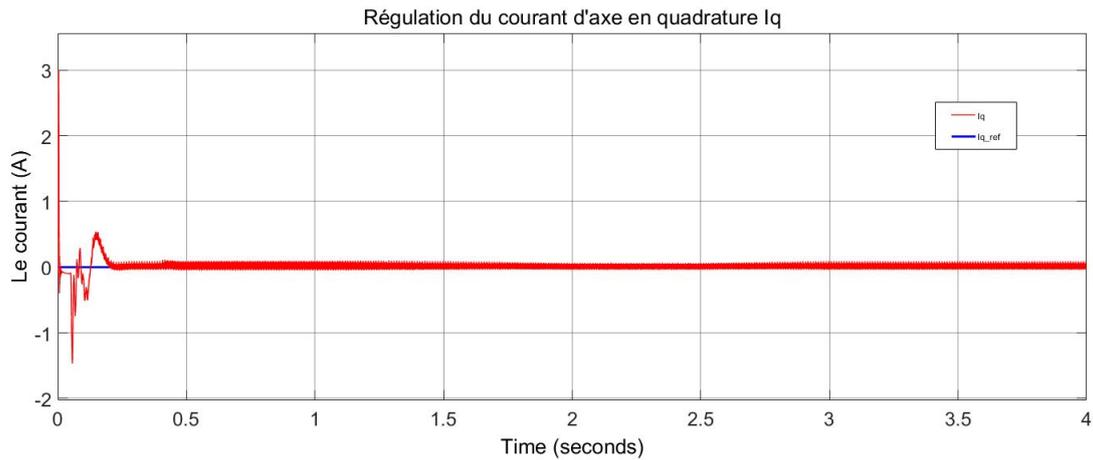


FIG. 4.16 : Régulation du courant  $i_q$

La figure 4.15 et la figure 4.16 illustrent les composantes directe  $I_d$  et en quadrature  $I_q$  du courant dans le repère de Park. Nous appliquons une composante de référence du courant réactif  $I_{qref}$  nulle, tandis que la composante de référence du courant actif  $I_{dref}$  est donnée par la sortie du régulateur du bus continu. Il faut environ 20 ms pour que les composantes  $d$  et  $q$  du courant suivent la valeur de référence et se stabilisent avec une erreur nulle en régime permanent. On observe que l'amplitude du courant actif  $I_q$  réagit aux variations d'irradiation.

