



Mémoire de fin d'étude

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique

Présenté par :  
**BOUGHERARA Selsabil**  
**CHEBIRA Soulef**

Thème

**Synthèse d'une loi de commande du  
MPPT pour un système de conversion à  
un seul étage**

Soutenu publiquement, le 29 / 07 /2022, devant le jury composé de :

M. BOUKLI HACENE Fouad	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
M. ABDI Sidi Mohammed	M.C.B	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. OUDJAMA Farid	Doctorant	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. CHERKI Brahim	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Mme. BOUSMAHA Imen	M.C.B	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2021/2022

## **Remerciements**

*Tout d'abord je remercie Allah qui m'a donné la volonté, le courage et la patience pour terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements*

*À notre Encadrant Abdi Sidi Mohammed*

*Votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité notre profond respect. Nous vous remercions pour votre accueil et votre patience ainsi que votre confiance et vos conseils.*

*À notre Co-encadrant Monsieur OUDJAMA Farid*

*Nos profondes gratitude s'orientent vers vous, pour vos judicieux conseils, pour votre aide et votre confiance, ainsi que vos encouragements Veuillez trouver à travers ces mots, le témoignage de nos sincères remerciements et notre plus grande estime.*

*Aux Monsieur CHERKI Brahim, Monsieur BOUKLI Fouad et Madame BOUSMAHA Imen, les membres du jury, vous nous avez fait un grand honneur en acceptant d'évaluer ce mémoire. Nous vous remercions fortement et tenons à vous exprimer nos profondes gratitude et nos sentiments les plus respectueux. Un grand honneur d'avoir Monsieur BOUKLI Fouad, président de la composante du jury.*

*Un grand merci à nos familles qui nous ont toujours soutenus dans les meilleurs moments comme dans les pires, chers mères et pères.*

*Nous exprimons nos remerciements les plus sincères et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À Dieu.*

*Pour être mon appui, mon repère, ma solution et mon éternel espoir. Pour la force qu'il me donne, et qu'il donne aux personnes qui m'ont aidé et soutenu. Merci pour toutes les fois où je vous ai imploré et vous m'avez exaucé. Et la meilleure des récompenses sera de voir un jour votre visage plein de Majesté.*

*À mes chers parents,*

*Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*À ma chère sœur*

*Ibtihel pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,*

*À mes chers frères,*

*Abdou ET Imad pour leur appui et leur encouragement,*

*À ma chère Tente*

*Djouweyda pour leurs judicieux conseils, pour leur aide et leur soutien moral,*

*À toute mes chers amis*

*Meriem, Amel, Zineb, Soulef, Soumia et Bouchra. On a passé des moments inoubliables pleins d'humour et de confiance et d'amitié et fidélité, je vous remercie pour votre aide et vos encouragements.*

*À mon binôme Soulef pour son aide*

*À toute ma famille*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible, Merci d'être toujours là pour moi.*

*BOUGHERRARA Selsabil*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À Dieu.*

*Pour être mon appui, mon repère, ma solution et mon éternel espoir. Pour la force qu'il me donne, et qu'il donne aux personnes qui m'ont aidé et soutenu. Merci pour toutes les fois où je vous ai imploré et vous m'avez exaucé. Et la meilleure des récompenses sera de voir un jour votre visage plein de Majesté.*

*À ma très chère mère,*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*À mon très cher père,*

*Tu as toujours été à mes côtés pour le soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*À mes chers frères,*

*Sofiane, Hocine, Adlane ET Imad pour leur appui et leur encouragement,*

*À toute mes chers amis,*

*En particulier : Bouchra, Nada, Selsabil, Weam, Hania, Meriem, Fatima Zohra et Samia qui me manque tellement. On a passé des moments inoubliables pleins d'humour et de confiance et d'amitié et fidélité, je vous remercie pour votre aide et vos encouragements.*

*À mon binôme Selsabil,*

*Pour son aide, son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce travail.*

*À toute ma famille,*

*À tous mes collègues de la promotion d'Automatique,  
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,  
et le fruit de votre soutien infaillible,  
Merci d'être toujours là pour moi.*

*CHEBIRA Soulef*

## Résumé

Les développements récents des énergies renouvelables ont conduit à l'émergence des sources d'énergie décentralisées (DER). Ces sources de faible puissance sont généralement installées au niveau local et peuvent être utilisées pour soutenir le réseau de distribution afin de répondre rapidement aux pics de puissance. Cependant, le raccordement des DER au réseau pose de nouveaux problèmes, principalement concernant la stabilité et la qualité de l'énergie.

Ce mémoire aborde la question des stratégies de contrôle pour un onduleur photovoltaïque (PV) à un étage. L'étude proposée traite le raccordement d'un onduleur monophasé au réseau qui permet aux panneaux photovoltaïques d'injecter de l'électricité produite. Une structure de contrôle complète pour le système PV monophasé est également présentée. Les principaux éléments de la structure de contrôle du système photovoltaïque sont : - une commande MPPT basée sur la méthode P&O ; - une méthode de synchronisation utilisant la boucle à verrouillage de phase (BPV), - un contrôleur de tension CC et une anticipation de puissance ; - et un contrôleur proportionnel résonnant (PR).

## Mots-clés

Système photovoltaïque, conversion à un seul étage, onduleur monophasé, commande MPPT, régulateur PR, boucle à verrouillage de phase (BPV), MATLAB, SIMULINK.

## Abstract

Recent developments in renewable energy have led to the emergence of decentralized energy sources (DER). These low-power sources are typically installed at the local level and can be used to support the distribution grid to quickly respond to power peaks. However, connecting DERs to the grid poses new challenges, primarily regarding stability and power quality.

This dissertation addresses the issue of control strategies for a single-stage photovoltaic (PV) inverter. The proposed study deals with the connection of a single-phase inverter to the grid that allows PV panels to inject generated electricity. A complete control structure for the single-phase PV system is also presented. The main elements of the PV system control structure are: - a P&O-based MPPT control; - a synchronization method using the phase-locked loop (PLL), - a DC voltage controller and power anticipation; - and a resonant proportional controller (PR).

## Keywords

Photovoltaic system, single stage conversion, single phase inverter, MPPT control, PR controller, phase locked loop (PLL), MATLAB, SIMULINK.

## ملخص

أدت التطورات الأخيرة في مجال الطاقة المتجددة إلى ظهور مصادر الطاقة اللامركزية (DER). عادةً ما يتم تثبيت مصادر الطاقة المنخفضة هذه على المستوى المحلي ويمكن استخدامها لدعم شبكة التوزيع للاستجابة بسرعة لذروات الطاقة. ومع ذلك، فإن ربط مصادر الطاقة اللامركزية بالشبكة يطرح تحديات جديدة، في المقام الأول فيما يتعلق بالاستقرار وجودة الطاقة.

تتناول هذه الرسالة مسألة استراتيجيات التحكم في العاكس الكهروضوئي أحادي المرحلة. تتناول الدراسة المقترحة توصيل عاكس أحادي الطور بالشبكة التي تسمح للألواح الكهروضوئية بحقق الكهرباء المولدة. كما يتم تقديم هيكل تحكم كامل للنظام الكهروضوئي أحادي الطور. العناصر الرئيسية لهيكل التحكم في النظام الكهروضوئي هي: - تحكم MPPT القائم على P&O. - طريقة التزامن باستخدام الحلقة المغلقة بالطور (PLL)، - وحدة تحكم في الجهد المستمر وتوقع القدرة؛ - ومصحح الرنين النسبي (PR).

## كلمات مفتاحية

النظام الكهروضوئي، التحويل أحادي المرحلة، العاكس أحادي الطور، التحكم MPPT، مصحح الرنين النسبي، الحلقة المغلقة الطور، MATLAB، SIMULINK.

## Table des matières

Liste des figures .....	9
Liste des tableaux .....	11
Liste des abréviations .....	12
Introduction générale .....	13

### CHAPITRE 1 : Généralités sur les générateurs photovoltaïques

1.1. Introduction .....	16
1.2. L'énergie photovoltaïque .....	16
1.2.1. Rayonnement solaire .....	16
1.3. Les cellules photovoltaïques .....	16
1.3.1. Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	16
1.3.2. Les types des cellules photovoltaïques.....	17
1.4. Générateur PV .....	18
1.4.1. Association des cellules PV .....	18
1.4.2. Protection d'un GPV .....	20
1.5. Modèle électrique équivalant d'une cellule PV .....	21
1.5.1. Le modèle pratique.....	21
1.5.2. Le modèle idéal .....	22
1.6. Caractéristiques des générateurs photovoltaïques .....	23
1.6.1. Tension en circuit ouvert $V_{co}$ .....	23
1.6.2. Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	23
1.6.3. Point de fonctionnement $P_{max} = (V_{max}, I_{max})$ .....	23
1.6.4. Facteur de forme .....	24
1.6.5. Rendement .....	24
1.6.6. Caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V).....	24
1.6.7. L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du GPV .....	27
1.6.8. L'influence de la température sur les caractéristiques de GPV.....	28
1.7. Les différentes applications de l'énergie photovoltaïque .....	29
1.8. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	31
1.8.1. Les avantages des systèmes photovoltaïques .....	31
1.8.2. Les inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	32
1.9. Conclusion .....	32

## CHAPITRE 2 : Généralités sur les convertisseurs CC/CC et CC/CA

2.1.	Introduction .....	35
2.2.	Convertisseurs Continu-Continu (Les hacheurs) .....	35
2.2.1.	Définition .....	35
2.2.2.	Principe de fonctionnement.....	35
2.2.3.	Mode de fonctionnement .....	36
2.2.3.1.	Mode de conduction continue (MCC) .....	36
2.2.3.2.	Mode de conduction discontinue (MCD) .....	36
2.2.3.3.	Limite entre la conduction continue et discontinue .....	36
2.2.4.	Classification des convertisseurs CC-CC .....	36
2.2.4.1.	Convertisseur Boost .....	36
2.2.4.2.	Convertisseur Buck .....	40
2.2.4.3.	Convertisseur Buck-Boost.....	41
2.2.5.	Applications des convertisseurs CC-CC .....	43
2.3.	Convertisseur Continu-Alternatif (Les onduleurs).....	44
2.3.1.	Définition .....	44
2.3.2.	Classification des onduleurs .....	44
2.3.2.1.	Les onduleurs du courant et les onduleurs de tension .....	44
2.3.2.2.	Les onduleurs autonomes et non autonomes .....	45
2.3.2.3.	Les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés .....	45
2.3.3.	Généralité sur les onduleurs monophasés .....	45
2.3.3.1.	L'onduleur monophasé en demi-pont.....	45
2.3.3.2.	L'onduleur monophasé en pont .....	47
2.3.4.	Les applications des onduleurs.....	51
2.4.	Caractéristiques d'un onduleur pour les systèmes photovoltaïques .....	52
2.5.	Les systèmes de conversion photovoltaïques .....	52
2.5.1.	Les systèmes de conversion photovoltaïques à deux étages .....	53
2.5.2.	Les systèmes de conversion photovoltaïques à un seul étage .....	53
2.6.	Conclusion .....	54

## CHAPITRE 3 : Commande MPPT d'un système photovoltaïque de conversion à un seul étage

3.1.	Introduction.....	56
3.2.	MPPT .....	56
3.2.1.	Classification des commandes MPPT .....	56
3.2.1.1.	Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée/sortie.....	56

3.2.1.2.	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche ou contrôle.....	57
3.2.2.	Les algorithmes de la commande MPPT.....	57
3.2.2.1.	La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	57
3.2.2.2.	La méthode incrémentation de la conductance (IC).....	59
3.2.3.	Autres méthodes .....	62
3.2.4.	Comparaison entre les méthodes MPPT.....	62
3.2.4.1.	Algorithme perturbation and observation (P&O).....	62
3.2.4.2.	La méthode incrémentation de la conductance (IC).....	62
3.3.	Description du système .....	63
3.3.1.	Le filtre LCL .....	64
3.3.2.	Stratégie de contrôle.....	64
3.3.2.1.	Algorithme de MPPT .....	64
3.3.2.2.	Le contrôleur de tension CC et l'anticipation de puissance.....	65
3.3.2.3.	Contrôleur du courant du réseau .....	66
3.3.2.4.	Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	66
3.4.	Simulation du système de conversion à un seul étage.....	69
3.4.1.	Calcul des paramètres de filtres .....	69
a.	Calcul de valeur du condensateur.....	69
b.	Calcul de valeur de l'inductance .....	69
3.4.2.	MLI .....	70
3.4.3.	Calcul des paramètres du Contrôleur PR .....	70
3.4.4.	Caractéristiques du GPV .....	72
3.4.5.	Implémentation de PLL sur MATLAB Simulink .....	72
3.4.6.	Schéma du correcteur sur MATLAB Simulink .....	74
3.4.7.	Simulation et interprétation.....	75
3.4.7.1.	Variation de l'éclairement .....	79
3.4.7.2.	Variation de la température .....	81
3.5.	Conclusion .....	82
	Conclusion générale .....	83
	Perspectives .....	84
	Bibliographies .....	85
	ANNEXE .....	91

## Liste des figures

### CHAPITRE 1 : Généralités sur les générateurs photovoltaïques

<b>Figure 1.1</b> : Fonctionnement de cellule photovoltaïque .....	17
<b>Figure 1.2</b> : Les différents types des cellules PV .....	18
<b>Figure 1.3</b> : Groupement de $N_s$ cellules en série .....	19
<b>Figure 1.4</b> : Groupement de $N_p$ cellules en parallèle .....	20
<b>Figure 1.5</b> : Schématisation d'un GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour .....	21
<b>Figure 1.6</b> : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV .....	21
<b>Figure 1.7</b> : Caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) .....	25
<b>Figure 1.8</b> : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) .....	27
<b>Figure 1.9</b> : L'influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) .....	28

### CHAPITRE 2 : Généralités sur les convertisseurs CC/CC et CC/CA

<b>Figure 2.1</b> : Convertisseur CC-CC .....	35
<b>Figure 2.2</b> : Schéma électrique du convertisseur Boost .....	36
<b>Figure 2.3</b> : Formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite) du convertisseur .....	37
<b>Figure 2.4</b> : Schéma électrique de convertisseur Buck .....	40
<b>Figure 2.5</b> : Formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite) du convertisseur .....	40
<b>Figure 2.6</b> : Schéma électrique de convertisseur Buck-Boost .....	42
<b>Figure 2.7</b> : Formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite) du convertisseur .....	42
<b>Figure 2.8</b> : Symbole d'un onduleur .....	44
<b>Figure 2.9</b> : Onduleur du courant .....	44
<b>Figure 2.10</b> : Onduleur de tension .....	45
<b>Figure 2.11</b> : Schéma électrique d'un onduleur en demi pont .....	46
<b>Figure 2.12</b> : Schéma électrique d'un onduleur en pont .....	47
<b>Figure 2.13</b> : Allure de tension (à gauche) et du courant (à droite) d'une charge résistive ..	49
<b>Figure 2.14</b> : Les cas possibles de commutation de l'onduleur monophasé en pont .....	51
<b>Figure 2.15</b> : L'allure de la tension et le courant aux bornes de la charge inductive .....	51
<b>Figure 2.16</b> : Système de conversion à deux étages .....	53

<b>Figure 2.17</b> : Système de conversion à un seul étage .....	54
--	----

### **CHAPITRE 3 : Commande MPPT d'un système photovoltaïque de conversion à un seul étage**

<b>Figure 3.1</b> : Le principe de la méthode P&O .....	58
<b>Figure 3.2</b> : Organigramme de l'algorithme P&O .....	59
<b>Figure 3.3</b> : L'évolution de point de fonctionnement selon le signe de $dP/dV$ .....	61
<b>Figure 3.4</b> : Organigramme de l'algorithme IC .....	61
<b>Figure 3.5</b> : Schéma descriptif d'un système de conversion à un seul étage.....	63
<b>Figure 3.6</b> : Filtre LCL .....	64
<b>Figure 3.7</b> : Contrôle de la puissance d'entrée .....	65
<b>Figure 3.8</b> : Signal de tension généré .....	67
<b>Figure 3.9</b> : MLI simple .....	67
<b>Figure 3.10</b> : MLI par hystérésis .....	68
<b>Figure 3.11</b> : MLI Sinus-Triangle .....	68
<b>Figure 3.12</b> : Schéma du contrôleur PR.....	70
<b>Figure 3.13</b> : Caractéristiques de GPV .....	72
<b>Figure 3.14</b> : Schéma SIMULINK de PLL .....	73
<b>Figure 3.15</b> : La chaîne du contrôle d'un onduleur monophasé .....	74
<b>Figure 3.16</b> : Schéma SIMULINK du système de conversion photovoltaïque à un seul étage .....	76
<b>Figure 3.17</b> : La puissance de sortie de MPPT .....	77
<b>Figure 3.18</b> : Le courant de sortie de l'onduleur .....	78
<b>Figure 3.19</b> : Le courant et la tension du réseau .....	79
<b>Figure 3.20</b> : La variation d'irradiation solaire .....	80
<b>Figure 3.21</b> : L'influence de l'éclairement sur le courant de réseau .....	80
<b>Figure 3.22</b> : La variation de la température .....	81
<b>Figure 3.23</b> : L'influence de la température sur le courant de réseau .....	82

## Liste des tableaux

### CHAPITRE 1 : Généralités sur les générateurs photovoltaïques

<b>Tableau 1.1</b> : Caractéristiques de champ PV .....	25
---	----

### CHAPITRE 2 : Généralités sur les convertisseurs CC/CC et CC/CA

<b>Tableau 2.1</b> : Conduction des interrupteurs dans un onduleur monophasé à demi pont.....	46
---	----

<b>Tableau 2.2</b> : Les configurations possibles d'un onduleur monophasé en pont.....	47
--	----

<b>Tableau 2.3</b> : Conduction des interrupteurs dans un onduleur monophasé à pont.....	48
--	----

## **Liste des abréviations**

**PV** : Photovoltaïque

**GPV** : Générateur Photovoltaïque

**DER** : Sources d'Energies Décentralisées « Decentralized Energy Resources »

**FF** : Facteur de Forme « Form Factor »

**DC/CC** : Direct Current / Courant Continu

**AC/CA** : Alternatif Current / Courant Alternatif

**MCC** : Mode de Conduction Continue

**MCD** : Mode de Conduction Discontinue

**IGBT** : Transistor Bipolaire à Grille Isolée « Isolated Gate Bipolar Transistor »

**MOSFET** : Transistor à Effet de champs à grille Métal Oxyde

**MPPT** : Poursuit du Point de Puissance Maximale « Maximum Power Point Tracking »

**PPM** : Point de Puissance Maximale

**P&O** : Perturbation et Observation « Perturb and Observe »

**IC** : Conductance Incrémentale « Incremental Conductance »

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion

**PWM** : Pulse Width Modulation

**PI** : Proportionnel Intégral

**PR** : Proportionnel Résonant

**BPV** : Boucle à Verrouillage de Phase

**PLL** : Phase Locked Loop

## Introduction générale

Les énergies renouvelables ou « énergies vertes » désignent un ensemble de moyens de produire l'énergie à partir de sources théoriquement illimitées, L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que les énergies renouvelables deviennent de plus en plus une solution prometteuse. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps telle que charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables qui sont produites à partir de sources qui sont théoriquement illimitées comme le soleil, ou le vent...

L'énergie solaire plus précisément l'énergie photovoltaïque (PV) est considérée comme une source d'énergie renouvelable largement répandue, en raison de son faible coût d'exploitation, de son faible coût d'entretien et surtout à son caractère écologique et non polluant. Selon la littérature, les cellules PV deviendront les sources d'énergie renouvelables alternatives les plus importantes jusqu'en 2040 [52].

Le marché de l'énergie photovoltaïque continue de se développer à un rythme élevé. La capacité photovoltaïque mondiale installée en 2020 atteindre entre 121 GW et 152 GW [53]. En outre, le niveau du prix des modules photovoltaïques et les coûts du système ont considérablement diminué. L'utilisation de systèmes PV connectés en parallèle au réseau a été simplifiée.

Différentes topologies de convertisseur d'interface peuvent être utilisées dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque. Les deux configurations typiques d'un système PV connecté au réseau sont à un ou deux étages. La configuration à un seul étage utilise un seul convertisseur de puissance. Avant de connecter un système PV au réseau électrique, la tension continue des modules solaires doit être convertie en tension alternative, cette opération est faite par des convertisseurs d'électronique de puissance (l'onduleur), Le but de l'électronique de puissance dans les systèmes photovoltaïque est de convertir le courant continu des panneaux PV en courant alternatif vers le réseau, avec le meilleur rendement possible, le coût le plus bas et en conservant une performance supérieure. La configuration à un seul étage utilise un seul convertisseur de puissance, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé et un faible coût par rapport à la topologie à deux étages.

Néanmoins, la stratégie de contrôle doit être élaborée pour extraire la puissance maximale possible et la transférer avec précision du générateur photovoltaïque au réseau avec moins de pertes. Dans ce cas, plus d'efforts seront consacrés à la conception du contrôleur.

Ce mémoire a pour but de synthétiser une loi de commande MPPT pour un système de conversion photovoltaïque monophasé à un seul étage. Une structure de contrôle complète pour le système PV monophasé est également présentée. Une méthode de perturbation et observation (P&O) a été utilisée afin de suivre le PPM de la caractéristique PV. Afin d'obtenir une référence du courant sinusoïdale propre (synchronisée avec la tension du réseau), on utilise une PLL, un contrôleur de tension CC et une anticipation de puissance sont utilisées pour améliorer la dynamique du système, un nouveau type de régulateur à cadre stationnaire appelé Proportionnel Résonant (PR) est introduit pour le contrôle du courant injecté.

Le mémoire est subdivisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les générateurs photovoltaïques, l'effet photovoltaïque, le principe de fonctionnement, les caractéristiques des générateurs PV ainsi que l'influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques des GPV, à la fin de ce chapitre nous avons donné des applications de l'énergie PV dans quelques domaines et les avantages et les inconvénients de l'énergie PV.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation des convertisseurs CC/CC et CC/CA et les caractéristiques d'un onduleur PV, à la fin de ce chapitre nous avons défini la structure de chaque stratégie de conversion (conversion à un seul étage et deux étages).
- Dans le troisième chapitre, nous avons commencé par présenter les différentes commandes MPPT appliquées dans la littérature. Après, nous avons défini la stratégie de contrôle appliquée à notre système. À la fin, nous étudions une modélisation et simulation par MATLAB/SIMULINK d'un système de conversion photovoltaïque monophasé à un seul étage avec une commande MPPT suivie par une chaîne de contrôleur décrit en détail dans ce chapitre.

# **Chapitre 01 :**

# **Généralités sur les**

# **générateurs**

# **photovoltaïques**

## 1.1. Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont les éléments principaux de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, cette conversion est faite grâce au phénomène physique dite l'effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous allons présenter des notions introductives sur les générateurs photovoltaïques qui seront utile dans la suite de notre travail. De plus, nous étudions les caractéristiques des GPV en utilisant MATLAB / SIMULINK pour voir l'influence de la variation des conditions météorologiques sur les GPV.

## 1.2. L'énergie photovoltaïque

Le mot "photovoltaïque" (PV) se compose de deux mots ; "photo" signifie lumière et "voltaïque" (du nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1825) qui a découvert la première cellule électrochimique) signifie électricité. Ainsi, la définition de la conversion photovoltaïque est l'utilisation de cellules photovoltaïques pour convertir directement la lumière en électricité. La première source inépuisable de lumière est le soleil [1].

### 1.2.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Par conséquent, en plus des rayons cosmiques, il comprend également les ultraviolets, la lumière visible et les ondes radio [2].

## 1.3. Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques appeler aussi photopiles sont les éléments de base du système photovoltaïque, son fonctionnement est basé sur le matériau de construction qui est un semi-conducteur. Ils permettent la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique cette convention est possible grâce à l'effet photovoltaïque qui a été découvert en 1839 par le physicien français « Alexandre Becquerel ». Ce phénomène est produit lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière les atomes de la couche de valence ont tendance à se décrocher. Dans les cellules PV, les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue et faible.

