

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ables Laghrou, Khenchela

Faculté des Sciences et technologie

Département de Génie Industrielle

Domaine : Génie Electrique

Spécialité : Commande Electrique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master académique en Commande Electrique

Thème :

Simulation Et Comparaison De Différentes Techniques MPPT Pour Un Svsystème Photovoltaïque

Présenté par:

▪ CHITOUR Yazid

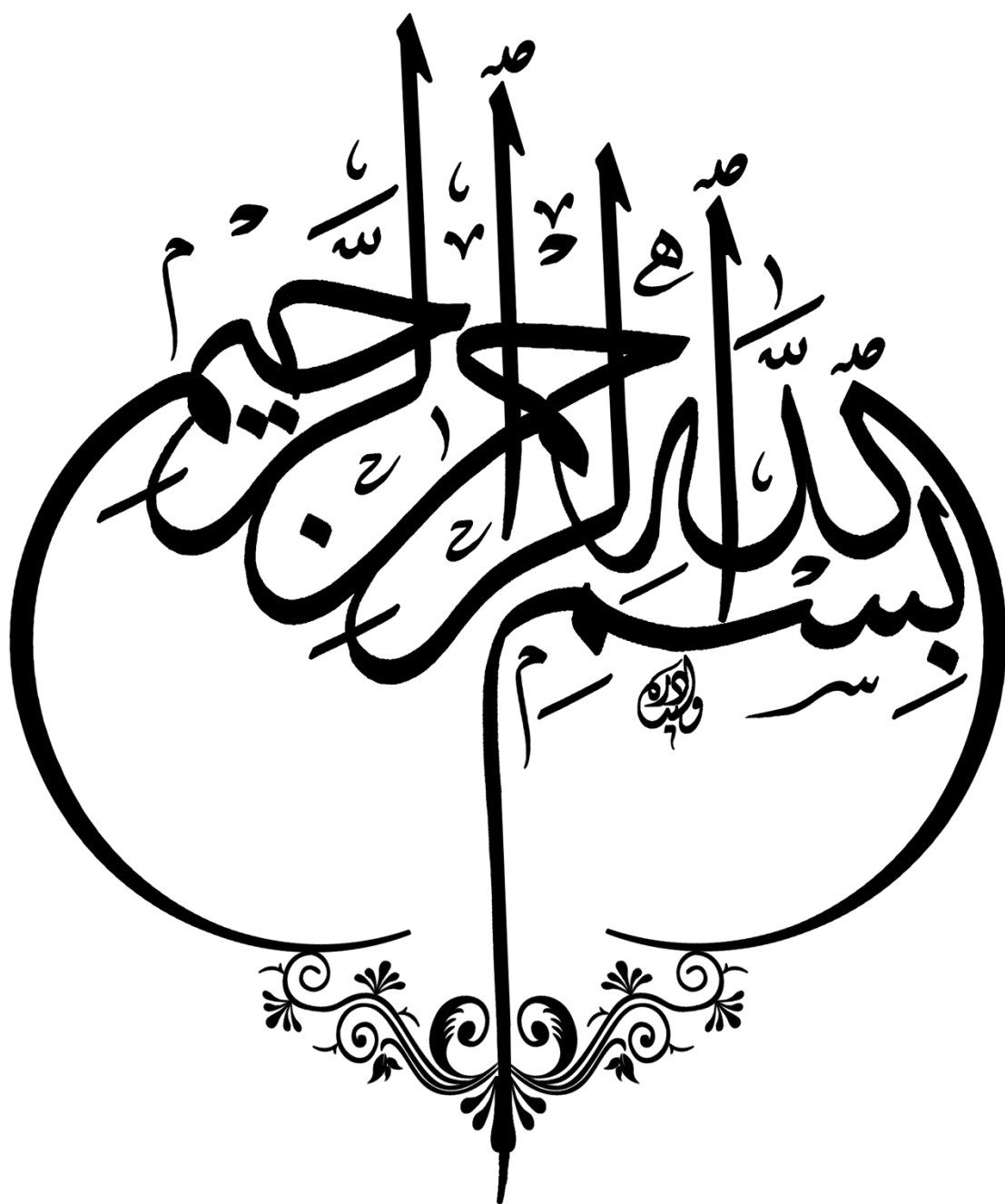
Encadré par :

Dr DJELAILIA Okba

Devant le jury

Président	BOUALI Lazher	MAA	Université de Khenchela
Encadrant	DJELAILIA Okba	MCA	Université de Khenchela
Examineur	NADJEM Abdelkader	MAA	Université de Khenchela

Année universitaire : 2025-2026



REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la volonté, la santé et le courage pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur **Djelailia Okba**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses orientations avisées et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce projet. Sa rigueur scientifique et son engagement pédagogique ont été une source d'inspiration précieuse.

Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant du Département des Sciences et Technologie, Faculté de Génie Électrique, de l'Université Abbes Laghrour – Khenchela, pour la qualité de la formation dispensée tout au long de notre cursus universitaire en Commande Électrique.

Nous remercions aussi les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de consacrer leur temps à l'examen de notre mémoire.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce projet de fin d'études.

Merci à tous.

DEDICACE

✧✧*Je dédie ce modeste travail* ✧✧

À mes très chers parents, qui m'ont offert amour, soutien et sacrifices sans limites.
Aucune dédicace ne saurait exprimer ma reconnaissance et mon affection pour eux.

À mes frères et sœurs, pour leurs encouragements, leur soutien moral et leur présence à
chaque étape de ma vie.

À toute ma famille, pour ses prières et ses bons vœux qui m'ont accompagné tout au long
de ce parcours.

À tous mes amis et camarades de la promotion Commande Électrique, avec qui j'ai
partagé les moments difficiles et les moments de joie durant ces années d'études.

À mon encadreur Monsieur Djelailia Okba, pour sa guidance et sa bienveillance tout au
long de ce projet.

À tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et cru en moi.

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque de conversion d'énergie. Le travail est structuré en trois chapitres complémentaires.

Le premier chapitre présente une introduction aux systèmes électriques et aux différentes sources d'énergie, en soulignant les limites des sources conventionnelles (charbon, gaz, nucléaire) et l'importance croissante des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des systèmes photovoltaïques. Il aborde le principe de fonctionnement des cellules PV, leurs caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) sous différentes conditions climatiques, ainsi que le convertisseur DC-DC de type Boost. Deux algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) sont étudiés et comparés : la méthode Perturbation et Observation (P&O) et la méthode de Conductance Incrémentale (INC). Les simulations sous MATLAB/Simulink montrent que l'algorithme INC offre de meilleures performances, avec un temps de réponse de 0,013 s et un rendement de 98,1 %.

Le troisième chapitre traite de la modélisation et de la simulation des onduleurs monophasé et triphasé commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI/PWM). Une analyse des perturbations harmoniques est réalisée, et l'intégration d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur triphasé est étudiée. Les résultats démontrent une réduction significative des harmoniques et une amélioration de la qualité des signaux de tension et de courant, dont les formes tendent vers des sinusoïdes équilibrées.

Mots-clés : Énergie solaire photovoltaïque · Système PV · Cellule solaire · Caractéristique I-V · Convertisseur Boost · MPPT · Perturbation et Observation (P&O) · Conductance Incrémentale (INC) · Onduleur monophasé · Onduleur triphasé · Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI/PWM) · Harmoniques · Filtre LC · Qualité de l'énergie · MATLAB/Simulink

Summary :

This thesis focuses on the study, modeling, and simulation of a photovoltaic energy conversion system. The work is organized into three complementary chapters.

The first chapter provides an introduction to electrical systems and various energy sources, highlighting the limitations of conventional sources (coal, gas, nuclear) and the growing importance of renewable energies, particularly solar photovoltaic energy.

The second chapter is dedicated to the modeling of photovoltaic systems. It covers the operating principles of PV cells, their current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V)

characteristics under different climatic conditions, as well as the DC-DC Boost converter. Two Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are studied and compared: the Perturb and Observe (P&O) method and the Incremental Conductance (INC) method. Simulations under MATLAB/Simulink show that the INC algorithm delivers better performance, with a response time of 0.013 s and an efficiency of 98.1%.

The third chapter deals with the modeling and simulation of single-phase and three-phase inverters controlled by Pulse Width Modulation (PWM). A harmonic distortion analysis is carried out, and the integration of an LC filter at the output of the three-phase inverter is studied. Results demonstrate a significant reduction in harmonics and an improvement in the quality of voltage and current waveforms, which approach balanced sinusoidal shapes.

Keywords: Solar photovoltaic energy · PV system · Solar cell · I-V characteristic · Boost converter · MPPT · Perturb and Observe (P&O) · Incremental Conductance (INC) · Single-phase inverter · Three-phase inverter · Pulse Width Modulation (PWM) · Harmonics · LC filter · Power quality · MATLAB/Simulink

المخلص :

تتناول هذه المذكرة دراسة ونمذجة ومحاكاة منظومة تحويل الطاقة الكهروضوئية، وهي مقسمة إلى ثلاثة فصول متكاملة. يقدم الفصل الأول مدخلاً للأنظمة الكهربائية ومختلف مصادر إنتاج الطاقة، مع إبراز حدود المصادر التقليدية كالشمس والغاز والطاقة النووية، والأهمية المتزايدة لمصادر الطاقة المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية الكهروضوئية. يُخصص الفصل الثاني لنمذجة الأنظمة الكهروضوئية، إذ يتناول مبدأ عمل الخلايا الشمسية وخصائصها الكهربائية (منحنيات التيار-الجهد والقدرة-الجهد) في ظروف إشعاع وحرارة مختلفة، فضلاً عن دراسة محول الجهد الرفع (Boost) كما يُقارن بين خوارزميتين لتتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT)، وهما: خوارزمية الإزعاج والملاحظة (P&O) وخوارزمية الموصلية التزايدية (INC) وتُظهر نتائج المحاكاة ببيئة MATLAB/Simulink تفوق خوارزمية INC بزمان استجابة يبلغ 0.013 ثانية ومردود 98.1% أما الفصل الثالث فيتناول نمذجة ومحاكاة العواكس أحادية وثلاثية الطور المُتحكم بها عبر تقنية التعديل بعرض النبضة (PWM)، مع تحليل التشويه التوافقي الناتج عن تبديل المفاتيح الإلكترونية. كما يدرس تأثير دمج مرشح LC عند خرج العاكس الثلاثي الطور، وتثبت النتائج تحسناً ملحوظاً في جودة موجات الجهد والتيار التي تقترب من الشكل الجيبي المتوازن، مما يؤكد فعالية البنية المقترحة في تحقيق طاقة كهربائية ذات جودة عالية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية · المنظومة الكهروضوئية · الخلية الشمسية · خاصية التيار-الجهد · (I-V) محول الجهد الرفع · (Boost) تتبع نقطة القدرة العظمى · (MPPT) خوارزمية الإزعاج والملاحظة · (P&O) خوارزمية الموصلية التزايدية (INC) · العاكس أحادي الطور · العاكس ثلاثي الطور · التعديل بعرض النبضة (PWM) التوافقيات · (Harmoniques) مرشح LC جودة الطاقة الكهربائية · MATLAB/Simulink

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	I
-----------------------------	---

CHAPITRE I : INTRODUCTION AUX SYSTÈMES ELECTRIQUE

I.1. Introduction.	1
I.2. Les Sources conventionnelles : charbon, gaz et nucléaire.	2
I.3. Les Sources renouvelable.	3
I.3.1. Énergie hydroélectrique.	3
I.3.2. Énergie éolienne.	4
I.3.3. La biomasse.	6
I.3.4. Électricité solaire PV et thermique.	7
I.4. La conversion des formes d'énergie.	12
I.5. L'impact environnemental de la consommation d'énergie.	13
I.6. Utilisation efficace de l'énergie.	14
I.7. Solutions possibles et durabilité.	14
I.8. Conclusion.	15

CHAPITRE II : LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

II.1 Introduction.	16
II.2 Definition du photovoltaïque.	17
II.3 Irradiation et rayonnement solaire.	17
II.3.1. Technologies des cellules photovoltaïques.	18
II.3.2. Cellules photovoltaïques et modules photovoltaïques.	19
II.4 Modélisation du module PV.	22
II.5 Courbes caractéristiques des cellules solaires.	23
II.6 Introduction aux systèmes PV.	27
II.6. 1 Systèmes photovoltaïques autonomes à couplage direct.	27
II.6. 2Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage sur batterie alimentant des charges CC et CA	28
II.7 Analyse d'un convertisseur élévateur de tension.	28
II.8 Algorithmes de poursuite des points de puissance maximale.	31
II.8.1Technique de perturbation et d'observation.	31
II.8.2Technique de conductance incrémentale.	34
II.8.3Efficacité d'un algorithme MPPT.	38
II.9 Résultats de simulation.	38
II.10 Conclusion.	41

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

. III.1 Introduction.....	43
III.2 Structure globale du système photovoltaïque.....	43
III.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur.....	45
III.4 Onduleur monophasé et triphasé.....	47
III.4.1 Onduleur monophasé.....	47
III.4.2 Onduleur triphasé.....	48
III.5 Commande PWM.....	50
III.5.1 Principe de la PWM.....	50
III.6 Simulation d'un onduleur triphasé en pont à commande MLI	52
III.6.1 Tension simples à la sortie de l'onduleur	53
III.6.2 Tensions composées à la sortie de l'onduleur	53
III.6.3 Courants de ligne à la sortie de l'onduleur	54
III.7 Analyse des perturbations harmoniques dans l'onduleur.....	55
III.7.1 Origine de la déformation des signaux.....	55
III.7.2 Notion d'harmoniques	56
III.7.3 Sources des Harmoniques	57
III.7.4 Charges Linéaires et Non Linéaires	58
III.7.5 Méthodes de filtrage des harmoniques.....	58
III.8 Application d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur et analyse des résultats.....	60
III.9 Conclusion	65

Listes des figures

Figure 1 : Vitesse du vent mesurée à 30 m au-dessus d'un terrain (0-15 m/s). (La station météorologique d'Adrar-Algerie)	5
Figure 2 : un exemple de courbe I-V	9
Figure 3 : L'impact du rayonnement et de la température sur la courbe I-V	9
Figure 4 : La variation temporelle du rayonnement pendant une journée d'été (30 aout 2010) Adrar-Algérie.	10
Figure 5 : Centrale à auge	11
Figure 6 : Vue aérienne de la tour solaire PS10 de 100MW à Saniticar la Mayor. Espagne. (Reproduit de Concentration Solar Power - de la recherche à la mise en œuvre. C. Communautés européennes). 12	
Figure 7 La conversion d'une variété de formes d'énergie en électricité.....	13
Figure 8 : la répartition des économies d'émissions par technologie. (Reportage tiré du rapport Stern, copyright Cambridge University Press)	14
Figure 9 : Rayonnement solaire et insolation	18
Figure 10 : cellule silicium monocristallin.....	18
Figure 11 : Modèle de circuit équivalent d'une cellule PV	22
Figure 12 : effet d'éclairement sur les caractéristiques électrique	24
Figure 13 : L'effet de température sur les caractéristiques électrique	25
Figure 14 : Système PV à couplage direct	27
Figure 15 : Diagramme d'un système PV autonome typique alimentant des charges CC et CA.....	28
Figure 16 : circuits équivalents du convertisseur DC/DC Boost pour les deux états de commutation. (a) Interrupteur ON $s=1$. (b) Interrupteur OFF $s=0$	29
Figure 17 : Schéma fonctionnel de l'installation PV avec régulateur MPPT	30
Figure 18 : Variation du point de fonctionnement par rapport à la ligne de charge (R_{eq})	31
Figure 19 : Organigramme de l'algorithme P&O MPPT conventionnel	32
Figure 20 : Variation de la pente (dP/dV) et le fonctionnement de P&O MPPT en régime permanent	33
Figure 21 : L'analyse de P&O MPPT classique avec glissement.....	34
Figure 22 : Point de fonctionnement selon le signe de dP/dV sur la caractéristique de puissance	35
Figure 23 : Organigramme de l'algorithme INC MPPT	37
Figure 24 : profil du rayonnement solaire.....	38
Figure 25 : Résultats de simulation de l'algorithme P&O MPPT conventionnel.....	39
Figure 26 : Résultats de simulation de l'algorithme INC MPPT conventionnel.....	40
Figure 27 système photovoltaïque	44
Figure 28 La structure globale du système photovoltaïque	45
Figure 29 schéma fonctionnel d'un onduleur.	46
Figure 30 Schéma block onduleur monophasé alimenté par une source PV.....	47
Figure 31 Schéma de l'onduleur triphasé	48
Figure 32 Différents états de commutation des interrupteurs de l'onduleur triphasé.	49
Figure 33 Principe de la commande MLI (PWM) (a) Comparaison du signal sinusoïdal de référence et du signal triangulaire ; (b) Signale de commande logique obtenu.....	51
Figure 34 Schémas de simulation de la chaine de conversion photovoltaïque.....	52
Figure 35 Schémas de simulation de la commande MLI.	52
Figure 36 Tensions simples à la sortie de l'onduleur triphasé	53
Figure 37 Tensions composées à la sortie de l'onduleur triphasé.....	54
Figure 38 Courants de ligne à la sortie de l'onduleur triphasé.....	55
Figure 39 Onde déformé et sa décomposition.....	56

Figure 40 Décomposition harmonique d'un signal déformé	57
Figure 41 Circuit avec une charge linéaire.....	58
Figure 42 Types de Filtres Passifs.	59
Figure 43 courants harmoniques de rang 3 et 5 qui sont injectes.	60
Figure 44 Schéma simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque avec filtre LC.....	61
Figure 45 : Tensions simples à la sortie du filtre LC.....	62
Figure 46 Tensions composées à la sortie du filtre LC.	63
Figure 47 Courant de ligne à la sortie du filtre.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ratio énergétique de plusieurs corps d'armée	6
Tableau 2 : paramètres du module PV MSX-60	37
Tableau 3 :la comparaison entre les deux algorithmes (P&O) et (INC)	41

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies, la consommation mondiale d'énergie électrique a connu une croissance considérable en raison du développement industriel, de l'augmentation démographique et de l'évolution technologique. Cette forte demande énergétique, associée à l'exploitation intensive des ressources fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, a entraîné de nombreuses conséquences environnementales, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, le réchauffement climatique et la dégradation de l'environnement. Face à ces enjeux énergétiques et environnementaux, l'intégration des énergies renouvelables constitue aujourd'hui une solution essentielle pour assurer un développement durable et une transition énergétique efficace.

Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place particulièrement importante grâce à ses nombreux avantages. En effet, l'énergie solaire est une source propre, silencieuse, inépuisable et largement disponible dans plusieurs régions du monde. Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique à travers l'effet photovoltaïque, sans émissions polluantes ni pièces mécaniques en mouvement. Ces caractéristiques font des systèmes photovoltaïques une solution attractive aussi bien pour les installations autonomes que pour les systèmes raccordés au réseau électrique.

Cependant, malgré leurs avantages, les systèmes photovoltaïques présentent plusieurs contraintes techniques. La puissance délivrée par les panneaux solaires dépend fortement des conditions climatiques, principalement de l'irradiation solaire et de la température. Cette variabilité entraîne des fluctuations importantes de la tension et du courant produits, ce qui nécessite l'utilisation de dispositifs de conversion et de commande performants afin d'assurer une exploitation optimale de l'énergie disponible.

Dans ce contexte, l'électronique de puissance joue un rôle fondamental dans les systèmes photovoltaïques modernes. Les convertisseurs statiques permettent d'adapter les niveaux de tension, d'améliorer les performances énergétiques et d'assurer l'alimentation des charges électriques en courant continu ou alternatif. Parmi ces convertisseurs, le convertisseur DC-DC de type Boost est largement utilisé pour élever la tension du générateur photovoltaïque et assurer le fonctionnement des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Ces algorithmes permettent d'extraire en permanence la puissance maximale disponible malgré les variations des conditions atmosphériques.

Par ailleurs, la conversion de l'énergie continue produite par les panneaux photovoltaïques en énergie alternative nécessite l'utilisation d'un onduleur DC-AC. Les onduleurs monophasés et triphasés jouent ainsi un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques, notamment pour l'alimentation des charges alternatives et l'injection de l'énergie dans le réseau électrique. Afin d'améliorer la qualité des tensions et des courants de sortie, les techniques de commande par modulation de largeur d'impulsions (PWM) sont largement utilisées. Toutefois, les opérations de commutation rapides des interrupteurs électroniques génèrent des perturbations harmoniques pouvant dégrader la qualité de l'énergie électrique. Pour cette raison, l'intégration d'un filtre LC en sortie de l'onduleur permet de réduire les composantes harmoniques et d'obtenir des signaux proches d'une forme sinusoïdale.

Le présent mémoire s'inscrit dans ce contexte et porte sur l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque intégrant différentes techniques MPPT ainsi qu'un onduleur triphasé avec filtre LC. L'objectif principal est d'analyser le comportement du système photovoltaïque et d'évaluer les performances des différentes structures de conversion utilisées dans la chaîne énergétique.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est organisé en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre présente une introduction générale aux systèmes électriques et aux différentes sources de production d'énergie. Il aborde les sources conventionnelles ainsi que les principales sources renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, la biomasse et l'énergie solaire. Une attention particulière est également portée aux enjeux environnementaux liés à la consommation énergétique et aux solutions permettant d'améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des systèmes photovoltaïques. Il présente les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques, les technologies existantes, la modélisation électrique des modules PV ainsi que les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. Ce chapitre traite également des convertisseurs Boost et des principales techniques MPPT, notamment les méthodes Perturbation et Observation (P&O) et Conductance Incrémentale, accompagnées de simulations sous MATLAB/Simulink.

Le troisième chapitre porte sur la modélisation et la simulation des onduleurs monophasés et triphasés utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Après une étude du

INTRODUCTION GENERALE

principe de fonctionnement des onduleurs et de la commande PWM, une analyse des perturbations harmoniques est réalisée. Enfin, l'intégration d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur triphasé est étudiée afin d'améliorer la qualité des tensions et des courants délivrés à la charge. Les différentes simulations réalisées sous MATLAB/Simulink permettent d'évaluer les performances globales du système proposé.

Ainsi, ce travail vise à contribuer à la compréhension des systèmes photovoltaïques modernes en combinant l'étude théorique, la modélisation mathématique et la validation par simulation numérique des différentes structures de conversion d'énergie..

CHAPITRE I

INTRODUCTION AUX

SYSTÈMES

ELECTRIQUE

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les caractéristiques fondamentales des principales centrales de production d'électricité afin de mieux appréhender le rôle des sources d'énergie renouvelables et leur intégration éventuelle au sein du système de distribution électrique. Les sources conventionnelles sont évoquées de manière plus succincte, ces dernières représentant la majeure partie de l'énergie fournie dans les réseaux où les renouvelables commencent à s'insérer, et constituant en même temps l'objet principal de cette thèse. Ces systèmes électriques conventionnels perdureront encore un certain temps et, au cours de la transition vers une fourniture énergétique durable, ils devront accompagner la part croissante d'énergie issue des sources renouvelables. Il est donc important que le lecteur dispose d'une compréhension élémentaire des sources conventionnelles et de leurs propriétés. Chaque type d'énergie renouvelable est analysé séparément afin de souligner leurs caractéristiques spécifiques, qui sont par nature variées.