- Les puissances

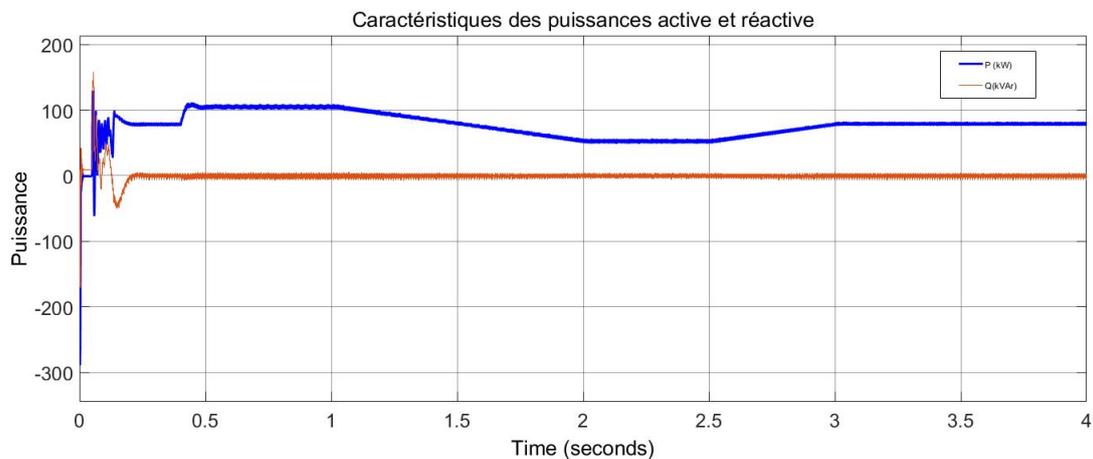


FIG. 4.17 : Caractéristiques des Puissances active et réactive

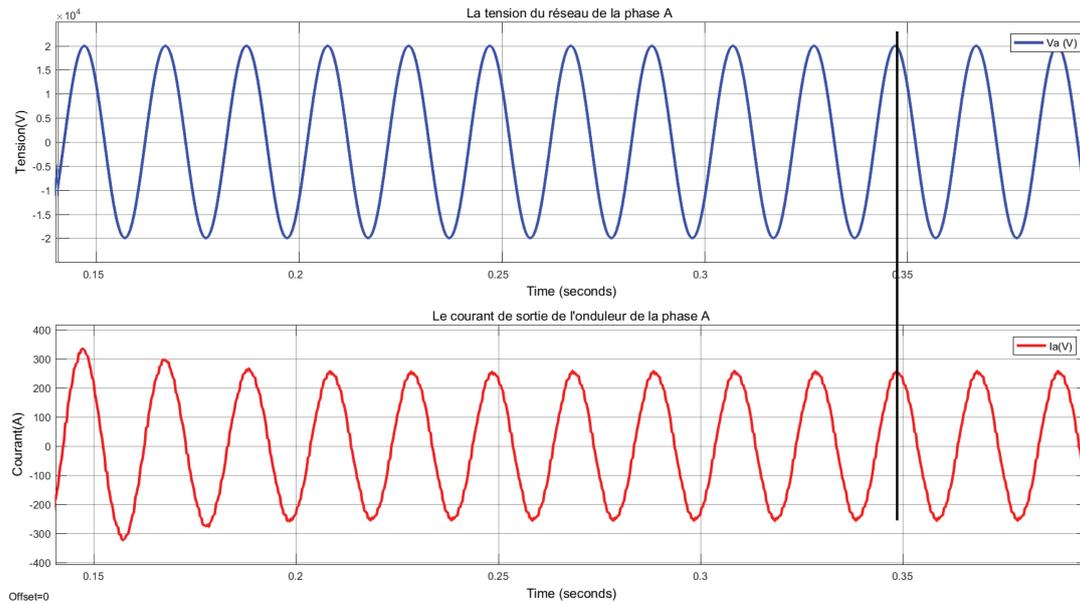


FIG. 4.18 : Courbes de courant de l'onduleur et la tension du réseau

Selon la figure 4.17, la puissance réactive est nulle et la puissance active atteint une valeur maximale en suivant les variations d'irradiation.

Le réseau commence par distribuer intensivement de l'énergie à l'onduleur pendant un court intervalle de temps afin d'atteindre rapidement la tension de référence  $V_{dc}$ , puis il devient un élément absorbant l'excès de puissance active produite par le générateur photovoltaïque et déversée par l'onduleur. Ces résultats indiquent que la régulation s'effectue correctement.

On constate, d'après la figure 4.18, que le courant de sortie de l'onduleur et la tension efficace du réseau sont en phase, car une consigne nulle a été imposée au courant réactif injecté  $I_{qref} = 0$ . Cela explique l'injection exclusive de la puissance active.

Les résultats obtenus par simulations sont généralement validés par rapport aux références bibliographiques.

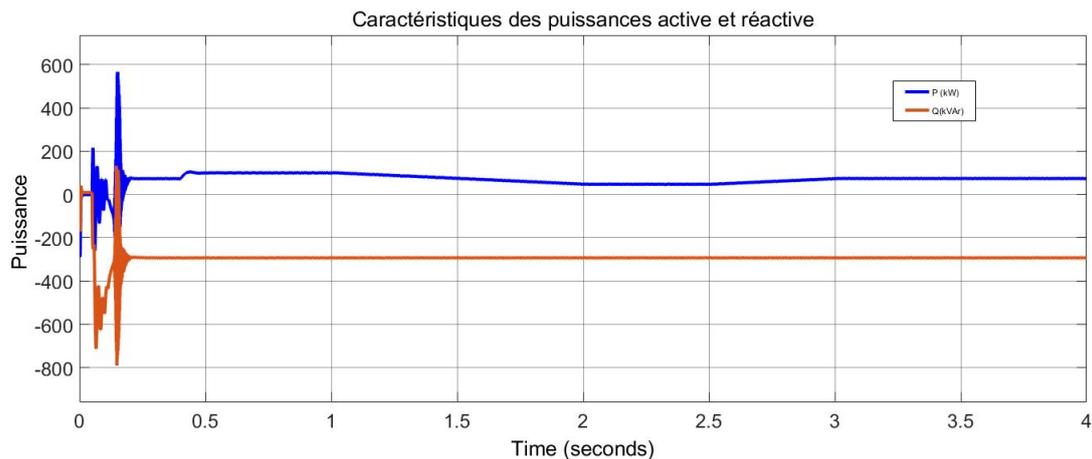


FIG. 4.19 : Caractéristiques des Puissances active et réactive avec injection de puissance réactive

