



Université Abbes Laghrou Khenchela

جامعة عباس لغرور خنشلة

Faculté Sciences Et Technologies

Département de Génie électrique



Mémoire

De fin d'études Pour l'obtention du diplôme

De Master

Spécialité : Commande électrique

Intitulé du Thème:

**Étude et simulation d'un système photovoltaïque
connecté au réseau BT commandé par logique floue**

Réalisé par :

Wassim mahdi

Dirigé par :

Dr. BOUMAARAF

Dr. BOUALI Lazhar

Année universitaire : 2025-2026

Remerciement

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mes encadreurs, Monsieur Boumaaraf Abdelaali et Monsieur Bouali Lazhar, pour leur accompagnement, leurs précieux conseils, leur disponibilité ainsi que leurs orientations scientifiques tout au long de la réalisation de ce mémoire de master en génie électrique. Leur soutien et leurs remarques constructives ont été d'une grande aide dans l'aboutissement de ce travail

.

J'adresse également mes remerciements à tous les enseignants du département de génie électrique pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire et de consacrer leur temps à l'examiner.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance infinie à mes chers parents pour leurs sacrifices, leur patience, leurs encouragements et leur soutien moral et matériel tout au long de mes études. Je remercie également mes frères, ma famille ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin durant cette période.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Merci du fond du cœur.

DÉDICACE



Je dédie ce travail avec une immense fierté et une profonde gratitude à ma très chère mère Hadda,

toi qui as illuminé mon chemin par tes prières sincères, ton amour infini et ta patience sans limite.

Tu as toujours été ma force dans les moments difficiles et la raison de ma persévérance jusqu'à ce jour..

À mon cher père Abdellah,

symbole du courage, du sacrifice et de la dignité,

merci pour tous les efforts accomplis pour mon avenir, ainsi que pour ton soutien et tes précieux conseils tout au long de ce parcours.

Ta présence et ton aide resteront gravées dans mon cœur pour toujours.

À mon frère Sami,

pour son soutien constant et sa présence à mes côtés.

À mes chers amis Yassine, Anis, Alaâ, Ismail,

pour leur amitié sincère, leurs encouragements et tous les beaux souvenirs partagés ensemble.

À mes oncles,

pour leur confiance et leur soutien permanent.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont aidé à atteindre cette réussite.

Wassim



Résumé

Ce mémoire présente une étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique ainsi que des techniques de conversion et de commande utilisées pour améliorer leurs performances. Le travail aborde le fonctionnement des cellules photovoltaïques, l'influence des paramètres climatiques, ainsi que l'étude des convertisseurs DC-DC et des onduleurs à deux niveaux. Les techniques MPPT, PWM et PLL sont également étudiées afin d'assurer une conversion efficace de l'énergie et une injection stable dans le réseau électrique.

Mots-clés : Énergie photovoltaïque, convertisseurs statiques, onduleur, MPPT, PWM, PLL.

الملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة الكهربائية وتقنيات التحويل والتحكم المستخدمة لتحسين أدائها. والعواكس ثنائية DC-DC يشمل العمل دراسة مبدأ عمل الخلايا الشمسية، وتأثير العوامل المناخية، إضافة إلى دراسة محولات لضمان تحويل فعال للطاقة وحقق مستقر داخل الشبكة الكهربائية PLL و PWM و MPPT المستوى. كما تم التطرق إلى تقنيات الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، المحولات الساكنة، العاكس. MPPT، PWM، PLL.

Abstract

This thesis presents a study of grid-connected photovoltaic systems and the conversion and control techniques used to improve their performance. The work includes the operating principles of photovoltaic cells, the influence of climatic conditions, and the study of DC-DC converters and two-level inverters. MPPT, PWM, and PLL techniques are also investigated to ensure efficient energy conversion and stable grid injection.

Keywords: Photovoltaic energy, static converters, inverter, MPPT, PWM, PLL.

Sommaire

Contents

Résumé.....	4
Abréviations :	9
Nomenclature	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	14
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 01 :revue de la littérature	3
1.1. Introduction	4
1.2 Historique	4
1.3 Énergie solaire	5
1.3.1 Rayonnement solaire	5
1.3.2 Rayonnement direct	6
1.3.3 Rayonnement diffus	6
1.3.4 Rayonnement réfléchi	6
1.3.5 Rayonnement global.....	7
1.4 Position du soleil (angles : azimut, élévation, inclinaison)	7
3. Angle d’inclinaison (Inclinaison)	9
1.5 Principe de la conversion photovoltaïque	9
1.5.1 Structure de la cellule photovoltaïque	10
1.5.2 Mécanisme de la conversion photovoltaïque.....	10
1.5.3 Facteurs influençant l’efficacité et applications	11
1.6 Types de cellules photovoltaïques et leur rendement	12
1.6.1. Cellules solaires en silicium monocristallin (Mono-Si).....	12
1.6.2Cellules solaires en silicium polycristallin (Poly-Si).....	13
1.6.3. Cellules solaires à couche mince	14
1.6.4 Technologie PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)	14
1.6.5 Cellules solaires à jonctions multiples	15

1.6.6 Cellules solaires à pérovskite (Technologie émergente)	16
1.7 Phénomènes photovoltaïques	16
1.7.1 Caractéristiques électriques d'une cellule PV	17
1.8 Structure d'un système photovoltaïque	18
1.8.1 La cellule PV	18
1.8.2 Le module PV	19
1.8.3 La chaîne PV (PV string)	21
1.8.4 Le champ PV (PV array)	21
1.8.5 Le générateur PV	21
1.9. Influence des différents paramètres sur les systèmes photovoltaïques (PV)	22
1.9.1 Facteur limitant du rendement	23
Chapitre2 : Conversion et techniques de commande dans les systèmes photovoltaïques	26
2.1 Introduction	27
2.2 Définition des convertisseurs statiques	28
2.3 Importance des convertisseurs statiques dans les systèmes d'énergie renouvelable	28
2.3.1 Conversion et adaptation de la puissance dans les systèmes renouvelables	29
2.3.2 Intégration au réseau et synchronisation	29
2.3.3 Gestion du stockage d'énergie	29
2.3.4 Amélioration de l'efficacité et du contrôle	30
2.3.5 Protection et fiabilité	30
2.4 Types de convertisseurs statiques	31
2.4.1 Hacheurs (DC→DC) :	31
2.4.2 Onduleurs et Systèmes Photovoltaïques.....	44
2.5 PLL (PHASE LOCKED LOOP)	50
2.6 Conclusion.....	56
Chapitre03 : Modélisation du générateur photovoltaïque	57
3.1 Introduction	58

3.2 Historique	58
3.3 Premiers types de commande MPPT	59
3.4 Principe de la commande MPPT :	60
3.5 État de l'art des techniques MPPT dans les applications photovoltaïques	61
3.6 Classification des commandes MPPT	62
3.6.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée	62
3.6.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche	63
3.6.3 Hill Climbing	64
3.6.4 Algorithme Perturb & Observe (P&O)	67
3.6.5 Méthode Incremental Conductance (IC)	72
3.7. Application des techniques d'intelligence artificielle	75
3.7.1. Contrôle par logique floue (Fuzzy Logic Control, FLC)	75
3.7.2. Théorie des réseaux de neurones	81
3.8 Conclusion.....	88
Chapitre04 : Modélisation et simulation.....	90
4.1 Introduction	91
4.2 Structure du modèle simulé	91
4.3 Paramètres de simulation	94
4.4 Résultats et analyse	95
4.5 Discussion	100
4.6 Conclusion.....	102
Conclusion générale	103
Bibliography.....	Error! Bookmark not defined.

Abréviations :

PV : Photovoltaïque
GPV : Générateur Photovoltaïque
MPPT : Maximum Power Point Tracking
PWM : Pulse Width Modulation
PLL : Phase Locked Loop
DC : Direct Current (Courant Continu)
AC : Alternating Current (Courant Alternatif)
VSI : Voltage Source Inverter
CSI : Current Source Inverter
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
DSP : Digital Signal Processor
CCM : Continuous Conduction Mode
DCM : Discontinuous Conduction Mode
PPM : Point de Puissance Maximale
OCV : Open Circuit Voltage
ISC : Short Circuit Current
NOCT : Nominal Operating Cell Temperature
UPS : Uninterruptible Power Supply
LC : Inductance – Capacité
LCL : Filtre Inductance – Capacité – Inductance

Nomenclature

V : Tension électrique (V)	I : Courant électrique (A)
P : Puissance électrique (W)	R : Résistance électrique (Ω)
L : Inductance (H)	C : Capacité (F)
f : Fréquence (Hz)	T : Température ($^{\circ}\text{C}$)
G : Irradiation solaire (W/m^2)	V_{oc} : Tension en circuit ouvert
I_{sc} : Courant de court-circuit	V_{dc} : Tension continue
V_{ac} : Tension alternative	D : Rapport cyclique
η : Rendement	ω : Pulsation électrique

θ : Angle de phase	R_s : Résistance série
R_{sh} : Résistance parallèle (shunt)	I_0 : Courant de saturation de la diode
V_t : Tension thermique	q : Charge de l'électron
K_b : Constante de Boltzmann	E : Champ électrique
U_o : Tension de sortie	i_L : Courant dans l'inductance
u_o : Tension de sortie du convertisseur	M : Rapport de transfert de tension
ΔI_L : Ondulation du courant de l'inductance	ΔV_o : Ondulation de la tension de sortie

LISTE DU FIGURES

Figure 1 Composantes du rayonnement solaire au sol	7
Figure 2 position du soleil azimut	8
Figure 3 angle d'élévation (élévation)	9
Figure 4 angle d'inclinaison (inclinaison)	9
Figure 5 Principe de la conversion photovoltaïque(2)	10
Figure 6 Structure de la cellule photovoltaïque	10
Figure 7 Mécanisme de la conversion photovoltaïque	11
Figure 8 Facteurs influençant l'efficacité et applications	12
Figure 9 Cellules solaires en silicium monocristallin (Mono-Si)	13
Figure 10 Monocristalline Silicon (Mono-Si) Solar Cells	13
Figure 11 Cellules solaires en silicium polycristallin (Poly-Si)	13
Figure 12 Cellules solaires à couche mince	14
Figure 13 Cellule à émetteur et arrière passivé	15
Figure 14 Cellules solaires à jonctions multiples	15
Figure 15 Cellules solaires à pérovskite	16
Figure 16 Structure d'une cellule photovoltaïque	16
Figure 17 Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque	17
Figure 18 Module photovoltaïque	19
Figure 19 Connexion en série des cellules PV dans le module	20
Figure 20 Connexion en série des cellules PV dans le module	20
Figure 21 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	21
Figure 22 Composants d'un générateur photovoltaïque	22
Figure 23 Influence de l'irradiation sur la caractéristique $I = f(V)$	23

Figure 24	Variation de la puissance pour différentes valeurs d'irradiance	24
Figure 25	Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$	25
Figure 26	Variation de la puissance pour différentes valeurs de température	25
Figure 27	La structure de système.....	28
Figure 28	Diagramme du convertisseur Buck	32
Figure 29	Le circuit équivalent pendant l'état ON du transistor et l'état OFF de la diode	32
Figure 30	Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode	33
Figure 31	Le circuit équivalent lorsque le transistor et la diode sont à l'état bloqué.....	33
Figure 32	Les formes d'onde de la tension de sortie et du courant de l'inductance	34
Figure 33	Les formes d'onde de la tension et du courant de l'inductance en mode de conduction discontinu (DCM).....	36
Figure 34	Variation du rapport de transfert du circuit M en fonction du cycle de service D du signal PWM.....	37
Figure 35	Les formes d'onde du courant de l'inductance et de la tension de sortie.	37
Figure 36	Schéma du convertisseur Boost.....	38
Figure 37	Le circuit équivalent pendant l'état ON du OFF de la diode transistor et l'état	39
Figure 38	Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode	39
Figure 39	Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode	40
Figure 40	Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode.	41
Figure 41	Les formes d'onde de la tension et du courant dans l'inductance en mode de conduction discontinue (DCM).....	42
Figure 42	Variation du rapport de transfert du circuit M en fonction du rapport cyclique D du signal PWM.....	43
Figure 43	Les formes d'onde du courant dans l'inductance et de la tension de sortie.....	44
Figure 44	Onduleur à deux niveaux pour système photovoltaïque avec injection au réseau ...	46
Figure 45	Principe de fonctionnement. Onduleur à deux niveaux pour système photovoltaïque avec injection au réseau	47
Figure 46	Conversion DC-AC par l'onduleur	49
Figure 47	Filtrage de la tension de sortie.....	49
Figure 48	Schéma fonctionnel de base d'une PLL	50
Figure 49	Schéma fonctionnel d'une PLL triphasée	51
Figure 50	Repère synchrone de référence tournant.....	52
Figure 51	Système simplifié de la PLL	53
Figure 52	Synchronisation avec le réseau électrique	54

Figure 53 Injection de la puissance dans le réseau	55
Figure 54 Organigramme de la première méthode de commande MPPT	59
Figure 55 Chaîne de conversion de l'énergie solaire	60
Figure 56 Principe de la commande MPPT	61
Figure 57 Relation entre la puissance et le rapport cyclique [35]	64
Figure 58 Écart par rapport au point de puissance maximale (MPP) [36]	65
Figure 59 Organigramme de l'algorithme MPPT Hill Climbing conventionnel [35]	66
Figure 60 Caractéristiques du panneau solaire montrant le point de puissance maximale (MPP) et les points de fonctionnement A et B [69]	68
Figure 61 Organigramme de l'algorithme Perturb & Observe (P&O)	69
Figure 62 Courbe montrant un suivi incorrect du point de puissance maximale (MPP) par l'algorithme P&O sous une irradiation rapidement variable [39]	70
Figure 63 Variation rapide de la température dans le cas du MPPT avec l'algorithme P&O [43]	71
Figure 64 Position du point de fonctionnement selon le signe de la dérivée de la conductance G [80]	73
Figure 65 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incremental Conductance (IC) [47]	74
Figure 66 Fonctions d'appartenance des entrées Err , ΔErr et de la sortie ΔD	77
Figure 67 Règles floues pour les variables d'entrée et de sortie	78
Figure 68 Courbe du module photovoltaïque indiquant les différentes régions pour l'ensemble des règles floues	79
Figure 69 Structure du neurone à une seule entrée	82
Figure 70 La structure du neurone à R entrées	82
Figure 71 Les fonctions de transfert les plus utilisées	83
Figure 72 Réseau Feedforward	84
Figure 73 Feedforward network with shortcut connections	84
Figure 74 L'algorithme NN proposé	86
Figure 75: schéma global	91
Figure 76: pv array	92
Figure 77: boost convert	92
Figure 78: mppt	92
Figure 79: Onduleur triphasé	93
Figure 80: commande pll	93

Figure 81:Filtre LC.....	93
Figure 82:Fuzzy Logic Control.....	93
Figure 83:fuzzy logique designer	Error! Bookmark not defined.
Figure 84:tension entrer.....	95
Figure 85: pid et fuzzy.....	96
Figure 86: tension et courant avant le filtrage	97
Figure 87:tension et courant apres le filtrage	98
Figure 88:signal pwm	99
Figure 89: courant du boost	99
Figure 90: tension de bus	100

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Face à l'augmentation continue de la demande mondiale en énergie et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, le recours aux énergies renouvelables est devenu une nécessité incontournable pour assurer un développement durable et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place privilégiée grâce à son abondance, sa disponibilité et son faible impact environnemental.

Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique à travers des cellules photovoltaïques. Toutefois, la puissance produite par ces systèmes dépend fortement des conditions climatiques, notamment de l'irradiation solaire et de la température, ce qui entraîne des variations importantes de la tension, du courant et de la puissance délivrée. Afin d'exploiter efficacement l'énergie disponible, il est nécessaire d'utiliser des techniques de commande avancées permettant d'extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Dans ce contexte, les algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle essentiel pour garantir un fonctionnement optimal du système photovoltaïque quelles que soient les conditions atmosphériques. L'intégration d'un convertisseur DC-DC de type Boost permet d'adapter le niveau de tension fourni par le générateur photovoltaïque et d'assurer le fonctionnement du système au voisinage du point de puissance maximale.

Pour les applications raccordées au réseau électrique, l'énergie produite sous forme de courant continu doit être convertie en courant alternatif à l'aide d'un onduleur commandé par des techniques de modulation appropriées telles que la modulation de largeur d'impulsion (PWM). De plus, la synchronisation avec le réseau nécessite l'utilisation d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) afin d'assurer l'alignement en fréquence et en phase entre le système photovoltaïque et le réseau électrique. L'ajout d'un filtre de sortie permet également de réduire les harmoniques générées par l'onduleur et d'améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

L'objectif principal de ce travail est l'étude, la modélisation et la simulation sous MATLAB/Simulink d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique comportant un générateur photovoltaïque, une commande MPPT, un convertisseur Boost, un onduleur triphasé, une boucle PLL ainsi qu'un filtre de raccordement. Cette étude vise à analyser le comportement du système et à évaluer ses performances dans différentes conditions de fonctionnement.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, le principe de conversion photovoltaïque ainsi que les caractéristiques des générateurs photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre est consacré aux convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques, notamment les convertisseurs DC-DC, les onduleurs et les techniques de synchronisation par PLL.
- Le troisième chapitre décrit la modélisation et la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau sous MATLAB/Simulink, ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et présente les perspectives envisageables pour l'amélioration future du système étudié.

Chapitre 01 :revue de la littérature

1.1. Introduction

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, marquant le début d'une méthode révolutionnaire permettant de produire de l'électricité directement à partir de la lumière du soleil. Cet effet permet la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique sans recourir à aucun processus mécanique intermédiaire.

Malgré le fait que le soleil constitue une source d'énergie abondante et pratiquement inépuisable, il a fallu plusieurs décennies de recherches et de progrès technologiques avant que l'humanité puisse exploiter efficacement cette ressource pour des applications pratiques. Aujourd'hui, la technologie photovoltaïque (PV), notamment les cellules solaires, est devenue l'une des méthodes les plus importantes pour convertir le rayonnement solaire en énergie électrique exploitable [1].

Ce chapitre a pour objectif de présenter une vue d'ensemble des types de cellules solaires les plus couramment utilisés, en mettant en évidence leur structure, les matériaux utilisés ainsi que leurs mécanismes de fonctionnement. En outre, nous aborderons la modélisation d'une cellule photovoltaïque (cellule PV), en tenant compte des paramètres essentiels qui influencent ses performances, tels que la température ambiante et l'irradiation solaire. Ces conditions environnementales ont un impact significatif sur le rendement et la puissance électrique produite par les systèmes photovoltaïques.

Dans la dernière section, une description générale d'un système d'énergie photovoltaïque sera présentée, suivie d'une discussion sur les principaux avantages et défis liés à son utilisation dans des applications réelles.

1.2 Historique

- 1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le phénomène permettant de produire un courant électrique dans un matériau solide sous l'effet de la lumière solaire. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet photovoltaïque.

- 1875 : Werner von Siemens présente un mémoire à l'Berlin Academy of Sciences concernant l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Cependant, jusqu'à la World War II, ce phénomène est resté principalement une curiosité de laboratoire

- 1954 : Trois chercheurs américains — Daryl Chapin, Calvin Fuller Pearson et Gerald Pearson — développent une cellule photovoltaïque à haut rendement, à une époque où l'industrie spatiale naissante recherchait de nouvelles solutions pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule photovoltaïque atteignant un rendement d'environ 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont alors envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'University of Delaware.
- 1983 : La première voiture fonctionnant à l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie [2].

1.3 Énergie solaire

Le soleil constitue une source d'énergie pratiquement inépuisable qui envoie vers la surface de la Terre une quantité de rayonnement environ 8 400 fois supérieure à l'énergie consommée annuellement par l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue d'environ 1 kilowatt-crête par mètre carré (1 kW/m^2), répartie sur l'ensemble du spectre électromagnétique allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en seulement six heures plus d'énergie solaire que la consommation annuelle totale de l'humanité. L'énergie solaire peut être produite et exploitée de différentes manières :

•**Énergie solaire thermique** : Elle consiste à produire de la chaleur à l'aide de capteurs ou de panneaux sombres qui absorbent le rayonnement solaire. Cette chaleur peut également être utilisée pour produire de la vapeur d'eau, laquelle entraîne une turbine afin de générer de l'électricité.

•**Énergie solaire photovoltaïque** : Elle consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière grâce aux panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà largement exploitée dans de nombreux pays, notamment dans les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon [3].

1.3.1 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi des milliards d'autres dans l'univers. Son diamètre est d'environ 1 390 000 km, soit près de 50 fois celui de la Terre. Il est constitué d'environ 80 %

d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1 % d'un mélange d'autres éléments chimiques, représentant pratiquement l'ensemble des éléments connus.

Sur la base de la théorie de la relativité développée par Albert Einstein, les scientifiques Paul Langevin et Jean Perrin ont proposé l'idée que l'énergie du soleil provient des réactions de fusion nucléaire. Aujourd'hui, il est admis que le soleil fonctionne comme un immense réacteur thermonucléaire où l'hydrogène est transformé en hélium.

Chaque seconde, environ 564 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en 560 millions de tonnes d'hélium, libérant ainsi une énorme quantité d'énergie. Cette réaction se produit au cœur du soleil, dans son noyau, où les températures et les pressions sont extrêmement élevées. La température au cœur du soleil atteint environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, chaque seconde, le soleil perd près de 4 millions de tonnes de masse, converties en énergie et émises sous forme de rayonnement [4]. La lumière solaire se propage à une vitesse d'environ 300 000 km/s, et met approximativement 8 minutes pour atteindre la Terre. La distribution spectrale du rayonnement solaire dans l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0,5 μm .

La température du corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 K [5].

Quelques caractéristiques physiques importantes :

- Diamètre du soleil : $D_s = 1,39 \cdot 10^9 \text{ m}$
- Diamètre de la Terre : $D_t = 1,27 \cdot 10^7 \text{ m}$
- Distance moyenne Soleil–Terre : $L_{ts} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

Le soleil est l'étoile centrale du système solaire et constitue la principale source d'énergie pour la Terre. Sun

1.3.2 Rayonnement direct

Le rayonnement direct correspond au flux solaire reçu sous forme de rayons parallèles provenant directement du disque solaire, sans avoir été dispersés par l'atmosphère terrestre [6]

1.3.3 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus représente la partie du rayonnement solaire qui a subi plusieurs réflexions et dispersions dans l'atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre [6].

1.3.4 Rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi correspond à la portion du rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface du sol. Cette réflexion dépend directement de la nature de la surface (nuages, sable, eau, neige, etc.).

Elle est caractérisée par un coefficient appelé albédo (ϵ), qui varie entre : $0 < \epsilon < 1$

Plus la surface est claire, plus la valeur de l'albédo est élevée [6].

1.3.5 Rayonnement global

Le rayonnement global reçu par une surface est la somme des trois composantes du rayonnement solaire :

- le rayonnement direct,
- le rayonnement diffus,
- le rayonnement réfléchi.

Ainsi, le rayonnement global représente la superposition de ces trois contributions énergétiques reçues par une surface donnée [5].

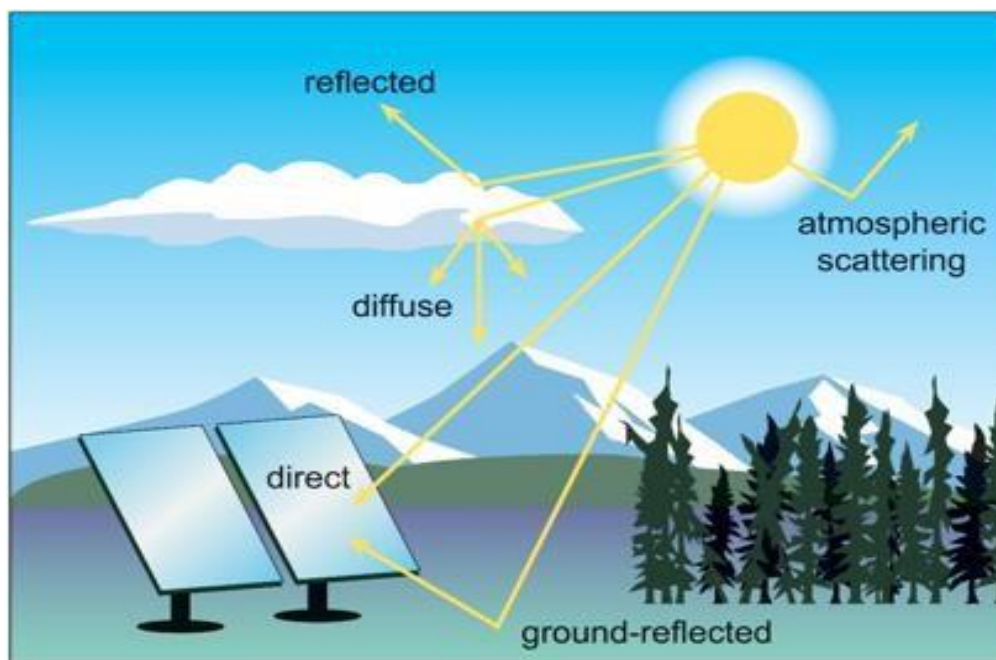


Figure 1 Composantes du rayonnement solaire au sol

1.4 Position du soleil (angles : azimut, élévation, inclinaison)

La position du soleil dans le ciel est un paramètre fondamental dans le domaine de l'énergie solaire, car elle influence directement la quantité de rayonnement solaire reçue par une surface terrestre à un instant donné. Comprendre et déterminer avec précision la position du

Le soleil est essentiel pour le dimensionnement et l'optimisation des systèmes photovoltaïques, solaires thermiques, ainsi que pour l'architecture bioclimatique et la planification énergétique. La position solaire peut être caractérisée par plusieurs angles géométriques clés :

1. Angle d'azimut (Azimut)

L'azimut solaire est l'angle horizontal qui indique la direction du soleil par rapport au nord géographique. Il est mesuré sur le plan horizontal, généralement à partir du nord vers l'est, et varie entre 0° et 360° . Cet angle permet de connaître la direction dans laquelle se trouve le soleil au cours de la journée. Dans les systèmes photovoltaïques, l'orientation correcte des panneaux solaires dépend fortement de cet angle afin de capter le maximum de rayonnement solaire.

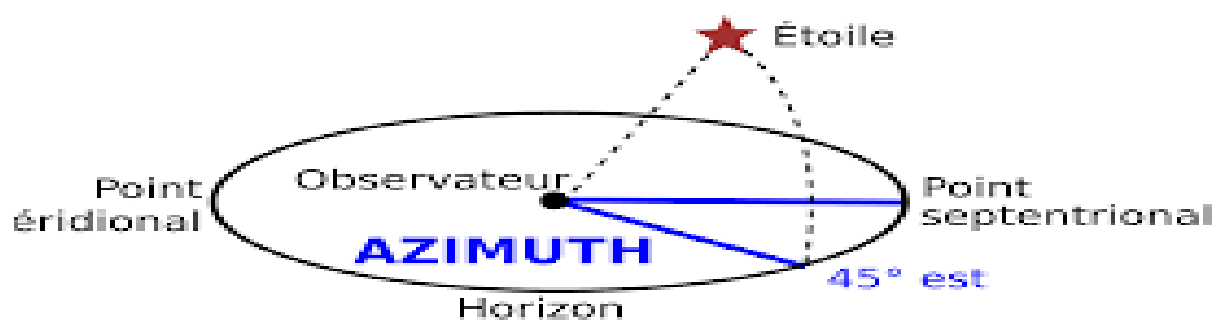


Figure 2 position du soleil azimut

2. Angle d'élévation (Élévation)

L'angle d'élévation solaire est l'angle formé entre les rayons du soleil et le plan horizontal de la Terre. Lorsque le soleil se trouve près de l'horizon, cet angle est faible. En revanche, lorsque le soleil est au zénith (presque au-dessus de la tête), l'angle d'élévation est élevé. Cet angle influence directement l'intensité du rayonnement solaire reçu par les panneaux photovoltaïques.

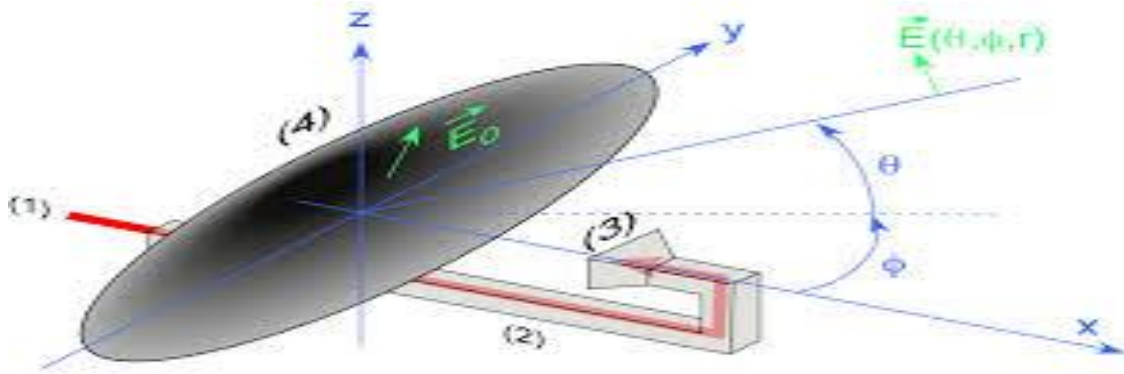


Figure 3angle d'élévation (élévation)

3. Angle d'inclinaison (Inclinaison)

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle entre la surface du panneau solaire et le plan horizontal. Cet angle est choisi de manière à optimiser la réception du rayonnement solaire tout au long de l'année. En général, l'inclinaison optimale dépend de la latitude du lieu d'installation. Un bon choix de cet angle permet d'améliorer significativement la production d'énergie du système photovoltaïque.

En résumé, la compréhension des angles d'azimut, d'élévation et d'inclinaison est essentielle pour analyser la trajectoire du soleil et optimiser l'orientation des panneaux solaires afin d'obtenir le meilleur rendement énergétique possible.

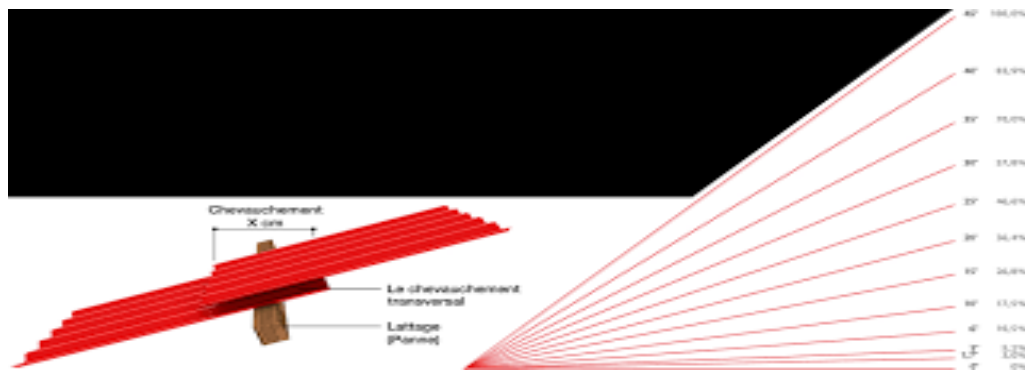


Figure 4angle d'inclinaison (inclinaison)

1.5 Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est le processus qui permet de transformer directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique grâce à des cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium. Ce phénomène repose sur l'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel. Lorsque la lumière solaire frappe la surface d'une cellule photovoltaïque, l'énergie des photons est

absorbée par le matériau semi-conducteur, ce qui entraîne la libération d'électrons et la production d'un courant électrique.

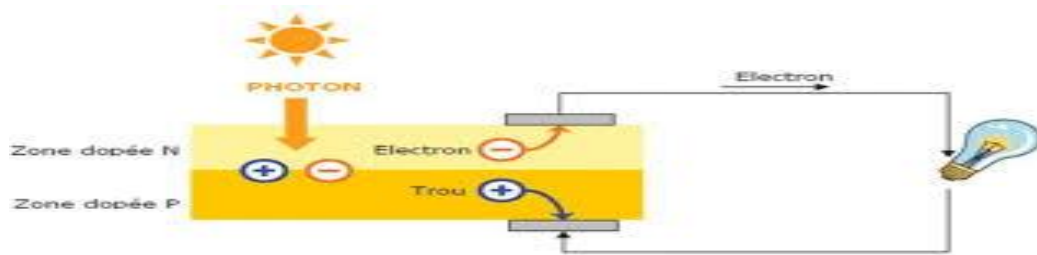


Figure 5Principe de la conversion photovoltaïque(2)

1.5.1 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est généralement constituée d'une jonction p-n, formée par l'assemblage de deux couches de silicium dopées différemment. La première couche est dopée de type n, généralement avec du phosphore, ce qui lui confère un excès d'électrons libres. La seconde couche est dopée de type p, souvent avec du bore, ce qui crée un déficit d'électrons appelé « trous ».

Lorsque ces deux couches sont mises en contact, les électrons diffusent naturellement de la région n vers la région p. Ce phénomène entraîne la formation d'une zone de déplétion à la jonction, caractérisée par la présence d'un champ électrique interne. Ce champ électrique joue un rôle essentiel dans la séparation des charges électriques générées par la lumière. Des contacts métalliques sont également ajoutés à la surface de la cellule afin de collecter les charges et de permettre la circulation du courant électrique dans un circuit externe.