### 1.3.1. Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repos sur le matériau utilisé, c'est un élément semi-conducteur. Quand les semi-conducteurs (généralement on utilise le silicium)

sont exposées à la lumière les atomes de la couche de valence ont tendance à se décrocher en créant une différence de potentiel faible, mais ça ne fait pas un courant électrique, un courant électrique est une circulation d'électrons dans un sens bien précis, pour obtenir ce courant il faut doper ce semi-conducteur.

Le dopage de semi-conducteur est une opération qui consiste à obtenir d'un côté un surplus d'électrons et d'un autre coté un déficit d'électrons ont créés une différence de potentiel de cette manière les électrons circulant toujours de la borne négative (qui possède un surplus d'électrons) vers la borne positive (qui possède un déficit d'électrons).

Une cellule est constituée de deux couches c'est une jonction PN. La couche exposée à la lumière est dopée N en ajoutant un matériau pour avoir un surplus d'électrons (par exemple du phosphore possédant 5 électrons sur sa dernière couche ainsi l'atome susceptible à libérer un électron). La couche inférieure est dopée P en ajoutant un matériau pour avoir un déficit des électrons (par exemple du bore qui possède lui 3 électrons seulement sur sa périphérie, ainsi l'atome manque un électron pour la réalisation des liaisons, le bore va donc capter un électron dans le reste du matériau). Cela permet de créer un courant électrique, dès que le soleil expose sur les cellules, les électrons du semi-conducteur se mettent à circuler et on obtient un courant. Ce fonctionnement est résumé par la figure (1.1) si dessous.

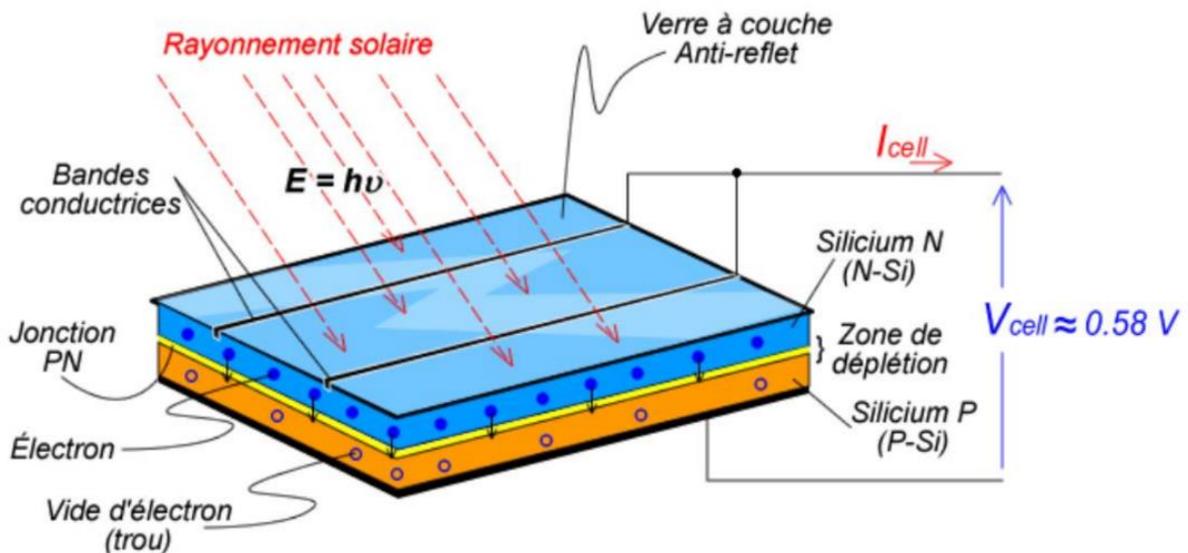


Figure 1.1: Fonctionnement de cellule photovoltaïque [3]

### 1.3.2. Les types des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types des cellules photovoltaïque on va illustrer par la suite les types les plus connus : [4]

- **Monocristallin** : ce type de cellule est fabriqué dans des laboratoires de haute technologie à partir d'un seul cristal de silicium parfaitement homogène ce types offre le meilleur rendement par rapport à les autres types déjà indiqué, le rendement varie entre 15% à 20%.
- **Polycristallin** : ce type est formée de différent cristaux de silicium, elle offre un rendement moins efficace que celle de monocristallin généralement entre 13% à 15%.
- **Amorphe** : Le terme amorphe fait référence à l'absence de toute structure cellulaire géométrique. Le rendement de ce type est entre 5% à 10%.

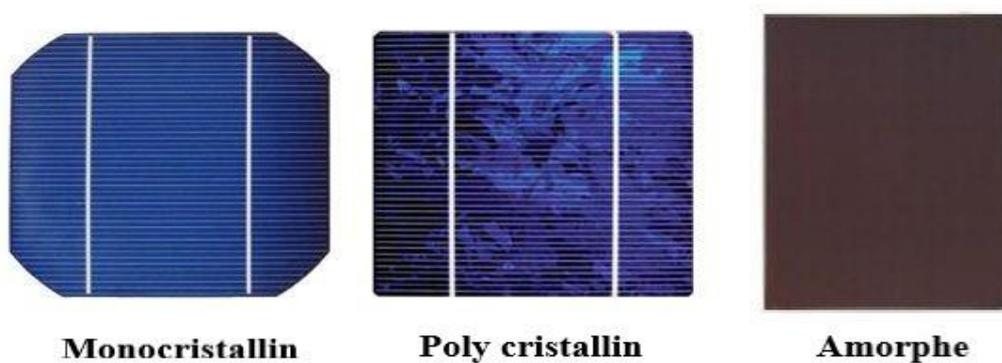


Figure 1.2: Les différents types des cellules PV

## 1.4. Générateur PV

Les cellules photovoltaïques sont reliées entre elles, soit en série ou en parallèle pour former des modules photovoltaïques, ces derniers sont connectés entre eux pour former un générateur photovoltaïque. La connexion des cellules en série augmente la tension de sortie en conservant le même courant qui traverse les cellules, par contre la connexion en parallèle augmente le courant et conserve la même tension.

### 1.4.1. Association des cellules PV

- **En série :**

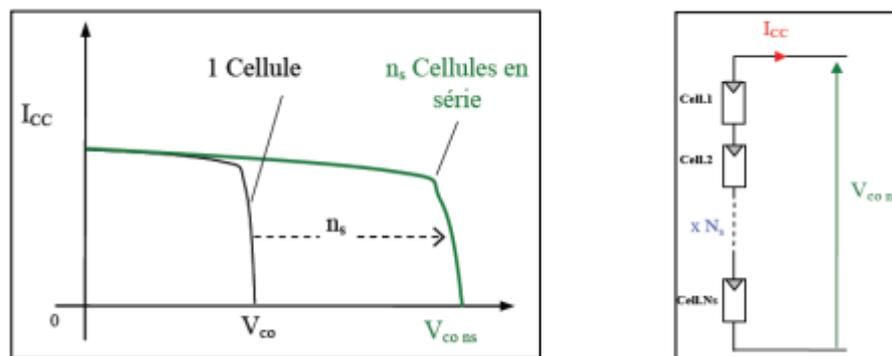
La combinaison de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les caractéristiques résultant du groupement en série sont alors obtenues en faisant passer le même courant dans les cellules et en additionnant la tension de base de chaque cellule. L'équation (1.1) résume les propriétés électriques d'une série de  $N_s$  cellules [5].

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (1.1)$$

Avec :

$V_{co}$ , représente la tension du circuit ouvert.

De tels systèmes associés sont généralement les plus couramment utilisés dans les modules photovoltaïques commerciaux. Comme la surface de la batterie devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure que la technologie progresse, tandis que sa tension reste très faible. L'association en série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'augmenter la puissance de l'ensemble [5].



**Figure 1.3: Groupement de  $N_s$  cellules en série [5]**

- **En parallèle :**

Par contre, l'association en parallèle de  $N_p$  cellules est possible et peut augmenter le courant de sortie du générateur résultant. Dans un groupe identique de cellules parallèles, les cellules sont soumises à la même tension, et les caractéristiques du groupe sont obtenues par sommation des courants. L'équation (1.2) résume les propriétés électriques d'une association de  $N_p$  cellules en parallèle [5].

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (1.2)$$

Avec :

$I_{cc}$ , représente le courant de court-circuit.

Si vous souhaitez un générateur photovoltaïque avec un courant de sortie plus important, vous pouvez soit utiliser une cellule photovoltaïque avec une surface plus importante et un rendement plus élevé, soit combiner plusieurs modules photovoltaïques aux caractéristiques similaires en parallèle [5].

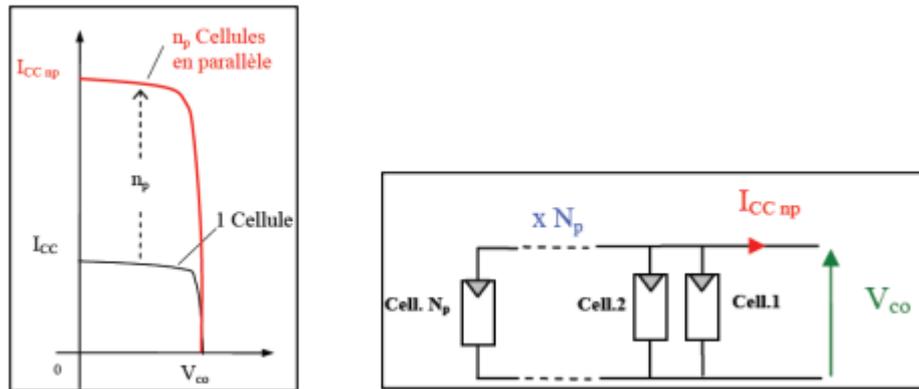


Figure 1.4: Groupement de  $N_p$  cellules en parallèle [5]

#### Remarque :

Pour qu'un générateur PV ainsi construit fonctionne de manière optimale, les  $(N_s, N_p)$  cellules doivent toutes se comporter de la même manière. Pour cela, ils doivent être issus de la même technologie, du même lot de fabrication et soumis aux mêmes conditions opératoires (lumière, température, vieillissement et inclinaison) [5].

#### 1.4.2. Protection d'un GPV

Cette connexion entre les cellules PV doit se faire par le même type des cellules et avec des diodes de sécurité. On distingue deux types de diode de protection [6] :

- Diode anti retour utilisée pour la protection dans le cas des connexions en parallèle pour éviter les courants négatifs dans GPV [6].
- Diode by-pass utilisée pour isoler un module PV en cas où l'éclairement n'est pas homogène en évitant l'échafaudement des cellules ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Cela nous permettant de ne pas perdre la totalité de la production [7].

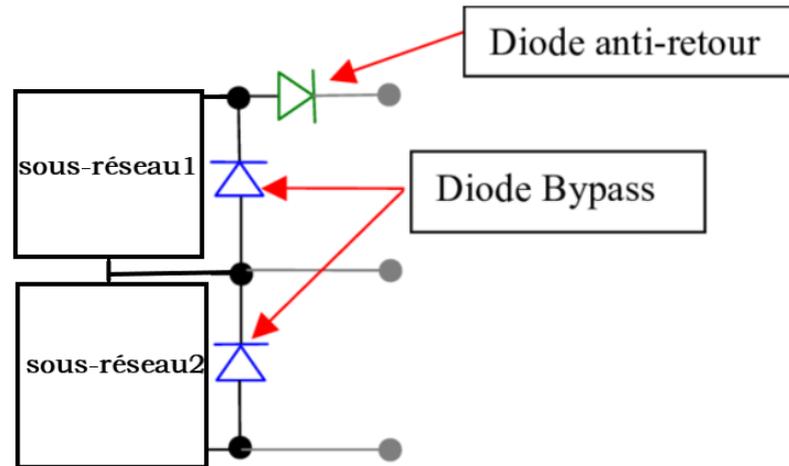


Figure 1.5: Schématisation d'un GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour

### 1.5. Modèle électrique équivalent d'une cellule PV

La cellule PV peut être représentée par le circuit équivalent illustré dans la figure (1.6)

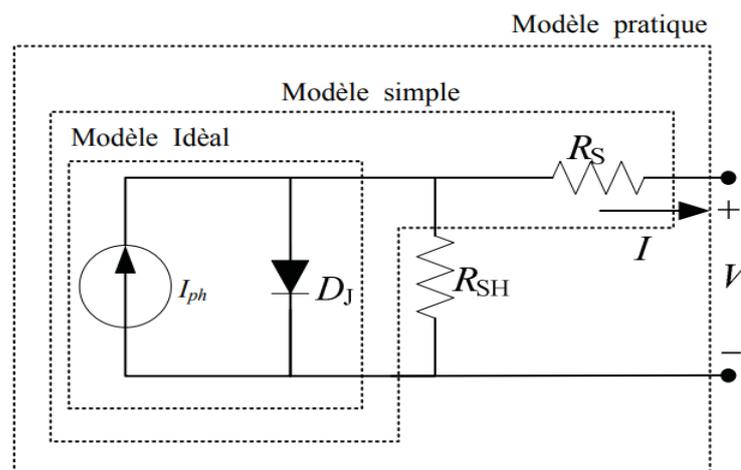


Figure 1.6: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [7]

Dès que le soleil brille la cellule PV se met à produire du courant électrique ce courant est appelée photo-courant ( $I_{ph}$ ) indépendant de tension, il dépend de l'éclairement, la résistance  $R_{sh}$  généralement à des valeurs très grandes, utilisé à cause du courant de fuites de jonction PN, la résistance  $R_s$  est utilisée en raison de la chute de tension, la valeur de  $R_s$  est petite.

#### 1.5.1. Le modèle pratique

D'après le schéma de la figure (1.6), une cellule PV peut être écrite comme la suite :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.3)$$

Avec le courant qui circule dans la diode est donné par :

$$I_d = I_s * \left( e^{\frac{V}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

La tension thermique de la diode est exprimée par :

$$V_{th} = \frac{kT_c A}{q} \quad (1.5)$$

Le courant circulant dans la résistance shunt de la cellule est exprimé par :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

En remplaçant (1.4), (1.5) et (1.6) dans (1.3), nous obtenons le modèle d'une cellule réelle est donné par :

$$I = (I_{ph} - I_s) \left( e^{\frac{qV}{kT_c A}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

### 1.5.2. Le modèle idéal

D'après le schéma dans le modèle pratique en négligeant les deux résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  le modèle mathématique est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.8)$$

Finalement, un modèle d'une cellule idéale est donné par l'équation suivante :

$$I = (I_{ph} - I_s) \left( e^{\frac{qV}{kT_c A}} - 1 \right) \quad (1.9)$$

Où :

$I$  : Courant de sortie de la photopile solaire (une cellule) (A).

$I_{ph}$  : Courant produite par la photopile solaire (A).

$I_d$  : Courant dans la diode (A).

$I_{sh}$  : Courant circulant dans la résistance shunt de la cellule (A).

$I_s$  : Courant de saturation dans la diode (A).

$V$  : Tension de sortie de la photopile solaire (V).

$V_d$  : Tension à la borne de  $R_{sh}$  (V).

$T_c$  : Température de la cellule (K : Kelvin).

$R_s$  : Résistance série d'une cellule ( $\Omega$ ).

$R_{sh}$  : Résistance shunt d'une cellule ( $\Omega$ ).

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

## 1.6. Caractéristiques des générateurs photovoltaïques [8, 9]

### 1.6.1. Tension en circuit ouvert $V_{co}$

C'est la tension mesurée aux bornes de la batterie quand le courant fourni par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = AV_{th} \log \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (1.10)$$

Avec :

$V_{co}$  : La tension de circuit ouvert.

$I_{ph}$  : Le photo-courant.

$I_0$  : Le courant de saturation.

$V_{th}$  : La tension thermique de la diode.

### 1.6.2. Courant de court-circuit $I_{cc}$

Dans un cas de court-circuit, on sait que la tension sera nulle donc on peut dire que :

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (1.11)$$

### 1.6.3. Point de fonctionnement $P_{max} = (V_{max}, I_{max})$

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque électroluminescente est une grandeur nécessaire pour évaluer ses performances ; elle est donnée par la relation :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (1.12)$$

Qu'elle convertit sur la caractéristique (I-V) le point de fonctionnement  $P_{max}$  au coude de la caractéristique (I-V), appelé le point de puissance maximale, où la valeur de tension  $V_{max}$  et courant  $I_{max}$  également appelés tension et courant maximum, respectivement.

#### 1.6.4. Facteur de forme

Le facteur de forme ou facteur de remplissage donne une image de la qualité du panneau solaire. Le facteur de forme noté FF est défini comme [10] :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.13)$$

En utilisant les caractéristiques courant-tension des cellules dans l'obscurité et dans la lumière, les performances et le comportement électrique des cellules photovoltaïques peuvent être évalués, de sorte que le facteur de forme (FF) peut être défini comme le rapport de la puissance maximale  $P_{max}$  au produit ( $V_{co} \cdot I_{cc}$ ).

#### 1.6.5. Rendement

Le rendement est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire frappant la cellule. Si S est la surface de la cellule (en m<sup>2</sup>), E est l'éclairement énergétique (en W/m<sup>2</sup>). L'efficacité énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc} S} = \frac{P_{max}}{S \cdot E_s} \quad (1.14)$$

$P_{inc}$  : Puissance incidente.

S : Surface de la cellule photovoltaïque.

s : La surface responsable à la conversion photovoltaïque (la surface éclairée par E) .

De plus, on sait d'après la relation (1.13) de facteur de forme que :  $P_{max} = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}$  donc la relation de rendement sera :

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{inc} S} \quad (1.15)$$

#### 1.6.6. Caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V)

Dans notre application nous avons utilisé le modèle « PV Array » sur MATLAB pour extraire les différentes informations de notre module PV, la référence de modèle choisi est « Zytech Engineering Technology ZT190S » qui a les caractéristiques suivantes :

Tableau 1.1 : Caractéristiques de champ PV

Paramètres	Valeurs
Courant de court-circuit $I_{cc}$	7.84A
Tension à circuit ouvert $V_{oc}$	36.3V
Courant maximum	7.35A
Tension maximale	29V
Puissance maximale	213.1W

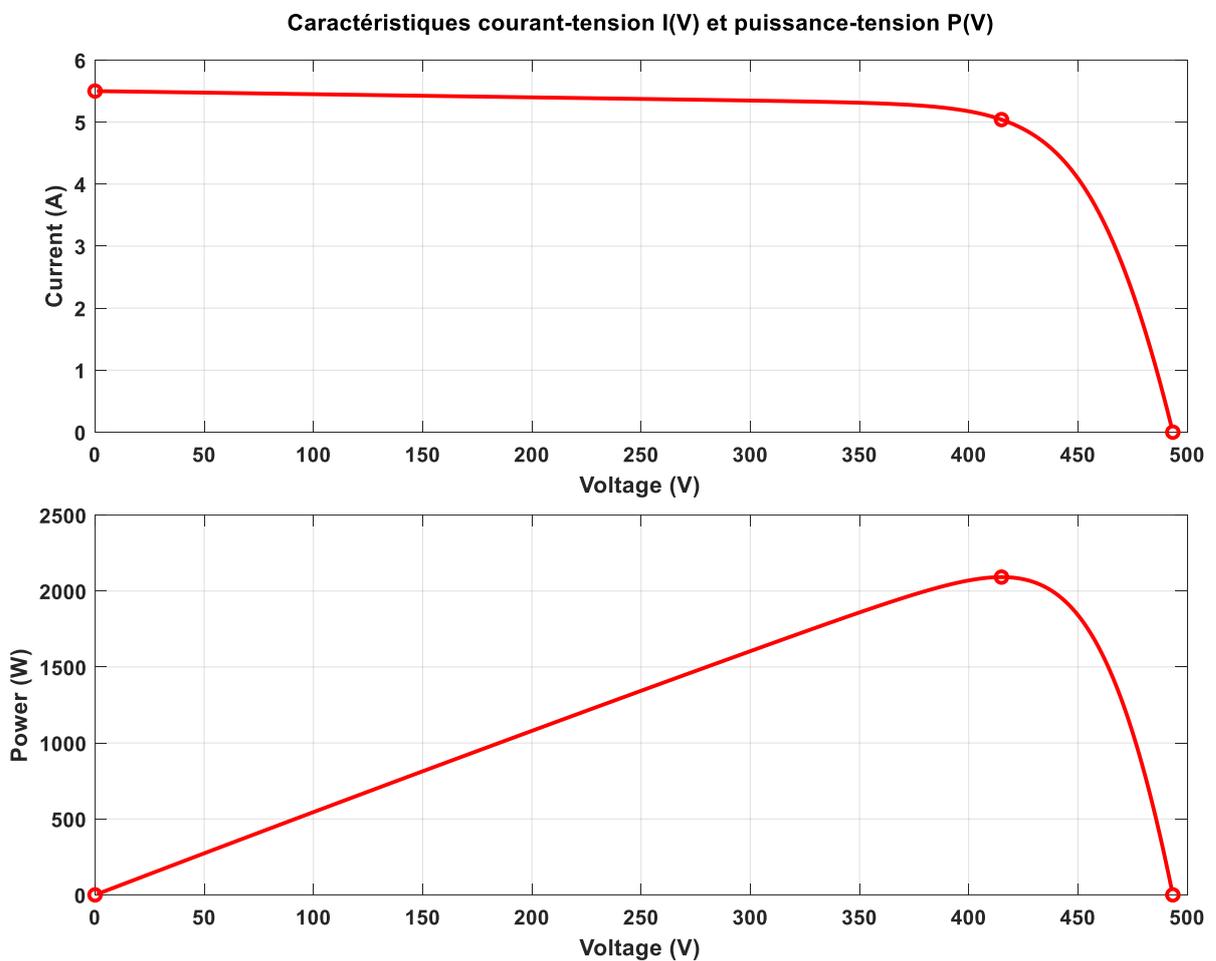


Figure 1.7: Caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V)

- **Caractéristique courant-tension I(V)**

La caractéristique fondamentale d'une cellule photovoltaïque est que le courant qu'elle peut fournir varie avec la tension à ces bornes. Les cellules photovoltaïques ont trois caractéristiques [9] :

- Point de court-circuit : correspondant à la tension nulle et au courant de court-circuit  $I_{cc}$ .
- Point de circuit ouvert : il n'y a pas du courant à la sortie à ce moment, et la tension est  $V_{co}$ .
- Point de puissance maximale (PPM) : ce point est le point où le produit (V.I) est maximal.

L'inspection de la caractéristique I(V) fait apparaître trois régions de base :

- La première région, où le courant reste quasiment constant pour les changements de tension. Dans ce domaine, les modules solaires s'apparentent à des générateurs du courant électrique. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, ce qui peut se faire sans risque dans le cas des cellules photovoltaïques.
- La deuxième région, est caractérisée par une variation du courant correspondant à une tension sensiblement constante. A courant nul, la tension maximale est obtenue, d'où le nom de tension à vide. Cette zone entoure le fonctionnement en tant que générateur de tension pour le module solaire.
- La troisième région, est située entre ces deux extrêmes, et elle est caractérisée par l'existence d'une valeur optimale qui fournit une puissance maximale, communément appelée PPM (Point de Puissance Maximale).

- **Caractéristique puissance-tension P(V)**

Contrairement à la caractéristique I(V) qu'est une fonction continue, correspondante à une fonction exponentielle et dont sa dérivée est toujours négative, la caractéristique P(V) a une valeur maximale à la tension  $V_{max}$  correspondant à la tension du point de puissance maximale PPM. Le courant du module qui lui est associé est  $I_{max}$ .