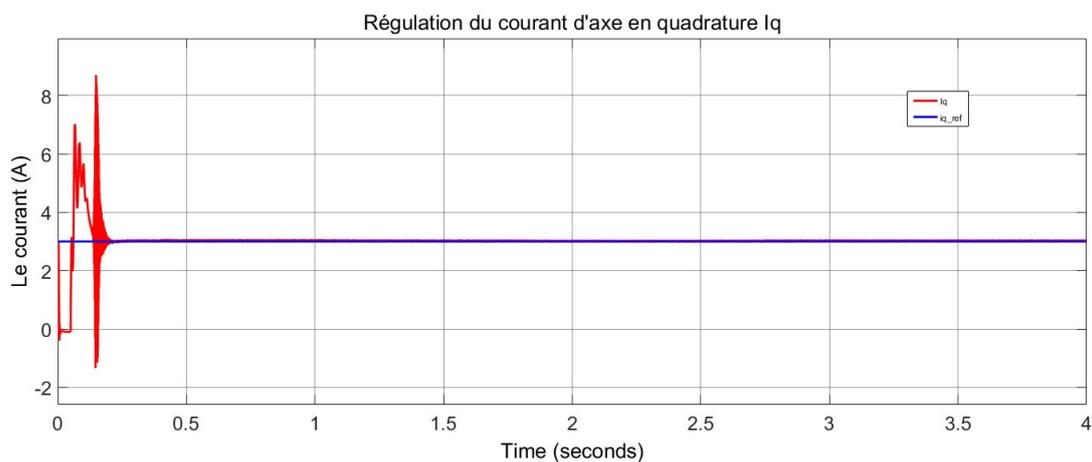


FIG. 4.20 : Régulation du courant  $i_q$

Dans la figure 4.19, la puissance réactive est non nulle car une consigne a été imposée au courant réactif  $I_{qref} = 3A$ . Ainsi, on peut confirmer que le courant  $I_q$  est l'image directe de la puissance réactive. La composante de référence du courant actif  $I_d$ , qui représente la puissance active, est toujours donnée par la sortie du régulateur du bus continu.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Nous avons commencé par examiner l'impact de ce raccordement sur le réseau. Étant donné que ce type de configuration est couramment utilisé, il nécessite une stratégie de contrôle pour être géré efficacement. Nous avons présenté différentes stratégies de contrôle assurant le bon fonctionnement de l'installation, telles que La synchronisation par rapport à l'évolution des tensions du réseau, la régulation des courants pour contrôler directement le flux d'énergie et permettre la gestion

des puissances active et réactive, ainsi que la régulation de la tension aux bornes du bus continu, essentielle pour maintenir la tension de sortie de l'onduleur.

Ces méthodes de contrôles ont prouvé leur efficacité dans les simulations effectuées en présentant les réponses des tensions, courants et puissances obtenus et les changements en fonction des valeurs de références utilisées ainsi que les changements du rayonnement.

## Conclusion et perspectives

### Conclusion générale

Le domaine de l'énergie photovoltaïque connaît une expansion rapide, stimulée par une prise de conscience environnementale et un intérêt croissant pour les énergies renouvelables. Ce secteur offre de nombreuses possibilités de recherche et d'innovation, particulièrement dans le développement et le contrôle des convertisseurs, ainsi que l'amélioration des systèmes de stockage. Le contrôle des convertisseurs est crucial pour optimiser la conversion de l'énergie solaire en électricité utilisable, améliorer l'efficacité des systèmes et assurer une intégration harmonieuse dans les réseaux électriques.

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'études vise à présenter une étude théorique par la modélisation et la simulation d'un onduleur photovoltaïque raccordé au réseau. Ce projet nous a permis non seulement d'étudier l'onduleur, mais aussi de modéliser, contrôler et simuler l'ensemble de la chaîne photovoltaïque énergétiquement connectée au réseau. L'objectif principal de cette recherche est de présenter des méthodes efficaces de contrôle et de gestion pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau public.

Nous avons donc commencé par une présentation des fondamentaux des systèmes photovoltaïques, essentielle pour entreprendre une étude approfondie de ces derniers. Par la suite, nous avons également exposé les différents systèmes de conversion utilisés ainsi que les diverses technologies associées à ces dispositifs.