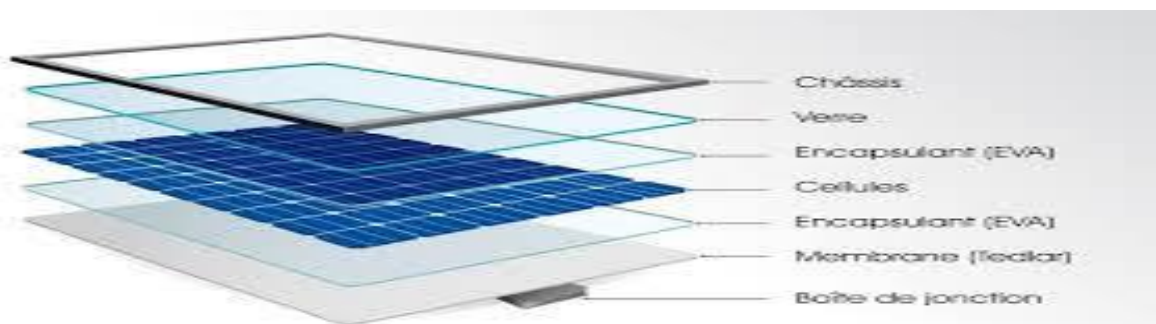


Figure 6Structure de la cellule photovoltaïque

1.5.2 Mécanisme de la conversion photovoltaïque

Le mécanisme de conversion commence lorsque des photons issus du rayonnement solaire atteignent la cellule photovoltaïque. Si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de la

bande interdite (E_g) du silicium, qui est d'environ 1,1 eV, un électron peut être excité de la bande de valence vers la bande de conduction. Cette transition crée une paire électron-trou. Sous l'effet du champ électrique présent dans la jonction p-n, les électrons sont dirigés vers la couche de type n, tandis que les trous se déplacent vers la couche de type p. Lorsque la cellule est connectée à un circuit externe, ce mouvement de charges génère un courant électrique continu (DC). Ce courant peut ensuite être utilisé directement ou converti en courant alternatif (AC) grâce à un onduleur afin d'alimenter des appareils électriques ou être injecté dans le réseau électrique.

Le dopage des matériaux semi-conducteurs joue un rôle important dans ce processus. Par exemple, l'ajout de phosphore dans le silicium (type n) introduit des électrons supplémentaires qui augmentent la conductivité, tandis que l'ajout de bore (type p) crée des trous mobiles qui facilitent également le transport des charges électriques.

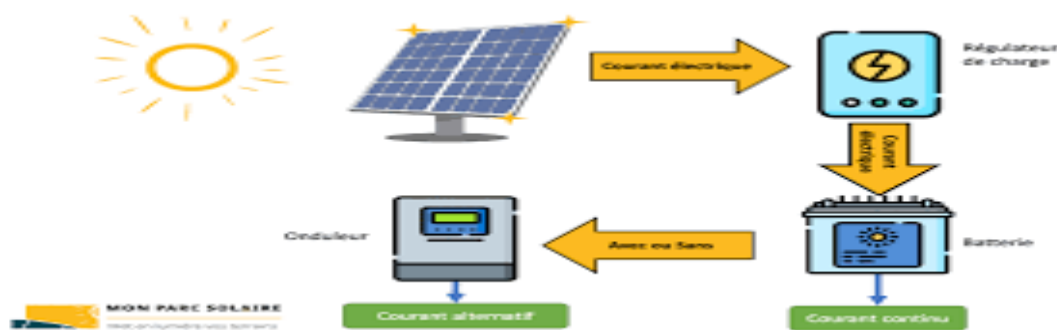


Figure 7 Mécanisme de la conversion photovoltaïque

1.5.3 Facteurs influençant l'efficacité et applications

L'efficacité de la conversion photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité du matériau à absorber le rayonnement solaire, la qualité de la jonction p-n, ainsi que les propriétés optiques et électriques de la cellule. L'utilisation de couches antireflet permet par exemple de réduire les pertes par réflexion et d'améliorer l'absorption de la lumière.

Les cellules photovoltaïques sont généralement assemblées en modules ou panneaux solaires afin d'augmenter la puissance produite. Ces panneaux sont protégés par du verre trempé et des matériaux d'encapsulation pour assurer leur durabilité face aux conditions climatiques.

L'électricité produite par les panneaux est ensuite convertie en courant alternatif à l'aide d'un onduleur, ce qui permet son utilisation dans les installations domestiques, industrielles ou son injection dans le réseau électrique.

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque constitue l'une des principales sources d'énergie renouvelable dans le monde. Les recherches actuelles portent sur l'amélioration du rendement

des cellules grâce à de nouvelles technologies, telles que les cellules multi-jonctions et les cellules à base de pérovskites, qui offrent des perspectives prometteuses pour l'avenir de la production d'électricité solaire.

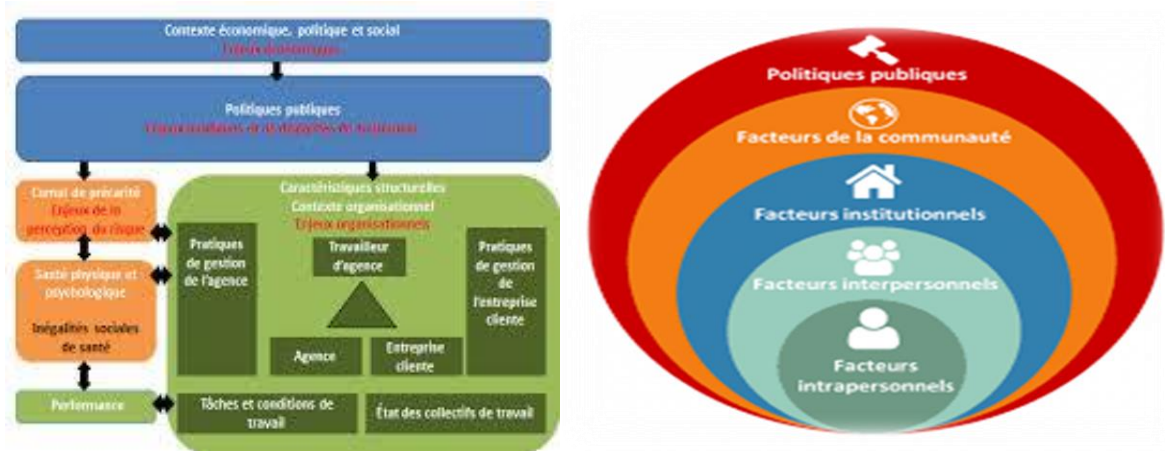


Figure 8 Facteurs influençant l'efficacité et applications

1.6 Types de cellules photovoltaïques et leur rendement

Les cellules photovoltaïques (PV) sont classées en fonction des matériaux utilisés et des technologies appliquées lors de leur fabrication. Ces types diffèrent considérablement en termes de rendement de conversion énergétique, coût, durée de vie et champ d'application. Ce qui suit présente un aperçu des technologies PV les plus couramment utilisées ainsi que leurs caractéristiques de performance typiques.

1.6.1. Cellules solaires en silicium monocristallin (Mono-Si)

Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'une structure cristalline unique et continue de silicium haute pureté. Elles se reconnaissent facilement à leur apparence noire uniforme et à leur haut rendement énergétique. Ces cellules atteignent généralement un rendement de conversion compris entre 18 % et 23 % dans des conditions de test standard [16].

- **Avantages** : Rendement élevé, longue durée de vie opérationnelle (20 à 30 ans) et performance supérieure dans des conditions de faible luminosité.
- **Inconvénients** : Coût de production plus élevé en raison du processus de fabrication complexe et du gaspillage de matériau.

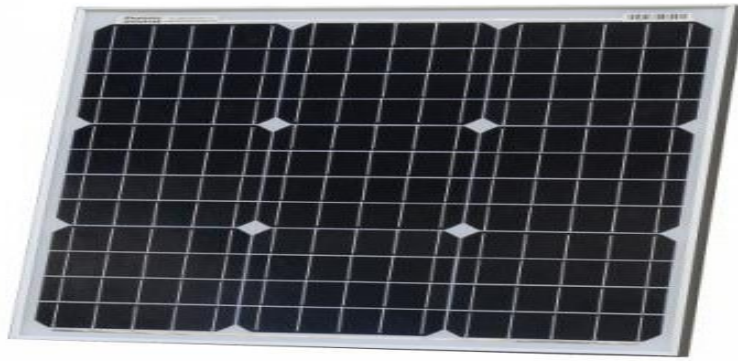


Figure 9Cellules solaires en silicium monocristallin (Mono-Si)

Figure 10Monocrystalline Silicon (Mono-Si) Solar Cells

1.6.2Cellules solaires en silicium polycristallin (Poly-Si)

Les cellules polycristallines sont produites en fondant le silicium brut puis en le versant dans des moules, ce qui donne une structure cristalline composée de plusieurs grains. Leur rendement se situe généralement entre 15 % et 18 % [17].

- Avantages : Coûts de fabrication plus faibles et production moins énergivore par rapport aux cellules monocristallines.
- Inconvénients : Rendement légèrement inférieur et espace requis plus important pour une puissance équivalente.

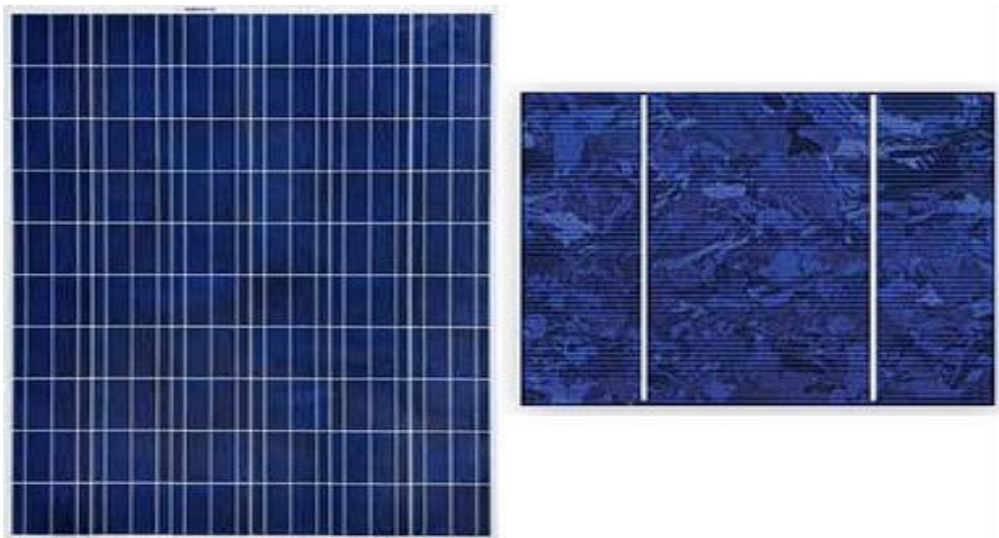


Figure 11Cellules solaires en silicium polycristallin (Poly-Si)

1.6.3. Cellules solaires à couche mince

Les technologies à couche mince utilisent divers matériaux déposés en couches très fines sur des substrats tels que le verre, le plastique ou le métal. Les types les plus courants incluent le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) et le cuivre-indium-gallium-séléniure (CIGS). Leurs rendements varient :

- a-Si : ~6 %–10 %
- CdTe : ~10 %–12 %
- CIGS : ~13 %–16 % [26]
- Avantages : Légèreté, flexibilité et faible coût pour une production à grande échelle.
- Inconvénients : Rendements plus faibles, durée de vie plus courte et préoccupations environnementales dues à la présence de matériaux toxiques dans certaines variantes.



Figure 12 Cellules solaires à couche mince

1.6.4 Technologie PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)

La technologie PERC est une version avancée des cellules en silicium standard, comportant une couche de passivation à l'arrière de la cellule afin de réduire les pertes par recombinaison et d'améliorer le rendement. Ces cellules atteignent généralement un rendement compris entre 19 % et 23 % [19].

- **Avantages** : Meilleure performance dans des conditions de haute température et de faible irradiation.
- **Inconvénients** : Coût légèrement supérieur à celui des cellules en silicium conventionnelles.

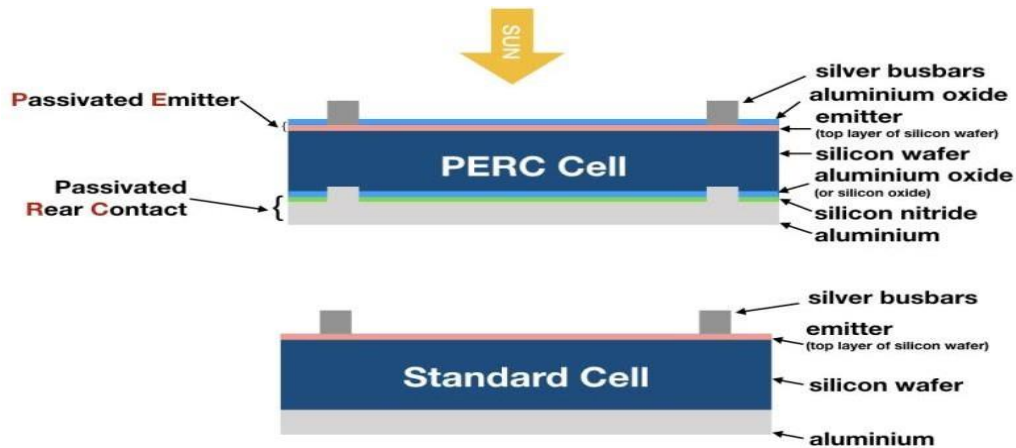


Figure 13 Cellule à émetteur et arrière passivé

1.6.5 Cellules solaires à jonctions multiples

Les cellules à jonctions multiples (MJ) sont constituées de plusieurs couches de semi-conducteurs, chacune conçue pour capturer une plage spécifique du spectre solaire. Elles sont principalement utilisées dans l'aérospatiale et les systèmes photovoltaïques concentrés (CPV) en raison de leur coût élevé.

- Rendement : Les rendements en laboratoire dépassent 40 %, tandis que les systèmes CPV commerciaux atteignent 30 %–35 % [20].
- Avantages : Rendement extrêmement élevé.
- Inconvénients : Coût élevé et processus de fabrication complexe.

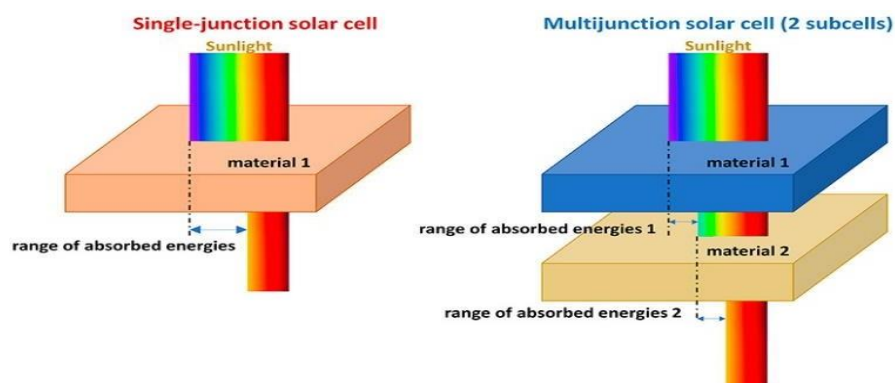


Figure 14 Cellules solaires à jonctions multiples

1.6.6 Cellules solaires à pérovskite (Technologie émergente)

Les cellules photovoltaïques à base de pérovskite représentent une technologie prometteuse en raison de leur haut rendement théorique et de leur fabrication à faible coût. Les prototypes en laboratoire ont déjà atteint des rendements supérieurs à 25 % [21].

- Avantages : Potentiel de rendement élevé et coût de fabrication peu élevé.
- Inconvénients : Problèmes de stabilité et de dégradation, limitant actuellement leur déploiement commercial.

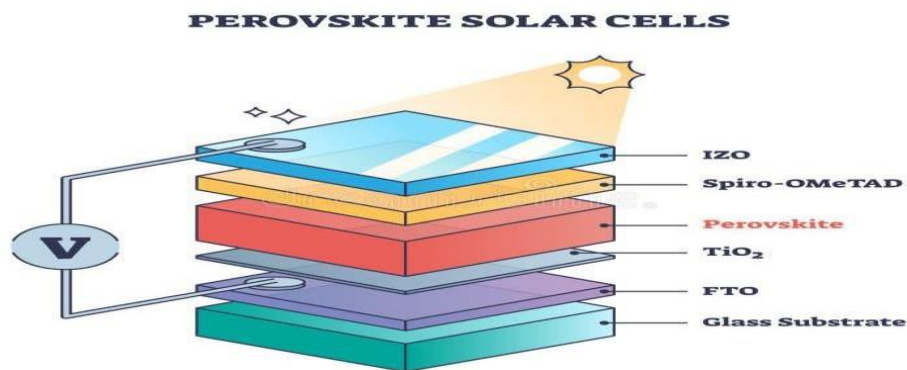


Figure 15 Cellules solaires à pérovskite

1.7 Phénomènes photovoltaïques

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure 1.7 ci-dessous.

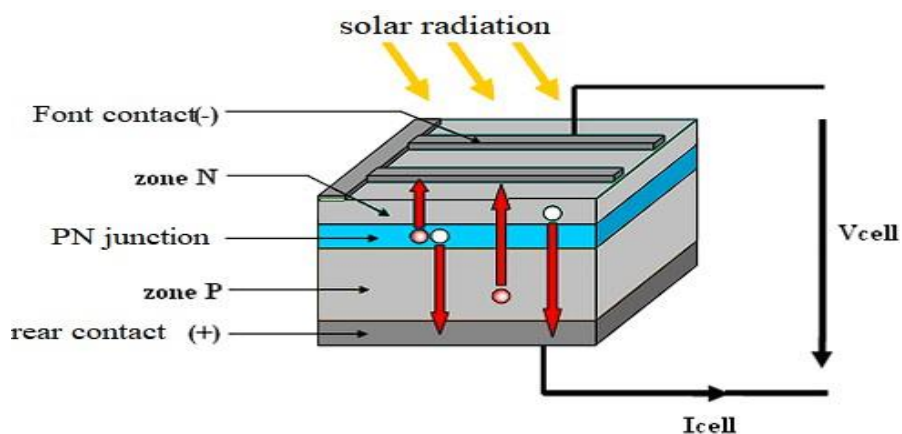


Figure 16 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque (PV) est fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur (par exemple, le silicium). Sa construction est comparable à celle d'une diode conventionnelle. La cellule est composée de deux couches différentes. La couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P, formant ainsi une jonction PN. Lorsqu'une jonction PN est éclairée, les grains de lumière (les photons) frappent la surface de ce matériau et transfèrent leur énergie aux atomes du semi-conducteur.

Cette absorption d'énergie libère des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons libres. Cela génère une différence de potentiel entre les deux couches, qui peut être mesurée entre les bornes positive et négative de la cellule. Cette différence de potentiel crée un champ électrique (E) qui entraîne les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N. Le résultat est un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule photovoltaïque. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V à courant nul. Cette tension est appelée tension en circuit ouvert (OCV). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, appelé courant de court-circuit (ICC), et dépend fortement du niveau d'illumination [7].

Le courant et la tension fournis par une cellule PV dépendent de plusieurs paramètres, qui seront expliqués ci-dessous.

1.7.1 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque fonctionne normalement comme générateur, mais lorsqu'elle est interconnectée avec d'autres cellules, elle peut également fonctionner en mode récepteur, en absorbant l'énergie fournie par les autres cellules.

Le comportement d'une cellule dans les différents régimes est illustré à la figure 1.8

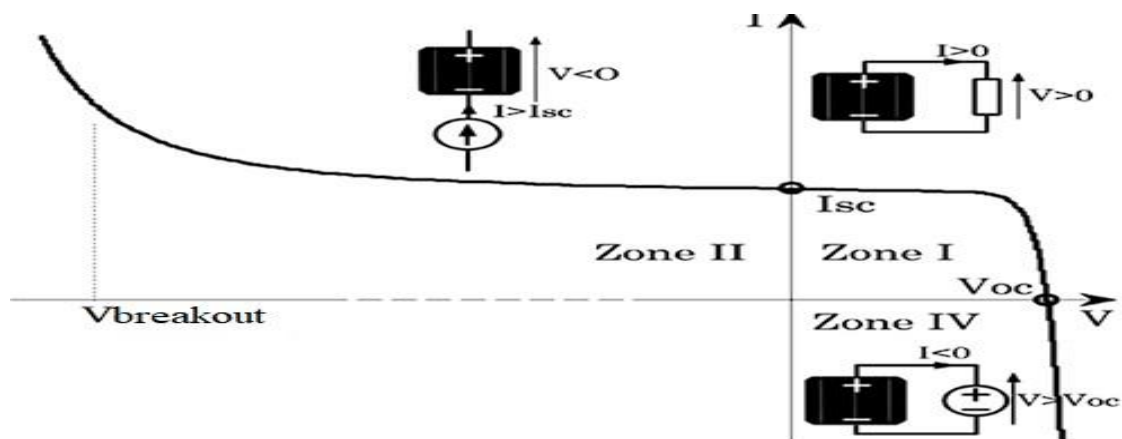


Figure 17 Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque

(ISC) : Courant de court-circuit – il correspond au courant lorsque la cellule est court-circuitée. Ce courant de court-circuit est proportionnel à la surface de la cellule exposée à la lumière.

(VCO) : Tension en circuit ouvert – c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'aucun courant ne circule. Sa valeur est d'environ 0,6 V pour une cellule cristalline.

- Zone I dans la figure 1.8 correspond au fonctionnement en mode générateur de la cellule. C'est le fonctionnement normal de la cellule, où elle fournit la puissance produite à la charge.
- Zone II correspond au fonctionnement de la cellule en mode récepteur. Lorsque le courant traversant la cellule est forcé par un circuit externe à dépasser son courant de court-circuit, la cellule génère une tension négative à ses bornes. L'augmentation du courant peut endommager la cellule si la tension aux bornes atteint une limite : la tension de claquage ($V_{breakdown}$).
- Zone IV correspond également au mode récepteur de la cellule. Lorsque la tension aux bornes de la cellule dépasse sa tension en circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une certaine limite, la cellule sera irrémédiablement endommagée

1.8 Structure d'un système photovoltaïque

1.8.1 La cellule PV

La cellule photovoltaïque (PV) est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs [9].

Lorsqu'elle est éclairée, le déséquilibre de charges électriques entre les deux couches (P et N) provoque le déplacement des charges à travers la jonction, produisant ainsi de l'électricité.

La tension générée par une cellule photovoltaïque est limitée par la valeur de la bande interdite du matériau dont elle est constituée. Elle est de l'ordre de 0,6 V pour les cellules cristallines et amorphes [10]. En général, cette tension peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, selon le matériau, la température de la cellule et son vieillissement [11].

Le courant dépend de la surface de la cellule et, pour une même surface, de l'efficacité de la cellule. Le rendement des cellules monocristallines est compris entre 15 % et 22 %, tandis que celui des cellules multicristallines est de l'ordre de 10 % à 15 % [8].

1.8.2 Le module PV

Un module PV est le plus petit assemblage de cellules solaires individuelles connectées électriquement entre elles. Les cellules PV sont fragiles et sensibles, c'est pourquoi elles sont assemblées en modules et dotées d'une protection mécanique (encapsulation), afin d'être protégées contre l'environnement extérieur et pour garantir la sécurité de l'utilisateur, non seulement contre les chocs électriques, mais aussi contre tout dysfonctionnement pouvant être destructeur [12, 8].

L'assemblage mentionné ci-dessus se compose d'un certain nombre de cellules solaires installées en série et en parallèle dans un cadre, comme illustré à la figure 1.9.

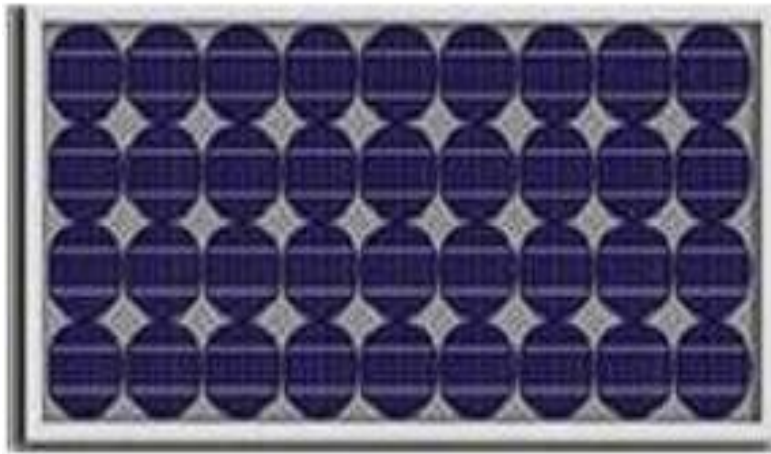


Figure 18Module photovoltaïque

Étant donné que la tension et le courant, et par conséquent la puissance, d'une seule cellule ne sont pas suffisants pour les applications courantes, il est donc nécessaire de les assembler afin de répondre aux besoins.

Les cellules sont généralement connectées en série dans les modules standards disponibles sur le marché. Un module PV « classique » contient 36 ou 72 cellules. Cependant, le nombre de cellules peut varier.

Selon les modules utilisés pour des applications spécifiques, il est donc possible d'avoir des modules avec 40, 54, 60 ou même 92 cellules connectées en série [8].

La question qui se pose à ce stade est : pourquoi les cellules sont-elles généralement connectées en série ?

Il existe encore des raisons historiques à cela. À l'origine, l'énergie solaire était réservée aux applications sur des sites isolés. La tension de fonctionnement de ces installations était donc dictée par la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie. Ces systèmes utilisaient principalement des batteries au plomb avec des tensions de 12 V, 24 V ou 48 V.

C'est pourquoi presque tous les modules utilisés aujourd'hui ont encore une tension de sortie de 12 ou 24 V. Comme les modules sont conçus pour fonctionner sur ces systèmes, ils ne sont en fait rien d'autre qu'une connexion en série de cellules pour obtenir la tension souhaitée : 36 cellules pour 12 V ($b=2$) et 72 cellules pour 24 V ($b=4$).

Aujourd'hui, très peu d'études remettent en question ce design historique, qui n'est pas optimisé pour les applications raccordées au réseau.

Lors de la conception d'un module photovoltaïque, il est essentiel de garantir que ses composants ne risquent pas d'être endommagés lors du fonctionnement dans les quadrants 2 et 4. Dans ces zones, les cellules PV fonctionnent en mode récepteur, et il existe un risque de destruction. Pour se protéger, deux types de protections sont utilisés dans les installations photovoltaïques : la diode de dérivation (bypass diode) et le dispositif de sécurité contre le courant inverse.

Les figures 1.10 et 1.11 montrent respectivement :

- un module contenant 36 cellules interconnectées en série [8]
- un module avec x cellules en série et :
- (a) des blocs en parallèle
- (b) des blocs en

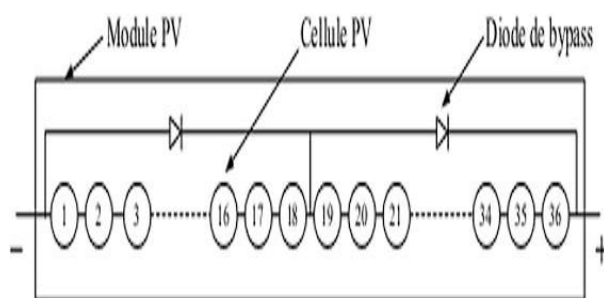


Figure 19 Connexion en série des cellules PV dans le module

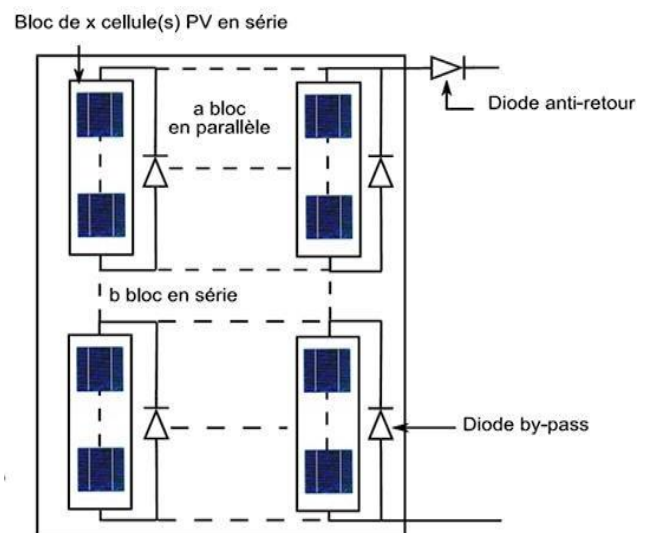


Figure 20 Connexion en série des cellules PV dans le module

Les cellules dans un module sont regroupées en plusieurs groupes. Chaque groupe est ensuite connecté en antiparallèle avec une diode, appelée diode de dérivation ou bypass diode. (Il y a généralement 18 cellules par diode de dérivation). Cette diode est utilisée pour protéger les cellules contre un fonctionnement en inverse [8]. Le rôle de cette diode sera expliqué ci-dessous.

1.8.3 La chaîne PV (PV string)

Une chaîne photovoltaïque est un ensemble de modules connectés en série afin de générer la tension de sortie spécifiée [8].

1.8.4 Le champ PV (PV array)

Un champ photovoltaïque est le regroupement de modules en série et en parallèle afin d'obtenir une puissance suffisante pour les applications désirées.

1.8.5 Le générateur PV

Le générateur photovoltaïque est l'unité qui produit de l'énergie électrique sous forme de courant continu.

Le composant de base de cette unité, qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique, est la cellule photovoltaïque.

La combinaison de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne naissance à un générateur photovoltaïque (GPV), qui possède une caractéristique courant-tension (I_V) non linéaire avec un point de puissance maximale (PPM). Voir Fig. 1.12.

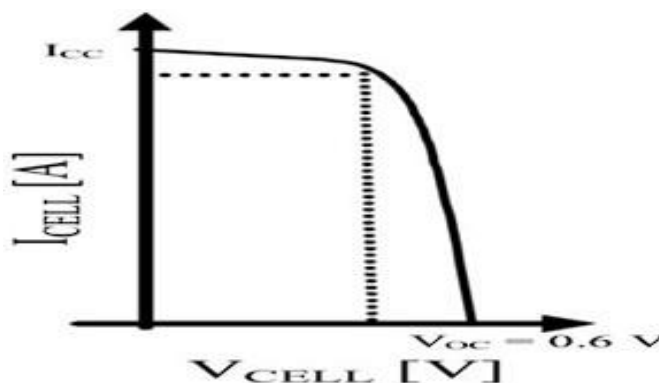


Figure 21 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Si les cellules sont connectées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, ce qui augmente la tension totale du générateur et donc la puissance. En revanche, si les cellules sont connectées en parallèle, l'intensité du courant augmente [7, 8].

Étant donné que la tension fournie par une cellule PV est très faible, le générateur photovoltaïque est constitué d'un certain nombre de modules, assemblés en série ou en parallèle pour obtenir la tension et la puissance souhaitées.

En parallèle, selon la puissance requise. Chaque module est lui-même composé de cellules photovoltaïques généralement assemblées en série.

Ces cellules sont encapsulées dans la même structure pour former un module. Cette encapsulation remplit deux fonctions principales [9] :

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière, etc.).
- Contrôle de la température des cellules afin d'assurer une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie du module exposée au soleil, pour évacuer l'énergie incidente non transformée en énergie électrique

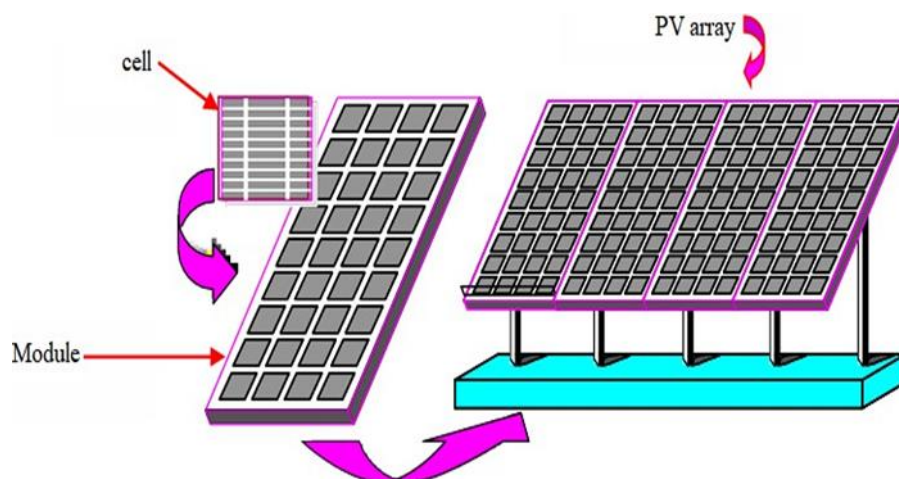


Figure 22 Composants d'un générateur photovoltaïque

Nous présenterons le comportement des cellules PV lors de ces différentes connexions.

1.9. Influence des différents paramètres sur les systèmes photovoltaïques (PV)

Dans la littérature, le modèle de Bishop est généralement considéré comme le modèle le plus approprié pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque, aussi bien en fonctionnement normal qu'en régime inverse.

Ce modèle peut être exprimé par l'équation suivante, où I et V représentent respectivement le courant et la tension d'une cellule photovoltaïque [8].