### 1.6.7. L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du GPV

L'influence de de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et sur la caractéristique P(V)

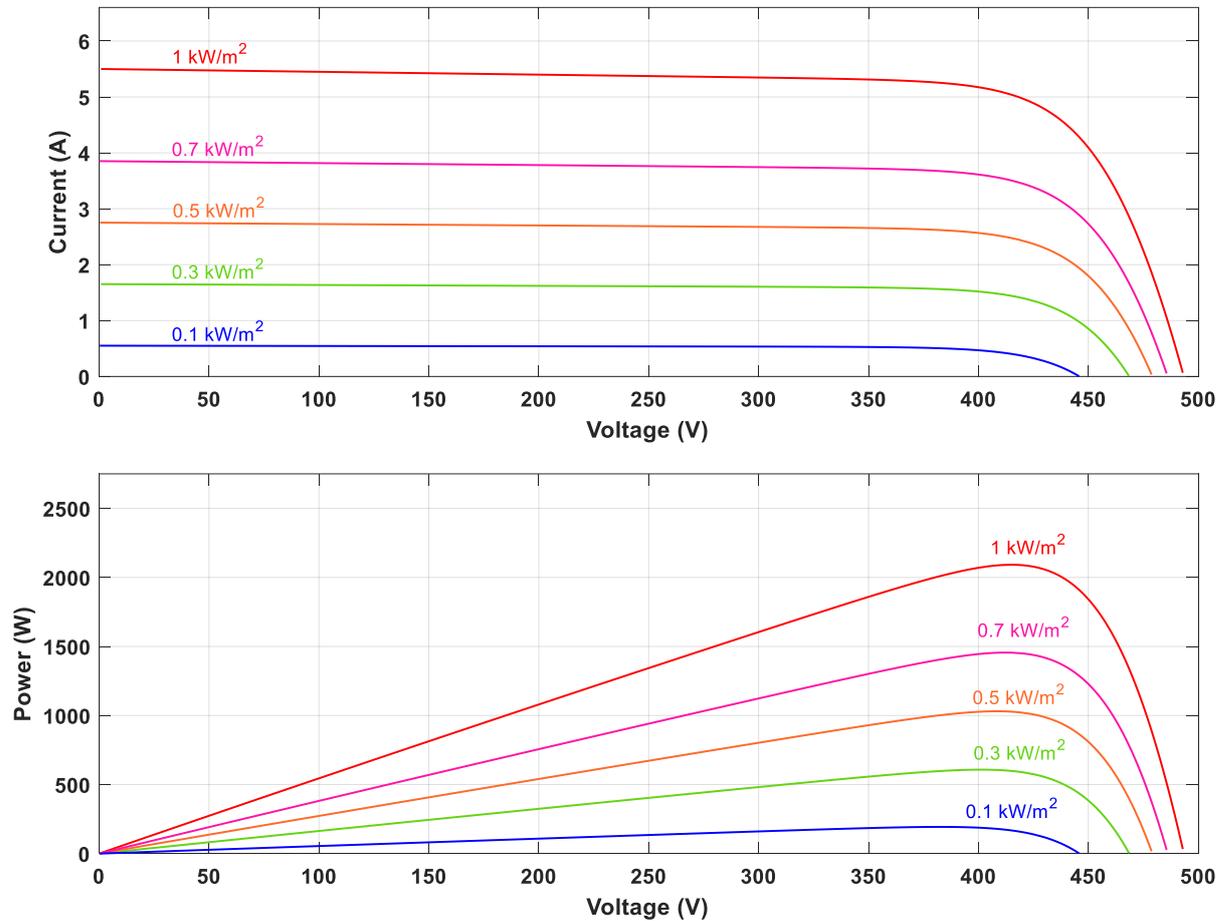


Figure 1.8: L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V)

- **Sur la caractéristique I(V)**

A température constante, en faisant varier l'éclairement entre  $100 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  avec un pas de  $200 \text{ W/m}^2$ , la caractéristique  $I = f(V)$  est donnée par :

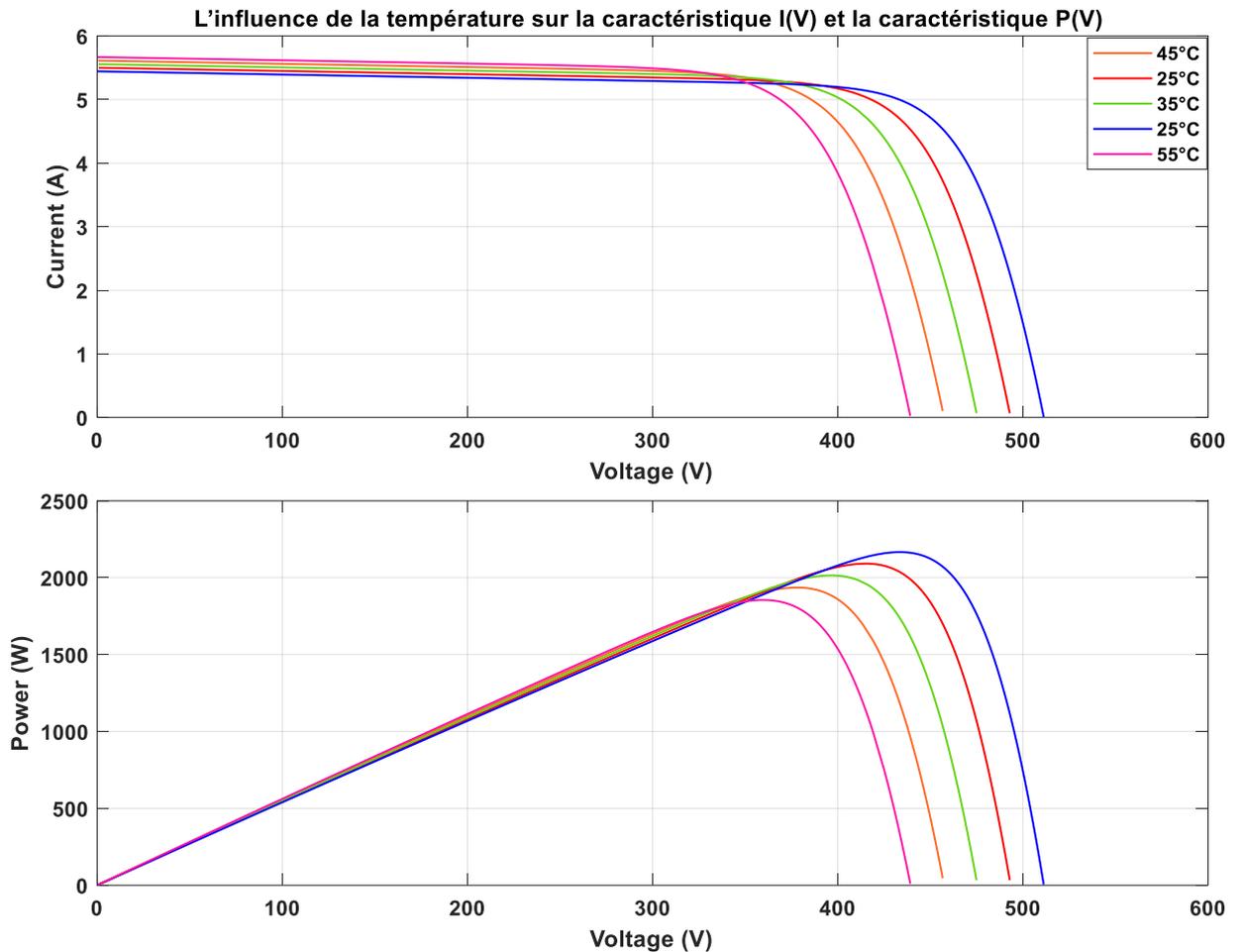
D'après la figure (1.8) ci-dessus, on constate une relation proportionnelle entre le courant de court-circuit avec l'intensité de l'éclairement, cela permet au module de produire une puissance électrique importante. Par contre, la tension de circuit ouvert ne varie que très peu car c'est une fonction logarithmique alors que le courant de court-circuit représente une fonction linéaire de l'éclairement.

- **Sur la caractéristique P(V)**

A température constante, en faisant varier l'éclairement entre  $100 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  avec un pas de  $200 \text{ W/m}^2$ , la caractéristique  $P = f(V)$  est donnée par :

Selon la figure (1.8), on remarque que la variation de la puissance est proportionnelle avec la variation de l'éclairement. De plus, on observe que les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### 1.6.8. L'influence de la température sur les caractéristiques de GPV



**Figure 1.9 : L'influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V)**

- **Sur la caractéristique I(V)**

A un éclairement constant, en faisant varier la température entre 25°C et 55°C, la caractéristique  $I=f(V)$  est donnée par :

L'évolution de la caractéristique I(V) en fonction de la température montre une diminution de la tension de circuit ouvert, plus la température augmente la cellule sera moins performante. Par contre le courant de court-circuit reste presque constant.

- **Sur la caractéristique P(V)**

A un éclairement constant, en faisant varier la température entre 25°C et 55°C, la caractéristique  $P=f(V)$  est donnée par :

L'augmentation de la température implique une diminution de la tension de circuit ouvert, par conséquent on constate une diminution de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

## **1.7. Les différentes applications de l'énergie photovoltaïque [11, 12]**

- **Les installations domestiques**

Elles nous permettent de devenir des véritables producteurs d'électricité à domicile. L'unité sera connectée au réseau local, ce qui nous permet d'alimenter et de tirer de l'électricité en cas de besoin.

- **Les objets de la vie quotidienne**

Les cellules photovoltaïques sont utilisées dans de nombreux appareils électroniques de la vie courante, comme les montres, les calculatrices, les jouets...

- **Les centrales électriques**

Comme le gaz naturel classique, le charbon, les centrales nucléaires, etc., elles alimentent des dizaines de milliers de foyers en électricité « verte », c'est-à-dire sans gaz à effet de serre.

- **Electrification des zones isolées**

Les panneaux photovoltaïques sont utilisés depuis des décennies comme une alternative économiquement viable dans des environnements isolés où l'électricité est rare et où l'accès au réseau est difficile.

- **Systèmes de pompage**

Le photovoltaïque est également utilisé pour alimenter des unités de pompage pour l'irrigation, l'eau potable et l'eau du bétail dans les zones rurales ou pour les systèmes de dessalement.

- **Transport et navigation maritime**

Bien que le photovoltaïque ne soit pas encore largement utilisé pour assurer la traction des transports, il est de plus en plus utilisé pour fournir une alimentation auxiliaire aux navires et aux voitures.

- **Systèmes d'éclairage**

L'éclairage public utilisant des systèmes photovoltaïques est considéré comme l'une des solutions les plus économiques pour éclairer les entrées de ville, les passages à niveau, les aires de repos, etc. Ce type d'application photovoltaïque peut également être trouvé dans des exemples tels que les panneaux d'affichage, les arrêts de bus, l'éclairage public et l'éclairage des tunnels.

- **Signalisation**

L'énergie solaire photovoltaïque peut automatiser les phares et bouées utilisés en mer. Pour une utilisation aérienne, des panneaux d'alimentations des balises et des panneaux de signalisation sont exploités. Une autre bonne application est la signalisation des ronds-points, courbes, panneaux routiers, obstacles, etc.

- **Télécommunication**

Dans le domaine des télécommunications, l'énergie solaire photovoltaïque est utilisée dans des domaines tels que les téléphones portables, les répéteurs radio et TV. Sur la route, les poteaux SOS sont alimentés par ce type d'énergie renouvelable, car cela élimine le besoin d'y faire passer des câbles d'alimentation secteur. Les radars, les radiotéléphones en général, les radiotéléphones des stations de surveillance militaires ou forestières, les téléphones ruraux par satellite, sont d'autres exemples d'utilisation de l'énergie solaire.

- **Exploitations agricoles et d'élevage**

L'énergie photovoltaïque est également utilisée dans les fermes. Les fermes sont généralement éloignées des lignes électriques. Dans ces cas, les panneaux photovoltaïques permettent l'électrification de l'exploitation. Dans certaines fermes d'élevage, l'énergie photovoltaïque est utilisée pour alimenter les systèmes de traite et le refroidissement du lait. Même ces systèmes sont pratiques pour l'électrification des clôtures.

- **Applications spatiales**

Les panneaux solaires sur les engins spatiaux sont généralement la seule source d'énergie pour alimenter les capteurs, le chauffage et le refroidissement actifs et les communications. La batterie stocke cette énergie pour une utilisation lorsque les panneaux solaires sont à l'ombre. Dans certains cas, l'électricité est également utilisée pour propulser des engins spatiaux.

## 1.8. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques [13]

### 1.8.1. Les avantages des systèmes photovoltaïques

- **Haute fiabilité**

Les systèmes photovoltaïques sont toujours très fiables, même dans des conditions difficiles. Les panneaux photovoltaïques garantissent un fonctionnement continu et ininterrompu des alimentations critiques.

- **Forte persévérance**

La plupart des modules d'un système PV ont une période de garantie allant jusqu'à 25 ans et restent opérationnels même après de nombreuses années.

- **Faibles coûts d'entretien**

Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent que des inspections régulières et des réparations occasionnelles, qui sont extrêmement peu coûteuses par rapport aux systèmes à carburant conventionnels.

- **Zéro consommation de carburant**

Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent pas de carburant et peuvent éliminer les coûts d'approvisionnement, de stockage et de transport associés.

- **La pollution sonore est faible**

Le système photovoltaïque peut fonctionner silencieusement avec un minimum de mouvement mécanique.

- **Il y a une supervision photovoltaïque**

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique, les systèmes photovoltaïques peuvent nécessiter l'ajout de certains modules.

- **Sécurité renforcée**

Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent pas de carburant et peuvent être exploités en toute sécurité après une conception et une installation appropriée.

- **Forte indépendance**

La raison de l'adoption de cette nouvelle technologie dans de nombreuses zones résidentielles est que les systèmes photovoltaïques maintiennent l'indépendance de la production d'énergie et ne sont donc pas affectés par les services publics.

### **1.8.2. Les inconvénients des systèmes photovoltaïques**

- **Coût de démarrage élevé**

Chaque installation PV doit être économiquement évaluée et comparée aux alternatives existantes. Actuellement, le coût de construction des systèmes photovoltaïques est relativement élevé, mais avec la réduction des coûts de construction des systèmes photovoltaïques et la hausse des prix de l'énergie traditionnelle, les systèmes photovoltaïques auront une forte compétitivité économique.

- **Instabilité du rayonnement solaire disponible**

Pour tout système solaire, les changements climatiques affecteront grandement la quantité d'énergie électrique produite. Par conséquent, la conception du système doit être ajustée en fonction des changements climatiques et de l'emplacement.

- **Avoir des exigences de stockage d'énergie**

Certains systèmes photovoltaïques utilisent des batteries comme dispositifs de stockage d'énergie. Cela augmente l'encombrement, le coût et la complexité du système.

- **L'efficacité doit être améliorée**

Pour que les systèmes PV reflètent la rentabilité, nous devons utiliser une méthode efficace pour distribuer l'énergie générée pendant l'utilisation. Cependant, ils sont maintenant souvent utilisés pour alimenter des appareils alternatifs inefficaces.

## **1.9. Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les générateurs photovoltaïques. Nous avons parlé des cellules PV : leurs fonctionnements, leurs types, leurs le modèle mathématique ainsi leurs caractéristiques. Et dans la deuxième partie nous avons illustré les applications ainsi que les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

A la fin de ce chapitre on peut conclure qu'il existe des facteurs qui influencent sur le fonctionnement des GPV, cette influence affecte directement le rendement de ces systèmes, dans le chapitre suivant on va définir les convertisseurs CC/CC et CC/AC et les différents systèmes de conversion des systèmes PV.

**Chapitre 02 :**  
**Généralités sur les**  
**convertisseurs**  
**CC/CC et CC/CA**

## 2.1. Introduction :

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors, ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance [14].

Dans ce chapitre, nous intéressons à l'étude des convertisseurs continu-continu (les hacheurs) et les convertisseurs continu-alternatif (les onduleurs) qui font partie de la chaîne de conversion photovoltaïque.

## 2.2. Convertisseurs Continu-Continu (Les hacheurs)

### 2.2.1. Définition

Un hacheur est un convertisseur statique CC qui génère une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Permet le contrôle de la puissance dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une grande flexibilité et un rendement élevé. Un hacheur est composé de condensateurs, d'inductances et commutateurs. Dans un monde idéal, tous ces appareils ne consommeraient pas d'énergie, c'est pourquoi les hacheurs ont de bons rendements. Un commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloquer / saturer), généralement il peut être un transistor MOSFET ou IGBT, ou un thyristor pour une puissance élevée [15].

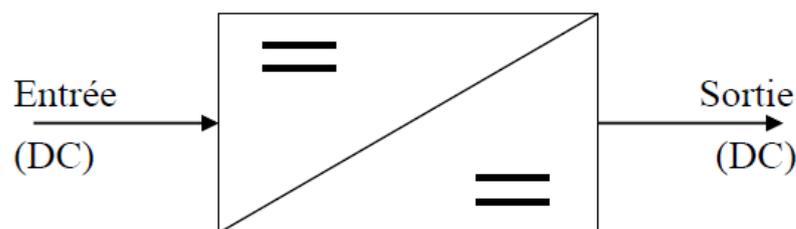


Figure 2.1 : Convertisseur CC-CC [16]

### 2.2.2. Principe de fonctionnement [17]

Le principe de fonctionnement du convertisseur CC-CC est très simple. L'inducteur dans la résistance d'entrée a une variation inattendue du courant d'entrée. Si l'interrupteur est maintenu aussi haut (état ON), alors l'inductance alimente l'énergie de l'entrée et stocke l'énergie sous forme d'énergie magnétique.

Si l'interrupteur est maintenu aussi bas (état OFF), il décharge l'énergie. Ici, la sortie du condensateur est supposée être élevée, ce qui est suffisant pour la constante de temps d'un circuit RC côté sortie. L'énorme constante de temps est comparée à la période de commutation et s'assure que l'état stable est une tension de sortie constante. Il doit être  $V_o(t) = V_o$  (constant) et présent à la borne de charge.

### 2.2.3. Mode de fonctionnement :

Le convertisseur peut fonctionner selon deux modes de fonctionnement en fonction de sa capacité de stockage d'énergie, de sa période de commutation et de sa charge. Les deux modes sont [18] :

#### 2.2.3.1. Mode de conduction continue (MCC) :

Dans ce cas, l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  est partiellement transférée. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas en un cycle de commutation.

#### 2.2.3.2. Mode de conduction discontinue (MCD) :

Dans ce cas, l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  est entièrement transférée. Le courant dans l'inductance est annulé avant la fin de la commutation.

#### 2.2.3.3. Limite entre la conduction continue et discontinue :

Lorsque le courant à travers l'inductance disparaît juste au moment où il commute, le courant moyen à travers la charge est la moitié de l'ondulation. On est alors à la limite entre conduction continue et conduction discontinue [18].

### 2.2.4. Classification des convertisseurs CC-CC :

#### 2.2.4.1. Convertisseur Boost : [19]

Un convertisseur élévateur ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure.

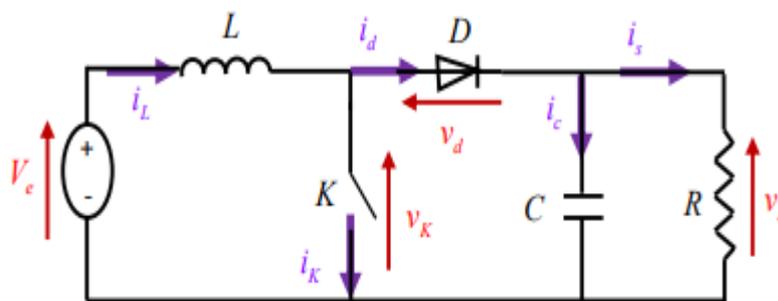


Figure 2.2 : Schéma électrique du convertisseur Boost [19]

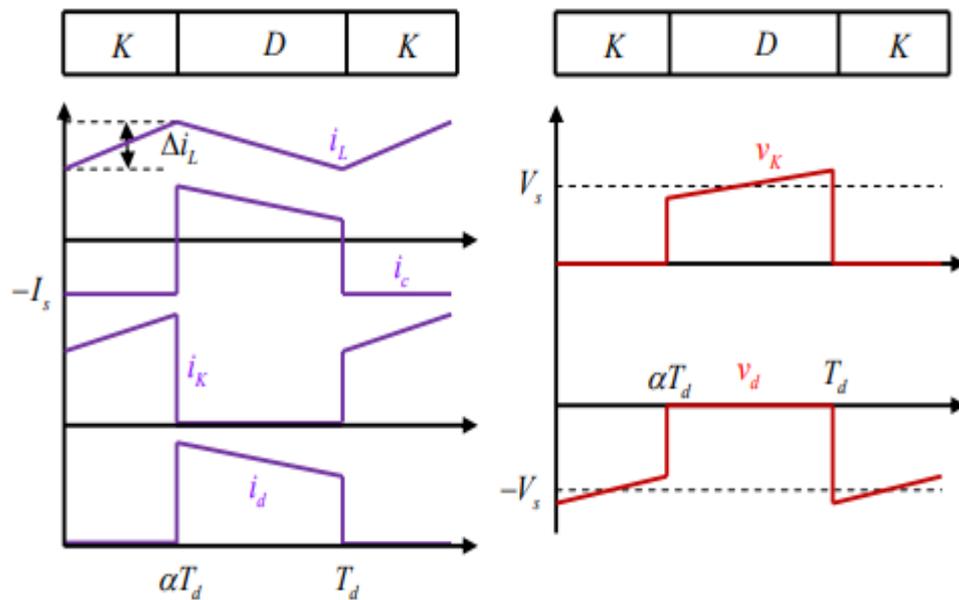
### a. Principe de fonctionnement :

Selon l'état de l'interrupteur K, le fonctionnement du convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes [20] :

- Phase d'accumulation d'énergie : Lorsque l'interrupteur K est fermé (état passant), cela fait augmenter le courant dans l'inductance, emmagasinant ainsi une certaine quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance est en série avec le générateur et sa f.é.m. a été ajoutée au générateur (effet élévateur/survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse alors la diode D, le condensateur C et la charge R. Cela entraîne le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur.

### b. Formes d'ondes :

En mode de conduction continue, on a les formes d'ondes du courant et de tension de la figure (2.3).



**Figure 2.3 : Formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite) du convertisseur [19]**

Soit

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min} \quad (2.1)$$

L'ondulation du courant dans l'inductance.

Dans la première phase de fonctionnement ( $0 < t < \alpha T_d$ ), l'équation du courant est donnée par :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (2.2)$$

Dans la première phase de fonctionnement ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), l'équation du courant est donnée par :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (2.3)$$

De l'équation (2.2) on tire :

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min} = \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (2.4)$$

Et de l'équation (2.3) :

$$\Delta i_L = I_{min} - I_{max} = \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (2.5)$$

En combinant ces deux relations, nous pouvons établir une expression de la tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (2.6)$$

### c. Courant moyen d'entrée :

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, la valeur moyenne du courant dans l'inductance peut être établie à partir du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique [19].

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (2.7)$$

### d. Calcul des ondulations : [19]

#### • Calcul de l'ondulation du courant :

De l'équation (2.4), on peut exprimer l'ondulation du courant dans l'inductance de la manière suivante :

$$\Delta i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T_d = \frac{\alpha V_e}{L f_d} \quad (2.8)$$

Avec  $f_d$  représente la fréquence de découpage.

- **Calcul de l'ondulation de la tension de sortie :**

Lors de la première phase de fonctionnement ( $0 < t < \alpha T_d$ ), le condensateur est le seul élément qui donne de l'énergie à la charge donc on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \Rightarrow \frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{C} i_s \quad (2.9)$$

D'après cette équation on peut exprimer facilement l'ondulation de la tension de sortie telle que :

$$\frac{\Delta V_s}{\alpha T_d} = \frac{I_s}{C} \quad (2.10)$$

$$\Rightarrow \Delta V_s = \frac{\alpha T_d I_s}{C} \quad (2.11)$$

$$\Rightarrow \Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f_d} \quad (2.12)$$

On sait que :

$$I_s = \frac{V_s}{R} = \frac{V_e}{(1 - \alpha)R} \quad (2.13)$$

En remplaçant (6) dans (5) :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha V_e}{(1 - \alpha)RC f_d} \quad (2.14)$$

De l'analyse des deux phases de fonctionnement, on remarque que le courant et la tension de contrainte sur l'interrupteur et la diode commandés sont les mêmes.

En tension, on a :

$$V_{Kmax} = |V_{Dmax}| = V_{smax} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.15)$$

Et en courant :

$$I_{Kmax} = I_{Dmax} = I_{smax} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.16)$$

2.2.4.2. Convertisseur Buck : [20] [21]

Un convertisseur abaisseur ou hacheur série est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure [22].