Dans un premier temps, il est utile de rappeler qu'en vertu du principe de conservation de l'énergie, la demande variable des consommateurs doit être continuellement équilibrée par la production électrique, ce qui est désigné par l'expression « la production suit la charge ». Les sources conventionnelles, comprenant ici les centrales fonctionnant aux combustibles fossiles et nucléaires, peuvent généralement fournir une puissance ajustée à la demande dans une certaine mesure, tandis que la majorité des renouvelables produit en fonction des fluctuations inhérentes à leur source d'énergie. Ces variations sont particulièrement marquées pour l'éolien, le solaire, l'énergie des vagues et la marémotrice, bien que le degré de prévisibilité de ces fluctuations diffère, ce qui constitue un élément clé pour assurer la stabilité du système énergétique. Par ailleurs, la production conventionnelle ne peut être modifiée instantanément ni être complètement flexible : les centrales thermiques nécessitent un délai pour atteindre leur pleine charge et ne sont pas conçues pour fonctionner de manière efficace à faible charge. Plus spécifiquement, les centrales nucléaires possèdent une capacité limitée à s'ajuster rapidement aux variations de charge. [01][02][03]

La suite de ce chapitre approfondit l'examen des différentes sources de production, en mettant l'accent sur leur capacité à répondre aux exigences d'un système électrique à grande échelle. Les principales énergies renouvelables sont présentées, à l'exception de la géothermie,

dont l'exploitation reste géographiquement restreinte et peut, lorsqu'elle est disponible, être assimilée à la production thermoénergétique. [04][05]

I.2. Les Sources conventionnelles : charbon, gaz et nucléaire

Les caractéristiques propres aux générateurs utilisant différentes sources de combustibles fossiles déterminent leur rôle au sein d'un système d'approvisionnement énergétique intégré. Les centrales nucléaires, par exemple, présentent une inflexibilité notable et sont généralement conçues pour fonctionner à une puissance stable. Ce mode d'exploitation, désigné sous le terme de charge de base, représente la fraction de la demande qui reste constante dans le temps. Pour ce qui est des centrales à charbon classiques, leur rendement énergétique se situe entre 30 et 40 %, dépendant largement du mode d'exploitation. Les performances optimales se rencontrent lors d'un fonctionnement en charge de base prolongée, alors qu'une augmentation des cycles ou un fonctionnement à faible charge tend à diminuer significativement l'efficacité opérationnelle. Les pointes de demande, qui ne durent que brièvement, sont souvent mieux gérées par des installations d'investissement initial modéré. Malgré des coûts opérationnels élevés liés à une production peu efficace, l'exploitation limitée dans la durée de ces unités de pointe rend ces coûts tolérables. [06][07][08]

La conversion thermique a connu des progrès importants au cours des vingt dernières années notamment grâce à l'essor des turbines à gaz à cycle combiné (TGCC). Dans ce dispositif, le gaz, généralement naturel, est brûlé à des températures avoisinant les 1000°C pour actionner une turbine. Les gaz d'échappement qui en résultent sont ensuite utilisés pour générer de la vapeur qui alimente une turbine à vapeur classique. Ces deux turbines entraînent des générateurs distincts qui injectent l'électricité produite dans le réseau. Cette configuration permet d'augmenter la température de combustion et ainsi d'atteindre des rendements optimaux, avec des performances pouvant atteindre 60 % dans les centrales de nouvelle génération. Ces installations offrent une grande capacité de régulation, bien que leur rendement élevé impose souvent des contraintes liées aux contrats d'approvisionnement en combustible, lesquels conditionnent le maintien d'une charge élevée. La majorité des centrales à gaz opèrent à puissance constante, contribuant ainsi aussi à la charge de base. Cependant, les récentes fluctuations des prix du gaz en Europe ont temporairement modifié cet état de fait, rendant dans certains cas plus économiquement pertinent le recours aux centrales à charbon en charge de base plutôt qu'aux centrales TGCC. [09][10][11]

I.3. Les Sources renouvelable

I.3.1. Énergie hydroélectrique

La production hydroélectrique constitue une forme indirecte d'énergie solaire. En effet, le rayonnement solaire provoque l'évaporation de l'eau des océans et, dans une moindre mesure, de celle des terres émergées. La vapeur ainsi formée s'élève, subit une expansion liée à la baisse de température, puis se condense pour former des nuages. Une partie des précipitations issues de cette condensation retombe en altitude. L'eau présente alors une énergie potentielle due au rayonnement solaire initial. L'énergie hydraulique correspond à la récupération partielle de cette énergie lorsque l'eau regagne les océans. À grande échelle, la production hydroélectrique mobilise de vastes réservoirs généralement créés par des barrages installés sur des cours d'eau. L'eau stockée dans ces réservoirs peut être relâchée de manière contrôlée afin d'actionner des turbines couplées à des générateurs électriques.[12] [13]

Le stockage d'eau dans ces réservoirs permet d'ajuster la production électrique en fonction des besoins du réseau. La capacité de stockage étant limitée, la production est généralement concentrée lors des périodes de forte demande afin d'optimiser les revenus. Étant donné la variabilité saisonnière des apports en eau, des modèles prédictifs intégrant des prévisions pluviométriques sont employés pour planifier et optimiser l'exploitation des centrales hydroélectriques. Dans certains pays bien dotés en ressources hydroélectriques, le coût de l'électricité peut devenir très faible, ce qui favorise le développement d'industries consommatrices d'énergie abondante et peu coûteuse. Cela explique notamment la localisation fréquente, dans ces pays, des activités énergivores telles que la fusion de l'aluminium ou la production de silicium. [14]

Les barrages présentent l'avantage de fournir une chute importante correspondant à la différence d'altitude de l'eau, mais leur construction dépend fortement des caractéristiques topographiques locales. Les cours d'eau jouent naturellement le rôle de canal d'évacuation de l'énergie potentielle de l'eau, et il est possible d'en exploiter une part à travers des installations à faible hauteur de chute, généralement de petite taille. Par ailleurs, on peut également installer des turbines directement dans le lit d'un cours d'eau, sans barrage ni conduits forcés, pour capter une fraction limitée de l'énergie cinétique du courant. Ces dispositifs, fonctionnant sans hauteur de chute, sont désignés sous le terme d'aménagements «au fil de l'eau». [15][16]

I.3.2. Énergie éolienne

Le vent est le résultat des mouvements à grande échelle des masses d'air dans l'atmosphère, qui sont principalement induits par le réchauffement différentiel de celle-ci sous l'effet du rayonnement solaire à l'échelle mondiale. Par conséquent, l'énergie éolienne peut être considérée, à l'instar de l'hydroélectricité, comme une forme d'énergie solaire indirecte. Dans les régions équatoriales, l'air est davantage chauffé, ce qui le rend plus léger et moins dense. Cet air chaud s'élève en altitude, puis se déplace vers les pôles, où l'air de surface est plus frais. Ce déplacement s'interrompt approximativement aux latitudes de 30° nord et sud, zones où l'air refroidit, redescend, et forme, dans les couches inférieures de l'atmosphère, un courant de retour [07] [17] [18].

La couche limite atmosphérique désigne la partie inférieure où la vitesse du vent est freinée par les forces de frottement à la surface terrestre. En conséquence, la vitesse du vent tend à augmenter avec l'altitude, et ce jusqu'à une hauteur d'environ 1000 mètres, variable en fonction des conditions atmosphériques. La variation de la vitesse du vent selon la hauteur est qualifiée de cisaillement. Il en découle que la ressource éolienne exploitable dépend de la hauteur du moyeu des turbines. Cette relation s'est renforcée ces dernières années, parallèlement à l'évolution technologique des éoliennes, dont les hauteurs moyennes dépassent désormais 100 mètres pour les machines de plusieurs mégawatts [18] [19] [20].

Dans ce contexte, le développement de l'énergie éolienne renouvelable s'est considérablement accéléré. Sur des sites bénéficiaires de vents favorables, les parcs éoliens parviennent à produire de l'électricité à des coûts parfois comparables à ceux des générateurs conventionnels les plus compétitifs. Les avancées technologiques, les économies d'échelle, la production en série et l'expérience acquise ont positionné l'énergie éolienne comme la principale source renouvelable susceptible d'apporter une contribution significative à la production électrique au cours de la prochaine décennie [18] [21].

La vitesse du vent à un emplacement donné varie en permanence, selon différentes échelles temporelles : interannuelle, saisonnière, synoptique (liée aux systèmes météorologiques), diurne et même à l'échelle des secondes, correspondant à la turbulence. Ces fluctuations à divers horizons temporels compliquent la prévision de la production énergétique

globale d'un site (sur le plan annuel et saisonnier) et soulèvent des défis pour garantir que la variabilité de la production n'ait pas d'impact défavorable sur le réseau électrique local connectant la turbine.

La figure 1.1 illustre ces variations en présentant plusieurs graphiques de la vitesse du vent sur diverses périodes. Le premier graphique montre la mesure continue sur 30 jours, suivie de représentations de plus en plus détaillées sur des intervalles temporels plus courts. On observe aisément que la variabilité relative est plus marquée sur les séries longues (synoptiques) que sur les séries couvrant des heures ou moins, où les fluctuations diurnes et turbulentes prédominent.

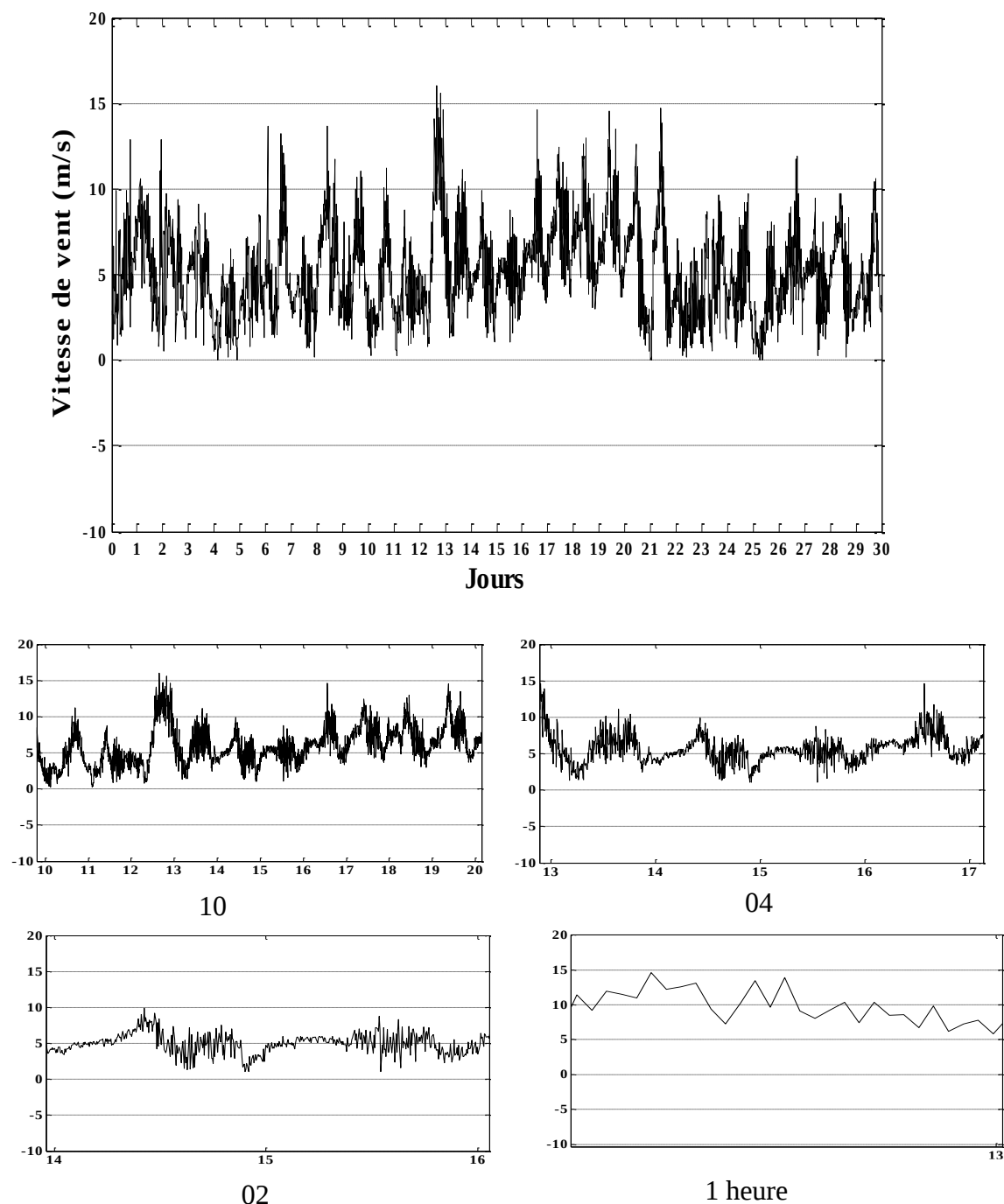


Figure 1 : Vitesse du vent mesurée à 30 m au-dessus d'un terrain (0-15 m/s). (La station météorologique d'Adrar-Algerie)

I.3.3. La biomasse

La biomasse a perdu de son importance au fur et à mesure que les pays ont connu leur industrialisation, ne représentant aujourd'hui qu'environ 3 % de l'énergie consommée dans les pays développés. En revanche, les pays en développement demeurent fortement dépendants du bois et d'autres formes de biomasse naturelle, ces sources couvrant plus de 30 % de leurs besoins énergétiques. Toutefois, la croissance démographique remet en question la durabilité de cet approvisionnement. Il est paradoxal que les pays industrialisés soient amenés à accroître leur recours à la biomasse, tandis que les régions les moins développées cherchent à limiter son usage afin de préserver cette ressource. [22][23]

Un aspect central de la biomasse réside dans l'énergie nécessaire à sa production, incluant la plantation, l'irrigation, l'emploi d'intrants chimiques et pesticides visant à améliorer les rendements, ainsi que la récolte et le séchage. Cette dépense énergétique ne peut être négligée. Par exemple, pour la production d'éthanol destiné aux carburants de transport, les raffineries fonctionnent généralement grâce à des combustibles fossiles afin de fermenter la biomasse et purifier l'éthanol obtenu. [22][24]

Lorsqu'elle est mobilisée pour la production d'électricité, notamment dans les petites centrales de cogénération décentralisées, les bénéfices de la biomasse peuvent être accrus si les cultures sont issues de l'agriculture biologique et exploitées localement. Le choix des cultures impacte également l'efficacité en matière de réduction des émissions de CO₂. Le tableau 1.1 présente le ratio entre l'énergie consommée et l'énergie produite pour plusieurs types de cultures. Parmi celles-ci, le miscanthus et le saule sont privilégiés dans les latitudes européennes et régions similaires. À l'heure actuelle, le miscanthus est principalement utilisé en co-combustion avec le charbon au sein des centrales électriques existantes.[20][36]

Le produit agricole	Ratio
Miscanthus	32.5
Saule	30.0
chanvre (paille)	8.5
blé (grain)	8.8
colza oléagineux	3.8

Tableau 1 : Ratio énergétique de plusieurs corps d'armée

La production à grande échelle de biocarburants présente une consommation énergétique importante et peut entraîner des conséquences négatives tant sur le plan environnemental que social. Ce type de développement requiert des volumes d'eau significatifs, ce qui a conduit à un abaissement préoccupant des nappes phréatiques dans les zones de culture intensive. Par ailleurs, l'extension des surfaces dédiées aux biocarburants pourrait accélérer la déforestation dans les régions tropicales, affectant ainsi la capacité de séquestration du CO₂ et mettant en danger de nombreuses espèces animales et végétales. En outre, si ces cultures sont soutenues par des subventions, il existe un risque de pénuries alimentaires lié à la disparition de terres auparavant consacrées à la production vivrière. Il apparaît donc que, sans une gestion rigoureuse, l'utilisation de la biomasse pourrait engendrer des impacts environnementaux majeurs. [24][25]

I.3.4. Électricité solaire PV et thermique

L'intensité moyenne de la lumière en dehors de l'atmosphère, connue sous le nom de constante solaire, est approximativement de 1353 W/m². En raison de l'atténuation causée par l'atmosphère, l'intensité maximale au niveau de la mer est d'environ 1 kW/m², ce qui correspond à une moyenne annuelle sur 24 heures de 0,2 kW/m² sur la surface globale de la Terre. Étant donné que cette densité énergétique demeure relativement faible, il est nécessaire de disposer de surfaces étendues pour atteindre une production énergétique significative. Par exemple, afin de générer une puissance de l'ordre d'un gigawatt, une surface proche de 5 km² serait requise, en supposant un rendement de conversion de 20 %. Cependant, dans les régions caractérisées par un faible éclairement solaire mais une forte densité de population, les surfaces de toiture disponibles et adaptées peuvent suffire à produire une quantité d'électricité couvrant une fraction notable de la consommation électrique locale. [26][27][28]

L'irradiation solaire varie selon la région géographique, les saisons ainsi que au cours de la journée, en fonction des fluctuations de la hauteur du soleil. Dans de nombreuses zones, l'ensoleillement continu n'est pas assuré. La présence de nuages peut réduire de manière significative le rayonnement net reçu et induire des variations rapides de l'intensité lumineuse, pouvant parfois survenir à l'échelle de la minute, voire en quelques secondes. Les variations saisonnières du rayonnement à la surface terrestre sont illustrées par la comparaison de deux sites distincts. Si l'ampleur de ces variations change selon la localisation, les principes

fondamentaux demeurent constants. De manière générale, les sites situés à des latitudes similaires tendent à présenter des ressources solaires comparables. [29][30][31]

I.3.4.1. La technologie de la conversion

Deux technologies majeures permettent la conversion de la lumière solaire en électricité. Les cellules photovoltaïques tirent parti de dispositifs semi-conducteurs pour convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique. L'efficacité des cellules photovoltaïques cristallines courantes se situe généralement entre 12 et 18 %, bien que des prototypes expérimentaux aient atteint des rendements supérieurs à 30 % [32] [33]. En revanche, les systèmes solaires thermiques procèdent par une conversion intermédiaire de l'énergie solaire en chaleur, sous forme de vapeur, utilisée ensuite pour actionner un turbogénérateur. Afin d'atteindre des températures élevées, ces systèmes s'appuient systématiquement sur des concentrateurs, tels que des auge paraboliques ou des tours solaires. Actuellement, la production d'électricité via ces deux technologies demeure significativement plus onéreuse que celle obtenue par des sources conventionnelles [34] [35].

I.3.4.2. Systèmes photovoltaïques

Au centre d'un système photovoltaïque se trouve le module PV, dont le rendement est principalement influencé par l'intensité du rayonnement incident. Sous des conditions extérieures définies, ces modules se caractérisent par une courbe courant-tension (I-V), telle que présentée à la figure 1.2. La puissance, obtenue par le produit du courant et de la tension, varie selon le point de fonctionnement et atteint un maximum proche du coude de la courbe I-V, appelé point de puissance maximale (PPM). L'électronique de puissance joue un rôle crucial dans la conversion du courant continu fourni par les modules PV en courant alternatif, pouvant ainsi être injecté dans le réseau électrique (des détails supplémentaires sont fournis au chapitre 2). La qualité d'une cellule peut être évaluée à partir de la forme de sa caractéristique I-V, notamment par le facteur de remplissage. Ce dernier se définit comme le rapport entre la puissance au PPM et le produit de la tension en circuit ouvert (valeur en laquelle la courbe I-V croise l'axe des tensions) par le courant en circuit fermé (valeur en laquelle la courbe croise l'axe des courants) [33].

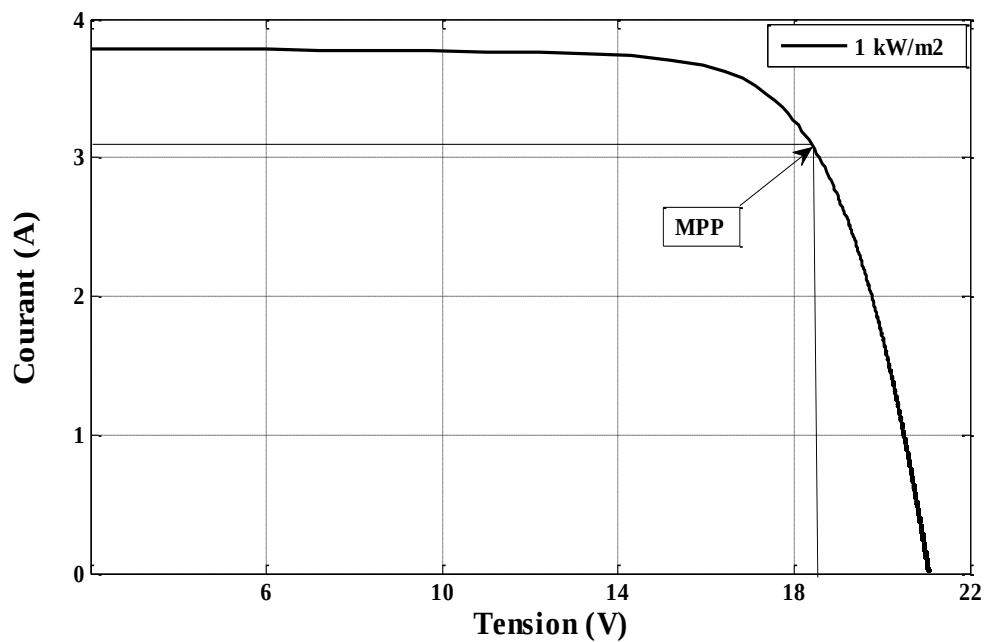


Figure 2 : un exemple de courbe I-V

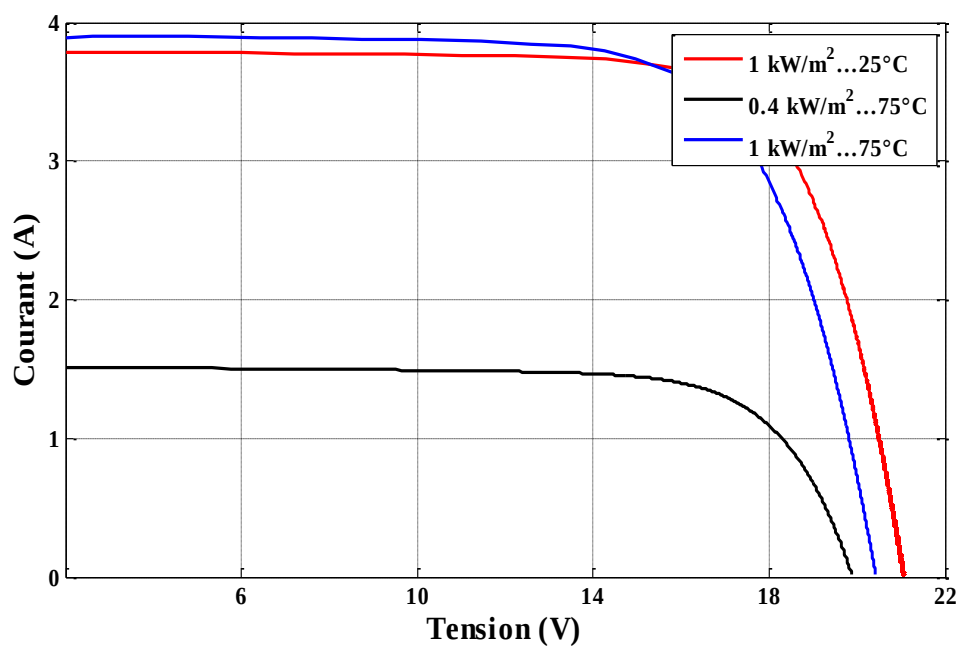


Figure 3 : L'impact du rayonnement et de la température sur la courbe I-V

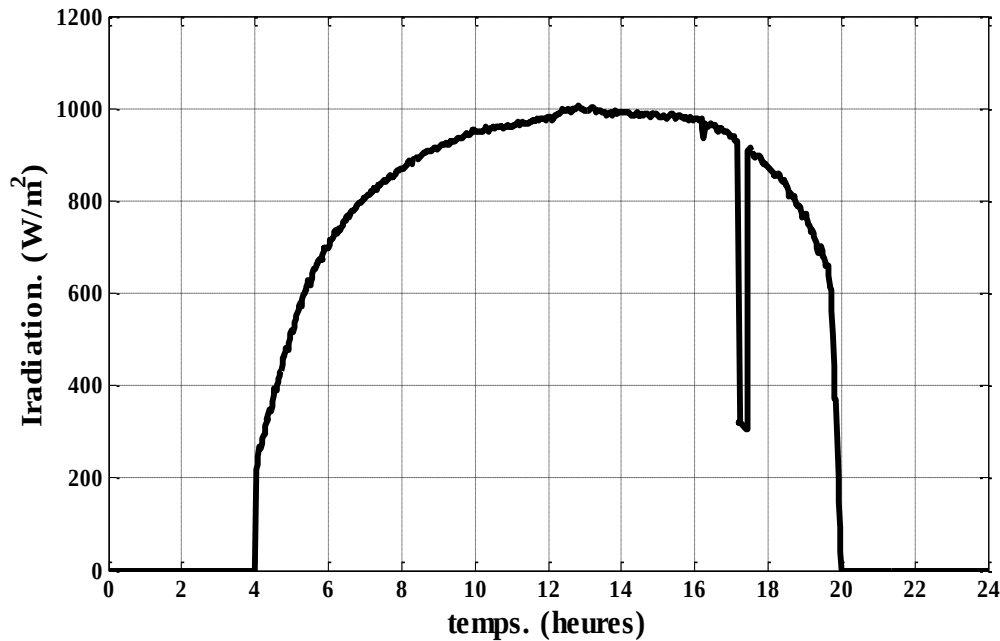


Figure 4 : La variation temporelle du rayonnement pendant une journée d'été (30 août 2010) Adrar-Algérie.

La caractéristique I-V et la tension à laquelle se produit le point de puissance maximale (PPM) sont des éléments essentiels. Le convertisseur de puissance joue un rôle crucial en maintenant la tension de fonctionnement aussi proche que possible du PPM, tout en s'adaptant aux variations liées au niveau d'irradiation et, dans une moindre mesure, à la température du module. Ces deux fonctions sont généralement intégrées dans les onduleurs utilisés pour le raccordement au réseau électrique. Les modules photovoltaïques ne disposent que d'une capacité négligeable de stockage d'énergie ; en conséquence, leur puissance varie immédiatement en fonction des fluctuations d'irradiation. Ainsi, un passage de nuage, comme illustré à la figure 1.4 juste avant 18h00, provoque une chute brutale de la production d'un système photovoltaïque. De manière similaire aux éoliennes, une répartition géographique des installations photovoltaïques permettrait d'atténuer significativement ces variations de courte durée. [32]

1.3.4.3. Systèmes solaires thermiques électriques

Les systèmes de production d'électricité solaire thermique utilisent fréquemment des concentrateurs solaires afin d'atteindre des températures élevées, susceptibles d'alimenter des moteurs thermiques avec une efficacité de conversion raisonnable. Deux types principaux de générateurs adaptés à une production à grande échelle ont été développés jusqu'ici, tous deux

dépendant du rayonnement direct ou focalisé. En conséquence, les régions caractérisées par un climat nuageux ou couvert, où la majorité du rayonnement est diffus, se révèlent peu compatibles avec cette technologie.

De vastes ensembles, ou parcs solaires, composés de réflecteurs paraboliques à auge, comme illustré en figure 1.5, concentrent le rayonnement solaire vers un récepteur linéaire traversé par un fluide caloporteur. Ce fluide peut être une huile thermique résistante à de hautes températures ou de l'eau sous pression. La vapeur générée est collectée puis dirigée vers un échangeur de chaleur ou une chaudière, où elle est surchauffée afin d'alimenter les turbines. Les températures de fonctionnement se situent généralement entre 350 et 400 °C, et des installations d'une puissance pouvant atteindre 80 MW ont été mises en service. Pour accroître la température de la vapeur alimentant la turbine, et ainsi améliorer son rendement, un chauffage complémentaire utilisant des combustibles conventionnels peut être appliqué au niveau du système solaire [36] [37]..



Figure 5 : Centrale à auge

Parabolique de 50 MW avec stockage thermique à Andosol. Espagne. (Reproduit de Concentration Solar Power - de la recherche à la mise en œuvre. C Communautés européennes. 2007)

Dans les tours solaires, le récepteur central est installé au sommet d'une tour entourée par un champ de miroirs orientables, appelés héliostats, qui suivent le mouvement du soleil. Ces héliostats réfléchissent et concentrent la lumière solaire sur le récepteur, où l'énergie est transférée à un fluide caloporteur, pouvant être de l'eau, un sel fondu ou un autre liquide adapté aux hautes températures. Il est possible d'atteindre des températures pouvant atteindre environ

1000 °C. Bien que des systèmes d'une puissance théorique allant jusqu'à 200 MW aient été envisagés, les installations construites à ce jour sont généralement de capacité bien inférieure.

La figure 1.6 illustre l'un des plus grands exemples actuellement opérationnels, les tours solaires PS10 et PS20 de 100 MW situées à Sanlúcar la Mayor, en Espagne. Il est prévu que, pour des centrales de taille supérieure à 300 MW, les tours solaires puissent offrir un avantage économique par rapport aux centrales photovoltaïques au sol [07][38].



Figure 6 : Vue aérienne de la tour solaire PS10 de 100MW à Sanlúcar la Mayor. Espagne. (Reproduit de Concentration Solar Power - de la recherche à la mise en œuvre. C. Communautés européennes).

I.4. La conversion des formes d'énergie

La figure 1.7 illustre les différentes conversions d'énergie menant à la production d'électricité. Actuellement, le principal processus de génération électrique à l'échelle mondiale est représenté par les trajectoires en gras, qui démarrent par la combustion chimique, se poursuivent par la transformation thermique, puis mécanique, pour enfin aboutir à la conversion électrique. Le rendement de cette chaîne est essentiellement limité par les contraintes thermodynamiques, spécifiquement celles imposées par le cycle de Carnot. Les centrales thermiques traditionnelles présentent des rendements situés entre 35 et 40 %, bien que des progrès significatifs aient été réalisés au cours des deux dernières décennies grâce au développement des turbines à gaz à cycle combiné (TGCC), permettant d'atteindre des rendements supérieurs à 50 %. En conséquence, lors de l'utilisation de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole ou le gaz, seule une fraction comprise entre 35 et 50 % de l'énergie primaire est effectivement convertie en électricité, la partie restante étant dissipée dans l'environnement sous forme de chaleur résiduelle [07][39].