Le générateur photovoltaïque fonctionne dans des conditions variables, telles que l'irradiation, la température et la charge, ce qui impacte le fonctionnement du système photovoltaïque. Une exploitation optimale de ce système exige un fonctionnement sûr et surtout une optimisation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque (GPV). Ces objectifs peuvent être atteints, en totalité ou en partie, grâce à une commande appropriée. Dans le deuxième chapitre, nous avons utilisé un étage adaptatif contrôlé par la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking), en particulier la méthode de perturbation et d'observation (P & O), pour commander le hacheur Boost en ajustant dynamiquement le rapport cyclique de ce convertisseur afin de maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale (PPM) pour toutes les variations environnementales.

Pour transmettre l'énergie générée par un panneau solaire au réseau public, il est crucial de convertir la puissance continue (DC) en puissance alternative (AC) à l'aide d'un onduleur, dont le bon fonctionnement est primordial. Le troisième chapitre explore le fonctionnement des onduleurs à trois niveaux dans un système à deux étages, en détaillant leurs stratégies de commande. Les onduleurs génèrent des harmoniques, nécessitant l'utilisation de filtres pour respecter les normes de qualité de l'énergie. Les résultats de simulation présentés confirment le principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à 3 niveaux et l'efficacité des filtres utilisés.

Le dernier chapitre a été consacré à la connexion d'une chaîne photovoltaïque au réseau public. Nous avons proposé une stratégie de contrôle pour éviter tout problème affectant le bon fonctionnement de l'installation, comme le problème de synchronisation de la tension. Cette stratégie garantit ainsi un contrôle de la tension du bus continu, maintenant une tension constante à l'entrée de l'onduleur, ainsi que la régulation des courants, permettant de contrôler les puissances actives et réactives.

Ces méthodes de contrôle ont prouvé leur efficacité dans les simulations présentées du fonctionnement de la chaîne photovoltaïque connectée au réseau. Ainsi, nous avons confirmé que les régulations proposées atteignaient leurs objectifs de manière constante, même lorsque les paramètres de référence et le rayonnement étaient modifiés.

Ce projet de fin d'études a été une opportunité précieuse pour approfondir notre compréhension des défis et des opportunités liés à l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Les connaissances que nous avons acquises et les résultats que nous avons obtenus constituent une contribution significative à la recherche dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Ils ouvrent également de nouvelles perspectives pour des innovations futures dans ce domaine crucial pour la transition énergétique mondiale.

Voici quelques perspectives découlant de ce travail :

- Les avancées continues dans les technologies photovoltaïques soulignent l'importance de perfectionner les méthodes de contrôle et de gestion des systèmes solaires pour optimiser leur efficacité dans différentes conditions environnementales. L'exploration de nouvelles structures de convertisseurs est essentielle pour réduire les pertes et accroître les rendements des systèmes photovoltaïques, en particulier dans l'étape de conversion entre les panneaux solaires et le bus continu.
- L'émergence des réseaux électriques intelligents nécessite l'exploration de stratégies de contrôle avancées, telles que l'utilisation de l'intelligence artificielle et de solutions de stockage innovantes, pour une gestion plus dynamique de la production solaire et une intégration plus fluide des systèmes photovoltaïques.
- Avec l'augmentation de l'adoption des systèmes photovoltaïques, il est essentiel de se concentrer sur la durabilité des composants et sur des méthodes de recyclage efficaces pour réduire l'impact environnemental de cette technologie en expansion.
- Des programmes éducatifs et des initiatives de sensibilisation sont essentiels pour encourager une adoption généralisée des énergies renouvelables, en particulier de l'énergie solaire.

En explorant ces perspectives de développement, le domaine de l'énergie photovoltaïque pourrait continuer à progresser vers une adoption plus large et une contribution significative à la transition énergétique mondiale vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables.