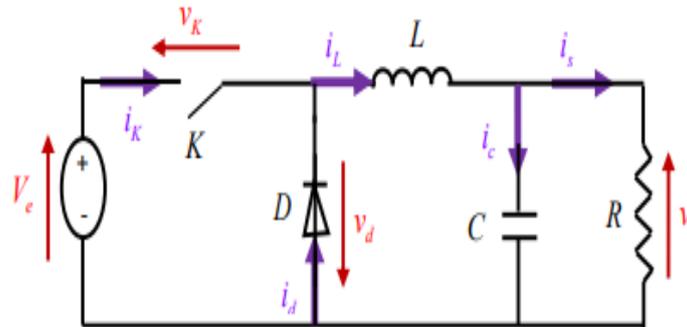


Figure 2.4 : Schéma électrique de convertisseur Buck [19]

a. Principe de fonctionnement : [23]

Le cycle de fonctionnement de période de découpage  $T_d$  est composé de deux phases. Le processus de commutation décrit par la position de l'interrupteur, pendant la première période de temps  $(\alpha T_d)$ , décharge l'inductance. Pendant la deuxième période de temps  $(\alpha - 1)T_d$ , l'inductance se relâche lorsque le courant  $i_L$  diminue.

b. Formes d'ondes :

En mode de conduction continue, on a les formes d'ondes du courant et de tension de la figure (2.5).

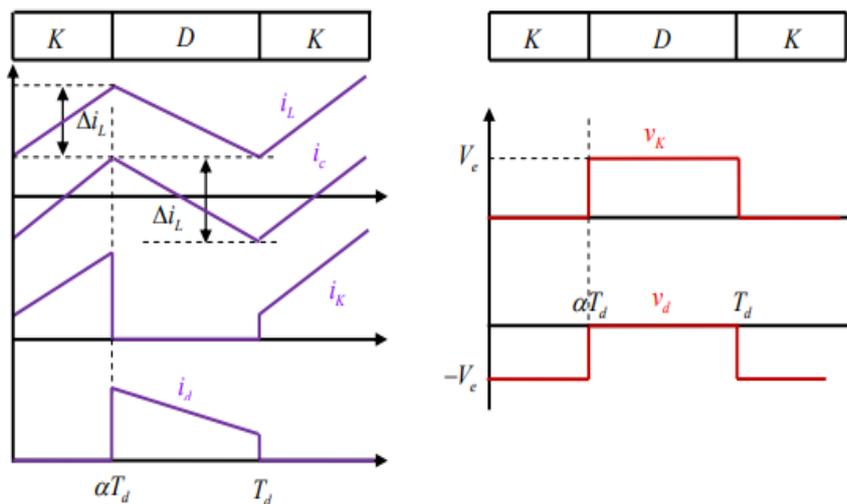


Figure 2.5 : Formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite) du convertisseur [19]

Nous étudions les convertisseurs Buck de la même manière précédente. La figure 9 montre la structure et les formes d'onde du courant et de tension de ce convertisseur, qui comporte un interrupteur en série avec la source [19].

La tension de sortie moyenne, l'ondulation du courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont respectivement données par [19] :

$$V_s = \alpha V_e \quad (2.17)$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{Lf_d} \quad (2.18)$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8Cf_d} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{8CLf_d^2} \quad (2.19)$$

Le courant moyen d'entrée qui traverse l'inductance est identique au courant moyen de la charge :

$$I_L = I_s \quad (2.20)$$

Les contraintes sur l'interrupteur et la diode commandés sont les mêmes.

En tension, on a :

$$V_{Kmax} = |V_{Dmax}| = V_e \quad (2.21)$$

Et en courant :

$$I_{Kmax} = I_{Dmax} = I_{smax} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.22)$$

### 2.2.4.3. Convertisseur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck-Boost appelé aussi convertisseur indirect à stockage inductif est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure ou supérieure avec une polarité opposée [24]. Il combine les propriétés des deux convertisseurs précédents.

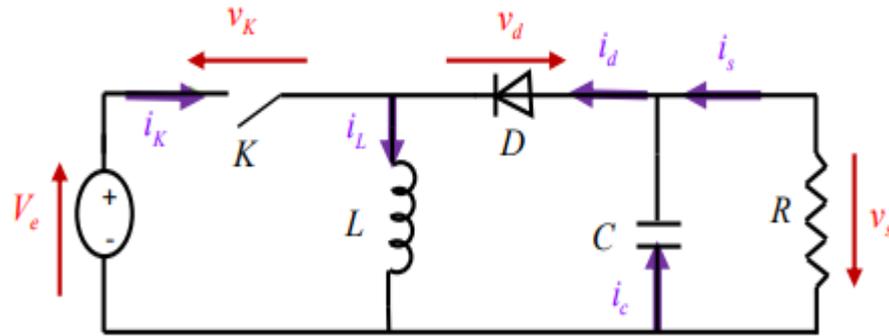


Figure 2.6 : Schéma électrique de convertisseur Buck-Boost [19]

**a. Principe de fonctionnement :**

Pendant l'état "ON", l'énergie fournie par la source est stockée dans l'inductance L. Cette énergie est ensuite délivrée à la charge pendant l'état "OFF". En raison de la présence de la diode D, le courant traverse l'inductance L dans un seul sens dans les deux états. Par conséquent,  $V_s$  est de polarité opposée à  $V_e$ , ce circuit est donc également appelé convertisseur inverseur [18].

**b. Formes d'ondes :**

En mode de conduction continue, on a les formes d'ondes du courant et de tension de la figure (2.7).

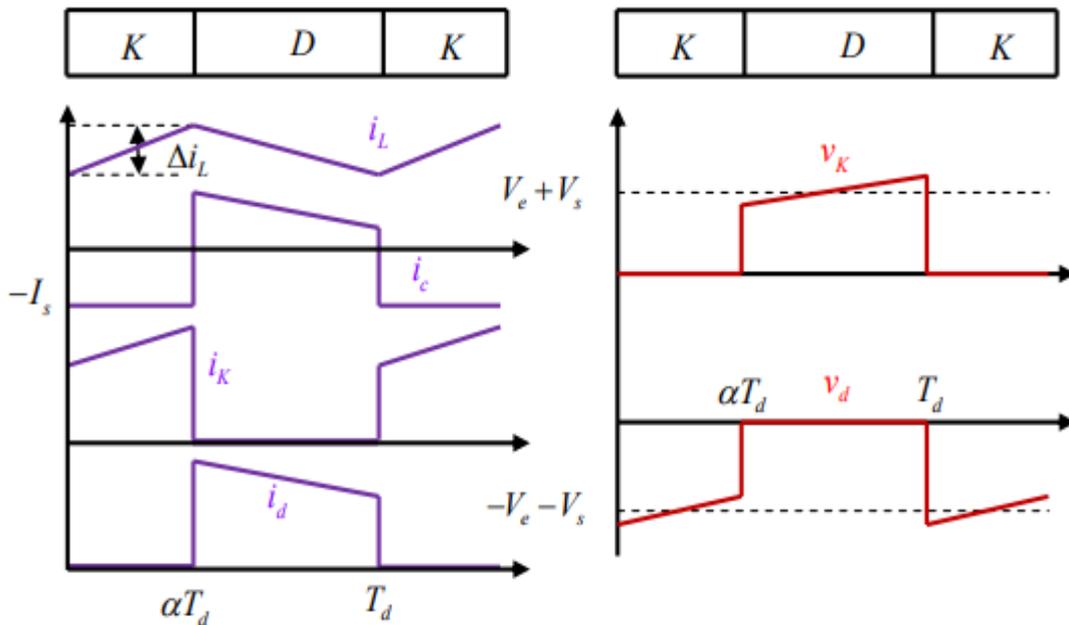


Figure 2.7 : Formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite) du convertisseur [19]

Les équations décrivant le circuit de convertisseur peuvent être obtenues de la même manière que précédemment.

La tension moyenne de sortie est donnée par [19] :

$$V_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_e \quad (2.23)$$

L'ondulation du courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont données respectivement par [19] :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f_d} \quad (2.24)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f_d} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) R C f_d} \quad (2.25)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à l'amplitude de la tension d'entrée, en fonction de la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élévateur en tension [19].

Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (2.26)$$

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur et la diode sont les mêmes :

En tension, on a :

$$V_{K,max} = |V_{D,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.27)$$

Et en courant :

$$I_{K,max} = I_{D,max} = I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.28)$$

### 2.2.5. Applications des convertisseurs CC-CC :

Les niveaux de puissance dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs d'équipements portables à dix ou cent watts dans les alimentations d'ordinateurs de bureau, en passant par les kilowatts ou les mégawatts dans les commandes de moteurs à vitesse variable et les centrales solaires dans l'industrie [25].

Certaines applications connues, les systèmes de récupération d'énergie (machines à vitesse variable, monte-charges, systèmes d'énergie renouvelable), nécessitent des convertisseurs capables de transférer l'énergie des générateurs vers les récepteurs et inversement, des récepteurs vers les générateurs : on dit qu'ils sont réversibles. Cependant, ce procédé est peu utilisé et est de toute façon réservé à des puissances relativement élevées. À moyenne et basse puissance, une alimentation à découpage est généralement utilisée [26].

## 2.3. Convertisseur Continu-Alternatif (Les onduleurs)

### 2.3.1. Définition :

Les convertisseurs statiques qui assurant la conversion du courant continu en courant alternatif sont nommées les onduleurs. Les onduleurs assurant la transformation de tension d'entrée en courant continue à une tension de sortie en courant alternative avec une amplitude et une fréquence souhaitée [27].

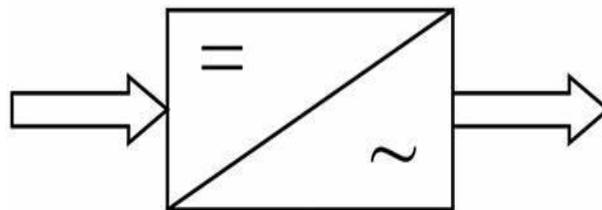


Figure 2.8 : Symbole d'un onduleur

### 2.3.2. Classification des onduleurs : [28]

On distingue plusieurs classifications des onduleurs :

#### 2.3.2.1. Les onduleurs du courant et les onduleurs de tension :

Cette classification est faite selon la nature d'alimentation c'est-à-dire :

- Si la source d'entrée de l'onduleur est une source du courant et la source de sortie de l'onduleur est une source de tension donc c'est un onduleur du courant.

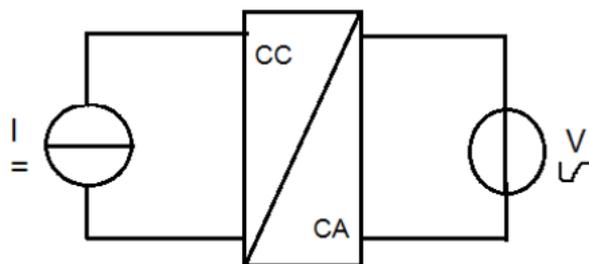


Figure 2.9 : Onduleur du courant [29]

- Si c'est l'inverse c'est-à-dire source d'entrée est une source de tension et la source de sortie est une source du courant donc c'est un onduleur de tension.

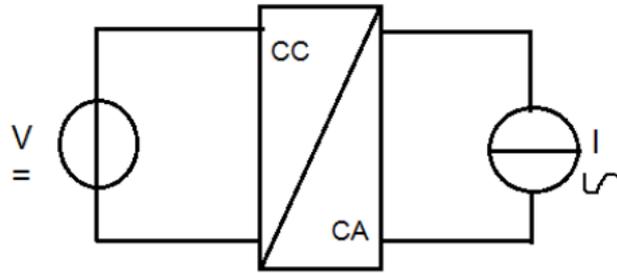


Figure 2.10 : Onduleur de tension [29]

### 2.3.2.2. Les onduleurs autonomes et non autonomes :

L'onduleur autonome (raccordé au réseau) : il impose la fréquence de sortie qui dépend de la commande.

L'onduleur non autonome (non raccordé au réseau) : la fréquence de sortie est imposée par la fréquence du réseau.

### 2.3.2.3. Les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés :

Cette classification est faite selon le nombre de phase de sortie de l'onduleur c'est-à-dire :

- Si la source d'entrée de l'onduleur est monophasée donc l'onduleur est monophasé
- Par contre si la source d'entrée est triphasée donc l'onduleur est triphasé

Dans la suite on s'intéresse plus à l'étude des onduleurs monophasés qu'on cherche à les commander par une commande MPPT.

### 2.3.3. Généralité sur les onduleurs monophasés :

Ce type des onduleurs est utilisé pour générer une tension de sortie alternative monophasée, il est généralement dédié aux alimentations de secours, on distingue deux grandes classes des onduleurs monophasés [30] :

#### 2.3.3.1. L'onduleur monophasé en demi-pont :

Un onduleur monophasé en demi-pont est composé de deux interrupteurs Q1 et Q2 (IGBT, MOSFET...), une diode antiparallèle relié à chacun des interrupteurs pour assurer une circulation bidirectionnelle du courant. Ces interrupteurs doivent être ensuite commander pour donner la tension désirée à la sortie de l'onduleur.

La topologie de ce type d'onduleur est présentée par la figure ci-dessous :

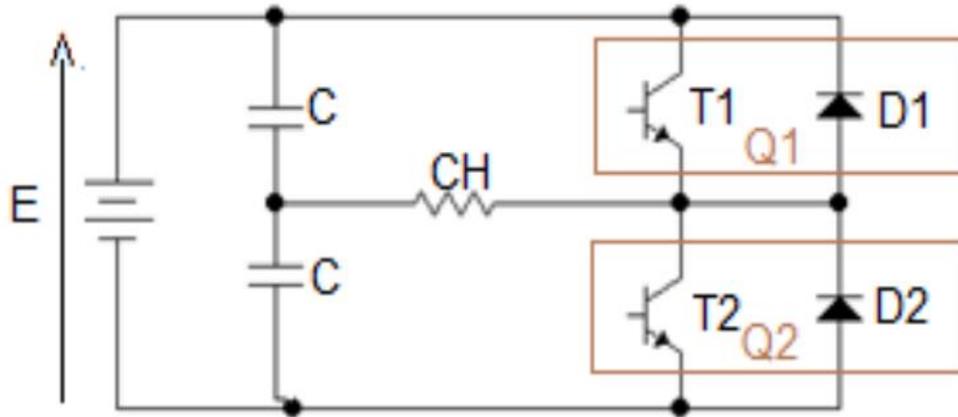


Figure 2.11 : Schéma électrique d'un onduleur en demi pont [31]

a. Principe de fonctionnement :

Pour  $0 \leq t < \frac{T}{2}$  :

L'interrupteur Q2 est fermé. L'interrupteur Q1 est ouvert.

La tension aux bornes de la charge  $U_{ch}$  est donnée par :

$$U_{ch} = \frac{E}{2} \tag{2.29}$$

Pour  $\frac{T}{2} \leq t < T$  :

L'interrupteur Q1 est ouvert. L'interrupteur Q2 est fermé.

La tension aux bornes de la charge  $U_{ch}$  est donnée par :

$$U_{ch} = -\frac{E}{2} \tag{2.30}$$

Tableau 2.1 : Conduction des interrupteurs dans un onduleur monophasé à demi-pont

Interrupteur fermé	Q1	Q2	Q1
Interrupteur ouvert	Q2	Q1	Q2

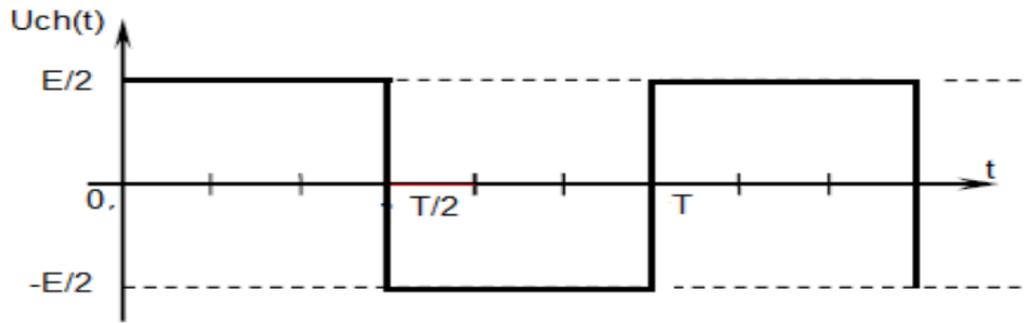


Figure 2.12 : L'allure de la tension aux bornes de la charge [32]

2.3.3.2. L'onduleur monophasé en pont :

Le montage de l'onduleur monophasé en pont contient quatre interrupteurs avec quatre diodes antiparallèles. La charge est reliée entre les deux bras de l'onduleur comme montre la figure ci-dessous [30] :

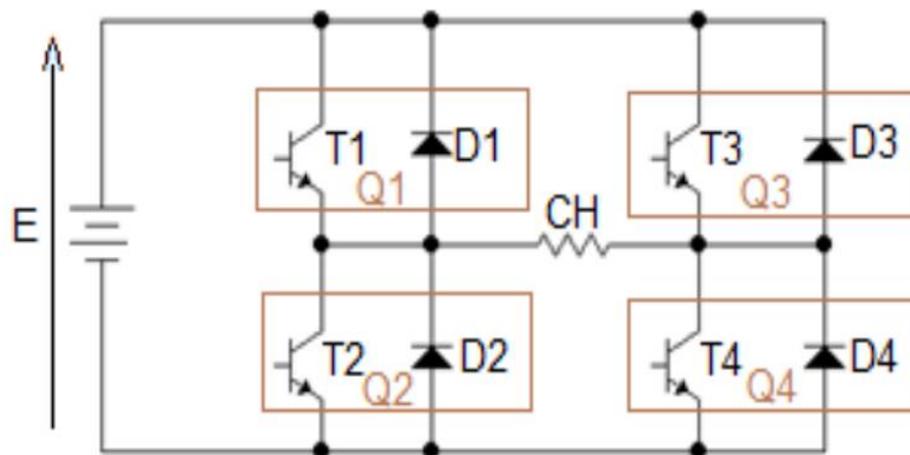


Figure 2.13 : Schéma électrique d'un onduleur en pont [31]

Tableau 2.2 : Les configurations possibles d'un onduleur monophasé en pont [33]

	Bras 1		Bras 2		Tension $U_{ch}$
	Q1	Q2	Q3	Q4	
1 <sup>er</sup> cas	Passent	Bloqué	Passent	Bloqué	$U_{ch} = 0$
2 <sup>ème</sup> cas	Passent	Bloqué	Bloqué	Passent	$U_{ch} = E$
3 <sup>ème</sup> cas	Bloqué	Passent	Passent	Bloqué	$U_{ch} = -E$
4 <sup>ème</sup> cas	Bloqué	Passent	Bloqué	Passent	$U_{ch} = 0$

**a. Principe de fonctionnement :**

Pour  $0 \leq t < \frac{T}{2}$  :

Les interrupteurs Q4 et Q1 sont fermés. Les interrupteurs Q2 et Q3 sont ouverts.

La tension aux bornes de la charge  $U_{ch}$  est donnée par :

$$U_{ch} = E \tag{2.31}$$

Pour  $\frac{T}{2} \leq t < T$  :

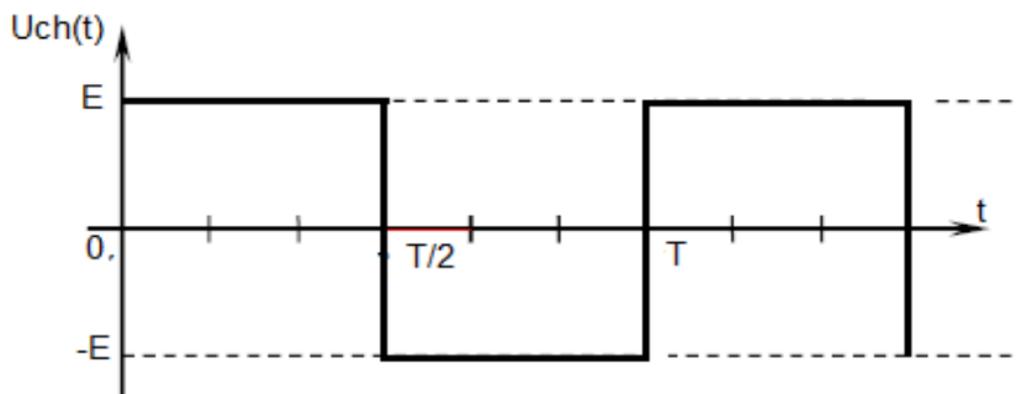
L'interrupteur Q2 et Q3 est ouvert. L'interrupteur Q1 et Q4 est fermé.

La tension aux bornes de la charge  $U_{ch}$  est donnée par :

$$U_{ch} = -E \tag{2.32}$$

**Tableau 2.3 : Conduction des interrupteurs dans un onduleur monophasé à pont**

<b>Interrupteur fermé</b>	<b>Q1 et Q4</b>	<b>Q2 et Q3</b>	<b>Q1 et Q4</b>
<b>Interrupteur ouvert</b>	<b>Q2 et Q3</b>	<b>Q1 et Q4</b>	<b>Q2 et Q3</b>



**Figure 2.14 : L'allure de la tension aux bornes de la charge [32]**

La charge peut être résistive ou inductive dans la suite on va étudier chacun de ces cas.

**b. Charge résistive :**

Pour  $0 \leq t < \frac{T}{2}$  :

Les interrupteurs Q4 et Q1 sont fermés. Les interrupteurs Q2 et Q3 sont ouverts.

Le courant aux bornes de la charge  $i_{ch}$  est donné par :

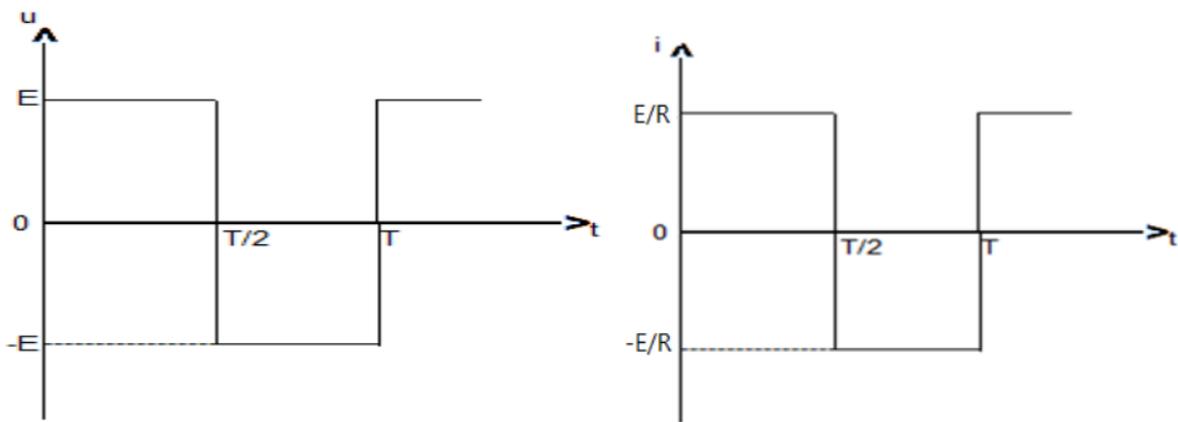
$$i_{ch}(t) = \frac{U_{ch}}{R} = \frac{E}{R} \quad (2.33)$$

Pour  $\frac{T}{2} \leq t < T$  :

L'interrupteur Q2 et Q3 est ouvert. L'interrupteur Q1 et Q4 est fermé.

Le courant aux bornes de la charge  $i_{ch}$  est donné par :

$$i_{ch}(t) = \frac{U_{ch}}{R} = -\frac{E}{R} \quad (2.34)$$



**Figure 2.15 : Allure de tension (à gauche) et du courant (à droite) d'une charge résistive [32]**

On remarque que la forme d'onde du courant suit la forme d'onde de tension avec une amplitude plus faible.

### c. Charge inductive :

Contrairement à la charge résistive, la charge inductive change l'allure du courant car la formule explicite de ce dernier est donnée sous forme d'une fonction exponentielle.

Pour  $0 \leq t < t_1$  :

T1 et T4 sont commandés à la fermeture tandis que T2 et T3 sont ouverts. Dans ce cas la tension aux bornes de la charge  $U_{ch}$  est donnée par :

$$U_{ch} = L \frac{di_{ch}}{dt} + Ri_{ch} = E \quad (2.35)$$

D'après l'équation ci-dessus, on obtient un courant négatif dans cet intervalle c'est-à-dire les diodes D1 et D4 qui conduisent le courant.

$$i_{ch}(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - I_M e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.36)$$

Dans cet intervalle de temps, l'énergie est fournie par la charge et elle est transmise vers la source appelée phase de restitution alternance.