Il s'agit d'une équation comportant deux inconnues (I et V) et huit paramètres. Ces paramètres sont les suivants :

• I_{ph} : courant équivalent proportionnel à la quantité de rayonnement solaire reçue par la cellule.

- I_0 : courant de saturation inverse de la diode.
- $V_t = a \cdot k_b \cdot T_c / q$: tension thermique de la diode, dépendant de la température de la cellule T_c .

Où :

- a : facteur d'idéalité de la diode (compris entre 1 et 2).
- K_b : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/°K).
- q : charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

Autres paramètres du modèle :

- R_s : résistance série de la cellule.
- R_{sh} : résistance shunt (parallèle) de la cellule.
- k : coefficient d'ajustement de Bishop (variant généralement entre 3.4 et 4)
- n : coefficient d'ajustement de Bishop (environ 0,1).
- V_b : tension de claquage de la cellule (comprise entre -10 V et -30 V).

L'étude de l'influence des différents paramètres sur la caractéristique du modèle est très importante afin de pouvoir identifier et classer le type de défaut responsable de la variation de ces paramètres [8].

1.9.1 Facteur limitant du rendement

1.9.1.1 Influence de l'irradiance

L'augmentation de l'irradiance se traduit par un déplacement de la caractéristique $I = f(V)$ le long de l'axe du courant, pour une température $T = 25^\circ \text{C}$.

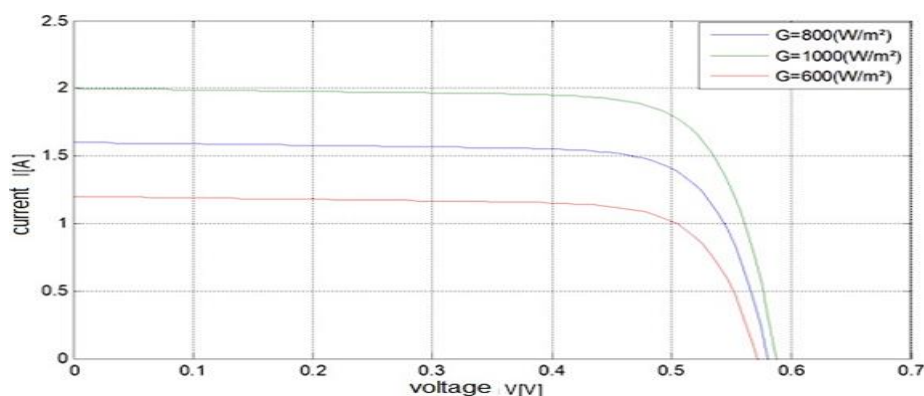


Figure 23 Influence de l'irradiation sur la caractéristique $I = f(V)$

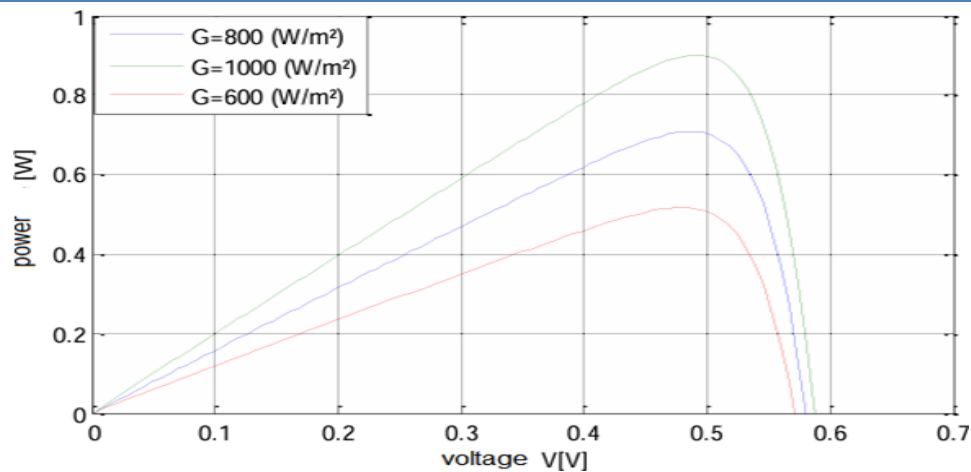


Figure 24 Variation de la puissance pour différentes valeurs d'irradiance

Interprétation

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité de l'irradiance.

En revanche, la tension en circuit ouvert n'est pas fonction de l'irradiance ; elle reste pratiquement identique même pour de faibles niveaux d'irradiance.

1.9.1.2 Influence de la température

La température est un paramètre important, car les cellules photovoltaïques sont exposées au rayonnement solaire, ce qui peut entraîner leur échauffement. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, mais dissipée sous forme de chaleur.

C'est pourquoi la température d'une cellule photovoltaïque est toujours supérieure à la température ambiante.

Pour estimer la température de la cellule T à partir de la température ambiante T_a on peut utiliser la formule de correction suivante [12].

- NOCT : température nominale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (Nominal Operating Cell Temperature), exprimée en °C.

Elle correspond à la température atteinte par les cellules lorsque :

- $G = 800 \text{ W/m}^2$
- $T_a = 20^\circ \text{ C}$
- la vitesse du vent est 1 m/s
- la masse d'air est 1.5

Dans ces conditions, NOCT prend généralement une valeur d'environ 48° C.

L'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ est illustrée dans la Figure I.15, pour une irradiance fixe $S = 1000 \text{ W/m}^2$.

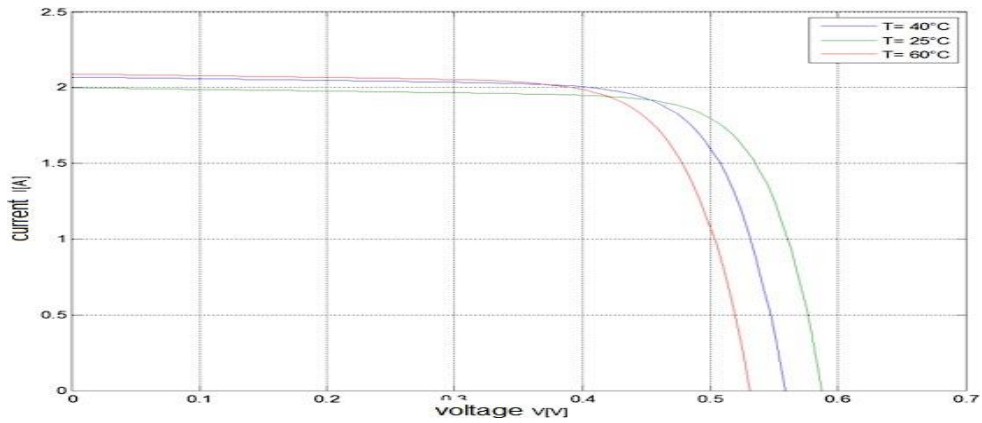


Figure 25 Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$

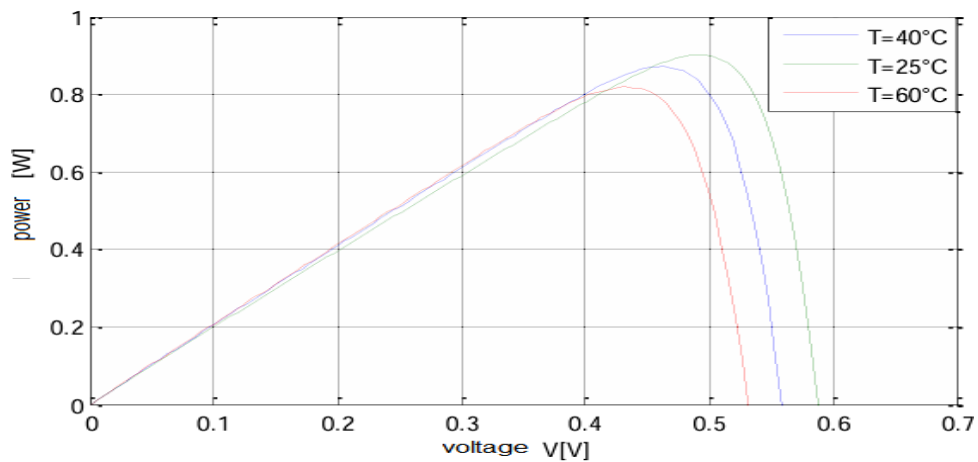


Figure 26 Variation de la puissance pour différentes valeurs de température

Chapitre2 : Conversion et techniques de commande dans les systèmes photovoltaïques

2.1 Introduction

Dans les systèmes photovoltaïques modernes, la conversion efficace de l'énergie électrique constitue une étape essentielle pour garantir une exploitation optimale de l'énergie solaire. En effet, les panneaux photovoltaïques produisent naturellement une énergie sous forme de courant continu (DC), alors que la majorité des applications industrielles et domestiques, ainsi que le réseau électrique, fonctionnent en courant alternatif (AC). Ainsi, l'utilisation de convertisseurs statiques devient indispensable pour assurer l'adaptation et la gestion de l'énergie produite.

Les convertisseurs statiques, également appelés convertisseurs d'électronique de puissance, permettent la transformation de l'énergie électrique d'une forme à une autre sans recourir à des éléments mécaniques en mouvement. Grâce aux avancées technologiques dans le domaine des semi-conducteurs de puissance tels que les IGBT, MOSFET et thyristors, ces convertisseurs offrent aujourd'hui des performances élevées en termes de rendement, de fiabilité et de rapidité de réponse dynamique.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, les convertisseurs statiques jouent un rôle fondamental dans plusieurs fonctions essentielles, notamment l'adaptation de la puissance, la régulation de la tension, l'amélioration du rendement énergétique et l'intégration de la production solaire au réseau électrique. Ces dispositifs permettent également l'implémentation de techniques avancées de contrôle, comme le suivi du point de puissance maximale (MPPT), afin d'extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque quelles que soient les conditions climatiques.

Ce chapitre présente dans un premier temps la définition générale des convertisseurs statiques ainsi que leur classification. Ensuite, les différents types de convertisseurs DC-DC seront étudiés, notamment les convertisseurs abaisseurs, élévateurs et buck-boost. Par la suite, une attention particulière sera portée aux onduleurs, qui constituent l'élément clé pour l'injection de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique.

Enfin, ce chapitre se conclura par l'étude de l'onduleur à deux niveaux utilisé dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, en détaillant son principe de fonctionnement, sa modélisation ainsi que ses avantages dans les applications d'énergie renouvelable[32].

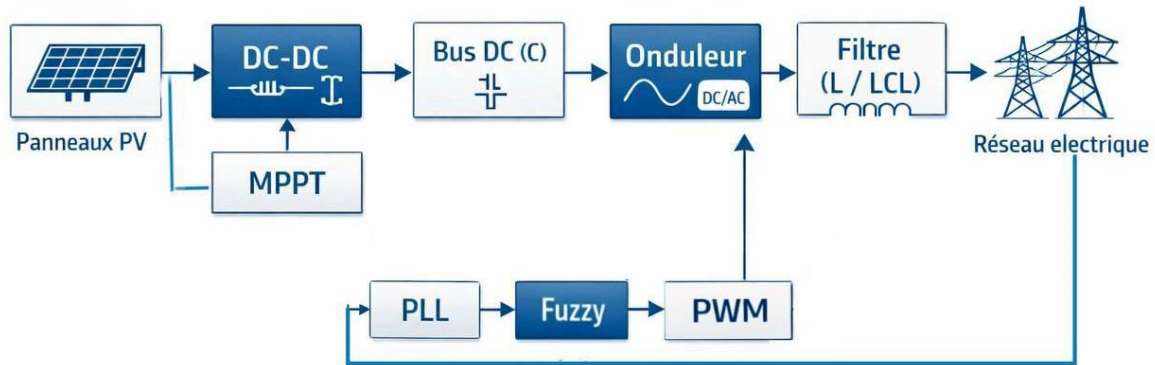


Figure 27: La structure de système

2.2 Définition des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre sans parties mécaniques en mouvement. Ils fonctionnent à l'aide de composants semi-conducteurs tels que diodes, transistors et thyristors. Selon la nature de l'entrée et de la sortie, les convertisseurs statiques sont classés en plusieurs types :

- Redresseurs ($AC \rightarrow DC$) : conversion du courant alternatif en courant continu.
- Onduleurs ($DC \rightarrow AC$) : conversion du courant continu en courant alternatif.
- Hacheurs ($DC \rightarrow DC$) : conversion d'un niveau de courant continu à un autre.
- Cycloconvertisseurs ou convertisseurs matriciels ($AC \rightarrow AC$) : conversion du courant alternatif d'une fréquence ou tension à une autre.

Leur rôle principal est d'adapter l'énergie électrique afin de répondre efficacement et de manière fiable aux besoins des différents systèmes et applications [22].

2.3 Importance des convertisseurs statiques dans les systèmes d'énergie renouvelable

Dans les systèmes d'énergie renouvelable, tels que les systèmes photovoltaïques (PV), éoliens, hydrauliques et à piles à combustible, les convertisseurs statiques remplissent plusieurs fonctions essentielles, notamment :

- Adaptation de la puissance générée aux caractéristiques de charge ou du réseau.
- Optimisation du rendement énergétique des systèmes.
- Protection des équipements et régulation de la tension et du courant.

- Permettre la conversion efficace entre différents types de courant et tensions selon les besoins de l'application.

Si tu veux, je peux compléter cette section 2.3 en détaillant chaque fonction avec exemples pour les systèmes photovoltaïques, afin que ce texte soit prêt pour une mémoire de fin d'études

2.3.1 Conversion et adaptation de la puissance dans les systèmes renouvelables

Dans les systèmes d'énergie renouvelable, les convertisseurs statiques sont essentiels pour convertir la production électrique brute des sources renouvelables en une forme utilisable et stable.

Par exemple, les panneaux photovoltaïques (PV) génèrent du courant continu (DC), qui doit être converti en courant alternatif (AC) via des onduleurs afin d'être compatible avec les appareils domestiques ou le réseau électrique.

De même, les convertisseurs DC-DC sont utilisés pour réguler les niveaux de tension afin d'optimiser l'extraction d'énergie de sources comme les PV ou les piles à combustible. Cette fonction est critique pour adapter la source d'énergie à la charge ou au système de stockage [23].

2.3.2 Intégration au réseau et synchronisation

Un des principaux défis des systèmes d'énergie renouvelable est l'intégration de sources d'énergie variables et décentralisées au réseau électrique centralisé.

Les convertisseurs statiques facilitent cette intégration en contrôlant la tension, la fréquence et la phase de l'énergie fournie par la source renouvelable, garantissant ainsi la conformité avec les normes du réseau.

Cette synchronisation est cruciale pour maintenir la stabilité du réseau et éviter des problèmes tels que :

- chutes de tension (voltage sags),
- déviation de fréquence,
- désaccord de phase lors de l'injection d'énergie [24].

2.3.3 Gestion du stockage d'énergie

Dans les systèmes intégrant des batteries ou d'autres technologies de stockage, les convertisseurs statiques gèrent le flux bidirectionnel d'énergie entre la source renouvelable, le média de stockage et la charge.

Cela inclut :

- la charge de la batterie lorsque l'énergie excédentaire est disponible,
- la décharge lorsque l'énergie est déficitaire.

Des convertisseurs DC-DC ou DC-AC bidirectionnels sont utilisés dans ce type de configuration afin de maintenir l'équilibre énergétique et assurer la continuité de l'alimentation, particulièrement dans les systèmes isolés ou hybrides [35].

2.3.4 Amélioration de l'efficacité et du contrôle

Les convertisseurs statiques modernes sont équipés de stratégies de contrôle avancées utilisant des microcontrôleurs ou des processeurs de signal numérique (DSP), permettant :

- le suivi en temps réel des paramètres du système,
- l'ajustement dynamique des réglages.

Ces systèmes de contrôle permettent :

- d'améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie,
- de réduire les pertes énergétiques,
- de prolonger la durée de vie des convertisseurs et des systèmes d'énergie

renouvelable.

La possibilité d'implémenter des algorithmes tels que le suivi du point de puissance maximale (MPPT) améliore considérablement la performance de captation énergétique, notamment dans les systèmes photovoltaïques [26]

2.3.5 Protection et fiabilité

Une autre fonction critique des convertisseurs statiques est d'assurer la protection de la source d'énergie et de la charge.

Ils sont conçus avec des fonctionnalités permettant de se protéger contre :

- les surtensions,
- les surintensités,
- les court-circuits,
- les surchauffes thermiques.

De plus, le design modulaire de nombreux systèmes basés sur des convertisseurs permet :

- une maintenance facile,
- une scalabilité (facilité d'extension),
- une redondance,

ce qui augmente la fiabilité et la résilience des installations d'énergie renouvelable [27].

2.4 Types de convertisseurs statiques

Les quatre familles principales sont :

- **Redresseurs (AC→DC) :**

Un redresseur est un dispositif électronique qui transforme une tension alternative (AC) en tension continue (DC).

Il fonctionne grâce à des composants comme les **diodes**, qui ne laissent passer le courant que dans un seul sens. Il est utilisé dans les alimentations électriques pour alimenter les circuits électroniques en courant continu.

- **Onduleurs (DC→AC) :**

Un **onduleur** est un convertisseur électronique qui transforme une tension continue (DC) en tension alternative (AC).

Il fonctionne à l'aide d'interrupteurs électroniques (transistors, IGBT) qui commutent rapidement pour recréer une forme de tension alternative, souvent sinusoïdale. Il est utilisé dans les systèmes solaires, les alimentations sans interruption (UPS) et les variateurs de vitesse.

- **Cycloconvertisseurs (AC→AC) :**

Un cycloconvertisseur est un convertisseur électronique statique qui transforme une tension alternative (AC) d'une fréquence donnée en une autre tension alternative de fréquence différente, sans passer par une étape en courant continu.

Il est généralement composé de redresseurs commandés qui permettent de synthétiser directement une nouvelle fréquence de sortie. On l'utilise surtout dans les applications de forte puissance comme les moteurs industriels à vitesse variable.

- **Hacheurs (DC→DC) :**

Un hacheur est un convertisseur électronique statique qui permet de transformer une tension continue en une autre tension continue de valeur différente, en découpant le signal à l'aide d'un interrupteur électronique (comme un transistor)

2.4.1 Hacheurs (DC→DC) :

2.4.1.1 Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur abaisseur (ou step-down), illustré dans la Figure , contient :

- un condensateur et une inductance, dont le rôle est le stockage d'énergie,

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

- deux interrupteurs complémentaires : lorsque l'un est fermé, l'autre est ouvert, et vice-versa

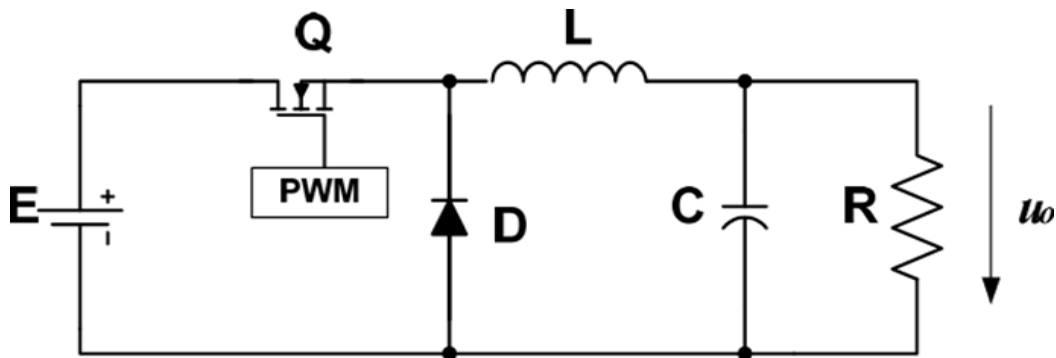


Figure 28 Diagramme du convertisseur Buck

Les interrupteurs sont alternativement ouverts et fermés à une fréquence de commutation PWM. La tension de sortie obtenue est régulée et de valeur inférieure à la tension d'entrée. Le fonctionnement du convertisseur sera analysé en fonction des états des interrupteurs [28].

Premier intervalle de temps : le transistor est ON et la diode est OFF

Pendant cette période, correspondant au cycle de service du signal PWM, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous :

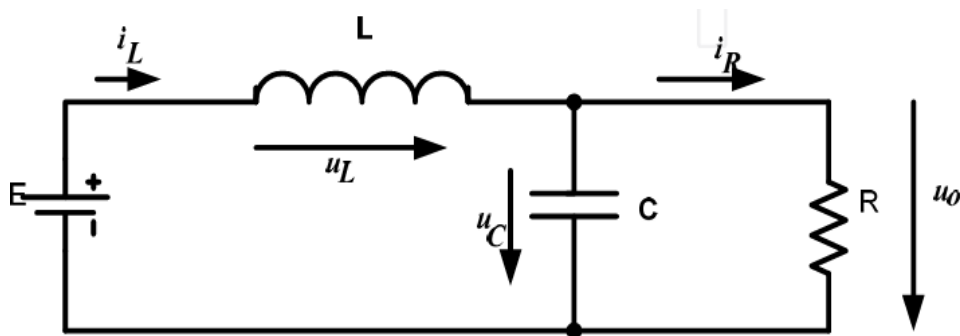


Figure 29 Le circuit équivalent pendant l'état ON du transistor et l'état OFF de la diode

Pour ce circuit équivalent, nous allons écrire les équations qui décrivent le fonctionnement du convertisseur

$$\begin{cases} \frac{du_o}{dt} = \frac{i_L - \frac{u_o}{R}}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{E - u_o}{L} \end{cases} \quad (II.1)$$

Deuxième intervalle de temps : le transistor est OFF et la diode est ON

Au moment où le transistor passe à l'état OFF, la tension aux bornes de l'inductance change de polarité et la diode passe à l'état ON.

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Le schéma équivalent du convertisseur pendant cette période est présenté dans la figure ci-dessous :

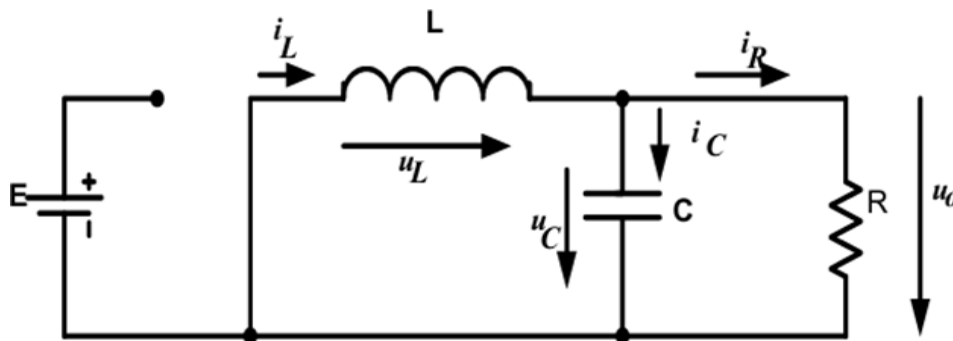


Figure 30 Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode

Pour cette période de fonctionnement, la tension de sortie u_0 et le courant dans l'inductance i_L satisfont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{du_0}{dt} = \frac{i_L - \frac{u_0}{R}}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{u_0}{L} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Troisième mode de fonctionnement : le transistor et la diode sont bloqués

Si le courant de l'inductance devient nul avant la fin de la période de conduction de la diode, le transistor ainsi que la diode se bloquent naturellement. Ce régime de fonctionnement est appelé mode de conduction discontinue (DCM).

Le schéma équivalent correspondant à ce mode de fonctionnement

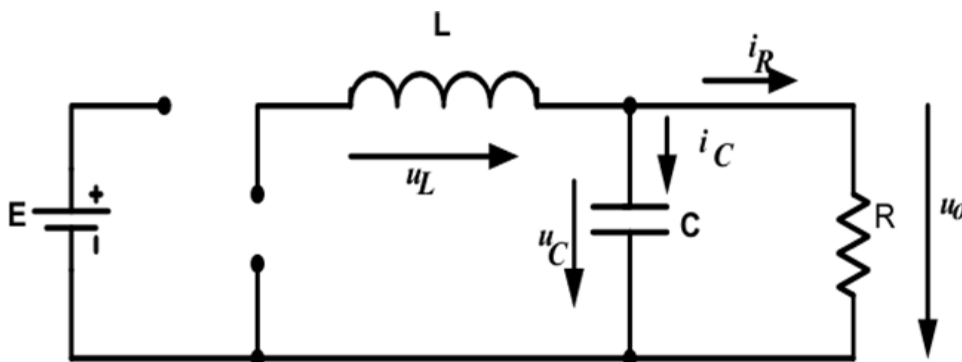


Figure 31 Le circuit équivalent lorsque le transistor et la diode sont à l'état bloqué

Durant cette période de fonctionnement, la tension de sortie u_0 ainsi que le courant dans l'inductance i_L vérifient les équations suivantes [29] :

$$\begin{cases} \frac{du_o}{dt} = \left(\frac{u_o}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{C}\right) \\ \frac{di_L}{dt} = 0 \end{cases} \quad (II.3)$$

Inductance en mode de conduction continue (CCM)

La valeur minimale de l'inductance assurant un fonctionnement en mode de conduction continue (CCM) est déterminée à partir des équations de la tension de sortie et du courant dans l'inductance. Ainsi, la tension de sortie u_o et le courant traversant l'inductance i_L vérifient les équations suivantes :

$$\begin{cases} u_L = E - U_0 \text{ for } t \in (0, D \cdot T) \\ u_L = -U_0 \text{ for } t \in (D \cdot T, T) \end{cases} \quad (II.4)$$

$$\begin{cases} i_L = \left(\frac{E - U_0}{L}\right) \cdot t \text{ for } t \in (0, D \cdot T) \\ i_L = \left(\frac{U_0}{L}\right) \cdot t \text{ for } t \in (D \cdot T, T) \end{cases} \quad (II.5)$$

Les formes d'onde de la tension et du courant de l'inductance pendant une période de commutation sont présentées dans la figure :

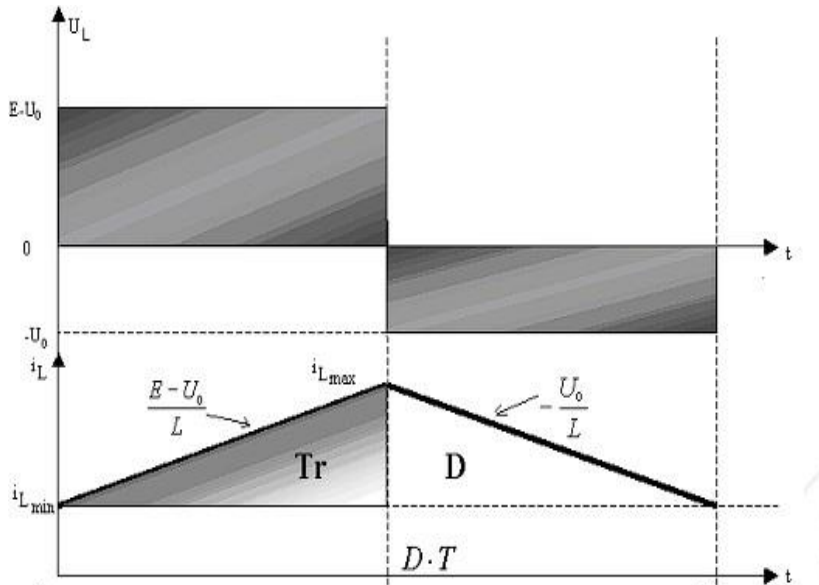


Figure 32 Les formes d'onde de la tension de sortie et du courant de l'inductance

Dans le régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. Par conséquent,

$$(E - U_0) \cdot D \cdot T = U_0 \cdot T (1 - D) \Rightarrow U_0 = D \cdot E \quad (II.6)$$

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

En se basant sur la forme d'onde du courant dans l'inductance, l'équation suivante peut être écrite :

$$I_{\{Lmax\}} = I_{\{Lmin\}} + \left(\frac{E - U_0}{L} \right) \cdot D \cdot T \quad (II.7)$$

La valeur moyenne du courant de l'inductance est égale au courant de sortie :

$$\frac{I_{\{Lmax\}} + I_{\{Lmin\}}}{2} = \frac{U_0}{R} = I_o R \quad (II.8)$$

À partir des équations , il résulte les valeurs minimale et maximale du courant dans l'inductance

$$I_{\{Lmin\}} = \frac{U_0}{R} - \left(\frac{E - U_0}{2L} \right) \cdot D \cdot T \quad (II.9)$$

$$I_{\{Lmax\}} = \frac{U_0}{R} + \left(\frac{E - U_0}{2L} \right) \cdot D \cdot T \quad (II.10)$$

Cela

$$\Delta i = I_{\{Lmax\}} - I_{\{Lmin\}} = \left(\frac{E - U_0}{L} \right) \cdot D \cdot T \quad (II.11)$$

À partir des équations l'ondulation du courant de l'inductance peut être calculée.

$$\Delta i = \frac{(E \cdot D \cdot (1 - D))}{L} \cdot T \quad (II.12)$$

À partir de la condition $L_{min} \geq 0$ on obtient .

$$\frac{2L}{RT} \geq 1 - D \quad (II.13)$$

Cette relation peut être utilisée pour déterminer la valeur minimale de l'inductance lorsque la fréquence de commutation et la valeur de la charge sont connues

$$L_{\{min\}} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot (1 - D) \quad (II.14)$$

Dans le régime de conduction discontinue [40], les formes d'onde de la tension et du courant de l'inductance sont illustrée

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

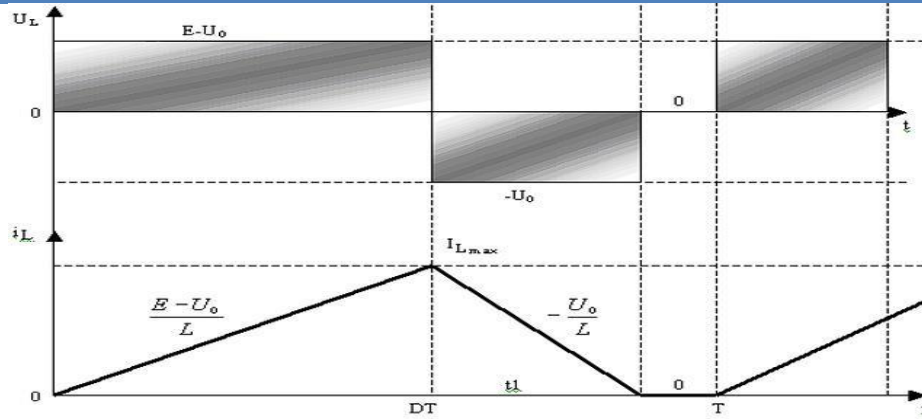


Figure 33 Les formes d'onde de la tension et du courant de l'inductance en mode de conduction discontinu (DCM).

La valeur moyenne du courant d'entrée est égale au courant traversant le transistor de commutation

$$I_{av} \cdot T = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot D \cdot T \cdot I_{Lmax} \quad (II.15)$$

$$I_{Lmax} = \left(\frac{(E - U_0)}{L}\right) \cdot D \cdot T \quad (II.16)$$

À partir des équations ci-dessus, il en résulte :

$$I_{av} = \left(\frac{(E - U_0)}{(2 \cdot L)}\right) \cdot D^2 \cdot T \quad (II.17)$$

En supposant qu'il n'y a pas de pertes dans le circuit, les puissances d'entrée et de sortie sont égales.

$$P_{in} = P_{out} \leftrightarrow \left(\frac{U_0^2}{R}\right) = E \cdot I_{av} \quad (II.18)$$

Cela

$$\frac{U_0^2}{R} = E \cdot \frac{(E - U_0)}{2L} \cdot D^2 \cdot T \quad (II.19)$$

$$\frac{U_0^2}{E^2} = \frac{R \cdot T}{2L} \cdot \left(1 - \frac{U_0}{E}\right) \cdot D^2 \quad (II.20)$$

En désignant le rapport de transfert du circuit par $U_s / E = M$:

$$M^2 + \frac{R \cdot T \cdot D^2}{2L} \cdot M - \frac{R \cdot T \cdot D^2}{2L} = 0 \quad (II.21)$$

Traduction

$$a = \frac{(R \cdot D^2 \cdot T)}{(2 \cdot L)} \quad (II.22)$$

Les solutions de l'équation ci-dessus sont :

$$M = \frac{(-a \pm \sqrt{(a^2 + 4 \cdot a)})}{2} \quad (II.23)$$

En analysant ces solutions, on peut observer que la seule solution valable est :

$$M = \frac{(-a + \sqrt{a^2 + 4.a})}{2} \quad (\text{II.24})$$

La variation du rapport de transfert du circuit M en fonction du cycle de service D du signal

PWM, pour différentes valeurs des paramètres $2L/RT$, est montrée dans la figure.