# Bibliography

- [1] M. f YADEN, M. EL OUARIACHI, T. MRABTI et al., “Conception et réalisation d’un système photovoltaïque muni d’une commande MPPT numérique”, *Revue des Energies Renouvelables*, t. 14, n° 1, p. 171-186, 31 mars 2011.
- [2] “M. Abdelaziz Hamzaoui, Optimisation de la production de l’électricité renouvelable pour site isolé , Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.”, Bing. ()
- [3] “I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, « Etude de la jonction PN d’un semi conducteur a l’équilibre thermodynamique », *Journal of Electron Devices*, Vol.5, pp.122-126, 2007.”, Bing. ()
- [4] B. MUSTAFA et F. BADREDDINE. “Étude et réalisation d’un onduleur solaire contrôlé par une carte DSP ,” *Projet de Fin d’Etude* ,Ecole Nationale Polytechnique , 2022. ()
- [5] “Cedric Cabal. Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008. Français”, Bing. ()
- [6] H. DERBAL, “Cellules solaires photovoltaïques plastiques enjeux et perspectives”, *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 1<sup>er</sup> jan. 2002.
- [7] A. M. NADER. “Conception D’un Onduleur Solaire Avec Mppt Intégré”, Thèse de Doct , Université Larbi Ben M’hidi Oum el Bouaghi , 2019. ()
- [8] “M.R.M.Boudia, « Modélisation électro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.”, Bing. ()
- [9] “A. Houari, « Contribution a l’étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, France, 2012.”, Bing. ()
- [10] M. WOTTO, “Systèmes solaires photovoltaïques Environnement et énergies renouvelables Résumé , MLD ConsulTech International, Montréal, Canada”,
- [11] S. VIGHETTI, “Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion”, thèse de doct., Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 24 sept. 2010.

- [12] M. PHATTANASAK, “Étude, modélisation et mise en oeuvre de convertisseurs DC-DC isolés multiport et modulaires , Thèse De Doc , Université de Lorraine”, déc. 2012.
- [13] A. ELSEROUGI, I. ABDELSALAM, A. MASSOUD et S. AHMED, “A Non-Isolated Hybrid-Modular DC-DC Converter for DC Grids : Small-Signal Modeling and Control”, *IEEE Access*, t. 7, p. 132 459-132 471, 2019.
- [14] F. CHOUAF. “Commande d’un onduleur triphase par mli vectorielle , Thèse De Doc , ” Université Badji Mokhtar- Annaba , 2018. ()
- [15] A. BOUZIDI. “Mémoire présenté pour l’obtention du diplôme de magister en électrotechnique : Diagnostic et contrôle des systèmes de conditionnement de l’énergie photovoltaïque. cas d’un système connecté au réseau électrique , Mémoire de Projet de Fin d’Etudes ,” Bing. ()
- [16] N. AOUCHICHE, “Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque.”, thèse de doct., Université Bourgogne Franche-Comté, 28 jan. 2020.
- [17] “Gildas Ragnagnéwendé Tapsoba, « mAPSOBA,« Maximisation d du transfert de l’énergie d’un champ photovoltaïque tenant compte du phénomène d’ombrage partiel : Connexion rréseau électrique » mémoire présenté à l’école de technologie supérieure comme exigence partielle à l’obtention de la maîtrise avec mémoire en génie électrique, école de technologie supérieure université du québecMemoire Presente a L’École de Technologie Superieure comme exigence partielle a l’obtention de la maistruse avec memoire en genie electrique , École de Technologie Superieure Universite du QUÉBEC, 2019”, Bing. ()
- [18] “Liu, Y.-H., Chen, J.-H., & Huang, J.-W. (2015). A review of maximum power point tracking techniques for use in partially shaded conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*”, Bing. ()
- [19] A. RENNANE et D. SAHEB - KOUSSA, “Evaluation des performances de la boucle à verrouillage de phase (PLL) pour l’interconnexion d’une source d’énergie renouvelable au réseau électrique”, *R vu des Energies Renouvelables*, t. 17, n° 2, p. 227-243, 30 juin 2014.
- [20] Z. KOALAGA, “Modélisation et simulation d’un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB /SIMULINK”, 1<sup>er</sup> jan. 2016.
- [21] N. SUBHANI, Z. MAY, M. K. ALAM, I. KHAN, M. A. HOSSAIN et S. MAMUN, “An Improved Non-Isolated Quadratic DC-DC Boost Converter With Ultra High Gain Ability”, *IEEE Access*, t. 11, p. 11 350-11 363, 2023.
- [22] G. TOUSSAINT, Z. KOALAGA, E. SIMONGUY, F. ZOUGMORÉ et D. BONKOUNGOU. “Modélisation et simulation d’un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK Modélisation et simulation d’un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB /SIMULINK”. (nov. 2016).
- [23] S. ABOUDA, “Contribution à La Commande Des Systèmes Photovoltaïques : Application Aux Systèmes de Pompages.”, These de doctorat, Reims, 14 avr. 2015.