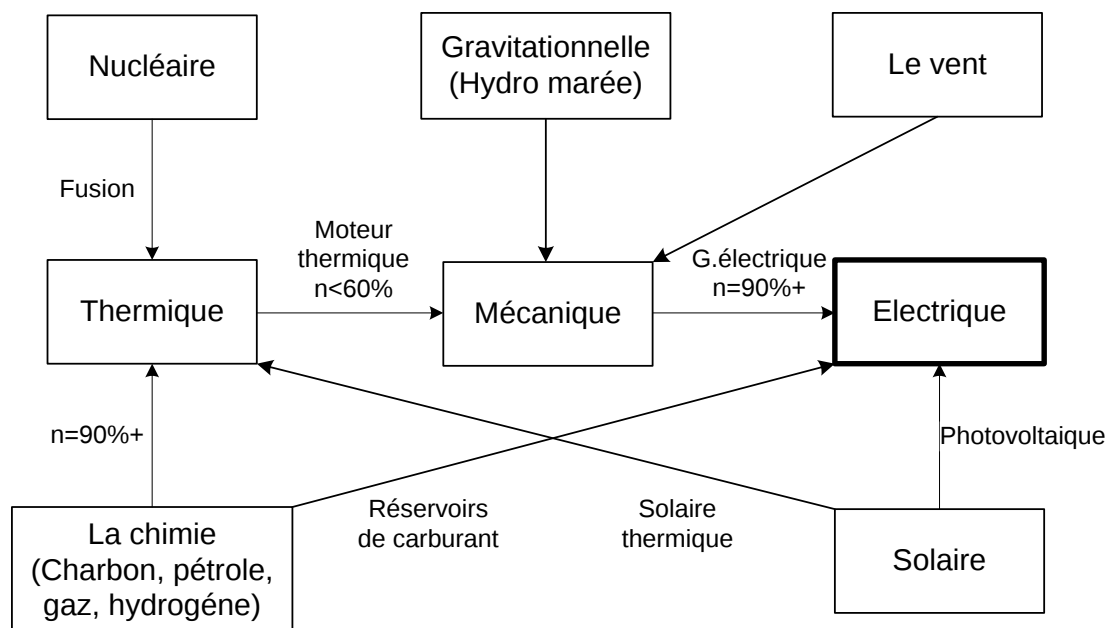


Figure 7 La conversion d'une variété de formes d'énergie en électricité

1.5. L'impact environnemental de la consommation d'énergie

Les combustibles fossiles présentent un trait commun : leur combustion génère du dioxyde de carbone. Ils jouent un rôle central dans le cycle à long terme du carbone sur Terre, ayant été formés durant des périodes géologiques caractérisées par un climat tropical étendu et des concentrations atmosphériques élevées en CO₂. Le carbone ainsi stocké, initialement sous forme de matière végétale transformée en charbon, pétrole, tourbe et gaz, a contribué à une diminution significative des niveaux de CO₂ atmosphérique, ce qui a favorisé un refroidissement global permettant le maintien de formes de vie évoluées. La problématique actuelle découle de la libération de ces stocks de carbone, qui entraîne un changement climatique marqué par un réchauffement planétaire, conséquence directe d'un renforcement de l'effet de serre.

Par ailleurs, le dioxyde de carbone n'est pas le seul polluant issu de la production d'énergie fossile. La combustion dans une atmosphère contenant environ 78 % d'azote conduit inévitablement à la formation d'oxydes d'azote — NO, NO₂ et N₂O — regroupés sous le terme NO_x. De plus, la présence de soufre dans les combustibles engendre des émissions de SO_x. Ces deux familles de composés contribuent à la formation des pluies acides. Pour cette raison, il est désormais courant de réduire les émissions de SO_x dans les centrales thermiques à combustibles fossiles grâce à des procédés de désulfuration des gaz de combustion. Cependant, ces

interventions ont pour effet de diminuer le rendement thermodynamique des installations, ce qui se traduit généralement par une augmentation des émissions de CO₂. [07][40]

I.6. Utilisation efficace de l'énergie

La figure 1.8 met en évidence que les mesures visant à améliorer l'efficacité devraient jouer un rôle prépondérant dans la réduction des effets du changement climatique. Il est néanmoins étonnant que l'utilisation rationnelle et efficiente de l'énergie soit rarement traitée de manière approfondie dans les stratégies nationales ou supranationales, bien que plusieurs études aient démontré que cette approche représente l'une des solutions les plus économiques pour atteindre les objectifs de durabilité [07].

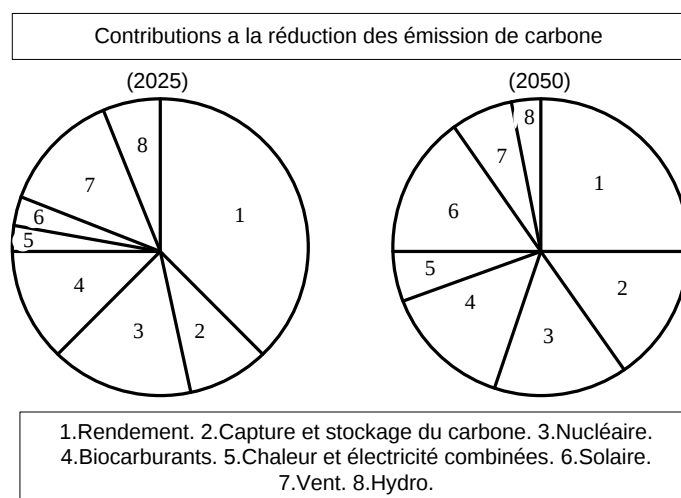


Figure 8 : la répartition des économies d'émissions par technologie. (Reportage tiré du rapport Stern, copyright Cambridge University Press)

I.7. Solutions possibles et durabilité

Les réserves mondiales de combustibles fossiles et de minéraux sont naturellement limitées, ce qui rend l'exploitation du charbon, du pétrole, du gaz et de l'uranium insoutenable sur le long terme. En revanche, l'énergie renouvelable, issue des flux énergétiques naturels, présente un caractère quasi inépuisable et tend à ne pas générer d'effets environnementaux négatifs durablement. En ce sens, elle est destinée à constituer à terme la pierre angulaire des systèmes d'approvisionnement énergétique, voire à devenir la principale source de production électrique.

Parmi les options susceptibles d'être neutres en termes d'émissions de carbone, on trouve notamment la fission nucléaire ainsi que toutes les sources d'énergie directement ou

indirectement liées au rayonnement solaire : biomasse, énergie éolienne, solaire (thermique et photovoltaïque), hydroélectricité et énergie marine. La géothermie ainsi que l'énergie marémotrice sont également considérées comme carboniquement neutres et souvent qualifiées de renouvelables, en raison de l'étendue considérable de leurs réservoirs, qui les rend pratiquement inépuisables. [07][41]

I.8. Conclusion

Actuellement, de nombreux réseaux électriques intègrent des sources d'énergie renouvelable, principalement l'hydroélectricité, l'éolien et le solaire. Il convient de rappeler que la diversité géographique de ces ressources, comme indiqué précédemment, facilite leur intégration. Cette diversité concerne également les autres formes d'énergie renouvelable et joue un rôle important dans leur incorporation aux systèmes conventionnels d'électrification. La relation spatiale et temporelle entre les différentes sources renouvelables intervient directement dans les problématiques d'intégration. Par exemple, la vitesse des courants de marée ne présente pas de corrélation avec celle du vent, et bien que l'énergie des vagues soit une forme dérivée de l'énergie éolienne, elle ne montre pas de corrélation significative avec la vitesse du vent sur des intervalles de dix minutes à une heure. L'énergie solaire suit un schéma de variation propre, tandis que la biomasse offre une certaine flexibilité. La manière dont les différentes sources renouvelables peuvent être combinées pour satisfaire la demande de charge constitue une question centrale qui sera abordée dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II

LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

II.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, la demande en ressources naturelles a connu une croissance rapide, principalement en raison de l'épuisement accéléré du charbon et du pétrole, ce qui exerce une pression considérable sur l'approvisionnement électrique et pourrait conduire à une crise énergétique globale. Face à cette situation, le recours à de nouvelles sources d'énergie fiables devient nécessaire. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, la biomasse, le biogaz, l'énergie des océans, des marées ainsi que la géothermie, sont souvent envisagées comme des alternatives viables aux sources d'énergie traditionnelles pour garantir l'approvisionnement futur.[42][43]

Parmi ces différentes formes d'énergie renouvelable, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît comme particulièrement prometteuse. Elle présente plusieurs avantages, incluant sa propreté, son abondance, sa flexibilité, l'absence d'émission polluante, sa fiabilité, son faible niveau sonore, sa nature quasi inépuisable, ses coûts d'entretien réduits, ainsi que sa conversion aisée en électricité, tout en restant économique. Cependant, cette technologie n'est pas exempte de limitations : son exploitation continue est entravée par les fluctuations climatiques, sa production reste liée à des coûts de fabrication élevés et son rendement énergétique demeure relativement faible.[44]

Les variations météorologiques, en particulier les fluctuations de l'irradiation solaire et de la température, représentent un facteur déterminant pour la performance énergétique des systèmes photovoltaïques. Il est reconnu que ces variations affectent directement le point de puissance maximum (PPM) des modules photovoltaïques ; il est donc important, autant que possible, d'identifier ce PPM. À cet égard, les algorithmes de suivi du point de puissance maximum (MPPT) jouent un rôle crucial en permettant d'extraire cette puissance optimale et d'améliorer ainsi l'efficacité des modules. Différentes méthodes MPPT ont été développées, se distinguant par leur précision, complexité, rapidité et stabilité autour du point de fonctionnement optimal. Parmi elles, les algorithmes dits Incremental Conductance et Perturb and Observe (P&O) sont les plus fréquemment utilisés, notamment en raison de leur simplicité tant dans leur mise en œuvre que dans leur contrôle.[45]

II.2 Définition du photovoltaïque

Le photovoltaïque désigne le processus de conversion directe de la lumière en électricité. Ce phénomène repose sur l'usage de matériaux capables d'absorber les photons lumineux et de libérer des charges électroniques. Ces matériaux sont employés pour concevoir des générateurs électriques dont l'unité fondamentale est appelée cellule photovoltaïque (cellule PV) [46].

II.3 Irradiation et rayonnement solaire

L'irradiation correspond à une grandeur instantanée qui caractérise le flux de rayonnement solaire incident sur une surface exprimée en kW/m². À l'extérieur de l'atmosphère, la densité du rayonnement solaire s'élève à environ 1,373 kW/m² [61]. Cependant, la densité maximale atteinte au niveau de la surface terrestre est généralement limitée à environ 1 kW/m². L'irradiation représente alors l'énergie reçue sur une surface donnée pendant un intervalle de temps précis ; il s'agit en effet de l'intégrale temporelle du flux irradiant. Par exemple, l'irradiation quotidienne peut être quantifiée en kWh/m² par jour. La notion d'isolation est souvent utilisée comme synonyme d'irradiation. Pour une irradiation standard de 1000 W/m², la durée d'ensoleillement est communément exprimée en heures [26] [28]. La figure 2.1 illustre la relation entre irradiation et insolation.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont l'énergie E_{ph} est donnée par l'équation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Où λ désigne la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Ce rayonnement global se compose de trois contributions principales :

- Le rayonnement solaire direct, reçu sans diffusion directement du Soleil.
- Le rayonnement diffus, résultant de la diffusion par l'atmosphère et les nuages.
- Le rayonnement réfléchi, renvoyé par la surface terrestre.

Les mesures du rayonnement solaire s'effectuent à l'aide de pyranomètres pour quantifier le rayonnement global, ou de pyréliomètres pour évaluer le rayonnement direct. L'irradiation solaire correspond à l'intégrale temporelle de ce rayonnement sur une période donnée [47] [48].

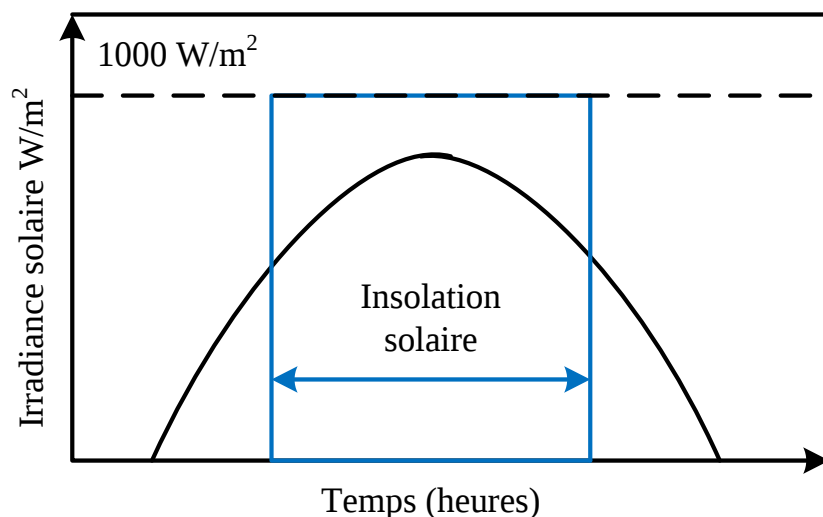


Figure 9 : Rayonnement solaire et insolation

II.3.1. Technologies des cellules photovoltaïques

L'unité fondamentale d'un système photovoltaïque est la cellule solaire, qui assure la conversion directe de l'énergie solaire en courant continu. Une cellule solaire typique repose sur une jonction PN constituée dans un matériau semi-conducteur, fonctionnant de manière analogue à une diode. Le silicium représente le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans ce contexte. Chaque type de matériau présente une efficacité énergétique et un coût spécifiques, variant selon ses propriétés [47]. Plusieurs catégories de cellules solaires sont recensées, parmi lesquelles le silicium monocristallin (c-Si), qui constitue le matériau cellulaire le plus répandu. La figure 2.2 illustre ce type de cellule.

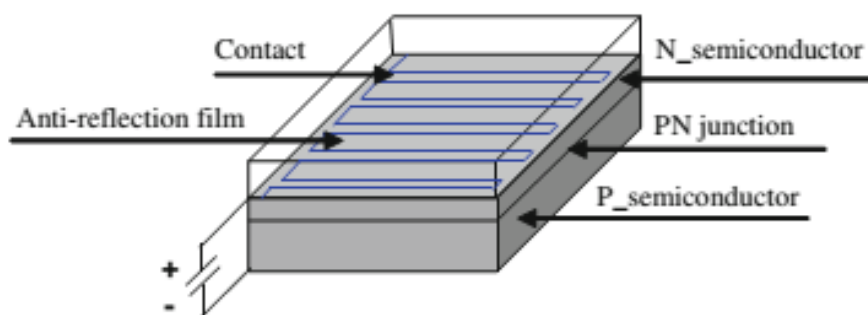


Figure 10 : cellule silicium monocristallin

Son efficacité est limitée par plusieurs facteurs. Le rendement le plus élevé de la cellule solaire au silicium est d'environ 23%, par certains autres matériaux semi-conducteurs jusqu'à 30%, ce qui dépend de la longueur d'onde et le matériau semi-conducteur.

- cellules poly-cristallines

On l'appelle aussi poly-silicium. Dans ce cas, le silicium fondu est coulé en lingots. Puis il forme de multiples cristaux. Ces cellules ont un rendement de conversion légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines. Les modules en silicium monocristallin et poly-cristallin sont très fiables pour les applications de puissance en extérieur.

- Couche mince

La cellule solaire à couche mince (TFSC), aussi appelée cellule photovoltaïque à couche mince (TFPV), est une cellule solaire constituée de matériaux à couche mince de quelques mm ou moins d'épaisseur. Les cellules solaires à couche mince habituellement utilisées sont :

1. Silicium amorphe (a-Si) et autre silicium à couche mince (TF-Si). Le rendement des cellules solaires amorphes se situe généralement entre 10 et 13 %. Leur durée de vie est plus courte que celle des cellules cristallines.
2. Le tellure de cadmium (CTe) est un composé cristallin formé à partir du cadmium et du tellure et son efficacité est d'environ 15 %.
3. Le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIS ou CIGS) est composé de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium. Son rendement est d'environ 16,71%.[47]

II.3.2. Cellules photovoltaïques et modules photovoltaïques**II.3.2.1 Cellules et panneaux**

Pour atteindre une puissance élevée, plusieurs cellules sont généralement assemblées en séries et en parallèles. Un module photovoltaïque résulte de l'association, encapsulée en usine, de plusieurs cellules individuelles. Un panneau regroupe un ou plusieurs de ces modules fixés sur une même structure porteuse.

L'orientation et l'inclinaison des panneaux constituent des paramètres essentiels dans leur conception, tout comme la prise en compte de l'ombrage causé par les obstacles environnants. Lorsque des cellules ou modules identiques sont ajoutés en série, le courant reste constant tandis que la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules ou modules en série. En revanche, une connexion parallèle de modules identiques maintient la tension constante, égale à celle de chaque module, tandis que l'intensité s'accroît en fonction du nombre de modules connectés en parallèle. [49][50]

En considérant les autres grandeurs comme constantes, le courant photovoltaïque IPV fourni par une cellule dépend de la tension VPV à ses bornes. On observe une diminution du

courant lorsque la tension augmente, la courbe caractéristique présentant une concavité dirigée vers le bas. La tension en circuit ouvert (V_{oc}) et le courant de court-circuit (I_{sc}) sont deux paramètres fréquemment utilisés pour caractériser les performances électriques de la cellule. Le courant de court-circuit I_{sc} correspond au courant mesuré lorsque les bornes de sortie sont court-circuitées, c'est-à-dire à une tension nulle ($V_{PV}=0$). La tension en circuit ouvert V_{oc} correspond à la tension mesurée lorsque le courant est nul ($I_{pv}=0$).

Les valeurs d' I_{sc} et V_{oc} , obtenues dans des conditions standards, sont désignées respectivement I_{sc-ref} et V_{oc-ref} . Ces informations figurent généralement dans la fiche technique du module ou de la cellule. [51][52]

La puissance fournie par un générateur photovoltaïque s'exprime par

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (2.2)$$

Cette puissance est positive pour la partie de la courbe I_{PV} - V_{PV} comprise entre le point d'ouverture et le point de court-circuit, donc pour les valeurs de V_{PV} satisfaisant la condition

$$0 < V_{PV} < V_{OC} \quad (2.3)$$

En dehors de l'intervalle spécifié par l'équation 2.3, la puissance P_{pv} devient négative, ce qui signifie que l'appareil photovoltaïque absorbe de la puissance du circuit électrique externe. Selon l'équation 2.2, la puissance P_{pv} est nulle lorsque la tension V_{PV} est égale à zéro, ce qui correspond au point de court-circuit. De manière similaire, lorsque V_{PV} atteint la tension en circuit ouvert V_{oc} , le courant I_{pv} est nul, entraînant également une puissance P_{pv} nulle conformément à la même équation. Dans l'intervalle défini par l'équation 2.3, la puissance PPV présente un maximum à un point désigné sous le nom de Maximum Power Point (MPP). Les valeurs de tension et de courant associées à ce point sont respectivement notées V_{MPP} et I_{MPP} . A ce point P (V_{MPP} , I_{MPP}), la puissance P_{pv} fournie par le générateur photovoltaïque est maximale et dénommée P_{MPP} .

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (2.4)$$

Dans la condition standard, les P_{MPP} , V_{MPP} et I_{MPP} prennent respectivement les valeurs $P_{MPP-ref}$, $I_{MPP-ref}$ et $V_{MPP-ref}$.

Le PPM est atteint lorsque

$$0 = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \quad (2.5)$$

$$0 = \frac{\partial (V_{pv} \cdot I_{pv})}{\partial V_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \quad (2.6)$$

$$- \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.7)$$

Le terme situé à gauche de l'équation 2.7 correspond à la résistance interne incrémentale du générateur photovoltaïque, le signe négatif découlant du choix des directions de référence associées à cet appareil. L'élément pertinent dans ce contexte est la résistance apparente de la charge. Par conséquent, l'équation 2.7 peut être interprétée comme la condition d'adaptation entre la résistance de la charge et la résistance interne du générateur photovoltaïque [53].

II.3.2.2 Efficacité

Le rendement de conversion d'un module photovoltaïque est défini comme la fraction de l'énergie solaire incidente que le module transforme en énergie électrique. Il s'exprime par le rapport entre la puissance électrique délivrée par le module et la puissance de la radiation lumineuse reçue.

$$\eta_1 = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{pv} \cdot I_{pv} \cdot I_{pv}}{A_{pv} \cdot G} \quad (2.8)$$

Où A_{pv} est la surface du module solaire et G l'irradiation. En fait, l'efficacité réelle du panneau PV est donnée par :

$$\eta_{pv} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \quad (2.9)$$

Où η_1 correspond au rendement calculé du panneau photovoltaïque, tel que défini par l'équation 2.8. Le facteur η_2 reflète l'impact de l'augmentation de la température de jonction, résultant du fait qu'une partie du rayonnement solaire incident n'est pas convertie en énergie électrique, mais dissipée sous forme de chaleur à l'intérieur du module. Cette élévation thermique est plus prononcée en cas de ventilation insuffisante des modules photovoltaïques, avec des valeurs comprises entre 0,8 et 0,9. La perte associée à η_3 provient de l'effet Joule dans les câbles. Pour en limiter l'ampleur, la section des conducteurs est déterminée en fonction d'une chute de tension admissible, conduisant à une valeur de η_3 égale à 0,98. Le facteur η_4

correspond aux pertes dans l'onduleur, estimées à 0,95. Quant à η_5 , il traduit l'efficacité du suivi du point de puissance maximale. Lorsque l'on considère également les pertes introduites par le convertisseur assurant cette fonction de suivi, η_5 ne prend en compte que les imperfections du tracking, avec une valeur de 0,98. Cette valeur diminue à 0,95 si les pertes du convertisseur sont intégrées dans l'évaluation. En l'absence de suivi du point de puissance maximale, η_5 reflète l'impact de cette carence, s'établissant alors à 0,8 [54].

II.3.2.3 Facteur de remplissage

Il décrit à quel point la courbe $I_{pv}-V_{pv}$ est carrée. Le facteur de remplissage est défini comme suit

$$FF = \frac{P_{MPP}}{(V_{OC} \cdot I_{SC})} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.10)$$

II.4 Modélisation du module PV

Le module photovoltaïque représenté sur la figure 2.3, souvent désigné sous le terme de modèle à diode unique, comprend une source de courant I_{pv} dont l'intensité varie en fonction des conditions environnementales telles que l'irradiation et la température. Cette source est associée à une diode placée en parallèle, ainsi qu'à deux résistances : une en série, R_s , et une autre en parallèle, R_{sh} .

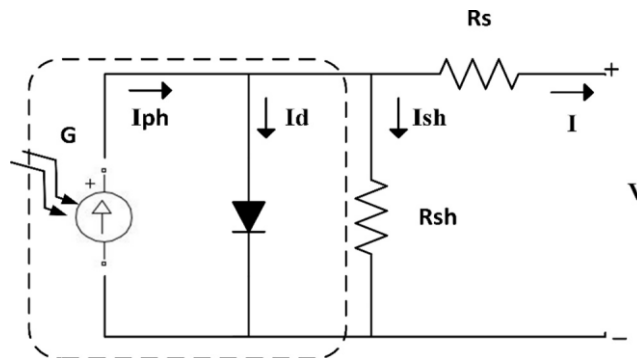


Figure 11 : Modèle de circuit équivalent d'une cellule PV

En appliquant la loi de Kirchhoff au modèle de circuit équivalent présenté à la figure 2.3 de la cellule photovoltaïque, le courant de sortie (I) peut être déterminé à partir de l'équation 2.11. Dans cette équation, I représente le courant délivré par le module PV, I_{pv} correspond au courant généré par la cellule photovoltaïque en fonction du rayonnement solaire, tandis que I_d et I_{sh} désignent respectivement le courant de la diode et celui circulant à travers la résistance parallèle.

$$I = Np \left(I_{pv} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V+R_s I}{\frac{N_s k T}{q} \gamma} \right)} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \right) \quad (2.11)$$

Le courant IPV tiré du système peut s'écrire comme suit Eq 2.12

$$I_{pv} = \left(\frac{G}{G_{STD}} \right) (I_{pv,STD} + K(T - T_{STD})) \quad (2.12)$$

Soit G le rayonnement solaire en W/m², GSTD la valeur du rayonnement solaire sous conditions standard (W/m²), I_{pv,STD} le courant du module photovoltaïque mesuré à GSTD et à la température standard de la jonction p-n TSTD. K désigne la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23}) tandis que T représente la température de la jonction p-n exprimée en Kelvin[8][10][11]. Le courant de diode I₀ peut alors être exprimé selon l'équation 2.13.

$$I_0 = \frac{I_{pv,STD} + K_i(T - T_{STD})}{e^{\left(\frac{qV_{oc} + K_i(T - T_{STD})}{\gamma V_t} - 1 \right)}} \quad (2.13)$$

Où q représente la charge élémentaire ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C), Voc et Vt désignent respectivement la tension en circuit ouvert et la tension thermique du module photovoltaïque. KI et KV correspondent aux coefficients relatifs au courant de court-circuit et à la tension en circuit ouvert, tandis que γ est la constante d'idéalité de la diode. V désigne la tension de sortie du module PV ; Rs est la résistance série associée au contact métallique reliant les cellules photovoltaïques, et Rp la résistance parasite due aux courants de fuite au niveau de la jonction p-n. Ns et Np représentent respectivement le nombre de cellules connectées en série et en parallèle [52].

II.5 Courbes caractéristiques des cellules solaires

La caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque est généralement illustrée par la courbe courant-tension (I_{pv}-V_{pv}) ainsi que par la courbe puissance-tension (P_{pv}-V_{pv}), analysées sous différentes conditions.