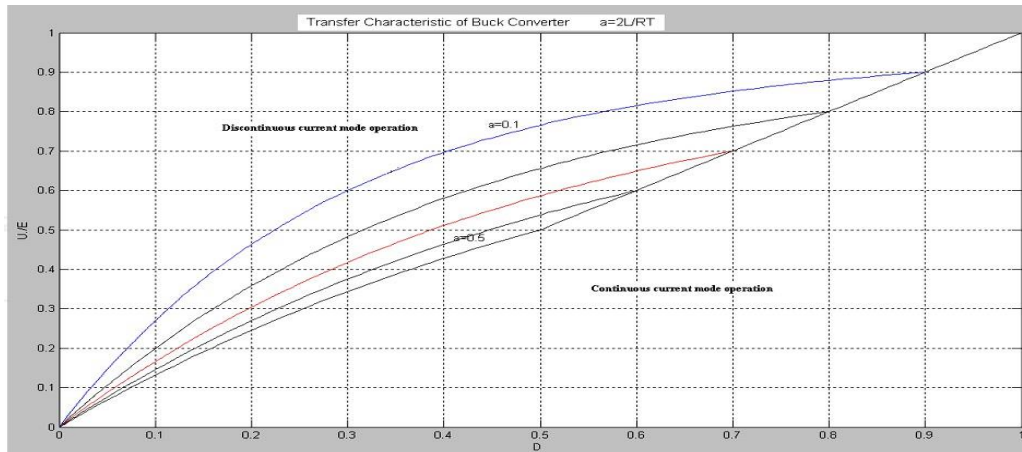
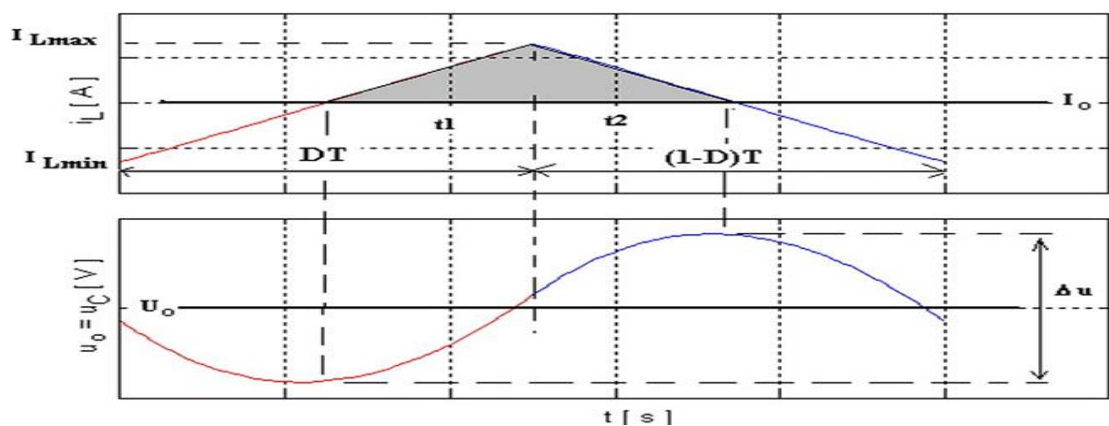


Figure 34 Variation du rapport de transfert du circuit M en fonction du cycle de service D du signal PWM.

Condensateur de filtrage

Un autre paramètre important à déterminer est la valeur du condensateur de sortie, afin d'obtenir une valeur spécifique de l'ondulation de tension de sortie. Le courant de charge du condensateur est égal à la différence entre le courant de l'inductance i_L et le courant de sortie i_O . En considérant un courant de sortie constant, la charge électrique stockée dans le condensateur pendant une période de commutation est égale à la surface ombrée de la figure



ci-
dessous.

$$Q = \Delta u \cdot C = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot (I_{Lmax} - I_O) \cdot (t_1 - t_2) \quad (\text{II.25})$$

Figure 35 Les formes d'onde du courant de l'inductance et de la tension de sortie.

$$\frac{t_1}{(D \cdot T)} = \frac{t_2}{((1-D) \cdot T)} = \frac{(t_1 + t_2)}{T} = \frac{(I_{Lmax} - I_0)}{(I_{Lmax} - I_{Lmin})} \quad (II.26)$$

Ainsi, la valeur du condensateur de sortie peut être calculée à l'aide de la formule suivante

$$C = \frac{((E - U_o) \cdot D \cdot T^2)}{(8 L \cdot \Delta u)} = \frac{(E (1 - D) D)}{(8 L \cdot f^2 \cdot \Delta u)} \quad (II.27)$$

On peut voir dans cette formule que la valeur du condensateur dépend de la fréquence de commutation. En augmentant la fréquence de commutation, la valeur du condensateur sera plus faible [30].

2.4.1.2 Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost (ou élévateur de tension), représenté sur la figure 9, contient, comme le convertisseur Buck, un condensateur et une inductance jouant le rôle de stockage d'énergie, ainsi que deux interrupteurs complémentaires. Dans le cas du convertisseur Boost, la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

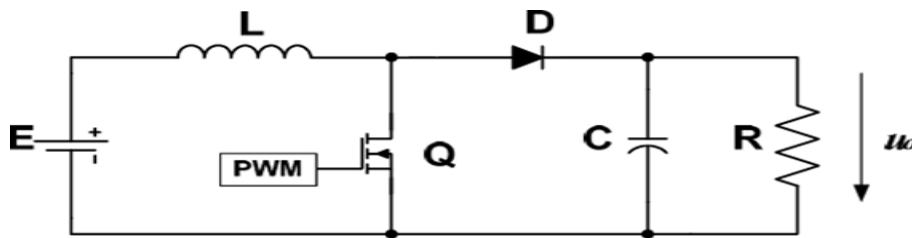


Figure 36 Schéma du convertisseur Boost

Les interrupteurs sont alternativement ouverts et fermés à une fréquence de commutation PWM. Tant que le transistor est à l'état ON, la diode est bloquée (polarisée en inverse). La tension d'entrée, appliquée directement à l'inductance \$L\$, engendre un courant croissant de manière linéaire. Lorsque le transistor est à l'état OFF, la charge est alimentée à la fois par la source d'entrée et par le filtre LC. La tension de sortie obtenue est une tension régulée de valeur supérieure à la tension d'entrée. Le fonctionnement du convertisseur sera analysé en fonction des états des interrupteurs. [28]

Premier intervalle de temps : le transistor est à l'état ON et la diode est OFF

Pendant cet intervalle de temps, correspondant au rapport cyclique du signal de commande PWM, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. Durant cette période, l'inductance L stocke de l'énergie.

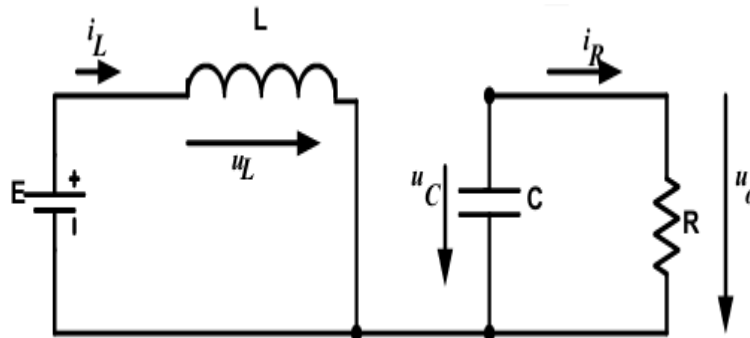


Figure 37 Le circuit équivalent pendant l'état ON du transistor et l'état OFF de la diode

Pendant cette période de fonctionnement, la tension de sortie u_o et le courant traversant l'inductance i_L vérifient les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \\ \frac{du_o}{dt} = -\frac{u_o}{R.C} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Deuxième intervalle de temps : le transistor est OFF et la diode est ON

Au moment où le transistor passe à l'état OFF, la tension aux bornes de l'inductance change de polarité et la diode passe à l'état ON. Le schéma équivalent du convertisseur pendant cette période est présenté dans la figure ci-dessous :

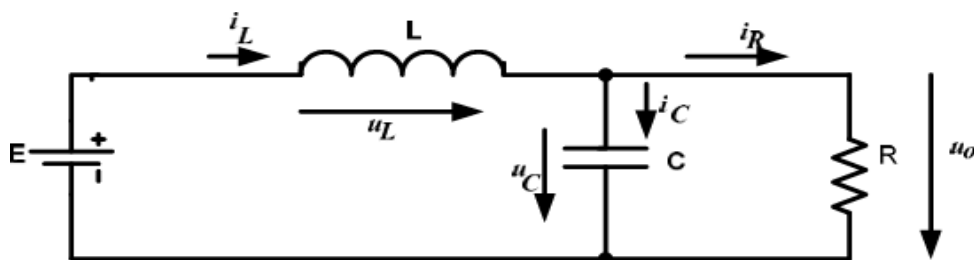


Figure 38 Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode

Pour cette période de fonctionnement, la tension de sortie u_o et le courant traversant l'inductance i_L vérifient les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{E - u_0}{L} \\ \frac{du_0}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) \left(i_L - \frac{u_0}{R}\right) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Troisième mode de fonctionnement :

le transistor et la diode sont tous deux OFF Si le courant dans l'inductance devient nul avant la fin de la période de conduction de la diode, le transistor et la diode seront tous deux à l'état OFF. Comme le courant de la diode devient nul, celle-ci se ferme naturellement, et le condensateur de sortie se décharge sur la charge. Ce régime de fonctionnement est appelé mode à courant discontinu. Le schéma équivalent de ce régime de fonctionnement est présenté ci-dessous :

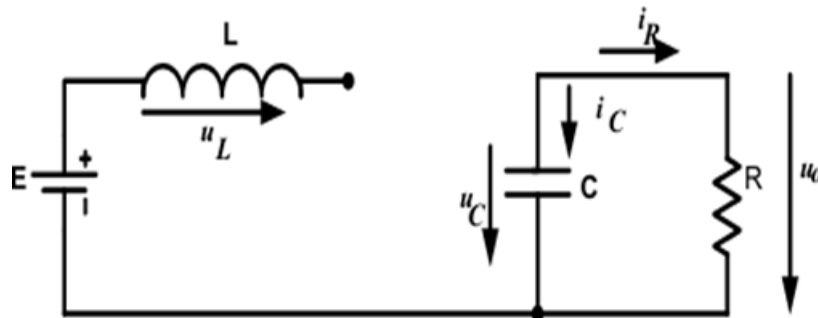


Figure 39 Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode

Pendant cette période de fonctionnement, la tension de sortie \$u_0\$ et le courant traversant l'inductance \$i_L\$ peuvent être calculés à partir des équations suivantes [28] :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0 \\ \frac{du_0}{dt} = -\frac{u_0}{R.C} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Inductance en mode de conduction continue (CCM)

La valeur minimale de l'inductance pour un fonctionnement en mode de conduction continue (CCM) est calculée à partir de l'équation du courant dans l'inductance.

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle

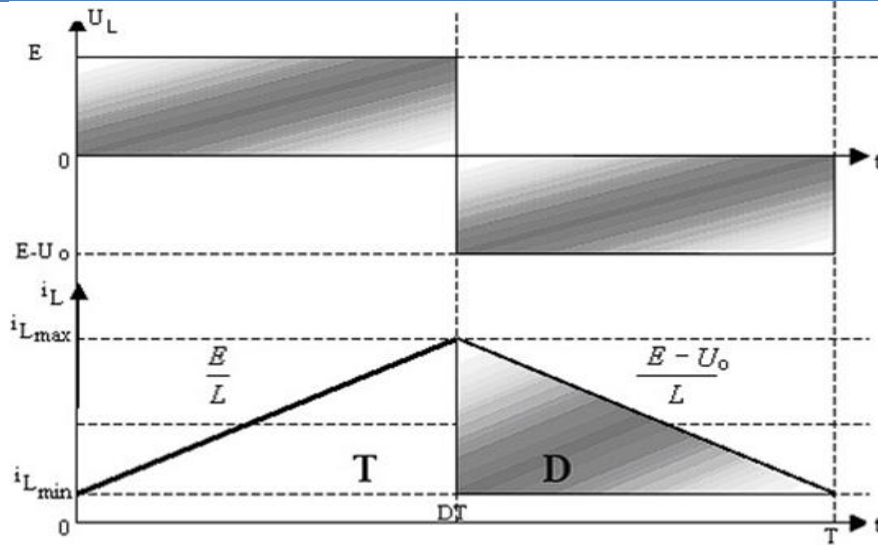


Figure 40 Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode.

Ainsi, la tension de sortie u_0 et le courant traversant l'inductance i_L vérifient les équations suivantes :

$$E.D.T = T.(1 - D).(U_0 - E) \Rightarrow U_0 = \frac{E}{1-D} \quad (\text{II.31})$$

D'après les formes d'onde ci-dessus, la valeur maximale du courant dans l'inductance est :

$$i_{Lmax} = i_{Lmin} + \left(\frac{E}{L}\right).D.T \quad (\text{II.32})$$

Le courant de sortie est égal au courant moyen de la diode.

$$\left(\frac{i_{Lmax} + i_{Lmin}}{2}\right).T.(1 - D) = \left(\frac{U_0}{R}\right).T \quad (\text{II.33})$$

En se basant sur les équations , on obtient :

$$i_{Lmax} = \frac{U_0}{R.(1-D)} + \frac{E.D.T}{2.L} \quad (\text{II.34})$$

$$i_{Lmin} = \frac{U_0}{R.(1-D)} - \frac{E.D.T}{2.L} \quad (\text{II.35})$$

En se basant sur les équations , l'ondulation du courant dans l'inductance peut être déterminée :

$$\Delta i = \frac{E.D.T}{L} \quad (\text{II.36})$$

À partir de la condition du mode de conduction continue, $i_{Lmin} \geq 0$ on obtient

$$\frac{2L}{R.T} \geq D.(1 - D)^2 \quad (\text{II.37})$$

Cette condition peut être utilisée pour déterminer la valeur minimale de l'inductance, pour une période de commutation T donnée et une charge R spécifique.

$$L_{\min} = \left(R \cdot \frac{T}{2}\right) \cdot D.(1 - D)^2 \quad (\text{II.38})$$

Le mode de conduction discontinue

En mode de conduction discontinue, les formes d'onde de la tension et du courant dans l'inductance sont présentées dans la figure ci-dessous :

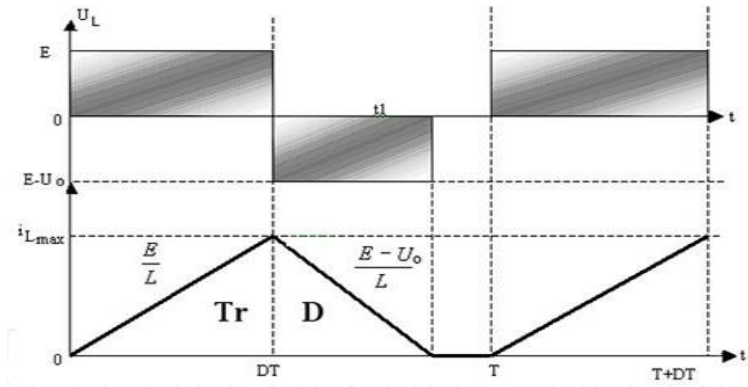


Figure 41 Les formes d'onde de la tension et du courant dans l'inductance en mode de conduction discontinue (DCM).

La valeur moyenne du courant d'entrée est égale à la valeur moyenne du courant dans l'inductance.

$$I_{av}.T = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot I_{max} \cdot (D.T + t_1) \quad (\text{II.39})$$

Ou

$$I_{\{Lmax\}} = \frac{(E.D.T)}{L} \quad (\text{II.40})$$

En se basant sur les équations (51) et (52), on obtient :

$$I_{\{av\}} = \frac{(E.D)}{(2.L)} \cdot (D.T + t_1) \quad (\text{II.41})$$

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance pendant une période de commutation est nulle.

$$E.D.T = t_1(U_o - E) \Rightarrow t_1 = \frac{(E.D.T)}{(U_o - E)} \quad (\text{II.42})$$

En remplaçant l'équation dans l'équation, et en considérant également que la puissance d'entrée est égale à la puissance de sortie,

$$P_{in} = P_{out} \leq \frac{U_0^2}{R} = E \cdot I_{av} \quad (II.43)$$

On obtient ainsi :

$$\left(\frac{U_0}{E}\right) \cdot \left(\frac{U_0}{E} - 1\right) = \frac{D^2 \cdot T \cdot R}{(2 \cdot L)} \quad (II.44)$$

En désignant le rapport de transfert de tension par $M = U_0/E$ l'équation (56) devient :

$$M \cdot (M - 1) = \frac{D^2 \cdot T \cdot R}{(2 \cdot L)} \quad (II.45)$$

La solution de cette équation est :

$$M = \frac{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot D^2 \cdot T \cdot R}{2 \cdot L}}\right)}{2} \quad (II.46)$$

La variation du rapport de transfert du circuit M en fonction du rapport cyclique D du signal

PWM, pour différentes valeurs des paramètres $\frac{2L}{RT}$ est montrée dans la figure [31]

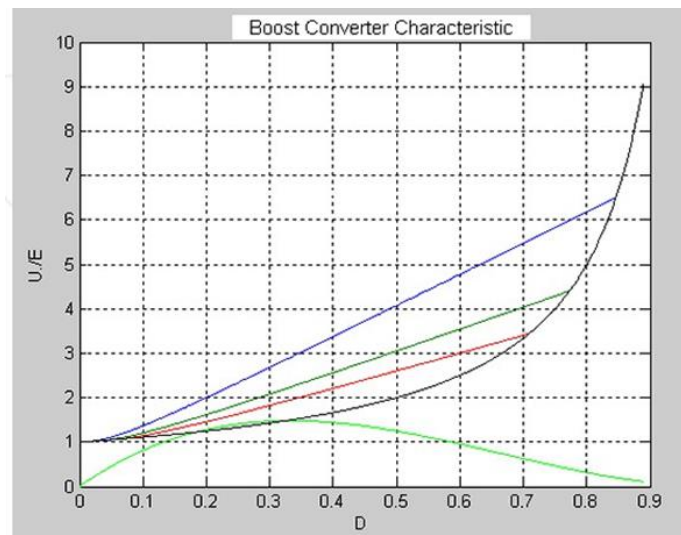


Figure 42 Variation du rapport de transfert du circuit M en fonction du rapport cyclique D du signal PWM.

Condensateur de filtrage

Un autre paramètre important à déterminer est la valeur du condensateur de sortie, afin d'obtenir une valeur spécifique de l'ondulation de la tension de sortie.

Le courant de charge du condensateur est égal à la différence entre le courant de la diode i_D et le courant de sortie i_o .

En considérant un courant de sortie constant, la charge électrique stockée dans le condensateur pendant une période de commutation est égale à l'aire ombrée de la figure ci-dessous.

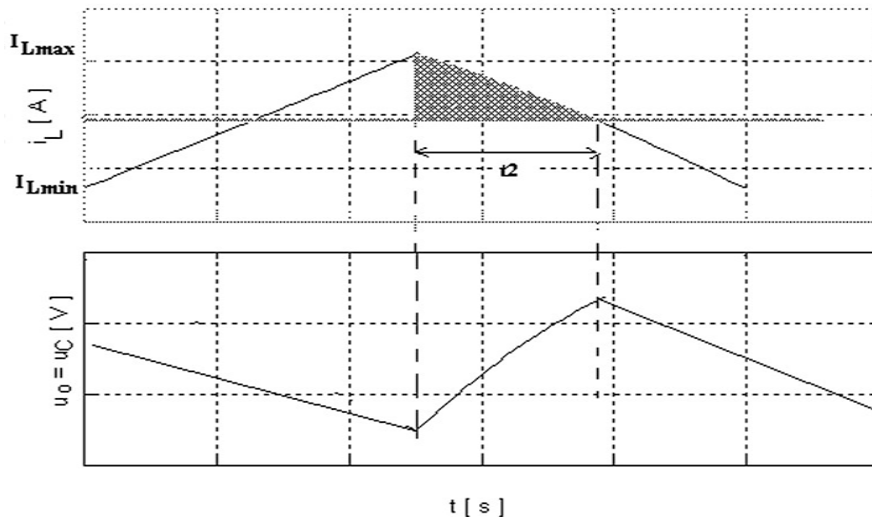


Figure 43 Les formes d'onde du courant dans l'inductance et de la tension de sortie.

$$Q = C \cdot \Delta u = \frac{1}{2} \cdot (I_{Lmax} - I_o) \cdot t_2 \quad (\text{II.47})$$

$$\frac{t_2}{(T \cdot (1 - D))} = \frac{(I_{Lmax} - I_o)}{(I_{Lmax} - I_{Lmin})} \quad (\text{II.48})$$

Ainsi, la valeur du condensateur de sortie peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$C = \frac{((I_{Lmax} - I_o)^2 \cdot T \cdot (1 - D))}{(2 \cdot (I_{Lmax} - I_{Lmin}))} \quad (\text{II.49})$$

2.4.2 Onduleurs et Systèmes Photovoltaïques

L'onduleur est un convertisseur statique d'énergie qui transforme une tension continue (DC), provenant généralement de panneaux photovoltaïques ou de batteries, en une tension

alternative (AC). Son rôle est crucial dans les systèmes d'énergie renouvelable car il permet d'adapter l'énergie produite aux besoins du réseau électrique ou des charges domestiques.

2.4.2.1 Types d'Onduleurs

On distingue principalement deux types d'onduleurs selon la source :

Onduleur de tension (VSI - Voltage Source Inverter) : La source d'entrée est une source de tension constante (condensateur).

Onduleur de courant (CSI - Current Source Inverter) : La source d'entrée est une source de courant (inductance).

Selon la configuration :

- **Onduleur monophasé :** Pour les petites puissances.
- **Onduleur triphasé :** Pour les applications industrielles et l'injection réseau de forte puissance.

2.4.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe repose sur le découpage de la tension continue à l'aide d'interrupteurs électroniques (IGBT ou MOSFET). En commandant l'ouverture et la fermeture de ces interrupteurs de manière séquentielle, on recrée une forme d'onde alternative à la sortie.

2.4.2.3 Onduleur à deux niveaux pour système photovoltaïque avec injection au réseau

Definition :

Un onduleur à deux niveaux (Two-Level Voltage Source Inverter – VSI) est un convertisseur statique de puissance qui permet de transformer une tension continue (DC) en une tension alternative (AC).

Ce type d'onduleur est largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique afin de convertir l'énergie produite par les panneaux solaires en énergie compatible avec le réseau.

L'appellation « deux niveaux » provient du fait que la tension de sortie générée par chaque bras de l'onduleur peut prendre seulement deux niveaux de tension : un niveau positif ($+V_{dc}/2$) et un niveau négatif ($-V_{dc}/2$) par rapport au point de référence.

Cette caractéristique distingue l'onduleur à deux niveaux des onduleurs multiniveaux qui peuvent produire plusieurs niveaux de tension.

Dans sa structure la plus simple, l'onduleur à deux niveaux est constitué d'un pont complet composé de quatre interrupteurs électroniques de puissance, généralement des IGBT ou des

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

MOSFET. Ces interrupteurs sont commandés par des signaux de contrôle provenant d'un système de commande afin de produire une tension alternative à partir de la source de tension continue.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'onduleur joue plusieurs rôles essentiels :

- Conversion du courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif.
- Synchronisation de la tension de sortie avec la tension du réseau électrique.
- Contrôle de la puissance active injectée dans le réseau.
- Amélioration de la qualité de l'énergie injectée en réduisant les harmoniques.

De plus, l'onduleur à deux niveaux est souvent associé à des techniques de modulation telles que la modulation de largeur d'impulsion (PWM – Pulse Width Modulation), qui permet de générer une tension de sortie quasi sinusoïdale et de réduire les distorsions harmoniques. Grâce à sa structure relativement simple, son coût réduit et sa grande fiabilité, l'onduleur à deux niveaux est l'une des solutions les plus utilisées dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

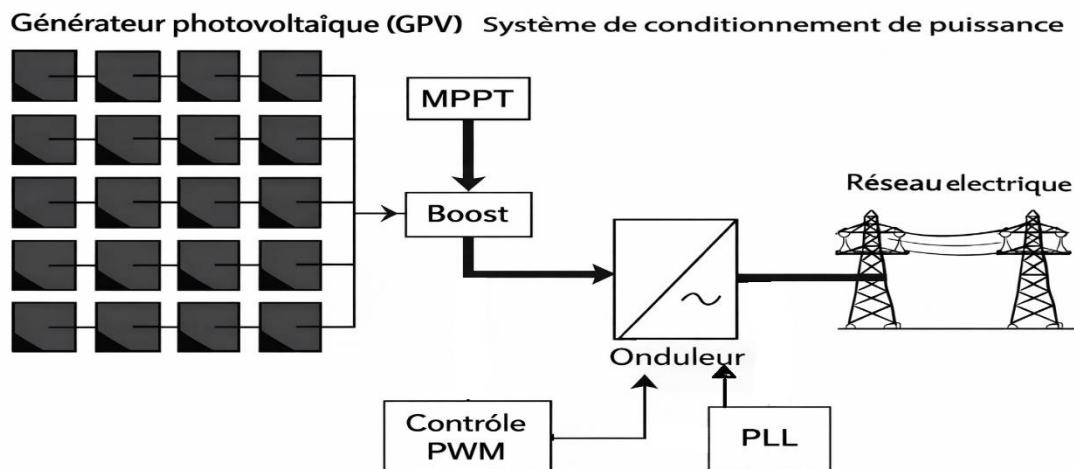


Figure 44: Onduleur à deux niveaux pour système photovoltaïque avec injection au réseau

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur à deux niveaux repose sur la commutation contrôlée des interrupteurs électroniques afin de convertir la tension continue provenant des panneaux photovoltaïques en une tension alternative synchronisée avec le réseau électrique. Dans un système photovoltaïque avec injection au réseau, le processus de fonctionnement peut être décrit en plusieurs étapes principales.

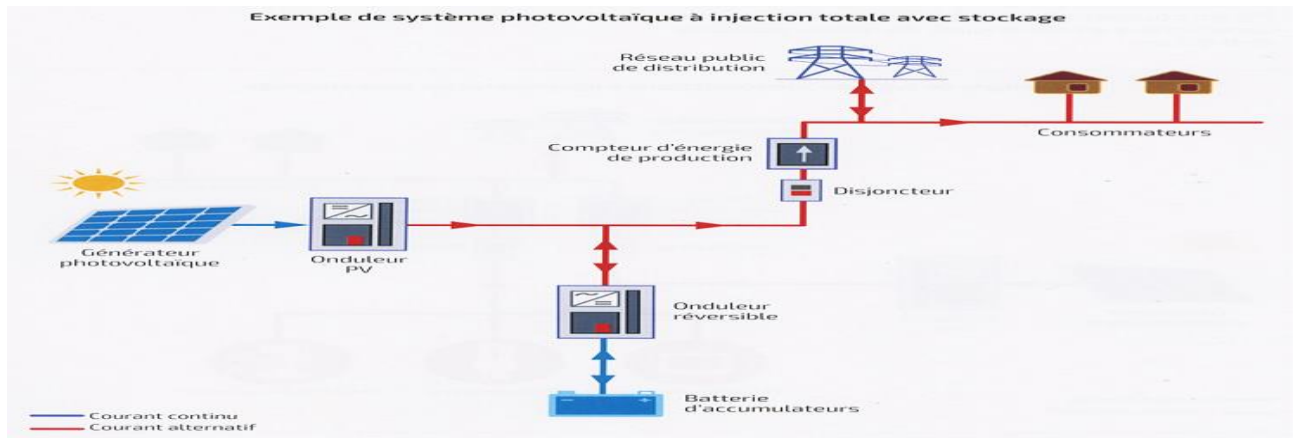


Figure 45 Principe de fonctionnement. Onduleur à deux niveaux pour système photovoltaïque avec injection au réseau

Production de l'énergie photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de courant continu. La tension générée dépend principalement de l'irradiation solaire et de la température des cellules photovoltaïques.

Cependant, cette tension continue n'est pas directement compatible avec le réseau électrique qui fonctionne en courant alternatif.

La tension continue générée par les panneaux solaires dépend de l'irradiation solaire et de la température des cellules. Elle peut être modélisée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V_{pu} + I_{pu} \cdot R_s}{n \cdot V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pu} + I_{pu} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.50)$$

- I_{pu} : courant du panneau photovoltaïque
- V_{pu} : tension du panneau photovoltaïque
- I_{ph} : courant généré par la lumière (irradiation)
- I_0 : courant de saturation inverse du diode
- R_s : résistance série interne
- R_{sh} : résistance parallèle interne
- n : facteur de diode
- V_t : tension thermique (kT/q)

Adaptation de la tension continue (Convertisseur DC-DC)

Avant d'être appliquée à l'onduleur, la tension continue provenant des panneaux photovoltaïques est généralement adaptée par un convertisseur DC-DC, souvent de type

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Boost. Ce convertisseur permet d'augmenter la tension et d'assurer le fonctionnement du système au point de puissance maximale (MPPT – Maximum Power Point Tracking).

Cette étape est essentielle pour maximiser l'énergie extraite du générateur photovoltaïque.

Pour un convertisseur de type Boost, la tension de sortie est donnée par :

$$V_{dc} = \frac{V_{pv}}{1 - D} \quad (\text{II.51})$$

où :

- D : rapport cyclique du convertisseur

Le courant de sortie est alors :

$$I_{dc} = I_{pu} \cdot (1 - D) \quad (\text{II.52})$$

Conversion DC-AC par l'onduleur à deux niveaux

Après l'adaptation de la tension, l'onduleur à deux niveaux convertit la tension continue du bus DC en une tension alternative.

Le fonctionnement repose sur la commutation alternée des interrupteurs électroniques. En contrôlant l'ouverture et la fermeture des interrupteurs selon une séquence précise, l'onduleur génère une tension alternative composée d'une succession d'impulsions positives et négatives.

Pour améliorer la qualité de la tension de sortie, une technique de modulation appelée PWM (Pulse Width Modulation) est généralement utilisée. Cette technique permet d'obtenir une tension de sortie quasi sinusoïdale après filtrage.

La tension de sortie de base de l'onduleur à deux niveaux peut être décrite comme suit :

$$V_{an(t)} = \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} \\ -\frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

*lorsque le switch inférieur est ferm

*lorsque le switch supérieur est ferm

Pour obtenir une tension quasi sinusoïdale via

PWM :

$$V_{out(t)} = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.54})$$

où :

• V_m : tension crête après filtrage

• $\omega = 2\pi f$: pulsation réseau



Figure 46 Conversion DC-AC par l'onduleur

Filtrage de la tension de sortie(Filtre LC ou LCL)

La tension générée par l'onduleur contient des composantes harmoniques dues aux commutations des interrupteurs. Pour réduire ces harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau, un filtre passif (généralement un filtre LC ou LCL) est utilisé à la sortie de l'onduleur.

Ce filtre permet d'obtenir une forme d'onde proche d'une sinusoïde.

Pour un filtre LC :

$$V_{out(t)} = L \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right) + i_L \cdot R + V_{load} \quad (II.55)$$

Ou pour le filtre LC complet :

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} + \left(\frac{1}{C} \right) \cdot \int i_L dt = V_{dc} - V_{AC} \quad (II.56)$$

où :

- L : inductance
- C: capacité
- i_L : courant de l'inductance
- V_{ac} : tension alternative de sortie



Figure 47 Filtrage de la tension de sortie

2.5 PLL (PHASE LOCKED LOOP)

Les boucles à verrouillage de phase appelées PLL (PLL = Phased Locked Loop) sont des dispositifs électroniques destinés à asservir la phase d'un oscillateur local à celle d'un signal extérieur. Elles sont largement utilisées dans les processus de traitement de l'information et de transmission des données.

La PLL est utilisée aussi dans divers systèmes électroniques dont:

Le récepteur radio;

Le téléphone cellulaire;

Dans la télécommunication, (restitution de porteuses, lors de la démodulation synchrone d'un signal AM ou la démodulation d'un signal en fréquence, démodulation FSK);

Dans le contrôle des moteurs électriques;

L'extraction d'un signal noyé dans un bruit;

Dans la reconstitution d'horloge en transmission de données, etc... .

STRUCTURE GENERALE DE LA PLL

Afin de connecter des sources à énergies renouvelables au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur de production d'énergie électrique avec celle du réseau en matière de phase et de fréquence tout en contrôlant celles relatives au réseau. La figure 1 montre le principe fonctionnel d'une PLL.

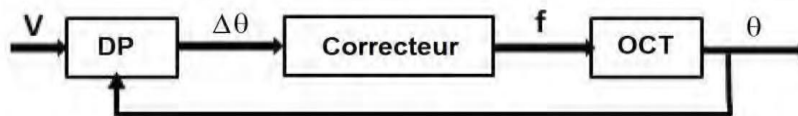


Figure 48:Schéma fonctionnel de base d'une PLL

Dans la littérature, ils existent plusieurs configurations de la PLL (Phase Lock Loop) .

Cependant, dans cette étude, nous citons celles qui sont les plus classiques à savoir:

Le zero crossing , qui utilise une logique OU exclusif.

La méthode de filtrage de la tension comme filtre $\pi\pi$ ou filtre dq .

Ces méthodes ont le même inconvénient de sensibilité aux perturbations.

La méthode la plus efficace est la PLL (Phase Lock Loop). La structure de la PLL est un système bouclé dont son comportement et ses performances sont étudiés et évalués moyennant la théorie des asservissements. Cette structure présente des configurations très diversifiées et comme présentées sur la figure 1, elle comprend principalement trois blocs:

Le détecteur de phase, 'DP';

Le correcteur;

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

L'oscillateur commandé en tension, 'OCT'.

Les techniques avancées utilisées dans la technologie de la PLL ont pour principal objectif d'utiliser une poursuite robuste de la phase du réseau qui permet de pallier à l'existence des perturbations. Ainsi, la configuration que nous avons retenu dans cette étude correspond au schéma synoptique de la PLL présenté dans et décrit par la figure suivante.