- [24] A. CID PASTOR, “Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques”, Theses, INSA de Toulouse, sept. 2006.
- [25] K. BEDOUD, H. MERABET et B. TAHAR, “Power control strategy of a photovoltaic system with battery storage system”, t. 69, déc. 2022.
- [26] U. ASHRAF, “A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems, article, academia.edu , 2020”,
- [27] R. DIOUF, “Modélisation des injections de puissance d’un système PV sur un réseau public , Memoire Pour l’Obtention de Master En Ingenierie de l’Eau et l’Environnement , 2012”,
- [28] M. Y. KHAN, H. LIU, Z. YANG et X. YUAN, “A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies”, *Energies*, t. 13, p. 4185, 13 août 2020.
- [29] D. PICAULT, “Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies”, thèse de doct., Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1<sup>er</sup> oct. 2010.
- [30] X. JIANG, “Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 2020”,
- [31] V. GUENEGUES, “Hygiène de la vie privée et sécurité électrique”,
- [32] C. BENZAZAH, M. A. LAFKIH et L. LAZRAK, “Etude comparative entre deux topologies d’onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM [ Comparative study between two topologies three-phase inverters, conventional 2-level and NPC 3-level with two methods different of control, SPWM and SWM ]”, t. 9, n° 2, 2014.
- [33] X. JIANG, “Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 2020”,
- [34] K. BERKOUNE, “Approche Mathématique Pour La Modulation de Largeur d’impulsion Pour La Conversion Statique de l’énergie Électrique : Application Aux Onduleurs Multiniveaux”,
- [35] J. FARHOOD, “Modelling, Design and Implementation of DQ Control in Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Systems used in Domestic Dwellings.”, déc. 2019.
- [36] T. M. C. LE, “Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle / commande et rejet de perturbations , These de doctorat, Universite de Grenoble, 2012”,
- [37] B. A. ABDELALI, “réseau utilisant un onduleur T-type à trois niveaux , Projet de fin d’études, École Nationale Polytechnique,”, 2020.
- [38] G. M. TINA et G. CELSA, “A Matlab/Simulink model of a grid connected single-phase inverter”, in *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Stoke On Trent, United Kingdom : IEEE, sept. 2015, p. 1-6.

# Annexes

## Simulation du systeme

### 1.1 Système

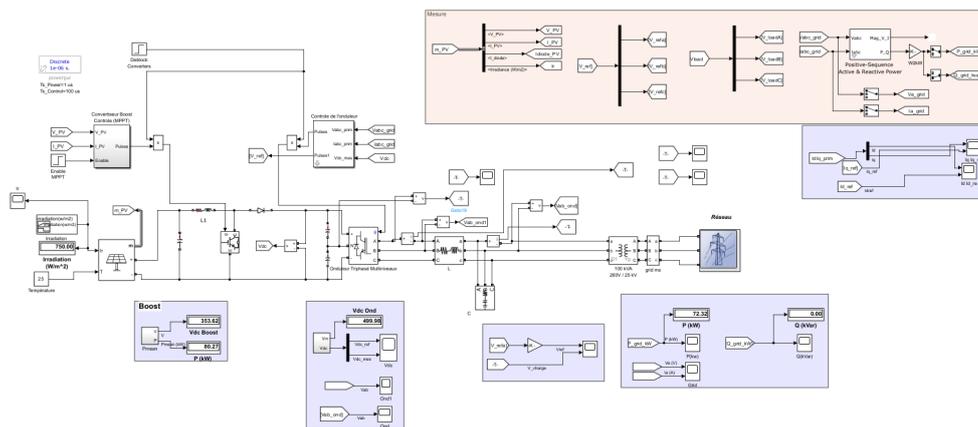


FIG. 1.1 : La simulation du systeme final

### 1.2 Principe de fonctionnement

1. De  $t = 0$  s à  $t = 0,05$  s, les impulsions vers les convertisseurs Boost et Onduleur sont bloquées. Le pont à trois niveaux fonctionne alors comme un redresseur à diodes, chargeant les condensateurs du bus DC à plus de 500 V.
2. À partir de  $t = 0,05$  s, les convertisseurs Boost et Onduleur sont débloqués. La tension du bus continu est régulée à  $V_{dc} = 500$  V et le rapport cyclique du Boost est fixé à  $D = 0,5$ .
3. À  $t = 0,4$  s, le MPPT s'active et commence à réguler la tension PV en ajustant le cycle de fonctionnement pour extraire la puissance maximale.
4. De 0,4 seconde à 4 secondes, diverses variations d'irradiance sont appliquées afin d'illustrer les bonnes performances du contrôleur MPPT.