**Pour  $t_1 \leq t < \frac{T}{2}$  :**

A l'instant  $t_1$ , le courant devient positif, ce qui rend les transistors T1 et T4 conduisent, ou les diodes D1 et D4 sont bloquées. Les équations pour  $U_{ch}(t)$  et  $i(t)$  restent les mêmes que précédemment car nous sommes toujours sur la même maille. Pour cela, nous sommes dans une phase appelée phase d'accumulation alternée où la charge reçoit de l'énergie.

**Pour  $\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2} + t_1$  :**

T2 et T3 sont commandés à la fermeture tandis que T1 et T4 sont ouverts. Dans ce cas la tension aux bornes de la charge  $U_{ch}$  est donnée par :

$$U_{ch} = L \frac{di_{ch}}{dt} + Ri_{ch} = -E \quad (2.37)$$

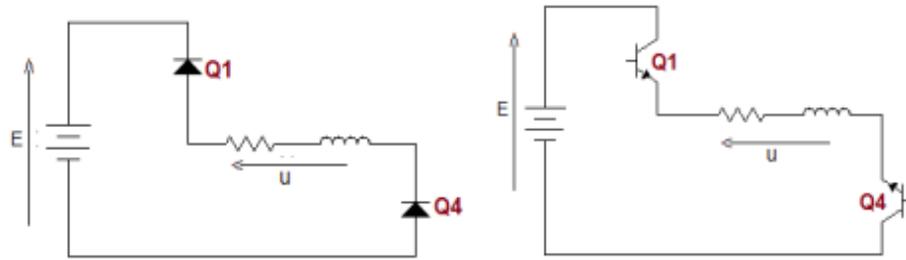
D'après l'équation ci-dessus, on obtient un courant positif dans cet intervalle c'est-à-dire les diodes D2 et D3 qui conduisent le courant.

$$i_{ch}(t) = \frac{E}{R} \left(-1 + e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}}\right) + I_M e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}} \quad (2.38)$$

Dans cet intervalle de temps la charge fournit l'énergie vers la source.

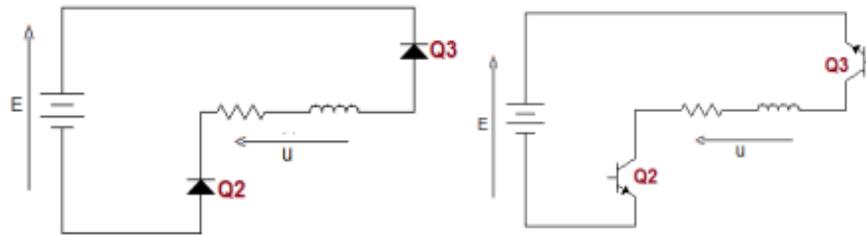
**Pour  $\frac{T}{2} + t_1 \leq t < T$  :**

A l'instant  $\frac{T}{2} + t_1$ , le courant devient négatif, ce qui rend les transistors T2 et T3 conduisent, ou les diodes D2 et D3 sont bloquées. Dans ce cas, la charge reçoit de l'énergie. Les équations pour  $U_{ch}(t)$  et  $i(t)$  restent les mêmes que précédemment car nous sommes toujours sur la même maille.



Cas n°1: Restitution alternance positive

Cas n°2: Accumulation alternance positive



Cas n°3: Restitution alternance négative

Cas n°4 : Accumulation alternance positive

Figure 2.16 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur monophasé en pont [34]

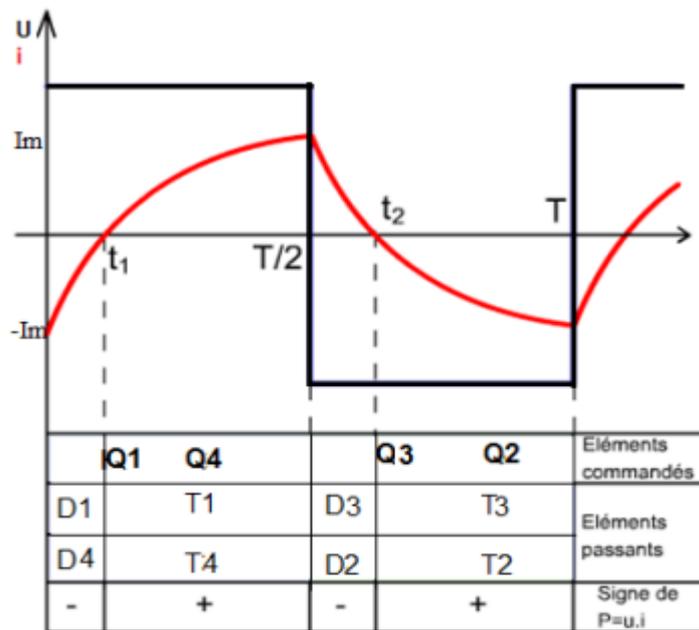


Figure 2.17 : L'allure de la tension et le courant aux bornes de la charge inductive [34]

2.3.4. Les applications des onduleurs [35]

Les onduleurs sont généralement utilisés dans plusieurs domaines tel que :

- La variation de la vitesse des machines industrielle telle que les moteurs synchrones et asynchrones.
- Transfert de l'énergie entre deux réseaux qui n'ont pas la même fréquence.
- Alimentation de sécurité pour contracter la coupure d'électricité.
- Alimentation des appareils domestiques (électroménagers, les appareils électroniques...).
- Génération de l'énergie électrique à partir des installations photovoltaïques.
- Compensateur de la puissance réactive.

#### **2.4. Caractéristiques d'un onduleur pour les systèmes photovoltaïques**

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques sont quelque peu différents des onduleurs conventionnels utilisés, mais le but de la conversion CC-CA est le même. La principale caractéristique des onduleurs photovoltaïques est de trouver le point de fonctionnement optimal du système. En pratique, les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques I-V non linéaires pour un éclairage et une température donnée, la tension est presque constante en circuit ouvert ou à forte charge (similaire à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge, le courant est pratiquement constant (source du courant). Un générateur est sensible à la tension en circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température. Le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement : le courant de court-circuit augmente lorsque l'éclairement augmente [36].

Les onduleurs PV disposent un système appelé MPPT « Maximal Power Point Tracking » qui force le générateur à travailler à son point maximum, ce qui va introduire une amélioration de rendement du système de conversion.

#### **2.5. Les systèmes de conversion photovoltaïques [37]**

Les systèmes PV connectés au réseau ont généralement deux ou plusieurs étages. Le premier étage est un convertisseur CC-CC destiné à augmenter la tension du réseau et à assurer la fonction MPPT, Le deuxième étage est destiné à la conversion du courant continu en courant alternatif. Plusieurs configurations ont été proposées pour tels systèmes. Le nombre d'étages impliqués dans un système PV connecté au réseau est une question importante, car il détermine l'efficacité globale, la fiabilité et la complexité du contrôle de tels systèmes.

### 2.5.1. Les systèmes de conversion photovoltaïques à deux étages

Les systèmes PV connectés au réseau utilisent généralement deux étages pour conditionner de manière appropriée l'énergie solaire disponible pour l'alimentation du réseau. Alors que le premier étage est utilisé pour augmenter la tension du réseau PV et suivre la puissance solaire maximale, le deuxième étage inverse le courant continu en courant alternatif de haute qualité. En général, le premier étage est constitué d'un convertisseur continu-continu de type " Boost " ou " Buck-Boost " et le deuxième étage contient un convertisseur continu-alternatif "onduleur" qui permet de faire la conversion du courant continu en courant alternatif pour le faire l'injecter au réseau.

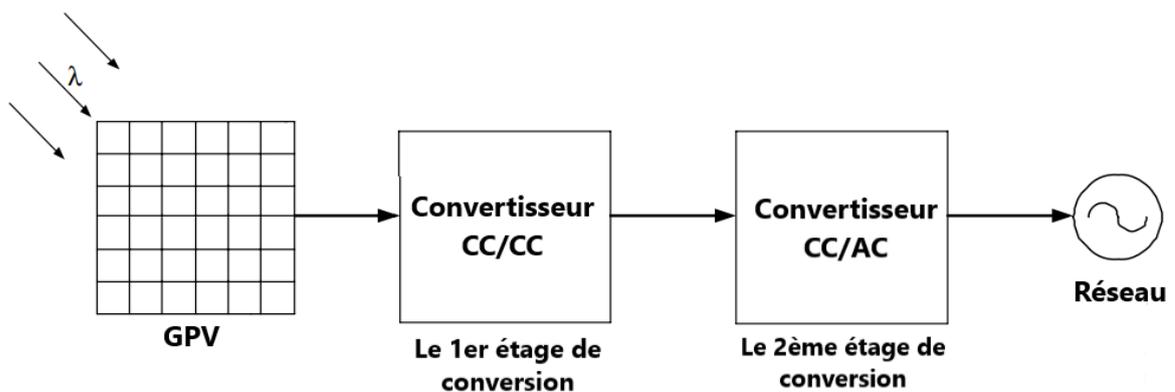


Figure 2.18 : Système de conversion à deux étages

Ces configurations à deux étages ont fait leurs preuves et fonctionnent bien, mais présentent des inconvénients tels qu'un nombre de pièces plus élevé, une efficacité moindre, une fiabilité moindre, un coût plus élevé et une taille plus importante. La question est de savoir s'il est possible de réduire le nombre d'étages de traitement de l'énergie dans ces systèmes ce qu'on va voir par la suite.

### 2.5.2. Les systèmes de conversion photovoltaïques à un seul étage

Il est possible de réduire le nombre des étages de la chaîne de conversion en utilisant un seul étage cela permet de réaliser la situation décrite par la figure (2.19). Cette configuration est dite système de conversion à un seul étage, le convertisseur CC/CC peut être ignoré et l'onduleur est le seul convertisseur du système. Par conséquent, soit le suivi de PPM ou la conversion CC/CA sont effectués par l'onduleur. Habituellement, l'efficacité du système de conversion à un seul étage est d'environ 4 à 10 % supérieure à celle des systèmes de conversion

à deux étages [38]. L'application de l'algorithme MPPT et de contrôleur du courant du réseau à l'onduleur peut compliquer les méthodes de contrôle [39].

Ce qui permet d'obtenir un système compact qui a une grande fiabilité, un poids réduit et un faible coût [40], [41]. Plus le nombre d'étages faible, plus l'intégration des modules n'est facile. En d'autres termes, une optimisation complète du circuit est nécessaire [42].

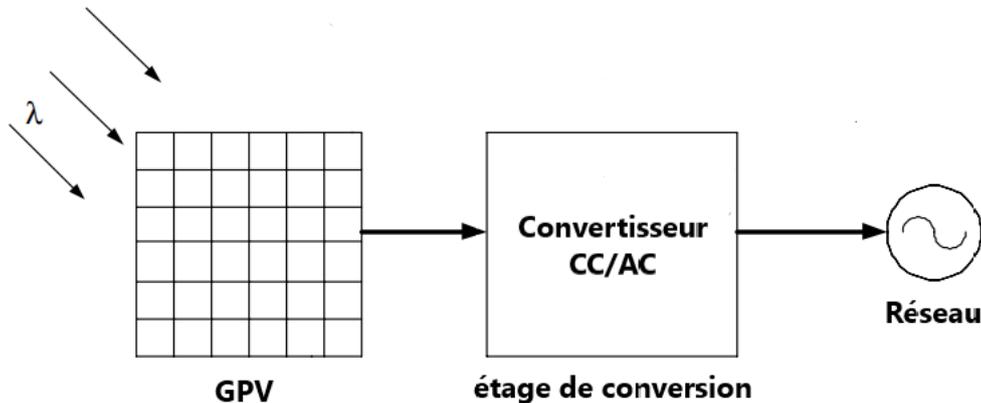


Figure 2.19 : Système de conversion à un seul étage

## 2.6. Conclusion

Ce chapitre est divisé en trois grandes parties. Dans la première partie, nous avons défini les différents convertisseurs CC/CC et leurs schémas électriques, leurs principes de fonctionnement et les applications de ces convertisseurs. Dans la deuxième partie nous avons présenté brièvement les convertisseurs CC/CA : définitions, classifications et après nous avons basé sur les onduleurs monophasés qui nous intéressent le plus pour notre simulation dans le chapitre suivant, ainsi que leurs types, le fonctionnement de chacun de ces types, ainsi les caractéristiques des onduleurs photovoltaïques. Dans la dernière partie nous avons défini les systèmes de convertisseurs photovoltaïques (à deux étages et à un seul étage).

Dans ce chapitre on peut conclure que l'objectif des convertisseurs de l'électronique de puissance dans les systèmes est de convertir le courant continu des panneaux PV en courant alternatif vers le réseau, avec le meilleur rendement possible, le coût le plus bas et en conservant les performances supérieures. Par la suite nous allons appliquer des stratégies de contrôle pour un onduleur photovoltaïque (PV) à un seul étage.

**Chapitre 03 :**  
**Commande MPPT**  
**d'un système de**  
**conversion à un**  
**seul étage**

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons appliquer une stratégie du contrôle basé sur différentes types de commandes pour contrôler un onduleur connecté au réseau dans un système de conversion à un seul étage. Nous commençons ce chapitre par des notions de base sur les MPPT, ainsi que leurs classifications. Ensuite, nous décrivons le système à étudier à travers la description de chaque partie de ce dernier. Enfin, grâce au logiciel de programmation MATLAB/SIMULINK, nous simulons et interprétons les différents résultats obtenus.

### 3.2. MPPT

La puissance maximale d'un panneau PV dépend de la température, l'éclairement et de la charge, cette puissance maximale correspondante d'un seul point appelée le point de puissance maximale « PPM », ce point est déterminé à partir de la caractéristique I et V [8].

MPPT est une abréviation en anglais qui signifie « Maximum Power Point Tracking », c'est une technique de suivi de point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. La commande MPPT est une technique de piloter les convertisseurs statiques, elle permet la recherche instantanée de PPM en assurant une amélioration du rendement du système PV quels que soit les conditions météorologiques (température et éclairement), cela est fait avec un algorithme de poursuivre qui permet une adaptation entre le générateur et sa charge [22].

#### 3.2.1. Classification des commandes MPPT

Il existe plusieurs algorithmes de recherche de point maximum pour améliorer le rendement des systèmes photovoltaïques. Les principales différences entre ces algorithmes sont la mise en œuvre (numérique ou analogique), la simplicité de la conception, les exigences des capteurs, la vitesse de convergence, la plage d'efficacité, ainsi que les coûts matériels.

La classification peut être effectuée selon le type de recherche ou selon les paramètres d'entrée/sortie de la commande MPPT. On distingue : [43]

##### 3.2.1.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée/sortie

- Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrées du convertisseur statique
- Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur statique

### 3.2.1.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche ou contrôle

#### a. Les méthodes indirectes :

- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court-circuit.

#### b. Les méthodes directes :

- La méthode Perturb & Observe (P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance (IC).

### 3.2.2. Les algorithmes de la commande MPPT

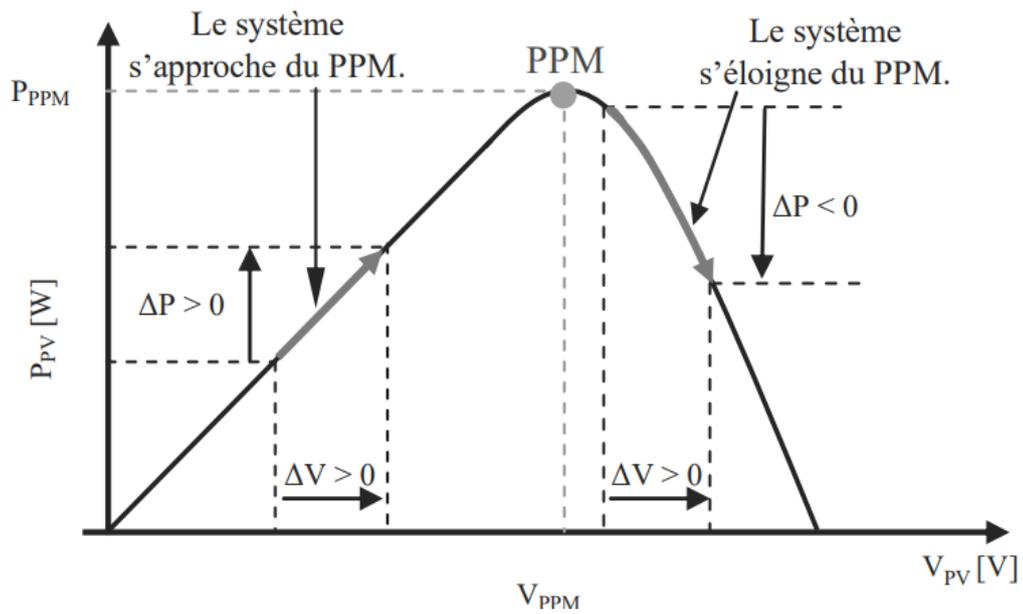
#### 3.2.2.1. La méthode Perturbe & Observe (P&O)

L'algorithme P&O est une technique classique de la recherche de PPM, il est parmi les méthodes de MPPT les plus utilisées à cause de sa simplicité de réalisation. Le principe de cette méthode consiste à créer une légère perturbation de la tension du générateur photovoltaïque notée  $\Delta V$ , cette perturbation provoque un changement de la puissance, cependant on analyse le sens de variation de cette puissance.

Dans cette technique la puissance de sortie de GPV est mesurée cycliquement et comparée avec la puissance précédente tel que :

- Si la puissance de sortie augmente à cause de la perturbation donc on poursuit la perturbation dans le même sens cela signifie qu'on s'approche de PPM.
- Si la puissance de sortie diminue à cause de la perturbation cela signifie qu'on s'éloigne de PPM donc on inverse la perturbation pour trouver le PPM.

La figure (3.1) ci-dessous illustre le principe de la méthode P&O et montre l'évolution de la puissance après chaque perturbation de tension  $\Delta V$ .



**Figure 3.1: Le principe de la méthode P&O**

Dans cet algorithme, des perturbations sont fournies à la tension. La tension du module PV est augmentée ou diminuée pour vérifier si la puissance est augmentée ou diminuée. Lorsqu'une augmentation de tension entraîne une augmentation de puissance, cela signifie que le point de fonctionnement du module PV se situe à gauche du PPM. Inversement, si la tension augmente entraînant une diminution de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement du module PV se trouve du côté droit du PPM.

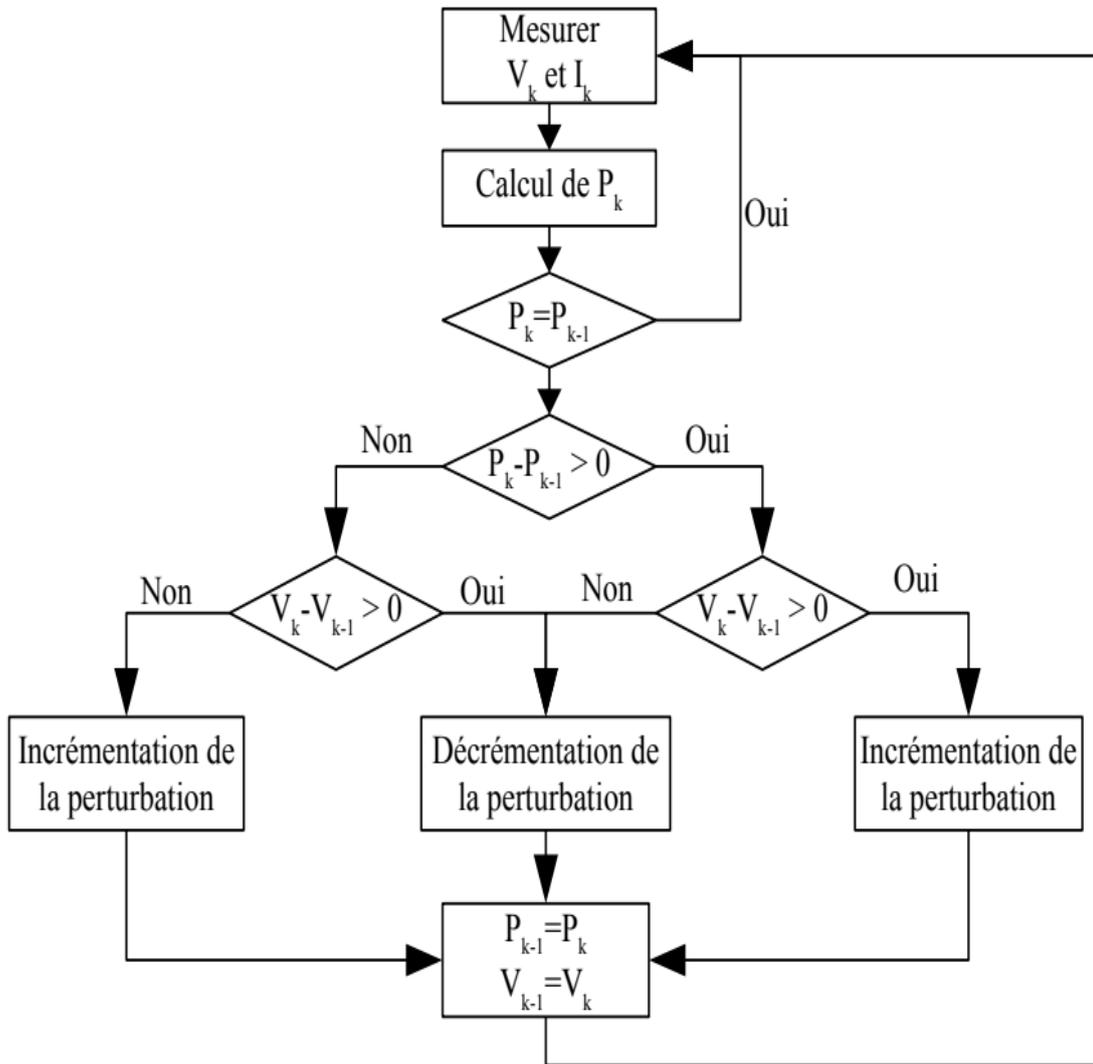


Figure 3.2 : Organigramme de l’algorithme P&O

Pour cette méthode ont besoin deux types de capteurs l’un pour la mesure de la tension du module PV ( $V_{PV}$ ) et l’autre pour la mesure du courant du module PV ( $I_{PV}$ ) à chaque cycle, ces deux capteurs sont nécessaires pour la mesure instantanée de la puissance du GPV.

**3.2.2.2. La méthode incrémentation de la conductance (IC)**

Cette technique a été proposée dans la littérature pour éviter les inconvénients de l’algorithme P&O, elle se base sur la connaissance de changement de la conductance de module PV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM [44].

La conductance est donnée par le rapport entre le courant et la tension de module PV, elle est notée par G :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.1)$$

La variation de la conductance s'écrit comme la suite :

$$dG = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (3.2)$$

La position de point de fonctionnement par rapport au PPM est définie par l'évolution de la puissance par rapport à la tension du GPV.

Sachant que la puissance générée par un module photovoltaïque est donnée par :

$$P_{PV} = V_{PV} \times I_{PV} \quad (3.3)$$

La dérivée de la puissance par rapport à la tension est :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \times V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (3.4)$$

Lorsqu'on est sur le PPM la dérivée de la puissance sera nulle, si la dérivée de la puissance elle est positive cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM et si la dérivée de la puissance est négative cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à droite, ceci nous conduit à définir les équations suivantes [45] :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.5)$$

Dans ce cas, le point du fonctionnement se situe sur le PPM.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.6)$$

Dans ce cas, le point du fonctionnement se situe à la gauche de PPM.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \Rightarrow \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.7)$$

Dans ce cas, le point du fonctionnement se situe à la droite de PPM.