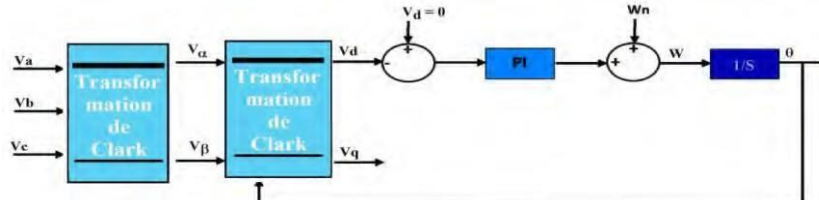


Figure 49: Schéma fonctionnel d'une PLL triphasée

Dans ce type de configuration de la PLL, nous supposons que les tensions du réseau sont équilibrées, et utilisées comme entrées dans la PLL et une fois contrôlées, sa sortie correspond à l'angle de phase de l'une des trois phases. Une fois ce dernier est détecté, nous faisons un décalage de 120 degrés pour chacune des deux autres phases.

Parmi les méthodes de détection, les plus usuelles utilisent la technologie de la PLL, nous citons:

a- Le 'zero crossing' qui utilise une logique OU Exclusif :

Cette structure, est utilisée principalement pour les systèmes monophasés, et peut être classée comme une structure dans laquelle la détection de phase et de fréquence est basée sur les points de passage par zéro du signal d'entrée. En outre, le bruit autour du point de passage à zéro de la tension rend l'angle de sortie oscillante. Par conséquent, les points de passage par zéro ne sont pas détectés, à chaque demi-cycle de la fréquence de travail, ce qui fait que les performances dynamiques de cette solution sont limitées.

b- Méthode de filtrage de la tension comme le filtre

Cette transformation permet de passer du repère abc vers le repère stationnaire

. Ce qui conduit à suivre l'angle de phase des signaux triphasés (V_{r1} , V_{r2} et V_{r3}).

Dans le cas d'un système équilibré, la tension du système triphasé de tension s'exprime de la manière suivante:

$$V_{r1} = V_m \cdot \sin(\theta) \quad (\text{II.57})$$

$$V_{r2} = V_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.58})$$

$$V_{r3} = V_m \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.59})$$

Où φ est l'angle de phase qui est égal à $2\pi f t$.

La matrice de transformation de Clarke dans le cas de conservation d'amplitude est donnée par l'équation .

$$T_{op} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}; 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

Ce qui nous permet d'écrire:

$$V_{\{\alpha\beta\}} = T_{\{\alpha\beta\}} \cdot T_{\{r1r2r3\}} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\theta) \\ V_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

Les deux signaux V_α , V_β transportent des informations uniquement sur l'angle de phase de l'une des trois phases (V_{r1} , V_{r2} ou V_{r3}).

c- La PLL triphasée synchrone (Phase Lock Loop)

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe d générée par cette transformation (Fig. 3) est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park (θ). En régime établi, l'angle estimé ($\hat{\theta}$) est égal à l'angle du réseau θ . Ici, le vecteur spatial de tension est synchronisé avec l'axe des q comme représenté dans la figure .

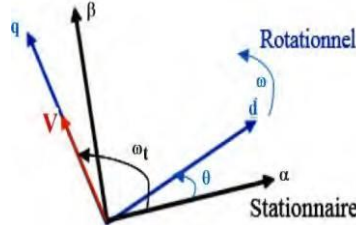


Figure 50: Repère synchrone de référence tournant

L'application de la transformation de Park sur les trois phases du réseau conduit aux expressions suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cdot \cos(\theta - \theta') \\ -V_m \cdot \sin(\theta - \theta') \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

Dans ce cas, la matrice de transformation est donnée par:

$$T_{qd} = \begin{bmatrix} \sin\theta' & \cos\theta' \\ -\cos\theta' & \sin\theta' \end{bmatrix} \quad (\text{II.63})$$

Où θ' est l'angle de phase déterminé par le système PLL.

La pulsation estimée θ' est la somme de la sortie du régulateur PI et la fréquence d'action directe ω_n .

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Nous constatons qu'il s'agit d'un système fortement non linéaire. Pour synthétiser le correcteur, on se base sur un modèle linéaire pour des faibles variations de la phase (θ).

Ainsi, lorsque θ' est très proche de θ , l'approximation des petits angles pour la fonction sinus conduit alors au modèle simplifié présenté sur la figure. Ce qui permet une simple synthèse du correcteur faisant partie de cette boucle.

Le but de l'utilisation de la fréquence d'action directe, ω_n , est de pouvoir contrôler le régulateur PI et de détecter le passage d'un signal de sortie par zéro. Dans notre cas, la pulsation d'action directe correspond à la valeur $2\pi \times 100$.

C'est le cas d'un fonctionnement idéal d'un réseau où sa fréquence est exactement de 50 Hz. Ainsi, une fois le régulateur réalise l'asservissement de la phase, la sortie du régulateur sera nulle.

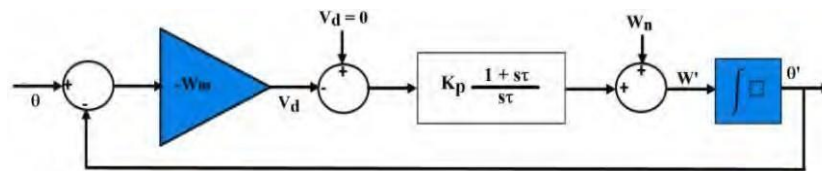


Figure 51: Système simplifié de la PLL

FONCTION DE TRANSFERT

La fonction de transfert FT correspondante au système représenté par la figure 4 et travaillant en boucle ouverte, est exprimée par l'équation suivante:

$$FT_{bo} = \left(k_p \cdot \frac{(1 + \tau \cdot s)}{(\tau \cdot s)} \right) \cdot \left(\frac{1}{(1 + s \cdot T_e)} \right) \cdot \left(\frac{V_m}{s} \right) \quad (II.64)$$

Avec, T_e , la période d'échantillonnage et τ , la constante du temps.

Lors du passage du système d'un fonctionnement en boucle ouverte envers celui travaillant en boucle fermée, la fonction de transfert régissant ce passage est exprimée par la relation suivante:

$$FT_{BF} = \frac{FT_{bo}}{(1 + FT_{bo})} \quad (II.65)$$

Synchronisation avec le réseau électrique (PLL)

Pour injecter l'énergie dans le réseau, la tension produite par l'onduleur doit être synchronisée avec la tension du réseau en termes de fréquence, de phase et d'amplitude.

Cette synchronisation est généralement réalisée à l'aide d'un système de verrouillage de phase appelé PLL (Phase Locked Loop). Ce système permet à l'onduleur de suivre la phase du

CHAPITRE2 : CONVERSION ET TECHNIQUES DE COMMANDE DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

réseau et d'assurer une injection stable de l'énergie.

Pour synchroniser l'onduleur avec le réseau :

$$\theta_{inv}(t) = \theta_{grid}(t) \quad (II.66)$$

La dynamique de la boucle de verrouillage de phase (PLL) peut être exprimée par :

$$\theta_{inv_dot} = \omega_{grid} + K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (II.67)$$

où :

• $e(t) = V_{grid} - V_{inu}$ est l'erreur de phase

• K_p, K_i : constantes de contrôle

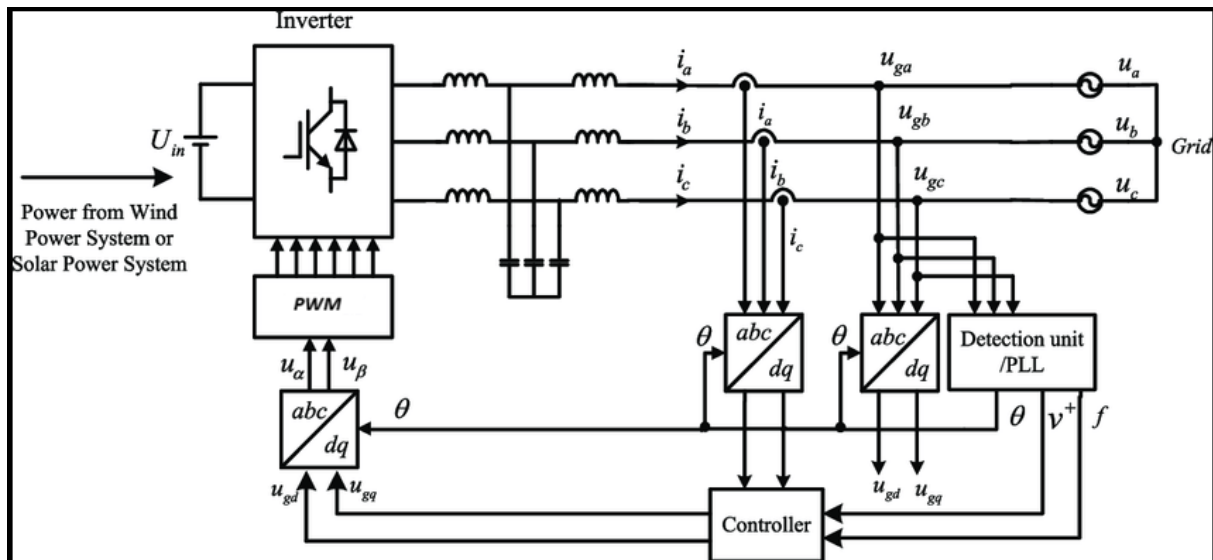


Figure 52: Synchronisation avec le réseau électrique

Injection de la puissance dans le réseau :

Une fois la synchronisation réalisée, l'onduleur peut injecter la puissance active produite par le système photovoltaïque dans le réseau électrique.

Le contrôle du courant injecté permet de réguler la puissance et de maintenir un facteur de puissance proche de l'unité.

Ainsi, l'onduleur joue un rôle fondamental dans l'intégration des systèmes photovoltaïques au réseau électrique en assurant la conversion, le contrôle et la qualité de l'énergie fournie.

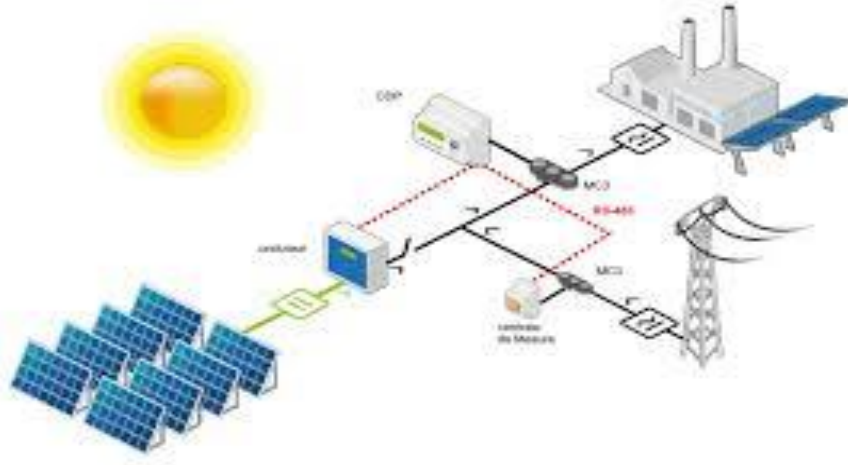


Figure 53 Injection de la puissance dans le réseau

La puissance injectée dans le réseau est donnée par:

$$P_{inj} = V_{grid} \cdot I_{inj} \cdot \cos(\phi) \quad (II.68)$$

Le courant injecté peut être contrôlé pour maintenir une puissance active souhaitée :

$$I_{inj} = \frac{P_{ref}}{V_{grid}} \quad (II.69)$$

Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux de l'énergie solaire et de la conversion photovoltaïque. Nous avons montré que les performances des cellules dépendent fortement des conditions climatiques (irradiance, température). Cette base théorique est indispensable pour comprendre le comportement des systèmes PV étudiés dans les chapitres suivants.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les convertisseurs statiques comme étant des éléments essentiels dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Leur rôle principal consiste à assurer l'adaptation de l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques afin de répondre aux exigences du réseau et des charges électriques.

Nous avons tout d'abord introduit les différents types de convertisseurs statiques ainsi que leurs principes de fonctionnement. L'étude des convertisseurs DC-DC a permis de comprendre l'importance de l'adaptation de la tension et de l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Ces convertisseurs jouent également un rôle important dans l'amélioration du rendement global du système photovoltaïque.

Ensuite, une attention particulière a été portée aux onduleurs, qui constituent l'élément central dans la conversion du courant continu en courant alternatif. Cette conversion est indispensable pour permettre l'injection de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique. Les différentes structures d'onduleurs ont été présentées, mettant en évidence leurs caractéristiques principales ainsi que leurs domaines d'application.

Enfin, l'étude de l'onduleur à deux niveaux pour l'injection réseau a permis de comprendre son fonctionnement, sa structure ainsi que ses avantages, notamment sa simplicité de commande, sa robustesse et sa large utilisation dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

Ce chapitre constitue ainsi une base théorique importante pour la suite de ce travail, où l'on s'intéressera à la modélisation, la commande et la simulation de l'onduleur deux niveaux dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Chapitre03 : étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau BT

3.1 Introduction

Cette adaptation est le résultat de lois de commande spécifiques permettant d'exploiter l'équipement au maximum de ses capacités, sans connaissance préalable de ces points de fonctionnement ou lorsque ceux-ci sont modifiés.

Cela correspond, du point de vue énergétique, au point de puissance maximale. Le terme « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) est fréquemment utilisé dans la littérature pour désigner ce type de commande.

Afin de produire une puissance maximale, le principe de ces méthodes consiste à rechercher le point de puissance maximale (PPM), tout en garantissant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge.

L'étude de plusieurs techniques MPPT constitue l'objectif de ce chapitre, où elles sont classées selon leurs principes de fonctionnement. Les plus courantes sont :

- Hill Climbing
- Perturb and Observe (P&O)
- Conductance incrémentale (Incremental Conductance)
- Commande par logique floue (Fuzzy Logic Control)
- Réseaux de neurones (Neural Networks)

3.2 Historique

Le concept de Maximum Power Point Tracking (MPPT) est apparu dans les années 1960, dans le cadre du développement des technologies solaires destinées principalement aux applications spatiales, où l'optimisation du rendement énergétique représentait un enjeu majeur.

Les premières solutions reposaient sur des techniques analogiques, offrant des performances relativement limitées ainsi qu'une faible capacité d'adaptation. L'évolution des stratégies MPPT s'est ensuite accélérée durant les années 1980 et 1990, avec l'apparition d'algorithmes devenus aujourd'hui classiques, notamment Perturb and Observe (P&O) et la conductance incrémentale (INC).

La méthode P&O consiste à introduire une perturbation sur la tension de fonctionnement puis à analyser l'évolution de la puissance, tandis que la technique INC s'appuie sur la comparaison entre la conductance instantanée et sa variation afin de déterminer la position du point de puissance maximale

À partir des années 2000, le développeme.

nt des systèmes de commande numériques, tels que les microcontrôleurs et les processeurs de signal numérique (DSP), a permis la mise en œuvre concrète de méthodes MPPT plus évoluées. Cela a favorisé l'émergence de techniques basées sur la logique floue, les réseaux de neurones artificiels ainsi que les algorithmes génétiques, offrant un suivi plus précis et plus robuste face aux variations des conditions environnementales .

Depuis les années 2010, les approches MPPT dites intelligentes et hybrides se sont largement développées. Elles associent des méthodes classiques à des techniques issues de l'intelligence artificielle, telles que l'apprentissage profond et l'apprentissage par renforcement, permettant une meilleure efficacité notamment en cas d'ombrage partiel ou de variations rapides de l'irradiation

3.3 Premiers types de commande MPPT
BOEHRINGER a été parmi les premiers à introduire une commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques en 1968. Cette approche reposait sur un algorithme simple, facilement implémentable sous forme numérique .

Cette technique avait été initialement conçue pour des applications spatiales, où les variations de température et d'ensoleillement sont relativement faibles comparées aux conditions rencontrées dans les systèmes terrestres.

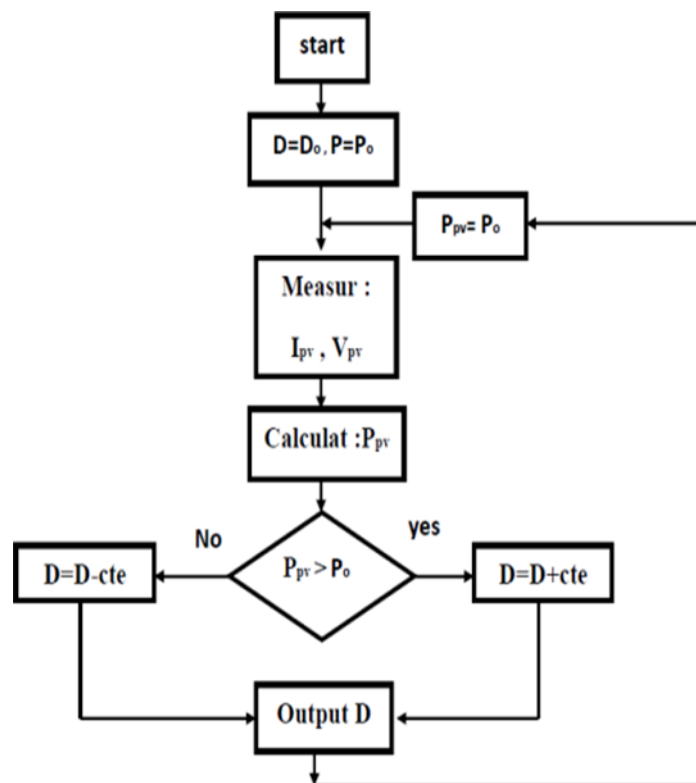


Figure 54 Organigramme de la première méthode de commande MPPT

3.4 Principe de la commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en permanence sa puissance maximale.

Ainsi, quelles que soient les conditions climatiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement optimal, correspondant à la puissance maximale (VPPM et IPPM).

La chaîne de conversion photovoltaïque est ainsi optimisée grâce à un convertisseur statique (CS) piloté par une commande MPPT.

Ce système peut être représenté par le schéma de la figure

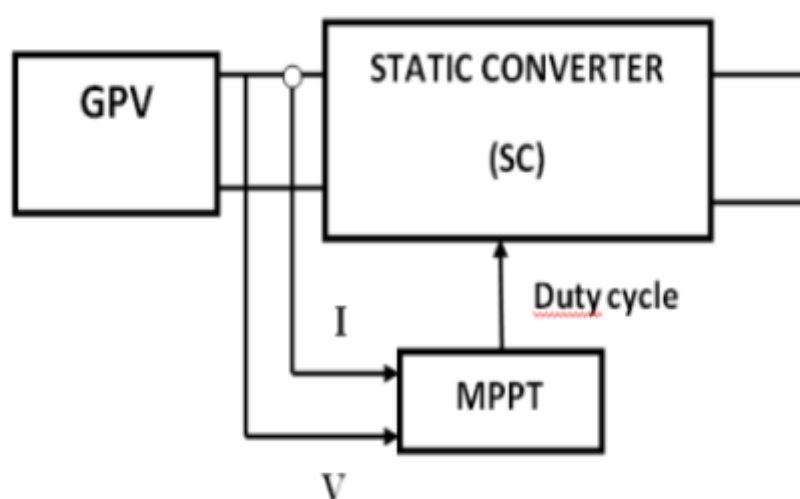


Figure 55 Chaîne de conversion de l'énergie solaire

Le contrôle MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), en utilisant un signal électrique approprié, afin d'obtenir la puissance maximale que le générateur photovoltaïque (GPV) peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins complexe pour localiser le point de puissance maximale (PPM). En général, il repose sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de celui-ci (I et V, et par conséquent la puissance du GPV) jusqu'à ce que le système soit positionné sur le PPM.

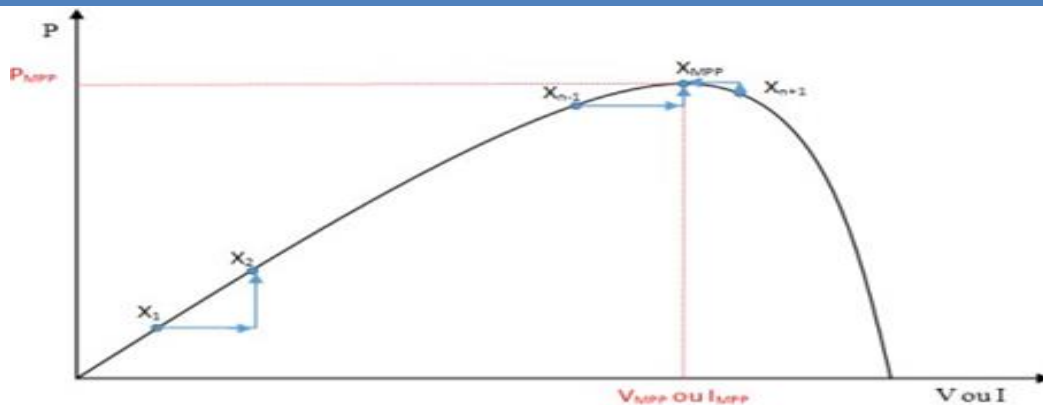


Figure 56 Principe de la commande MPPT

3.5 État de l'art des techniques MPPT dans les applications photovoltaïques

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer : elle est égale au produit de la tension par le courant. Cependant, la détermination de la puissance de référence est plus complexe, car celle-ci dépend des paramètres météorologiques (température et irradiation). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend l'exploitation à puissance maximale plus difficile à réaliser.

Ainsi, une commande pour le suivi du point de puissance maximale (PPM) est nécessaire. Cette commande, appelée algorithme MPPT, peut être plus ou moins complexe. En général, elle repose sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à ce que celui-ci atteigne le PPM.

Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. De nombreux chercheurs se sont intéressés à rappeler et comparer les différentes techniques MPPT existantes [34]. BHATNAGAR cite plus de trente techniques MPPT dans son article . ESRAM et CHAPMAN comparent plusieurs algorithmes MPPT selon leur dépendance aux paramètres des panneaux solaires et la complexité de leur mise en œuvre.

Selon PASTOR, ces méthodes peuvent être classées selon :

- Le type de mise en œuvre électronique : analogique, numérique ou mixte
- Les paramètres d'entrée de la commande : commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée ou de sortie du convertisseur statique (CS)

- Le type de recherche ou de contrôle effectué.

3.6 Classification des commandes MPPT

On peut classer de manière générale les commandes MPPT selon le type de mise en œuvre électronique : analogique, numérique ou mixte. Cependant, il est plus intéressant de les classer selon le type de recherche effectuée et les paramètres d'entrée de la commande MPPT.

3.6.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

3.6.1.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Certaines commandes MPPT recherchent le PPM en fonction de l'évolution de la puissance fournie par le GPV. C'est le cas, par exemple, de la méthode Hill Climbing, de Perturb & Observe (P&O) et des algorithmes de conductance incrémentale, qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour appliquer la commande.

Une action de commande appropriée pour le suivi du point de puissance maximale (PPM), ou pour les commandes basées sur

Les relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximale ($VOPT$ et $IOPT$) et les paramètres caractéristiques du module photovoltaïque (VOC et ISC) sont particulièrement exploitées dans les MPPT inspirés des réseaux de neurones. Dans ces approches, on utilise soit de grands systèmes de mémoire informatique ayant stocké tous les cas possibles, soit des commandes plus approximatives. Tous ces types de commandes présentent l'avantage d'une grande précision et d'une réaction rapide .

3.6.1.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, on trouve également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du CS. Par exemple, certaines commandes MPPT visent à maximiser le courant de sortie, principalement utilisées lorsque la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est réalisée à travers le rendement du convertisseur. En résumé, plus l'étage de conversion est performant, plus cette approximation est valide.

Cependant, de manière générale, tous les systèmes utilisant un seul capteur sont intrinsèquement imprécis. La plupart de ces systèmes ont été initialement conçus pour des applications spatiales .

3.6.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

3.6.2.1 MPPT indirect

Ce type de commande MPPT exploite le lien entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), facilement déterminables, et la position approximative du MPP. Il inclut également les commandes basées sur une estimation du point de fonctionnement du GPV à partir d'un modèle paramétrique prédéfini.

On trouve aussi des commandes qui établissent un suivi optimal de la tension en prenant en compte uniquement les variations de température des cellules mesurées par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre et sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis, opérant dans des zones géographiques où les changements climatiques sont faibles .

3.6.2.2 MPPT direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurées dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures reposent sur un algorithme de recherche, permettant de déterminer le maximum de la courbe de puissance sans interrompre le fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée à intervalles réguliers.

- Si la puissance de sortie augmente, la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante.
- Sinon, elle est inversée.

Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être conservé et amélioré par d'autres algorithmes pour éviter des erreurs d'interprétation, pouvant survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche.

Une augmentation de la puissance peut survenir à la suite d'une hausse rapide du niveau d'irradiation. La détermination de la valeur de la puissance du générateur photovoltaïque, essentielle pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

D'autres algorithmes reposent sur l'introduction de variations sinusoïdales de petit signal sur la fréquence de commutation du convertisseur, afin de comparer la composante alternative

(AC) et la composante continue (DC) de la tension du GPV, et ainsi positionner le point de fonctionnement le plus proche possible du MPP.

L'avantage de ces types de commandes réside dans leur précision et leur rapidité de réaction.

3.6.3 Hill Climbing

3.6.3.1 Définition

La méthode Hill Climbing est une technique d'optimisation permettant de trouver une solution locale optimale à un problème computationnel. Il s'agit d'une méthode itérative, appartenant à la famille des recherches locales.

3.6.3.2 Principe de fonctionnement

La technique de contrôle Hill Climbing consiste à appliquer une perturbation sur le rapport cyclique, ce qui entraîne un déplacement du point de fonctionnement le long de la caractéristique puissance – rapport cyclique du générateur photovoltaïque. Théoriquement, la recherche s'arrête lorsque le point de puissance maximale (MPP) est atteint .

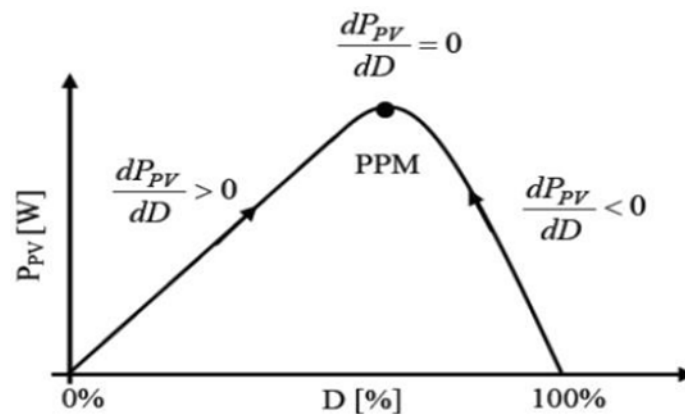


Figure 57 Relation entre la puissance et le rapport cyclique [35]

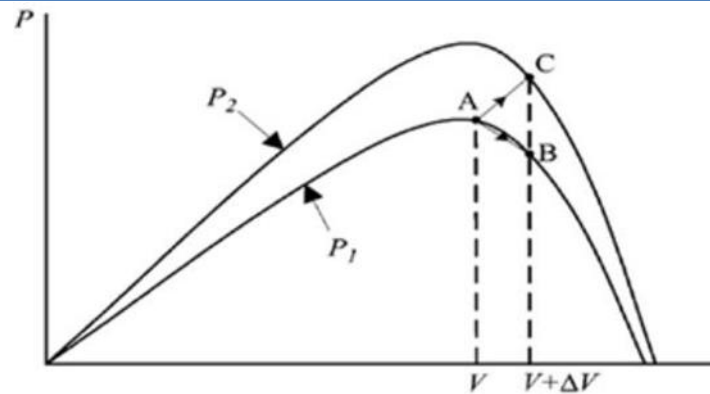


Figure 58 Écart par rapport au point de puissance maximale (MPP) [36]

Plus précisément, le principe de fonctionnement consiste à mesurer périodiquement la tension PV (V_{pv}) et le courant PV (I_{pv}), afin de calculer la puissance instantanée du PV (P_{pv}). Ensuite, une perturbation du rapport cyclique (D) du convertisseur DC/DC est appliquée de manière à ce que sa direction rapproche le point de fonctionnement du MPP [37,38]. La modification du rapport cyclique affecte directement la valeur de I_{pv} , ce qui entraîne par conséquent une variation de V_{pv} [39]. La direction de la perturbation dépend de la comparaison entre la puissance P_{pv} actuelle et la mesure précédente, et elle est appliquée avec un pas fixe [38].

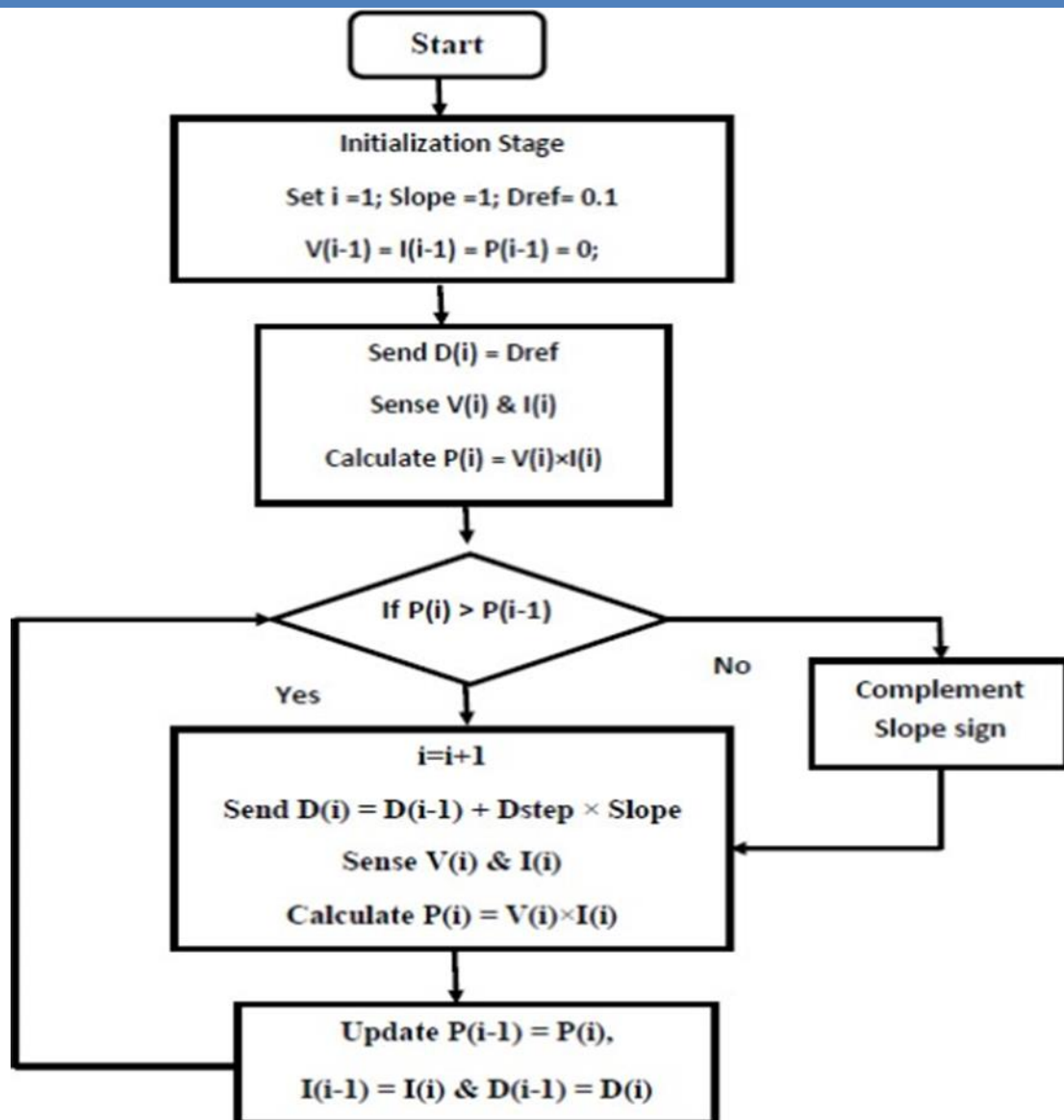


Figure 59 Organigramme de l'algorithme MPPT Hill Climbing conventionnel [35]

Dans la méthode Hill Climbing (HC), à chaque itération i , l'algorithme commence par mesurer la tension $V(i)$ et le courant $I(i)$ du module PV, puis calcule la puissance correspondante :

$$P(i) = V(i).I(i) \quad (\text{III. 1})$$

Ensuite, le rapport cyclique (D) du convertisseur est perturbé par un pas d'incrément de rapport cyclique (D_{step}), et la variation de puissance est obtenue :

$$\Delta P = P(i + 1) - P(i) \quad (III. 2)$$

- Si ΔP est positive, la perturbation est dans la bonne direction, et une nouvelle perturbation est appliquée dans la même direction pour atteindre le MPP.
- Si ΔP est négative, la direction de la perturbation est inversée, ce qui indique que le suivi s'éloigne du MPP.

L'organigramme de l'algorithme HC est présenté à la Figure [35].

3.6.3.3 Objectif de l'utilisation de la méthode Hill Climbing

L'objectif de l'utilisation d'un MPPT est d'extraire la puissance maximale du module PV quelles que soient les conditions atmosphériques variables, en particulier les variations de l'irradiation solaire.