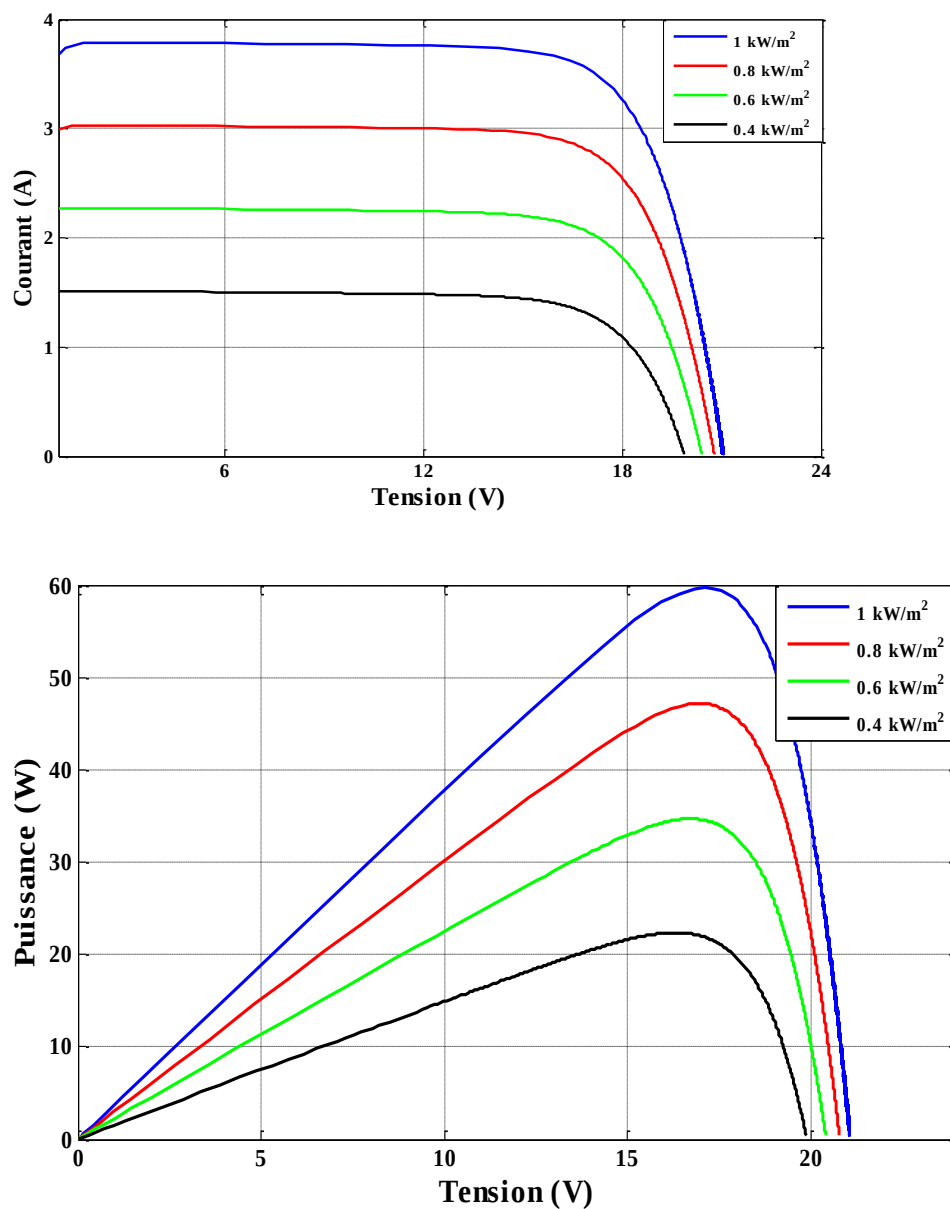


Figure 12 : effet d'éclairement sur les caractéristiques électrique

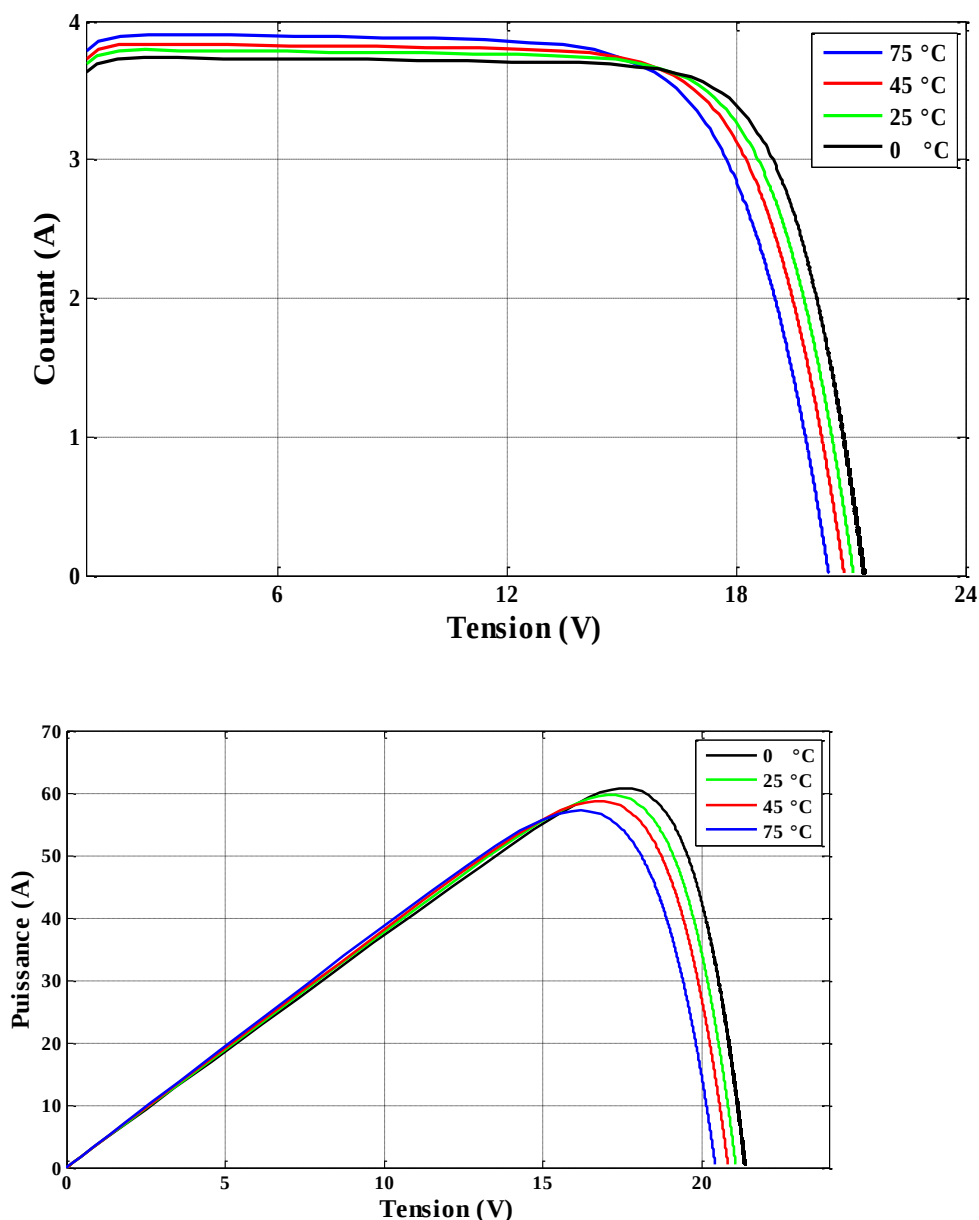


Figure 13 : L'effet de température sur les caractéristiques électrique

Effet d'irradiation

La figure 2.4 illustre les caractéristiques courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) ainsi que puissance-tension (P_{pv} - V_{pv}) d'une cellule photovoltaïque soumise à divers niveaux de rayonnement. Il apparaît que le courant de court-circuit (I_{sc}) augmente de manière presque linéaire avec l'irradiance, tandis que la tension en circuit ouvert (V_{oc}) présente une hausse plus modérée. Par ailleurs, la puissance électrique maximale ($PMPP$) croît plus rapidement que l'irradiance, ce qui implique une amélioration de l'efficacité pour des niveaux d'éclairement plus élevés. Les conditions dites de référence correspondent typiquement à une irradiance de 1000 W/m^2 . En pratique, l'intensité du rayonnement incident sur les cellules photovoltaïques sans concentration

optique est inférieure, ce qui conduit à un rendement moindre que la valeur nominale indiquée dans la littérature [55] [56].

Effet de la température

Concernant l'impact de la température, une élévation de la température interne de la jonction (T_j) entraîne une légère augmentation du courant de court-circuit I_{sc} , attribuable à une absorption lumineuse améliorée liée à la diminution de la largeur de la bande interdite. En revanche, la tension en circuit ouvert diminue sensiblement avec la température, ce qui provoque une réduction significative de la puissance électrique maximale, comme l'illustre la figure 2.5. Les conditions standard sont définies généralement à une température de jonction de 25 °C. Or, en conditions réelles sous illumination solaire, cette température s'avère souvent plus élevée, ce qui conduit à une baisse de l'efficacité.

Pour des variations de température modérées, il est possible de calculer le courant de court-circuit I_{sc} à une température donnée T_j grâce à une relation adaptée :

$$\Delta T = T_j - T_{jref} \quad (2.13)$$

$$I_{sc} = I_{sc-T_{jref}} [1 + \alpha_{sc} \cdot \Delta T] \quad (2.14)$$

Où α_{sc} Le coefficient de température relatif du courant de court-circuit (/K), tel qu'indiqué dans la fiche technique, est noté. T_{jref} désigne la température de référence de la cellule photovoltaïque (K), tandis qu' $I_{sc-T_{jref}}$ correspond au courant de court-circuit mesuré à cette température. De manière similaire, la tension à vide peut être exprimée pour de faibles variations de température selon la relation suivante :

$$V_{oc} = V_{oc-T_{jref}} [1 + \beta_{oc} \cdot \Delta T] \quad (2.15)$$

Où $V_{oc-T_{jref}}$ représente la tension à vide mesurée à la température de référence, et β_{oc} désigne le coefficient thermique relatif de cette tension (exprimé en /K), tel qu'indiqué dans la documentation technique. Par ailleurs, il est fréquent que cette même documentation fournisse également le coefficient de température associé au point de puissance maximale (PMPP) :

$$P_{MPP} = P_{MPP-T_{jref}} [1 + \gamma_{MPP} \cdot \Delta T] \quad (2.16)$$

où $P_{MPP-T_{jref}}$ est la puissance maximale à la température de référence, $k_{si MPP}$ est le coefficient de température de puissance maximale relative ($/K$) tel que trouvé dans la fiche technique [70].

II.6 Introduction aux systèmes PV

Un système photovoltaïque est conçu pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Il est constitué de divers composants, notamment des cellules photovoltaïques, des interconnexions électriques, une structure de montage mécanique et un dispositif de conversion de l'énergie électrique. L'électricité générée peut être soit stockée au sein d'un système autonome, soit accumulée dans des batteries, soit injectée dans un réseau électrique plus vaste. L'intégration d'un équipement de conditionnement de puissance est avantageuse, car elle optimise le fonctionnement du système photovoltaïque. Dans ce contexte, des dispositifs spécifiques sont employés pour maximiser le transfert de puissance au réseau. Ces dispositifs sont communément appelés suiveurs de point de puissance maximale [57].

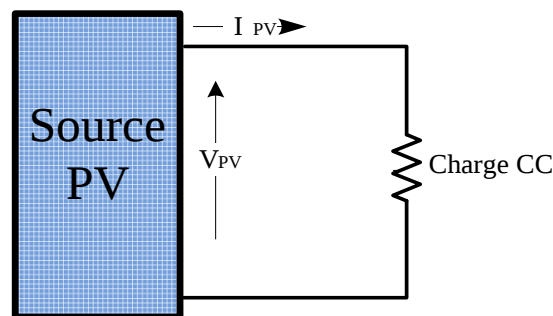


Figure 14 : Système PV à couplage direct

II.6.1 Systèmes photovoltaïques autonomes à couplage direct

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont conçus pour fonctionner de manière indépendante du réseau électrique, souvent dimensionnés pour alimenter certaines charges en courant continu (CC) ou alternatif (CA). Le modèle le plus élémentaire de ces systèmes repose sur un couplage direct, où la sortie en CC d'un module photovoltaïque est connectée directement à une charge en CC, comme illustré en figure 2.6. Dans ce type de configuration, la charge ne fonctionne qu'en présence d'ensoleillement. Ce principe s'applique fréquemment à des équipements tels que les ventilateurs de ventilation, les pompes à eau ou encore les petites pompes de circulation utilisées dans des systèmes de chauffage solaire thermique de l'eau.

II.6.2 Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage sur batterie alimentant des charges CC et CA

Lorsque les applications photovoltaïques autonomes doivent fournir de l'électricité durant la nuit ou en l'absence de lumière, l'intégration d'un dispositif de stockage devient indispensable. Les batteries constituent la solution de stockage la plus couramment employée. Divers types de batteries peuvent être envisagés, notamment les batteries plomb-acide, nickel-cadmium, bromure de lithium zinc, chlorure de zinc, soufre de sodium, nickel-hydrogène, ainsi que les systèmes redox et vanadium. Le choix d'une batterie pour une application photovoltaïque repose sur plusieurs critères spécifiques.

Le régulateur de charge joue un rôle crucial en maintenant la batterie dans un état de charge optimal tout en évitant tant la surcharge causée par le générateur photovoltaïque que la décharge excessive due aux charges connectées. Plusieurs technologies de régulateurs de charge existent. Le contrôleur shunt, par exemple, agit en parallèle avec le réseau et la batterie pour réguler leur charge. Le contrôleur série, quant à lui, est souvent utilisé dans les petits systèmes photovoltaïques, se plaçant en série entre le générateur PV et la batterie. Enfin, le contrôleur de suivi du point de puissance maximum assure que le générateur PV fonctionne à son rendement optimal. Le variateur, lorsque présent, utilise un générateur interne de fréquence afin de fournir une sortie avec la fréquence adéquate.

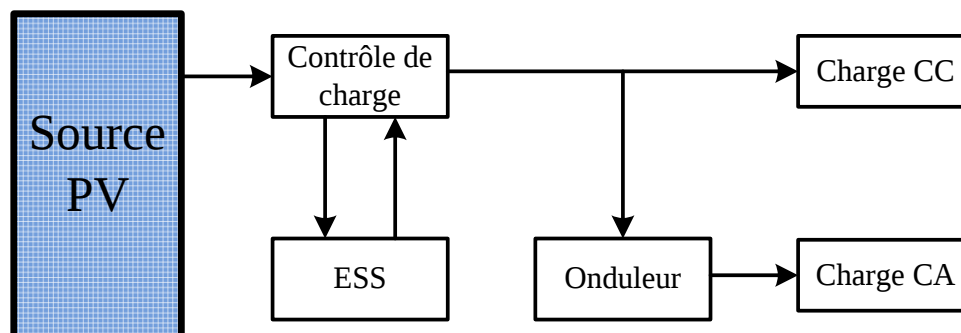


Figure 15 : Diagramme d'un système PV autonome typique alimentant des charges CC et CA

II.7 Analyse d'un convertisseur élévateur de tension

Parmi les divers convertisseurs DC-DC employés dans les systèmes photovoltaïques, le convertisseur boost se distingue par son large utilisation, due notamment à la simplicité de sa structure, à sa facilité de mise en œuvre et à son efficacité relativement élevée. Ce convertisseur peut être analysé en fonction de deux modes, correspondant respectivement à l'état allumé et

éteint du MOSFET. En modulant la durée d'activation commutée, il devient possible de réguler la puissance transmise au sein des systèmes photovoltaïques. Les relations mathématiques régissant le fonctionnement du convertisseur boost sont exprimées dans l'équation 2.17 [58].

$$V_c = \frac{V_{PV}}{1-D} \quad (2.17)$$

$$\text{Où, } D = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.18)$$

D représente le rapport cyclique, tandis que V_0 et V_{PV} désignent respectivement la tension du convertisseur élévateur et la tension de sortie. La période du cycle est notée T , et T_{ON} correspond à la durée de mise sous tension. L'activation ou la désactivation s'effectue en fonction de la commande par modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les modes de commutation du MOSFET, en position ON et OFF, dans le convertisseur DC/DC Boost sont illustrés par les schémas équivalents présentés à la Figure 2.8.

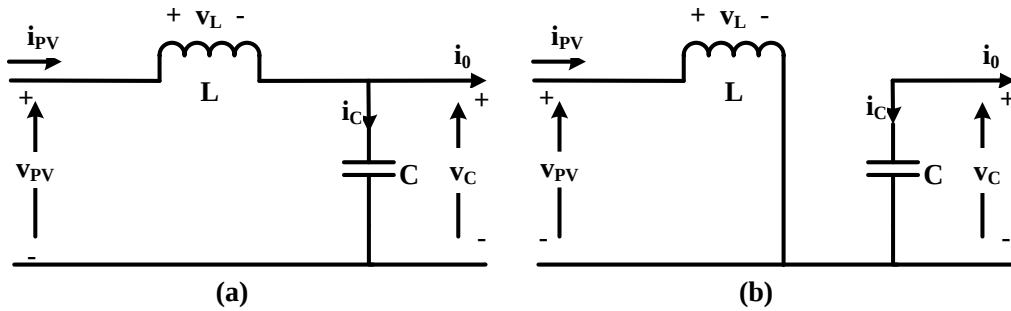


Figure 16 : circuits équivalents du convertisseur DC/DC Boost pour les deux états de commutation. (a) Interrupteur ON $s=1$. (b) Interrupteur OFF $s=0$

Il est établi que, lorsque le MOSFET du convertisseur élévateur de tension est conducteur, la tension d'entrée traverse l'inductance (L). Ce phénomène peut être décrit par les équations 2.19 et 2.20.

$$\frac{di_{PV}}{dt} = -\frac{1}{L}i_{PV} + \frac{1}{L}v_{PV} \quad (2.19)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{1}{C}i_{PV} + \frac{1}{RC}v_C \quad (2.20)$$

Et lorsque le MOSFET est éteint, les équations peuvent être exprimées par Eq 2.21 et Eq 2.22

$$\frac{di_{PV}}{dt} = \frac{1}{L}v_{PV} \quad (2.21)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{1}{RC} v_C \quad (2.22)$$

La réalisation du convertisseur DC-DC boost facilite l'extraction de la puissance produite par les modules photovoltaïques au point de puissance maximale (MPP). Cette puissance est ensuite utilisée pour alimenter la charge, grâce à l'adaptation du rapport cyclique D selon l'algorithme MPPT, comme illustré à la figure 2.9 [58] [59].

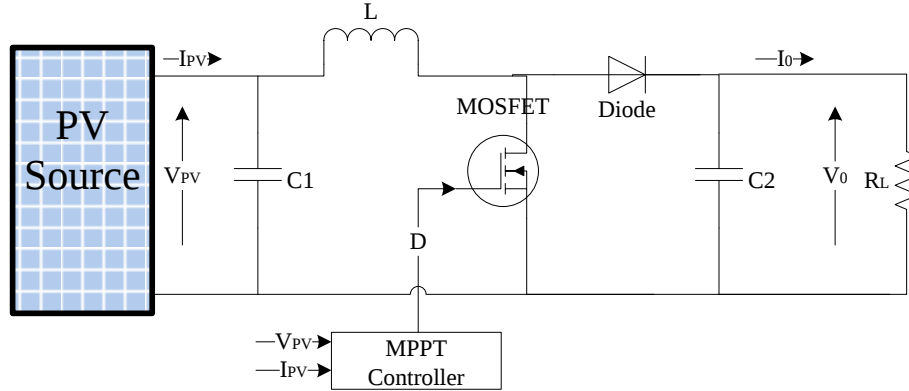


Figure 17 : Schéma fonctionnel de l'installation PV avec régulateur MPPT

L'efficacité du convertisseur boost peut être écrite par Eq 2.23

$$\eta = \frac{V_0 I_0}{V_{PV} I_{PV}} = \frac{V_0 I_0}{V_{PV}^2 / R_{eq}} = \left(\frac{V_0}{V_{PV}} \right)^2 \frac{R_{eq}}{R_L} = \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \frac{R_{eq}}{R_L} \quad (2.23)$$

Où, I_{PV} et V_{PV} sont respectivement le courant et la tension du module PV. R_{eq} est la résistance équivalente du convertisseur, extraite d'Eq 2.23

$$R_{eq} = \eta \left(\frac{1-D}{D} \right)^2 R_L \quad (2.24)$$

À partir d'Eq 2.24 et comme le montre la figure 2.10, la variation du rapport cyclique fait varier le point de fonctionnement lorsque la résistance équivalente change [60]

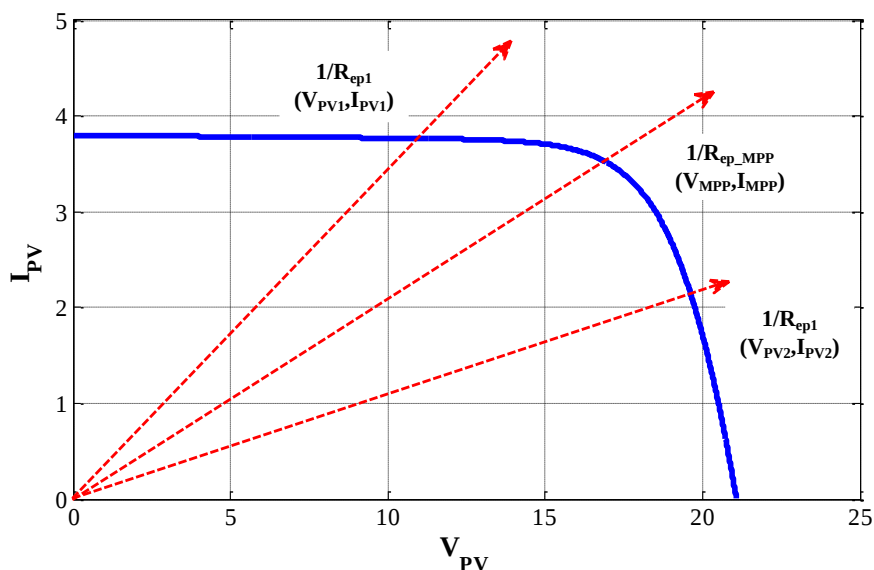


Figure 18 : Variation du point de fonctionnement par rapport à la ligne de charge (R_{eq})

II.8 Algorithmes de poursuite des points de puissance maximale

Le contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) associé à un convertisseur DC/DC permet à un générateur photovoltaïque de délivrer une puissance continue maximisée, indépendamment des conditions environnementales telles que l'irradiation ou la température. Cette méthode vise à positionner le système à son point de fonctionnement optimal, caractérisé par la tension et le courant optimaux (V_{opt} , I_{opt}). L'introduction initiale d'un système MPPT remonte à 1968 dans le cadre d'applications spatiales. Depuis lors, divers algorithmes MPPT ont été conçus et largement adaptés afin d'identifier ce point de puissance maximale. La technique dominante repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique (duty cycle) pour maintenir le générateur à sa valeur optimale malgré les fluctuations des conditions météorologiques ou les variations soudaines de la charge. Les éléments essentiels d'un circuit MPPT comprennent un étage de puissance et un contrôleur.

Dans la figure 2.9, la tension d'entrée de l'étage de puissance (V_{pv}) et le courant (I_{pv}) sont exploités par le contrôleur dans le suivi du point de puissance maximale. Le paramètre de commande de l'étage de puissance, noté α , est ajusté de manière continue jusqu'à ce que le générateur PV atteigne son point de puissance maximal. [55]

II.8.1 Technique de perturbation et d'observation

L'algorithme Perturb & Observe (P&O), connu aussi sous le terme de « hill climbing », se distingue par sa popularité et son usage courant, en raison essentiellement de sa simplicité

de mise en œuvre et du faible nombre de paramètres mesurés requis. Ce procédé repose sur la mesure continue du courant et de la tension du générateur photovoltaïque, ainsi que sur le calcul de la puissance de sortie, afin d'orienter le point de fonctionnement vers la puissance maximale.

Cette méthode fonctionne grâce à une boucle de rétroaction, nécessitant un nombre limité de mesures. La tension du panneau est intentionnellement modifiée, soit augmentée, soit diminuée, puis la nouvelle puissance est comparée à celle enregistrée avant cette perturbation. Si l'augmentation de la tension génère une hausse de la puissance, la prochaine modification continuera dans la même direction ; inversement, si la puissance diminue, la perturbation suivante s'effectuera dans la direction opposée. Un organigramme illustrant ce principe est présenté en figure 2.11.

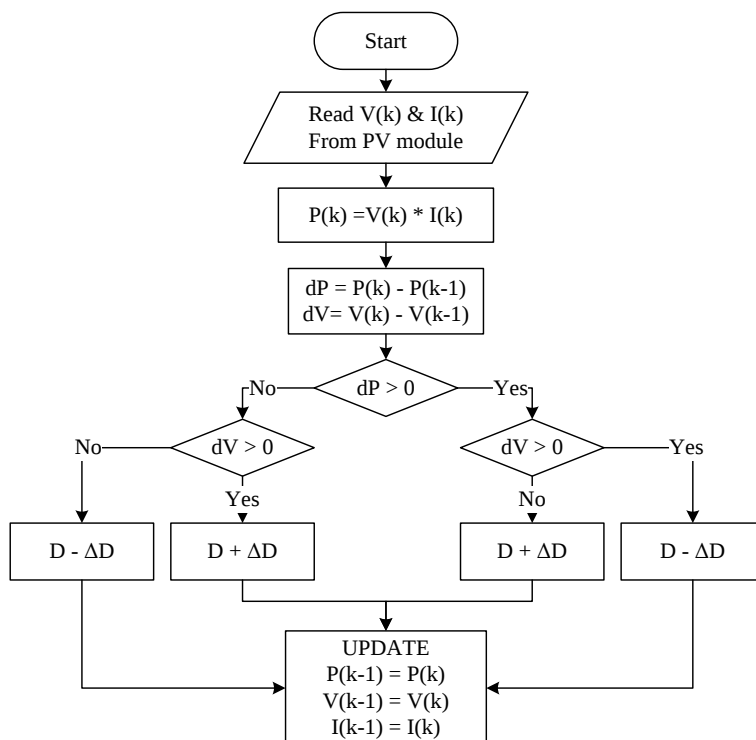


Figure 19 : Organigramme de l'algorithme P&O MPPT conventionnel

Les avantages de cette méthode se résument principalement au fait qu'elle ne requiert pas la connaissance préalable des caractéristiques du générateur photovoltaïque et qu'elle présente une relative simplicité d'implémentation. Cependant, en régime permanent, le point

de fonctionnement fluctue autour du point de puissance maximale (MPP), ce qui engendre des pertes d'énergie. L'utilisation d'une technique de suivi du MPP (MPPT) s'avère donc nécessaire afin d'extraire la puissance maximale du module photovoltaïque [61].