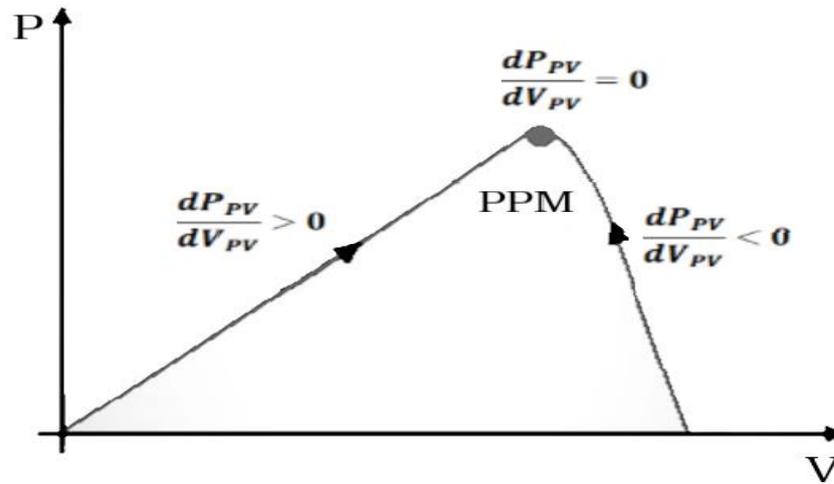


Figure 3.3 : L'évolution de point de fonctionnement selon le signe de  $dP/dV$

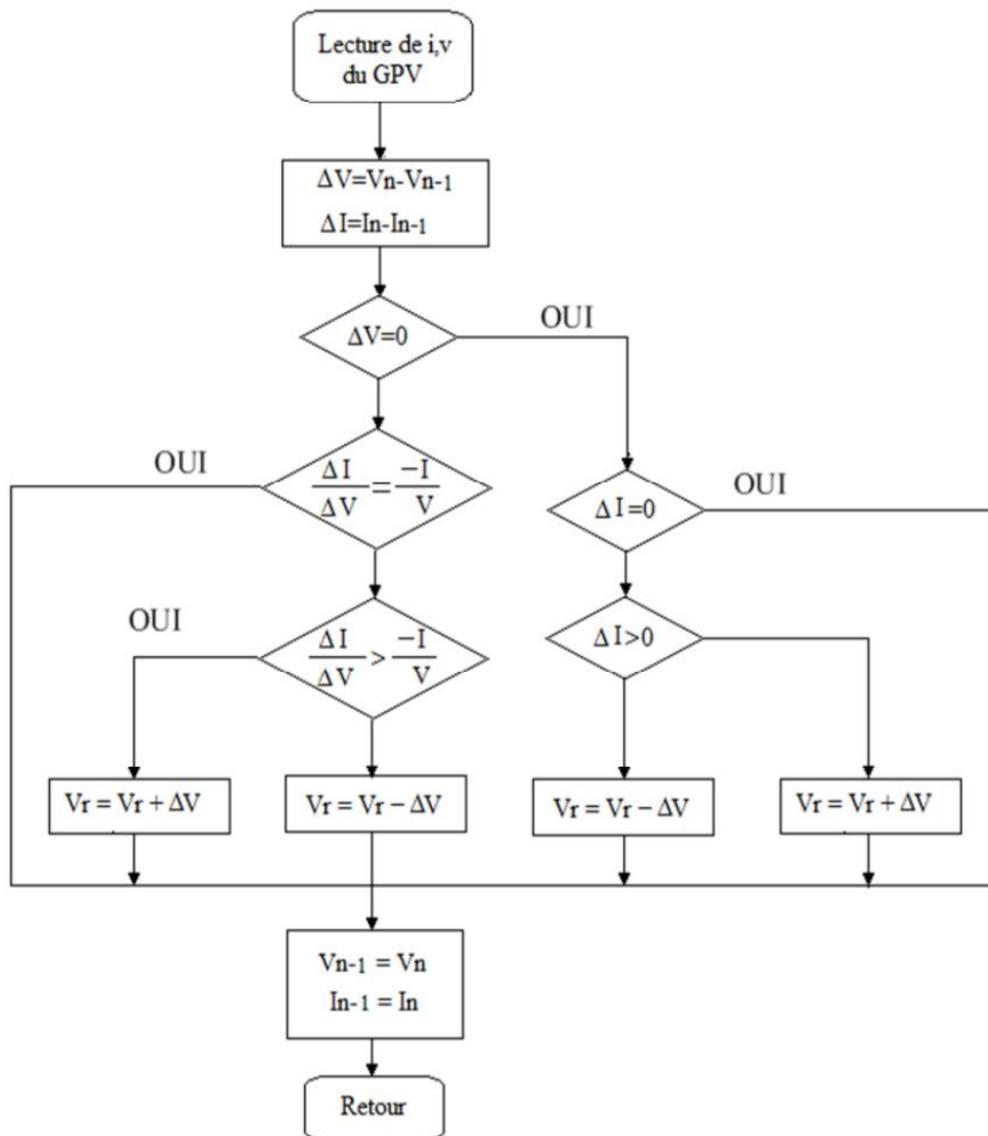


Figure 3.4 : Organigramme de l'algorithme IC

### 3.2.3. Autres méthodes

Dans la littérature plusieurs nouveaux algorithmes de MPPT ont été proposés, on peut citer :

- Algorithme MPPT par la logique floue (Fuzzy Logic).
- Algorithmes tension constante (CV : Constant Voltage).
- Algorithme du courant constant (CC : Constant Current).
- Algorithmes capacité parasite (PC : Parasite Capacity).
- Les algorithmes d'identification en temps réel du PPM.
- Algorithme à base des réseaux de neurones.
- L'algorithme d'optimisation par l'essaim particulaire (PSO).

### 3.2.4. Comparaison entre les méthodes MPPT

#### 3.2.4.1. Algorithme perturbation and observation (P&O)

##### a. Avantages

- Facile à mettre en œuvre.
- Une structure simple.
- La méthode P&O nécessite juste quelques paramètres mesurés.
- La méthode P&O est la plus populaire en raison de son faible coût.

##### b. Inconvénients

- Le P&O présente des oscillations au tour de PPM.
- Il dépend des conditions initiales.
- Les systèmes PV ne peuvent pas toujours fonctionner au point de puissance maximale  
Le processus est lent en raison d'essais et d'erreurs.
- Le principal inconvénient de cet algorithme est qu'il ne fonctionne pas bien après des changements soudains des conditions météorologiques.

#### 3.2.4.2. La méthode incrémentation de la conductance (IC)

##### a. Avantages

- La vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement [46].
- Rapide en régime transitoire.
- Minimise les pertes de puissance causée par les oscillations au tour de PPM.

### b. Inconvénients

- L'algorithme IC est un peu complexe à mettre en œuvre.
- L'instabilité possible de rendement due à l'utilisation de l'algorithme dérivé.

### 3.3. Description du système

Habituellement, le convertisseur de puissance de la source du courant continu relié à la charge et/ou au réseau consiste en un convertisseur à deux étages : le convertisseur continu-continu et le convertisseur continu-alternative. Une solution alternative intéressante pourrait être l'utilisation d'un convertisseur à un étage où le convertisseur continu-continu est évité. Dans la solution classique avec convertisseur à deux étages, le convertisseur continu-continu nécessite plusieurs dispositifs supplémentaires produisant une grande quantité de pertes par conduction, une réponse transitoire lente et un coût élevé, alors que les avantages des convertisseurs à un étage sont : un bon rendement, un prix plus bas et une mise en œuvre plus facile.

Comme le montre la figure (3.5), le système PV se compose d'une chaîne de panneau solaire relié entre elles en série, un convertisseur CC/AC relié avec un filtre (LCL)

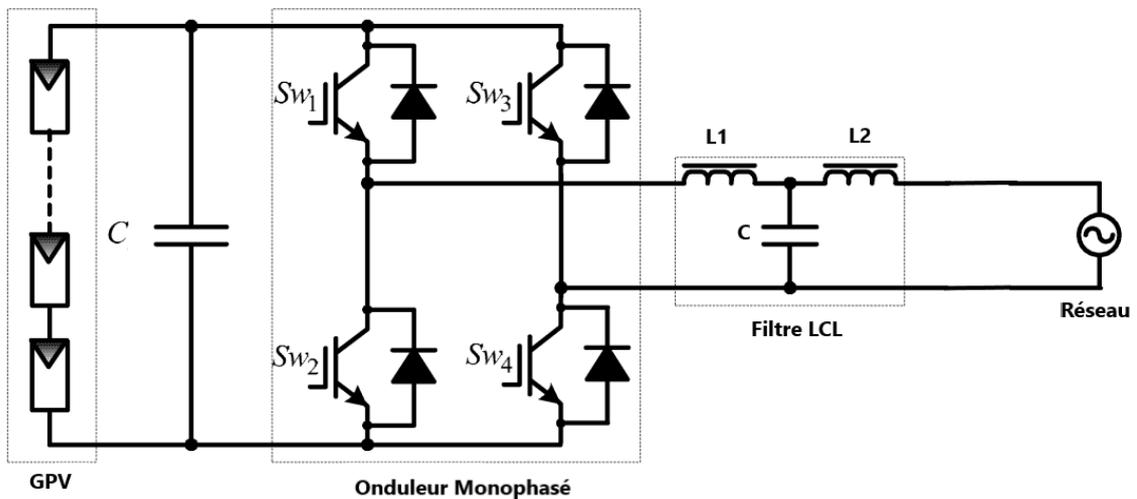


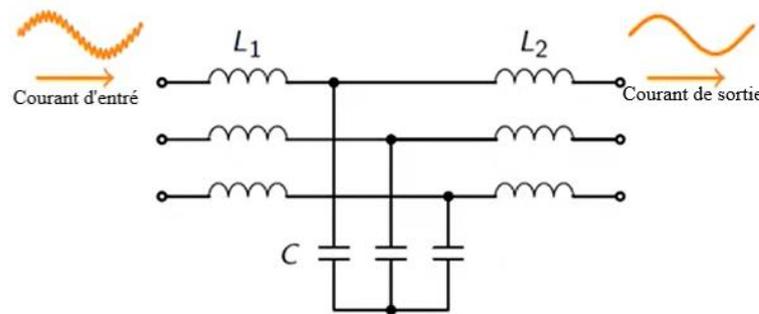
Figure 3.5 : Schéma descriptif d'un système de conversion à un seul étage [47]

Le nombre de panneaux dans la chaîne doit garantir une tension continue supérieure à la tension alternative de pointe à tout moment. La conversion de l'énergie du côté continu au côté alternatif est effectuée par un onduleur monophasé à source de tension.

### 3.3.1. Le filtre LCL

Le filtre LCL est largement utilisé dans les onduleurs connectés au réseau en raison de ses performances supérieures. Sans filtre LCL le courant généré par l'onduleur est un courant plein des harmoniques, injecter ce type du courant dans le réseau détériore la tension de réseau alors il va provoquer des nombreux problèmes de qualité d'alimentation.

Afin d'éviter tous ce problème en utilisant un filtre LCL en sortie de l'onduleur, donc lorsqu'on utilise un filtre LCL on va obtenir un courant de sortie sinusoïdal très lisse sans harmoniques comme montre la figure (3.6) ci-dessous :



**Figure 3.6 : Filtre LCL**

Telle que :

$L_1$  : est l'inductance côté de l'onduleur.

$L_2$  : est l'inductance côté réseau.

$C$  : le condensateur du filtre.

### 3.3.2. Stratégie de contrôle

Pour les onduleurs PV connectés au réseau d'une puissance de 1 à 5 kW, Les principaux éléments de la structure de contrôle sont l'algorithme de synchronisation basé sur PLL, le MPPT, le contrôle de la puissance d'entrée et le contrôleur du courant et de tension de réseau. Dans la suite on va voir tous ces éléments en détails.

#### 3.3.2.1. Algorithme de MPPT

La tâche de l'algorithme MPPT dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque est de régler en permanence le système de manière à ce qu'il tire la puissance maximale du panneau solaire, quelles que soient les conditions météorologiques ou de charge. Puisque les caractéristiques tension-courant du panneau solaire ne sont pas idéales et que les conditions

telles que l'irradiation, la température ambiante et le vent qui affectent la sortie du panneau solaire sont imprévisibles, le suiveur doit traiter un système non linéaire et variable dans le temps. Les algorithmes MPPT conventionnels utilisent  $dP/dV = 0$  pour obtenir la sortie du point de puissance maximale. Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés afin de mettre en œuvre le MPPT comme suit : perturbation et observation, conductance incrémentale, capacité parasite et tension constante, mais seuls les deux premiers sont les plus fréquemment utilisés.

L'algorithme perturbation et d'observation a été choisi comme stratégie MPPT dans ce travail. Cet algorithme présente des avantages par rapport aux autres algorithmes car il a une structure simple donc il est facile à mettre en œuvre et aussi il présente un faible coût par rapport à tous les autres algorithmes. L'un des inconvénients de cet algorithme est l'apparition des oscillations autour du point de puissance maximal.

### 3.3.2.2. Le contrôleur de tension CC et l'anticipation de puissance

Une nouvelle méthode de contrôle de la puissance d'entrée a été proposée dans l'étude de [48] et qui nous permet d'améliorer la dynamique du système, cette stratégie de contrôle de la puissance d'entrée dans le cas d'une configuration de puissance du système PV sans convertisseur CC-CC sont présentées dans la section suivante.

Dans la figure (3.7), la nouvelle stratégie de contrôle de la puissance d'entrée proposé par [48]. Le nouvel élément introduit est l'anticipation de la puissance. La valeur calculée de la référence d'amplitude du courant en utilisant la puissance PV ( $P_{pv}$ ) et la valeur efficace de la tension alternative ( $V_{acRMS}$ ) est ajoutée à la valeur de sortie du contrôleur de tension continue ( $I_r$ ), ce qui donne la référence d'amplitude du courant alternatif ( $I_{ref}$ ). En utilisant l'anticipation de la puissance d'entrée, la dynamique du système PV est améliorée, sachant que le MPPT est plutôt lent. Le contrôleur de tension continue assure une réponse rapide du système PV à un changement soudain de la puissance d'entrée.

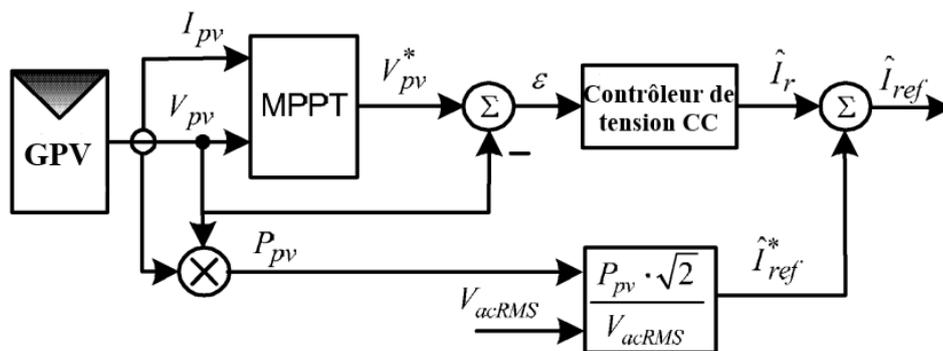


Figure 3.7 : Contrôle de la puissance d'entrée [47]

Le contrôleur utilisé pour le contrôle de tension CC est un proportionnel intégral PI qui est souvent utilisé en conjonction avec le correcteur proportionnel pour améliorer le régime permanent. La raison de cette combinaison est que le correcteur intégral améliore le régime permanent tout en dégradant le transitoire. Quant à l'action proportionnelle, elle offre la possibilité de modifier à la fois le régime transitoire et le régime permanent [49].

La fonction de transfert du correcteur Proportionnel Intégral s'écrit :

$$C(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (3.8)$$

Avec :

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

$T_i$  : La constante du temps de l'action intégrale.

En résumé, le correcteur Proportionnel Intégral améliore la précision, par contre la stabilité du système n'est pas toujours effectuée.

### 3.3.2.3. Contrôleur du courant du réseau

Un régulateur Proportionnel Résonant (abrégé en régulateur PR), est un type particulier de fonction de transfert qui est souvent mis en œuvre pour la commande en boucle fermée de systèmes au comportement sinusoïdal. Comme leur nom l'indique, ils possèdent à la fois un terme proportionnel  $K_p$  et un terme résonant  $K_r$ , qui peuvent être réglés indépendamment [50].

La fonction de transfert de contrôleur PR est donnée par :

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (3.9)$$

Dans le domaine de l'électronique de puissance, les contrôleurs proportionnels résonnants (PR) ont suscité un grand intérêt pour les applications de contrôle du courant/tension alternatif monophasé en raison de leurs performances et de leur simplicité de mise en œuvre.

### 3.3.2.4. Modulation de largeur d'impulsion (MLI) [51]

#### a. Définition

La modulation de largeur d'impulsion MLI (ou en anglais Pulse Width Modulation) est une technique utilisée en électronique de puissance pour convertir une tension continue en

tension continue (conversion CC-CC) ou pour convertir une tension continue en tension alternative (conversion CC-CA).

### b. Principe

La MLI repose sur la génération d'une tension carrée à rapport cyclique variable, définie sur la figure ci-dessous.

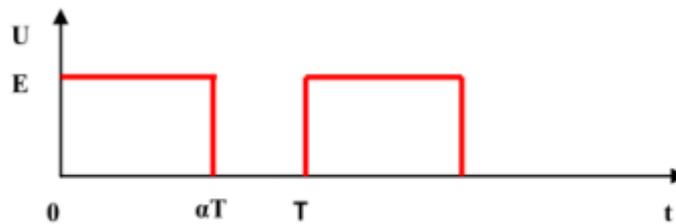


Figure 3.8 : Signal de tension généré

La tension est périodique, de période  $T$ , égale à  $E$  pendant une durée  $\alpha T$ , à 0 pendant  $(1 - \alpha T)$ . Le paramètre  $\alpha$  (compris entre 0 et 1) est le rapport cyclique.

### c. Classifications des techniques de MLI

**MLI simple** : Les signaux de commande sont obtenus par comparaison d'un signal de référence avec un signal d'onde porteuse triangulaire.

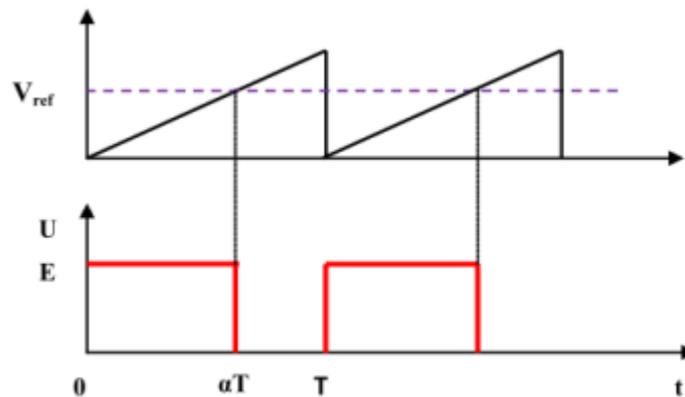
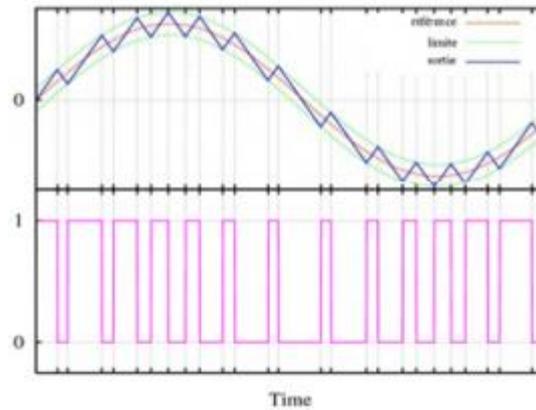


Figure 3.9 : MLI simple

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture du transistor son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture.

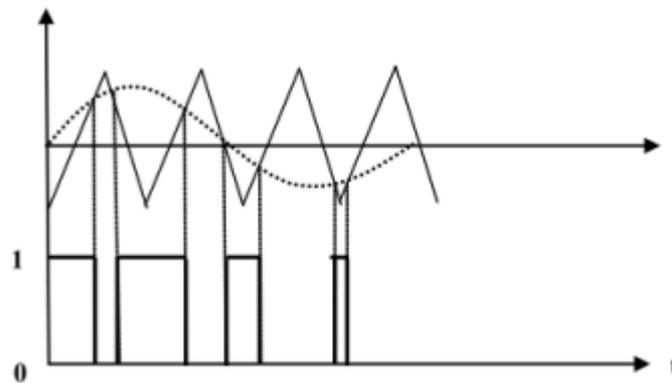
**MLI par hystérésis** : Cette méthode consiste à maintenir le courant entre deux limites autour de la référence sinusoïdale. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre

les courants mesurés et les référence des courants. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.



**Figure 3.10 : MLI par hystérésis**

**MLI Sinus-Triangle :** Les signaux de commandes sont obtenus par intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence  $f_s$ , appelée modulante, avec un signal triangulaire de haute fréquence  $f_p$ , appelée la porteuse  $p$ , pour déterminer les instants de commutation. Le schéma de principe est donné par la figure suivante :



**Figure 3.11 : MLI Sinus-Triangle**

### 3.4. Simulation du système de conversion à un seul étage

#### 3.4.1. Calcule des paramètres de filtres

##### a. Calcule de valeur du condensateur :

Le condensateur est conçu en fonction de la puissance réactive absorbée dans les conditions nominales, la puissance réactive absorbée par le condensateur est limitée à 5% de la puissance apparente  $S$ , la puissance réactive est donnée par :

$$Q = \frac{V^2}{1/2 * \pi * f * C} \quad (3.10)$$

En utilisant la notion de 5% on trouve que :

$$\frac{V^2}{1/2 * \pi * f * C} = 0.05 * S \quad (3.11)$$

De plus,

$$C = \frac{0.05 * S}{V^2 * 2 * \pi * f} \quad (3.12)$$

On remplace les différentes valeurs et on tire la valeur de  $C$  :

$$C = 6.23 \times 10^{-6} F$$

##### b. Calcule de valeur de l'inductance

La valeur de l'inductance  $L_1$  est sélectionnée en fonction du courant maximal autorisé de l'onduleur. En générale pour le calcul de  $L_1$  on utilise la règle suivante :

**La 1<sup>ère</sup> condition :** L'ondulation maximale du courant autorisé doit être limitée jusqu'à 20% du courant nominal

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{4 * F_{sw} * \Delta I_{ppmax}} \quad (3.13)$$

$$L_1 = \frac{400}{4 * 10000 * 8.69 * 1.414 * 0.2}$$

$$L_1 = 4.06 mH$$

**La 2<sup>ème</sup> condition :** La chute de tension maximale à travers l'inductance est limitée à 10% de la tension nominale :

$$V_{L_1+L_2} = I * X_{L_1+L_2} = I * 2 * \pi * f * (L_1 + L_2) \quad (3.14)$$

$$I * 2 * \pi * f * (L_1 + L_2) = 10\% \text{ de } V = 0.1V \quad (3.15)$$

Nous savons que :

$$I = \frac{S}{V} \quad (3.16)$$

Remplaçons (3.16) dans (3.15) nous obtenons :

$$L_1 + L_2 = \frac{10\% \text{ de } V}{\left(\frac{S}{V}\right) * 2 * \pi * f} = \frac{0.1 * V^2}{S * 2 * \pi * f} \quad (3.17)$$

$$L_1 + L_2 = \frac{0.1 * 230^2}{2000 * 2 * \pi * 50}$$

$$L_1 + L_2 = 8.41 \text{ mH}$$

Finalement on trouve :

$$L_2 = 4.35 \text{ mH}$$

### 3.4.2. MLI

La technique que nous avons utilisée est une MLI unipolaire. Ici, la tension de référence est comparée à l'onde porteuse triangulaire. Comme nous utilisons une MLI unipolaire, les références positives et négatives sont comparées, la sortie de chaque comparateur est inversée puis connectée à la borne de grille de chaque MOSFET.