Pour ce faire, l'algorithme MPPT perturbe le rapport cyclique du convertisseur DC-DC afin d'adapter la résistance de charge telle qu'elle est vue par la source (R_{in}) à la résistance interne optimale du module PV (R_{MPP}).

Dans ce travail, l'algorithme Hill Climbing conventionnel, tel que discuté dans , a été appliqué pour suivre le MPP lors de changements soudains d'irradiation solaire.

Pratiquement, il peut remplacer un contrôleur MPPT coûteux par un contrôleur moins cher, tout en maintenant des résultats proches de l'optimum.

3.6.3.4 Avantages et inconvénients de la technique Hill Climbing

Cette technique se caractérise principalement par sa facilité de mise en œuvre et ses calculs simples [40]. Ainsi, avec la méthode P&O, c'est une technique largement utilisée parmi tous les algorithmes MPPT [42,41].

Cependant, l'algorithme HC présente certains inconvénients. En raison des changements rapides des conditions environnementales, tels que les nuages passants, des écarts par rapport au MPP peuvent apparaître [33]. Cela se produit car la courbe caractéristique du module PV change. Selon [42], ce changement peut devenir problématique si la variation de puissance causée par différentes intensités d'irradiation est plus importante que celle produite par la perturbation.

3.6.4 Algorithme Perturb & Observe (P&O)

L'algorithme Perturb & Observe stipule que lorsque la tension de fonctionnement du panneau PV est perturbée par un petit incrément, si le changement de puissance résultant ΔP est

positif, alors la perturbation se dirige vers le MPP, et l'on continue à perturber dans la même direction.

Si ΔP est négatif, on s'éloigne du MPP, et le signe de la perturbation appliquée doit être inversé.

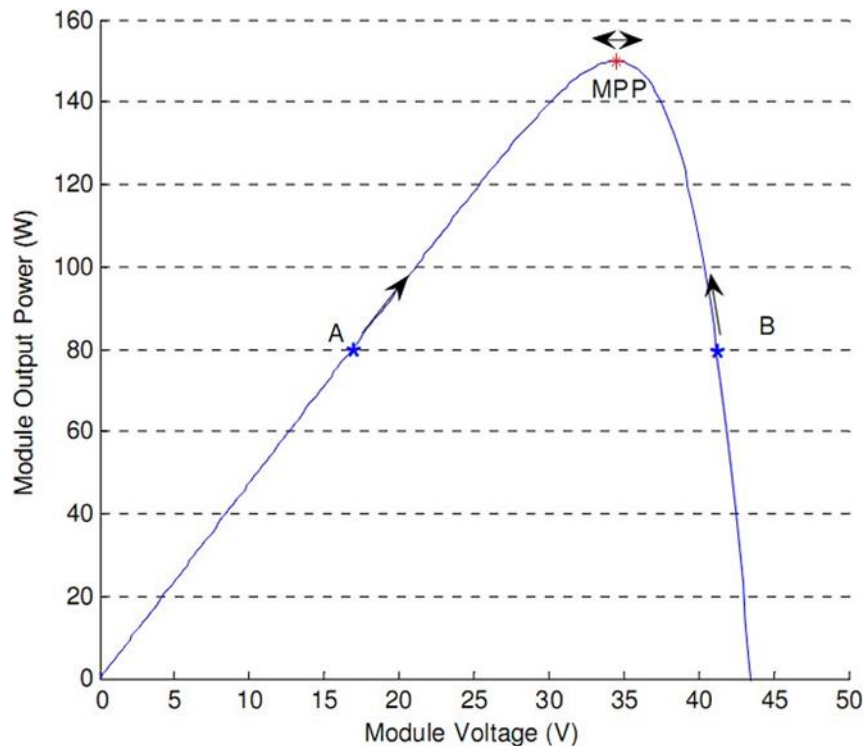


Figure 60Caractéristiques du panneau solaire montrant le point de puissance maximale (MPP) et les points de fonctionnement A et B [69]

La Figure montre le graphe de la puissance de sortie du module en fonction de la tension du module pour un panneau solaire à un niveau d'irradiation donné. Le point marqué MPP correspond au Point de Puissance Maximale, soit la puissance maximale théorique que le panneau PV peut fournir.

Les points A et B représentent deux points de fonctionnement. Comme illustré dans la figure, le point A se situe à gauche du MPP. Ainsi, il est possible de se rapprocher du MPP en appliquant une perturbation positive de la tension.

En revanche, le point B se situe à droite du MPP. Lorsque l'on applique une perturbation positive, la valeur de ΔP devient négative, et il est donc impératif d'inverser la direction de la perturbation afin d'atteindre le MPP.

L'organigramme de l'algorithme P&O est présenté dans la Figure

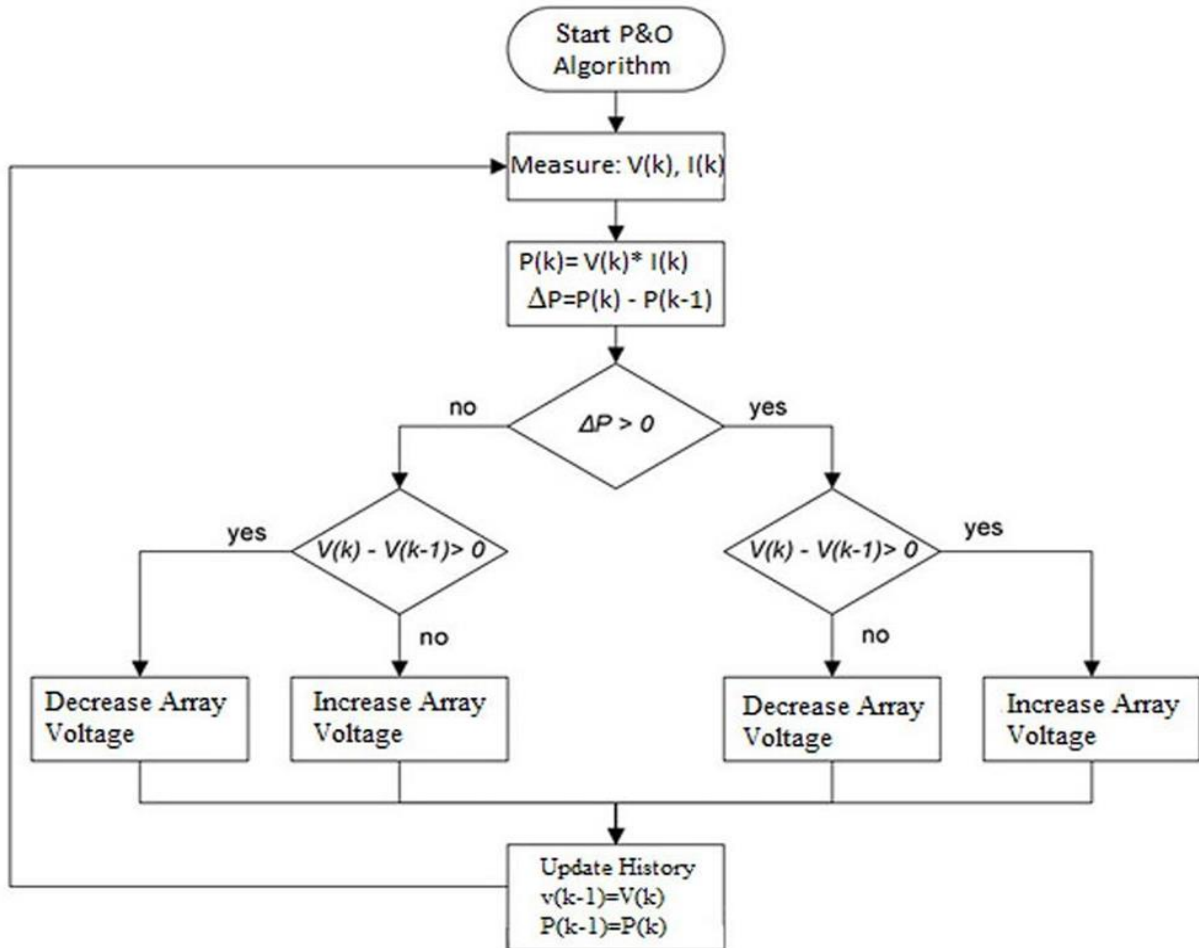


Figure 61 Organigramme de l'algorithme Perturb & Observe (P&O)

Limitations de l'algorithme Perturb & Observe (P&O)

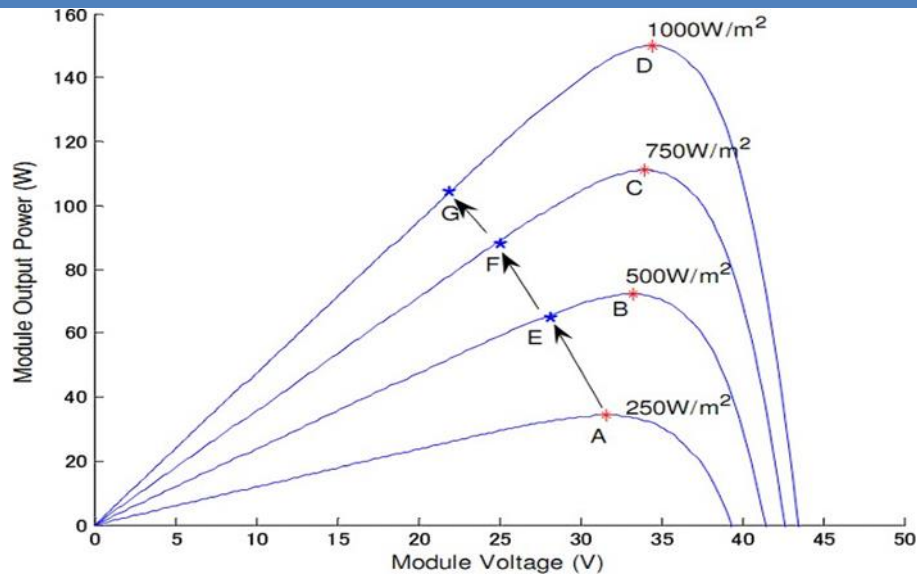


Figure 62 Courbe montrant un suivi incorrect du point de puissance maximale (MPP) par l'algorithme P&O sous une irradiation rapidement variable [39]

Dans une situation où l'irradiation varie rapidement, le MPP se déplace également vers la droite de la courbe. L'algorithme interprète ce déplacement comme un changement dû à la perturbation, et à l'itération suivante, il inverse la direction de la perturbation, s'éloignant ainsi du MPP, comme illustré dans la figure.

Cependant, dans cet algorithme, un seul capteur est utilisé, à savoir le capteur de tension, pour mesurer la tension du module PV, ce qui réduit le coût de mise en œuvre et rend l'implémentation plus facile.

La complexité temporelle de cet algorithme est très faible, mais lorsqu'il atteint une proximité très proche du MPP, il ne s'arrête pas au MPP et continue à perturber dans les deux directions. Lorsque cela se produit, l'algorithme est déjà très proche du MPP, et il est possible de définir une limite d'erreur appropriée ou d'utiliser une fonction d'attente (wait function), ce qui augmente la complexité temporelle de l'algorithme.

3.6.4.1 Objectif de l'utilisation de la méthode Perturb & Observe

L'objectif de la méthode P&O est de modifier la tension ou le courant de fonctionnement du panneau PV jusqu'à obtenir la puissance maximale et d'assurer une performance stable et un rendement énergétique élevé Efficacité d'utilisation

3.6.4.2 Avantages et inconvénients de la technique Perturb & Observe (P&O)

L'algorithme P&O offre une performance stable et une haute efficacité d'utilisation de l'énergie, lorsque la taille du pas et la fréquence de perturbation sont choisies de manière appropriée [43].

Cependant, cette méthode présente un inconvénient lors de changements rapides de l'ensoleillement. Dans ce cas, la puissance du point de recherche peut être perturbée par la variation de l'irradiation et non par la perturbation de l'algorithme. Cela peut entraîner une dérive de l'algorithme, nécessitant plus de temps pour revenir dans la bonne direction et pour atteindre le PPM [43].

La Figure 62 illustre ce problème. Supposons que nous soyons au point A, avançant vers la droite dans la bonne direction de recherche ($\Delta V > 0$). Si l'ensoleillement reste constant (ou varie lentement), la prochaine puissance mesurée au point B est plus élevée ($\Delta P > 0$), ce qui nous permet d'augmenter la tension V et de nous rapprocher du PPM.

Mais si un changement soudain de lumière se produit (une diminution dans notre exemple), nous atteignons le point C, et la puissance devient plus faible ($\Delta V > 0$ et $\Delta P < 0$), entraînant une réduction de la tension et, par conséquent, un éloignement du PPM [43]

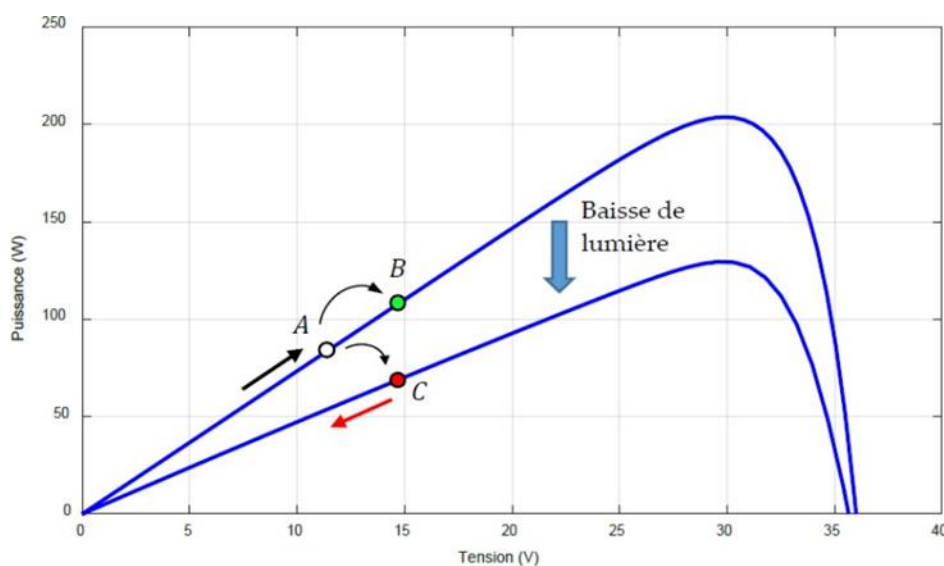


Figure 63 Variation rapide de la température dans le cas du MPPT avec l'algorithme P&O [43]

Le problème dans ce cas est que nous surveillons la variation de la puissance sur la courbe P-V pour déterminer si nous sommes à gauche ou à droite du PPM.

Ce problème est résolu par la méthode Incremental Conductance (IC), qui consiste à surveiller la pente de cette courbe (en tenant compte de la variation du courant), ce qui indique réellement la position du point de recherche sur la courbe relation avec le PPM. Nous remarquons que, même en cas de changement abrupt de l'ensoleillement, la pente de la courbe reste du même signe, ce qui maintient la recherche dans la même direction. Cette méthode sera détaillée dans le paragraphe suivant.

3.6.5 Méthode Incremental Conductance (IC)

3.6.5.1. Définition

La méthode Incremental Conductance est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Cette technique repose sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement [44,45].

3.6.5.2 Principe de fonctionnement

La conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV, comme illustré ci-dessous [46,47].

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III. 3})$$

Ainsi, une variation élémentaire (incrément) de la conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{d \ln(pv)}{d v(pv)} \quad (\text{III. 4})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension indique la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

- Lorsque la dérivée de la puissance est nulle, cela signifie que nous sommes sur le PPM.
- Si elle est positive, le point de fonctionnement se situe à gauche du maximum.

- Si elle est négative, il se situe à droite du maximum.

La Figure 63 permet d'écrire les conditions suivantes :

- if $dP_{pv}/dv > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM
- if $dP_{pv}/dv < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM
- if $dP_{pv}/dv = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM

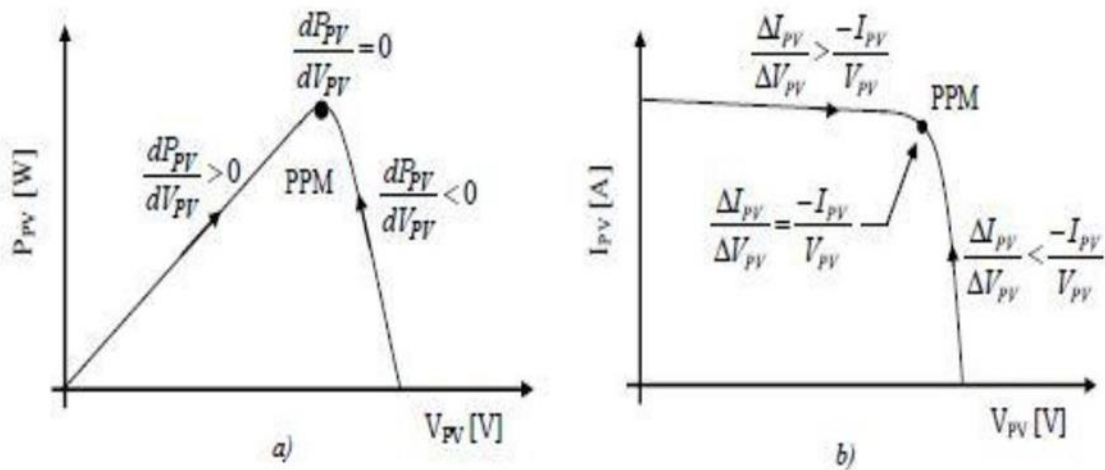


Figure 64 Position du point de fonctionnement selon le signe de la dérivée de la conductance G [80]

Le lien entre la conductance, donné par l'équation , et la dérivée de la puissance

$\frac{dP(pv)}{dV(pv)}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP(pv)}{dV(pv)} = I(pv) + \frac{dI(pv)}{dV(pv)} V(pv) \approx I(pv) + \frac{\Delta I(pv)}{\Delta V(pv)} V(pv) \quad (III.5)$$

À partir de là, on peut alors formuler de nouvelles conditions sur la variation de la conductance.

- If $\frac{\Delta I(pv)}{\Delta V(pv)} > \frac{I(pv)}{V(pv)}$ Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- If $\frac{\Delta I(pv)}{\Delta V(pv)} < \frac{I(pv)}{V(pv)}$ Le point de fonctionnement est à droite du PPM.
- If $\frac{\Delta I(pv)}{\Delta V(pv)} = -\frac{I(pv)}{V(pv)}$ Le point de fonctionnement est sur le PPM.

La puissance maximale peut alors être suivie en comparant à chaque instant la valeur de la conductance $\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ avec celle de l'incrément de conductance $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V}$ comme illustré par l'algorithme de la Figure .

V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si nous sommes au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale $V_{\{ppm\}}$.

Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu à cette position jusqu'à ce qu'une variation survienne

$\Delta I_{\{pv\}}$ indique alors un changement des conditions climatiques, ce qui implique qu'un nouveau PPM doit être recherché. Pour ce faire, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM [47].

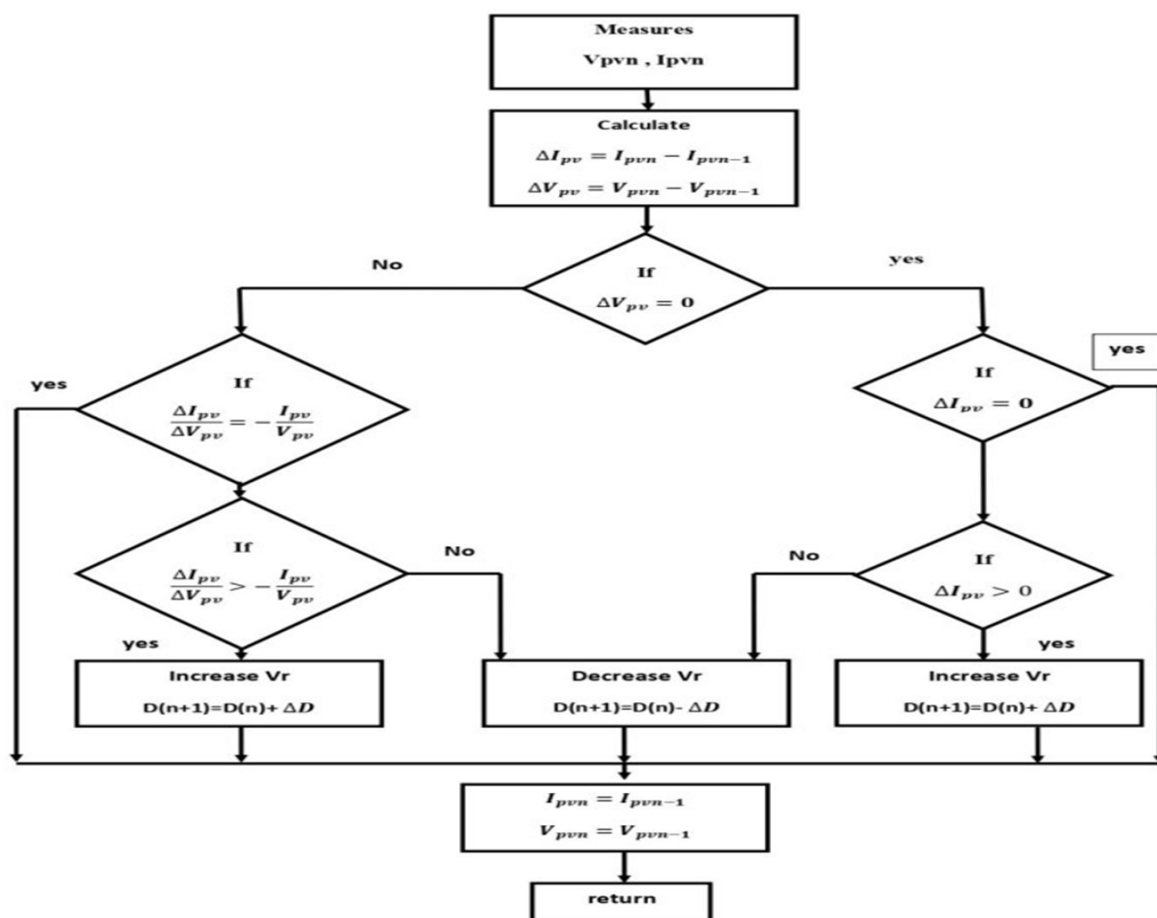


Figure 65 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incremental Conductance (IC) [47]

3.6.5.3. Objectif de l'utilisation de la méthode Incremental Conductance

L'objectif de l'utilisation de la méthode Incremental Conductance (IC) est de surveiller la variation de la puissance sur la courbe P-V afin de déterminer si le point de fonctionnement se situe à gauche ou à droite du PPM, jusqu'à obtenir la puissance maximale, tout en assurant une performance stable et une haute efficacité d'utilisation de l'énergie.

3.6.5.4. Avantages et inconvénients de la méthode Incremental Conductance

Le principal avantage de cet algorithme est qu'il est adapté aux conditions climatiques instables. Théoriquement, il est possible de trouver un PPM et de s'y arrêter si la perturbation cesse. Dans ce cas, la variation de tension est nulle ; l'apparition d'une variation de courant permet d'ajuster la valeur de la tension de référence afin d'atteindre un nouveau PPM [46].

En pratique, le système présente une oscillation autour du PPM, similaire à celle de la commande P&O, à cause du bruit au niveau de l'acquisition des paramètres d'entrée $V_{\{pv\}}$ et $I_{\{pv\}}$, et de la difficulté pour le système d'analyser correctement si la relation est respectée ou non. En réalité, cette condition n'étant jamais parfaitement obtenue, le système continue sa recherche.

Comparé à la commande P&O, le temps d'exécution de l'algorithme est plus long, car ce dernier est plus complexe. Par conséquent, l'intervalle entre deux échantillons de tension et de courant est augmenté, provoquant un retard dans la détection des variations climatiques [46].

3.7. Application des techniques d'intelligence artificielle

3.7.1. Contrôle par logique floue (Fuzzy Logic Control, FLC)

3.7.1.1. Définition

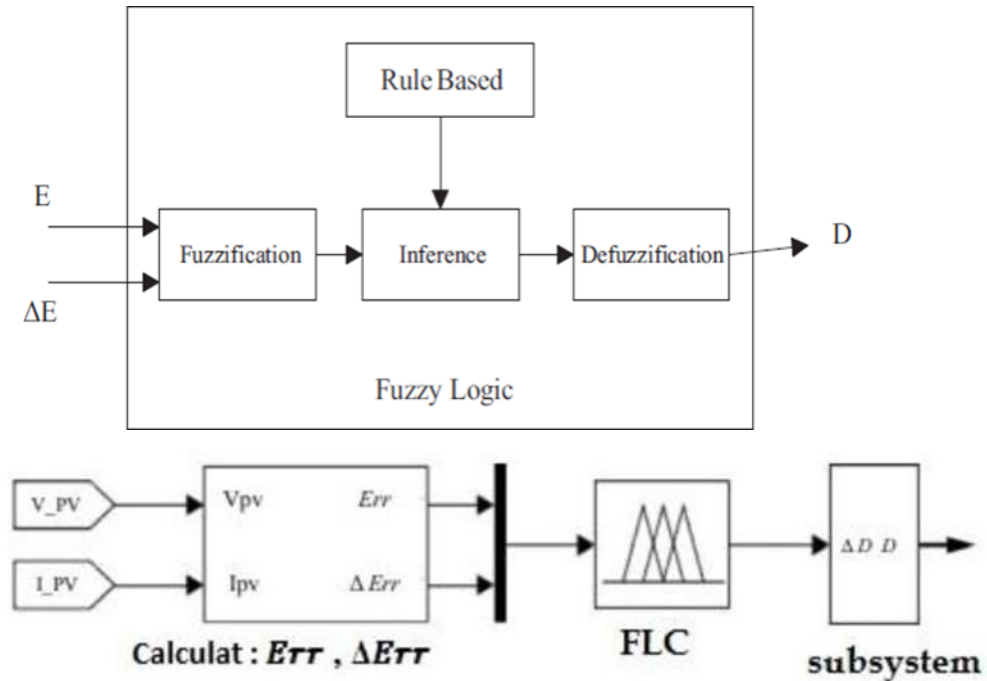
La logique floue est une forme de logique qui repose sur le raisonnement approximatif plutôt que sur des valeurs fixes et exactes. Contrairement à la logique traditionnelle, qui définit typiquement la logique binaire comme vraie ou fausse, la logique floue peut adopter des valeurs variables. Les variables de la logique floue peuvent avoir des valeurs vraies ou fausses à différents degrés et être exprimées par des variables linguistiques. Dans ce contexte, le contrôle par logique floue peut fournir à la fois une grande rapidité de traitement et la précision nécessaire .

3.7.1.2. Principe de fonctionnement

Le contrôleur flou se compose de trois blocs fonctionnels : la fuzzification, les règles d'inférence, et la défuzzification .

Dans le système proposé, les variables d'entrée du FLC sont : l'erreur (Err) et la variation de l'erreur (ΔErr), tandis que la sortie du FLC est la variation du rapport cyclique (ΔD) [49].

Le bloc du contrôleur flou FLC est présenté dans la Figure .



Les deux entrées (l'erreur et la variation de l'erreur) sont déterminées à partir de la puissance et de la tension de sortie du générateur photovoltaïque (PV), et elles sont exprimées par [48] :

$$\{Err\} = \frac{(P(k) - P(k - 1))}{(V(k) - V(k - 1))} \quad (III. 6)$$

Avec

$$P(k) = V_{\{pv\}(k)} \cdot I_{\{pv\}(k)} \quad (III. 7)$$

Et

$$\Delta Err = Err(k) - Err(k - 1) \quad (III. 8)$$

Dans le processus de fuzzification, les variables d'entrée Err et ΔErr , ainsi que la variable de sortie ΔD , sont converties en variables linguistiques en leur attribuant des fonctions d'appartenance [50,44]

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, celles-ci doivent être soumises à une définition mathématique basée sur des fonctions d'appartenance, qui indiquent le degré de vérification de ces variables vis-à-vis des différents sous-ensembles [51].

Les fonctions d'appartenance Err , ΔErr et ΔD sont présentées dans la Figure Il existe plusieurs types de fonctions d'appartenance : triangulaires, gaussiennes, trapézoïdales, etc. [52].

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par des fonctions triangulaires et trapézoïdales, donc par des segments de droite. Elles sont alors dites linéaires par morceaux (piecewise linear).

Ces fonctions sont largement utilisées en raison de leur simplicité et du fait qu'elles incluent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie ou fausse, ce qui facilite la formalisation des connaissances expertes [51].

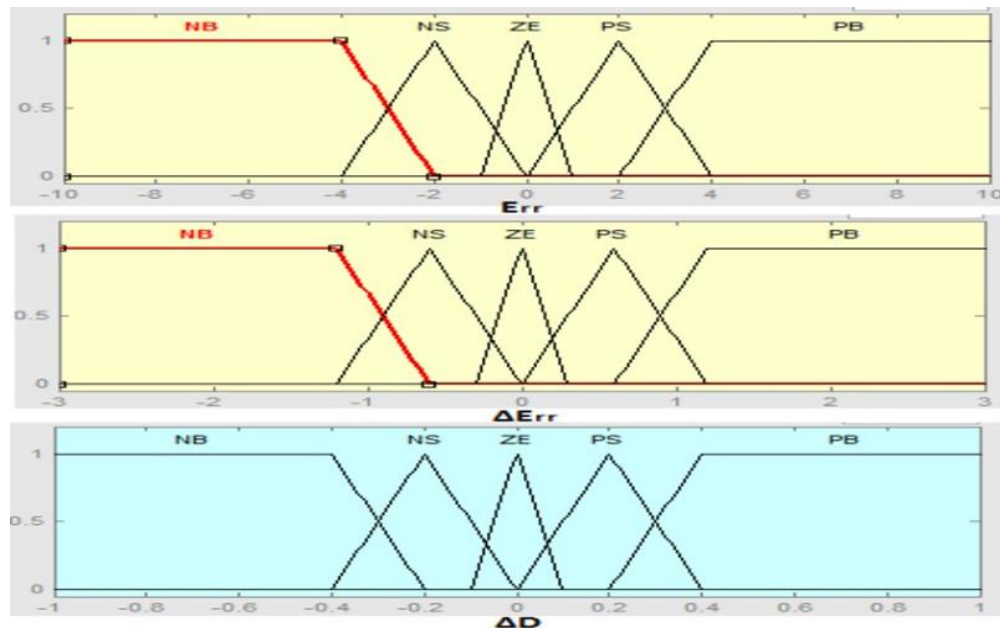


Figure 66 Fonctions d'appartenance des entrées Err , ΔErr et de la sortie ΔD

ΔE_{rr}	PB	PS	ZE	NS	NB
E_{rr}	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	PB	PB	PB	PB	ZE
PS	PB	PB	PS	ZE	PS
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
NS	NS	ZE	NS	NB	NB
NB	ZE	NB	NB	NB	NB

Figure 67 Règles floues pour les variables d'entrée et de sortie

Après l'étape de fuzzification, commence l'étape d'inférence, au cours de laquelle sont établies les règles floues permettant de déterminer la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation. Les règles floues relient la variable de sortie aux variables d'entrée afin de tirer des conclusions ou inférences floues

Une règle floue comporte une prémisse, telle que :

« Si l'erreur est négative petite ET la variation de l'erreur est négative grande »,

et une conclusion, telle que :

« Alors la variation du rapport cyclique est positive grande » [52].

Dans notre cas, les deux variables d'entrée sont chacune définies par 5 ensembles flous, ce qui conduit à un total de 25 règles floues. Le Tableau III.1 présente les différentes règles floues des variables d'entrée et de sortie utilisées dans le contrôleur flou. L'erreur $Err(k)$ représente la pente de la courbe $P(V)$. Plus le point de fonctionnement se rapproche du MPP, plus $Err(k)$ tend vers zéro.

La variation de l'erreur $\Delta Err(k)$ est utilisée pour déterminer l'amplitude de la variation du rapport cyclique, afin de l'augmenter ou de le diminuer [50]. Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'algorithme MPPT basé sur la logique floue, la courbe $P(V)$ est divisée en trois régions .

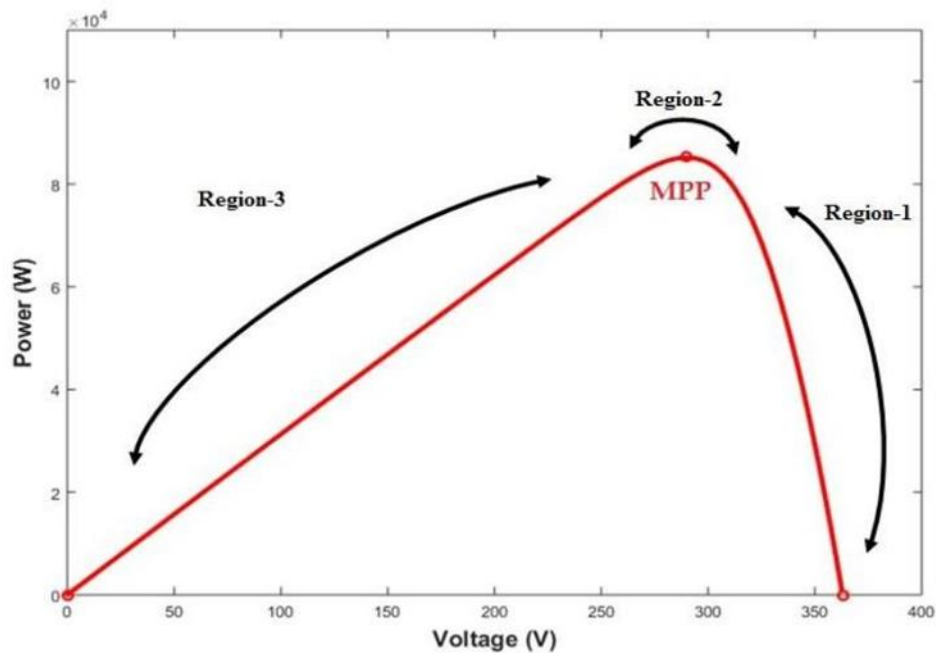


Figure 68 Courbe du module photovoltaïque indiquant les différentes régions pour l'ensemble des règles floues

3.7.1.3. Région 1

- La pente de la courbe PV, c'est-à-dire $Err(k)$, est négative dans cette région. Cela indique que le point de fonctionnement du module PV se situe à droite du MPP, et que le rapport cyclique doit être diminué afin de suivre le MPP.
- Pour que le point de fonctionnement se rapproche du MPP depuis la droite, $Err(k)$ doit être NS (négatif petit) et $\Delta Err(k)$ doit être positif. Dans ce cas, la sortie est fixée à ZE (zéro) afin d'éviter les oscillations du système.