Cela implique que lorsque le signal en croissance devient négatif, la direction de variation s'inverse et que le point de fonctionnement continue d'osciller avec un pas fixe dans cette zone, conduisant ainsi à un phénomène d'ondulations en régime permanent, illustré à la figure 2.12. Par exemple, si l'on considère que le point de fonctionnement (1) évolue jusqu'au point (2), la décision est alors prise au point (2), comme le montre la figure :

$dP = (P_2 - P_1) > 0$ et $dV = (V_2 - V_1) > 0$, le point de fonctionnement passe à (3) par diminution du cycle. Et à (3) comme $dP = (P_3 - P_2) < 0$ et $dV = (V_3 - V_2) > 0$, le point de fonctionnement revient à (2) en augmentant le rapport cyclique. A (2) comme $dP = (P_2 - P_3) > 0$ et $dV = (V_2 - V_3) < 0$ le point de fonctionnement passe à (1) en augmentant le rapport cyclique. A (1) comme $dP = (P_1 - P_2) < 0$ et $dV = (V_1 - V_2) < 0$, Le point de fonctionnement évolue vers (2) lorsqu'on réduit le rapport cyclique. Dans ce contexte, la méthode conventionnelle de recherche du maximum par perturbation et observation (P&O) provoque une oscillation du point de fonctionnement entre ces trois positions.

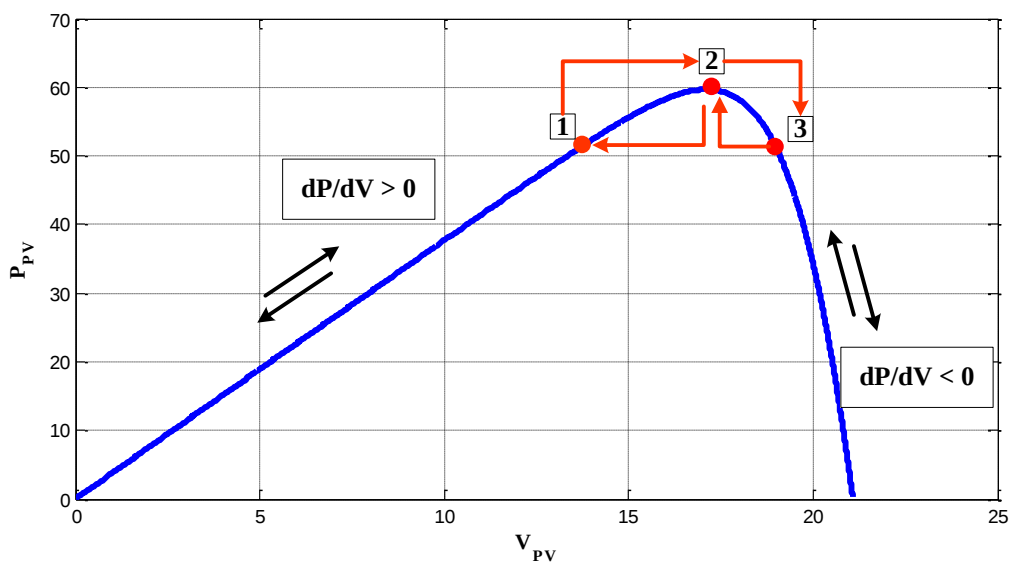


Figure 20 : Variation de la pente (dP/dV) et le fonctionnement de P&O MPPT en régime permanent

Un autre inconvénient réside dans le fait que la méthode P&O conventionnelle ne parvient pas à suivre le point de puissance maximale (MPP) lorsque les conditions climatiques évoluent rapidement. En conséquence, cette méthode ne peut être considérée comme valide que dans des situations où les variations du rayonnement sont uniformes ou lentes. Par exemple, si lors du fonctionnement au point (1), l'irradiation augmente, le point de fonctionnement se déplacera vers un nouveau point (4) sur la nouvelle courbe illustrée à la figure 2.13 $dP = P_4(kTa) - P_2((k-1)Ta) > 0$ et $dV = V_4(kTa) - V_2((k-1)Ta) > 0$. Le rapport cyclique sera diminué de manière à ce que le point de fonctionnement s'éloigne du point de puissance maximale (MPP), ce phénomène étant désigné sous le terme de glissement ou de dérive [62][63].

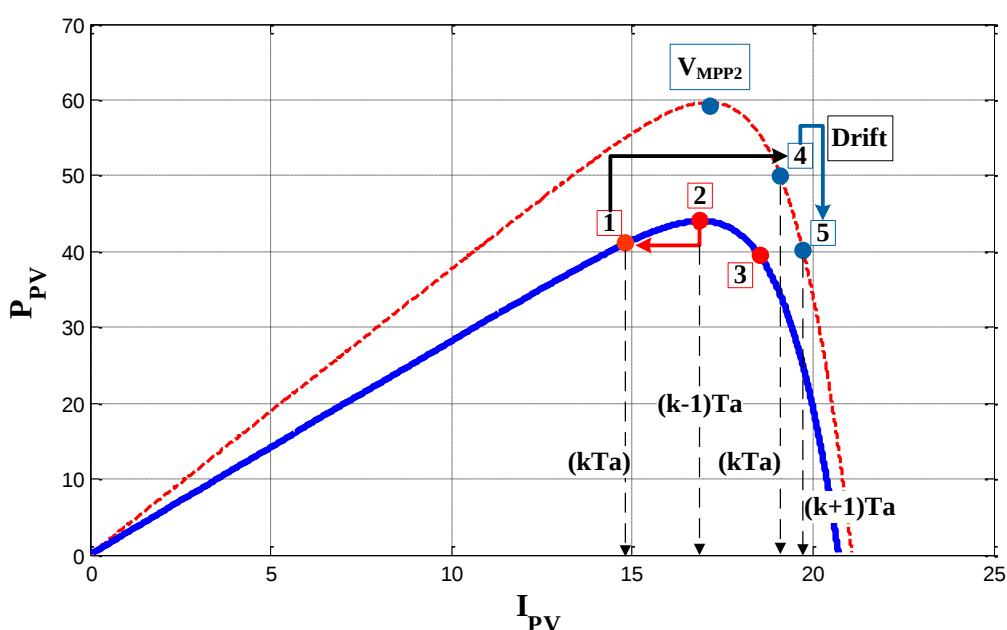


Figure 21 : L'analyse de P&O MPPT classique avec glissement

II.8.2 Technique de conductance incrémentale

La limitation de l'algorithme Perturb&Observe, particulièrement sensible lors du suivi du point de puissance maximale en conditions atmosphériques changeant rapidement, est atténuée par l'approche basée sur la conductance incrémentale. Cette méthode s'appuie sur l'observation que la pente de la puissance par rapport à la tension (dP/dV) du panneau photovoltaïque est positive à gauche du point de puissance maximale (MPP), nulle en ce point, et négative à droite, comme illustré sur la figure 2.14 [45] [64].

L'approche incrémentale se focalise directement sur les fluctuations de la puissance. Elle utilise les mesures du courant et de la tension de sortie du panneau photovoltaïque afin de déterminer la conductance, définie comme I_{pv}/V_{pv} , ainsi que la conductance incrémentale, correspondant à la dérivée dI_{pv} par rapport à V_{pv} . Le principe consiste à comparer ces deux grandeurs et à ajuster la tension PV en conséquence, dans le but d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule ($dP_{pv}/dV_{pv} = 0$). Cette méthode est généralement reconnue pour son efficacité dans la recherche précise du point de puissance maximale [66, 86].

Néanmoins, la mise en œuvre de cet algorithme requiert souvent une complexité importante et une capacité de calcul élevée, ce qui tend à allonger la durée du cycle de contrôle du système. La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque peut être exprimée sous la forme suivante :

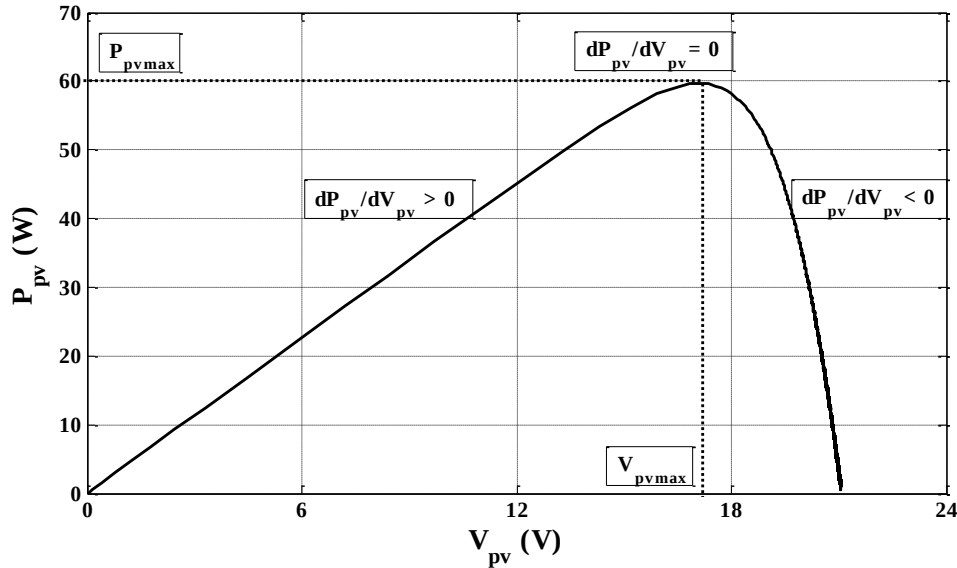


Figure 22 : Point de fonctionnement selon le signe de dP/dV sur la caractéristique de puissance

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \cdot V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{V_{pv}} \cdot \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

En définissant la conductance PV et la conductance incrémentale

$$GG = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

$$\Delta GG = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{V_{pv}} \cdot \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = GG - \Delta GG \quad (2.27)$$

L'équation 2.27 indique que la tension de fonctionnement est inférieure à celle correspondant au point de puissance maximale lorsque la conductance dépasse la conductance incrémentale, et inversement. Par conséquent, l'objectif de cet algorithme consiste à ajuster le point de fonctionnement de la tension de manière à ce que la conductance soit égale à la conductance incrémentale. Dans cette optique, les équations 2.29 et 2.30 servent à définir la direction dans laquelle il convient d'appliquer une perturbation afin de rapprocher le point de fonctionnement du MPP. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que la condition exprimée par l'équation 2.28 soit satisfaite. Une fois que le MPP est atteint, le système de suivi continuera à opérer à ce point jusqu'à ce qu'un changement de courant soit détecté, traduisant un changement d'irradiation sur le réseau présenté en figure 2.14 [45] [64].

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad GG = \Delta GG \quad (2.28)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \quad \frac{I_{pv}}{V_{pv}} > -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad GG > \Delta GG \quad (2.29)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \quad \frac{I_{pv}}{V_{pv}} < -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad GG < \Delta GG \quad (2.30)$$

La figure 2.15 présente l'organigramme de cette méthode.

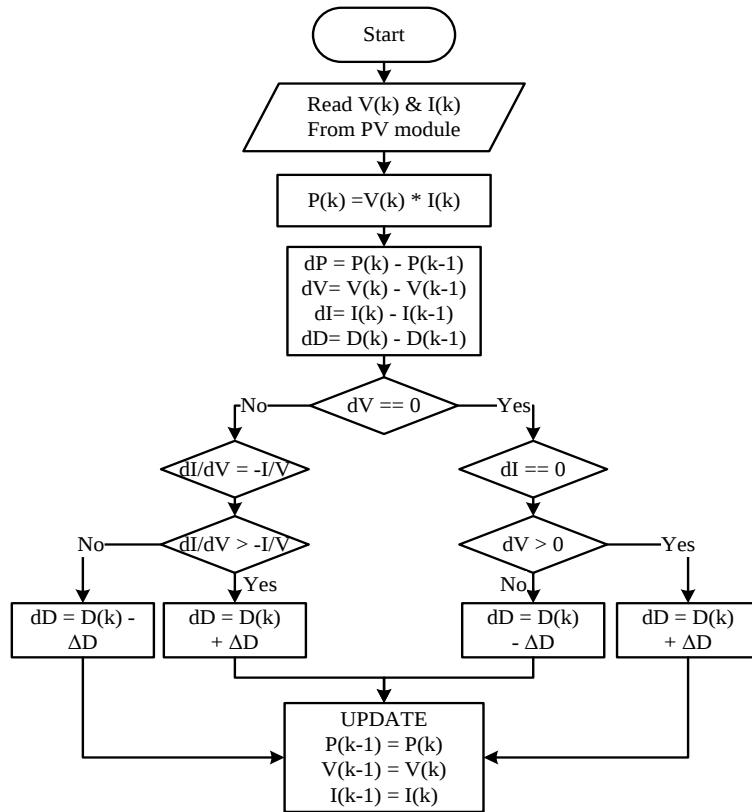


Figure 23 : Organigramme de l'algorithme INC MPPT

Le système développé sous Matlab/Simulink comprend un module photovoltaïque associé à un convertisseur élévateur DC-DC relié à une charge résistive. Le modèle photovoltaïque repose sur une diode unique, inspiré du module MSX-60. Les caractéristiques du module PV sont présentées dans le tableau 2.1. Quant au convertisseur DC-DC élévateur, il est constitué de $C_{IN} = 2200e-6$ (F), $C_{OUT} = 2200e-6$ (F), $L_1 = 330e-6$ (H), $R = 35$ (Ω), et $f_{sw} = 10$ (KHz).

Paramètres Module PV du MSX-60 à	1000 W/m ² /25 °C
Puissance maximale (P_{MPP})	60 W
Tension au PMPP (V_{MPP})	17.1 V
Courant au PMPP (I_{MPP})	3.5 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8 A
Tension à vide (V_{oc})	21.1 V

Tableau 2 : paramètres du module PV MSX-60

II.8.3 Efficacité d'un algorithme MPPT

L'efficacité MPPT des algorithmes est le paramètre le plus important d'un algorithme MPPT. Cette valeur est calculée à l'aide de l'équation suivante.

$$\eta = \frac{P_{MPP(t)}}{P_{MPP}^*} \times 100 \quad (2.31)$$

Et il peut calculer l'efficacité moyenne MPPT avec l'équation démontrée comme suit.

$$\eta_{MPPT(avg)} = \frac{\int P_{MPP(t)} dt}{\int P_{MPP}^* dt} \times 100 \quad (2.32)$$

Où, P_{MPP}^* est le MPP théorique, c'est la cible de l'algorithme, et P_{MPP} est la puissance réelle extraite en utilisant l'algorithme MPPT, cela dépend de la performance du suivi [45][64].

II.9 Résultats de simulation

La simulation réalisée pour montrer les résultats des différents algorithmes lorsque le profil du rayonnement solaire est variable comme indiqué ci-dessous sur la figure 2.16

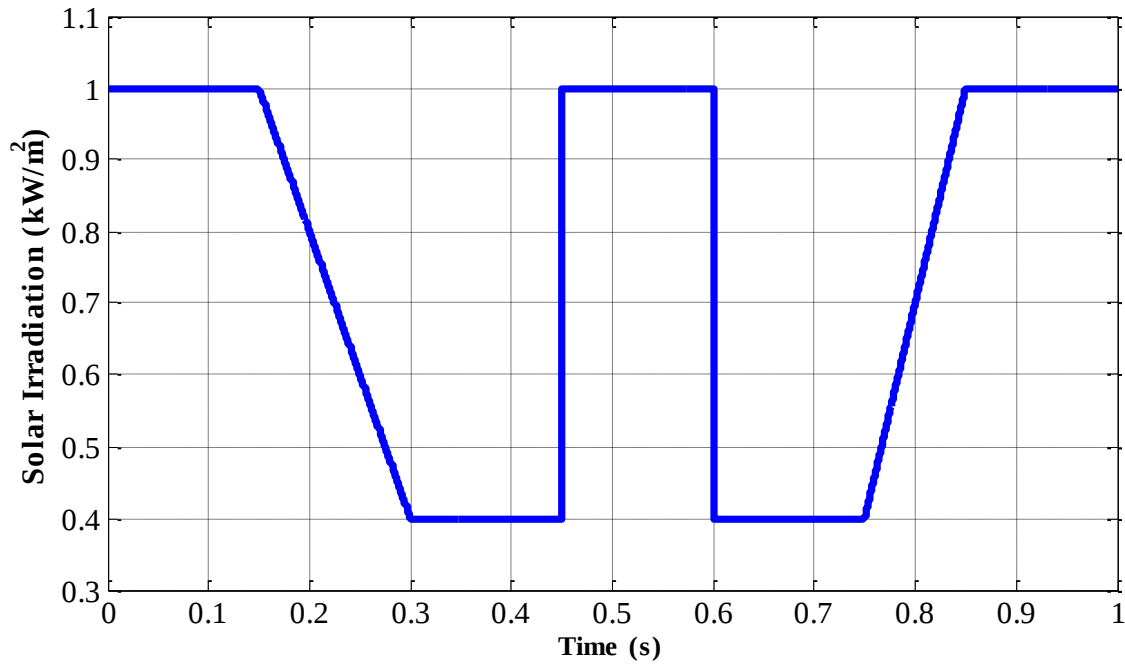


Figure 24 : profil du rayonnement solaire

La figure 2.17 présente les résultats de simulation obtenus avec l'algorithme conventionnel P&O MPPT. Cette méthode permet d'atteindre le point de puissance maximale (MPP) à $t = 0,065$ s. Comme l'illustre la figure 2.17.a, lorsque l'irradiance solaire G est de 1 kW/m^2 , la puissance fluctue entre $59,36 \text{ W}$ et $59,6845 \text{ W}$. À $t = 0,3$ s, l'ensoleillement diminue progressivement jusqu'à $0,4 \text{ kW/m}^2$, ce qui entraîne une baisse concomitante de la

puissance photovoltaïque. Cependant, l'algorithme ne parvient pas à suivre de manière précise le MPP dans cette phase. À $t = 0,45$ s, l'irradiance remonte brusquement à 1 kW/m^2 , provoquant une augmentation rapide de la puissance PV ainsi que des oscillations comprises entre $59,3365 \text{ W}$ et $59,6844 \text{ W}$. Malgré cela, la réponse de l'algorithme reste imprécise et l'atteinte du MPP ne s'effectue qu'à $t = 0,49$ s, comme le montre la figure 2.17.b. Par la suite, lorsque l'ensoleillement baisse à $0,4 \text{ kW/m}^2$ avant de remonter lentement à $t = 0,75$ s, la puissance PV augmente

également, mais le suivi reste marqué par une certaine imprécision.

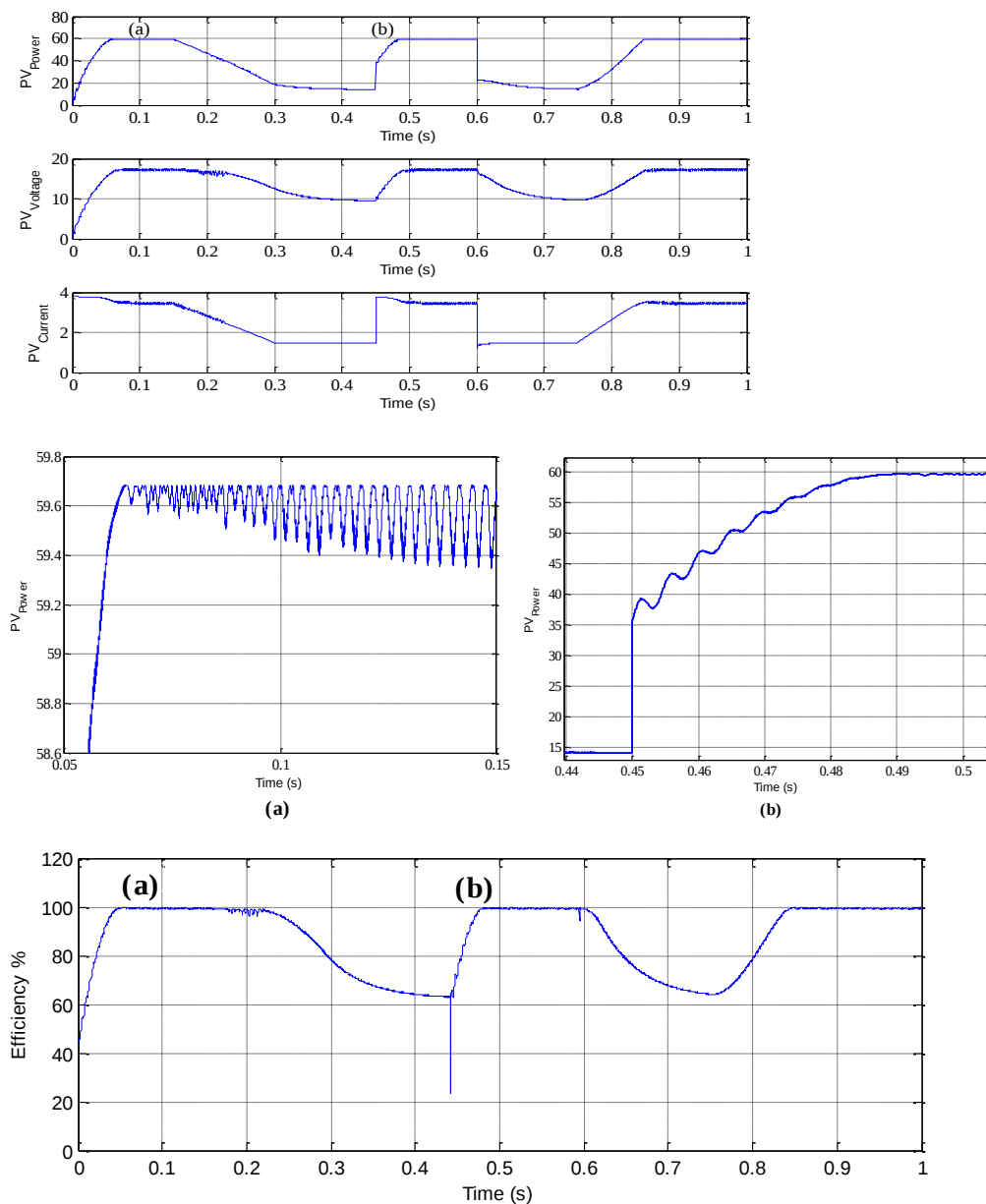


Figure 25 : Résultats de simulation de l'algorithme P&O MPPT conventionnel

Les résultats obtenus avec l'algorithme INC MPPT classique sont illustrés à la figure 2.18, en utilisant le même profil d'irradiation solaire. La puissance photovoltaïque atteint le point de puissance maximale (MPP) à $t = 0,013$ s. Les fluctuations de la puissance PV se situent dans l'intervalle compris entre 59,5998 W et 59,6845 W. Entre $t = 0,3$ s et $t = 0,75$ s, alors que l'irradiation solaire diminue progressivement puis augmente rapidement, le contrôleur suit la puissance maximale malgré une variation importante, comme l'indiquent les figures 2.18(a) et 2.18(b). Cependant, en présence d'une variation soudaine du rayonnement, le contrôleur parvient tout de même à atteindre la puissance maximale.

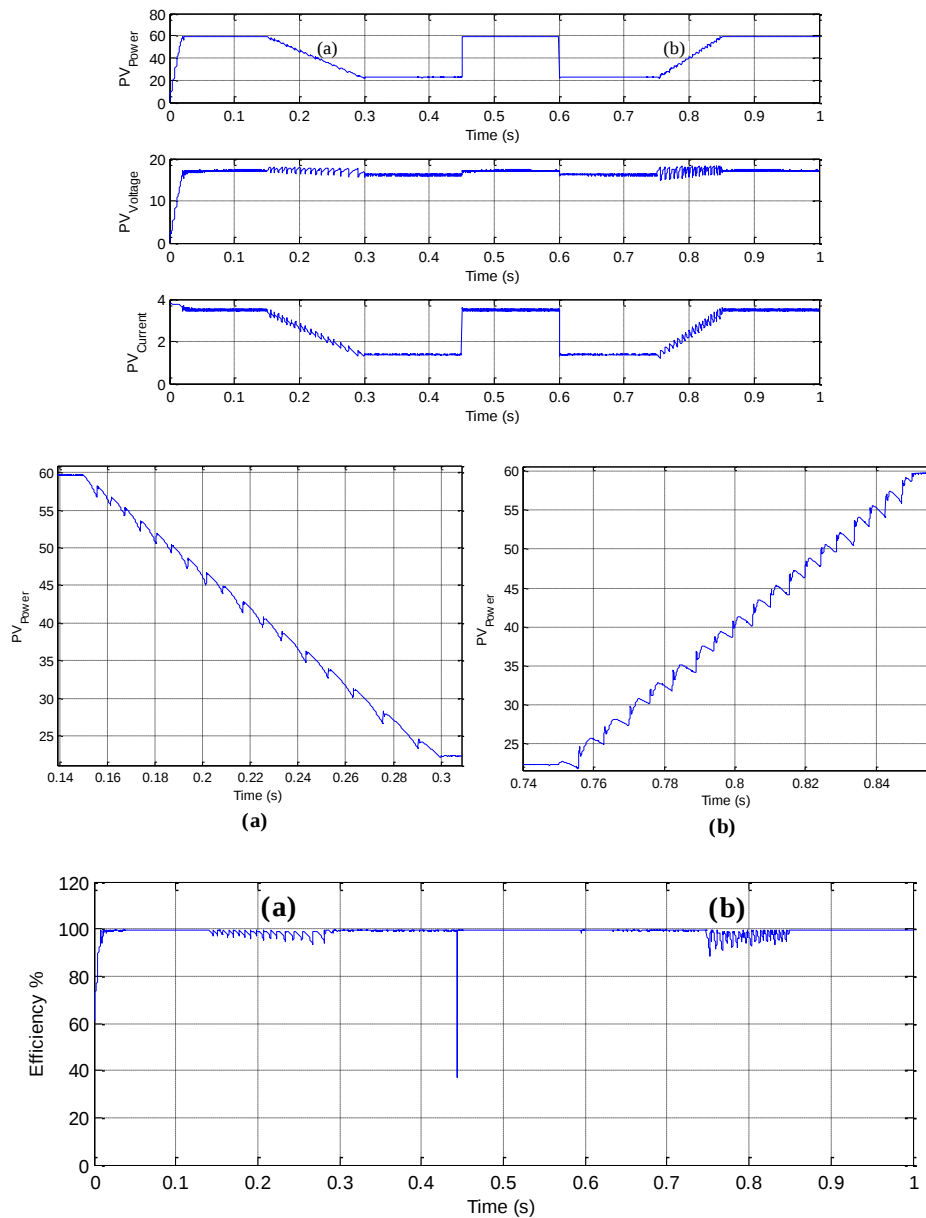


Figure 26 : Résultats de simulation de l'algorithme INC MPPT conventionnel

Algorithme	Le temps de réponse	L'oscillation de puissance en régime permanent	Le rendement
MPPT			
P&O	0.065s	0.3245 (W)	97.30%
Conventionnel			
INC	0.013s	0.0847 (W)	98.1 %
Conventionnel			

Tableau 3 :la comparaison entre les deux algorithmes (P&O) et (INC)

Le tableau 2.2 offre une analyse comparative des méthodes P&O et INC, en se concentrant sur le délai de réponse, les fluctuations de puissance une fois l'état stable atteint, ainsi que sur le rendement, évalué selon diverses intensités de rayonnement solaire.