### 3.4.3. Calcul des paramètres du Contrôleur PR

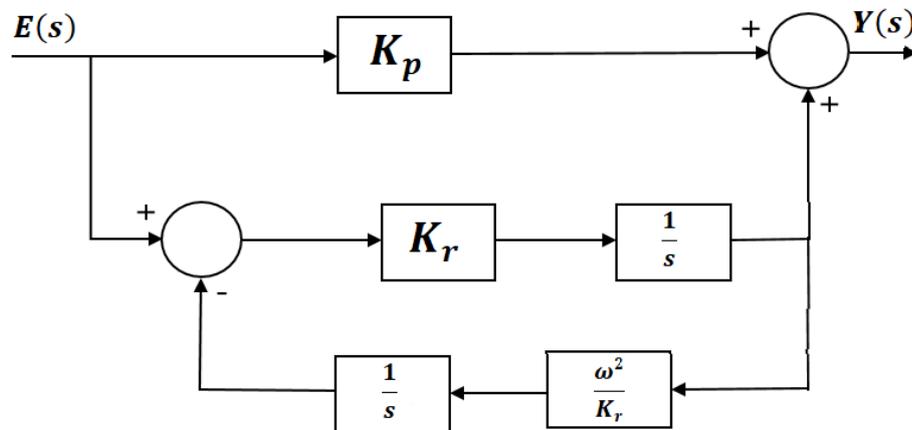


Figure 3.12 : Schéma du contrôleur PR

La fonction de transfert du correcteur Proportionnel Résonant est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (3.18)$$

Il n'existe pas une méthode générale pour le calcul des paramètres du correcteur.

Le calcul du paramètre  $K_r$  s'effectue de la manière suivante :

Nous définissons  $G_n$  par :

$$G_n = \frac{K_r \omega_n}{\omega_n^2 \omega_0} \quad (3.19)$$

Avec :

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.20)$$

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (3.21)$$

Choisissons maintenant  $G_n = 0.1$  et substituons le dans l'équation pour trouver une valeur du départ pour  $K_r$ .

$$K_r = \frac{G_n \omega_n^2 \omega_0}{\omega_n} \quad (3.22)$$

Cette technique de calcul est élémentaire pour calculer cette constante, et la valeur obtenue en premier coup, n'est pas forcément la bonne nous pouvons la changer selon les performances de notre système.

Pour notre cas d'étude, et après quelques tâtonnements, nous avons choisis la valeur du gain  $K_r = 400$ , cela implique que :

$$\frac{\omega^2}{K_r} = \frac{(2\pi * 50)^2}{400} = 246.74$$

Selon [54], la taille du gain proportionnel  $K_p$  du contrôleur PR détermine la bande et la marge de phase de stabilité.

Le  $K_p$  est choisis de la sorte qu'il ne soit pas compatible avec  $K_r$ , et aussi il doit garantir la stabilité du courant. Après quelques essais, nous avons pris  $K_p = 10$ .

De plus, pour  $K_p$  et  $K_r$  choisis la fonction de transfert du correcteur s'écrit :

$$C(p) = 10 + \frac{400s}{s^2 + 98696}$$

### 3.4.4. Caractéristiques du GPV

Dans cette partie, le système a été testé dans les conditions d'une irradiation de 1000W/m<sup>2</sup>, et à une température ambiante de 25°C.

Les caractéristiques du modèle des panneaux photovoltaïques utilisés lors de la simulation sont présentées par la figure (3.13).

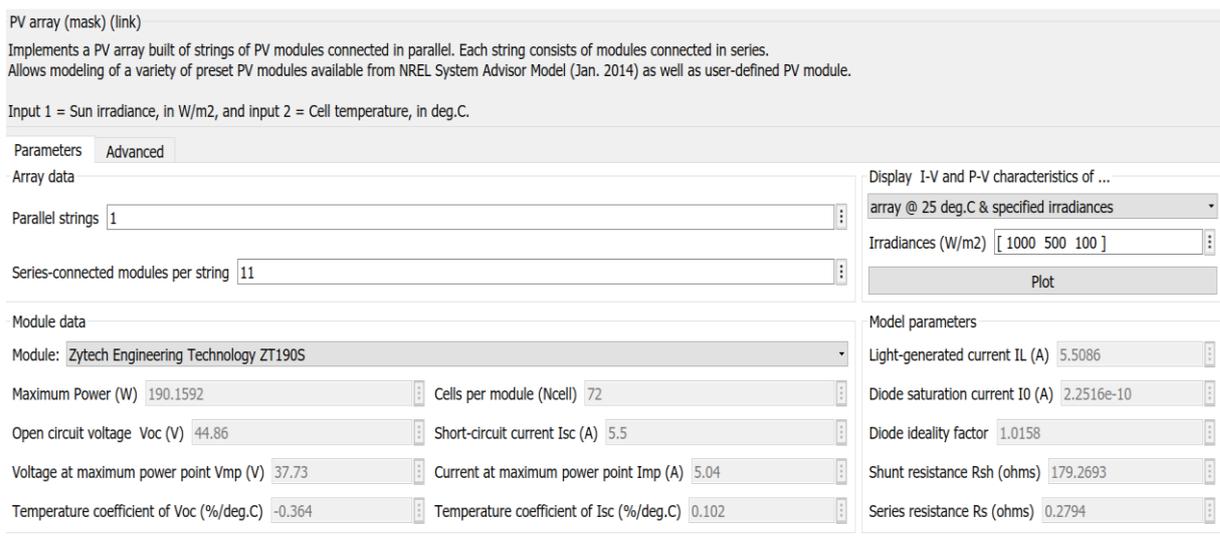


Figure 3.13 : Caractéristiques de GPV

### 3.4.5. Implémentation de PLL sur MATLAB Simulink [48]

Afin de connecter la source d'énergie renouvelable au réseau, qui est dans notre cas, la source d'énergie photovoltaïque, il est nécessaire de synchroniser la tension du générateur photovoltaïque (GPV) avec la tension du réseau en termes de phase et de fréquence, tout en contrôlant la tension associée au réseau. Pour cela une PLL doit être utilisée.

La PLL est un système de contrôle ou une boucle de contrôle qui maintient la même phase entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Elle sert à synchroniser donc le signal de sortie avec le signal d'entrée en phase et en fréquence. Ainsi, lorsque la fréquence de sortie est égale à la fréquence d'entrée et qu'il n'y a pas de différence de phase ou une différence de phase constante entre les deux signaux, on peut dire que la boucle est en condition de verrouillage. En général, une PLL se compose de trois blocs de base : le détecteur de phase, le filtre de boucle ou le filtre passe-bas, et l'oscillateur de contrôle de tension.

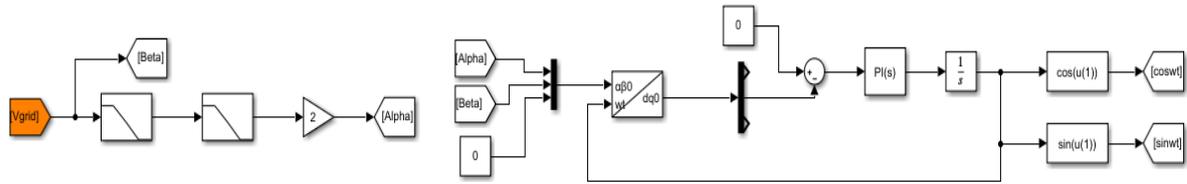


Figure 3.14 : Schéma SIMULINK de PLL

La mise en œuvre du PLL est maintenue comme suit :

Tout d'abord, nous allons donner la tension à un filtre passe-bas ; nous savons que la fonction de transfert du filtre passe-bas est :

$$TF = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (3.23)$$

Avec  $\omega_c$  représente la fréquence du filtre.

En remplaçant  $s$  par  $j\omega$  nous obtenons :

$$TF = \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \quad (3.24)$$

L'amplitude et la phase du filtre sont donnés par :

$$|TF| = \frac{\omega_c^2}{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}} \quad (3.25)$$

$$\theta = -\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad (3.26)$$

Si  $\omega = \omega_c$  nous trouvons :

$$|TF| = \frac{\omega_c^2}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega_c^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\theta = -\arctan\left(\frac{1}{1}\right) = -45^\circ$$

Si nous ajoutons un autre filtre, l'amplitude et la phase seront comme suit :

$$|TF| = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{1}{2}$$

$$\theta = 2 * (-45^\circ) = -90^\circ$$

Maintenant, multiplions la sortie du second filtre passe-bas par 2. Nous obtenons alors un signal identique à l'entrée, mais avec un déphasage de 90 degrés, puisque le signal bêta est toujours décalé de 90 degrés par rapport au signal alpha, nous pouvons appeler le signal d'entrée bêta et le signal de sortie alpha.

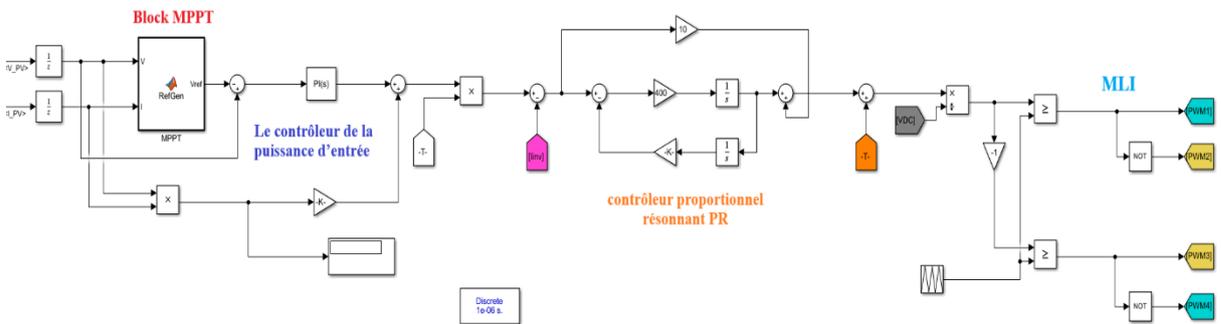
Afin d'implémenter la PLL, nous convertissons d'abord les signaux alpha et bêta en signaux  $dq$  (car la transformée de Park est une extension du détecteur de phase), puis nous mettons en place un système de contrôle à la sortie  $q$  pour trouver l'erreur entre  $q$  et  $Q_{ref}$  et nous fixons  $Q_{ref}$  à zéro. Cette erreur est transmise à la sortie du contrôleur PI. Le contrôleur PI donnera les informations sur l'angle ; il les intégrera pour obtenir «  $\omega t$  ».

Ici, le contrôleur PI fonctionne de telle manière que la sortie «  $\omega t$  » est toujours alignée avec le signal d'entrée. Cette valeur «  $\omega t$  » peut être utilisée pour la génération du signal de référence du courant actif par  $\cos \omega t$  et de la référence du courant réactif par  $\sin \omega t$ .

Les paramètres du contrôleur PI de la structure PLL sont calculés de manière à ce que nous puissions régler directement le temps de stabilisation et le facteur d'amortissement de cette structure PLL. La structure PLL est également utilisée pour la surveillance de la tension du réseau afin d'obtenir les valeurs d'amplitude et de fréquence de la tension du réseau [48].

**3.4.6. Schéma du correcteur sur MATLAB Simulink**

Les principaux éléments de la structure de contrôle du système de conversion à un seul étage sont le MPPT pour le suivie de PPM, le contrôle de la puissance d'entrée qui est fait dans notre travail par un correcteur PI et le contrôleur du courant et de tension de réseau qui est fait dans notre travail par un correcteur PR. Le schéma SIMULINK suivant représente la chaîne de contrôle de notre système :

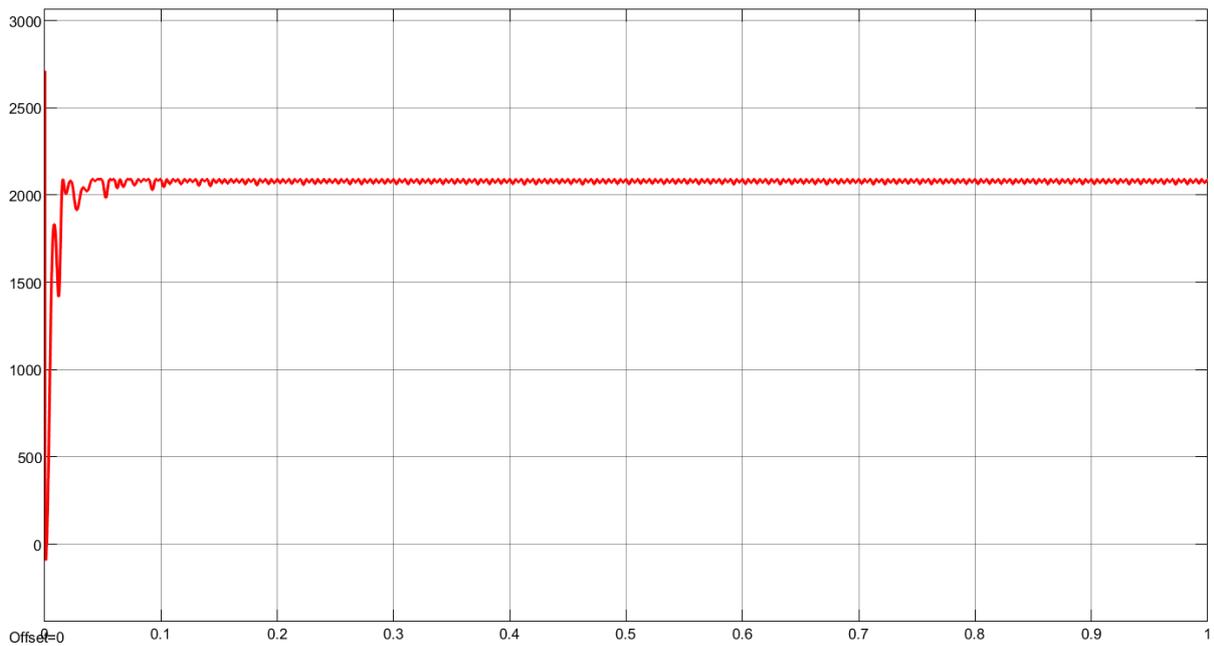


**Figure 3.15 : La chaîne du contrôle d'un onduleur monophasé**

**3.4.7. Simulation et interprétation**

Le but de ces simulations est de visualiser les différentes caractéristiques électriques du système de conversion à un seul étage raccordé au réseau, la figure (3.16) ci-dessous représente le schéma SIMULINK de notre système :



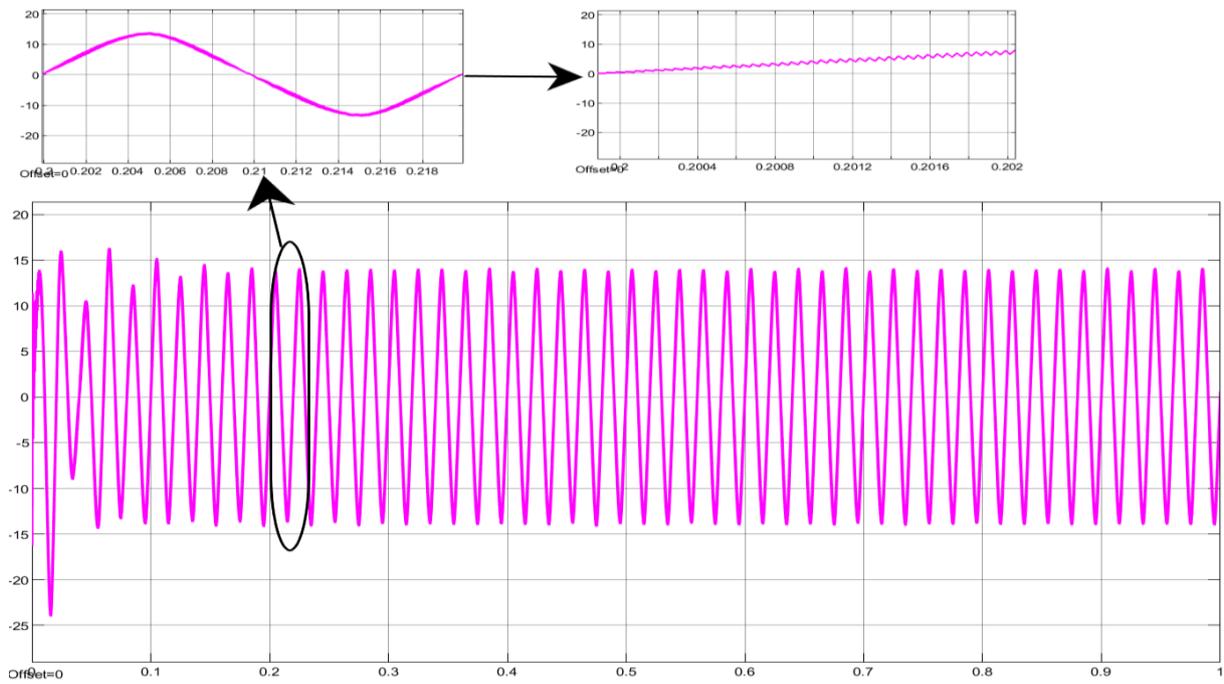


**Figure 3.17 : La puissance de sortie de MPPT**

**Interprétation du résultat :**

D'après la figure (3.17), nous constatons que le temps de convergence de la commande appliquée est 0.1s, et que la puissance maximale du panneau solaire est bien réglée par la commande MPPT appliquées. Nous remarquons aussi la non-disparitions des oscillations car l'algorithme P&O n'élimine pas ces dernières. Ces oscillations représentent physiquement des pertes de puissance.

**Le courant de sortie du l'onduleur :**



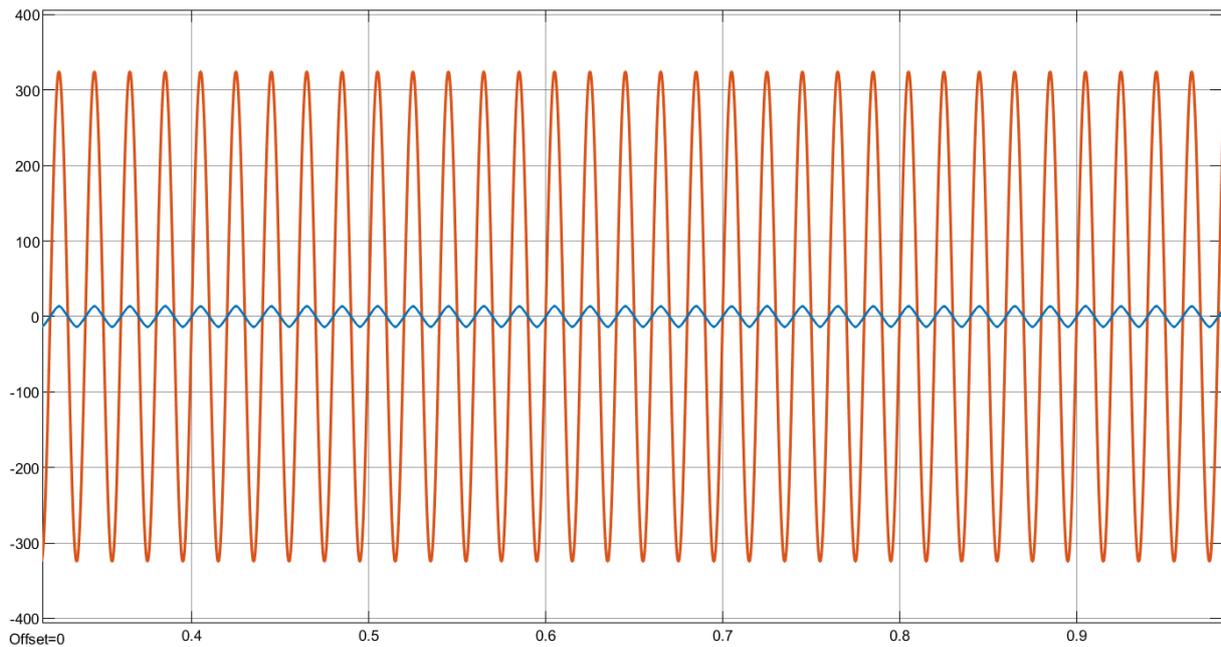
**Figure 3.18 : Le courant de sortie du l'onduleur**

**Interprétation du résultat :**

A travers la figure (3.18), nous remarquons que le courant de la sortie du l'onduleur présente des harmoniques cela nécessite l'utilisation d'un filtre passif.

**Le courant et la tension du réseau :**

Le courant et la tension de réseau sont tracés dans la figure (3.19).



**Figure 3.19 : Le courant et la tension du réseau**

### **Interprétation du résultat**

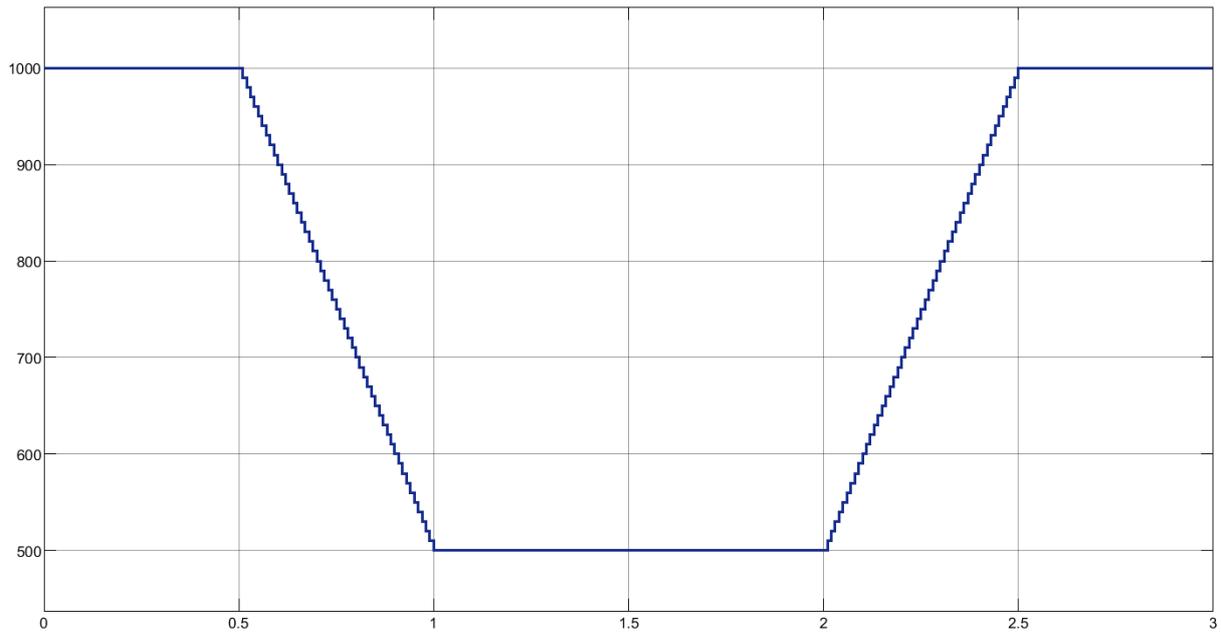
Dans la figure (3.) on remarque que le courant et la tension du réseau sont en phase. On peut aussi remarquer que l'onde du courant est très lisse c'est-à-dire sans aucune harmonique cela nous montre l'intérêt d'utilisation du filtre LCL à la sortie de l'onduleur.