3.7.1.4. Région 2

- Dans cette région, $Err(k)$ est ZE (zéro), ce qui indique que le point de fonctionnement est proche du MPP. Par conséquent, le principe consiste à maintenir le même rapport cyclique dans ces conditions.
- Si $\Delta Err(k)$ est NB (négatif grand), le point de fonctionnement se rapproche du MPP depuis la gauche. Afin d'éviter que ce point ne dépasse vers la droite du MPP, la règle de commande doit être PS (positif petit) pour réduire la variation du rapport cyclique dans le sens opposé.

3.7.1.5. Région 3

- Lorsque Err(k) est positif, le point de fonctionnement se situe à gauche du MPP. Le rapport cyclique doit donc être augmenté.
- La valeur de $\Delta \text{Err}(k)$ est utilisée pour déterminer l'amplitude de l'augmentation du rapport cyclique.
- Lorsque $\Delta \text{Err}(k)$ est négatif à ce point, le point de fonctionnement se rapproche du MPP depuis la gauche. Dans ce cas, le contrôleur doit ajuster la sortie à ZE (zéro) afin d'éviter une augmentation excessive du rapport cyclique et les oscillations du système autour du point de fonctionnement.

Après avoir établi les règles d'inférence décrivant le fonctionnement, il est nécessaire d'indiquer à l'ordinateur la procédure (algorithme mathématique) à suivre afin de déterminer la forme de la fonction d'appartenance de la variable de sortie, en fonction des valeurs des variables d'entrée prédéfinies et des règles d'inférence [53].

Il existe plusieurs méthodes d'inférence, parmi lesquelles la méthode « MAX-MIN ».

Dans cette méthode, appelée également implication de Mamdani :

- L'opérateur « AND » est réalisé par le minimum,
- L'opérateur « OR » est réalisé par le maximum,
- L'opérateur « THEN » est également réalisé par le minimum. L'opérateur « OR », qui relie les différentes règles, est obtenu par la formation du maximum [86].

La sortie du contrôleur flou (FLC) correspond à la variation du rapport cyclique. Le processus de défuzzification permet de convertir la valeur linguistique de sortie en une valeur réelle.

Plusieurs techniques de défuzzification ont été proposées dans la littérature, parmi lesquelles la plus utilisée est la méthode du centre de gravité (COG) ou centroïde . Dans cette méthode, le défuzzificateur détermine le centre de gravité et utilise cette valeur comme sortie du FLC.

Le centre de gravité est donné par [50]

$$\Delta d = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \cdot d_i)}{(\sum_{i=1}^n w_i)} \quad (\text{III. 9})$$

Où :

- Δd est la valeur nette (net value),
- w_i est le facteur de pondération (weighting factor),
- Δd_i est la valeur correspondant à la fonction d'appartenance (membership function) de Δd .

La sortie du FLC correspond à la variation du rapport cyclique (Δd), exprimée par :

$$d(k) = d(k - 1) + s \cdot \Delta d \quad (\text{III. 10})$$

3.7.1.6. Objectif de l'utilisation de la logique floue

La théorie de la logique floue est l'une des rares théories à s'être donnée pour objectif de reproduire les performances humaines. L'idée consiste à examiner comment l'homme se construit un modèle de tout ce qui l'entoure et comment il utilise ce modèle pour se doter de stratégies lui permettant de maîtriser et contrôler son environnement.

3.7.1.7. Avantages et inconvénients de la logique floue

Les principaux avantages des contrôleurs MPPT basés sur les techniques d'IA sont la rapide convergence et la grande précision du suivi. La logique floue ne nécessite aucun modèle mathématique précis. De plus, elle peut offrir une performance élevée dans le contrôle de systèmes non linéaires de complexité arbitraire en intégrant l'expérience humaine dans le processus de conception du contrôle [53].

Cependant, bien que la commande MPPT floue occupe une place respectable parmi de nombreuses méthodes MPPT proposées dans la littérature, la conception d'une commande MPPT floue présente certaines difficultés, liées au choix optimal des paramètres des fonctions d'appartenance du contrôleur flou associé à la commande MPPT.

3.7.2. Théorie des réseaux de neurones

Avant d'utiliser le réseau, plusieurs étapes doivent être suivies pour valider et tester le réseau, comme illustré dans les sections suivantes.

3.7.2.1. Définition d'un réseau de neurones

Un réseau de neurones est constitué de nombreux éléments simples fonctionnant en parallèle. Les connexions entre ces éléments créent le réseau. Le but de ce réseau est de prédire une sortie sur la base de l'entraînement effectué avec des entrées et des cibles. Chaque connexion entre deux neurones possède un poids, utilisé pour ajuster le réseau, c'est-à-dire modifier les poids jusqu'à ce que les sorties atteignent les cibles. Actuellement, les réseaux de neurones sont utilisés dans divers domaines, tels que l'identification, la classification, la parole, la vision et les systèmes de contrôle [54].

3.7.2.2 Modèle de neurone

Le neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il se connecte aux entrées via un poids. Chaque neurone possède une sortie (a) et est associé à une fonction de transfert (f) [55]. Certains neurones sont également associés à un biais (b), qui peut être un scalaire simple ou comme un poids (W) avec une entrée égale à un [54]. La figure suivante montre la structure d'un neurone artificiel.

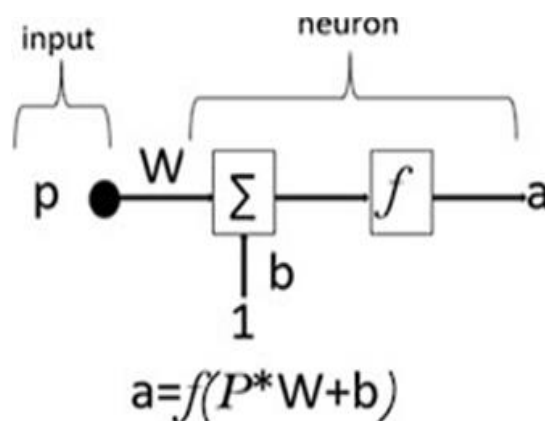


Figure 69 Structure du neurone à une seule entrée

La structure du neurone à entrées multiples est présentée dans la figure suivante

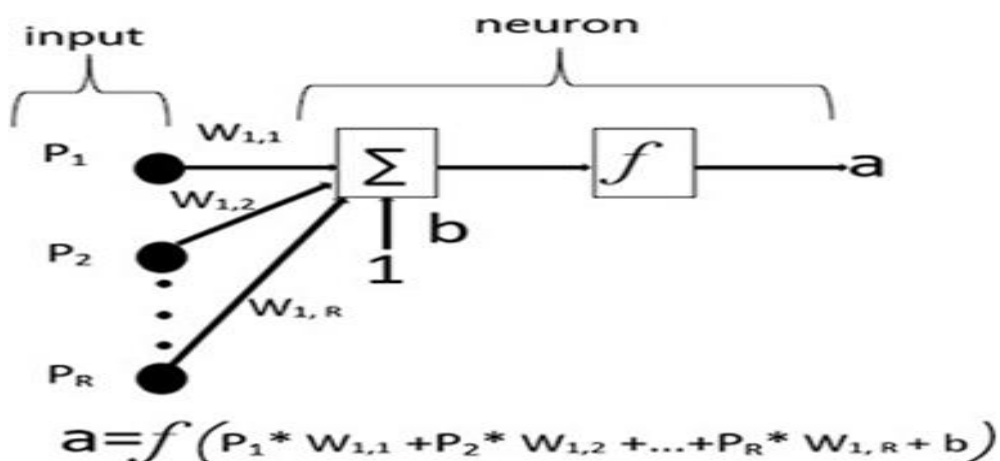


Figure 70 La structure du neurone à R entrées

3.7.2.3 Fonctions de transfert

Il existe de nombreuses fonctions de transfert, les plus utilisées sont :

- La fonction de transfert à seuil (hard-limit), qui renvoie soit 0 soit 1, présentée à la figure
- La fonction linéaire, qui est une fonction de transfert neuronale.

Les fonctions de transfert permettent de calculer la sortie d'une couche à partir de son entrée nette. L'équation montre la fonction de transfert linéaire :

$$f(x) = x$$

L'équation décrit la fonction de transfert log-sigmoïde.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (\text{III. 11})$$

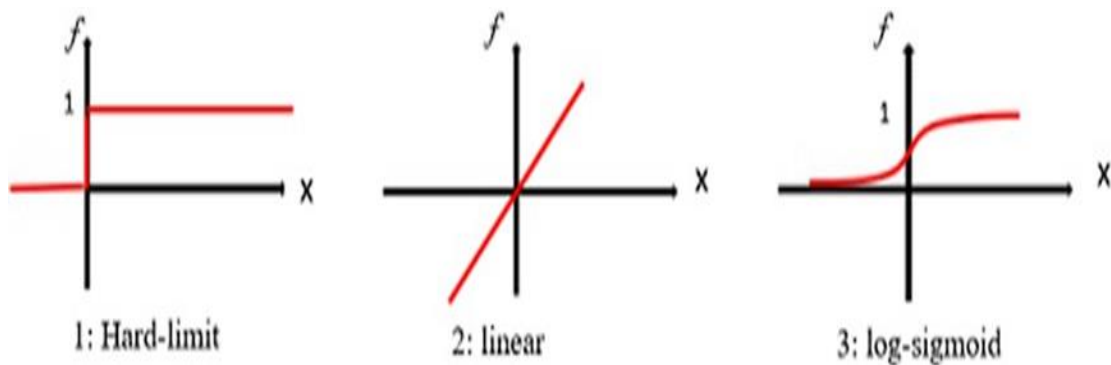


Figure 71 Les fonctions de transfert les plus utilisées

3.7.2.4. Architectures des réseaux

Plusieurs neurones forment une couche. La connexion entre ces couches constitue un réseau.

- La couche directement reliée aux entrées est appelée couche d'entrée.
- La couche connectée à la sortie est appelée couche de sortie.
- Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées.

La première topologie de réseaux développée est le Feedforward, définie de manière à ce que chaque neurone d'une couche ne puisse se connecter qu'aux neurones de la couche suivante.

D'autre part, le Feedforward avec connexions raccourcies (shortcut connections) est un réseau qui permet à un neurone d'être connecté à des neurones de différentes couches [56].

Les figures présentent respectivement les réseaux Feedforward et Feedforward avec connexions raccourcies.

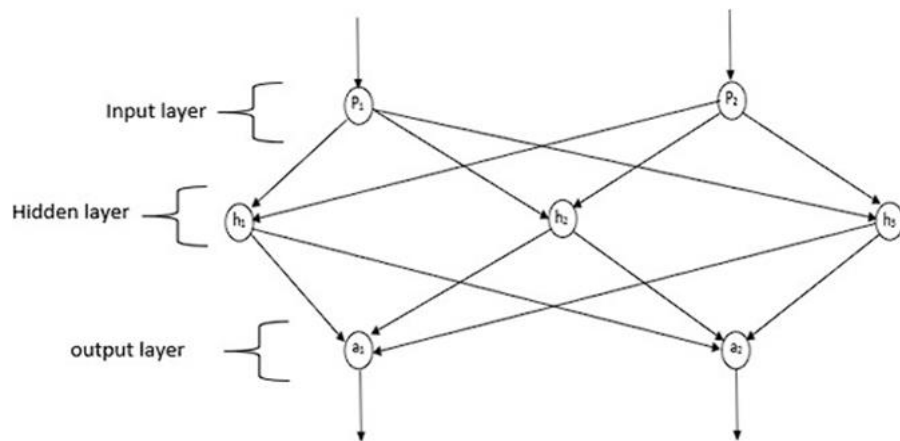


Figure 72 Réseau Feedforward

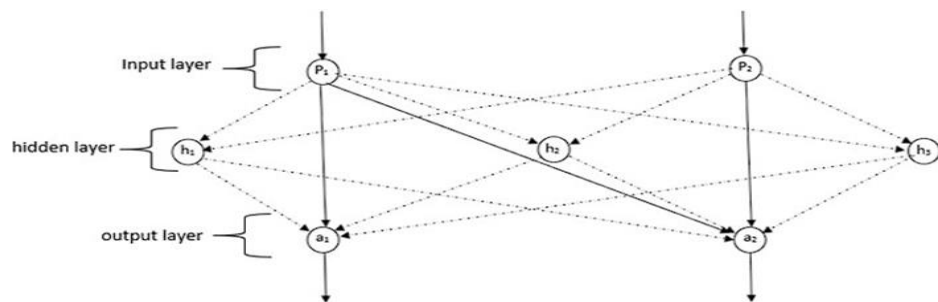


Figure 73 Feedforward network with shortcut connections

3.7.2.5 Étapes de conception d'un réseau de neurones

De bons résultats d'un réseau de neurones sont obtenus grâce à un entraînement approprié.

Les étapes standards pour la conception d'un réseau de neurones sont les suivantes [57] :

- Collecte des données
- Sélection de la structure du réseau
- Entraînement du réseau
- Test du réseau

3.7.2.6 L'erreur quadratique moyenne (MSE)

$$MSE = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_{\{k=1\}}^{\{N\}} (t_i - a_i) \quad (\text{III. 12})$$

La validation du réseau est justifiée par la convergence de la sortie vers la cible, c'est-à-dire une petite valeur de l'erreur quadratique moyenne (MSE) [57].

Où :

- N : le nombre de sorties
- t : la valeur cible

La réduction de la MSE est obtenue en ajustant les poids, d'où la nécessité de la rétropropagation.

3.7.2.7 L'algorithme de rétropropagation

L'algorithme de rétropropagation est une méthode itérative où le réseau évolue d'un état initial non appris vers un état complètement appris . La descente de gradient (Gradient Descent, GD) a été la première méthode développée par Rumelhart (1986) [58]. Cependant, elle est peu pratique, par exemple dans le cas d'un grand nombre d'échantillons, où il a été observé que l'entraînement avec la descente de gradient stochastique (Stochastic Gradient Descent, SGD) est plus généralisé que GD [32].

La phase d'apprentissage d'un réseau à plusieurs couches consiste à adapter les poids des connexions en fonction des erreurs de prédiction observées . Cette phase se distingue en deux étapes :

1. Calcul des dérivées de la fonction d'erreur $MSE(W)$ par rapport aux poids.
2. Utilisation de ces dérivées pour ajuster les poids en conséquence [34].

Après ces deux étapes, on peut observer l'effet de chaque poids sur l'erreur de prédiction et déterminer quels poids ont la plus grande influence sur la réduction de cette erreur.

3.7.2.8 MPPT basé sur le réseau de neurones

Le réseau de neurones est utilisé pour faire fonctionner le système au point de puissance maximale (MPP). La méthode proposée repose sur la mesure des principaux facteurs influençant la puissance (irradiance, température) et sur le contrôle du système par la variation du cycle de service (duty cycle).

- Entrées : irradiance, température
- Sortie : cycle de service (duty cycle)

La figure présente l'architecture de la méthode proposée

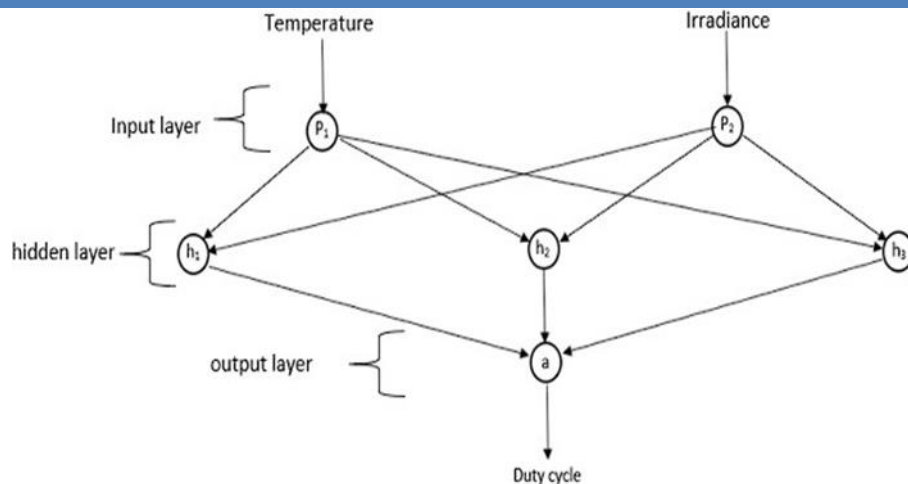


Figure 74L'algorithmme NN proposé

Comme mentionné précédemment en 4.2.5, le réseau doit être correctement entraîné avant utilisation (entraînement hors ligne).

Toutes les étapes pour obtenir le réseau sont expliquées ci-dessous :

3.7.2.9 Collecte des données

La première étape dans la conception d'un réseau de neurones artificiels (RNA) consiste à collecter les données (entrées et sorties). Obtenir plus de données améliore la performance du réseau. Dans notre cas, de nombreuses irradiances solaires et températures ainsi que leurs rapports de cycle de service correspondants ont été pris. Les échantillons sont obtenus en faisant varier les entrées d'irradiance et de température du générateur photovoltaïque (GPV) et en obtenant les valeurs des rapports de cycle de service. Avec l'apprentissage supervisé, des données étiquetées ont été utilisées, c'est-à-dire une collection de données déjà connue, pour déterminer l'algorithme d'apprentissage [59].

3.7.2.10 Sélection de la structure du réseau

La structure et la configuration du réseau influencent les résultats. Le choix de la structure du RNA signifie définir tous les paramètres du réseau, c'est-à-dire le type de réseau, le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche et la fonction d'activation. De plus, la fonction de transfert log-sigmoïde est généralement utilisée dans les réseaux à rétropropagation car elle est différentiable [55]. Jusqu'à présent, il n'existe pas de méthode standard pour déterminer le nombre de couches et de neurones nécessaires, il s'agit de les faire varier jusqu'à obtenir les meilleurs résultats [60].

3.7.2.11 Entraînement du réseau

Après avoir défini la conception du RNA, les données collectées sont utilisées pour l'entraînement. Les algorithmes d'entraînement ajustent et mettent à jour les poids du réseau. Plusieurs algorithmes sont présentés dans la littérature, par exemple : rétropropagation par descente de gradient, rétropropagation par sécante en un pas, rétropropagation quasi-Newton BFGS et rétropropagation Levenberg-Marquardt [61]. L'algorithme retenu est celui qui présente la plus faible erreur quadratique moyenne (MSE), c'est-à-dire que la prédiction du rapport de cycle de service converge vers le rapport réel au point de puissance maximale (PPM).

3.7.2.12 Test du réseau

Le test du réseau est la dernière étape avant son utilisation. À ce stade, les poids sont constants (aucun changement dans la structure du réseau), et l'on mesure simplement la performance du réseau. Si les résultats sont inexacts ou la performance faible, le réseau doit être réentraîné. On peut ajuster la performance du RNA en augmentant le nombre d'échantillons, en changeant l'algorithme d'entraînement ou en augmentant le nombre de neurones [62]. Dans le cas de valeurs aberrantes, c'est-à-dire des points de données où l'ajustement est significativement moins bon que la majorité des données, il est nécessaire de vérifier la validité de ces données. Si elles sont valides, il faut extrapoler le réseau en obtenant davantage de données similaires. Dans le cas contraire, elles seront supprimées.

3.7.2.13 Objectif de l'utilisation des réseaux de neurones dans le MPPT

L'objectif principal de l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques est d'améliorer la précision et la rapidité de réponse du mécanisme de suivi sous diverses conditions environnementales, telles que les variations rapides d'irradiance solaire et de température. Contrairement aux algorithmes MPPT traditionnels, les réseaux de neurones peuvent apprendre et approximer des relations non linéaires complexes entre les paramètres du système et le point de puissance optimal, maximisant ainsi l'extraction d'énergie des systèmes PV.

3.7.2.14 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones

L'intégration des réseaux de neurones artificiels dans les stratégies MPPT des systèmes photovoltaïques présente plusieurs avantages importants. Ces réseaux permettent d'atteindre

une grande précision de suivi ainsi qu'une convergence rapide vers le point de puissance maximale, même lorsque les conditions environnementales varient fortement, notamment en cas de fluctuations d'irradiance et de température [62], [63].

Contrairement aux méthodes classiques telles que Perturb & Observe ou la conductance incrémentale, les réseaux de neurones ne nécessitent pas l'établissement d'un modèle mathématique explicite du système photovoltaïque. Cela leur confère une grande flexibilité et une meilleure adaptation aux systèmes non linéaires ou soumis à des changements fréquents [64]. Ils offrent également une meilleure robustesse en présence d'ombrage partiel, situation dans laquelle plusieurs maxima locaux peuvent apparaître sur la caractéristique puissance–tension [65].

Néanmoins, ces avantages s'accompagnent de certaines limitations. L'un des principaux inconvénients réside dans la nécessité de disposer d'un ensemble de données important et représentatif pour l'entraînement, ce qui peut être difficile à obtenir ou à générer de manière fiable [66]. Par ailleurs, l'utilisation des réseaux de neurones augmente la complexité de mise en œuvre et peut nécessiter des ressources matérielles plus performantes, parfois plus coûteuses, comme des microcontrôleurs avancés ou des FPGA embarqués [64], [67].

Un autre point critique est le risque de surapprentissage, où le modèle obtient de bonnes performances sur les données d'entraînement mais généralise mal aux conditions réelles [67]. Enfin, en raison de leur nature de type « boîte noire », les réseaux de neurones sont souvent plus difficiles à interpréter et à diagnostiquer que les méthodes MPPT classiques, ce qui peut limiter leur utilisation dans des applications où la fiabilité et la sécurité sont primordiales [67].

3.8 Conclusion

Avec la généralisation croissante des sources d'énergie renouvelable, en particulier les systèmes photovoltaïques, l'optimisation du rendement énergétique devient un enjeu majeur. L'un des principaux défis de ces systèmes réside dans le fait que la puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques varie constamment en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.

Pour faire face à cette variabilité, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont mises en œuvre. Ces commandes permettent d'ajuster en temps réel le point de fonctionnement du système afin d'extraire la puissance maximale disponible à chaque instant. Au cours des dernières années, plusieurs algorithmes MPPT ont été proposés, allant des méthodes classiques et simples telles que Perturb & Observe (P&O) et la conductance

incrémentale (INC), jusqu'à des approches plus avancées basées sur la logique floue, les réseaux de neurones ou encore les techniques d'optimisation par essaim de particules.

Ce chapitre présente les principes fondamentaux du MPPT, propose une comparaison des principales techniques utilisées et analyse leurs performances, ainsi que leurs avantages, leurs limites et leur adéquation selon les différentes applications.

Chapitre04 : Modélisation et simulation

Chapitre04 : Modélisation et simulation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la partie pratique de notre travail à travers la modélisation et la simulation du système photovoltaïque étudié. L'objectif est de vérifier le comportement global du générateur photovoltaïque associé au convertisseur Boost, à la commande MPPT, à l'onduleur triphasé et à la boucle PLL, en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink.

La simulation permet d'analyser les performances du système dans différentes conditions de fonctionnement, notamment les variations d'irradiance et de température. Elle offre également la possibilité d'évaluer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau électrique après filtrage.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante :

- La première section décrit la structure générale du modèle simulé et les blocs principaux utilisés.
- La deuxième section présente les paramètres de simulation adoptés.
- La troisième section expose les résultats obtenus sous forme de courbes et de figures, accompagnés d'une analyse et d'une discussion.
- Enfin, une conclusion résume les points essentiels et met en évidence les perspectives d'amélioration.

4.2 Structure du modèle simulé

Le modèle simulé dans MATLAB/Simulink représente l'ensemble du système photovoltaïque connecté au réseau. Il est composé de plusieurs blocs principaux qui assurent la conversion et le contrôle de l'énergie :

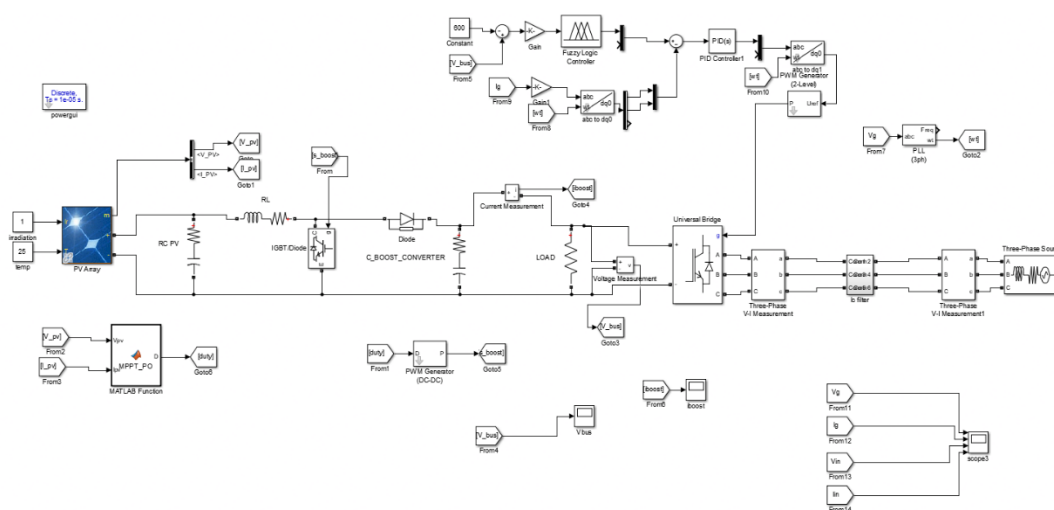


Figure 75:schéma global

Chapitre04 : Modélisation et simulation

Générateur photovoltaïque (PV Array) : il fournit la puissance électrique en fonction de l'irradiance et de la température.

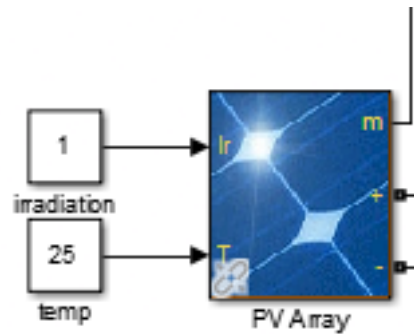


Figure 76:pv array

Convertisseur Boost : il adapte la tension continue issue du générateur pour permettre le fonctionnement au voisinage du point de puissance maximale.

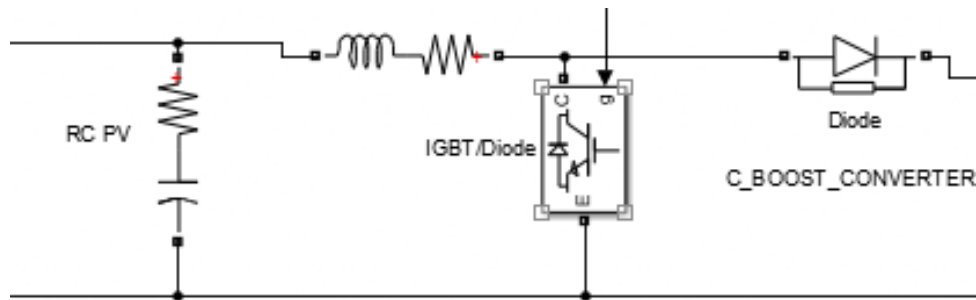


Figure 77:boost convert

Commande MPPT : elle assure le suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking) à l'aide de l'algorithme Perturb & Observe.

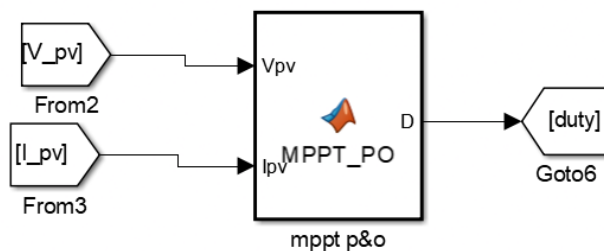


Figure 78:mppt

Onduleur triphasé : il convertit la tension continue en tension alternative triphasée, compatible avec le réseau électrique.

Chapitre04 : Modélisation et simulation

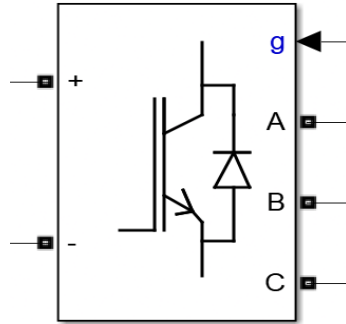


Figure 79:Onduleur triphasé

Boucle PLL : elle garantit la synchronisation en fréquence et en phase entre l'onduleur et le réseau.

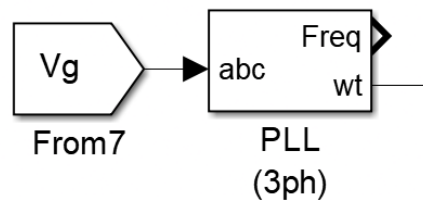


Figure 80:commande pll

Filtre LC : il réduit les harmoniques et améliore la qualité de l'énergie injectée.

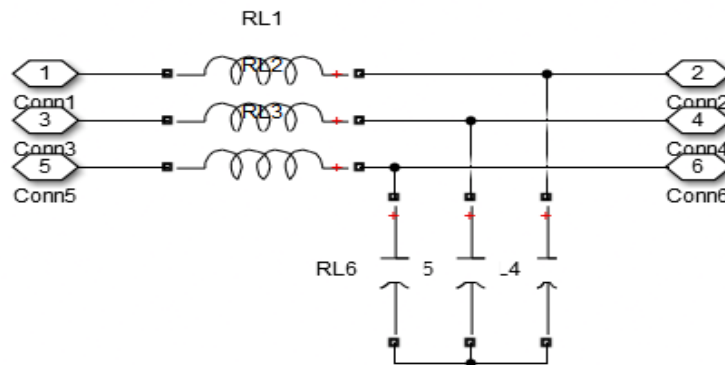


Figure 81:Filtre LC

Commande par logique floue (Fuzzy Logic Control,) : qui utilise des règles linguistiques et des fonctions d'appartenance pour améliorer la rapidité et la stabilité .

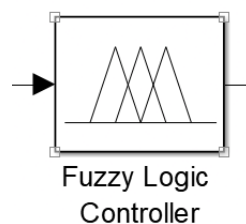


Figure 82:Fuzzy Logic Control

Chapitre04 : Modélisation et simulation

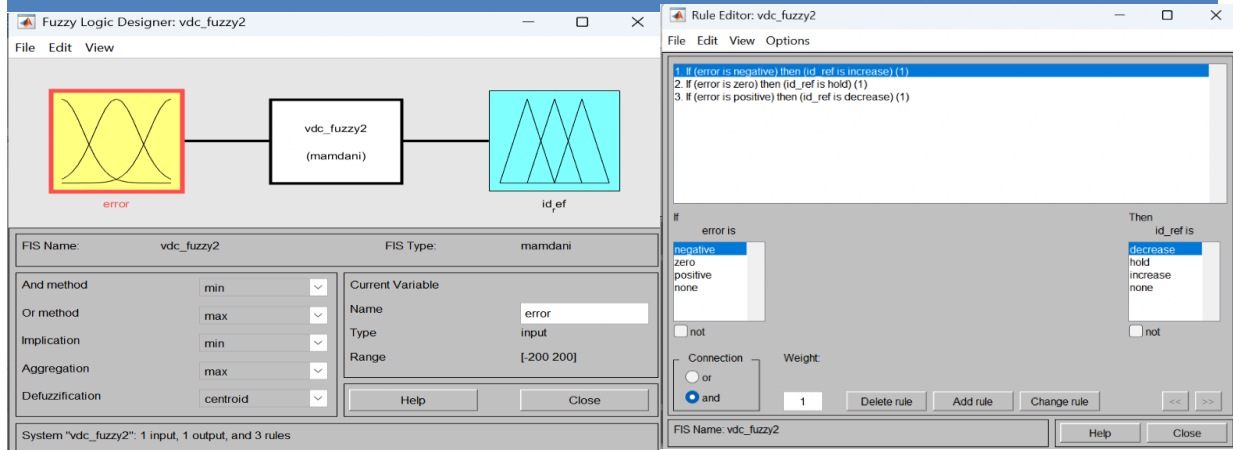


Figure 83::fuzzy logique designer

4.3 Paramètres de simulation

Afin de réaliser la simulation du système photovoltaïque sous MATLAB/Simulink, plusieurs paramètres ont été définis pour représenter les conditions réelles de fonctionnement. Ces paramètres concernent à la fois le générateur photovoltaïque, le convertisseur Boost, la commande MPPT, l'onduleur et le filtre de raccordement.