II.10 Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation numérique des modules photovoltaïques fondée sur le modèle à une diode. L'algorithme développé a été implémenté avec succès dans l'environnement MATLAB/Simulink, offrant une précision suffisante pour les simulations à l'échelle des grands systèmes photovoltaïques. La caractéristique courant-tension (I-V) du module PV manifeste une non-linéarité, et la puissance extraite varie sensiblement selon les conditions climatiques. En effet, la puissance générée par le panneau PV dépend directement de l'intensité du rayonnement solaire et diminue lorsque la température augmente. Par conséquent, chaque combinaison de rayonnement et de température correspond à un point de fonctionnement optimal. L'intégration d'un convertisseur DC-DC couplé à un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) constitue une étape cruciale pour maximiser le transfert d'énergie entre la source et la charge, tout en améliorant l'efficacité globale du système.

CHAPITRE III

MODÉLISATION ET

SIMULATION DE

L'ONDULEUR AVEC FILTRE

LC DANS UN SYSTÈME

PHOTOVOLTAÏQUE

. III.1 Introduction

Avec l'augmentation de la demande mondiale en énergie électrique et les préoccupations environnementales liées à l'utilisation des sources conventionnelles, les systèmes photovoltaïques occupent aujourd'hui une place importante dans la production d'énergie électrique renouvelable. Grâce à leur caractère propre, silencieux et inépuisable, les générateurs photovoltaïques représentent une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques dans plusieurs domaines résidentiels, industriels et agricoles.

Cependant, l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est de nature continue (DC), alors que la majorité des charges domestiques et industrielles fonctionnent en courant alternatif (AC). Pour cette raison, l'utilisation d'un convertisseur DC-AC, appelé onduleur, devient indispensable afin d'assurer l'adaptation entre la source photovoltaïque et les charges alternatives ou le réseau électrique.

Dans un système photovoltaïque, l'onduleur joue un rôle fondamental non seulement dans la conversion de l'énergie électrique, mais également dans l'amélioration de la qualité de l'énergie délivrée. En effet, les signaux générés par les convertisseurs statiques contiennent généralement des harmoniques dues aux opérations de commutation des interrupteurs électroniques. Ces harmoniques peuvent dégrader les performances du système, augmenter les pertes et perturber le fonctionnement des équipements électriques.

Afin d'améliorer la qualité des signaux de sortie et de réduire les distorsions harmoniques, les techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI/PWM) sont largement utilisées pour la commande des onduleurs. De plus, l'intégration d'un filtre LC permet d'atténuer les composantes harmoniques haute fréquence et d'obtenir des tensions et courants de sortie proches d'une forme sinusoïdale.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la simulation d'un onduleur monophasé et triphasé intégré dans un système photovoltaïque sous l'environnement MATLAB/Simulink. Nous étudierons également l'effet du filtre LC sur la qualité de l'énergie fournie à la charge à travers l'analyse des tensions, des courants et des performances globales du système.

III.2 Structure globale du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un ensemble de composants électriques et électroniques permettant de convertir l'énergie solaire en énergie électrique exploitable pour alimenter

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

différentes charges. La structure globale d'un système photovoltaïque dépend généralement de l'application visée, qu'il s'agisse d'un système autonome ou raccordé au réseau électrique.

Dans cette étude, le système photovoltaïque considéré est constitué principalement d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC de type Boost commandé par un algorithme MPPT, d'un bus continu, d'un onduleur DC-AC ainsi que d'un filtre LC destiné à améliorer la qualité des signaux de sortie. L'ensemble du système est représenté par la (Figure 27).

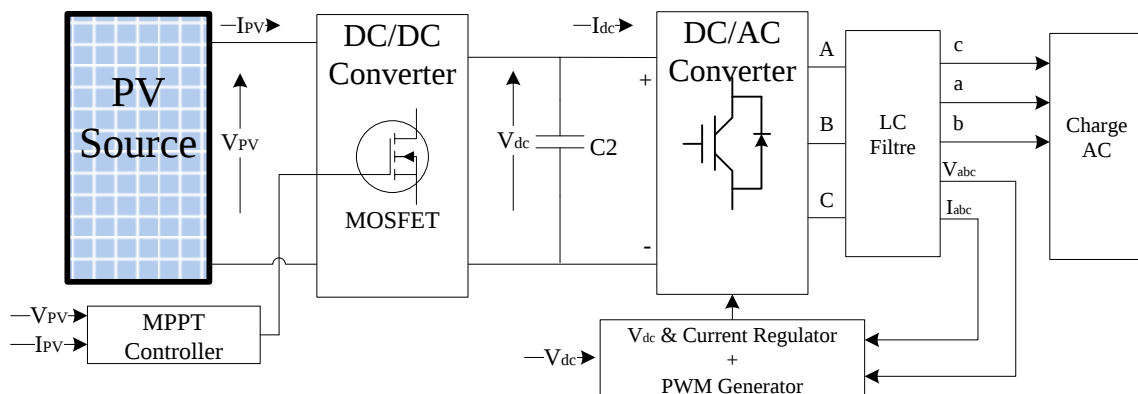


Figure 27 système photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque constitue la source principale d'énergie. Il transforme le rayonnement solaire en énergie électrique continue grâce à l'effet photovoltaïque. Cependant, la puissance délivrée par les panneaux dépend fortement des conditions climatiques telles que l'irradiation solaire et la température, ce qui entraîne des variations importantes de la tension et du courant produits.

Afin d'extraire la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque, un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisé. Ce dernier commande le convertisseur Boost pour adapter le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque au point de puissance maximale. Le convertisseur élévateur de tension (Boost) permet également d'augmenter et de stabiliser la tension continue du bus DC afin d'assurer une alimentation adéquate de l'onduleur.

L'onduleur assure ensuite la conversion de la tension continue en tension alternative exploitable par les charges AC. La commande de l'onduleur est réalisée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM), permettant de générer une tension alternative de fréquence et d'amplitude contrôlées.

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Toutefois, les signaux issus de l'onduleur contiennent des composantes harmoniques générées par les commutations rapides des interrupteurs électroniques. Pour réduire ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie fournie à la charge, un filtre LC est inséré à la sortie de l'onduleur. Ce filtre permet d'atténuer les harmoniques haute fréquence et d'obtenir des formes d'onde plus proches d'un signal sinusoïdal. La structure globale du système photovoltaïque étudié peut être représentée par (Figure 28).

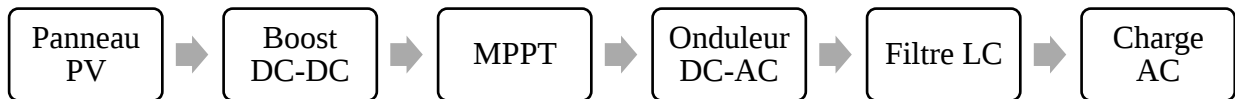


Figure 28 La structure globale du système photovoltaïque

Cette architecture permet d'assurer une conversion efficace de l'énergie solaire tout en garantissant une bonne qualité de l'énergie délivrée à la charge.

III.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de transformer une tension continue en tension alternative de fréquence et d'amplitude désirées. Dans les systèmes photovoltaïques, il constitue un élément essentiel puisqu'il assure l'adaptation entre la source photovoltaïque, qui produit une énergie continue, et les charges fonctionnant en courant alternatif ou le réseau électrique.

Le principe de fonctionnement d'un onduleur repose sur la commutation électronique rapide des interrupteurs de puissance, généralement des transistors IGBT ou MOSFET commandés par des signaux PWM. Ces interrupteurs permettent de modifier périodiquement la polarité de la tension appliquée à la charge afin de générer une forme d'onde alternative à partir d'une source continue.

Dans un système photovoltaïque, la tension continue fournie par le générateur PV ou par le bus DC est appliquée à l'entrée de l'onduleur. Grâce à une stratégie de commande appropriée, les interrupteurs sont activés suivant une séquence bien définie permettant de produire une tension alternative monophasée ou triphasée.

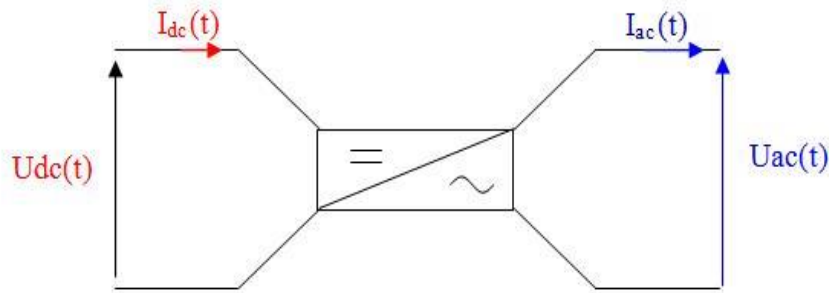


Figure 29 schéma fonctionnel d'un onduleur.

Le fonctionnement de l'onduleur dépend principalement de l'état des interrupteurs électroniques. Lorsque certains interrupteurs sont fermés tandis que d'autres sont ouverts, une polarité positive est appliquée à la charge. En inversant les états de commutation, la polarité devient négative. Cette alternance rapide des états de conduction permet de créer une tension alternative périodique.

La commande par modulation de largeur d'impulsion (PWM) est largement utilisée dans les onduleurs modernes en raison de ses nombreux avantages, notamment

- l'amélioration de la qualité de la tension de sortie.
- la réduction du contenu harmonique.
- le contrôle précis de l'amplitude et de la fréquence.
- l'amélioration du rendement énergétique.

La fréquence fondamentale de la tension de sortie dépend du signal de référence utilisé dans la commande PWM, tandis que la fréquence de découpage est déterminée par la porteuse triangulaire. Plus la fréquence de découpage est élevée, plus la forme d'onde de sortie se rapproche d'un signal sinusoïdal.

Cependant, les commutations rapides des semi-conducteurs génèrent des harmoniques de haute fréquence qui peuvent dégrader la qualité de l'énergie électrique. Pour cette raison, un filtre LC est généralement placé à la sortie de l'onduleur afin de réduire les composantes harmoniques et d'obtenir une tension alternative plus stable et plus sinusoïdale. Dans cette étude, deux types d'onduleurs sont étudiés l'onduleur monophasé ; l'onduleur triphasé. Ces deux structures seront modélisées et simulées sous MATLAB/Simulink afin d'analyser leurs performances dans un système photovoltaïque.

III.4 Onduleur monophasé et triphasé

Dans cette section, nous présentons la modélisation structurelle des onduleurs monophasés et triphasés, ainsi que leur principe de commande basé sur les états de commutation des interrupteurs. L'objectif est de définir les relations électriques fondamentales permettant de relier les signaux de commande aux tensions de sortie.

III.4.1 Onduleur monophasé

L'onduleur monophasé en pont complet (H-bridge) (Figure 30) est constitué de quatre interrupteurs de puissance (IGBT ou MOSFET), chacun associé à une diode antiparallèle. Cette structure permet de générer une tension alternative à partir d'une source continue (Vdc).

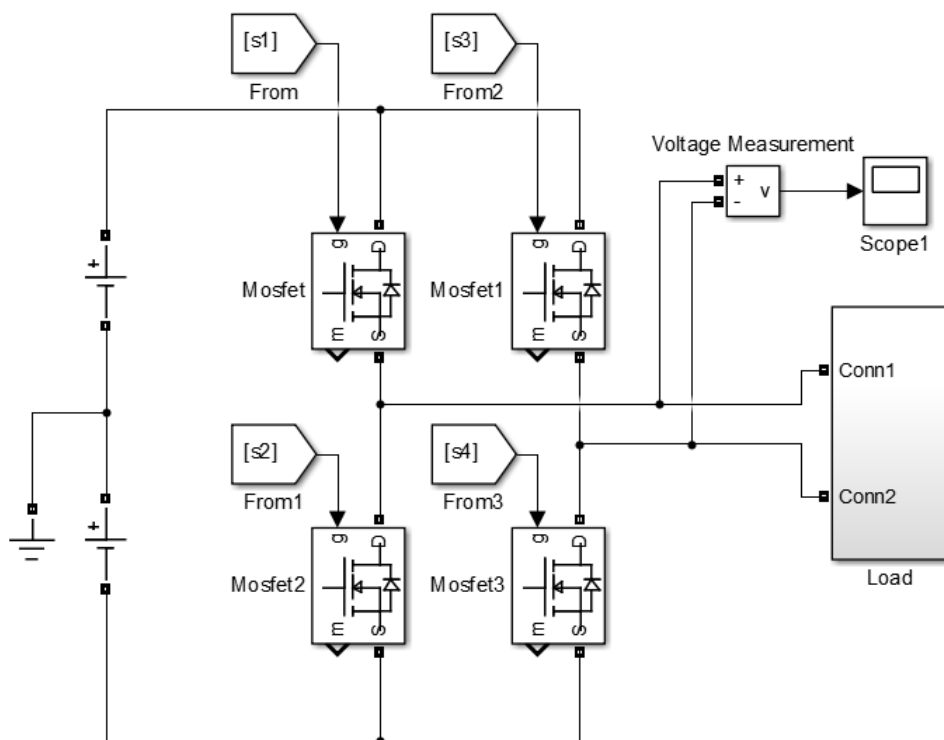


Figure 30 Schéma block onduleur monophasé alimenté par une source PV

États de commutation (Switching states) : Les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire. Les états possibles sont :

- Si : (S1 = 1) et (S4 = 1) : $[V_{out} = +V_{dc}]$
- Si : (S2 = 1) et (S3 = 1) : $[V_{out} = -V_{dc}]$

Les combinaisons simultanées des interrupteurs du même bras sont interdites afin d'éviter un court-circuit du bus continu.

III.4.2 Onduleur triphasé

L'onduleur triphasé en pont est la structure la plus utilisée dans les applications photovoltaïques et industrielles. Il est également décliné en version monophasée. Cette topologie (Figure 31) est constituée de trois cellules de commutation, chacune associée à une phase du système triphasé.

Chaque cellule comporte deux interrupteurs de puissance commandés de manière complémentaire à l'ouverture et à la fermeture. La tension alternative est obtenue à partir de la combinaison des tensions de bras, ce qui permet de générer un système triphasé équilibré à partir d'une source continue (V_{dc}).

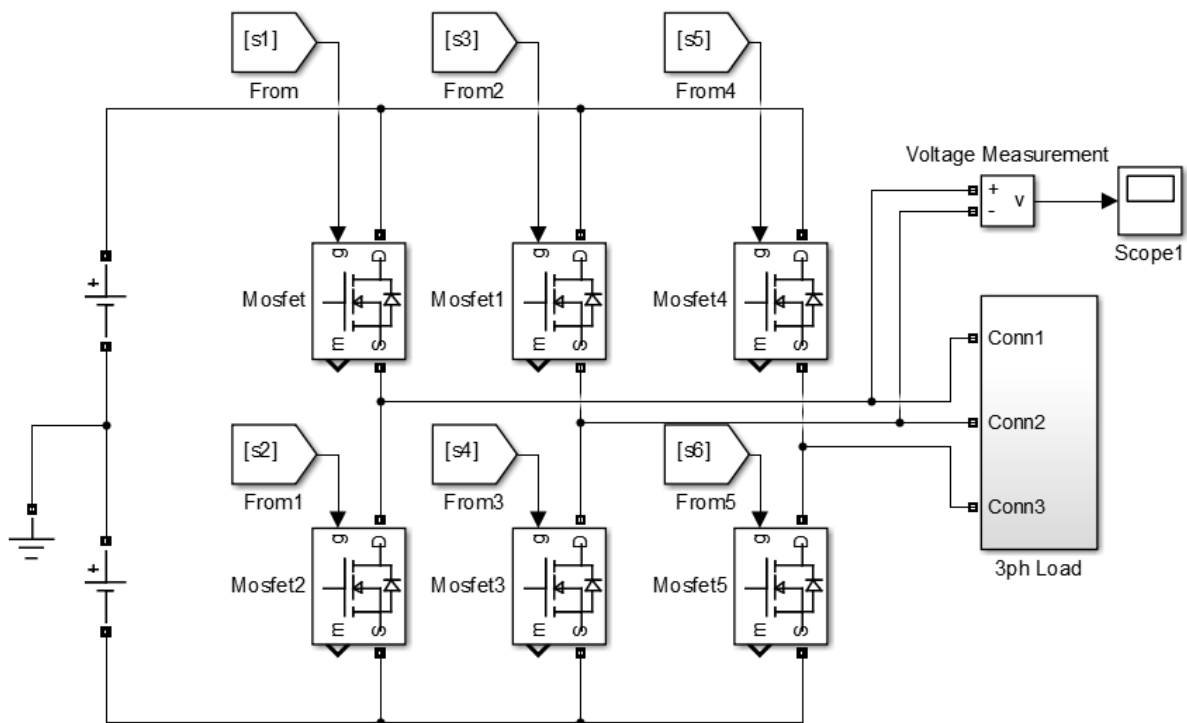


Figure 31 Schéma de l'onduleur triphasé

Dans cette configuration différentielle, chaque cellule de commutation représente une phase de l'onduleur. La tension de sortie de chaque bras constitue une tension simple, tandis que les tensions entre phases représentent les tensions composées. En régime normal de fonctionnement, l'onduleur doit fournir un système de tensions triphasées dont les composantes fondamentales sont équilibrées.

Principe de commutation des interrupteurs : Les interrupteurs de puissance (IGBT ou thyristors) fonctionnent en mode binaire : ils sont soit à l'état passant (fermé), soit à l'état bloqué (ouvert). Le passage d'un état à un autre est commandé périodiquement selon une

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

fréquence de découpage (f_c), telle que la période de commutation ($T_e = 1/f_c$) soit très inférieure à la période fondamentale (T) de la tension de sortie.

L'onduleur triphasé est constitué de six interrupteurs commandés, généralement notés (K_1 , K_2 , K_3) et (K'_1 , K'_2 , K'_3), formant trois bras complémentaires. Pour assurer un fonctionnement correct, deux contraintes fondamentales doivent être respectées :

- La source continue ne doit jamais être en circuit ouvert : cela implique qu'au moins un interrupteur de chaque bras doit être conducteur à tout instant.
- Un court-circuit du bus continu doit être évité : ainsi, deux interrupteurs complémentaires d'un même bras ne doivent jamais être fermés simultanément.

Dans un fonctionnement normal, il n'y a donc que trois interrupteurs fermés sur six à un instant donné, ce qui permet de générer les différentes combinaisons de tensions de sortie.

Les différentes séquences de commutation permettent de générer des tensions triphasées alternatives dont les formes d'onde, après filtrage, se rapprochent d'un système sinusoïdal équilibré. Le contrôle de ces séquences constitue la base des techniques de modulation (notamment la PWM) utilisées dans les onduleurs photovoltaïques modernes.

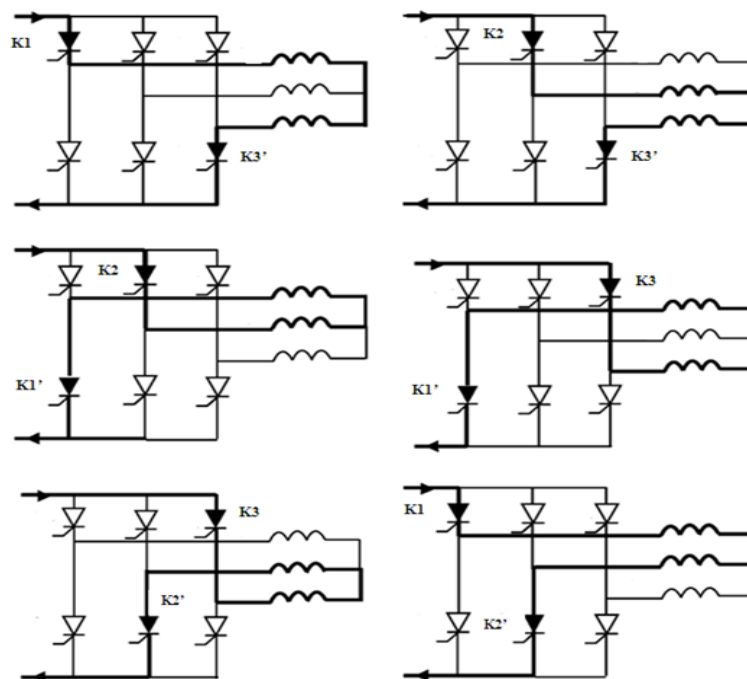


Figure 32 Différents états de commutation des interrupteurs de l'onduleur triphasé.

III.5 Commande PWM

La commande des interrupteurs de l'onduleur joue un rôle fondamental dans la détermination de la forme, de l'amplitude et de la qualité de la tension de sortie. En effet, en agissant sur les signaux de commande des semi-conducteurs, il est possible de synthétiser une tension alternative à partir d'une source continue tout en contrôlant les harmoniques générées.

Parmi les différentes techniques de commande des onduleurs, on distingue principalement :

Commande à onde rectangulaire : La tension de sortie est de forme carrée. Cette méthode est simple mais ne permet pas le réglage de la valeur efficace de la tension et génère un contenu harmonique élevé.

Commande en créneaux de largeur variable : Cette technique repose sur le déphasage et la variation de la largeur des impulsions. Elle permet un contrôle partiel de la valeur efficace de la tension de sortie.

Commande à paliers (onde en escalier) : Elle consiste à combiner plusieurs signaux rectangulaires afin d'obtenir une forme d'onde se rapprochant d'une sinusoïde. Toutefois, elle reste limitée en termes de performance dynamique et de qualité spectrale.

Commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI / PWM) : C'est la technique la plus utilisée dans les systèmes modernes, notamment dans les applications photovoltaïques. Elle permet de générer une tension de sortie sous forme d'un train d'impulsions dont la largeur varie en fonction d'un signal de référence. Cette technique réduit considérablement le contenu harmonique et facilite le filtrage de la tension de sortie.

III.5.1 Principe de la PWM

La modulation de largeur d'impulsions (PWM) consiste à comparer un signal de référence sinusoïdal de basse fréquence (f_m) avec un signal triangulaire haute fréquence (f_c), appelé porteuse. Le résultat de cette comparaison génère un signal logique de commande prenant les valeurs 0 ou 1. Le signal de sortie de commande des interrupteurs est donc défini par :

- Si ($V_{ref} > V_{tri}$) alors ($S = 1$)
- Si ($V_{ref} < V_{tri}$) alors ($S = 0$)

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Deux paramètres essentiels caractérisent la modulation PWM :

- **Indice de modulation en amplitude** ($m_a = V_{ref}/V_{tri}$)
- **Indice de modulation en fréquence** : ($m_f = f_c/f_m$)

Pour garantir une bonne qualité de signal, la fréquence de la porteuse doit être largement supérieure à celle du signal de référence. L'utilisation de la PWM dans les onduleurs présente plusieurs avantages :

- Réduction significative du taux d'harmoniques (THD)
- Amélioration de la qualité de la tension de sortie
- Contrôle précis de l'amplitude et de la fréquence
- Compatibilité avec les systèmes numériques (DSP, MATLAB/Simulink)
- Facilité d'intégration avec les filtres LC pour obtenir une forme sinusoïdale

Le principe de génération de la commande PWM est illustré par la comparaison entre un signal sinusoïdal de référence et un signal triangulaire de haute fréquence. Le signal résultant est ensuite utilisé pour commander directement les interrupteurs de l'onduleur. La (figure III.7) illustre le principe de génération du signal PWM à partir de la comparaison entre une onde de référence et une onde porteuse triangulaire.

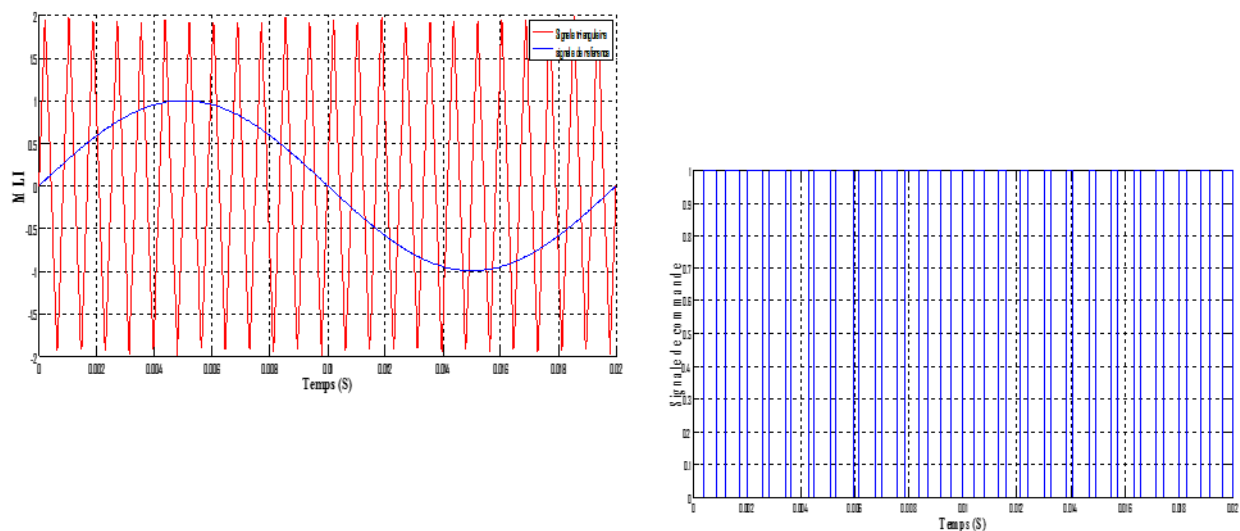


Figure 33 Principe de la commande MLI (PWM) (a) Comparaison du signal sinusoïdal de référence et du signal triangulaire ; (b) Signale de commande logique obtenu

III.6 Simulation d'un onduleur triphasé en pont à commande MLI

Dans cette section, nous présentons la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink (Figure 34) d'une chaîne complète de conversion d'énergie photovoltaïque. Le système étudié est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC de type Boost associé à une commande MPPT basée sur l'algorithme de la conductance incrémentale, ainsi que d'un onduleur triphasé en pont commandé par modulation de largeur d'impulsions (Figure 34), alimentant une charge de type RL.