#### **3.4.7.1. Variation de l'éclairement**

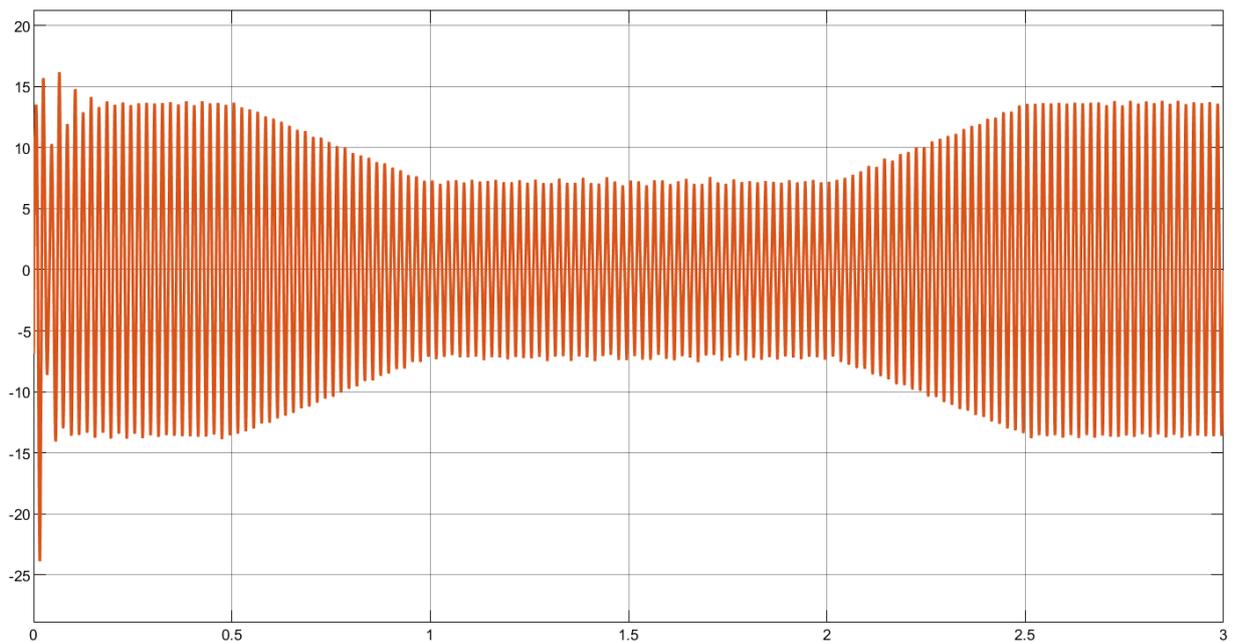
Afin d'analyser la réaction du système suite à un changement de l'éclairement. Nous allons simuler le système avec une variation progressive de l'éclairement comme suit :

- Pour  $t = [0s ; 0.5s]$  l'éclairement est constant à la valeur  $1000 \text{ W/m}^2$ .
- Pour  $t = [0.5s ; 1s]$  l'éclairement diminue progressivement de  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $500 \text{ W/m}^2$ .
- Pour  $t = [1s ; 2s]$  l'éclairement est constant à la valeur  $500 \text{ W/m}^2$ .
- Pour  $t = [2s ; 3s]$  l'éclairement augmente progressivement de  $500 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

La variation de l'éclairement est tracée sur la figure (3.20), et le courant de réseau est tracé sur la figure (3.21)



**Figure 3.20 : La variation d'irradiation solaire**



**Figure 3.21 : L'influence de l'éclairement sur le courant de réseau**

### **Interprétation du résultat**

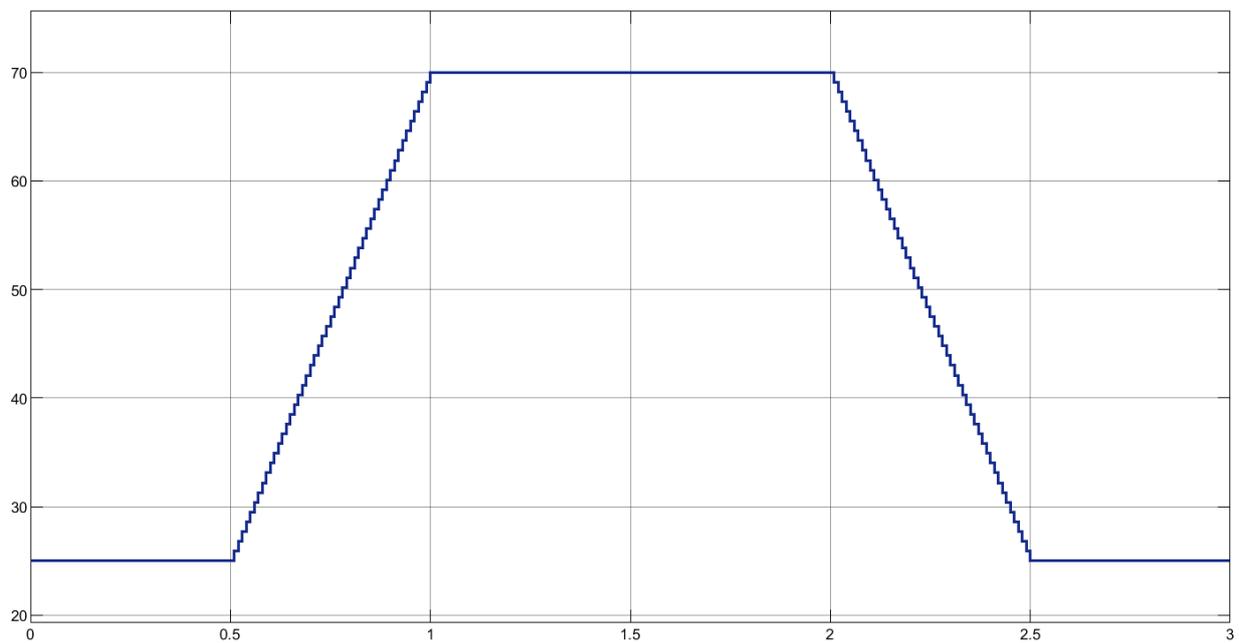
A travers la figure (3.21), nous remarquons que la variation de l'éclairement influe sur le courant de réseau l'amplitude du courant  $I_{grid}$  diminue avec la diminution de l'éclairement et augmente avec l'augmentation de l'éclairement donc on peut dire qu'il y a une relation proportionnelle entre l'éclairement et l'amplitude du courant.

### 3.4.7.2. Variation de la température

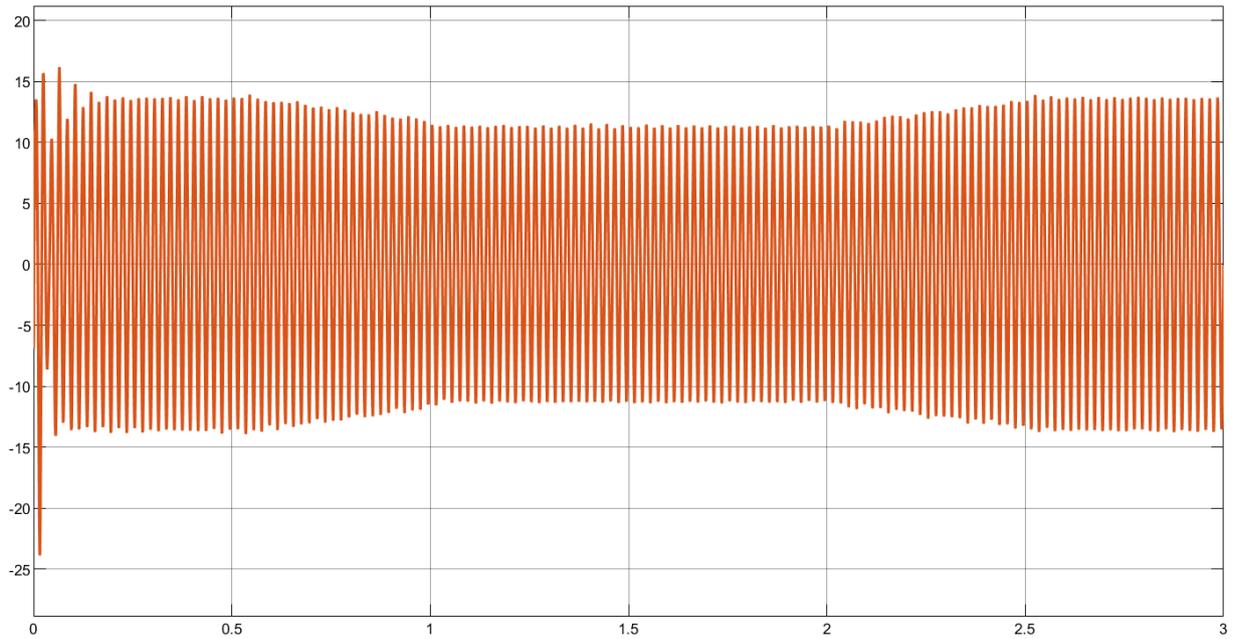
Afin d'analyser la réaction du système suite à un changement de la température. Nous allons simuler le système avec une variation progressive de la température comme suit :

- Pour  $t = [0\text{s} ; 0.5\text{s}]$  la température est constante à la valeur  $25\text{ °C}$ .
- Pour  $t = [0.5\text{s} ; 1\text{s}]$  la température augmente progressivement de  $25\text{ °C}$  à  $70\text{ °C}$ .
- Pour  $t = [1\text{s} ; 2\text{s}]$  la température est constante à la valeur  $70\text{ °C}$ .
- Pour  $t = [2\text{s} ; 3\text{s}]$  la température diminue progressivement de  $70\text{ °C}$  à  $25\text{ °C}$ .

La variation de la température est tracée sur la figure (3.22) et le courant du réseau est tracé sur la figure (3.23).



**Figure 3.22 : La variation de la température**



**Figure 3.23 : L'influence de la température sur le courant de réseau**

### **Interprétation du résultat**

A travers la figure (3.23), nous remarquons que la variation de la température n'affecte pas beaucoup le courant du réseau

### **3.5. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons simulé le système de conversion photovoltaïque à un seul étage, on utilise une structure de contrôle : un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant la méthode de perturbation et d'observation (P&O), une méthode de synchronisation utilisant la boucle à verrouillage de phase (PLL), le contrôle de la puissance d'entrée utilisant le contrôleur de tension CC et l'anticipation de puissance, le contrôleur du courant du réseau utilisant contrôleur proportionnel résonnant (PR) pour l'onduleur monophasé raccordé au réseau. Pour mettre en évidence l'efficacité de ces commandes pour le suivi du point de puissance maximal sur notre système nous avons testé l'influence de l'éclairement et la température. Les résultats de simulation nous permettent de conclure que le système commandé par la méthode P&O avec la boucle de contrôle déjà expliquer montre leur efficacité non seulement pour la poursuite du point de puissance maximale mais aussi en termes de temps de réponse et de stabilité.

## Conclusion générale

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est d'étudier l'application de la commande MPPT pour piloter un système photovoltaïque connecté au réseau à un seul étage de conversion. Le but c'était de contrôler le point de puissance maximale avec l'algorithme P&O à base d'un contrôleur PR.

Nous avons débuté ce travail par la présentation des notions sur l'énergie solaire et des généralités sur les générateurs photovoltaïques. Nous avons étudié en simulation sous MATLAB les caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'un générateur photovoltaïque sous différentes conditions climatiques. Dans cette partie on peut conclure que la température et l'éclairement influent sur les caractéristiques du système PV ainsi sur le rendement donc il est nécessaire de commander le PPM pour garantir le meilleur rendement du système PV dans n'importe quelle condition météorologique.

Le second chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs de chaîne de conversion PV (les hacheurs et les onduleurs), de l'onduleur photovoltaïque et la topologie des chaînes de conversion PV dans cette partie on a montré la différence entre les deux topologies de chaîne de conversion (à un seul étage et deux étages). On conclure que le système PV de conversion à un seul étage présente des avantages remarquables par rapport au système de conversion à deux étages au sens de rendement et de coût des installations.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau. Nous avons exposé les différentes classifications des commandes MPPT qui adapte un panneau PV et nous avons présenté aussi la stratégie de contrôle MPPT d'un onduleur PV que nous avons adopté pour notre système qui se compose d'un contrôleur MPPT base sur l'algorithme P&O et une boucle de contrôle de tension continue en utilisant un correcteur PI et un contrôleur PR pour courant injecté au réseau. Nous avons utilisé cette commande pour piloter un système PV connecté au réseau électrique via un onduleur monophasé, et ceci, pour assurer la poursuite du point de puissance maximale et la commande du courant de réseau. D'après les résultats présentés dans le dernier chapitre nous pouvons conclure que même en présence des variations de température et éclairement le système continue à suivre le point de puissance maximale.

Dans ce mémoire on a présenté une solution alternative intéressante utilisant un convertisseur à un étage, où le convertisseur CC/CC est évité, a été développé et testée avec succès sur un onduleur PV monophasé. Les avantages des convertisseurs à un étage sont : un bon rendement, un prix plus bas et une mise en œuvre plus facile, tandis que le principal inconvénient est le fait que les panneaux PV sont en série et que si l'ombrage se produit sur un ou plusieurs panneaux PV, le rendement de l'ensemble du système est réduit.

## **Perspectives**

Comme suite de notre travail, nous suggérons les deux propositions suivantes :

- Puisque le rendement des panneaux photovoltaïques associés en série est affecté par l'effet d'ombrage, nous suggérons l'utilisation des nouvelles cellules photovoltaïques qui sont basées sur les techniques de constructions qui prennent en compte l'influence de l'ombrage pour atteindre le fonctionnement optimal des panneaux photovoltaïques.
- Dans notre travail on a utilisé l'algorithme P&O pour implémenter la commande de MPPT, donc nous proposons d'utiliser l'algorithme IC qui nous permet d'éviter les oscillations présentées autour de point de puissance maximale.

## Bibliographies

- [1] Mekemeche Abdelkader, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat en Physique, Option Conversions Photovoltaïques, Université de Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, Le 4/7/2017.
- [2] « Définition | Rayonnement solaire | Futura Planète ». <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/> (consulté le 15 juin 2022).
- [3] Tommy Andy, THEUBOU TAMEGHE « contribution À La Mise En Œuvre Et À La Commande D'un Micro réseau De Cogénération Modulaire (Injection De Puissance Et Stabilisation De Fréquence) », Thèse de Doctorat, Université de QUÉBEC, Décembre 2019.
- [4] TAYEBI AZZEDINNE, « Réalisation d'un Onduleur de Tension Commandé par Microcontrôleur pour un Système Photovoltaïque », Thèse Doctorat Électrotechnique option Réseaux électriques, Université DJILLALI LIABES de SIDI-BEL-ABBES, Le 28/1/2021.
- [5] MESSAOUDENE Hichem, « Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques », Mémoire de Magister en Électronique, Option Microélectronique, Université EL HADJ LAKHDAR BATNA, 2013/2014.
- [6] H. Häberlin, « *Photovoltaics: System Design and Practice* ». John Wiley & Sons, 2012.
- [7] Sidi Mohammed El Amine ABDI, « Commande du convertisseur multicellulaire pour la production d'énergie d'origine renouvelable », Thèse Doctorat en Électrotechnique option Systèmes électro-énergétiques, Université de A. MIRA-BEJAIA, 2017/2018.
- [8] Selma HAMMADOU et Souad REZZAK, « Commande linéarisante appliquée aux Systèmes PV connecté au réseau », Mémoire de Master en Automatique option Automatiques et Systèmes, Université de Jijel, 2019/2020.
- [9] ZEGRAR MANSOUR, « OPTIMISATION DE L'ASSOCIATION GPV-ONDULEUR MULTINIVEAU », Thèse Doctorat en Electronique option Electronique de puissance, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTOMB), 2016/2017.
- [10] A. Luque et S. Hegedus, « *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* ». John Wiley & Sons, 2011.

- [11] N. R. Canada, « PV Applications », <https://www.nrcan.gc.ca/energy/energy-sources-distribution/renewables/solar-photovoltaic-energy/pv-applications/7339> (consulté le 15 juin 2022).
- [12] « Les applications du photovoltaïque - Energreen ». <https://www.energreen.be/faq/photovoltaique/comprendre-photovoltaique/les-applications-du-photovoltaique> (consulté le 15 juin 2022).
- [13] Candice, « Advantages and disadvantages of photovoltaic systems », *Sungzu*, <https://sungzu.com/advantages-disadvantages-photovoltaic-systems/> (consulté le 15 juin 2022).
- [14] « Les convertisseurs statiques », *Elec - 13*, <https://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/> (consulté le 15 juin 2022).
- [15] SAHRAOUI Hamza, « Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation) », Thèse de Doctorat en Électrotechnique Option Commandes Des Systèmes Industriels Et Energies Renouvelables, Université de Batna 2, Le 06/12/2016.
- [16] « Cours sur les hacheurs - Cours TechPro ». <https://www.courstechpro.com/2019/03/cours-sur-les-hacheurs.html> (consulté le 15 juin 2022).
- [17] A. Says, « DC-to-DC Converters: Design, Working & Applications », *How To Electronics*, 10 juin 2021. <https://how2electronics.com/dc-to-dc-converters-design-working-applications/> (consulté le 15 juin 2022).
- [18] NETTARI Yakoub, « Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC », Mémoire de Magister en Électrotechnique Option Commande Électrique, Université FERHAT ABBAS - SETIF 1 UFAS (ALGERIE), Le 30/10/2014.
- [19] BELKAID ABDELHAKIM, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat en Sciences Option Électrotechnique, Université FERHAT ABBAS - SETIF 1 UFAS (ALGERIE), Le 19/10/2015.
- [20] ATCHOUM Safa, « Réalisation d'un convertisseur BUCK – MPPT », Mémoire de Master en Génie Electrique, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2016/2017.
- [21] CHEKKAF Ikram et BOUZIANE Mohammed Amine, « Etude et modélisation des hacheurs boost multi-niveaux dédiés aux systèmes photovoltaïques », Mémoire de Fin d'Etudes du Diplôme de l'ingénieur en Électrotechnique Option Energies et

Environnements, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUÉES TLEMCEN, Le 07/07/2019.

- [22] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Master Académique en Génie Electrique Option Réseaux Electriques, Université Echahid Hama Lakhder d'el-oued, 2015.
- [23] Cylia TIGRINE et Ouerdia Ait Ouali, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master en Automatique, Université de A. MIRA-BEJAIA, 2018/2019.
- [24] J. Mahdavi, A. Emadi, et H. A. Toliyat, « Application of state space averaging method to sliding mode control of PWM DC/DC converters », in *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, oct. 1997, vol. 2, p. 820-827 vol.2. doi: 10.1109/IAS.1997.628957.
- [25] KADA BELGHITRI Abdelheq, « ETUDE ET REALISATION D'UN CONVERTISSEUR DC-DC », Mémoire de Master en Electronique, Université de Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Juin 2018.
- [26] KHALEM Sofiane et GHERBI Azzedine, « Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continu-continu et continu-alternatifs », Mémoire de Master en Génie Electrique Option Machines électrique, Université de M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2015/2016.
- [27] M. H. Rashid, « *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications* ». Pearson, 2014.
- [28] « Onduleur », [http://michel.lebeau.pagesperso-orange.fr/html/Cours/COURS1\\_Onduleurs/COURS1\\_Onduleur\\_cours.htm#\\_Toc67829920](http://michel.lebeau.pagesperso-orange.fr/html/Cours/COURS1_Onduleurs/COURS1_Onduleur_cours.htm#_Toc67829920) (consulté le 14 juin 2022).
- [29] ABBASSEN Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option Machines Électriques, Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, Le 5/5/2011.
- [30] GHORZI Zoulikha et MIMOUNI Amina, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Master en Électrotechnique Option Energies et Environnements, ÉCOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUÉES TLEMCEN, Le 09/07/2019.
- [31] BENMIRA HASSAN, « IMPLANTATION DE LA COMMANDE VECTORIELLE SPATIALE DANS UN CIRCUIT DÉDIÉ », Exigence Partielle De La Maîtrise en Génie Électrique, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRE, Janvier 2003.

- [32] MOUSSOUNI Nasser Eddine et OUADFEL Sofiane, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé », Mémoire de Master en Électrotechnique, Option Commande des Systèmes Electriques, Université de Abderrahmane MIRA- BEJAIA, 2016/2017.
- [33] Kheireddine CHETTIH, « Réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant », Mémoire de Master en Électrotechnique, Université DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, Le 17/07/2015.
- [34] OUSSAMA DEGLA et TAREK SAYAH LEMBAREK, « Etude par simulation d'un onduleur », Mémoire de Master en Génie électrique, Option Électrotechnique Industrielle, Université de KASDI MERBAH OUARGLA, 2019/2020.
- [35] « Cours onduleur - électronique de puissance », *cours-gratuit.com*. <https://www.cours-gratuit.com/cours-electronique-de-puissance/cours-onduleur> (consulté le 14 juin 2022).
- [36] « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances », Rapport rédigé par Violaine Didier, Août 2007.
- [37] S. Jain et V. Agarwal, « A Single-Stage Grid Connected Inverter Topology for Solar PV Systems With Maximum Power Point Tracking », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, n° 5, p. 1928-1940, sept. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.904202.
- [38] R. A. Mastromauro, M. Liserre, et A. Dell'Aquila, « Control Issues in Single-Stage Photovoltaic Systems: MPPT, Current and Voltage Control », *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, n° 2, p. 241-254, mai 2012, doi: 10.1109/TII.2012.2186973.
- [39] E. Heydari et A. Y. Varjani, « Combined Modified P&O Algorithm with Improved Direct Power Control Method Applied to Single- Stage Three-Phase Grid-Connected PV System », p. 5, 2018.
- [40] F. Blaabjerg, Z. Chen, et S. B. Kjaer, « Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, n° 5, p. 1184-1194, sept. 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.833453.
- [41] F. Blaabjerg, A. Consoli, J. A. Ferreira, et J. D. van Wyk, « The future of electronic power processing and conversion », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, n° 1, p. 3-8, janv. 2005, doi: 10.1109/TIA.2004.841166.
- [42] M. Meinhardt, V. Leonavicius, J. Flannery, et S. C. Ó Mathúna, « Impact of power electronics packaging on the reliability of grid connected photovoltaic converters for outdoor applications », *Microelectronics Reliability*, vol. 39, n° 10, p. 1461-1472, oct. 1999, doi: 10.1016/S0026-2714(99)00080-3.

- [43] « Classification des commandes MPPT - Principe de la recherche du point de puissance maximale (MP) ». <https://123dok.net/article/classification-commandes-mppt-principe-recherche-puissance-maximale-mp.yngn5lkl> (consulté le 17 juin 2022).
- [44] CABAL Cédric, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Toulouse, Le 15 décembre 2008.
- [45] F. OUDIAI, K. LAGHA-MENOUER, A. HADJ ARAB et R. ZIRMI, « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance », 2nd International Seminar on Fossil, New and Renewable Energy, November 2019, Boumerdes, Algeria.
- [46] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », Université de Toulouse, Revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [47] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, et F. Blaabjerg, « Control of single-stage single-phase PV inverter », TEODORESCU Remus, Institute of Energy Technology Aalborg University, 2005.
- [48] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, et F. Blaabjerg, « Control of Single-Stage Single-Phase PV Inverter », *EPE Journal*, vol. 16, n° 3, p. 20-26, sept. 2006, doi: 10.1080/09398368.2006.11463624.
- [49] AISSAT Thanina et BOUSSALEM Chahira., « Dimensionnement d'un régulateur en utilisant la méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire. Application à la commande en vitesse de la machine à courant continu », Mémoire de Master en Automatique, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Juin 2009.
- [50] N. C. N. is the lead engineer at imperix H. is the author, co-author, et O. R. of N. Notes, « Proportional resonant controller », *imperix*, 23 mars 2021. <https://imperix.com/doc/implementation/proportional-resonant-controller> (consulté le 14 juin 2022).
- [51] Dr. Abdelkarim CHEMIDI, « Commande Des Machines », Polycopié du cours, Ecole Supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, 2020/2021.
- [52] J. Khazaei, Z. Miao, L. Piyasinghe, et L. Fan, « Real-time digital simulation-based modeling of a single-phase single-stage PV system », *Electric Power Systems Research*, vol. 123, p. 85-91, juin 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.01.023.
- [53] « BNEF révisé ses prévisions de la capacité photovoltaïque mondiale pour 2020 à la baisse en raison du coronavirus », *pv magazine France*. <https://www.pv->

magazine.fr/2020/03/16/bnef-revise-ses-previsions-de-la-capacite-photovoltaique-mondiale-pour-2020-a-la-baisse-en-raison-du-coronavirus/ (consulté le 14 juin 2022).

- [54] X. Yuan, W. Merk, H. Stemmler, et J. Allmeling, « Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, n° 2, p. 523-532, mars 2002, doi: 10.1109/28.993175.

## ANNEXE

### 1. L'algorithme P&O :

```
function Vref = RefGen(V, I)
Vrefmax = 493.5;
Vrefmin = 0;
Vrefinit = 415;
deltaVref = 1;
persistent Vold Pold Vrefold;
datatype = 'double';
if isempty(Vold)
    Vold = 0;
    Pold = 0;
    Vrefold = Vrefinit;
end
p = V*I;
dV = V - Vold;
dP = p - Pold;
if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        end
    else
        if dV < 0
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        end
    end
end
else Vref = Vrefold;
```

end

if Vref >= Vrefmax || Vref <= Vrefmin

Vref = Vrefold;

end

Vrefold = Vref;

Vold = V;

Pold = p ;

## 2. Table des paramètres

	<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Réseau</b>	Fréquence du réseau	50Hz
	Tension du réseau	325V
<b>Filtre LCL</b>	L1	4.06mH
	L2	4.35mH
	C	6.23 $\mu$ F
<b>Onduleur</b>	Fréquence de commutation	10 KHz
<b>GPV</b>	Nombre des Panneaux PV en série	11 panneaux
	La tension de circuit ouvert	493.5 V