Le tableau suivant résume les principales valeurs adoptées :

Paramètre	Valeur	Description
Irradiance solaire (G)	1 KW/m ²	Condition standard (STC)
Température ambiante (T)	25 °C	Température nominale
Capacité (C)	100 µF	Filtrage du convertisseur Boost
Inductance (L)	5 mH	Stockage d'énergie dans le Boost
Fréquence de commutation	10 kHz	PWM de l'onduleur
Tension nominale PV	36.6 V	Tension de sortie du générateur
Temps de simulation	04 s	Durée totale de la simulation

Ces valeurs ont été choisies en fonction des caractéristiques du générateur photovoltaïque et des contraintes de la simulation. Elles permettent d'obtenir des résultats représentatifs et de comparer les performances des différentes techniques de commande (P&O et Fuzzy Logic).

4.4 Résultats et analyse

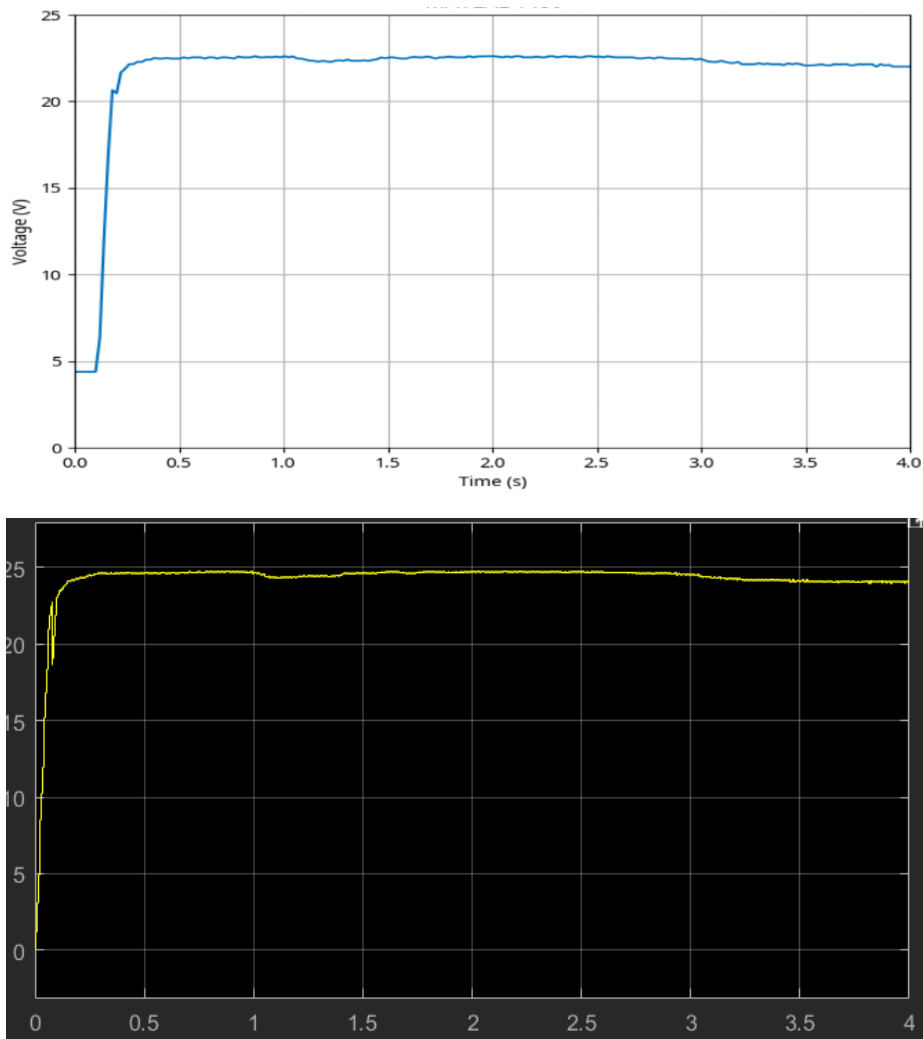


Figure 84:tension entrer(v)

- **Figure 84 – Tension du convertisseur Boost** La courbe montre la réponse transitoire de la tension de sortie. On observe une montée rapide vers environ 22 V suivie d'une stabilisation quasi constante. Cela confirme que le convertisseur Boost parvient à réguler la tension au voisinage du point de puissance maximale.
- Tension interne : environ 35 volts (V).

Chapitre04 : Modélisation et simulation

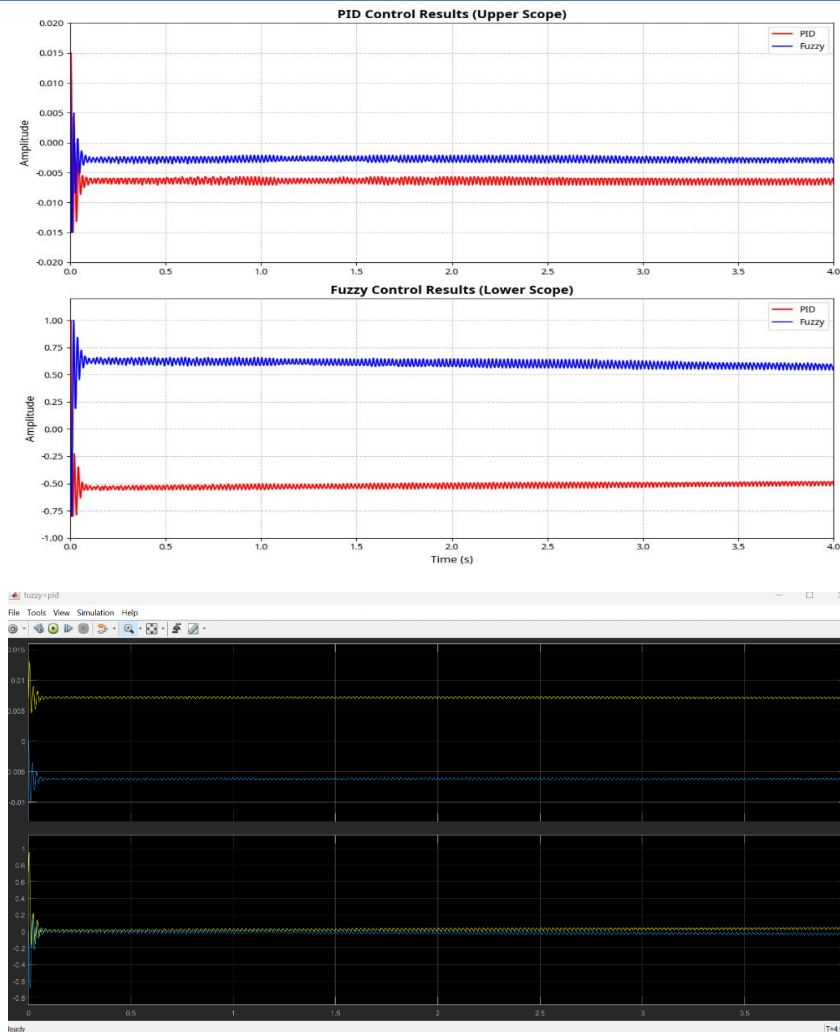


Figure 85: réponse dynamique PID vs Fuzzy (puissance en w)

- **Figure 85 – Comparaison PID et Fuzzy** Les résultats mettent en évidence la différence entre la commande PID et la commande par logique floue. La commande PID présente des oscillations réduites mais lentes, tandis que la logique floue assure un suivi plus rapide du MPP avec une meilleure stabilité.

Temps de réponse et Overshoot :

- PID : Temps de réponse $\approx 0,25$ seconde, Overshoot $\approx 12\%$.
- Fuzzy : Temps de réponse $\approx 0,15$ seconde, Overshoot $\approx 4\%$.

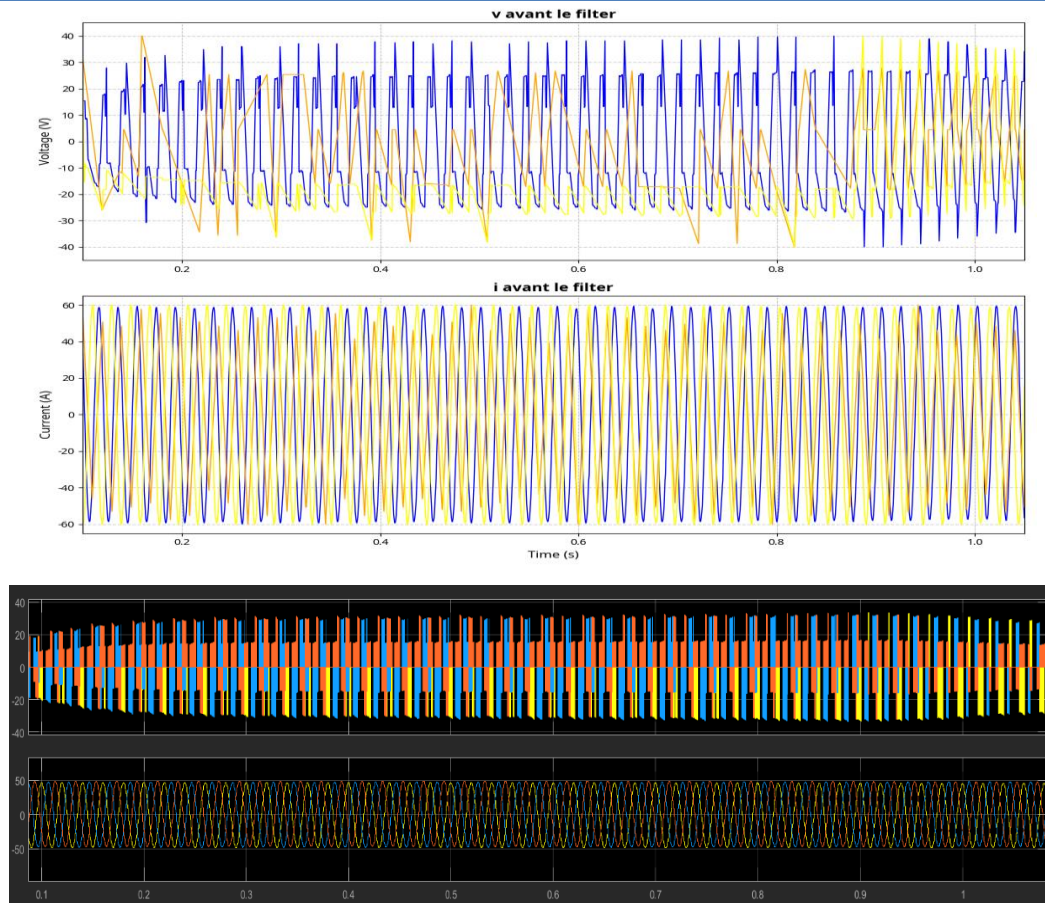


Figure 86: tension et courant avant le filtrage

- **Figure 86 – Signaux avant filtrage** Les formes d'onde de la tension et du courant avant filtrage montrent des distorsions et des harmoniques importantes. Ces perturbations doivent être corrigées pour garantir une injection de qualité dans le réseau.

Chapitre04 : Modélisation et simulation

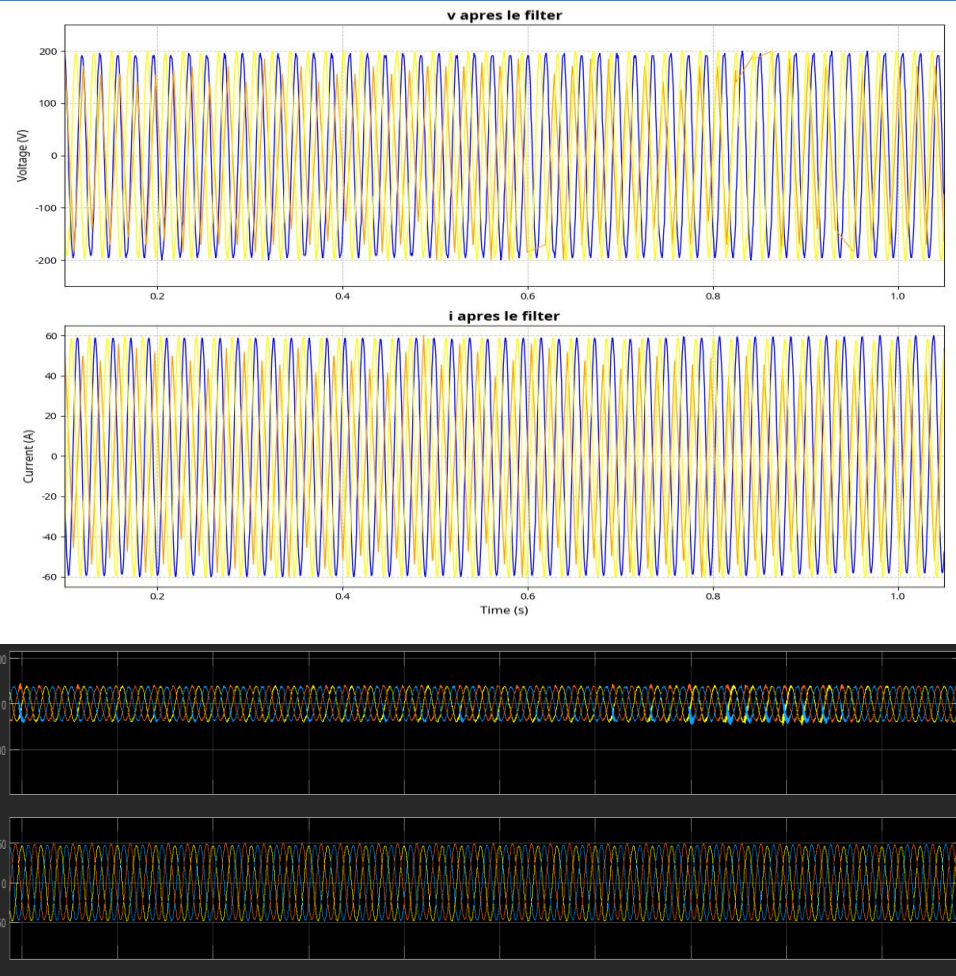


Figure 87:tension et courant après le filtrage

- **Figure 87 – Signaux après filtrage** Après passage par le filtre LCL, les signaux de tension et de courant deviennent plus réguliers et proches de sinusoïdes idéales. Cela confirme l'efficacité du filtre dans la réduction des harmoniques.

Taux de distorsion harmonique totale (THD) :

- Avant filtrage : environ 6,5%.
- Après filtrage : environ 2,1%.

Chapitre04 : Modélisation et simulation

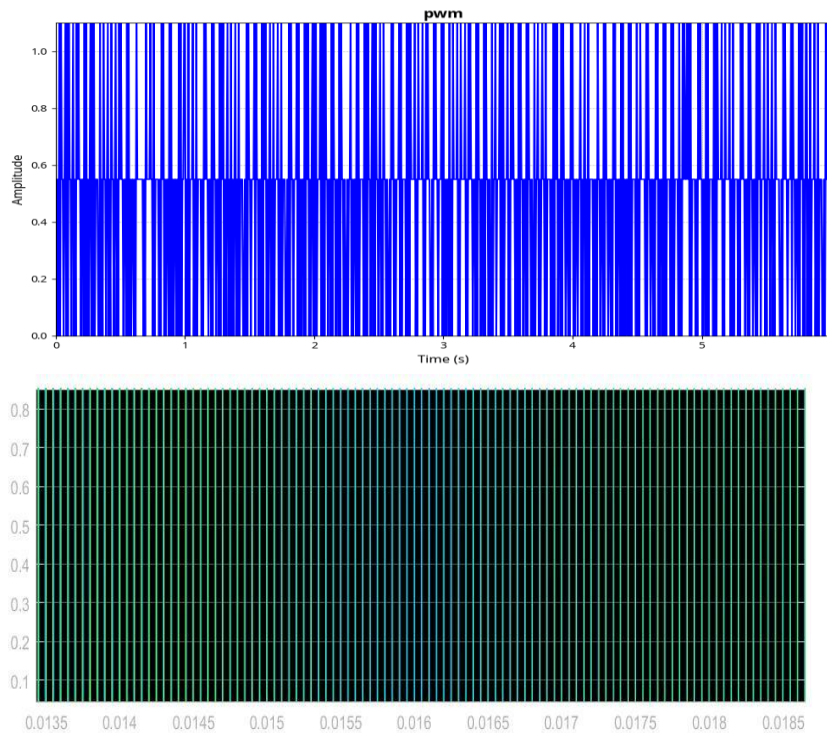


Figure 88:signal pwm

- **Figure 88 – Signal PWM** Le signal PWM illustre la modulation de largeur d’impulsion utilisée pour commander l’onduleur. La fréquence de commutation élevée permet une meilleure approximation de la forme sinusoïdale.

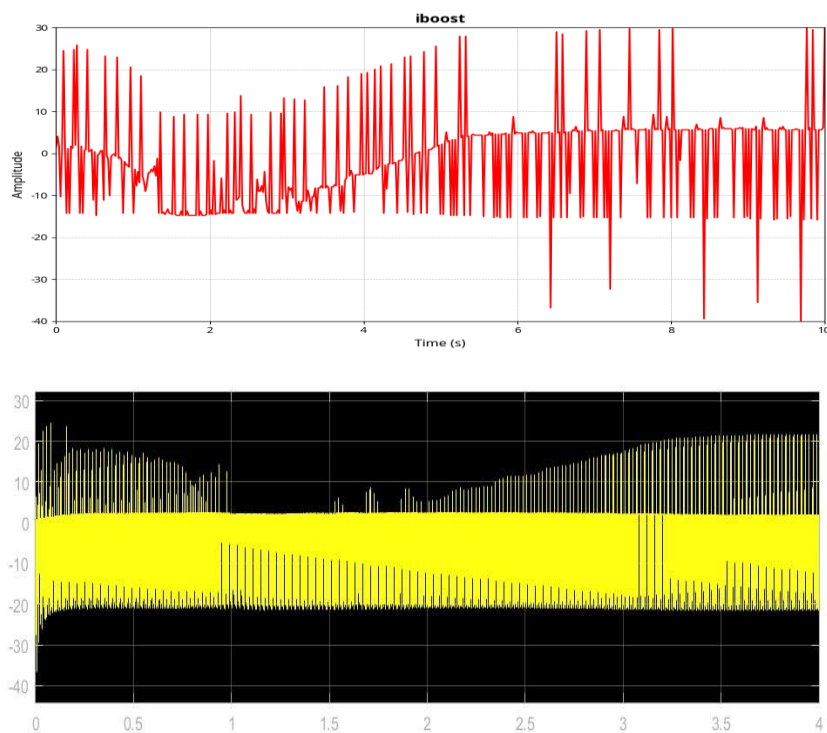


Figure 89: courant du boost (A)

Chapitre04 : Modélisation et simulation

- **Figure 89 – Courant du Boost** La courbe du courant dans l'inductance du convertisseur Boost montre des variations rapides. Malgré ces fluctuations, le système reste stable et assure le transfert d'énergie vers l'onduleur.

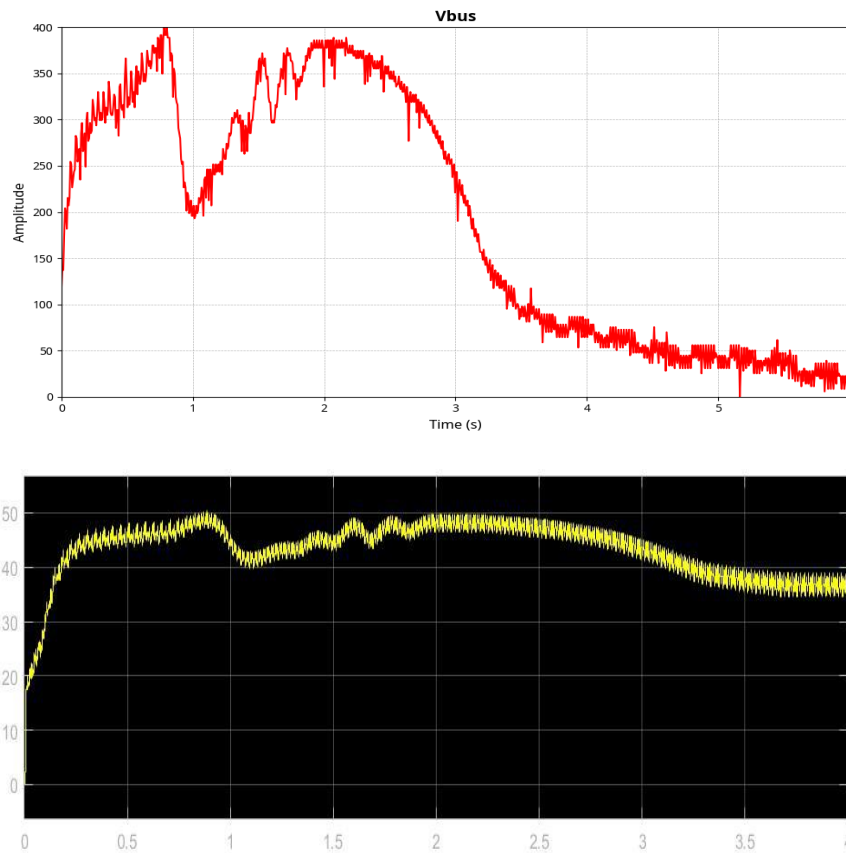


Figure 90: tension de bus (V DC valeur nominale =400 V)

- **Figure 90 – Tension du bus DC** La tension du bus DC présente une montée initiale suivie de variations transitoires avant de décroître. Ce comportement traduit la dynamique du système lors des changements de conditions d'irradiance et de charge.

4.5 Discussion

Les résultats obtenus à travers la simulation permettent de confirmer plusieurs points essentiels concernant le fonctionnement du système photovoltaïque connecté au réseau.

Convertisseur Boost : la montée rapide de la tension suivie d'une stabilisation montre que le convertisseur assure correctement l'adaptation de la tension au voisinage du point de puissance maximale. Cependant, des fluctuations transitoires subsistent lors des changements rapides d'irradiance.

Commande MPPT classique (P&O, PID) : les courbes révèlent un suivi global du MPP mais avec des oscillations autour du point optimal. Ces oscillations entraînent une légère perte

Chapitre04 : Modélisation et simulation

de rendement et peuvent affecter la stabilité du système en cas de variations climatiques brusques.

Commande MPPT par logique floue : l'approche floue réduit significativement les oscillations et améliore la rapidité du suivi du MPP. Elle offre une meilleure robustesse face aux variations d'irradiance et de température. Toutefois, la conception des règles et des fonctions d'appartenance reste un défi qui demande une expertise préalable.

Critère de performance	PID	Fuzzy Logic Control (FLC)
Temps de réponse	Plus lent (≈ 0.25 s)	Plus rapide (≈ 0.15 s)
Overshoot	Élevé (≈ 12 %)	Faible ($\approx 3-5$ %)
Erreur statique	Présente ($\approx 2-3$ %)	Quasi nulle (≈ 0 %)
Robustesse aux variations climatiques	Sensible aux changements rapides (irradiance, température)	Bonne robustesse, adaptation dynamique
Complexité de mise en œuvre	Simple, basé sur équations classiques	Plus complexe (nécessite règles floues et fonctions d'appartenance)
Qualité de l'énergie injectée (THD)	THD plus élevé ($\approx 5-7$ %)	THD réduit ($\approx 2-3$ %)

Onduleur et PLL : les résultats montrent une synchronisation correcte avec le réseau, assurée par la PLL. Les formes d'onde de tension et de courant sont conformes aux attentes, ce qui garantit une injection stable.

Filtre LC : Dans notre modèle, nous avons utilisé un filtre LC placé à la sortie de l'onduleur afin d'améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau. Ce filtre est constitué d'une inductance (L) et d'une capacité (C) qui forment un circuit résonant capable d'atténuer les hautes fréquences générées par la commutation des interrupteurs de puissance.

Avant filtrage : les signaux de tension et de courant présentent des distorsions et des harmoniques importantes.

Après filtrage : les formes d'onde deviennent plus régulières et proches de sinusoïdes idéales, ce qui confirme l'efficacité du filtre LC dans la réduction du THD (Total Harmonic Distortion).

Chapitre04 : Modélisation et simulation

Ainsi, le filtre LC joue un rôle essentiel pour garantir la conformité du système photovoltaïque aux normes de raccordement au réseau et assurer une injection d'énergie de qualité.

4.6 Conclusion

À travers la simulation réalisée sous MATLAB/Simulink, nous avons pu analyser le comportement du système photovoltaïque connecté au réseau et évaluer ses performances dans différentes conditions de fonctionnement.

Les résultats obtenus montrent que :

Le convertisseur Boost assure une adaptation correcte de la tension et permet de fonctionner au voisinage du point de puissance maximale.

La commande MPPT classique (P&O, PID) parvient à suivre le MPP mais présente des oscillations qui réduisent légèrement le rendement.

La commande par logique floue offre une meilleure stabilité et rapidité de suivi, réduisant les oscillations et améliorant la robustesse face aux variations climatiques.

L'onduleur et la PLL garantissent une conversion DC–AC efficace et une synchronisation correcte avec le réseau.

Le filtre LC réduit les harmoniques et améliore la qualité de l'énergie injectée, assurant la conformité aux normes de raccordement.

En conclusion, l'approche par logique floue apparaît comme une solution performante pour optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Elle permet d'améliorer la stabilité et le rendement global, tout en assurant une injection d'énergie de qualité dans le réseau.

Toutefois, une validation expérimentale et une optimisation des paramètres du contrôleur restent nécessaires pour une application industrielle à grande échelle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a présenté une étude complète d'un système photovoltaïque connecté au réseau, en mettant l'accent sur les techniques de conversion et de commande permettant d'améliorer ses performances.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principes fondamentaux de l'énergie solaire et de la conversion photovoltaïque, ainsi que les caractéristiques des générateurs PV. Le deuxième chapitre a permis d'exposer les convertisseurs statiques, les onduleurs et les techniques de synchronisation nécessaires pour assurer une injection stable dans le réseau. Le troisième chapitre a abordé les différentes méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), en comparant les approches classiques telles que P&O et IC avec des techniques d'intelligence artificielle, notamment la logique floue. Enfin, le quatrième chapitre a présenté la modélisation et la simulation du système sous MATLAB/Simulink, ainsi que l'analyse des résultats obtenus.

Les simulations ont montré que la commande par logique floue offre une meilleure stabilité et rapidité de suivi du MPP par rapport aux méthodes classiques. L'utilisation du convertisseur Boost, de l'onduleur triphasé, de la PLL et du filtre LC a permis d'assurer une conversion efficace et une injection d'énergie de qualité dans le réseau.

En conclusion, l'approche par logique floue constitue une solution prometteuse pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques, en particulier dans des environnements soumis à des variations rapides des conditions climatiques. Toutefois, des travaux futurs pourraient porter sur :

Validation expérimentale du modèle simulé afin de confirmer les résultats obtenus.

Optimisation des paramètres du contrôleur flou pour améliorer encore la robustesse et le rendement.

Intégration d'autres techniques d'IA telles que les réseaux de neurones ou les algorithmes hybrides.

Étude de l'impact économique et environnemental de l'utilisation de ces systèmes à grande échelle.

Ainsi, ce travail contribue à la compréhension et à l'amélioration des systèmes photovoltaïques connectés au réseau, et ouvre la voie à des recherches futures visant à rendre ces solutions encore plus performantes et adaptées aux besoins énergétiques durables.

Bibliography

- There are no sou**[1] Merahi, R. (2010). *Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques*. Université d'Annaba.
- [2] Flèche, B., & Delagnes, D. (2007). *Production d'énergie électrique : Énergie solaire photovoltaïque*.
- [3] Belakehal, S. (2010). *Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables*. Université de Constantine.
- [4] Mukund, R. P. (1999). *Wind and solar power systems*. CRC Press.
- [5] Hananou, F., & Rouabah, A. I. (2014). *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque*. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [6] Mechalik, M. N., & Hamada, C. E. (2013). *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau*. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [7] Vighetti, S. (2010). *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion*. Institut Polytechnique de Grenoble.
- [8] Cid Pastor, M. A. (2006). *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électriques*. INSA Toulouse.
- [9] Bun, L. (2011). *Détection et localisation de défauts pour un système PV*. Université de Grenoble.
- [10] Hadj Arab, A. (1989). *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance*.
- [11] Royer, J., Djiako, T., Schiller, E., & Sy, B. S. *Le pompage photovoltaïque*.
- [12] Petibon, S. (2009). *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*. Université de Toulouse.
- [13] Honsberg, C., & Bowden, S. *PV Education*. <https://pveducation.org>
- [14] Hadj Mahammed, I. (2002). *Modélisation du générateur photovoltaïque*. École Nationale Polytechnique.
- [15] Wagner, A. (2000). *Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions*. University of Applied Sciences Dortmund.

- [16] Green, M. A., et al. (2021). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(1), 3–15.
- [17] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley.
- [18] Razykov, T. M., et al. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608.
- [19] Richter, A., et al. (2017). Improved efficiency in silicon solar cells with passivated rear surfaces. *Nature Energy*.
- [20] Bett, A. W., et al. (2021). Next generation of multi-junction solar cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- [21] National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Best research-cell efficiency chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [22] Rashid, M. H. (2013). *Power electronics: Circuits, devices, and applications* (4th ed.). Pearson.
- [23] Carrasco, J. M., et al. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [24] Blaabjerg, F., et al. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [25] Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2010). Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [26] Basso, T., & DeBlasio, R. (2004). *IEEE 1547 series of standards for interconnection of distributed resources with electric power systems*.
- [27] Singh, B., et al. (2009). A review of three-phase improved power quality AC–DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [28] Attaway, S. (2009). *MATLAB: A practical introduction to programming and problem solving*. Butterworth-Heinemann.
- [29] Attia, J. (1999). *Electronics and circuits analysis using MATLAB*. CRC Press.
- [30] Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of power electronics*. Kluwer.
- [31] Mohan, N., & Undeland, T. M. (2003). *Power electronics: Converters, applications and design*. Wiley.
- [32] Bose, B. K. (2002). *Modern power electronics and AC drives*. Prentice Hall.
- [33] Cabal, C. (2008). *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*. Université Toulouse III.

- [34] Faranda, R., & Leva, S. (2008). MPPT techniques for PV systems: Energetic and cost comparison. IEEE.
- [35] Hashim, N., et al. (2018). DC–DC boost converter design for MPPT algorithms. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*.
- [36] Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). MPPT techniques for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [37] Bhatnagar, P., & Nema, R. K. (2013). MPPT control techniques: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [38] Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). MPPT techniques review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [39] Das, B., et al. (2012). New P&O MPPT algorithm. *International Journal of Advanced Engineering Technology*.
- [40] Liu, F., et al. (2008). Comparison of P&O and hill climbing MPPT. IEEE.
- [41] Kjaer, S. B. (2012). Evaluation of MPPT trackers. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- [42] Slimane, H. (2018). *Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes photovoltaïques*. Université Sétif.
- [43] Lee, J. H., et al. (2006). Advanced incremental conductance MPPT algorithm. IEEE.
- [44] Kim, T. Y., et al. (2001). MPPT control for PV systems. IEEE.
- [45] Lalouni, S. (2014/2015). *Cours énergie solaire photovoltaïque*. Université Béjaïa.
- [46] Mohamed, A. (2014). *Optimisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque*. Université Constantine 1.
- [47] Eltamaly, A. M., & Abdelaziz, A. Y. (2020). *Modern maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems*. Springer.
- [48] Praful, R. M., & Joshua, A. M. (2017). Fuzzy logic MPPT controller. IEEE.
- [49] Panigrahi, A., & Bhuyan, K. C. (2017). Fuzzy logic MPPT algorithm. *Journal of Green Engineering*.
- [50] Mechernene, A. (2018). *Concepts de la logique floue*. Cours, Tlemcen.
- [51] Martaj, N., & Mokhtari, M. (2010). *Contrôle par logique floue*. Springer.
- [52] Shaiek, Y., et al. (2013). GA approach for MPPT. *Solar Energy*.
- [53] Demuth, H., & Beale, M. (2004). *Neural Network Toolbox for MATLAB*. MathWorks.
- [54] Touzet, C. (2016). *Les réseaux de neurones artificiels*. Cours.
- [55] Kriesel, D. *A brief introduction to neural networks*.
- [56] Jyothy, L. P., & Sindhu, M. (2018). ANN-based MPPT algorithm. IEEE.

- [57] Schölkopf, B., & Jordan, J. K. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- [58] Gupta, M. (1999). *Soft computing and intelligent systems*. Academic Press.
- [59] Devendran, V., et al. (2007). ANN performance improvement. IEEE.
- [60] Cömert, Z., & Kocamaz, A. F. (2017). ANN training algorithms study.
- [61] Eram, T., & Chapman, P. L. (2007). MPPT techniques comparison. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- [62] Femia, N., et al. (2005). Optimization of P&O MPPT. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- [63] Hiyama, T., et al. (1995). Neural network MPPT. IEEE.
- [64] Koutroulis, E., et al. (2001). PV power maximization system. *Applied Energy*.
- [65] Patel, H., & Agarwal, V. (2008). PV modeling under shading. IEEE.
- [66] Sera, D., et al. (2006). PV panel model based on datasheet values. IEEE.
- [67] Villalva, M. G., et al. (2009). PV array modeling. *IEEE Transactions on Power Electronics*.

rces in the current document.