L'objectif de cette simulation est d'analyser le comportement dynamique des grandeurs électriques à différents niveaux de conversion, notamment les tensions de phase, les tensions composées ainsi que les courants de ligne, afin d'évaluer les performances globales du système photovoltaïque.

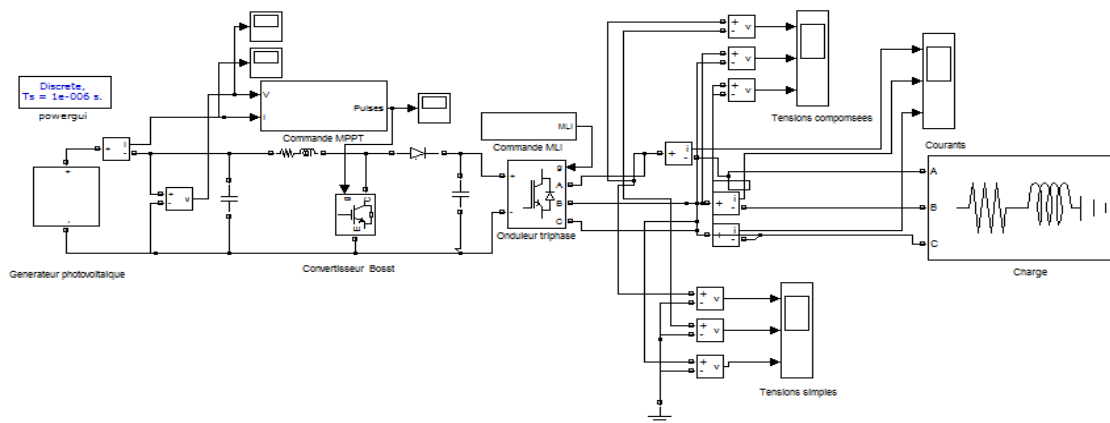


Figure 34 Schémas de simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

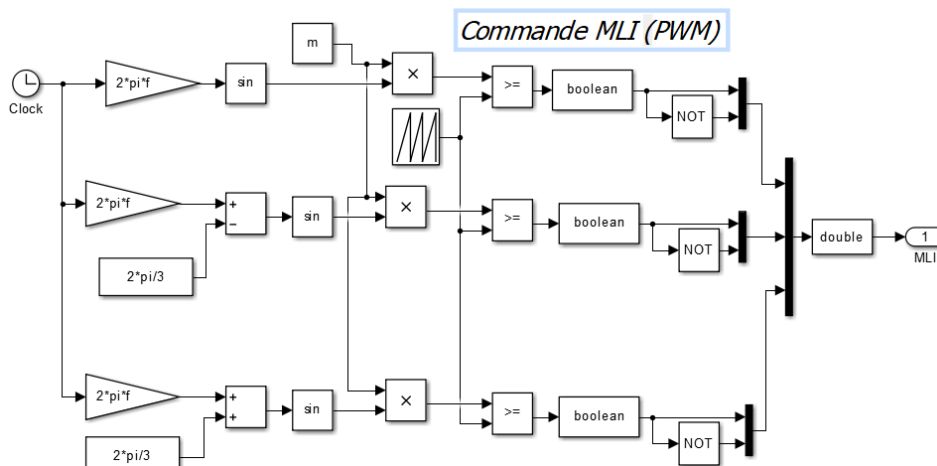


Figure 35 Schémas de simulation de la commande MLI.

III.6.1 Tensions simples à la sortie de l'onduleur

La figure 36 représente l'évolution des tensions de phase (V_a), (V_b) et (V_c) mesurées entre chaque phase de l'onduleur et le pôle négatif du bus continu. D'après les résultats obtenus, on observe que les tensions de sortie présentent une forme PWM caractéristique, résultant de la commutation rapide des interrupteurs de puissance. Ces tensions alternent entre différents niveaux de tension en fonction des états de commutation des interrupteurs (K1), (K2) et (K3), conformément au principe de commande MLI.

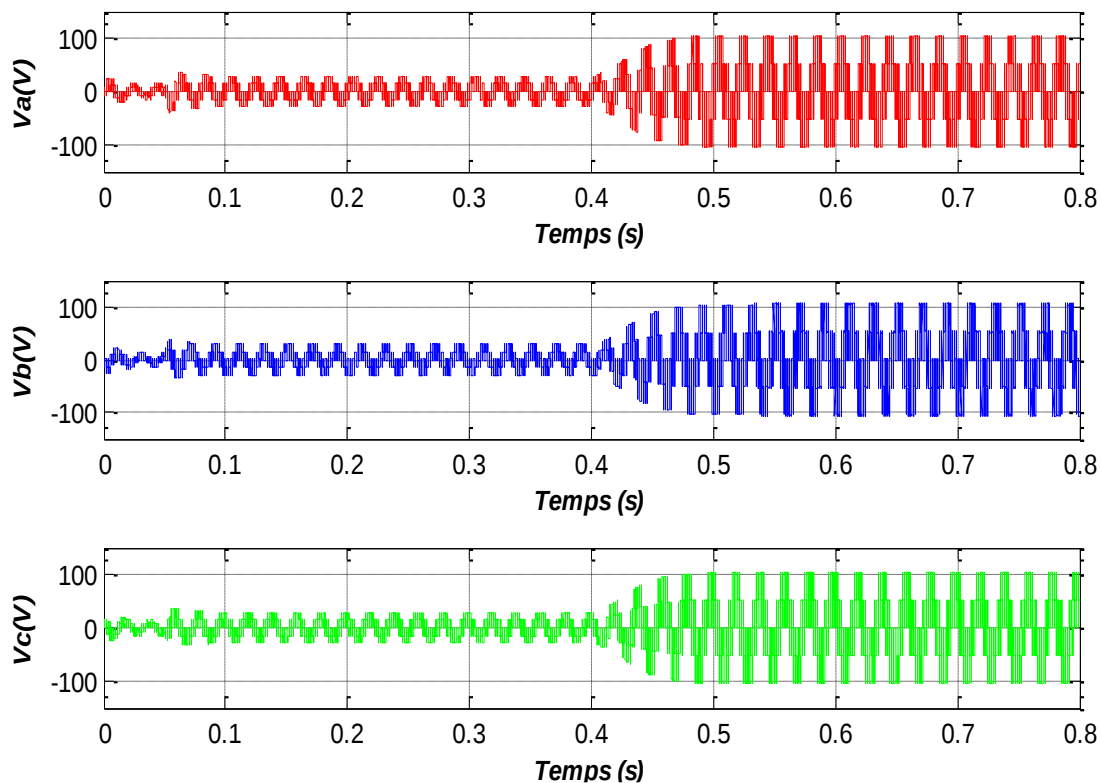


Figure 36 Tensions simples à la sortie de l'onduleur triphasé

III.6.2 Tensions composées à la sortie de l'onduleur

La figure 37 illustre les tensions composées du système triphasé, obtenues par différence entre les tensions de phase. Elles sont définies par les relations suivantes : $V_{ab} = V_b - V_a$; $V_{bc} = V_c - V_b$; $V_{ca} = V_a - V_c$

Ces tensions présentent une meilleure qualité que les tensions simples, avec une amplitude plus élevée et une structure plus régulière. Elles constituent les grandeurs principales utilisées dans l'alimentation des charges triphasées. On remarque que, malgré la présence d'harmoniques dues à la commutation, la forme globale des tensions composées reste stable et périodique.

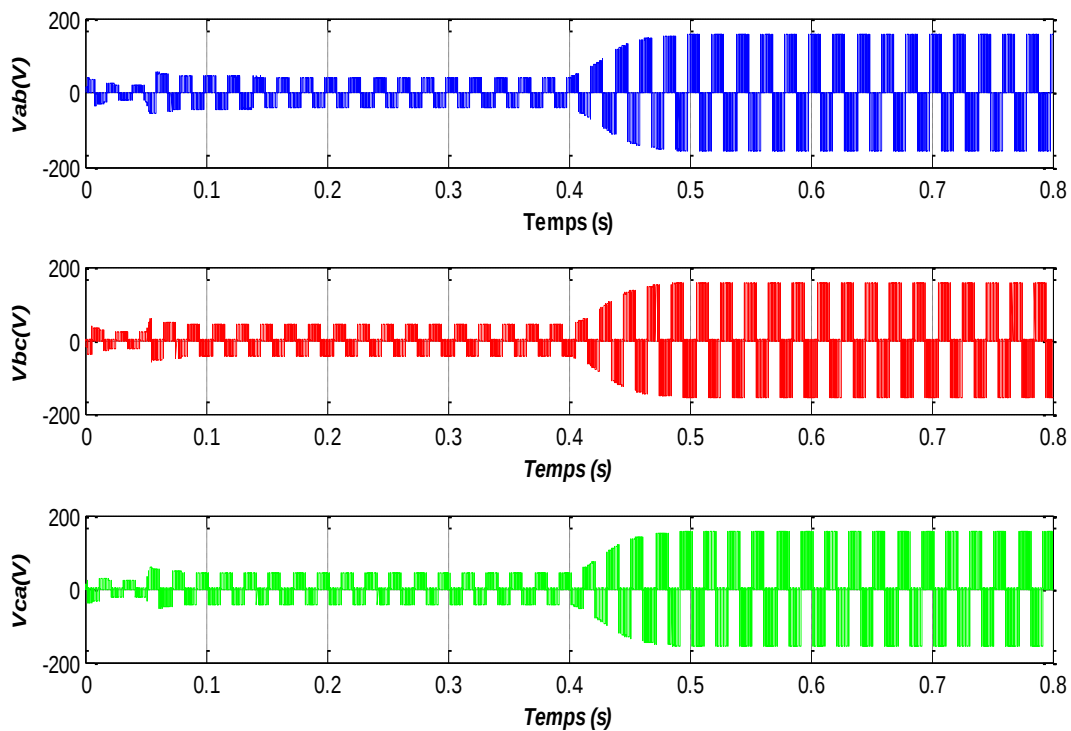


Figure 37 Tensions composées à la sortie de l'onduleur triphasé

III.6.3 Courants de ligne à la sortie de l'onduleur

La figure 38 présente les courants de ligne (I_a), (I_b) et (I_c) délivrés par l'onduleur vers la charge RL. Contrairement aux tensions de sortie, les courants présentent une forme plus lissée grâce à l'effet inductif de la charge RL, qui agit comme un filtre naturel atténuant les variations rapides dues à la PWM. Les courants tendent ainsi vers des formes quasi sinusoïdales en régime permanent. L'analyse des résultats montre que le système atteint un régime stable après un court régime transitoire, ce qui confirme la bonne performance dynamique de la commande MLI appliquée à l'onduleur triphasé.

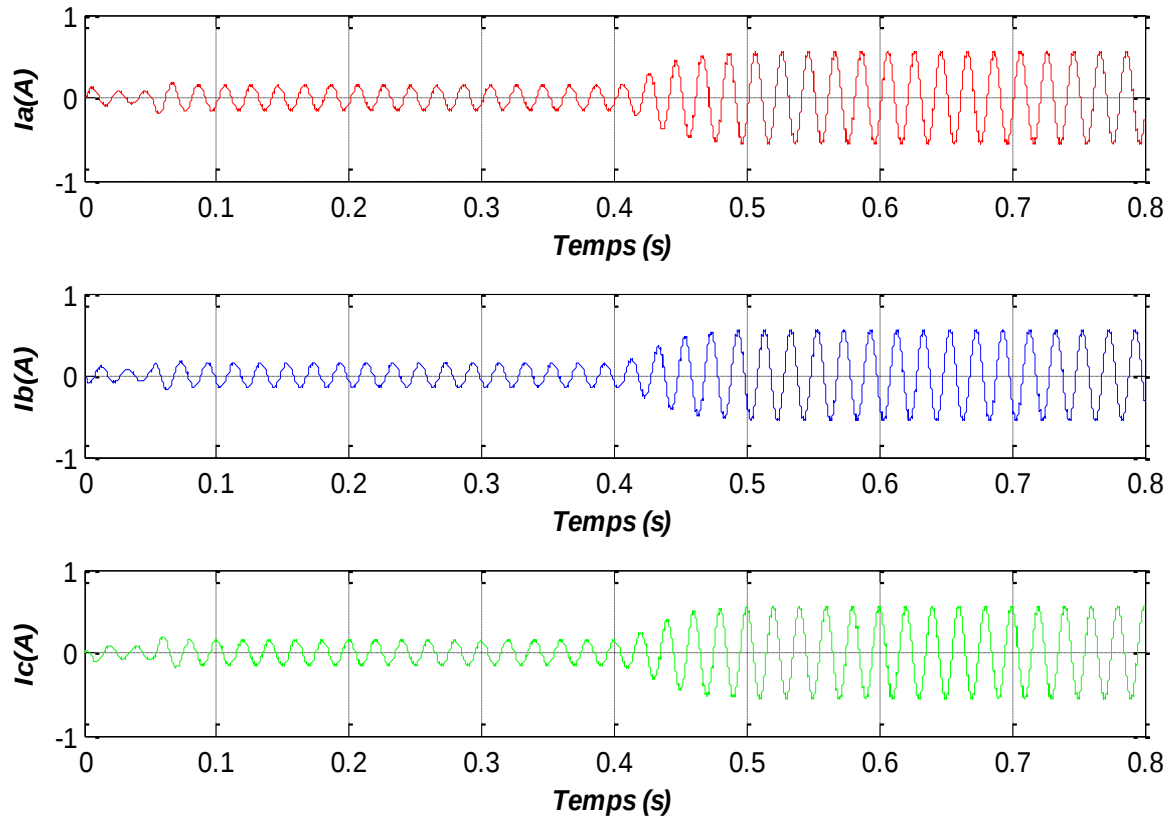


Figure 38 Courants de ligne à la sortie de l'onduleur triphasé.

III.7 Analyse des perturbations harmoniques dans l'onduleur

Dans les systèmes photovoltaïques, l'énergie électrique est généralement injectée sous forme d'un système triphasé sinusoïdal. Toutefois, dans la pratique, les convertisseurs statiques tels que les onduleurs introduisent des distorsions dans les tensions et les courants en raison des commutations électroniques rapides. Ces perturbations se traduisent par la présence d'harmoniques qui dégradent la qualité de l'énergie électrique et peuvent affecter le fonctionnement des charges sensibles. Ainsi, l'analyse harmonique constitue un élément essentiel dans l'évaluation des performances d'un onduleur.

III.7.1 Origine de la déformation des signaux

La déformation des formes d'onde de tension et de courant est principalement liée au caractère non linéaire des convertisseurs de puissance. Même lorsque la source est parfaitement sinusoïdale, les dispositifs électroniques de commutation génèrent des signaux non sinusoïdaux en sortie. Dans le cas des onduleurs PWM, la tension de sortie est constituée d'une succession d'impulsions dont la moyenne suit une forme sinusoïdale. Cette structure entraîne naturellement l'apparition de composantes harmoniques de haute fréquence.

III.7.2 Notion d'harmoniques

Les harmoniques sont des composantes sinusoïdales dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale (Figure 39)

$$f_n = (n) \times (f_1)$$

avec : f_1 c'est la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz) et n est le rang harmonique.

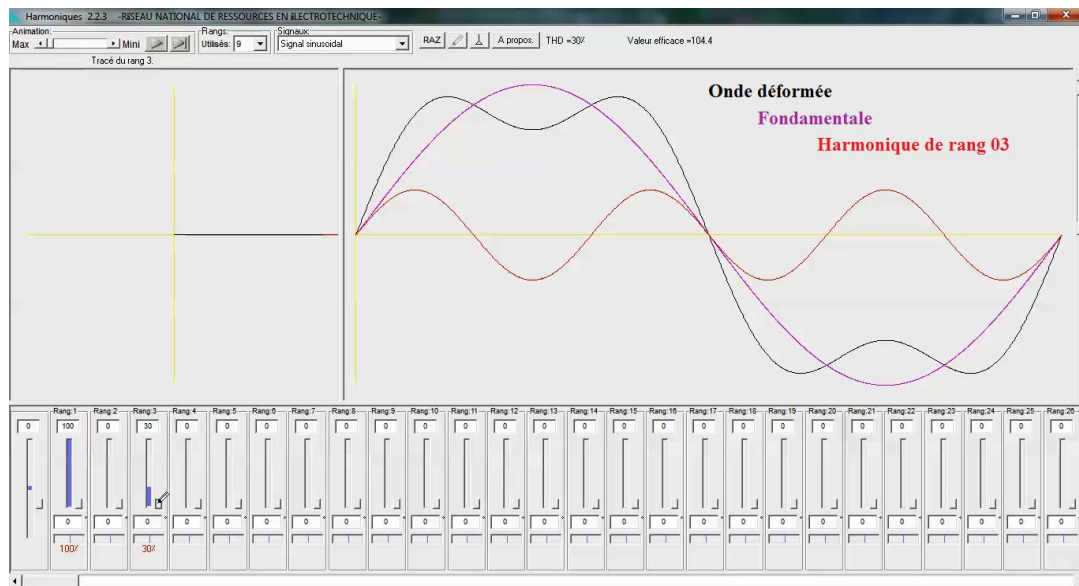


Figure 39 Onde déformée et sa décomposition.

Le signal périodique non sinusoïdal peut être décomposé en série de Fourier. Les harmoniques sont généralement regroupés en deux classes: les harmoniques de rang pair (2, 4, 6. ...) et les harmoniques de rang impair (1,3, 5, ..). Le rang harmonique étant défini comme le rapport entre la fréquence de cet harmonique et la fréquence fondamentale du convertisseur (DC-AC).

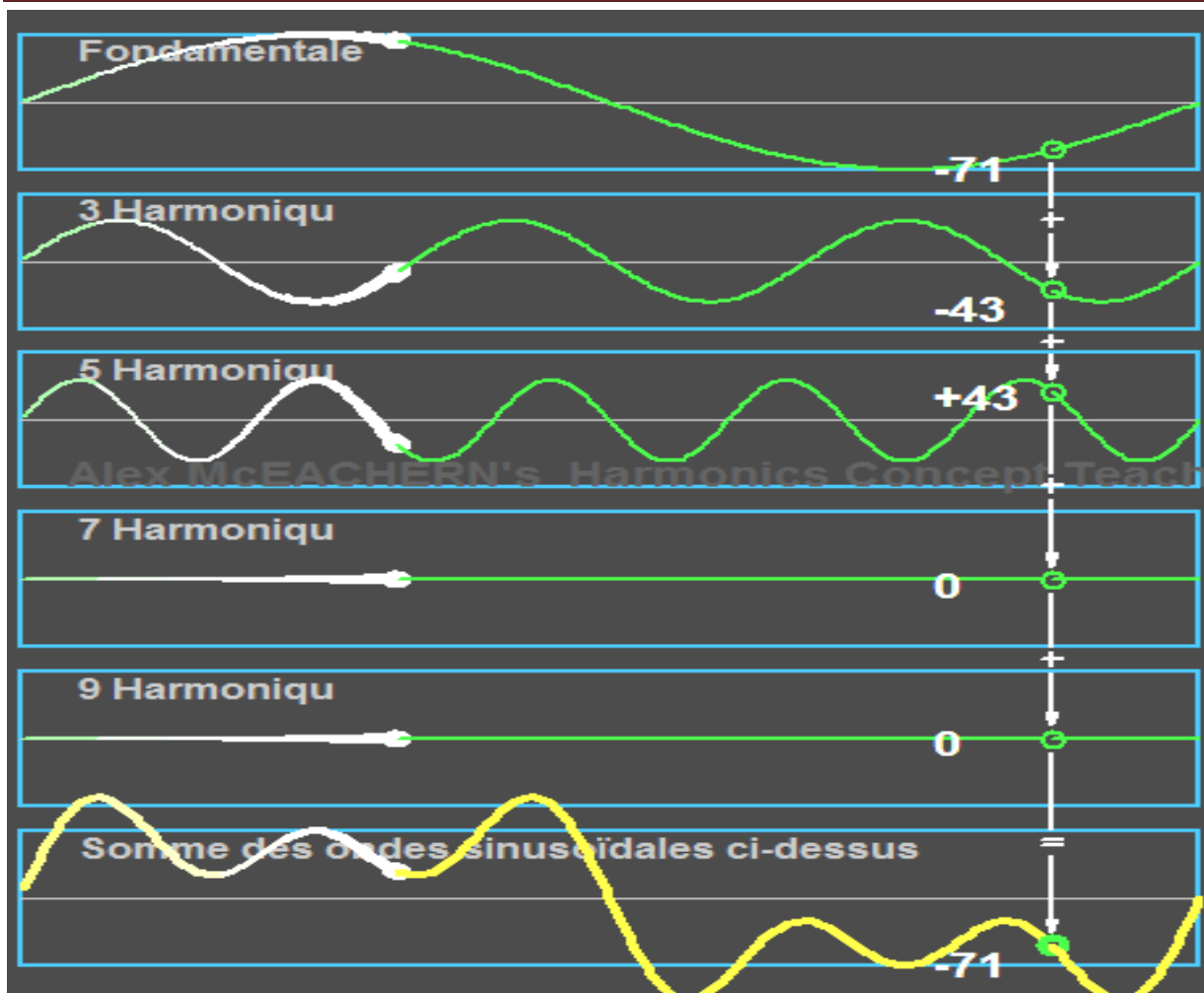


Figure 40 Décomposition harmonique d'un signal déformé

III.7.3 Sources des Harmoniques

Dans les systèmes électriques modernes, les principales sources d'harmoniques sont les équipements à électronique de puissance, notamment :

- les redresseurs,
- les convertisseurs DC-DC,
- les onduleurs,
- les charges non linéaires.

Dans un système photovoltaïque, l'onduleur constitue la principale source de distorsion harmonique en raison de la commutation PWM des interrupteurs de puissance.

Considérons une source d'énergie sur lequel une charge absorbe un courant non linéaire. Cette charge peut être considérée comme un générateur des harmoniques. Les harmoniques peuvent être générés à travers les deux moyens connus, le courant et la tension. La principale

source des harmoniques vient des nombreux appareils électriques qui s'alimentent au moyen des convertisseurs statiques. On peut citer des perturbateurs tels que les appareils à arc électrique et les convertisseurs de courant.

III.7.4 Charges Linéaires et Non Linéaires

Une charge est dite **linéaire** lorsqu'elle absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Dans ce cas, la relation tension-courant est proportionnelle et la distorsion harmonique est faible (Figure 41). À l'inverse, une charge est dite **non linéaire** lorsqu'elle consomme un courant non sinusoïdal même si la tension d'alimentation est sinusoïdale. Ce comportement est typique des convertisseurs statiques et des équipements électroniques.

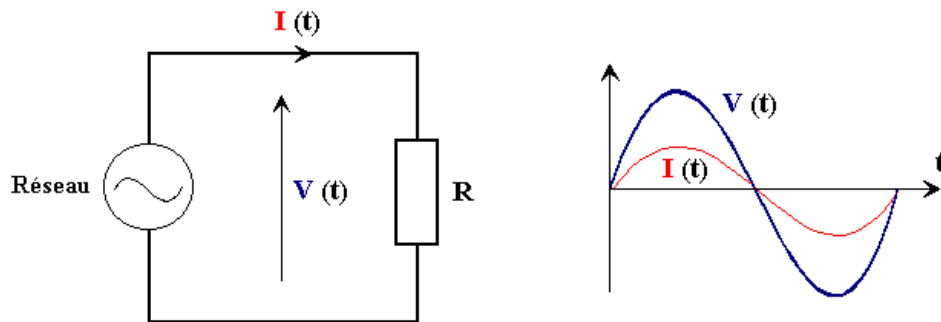


Figure 41 Circuit avec une charge linéaire.

III.7.5 Méthodes de filtrage des harmoniques

Dans les systèmes de conversion d'énergie électrique, la présence d'harmoniques générées principalement par les convertisseurs statiques nécessite l'utilisation de techniques permettant d'améliorer la qualité des signaux de tension et de courant. Dans les systèmes photovoltaïques, cette amélioration repose à la fois sur des méthodes de commande et sur des solutions de filtrage. Le filtre passif est utilisé dans plusieurs domaines de l'électronique, dans le traitement du signal. Un filtre est dit passif lorsque sa mise en fonction ne nécessite aucune source d'énergie.

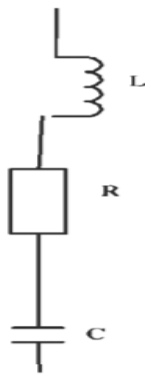
Filtre passif : Le filtrage passif est une méthode classique utilisée pour réduire les composantes harmoniques dans les systèmes électriques. Il ne nécessite aucune source d'énergie externe et repose sur des éléments passifs tels que les inductances, les condensateurs et parfois les résistances. Le filtre passif est généralement conçu pour atténuer des plages spécifiques de fréquences harmoniques. On distingue principalement deux structures le filtre passif résonant et le filtre passif amorti.

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

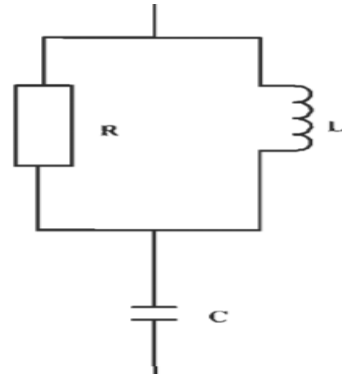
Le filtre résonant (Figure 42 (a)) est accordé sur une fréquence spécifique afin de créer un chemin à faible impédance pour une harmonique donnée. Sa fréquence d'accord est définie

$$\text{par : } F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} .$$

Le filtre amorti, quant à lui, permet une atténuation sur une bande de fréquences plus large grâce à l'ajout d'un élément résistif, ce qui améliore la robustesse du filtrage (Figure 42 (b)).



(a) filtre passif résonant.



(b) filtre passif amorti.

Figure 42 Types de Filtres Passifs.

Filtrage Actif : Le filtrage actif repose sur l'injection de courants harmoniques en opposition de phase (Figure 43) avec ceux générés par la charge non linéaire. Cette technique permet une compensation dynamique des harmoniques et une amélioration en temps réel de la qualité de l'énergie électrique. Contrairement aux filtres passifs, les filtres actifs sont capables de s'adapter aux variations de charge et offrent une meilleure performance globale, notamment en termes de compensation des harmoniques et de l'énergie réactive. Le filtre actif permet de réduire significativement les harmoniques en courant. Ses autres fonctionnalités sont le rééquilibrage et la compensation de l'énergie réactive.

Dans les systèmes photovoltaïques modernes, la réduction des harmoniques ne dépend pas uniquement du filtrage, mais également de la stratégie de commande de l'onduleur, notamment la modulation de largeur d'impulsions (PWM) et l'augmentation de la fréquence de découpage. Le filtre LC placé en sortie de l'onduleur joue un rôle complémentaire en améliorant la forme finale des tensions délivrées à la charge.

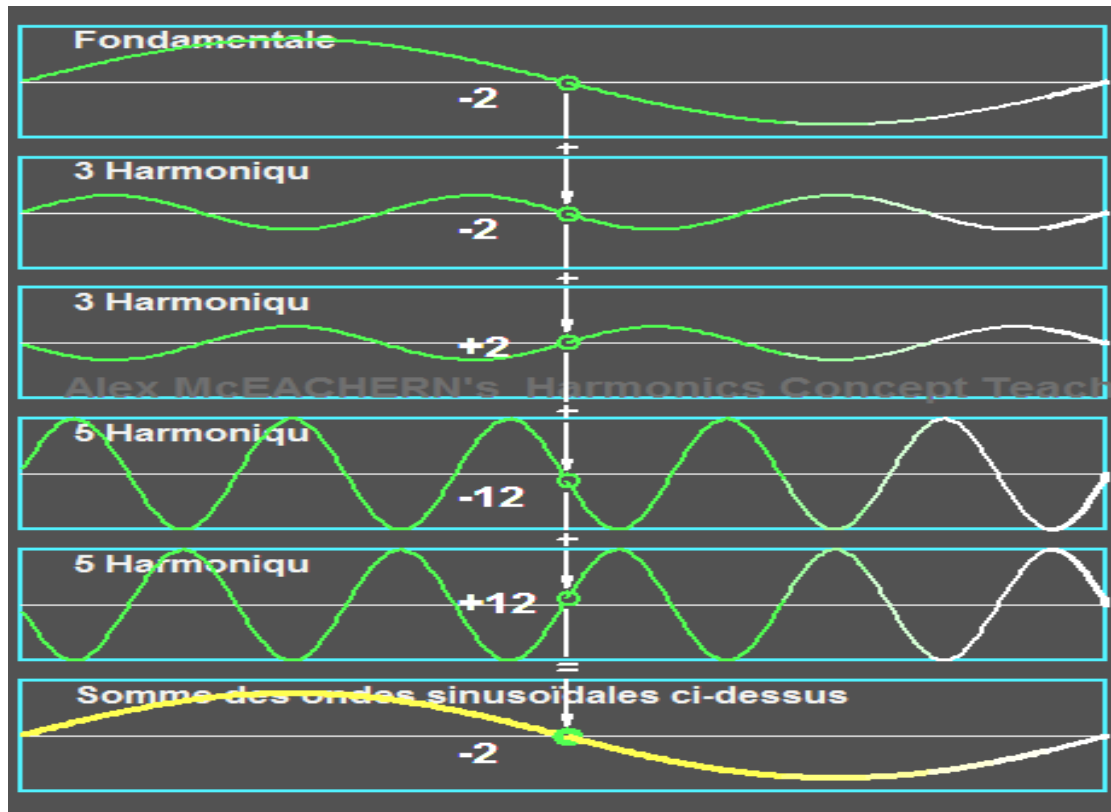


Figure 43 courants harmoniques de rang 3 et 5 qui sont injectés.

Dans les systèmes photovoltaïques modernes, la réduction des harmoniques ne dépend pas uniquement du filtrage, mais également de la stratégie de commande de l'onduleur, notamment la modulation de largeur d'impulsions (PWM) et l'augmentation de la fréquence de découpage. Le filtre LC placé en sortie de l'onduleur joue un rôle complémentaire en améliorant la forme finale des tensions délivrées à la charge.

Ainsi, l'association entre une commande PWM performante et un filtrage LC approprié permet d'obtenir une tension de sortie plus stable et proche d'une forme sinusoïdale, garantissant une meilleure qualité de l'énergie dans le système photovoltaïque étudié.

III.8 Application d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur et analyse des résultats

Dans cette section, nous présentons l'étude des performances de l'onduleur triphasé en pont à commande MLI en présence d'un filtre LC placé à sa sortie (Figure 44). L'objectif principal de ce filtre est d'atténuer les composantes harmoniques générées par les commutations des interrupteurs et d'améliorer la qualité des tensions et courants délivrés à la charge. Le filtre LC constitue un circuit passif sélectif qui agit principalement sur les composantes de haute fréquence, laissant passer la composante fondamentale du signal. Ainsi, il permet d'obtenir des

CHAPITRE III MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ONDULEUR AVEC FILTRE LC DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

formes d'onde plus proches de la sinusoïde et d'améliorer la qualité globale de l'énergie électrique.

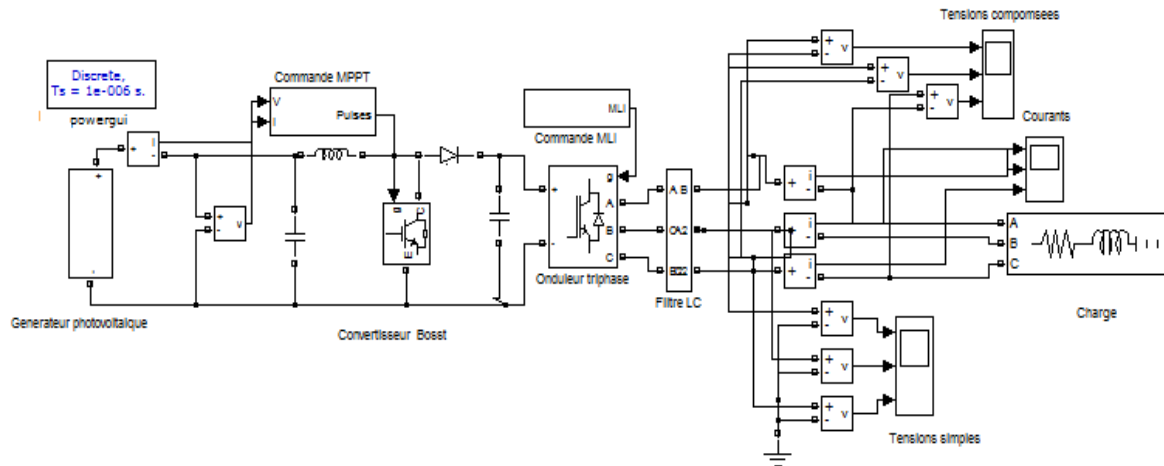


Figure 44 Schéma simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque avec filtre LC

Analyse des tensions simples filtrées : La (Figure 45) présente les tensions de phase (V_a), (V_b) et (V_c) après filtrage LC. On observe clairement que les tensions, initialement de forme PWM en sortie de l'onduleur, deviennent plus lissées grâce à l'action du filtre. Les variations rapides dues aux commutations sont fortement atténuées, ce qui permet d'obtenir une forme d'onde beaucoup plus proche d'une sinusoïde. Cette amélioration confirme l'efficacité du filtre LC dans la suppression des composantes haute fréquence et dans la restitution de la composante fondamentale du signal.

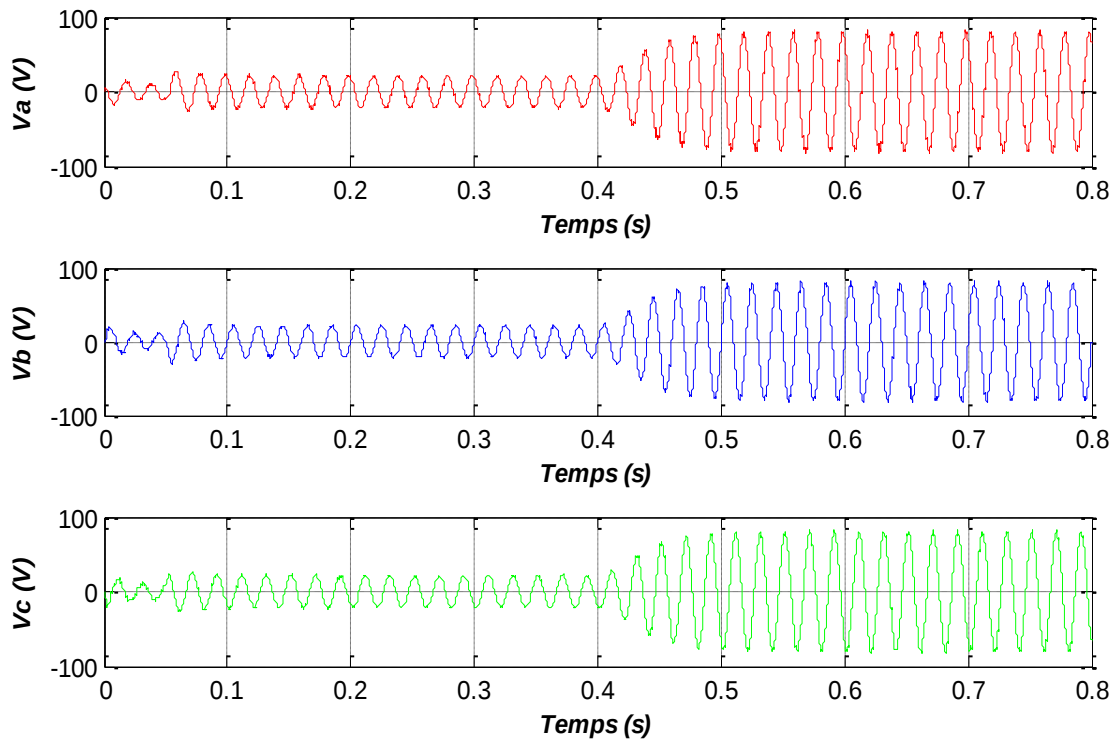


Figure 45 : Tensions simples à la sortie du filtre LC.

Analyse des tensions composées filtrées : La (Figure 46) représente les tensions composées (V_{ab}), (V_{bc}) et (V_{ca}) après filtrage. On remarque que les tensions ligne-ligne présentent une meilleure qualité que les tensions simples, avec une réduction significative des ondulations liées aux harmoniques. Les signaux obtenus sont plus réguliers et conservent une structure équilibrée triphasée. Cette amélioration est importante car les tensions composées constituent les grandeurs principales utilisées pour l'alimentation des charges triphasées. Le filtre LC permet donc d'assurer une meilleure compatibilité entre l'onduleur et la charge.

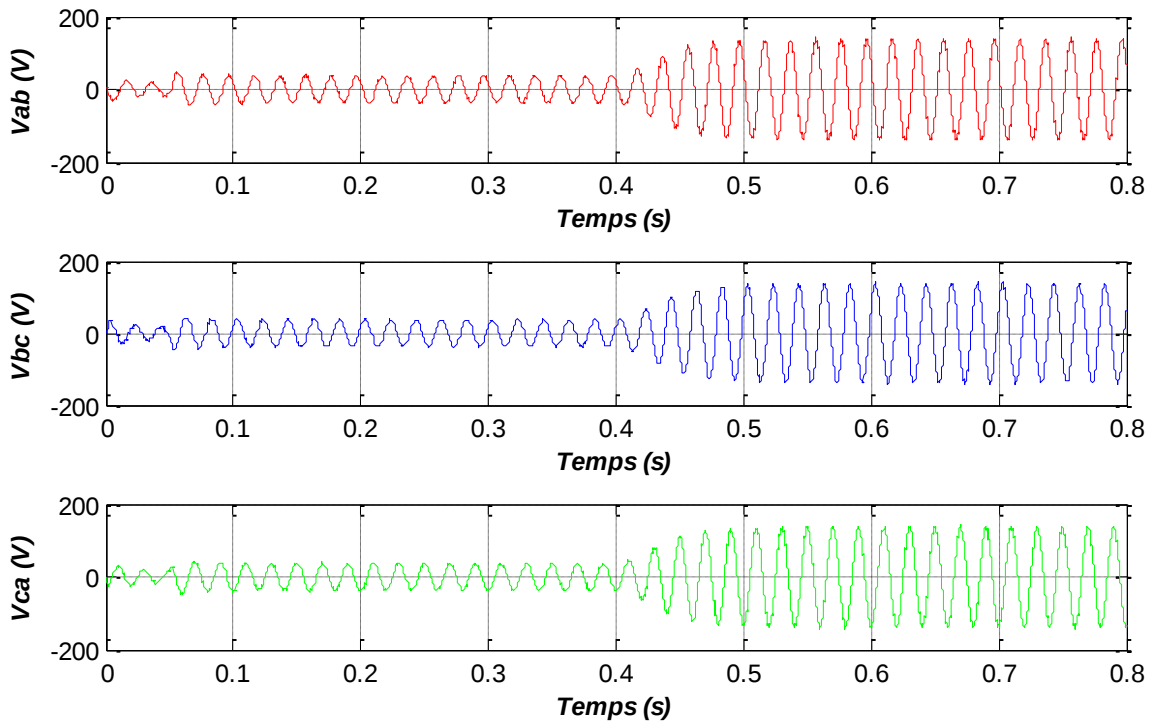


Figure 46 Tensions composées à la sortie du filtre LC.

Analyse des courants de ligne filtrés : La (Figure 47) présente les courants de ligne (I_a), (I_b) et (I_c) après filtrage. Grâce à l'effet combiné du filtre LC et de l'inductance de la charge, les courants deviennent beaucoup plus lisses et tendent vers des formes quasi sinusoïdales en régime permanent. Les oscillations rapides observées en sortie directe de l'onduleur sont fortement réduites. On observe également une bonne symétrie entre les trois phases, ce qui confirme le fonctionnement équilibré du système triphasé. Le système atteint rapidement un régime permanent stable, ce qui témoigne de la bonne dynamique globale de la chaîne de conversion.

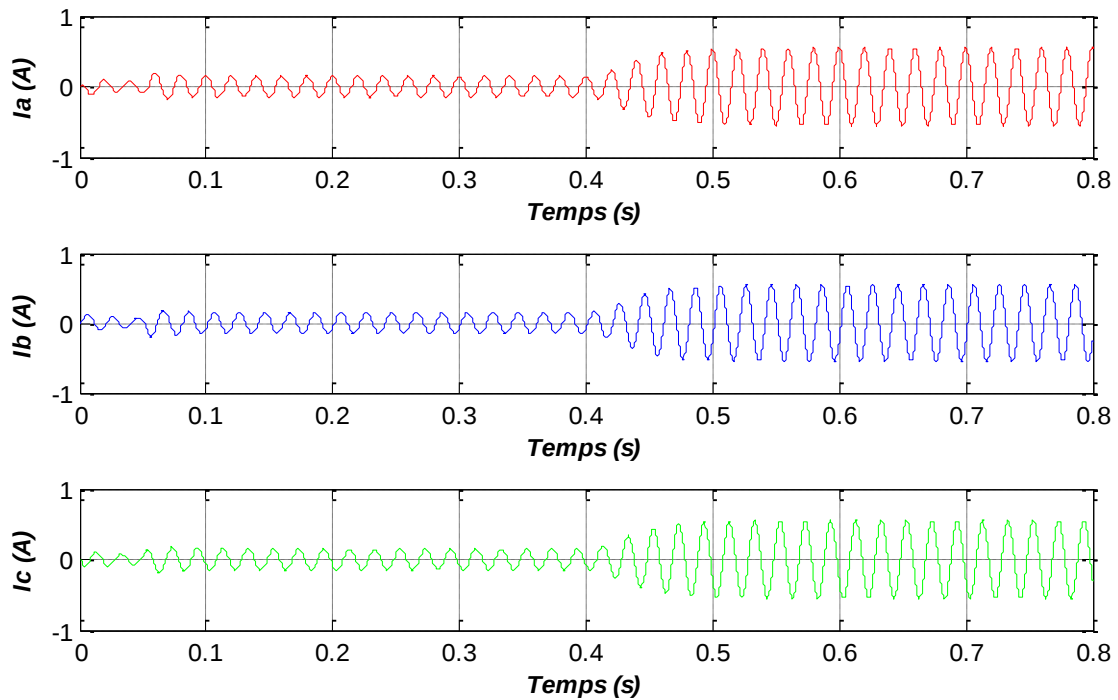


Figure 47 Courant de ligne à la sortie du filtre

L'introduction du filtre LC à la sortie de l'onduleur permet d'améliorer significativement la qualité des tensions et des courants. Les résultats de simulation montrent une réduction des ondulations et une meilleure approximation des signaux à des formes sinusoïdales équilibrées, ce qui confirme l'efficacité de l'architecture proposée dans le système photovoltaïque étudié.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion photovoltaïque complète incluant un générateur PV, un convertisseur DC-DC de type Boost associé à une commande MPPT, ainsi qu'un onduleur triphasé commandé par modulation de largeur d'impulsion (PWM). L'objectif principal était d'analyser le comportement dynamique des différents étages de conversion ainsi que la qualité de l'énergie électrique produite.

Dans un premier temps, le principe de fonctionnement des onduleurs a été étudié en mettant en évidence le rôle essentiel des interrupteurs de puissance et des stratégies de commande dans la génération de la tension alternative à partir d'une source continue. Les structures monophasée et triphasée ont été modélisées en détaillant leurs états de commutation et les relations fondamentales permettant de décrire les tensions de sortie.

Ensuite, la technique de commande PWM a été introduite comme méthode principale de pilotage des onduleurs modernes. Cette technique permet non seulement de contrôler l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie, mais également de réduire significativement les distorsions harmoniques liées aux commutations.

Par la suite, une analyse des perturbations harmoniques a été réalisée afin de mettre en évidence l'impact des convertisseurs statiques sur la qualité de l'énergie électrique. Les origines des harmoniques ainsi que leur classification ont été rappelées, permettant de justifier la nécessité de solutions d'atténuation adaptées.

Enfin, l'étude s'est concentrée sur l'intégration d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur triphasé. Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink ont montré que ce filtre permet d'améliorer de manière significative la qualité des tensions et des courants, en réduisant les composantes haute fréquence et en rapprochant les formes d'onde de signaux sinusoïdaux équilibrés. Cette amélioration confirme l'intérêt de l'association entre la commande PWM et le filtrage LC dans les systèmes photovoltaïques.

Ainsi, ce chapitre a permis de valider le bon fonctionnement de la chaîne de conversion étudiée et de démontrer l'efficacité des solutions de commande et de filtrage utilisées pour garantir une énergie électrique de meilleure qualité, adaptée aux applications modernes des systèmes photovoltaïques

CONCLUSION

GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent mémoire a été consacré à l'étude, à la modélisation et à la simulation d'un système photovoltaïque de conversion d'énergie intégrant un générateur PV, un convertisseur DC-DC de type Boost commandé par un algorithme MPPT, ainsi qu'un onduleur monophasé et triphasé commandé par modulation de largeur d'impulsions (PWM) avec filtre LC de sortie. L'objectif principal de ce travail était d'analyser le comportement global de la chaîne de conversion photovoltaïque et d'évaluer les performances des convertisseurs statiques dans l'amélioration de la qualité de l'énergie délivrée à la charge.

Dans le premier chapitre, une étude générale des différentes sources de production d'énergie électrique a été présentée. Cette analyse a permis de mettre en évidence les limites des sources conventionnelles, notamment leur impact environnemental et leur caractère épuisable, ainsi que l'importance croissante des énergies renouvelables dans le contexte actuel de transition énergétique. Parmi ces ressources, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît comme une solution prometteuse grâce à sa disponibilité, sa propreté et sa facilité d'intégration dans différents domaines d'application.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude des systèmes photovoltaïques et à la modélisation du générateur solaire. Les caractéristiques électriques du module PV ont été analysées sous différentes conditions d'irradiation et de température. L'étude du convertisseur Boost associé aux algorithmes MPPT, notamment la méthode de la conductance incrémentale, a permis d'assurer l'extraction optimale de la puissance disponible au niveau du générateur photovoltaïque. Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink ont confirmé l'efficacité de cette stratégie de commande pour le suivi du point de puissance maximale.

Le troisième chapitre a porté sur l'étude des convertisseurs DC-AC, en particulier les onduleurs monophasés et triphasés à commande PWM. La modélisation des états de commutation et l'analyse des tensions simples, tensions composées et courants de ligne ont permis de comprendre le fonctionnement global de l'onduleur dans un système photovoltaïque. Les simulations réalisées ont montré que la technique PWM permet de générer des tensions alternatives contrôlées avec une meilleure qualité spectrale par rapport aux commandes classiques.

Une attention particulière a également été accordée à l'analyse des perturbations harmoniques générées par les commutations des interrupteurs de puissance. L'intégration d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur a permis de réduire significativement les composantes

REFERENCES

harmoniques haute fréquence et d'améliorer la qualité des tensions et courants délivrés à la charge. Les résultats obtenus ont mis en évidence des formes d'onde plus lisses et plus proches d'un régime sinusoïdal équilibré, confirmant ainsi l'efficacité de l'architecture proposée.

L'ensemble des simulations effectuées sous l'environnement MATLAB/Simulink a permis de valider les modèles développés et d'analyser le comportement dynamique du système photovoltaïque dans différentes conditions de fonctionnement. Cette approche a montré l'importance des convertisseurs statiques, des stratégies de commande PWM et des techniques de filtrage dans l'amélioration des performances énergétiques et de la qualité de l'énergie électrique.

Enfin, ce travail constitue une base intéressante pour des perspectives futures portant sur :

- l'intégration des systèmes photovoltaïques au réseau électrique,
- l'utilisation des onduleurs multiniveaux afin de réduire davantage le taux de distorsion harmonique,
- le développement de techniques de commande intelligentes basées sur l'intelligence artificielle,
- ainsi que l'intégration de systèmes de stockage d'énergie pour améliorer la stabilité et la continuité de l'alimentation électrique.

Ainsi, cette étude contribue à une meilleure compréhension des systèmes photovoltaïques modernes et met en évidence l'importance des techniques de conversion et de filtrage dans le développement des systèmes énergétiques renouvelables performants et durables..

REFERENCE :

Chapitre I :

1.1 — Équilibre du réseau électrique [01] [02] [03]

[01] J. Machowski, J. Bialek, J. Bumby — Power System Dynamics: Stability and Control — Wiley, 2nd ed., 2008.

[02] P. Kundur — Power System Stability and Control — McGraw-Hill, 1994.

[03] A. Berizzi — The Italian 2003 blackout: lessons learned and recommendations — IEEE PES General Meeting, 2004.

1.2 — Énergie géothermique et énergie marémotrice [04] [05]

[04] H. Gupta — Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century — Elsevier, 2007.

[05] A. Charlier, A. Requier — Les énergies renouvelables — L'électricité d'origine renouvelable — Éditions Lavoisier, 2006.

1.3 — Centrales au charbon, au gaz et nucléaires [06][07][08][09][10][24]

[06] D. Goodstein — Out of Gas: The End of the Age of Oil — W.W. Norton & Company, 2004.

[07] N. Jenkins, J.B. Ekanayake, G. Strbac — Distributed Generation — IET, London, 2010.

[08] International Energy Agency (IEA) — World Energy Outlook — IEA Publications, Paris, 2022.

[09] H. Bossel — Earth at a Crossroads: Paths to a Sustainable Future — Cambridge University Press, 1998.

[10] A. Ter-Gazarian — Energy Storage for Power Systems — IET, 2nd ed., 2011.

[11] S. Kaplan — Power Plants: Characteristics and Costs — Congressional Research Service Report, 2008.

REFERENCES

1.4 — Énergie hydroélectrique [12][13][14][15][29]

[12] B. Massey, J. Ward-Smith — *Mechanics of Fluids* — Taylor & Francis, 9th ed., 2012.

[13] G. Boyle (ed.) — *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future* — Oxford University Press, 3rd ed., 2012.

[14] I. Dincer, M. Rosen — *Energy: Conversion, Conservation and Management* — Elsevier, 2007.

[15] T. Abbasi, S.A. Abbasi — *Small Hydro and the Environmental Implications of its Expansion* — *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2134–2143, 2011.

[16] A. Anagnostopoulos, D. Papantonis — *Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant* — *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1685–1694, 2008.

1.5 — Énergie éolienne [17][18][19][20][34]

[17] D. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi — *Wind Energy Handbook* — Wiley, 2nd ed., 2011.

[18] S. Heier — *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems* — Wiley, 2006.

[19] T. Ackermann (ed.) — *Wind Power in Power Systems* — Wiley, 2nd ed., 2012.

[20] M.R. Patel — *Wind and Solar Power Systems* — CRC Press, 2nd ed., 2006.

[21] GWEC — *Global Wind Report — Annual Market Update* — GWEC Publications, Brussels, 2023.

1.6 — Biomasse (Biomasse) [22][23][24][25]

[22] D.O. Hall, J.I. House — *Biomass Energy in Western Europe to 2050* — *Land Use Policy*, vol. 12, no. 1, pp. 37–48, 1995.

[23] P. McKendry — *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass* — *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 37–46, 2002.

[24] A.E. Farrell et al. — *Ethanol can contribute to energy and environmental goals* — *Science*, vol. 311, pp. 506–508, 2006.

[25] R. Domac, K. Richards, S. Risovic — *Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects* — *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, pp. 97–106, 2005.

REFERENCES

1.7 — Énergie solaire photovoltaïque et thermique [26]...[51]

[26] M.A. Green — Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications — Prentice-Hall, 1982.

[27] J.A. Duffie, W.A. Beckman — Solar Engineering of Thermal Processes — Wiley, 4th ed., 2013.

[28] T. Markvart, L. Castañer (eds.) — Practical Handbook of Photovoltaics — Elsevier, 2003.

[29] NASA POWER Project — Surface meteorology and Solar Energy Dataset — NASA Langley Research Center.

[30] E. Lorenzo — Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems — Progensa, 1994.

[31] R. Messenger, J. Ventre — Photovoltaic Systems Engineering — CRC Press, 3rd ed., 2010.

[32] W. Shockley, H.J. Queisser — Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells — Journal of Applied Physics, vol. 32, pp. 510–519, 1961.

[33] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta — Solar cell efficiency tables (version 37) — Progress in Photovoltaics, vol. 19, pp. 84–92, 2011.

[34] A. Luque, S. Hegedus (eds.) — Handbook of Photovoltaic Science and Engineering — Wiley, 2nd ed., 2011.

[35] IEA-PVPS — Trends in Photovoltaic Applications — IEA PVPS Programme, Report T1, 2022.

[36] D. Barlev, R. Vidu, P. Stroeve — Innovation in concentrated solar power — Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 95, pp. 2703–2725, 2011.

[37] European Commission — Concentrating Solar Power — From Research to Implementation — EC Publications, Luxembourg, 2007.

[38] R. Pitz-Paal, J. Dersch, B. Milow — ECOSTAR — European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping — DLR, 2005.

1.8 — Impact environnemental et efficacité énergétique [39][40][54]

[39] IPCC — Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation — Cambridge University Press, 2011.

REFERENCES

[40] N. Stern — The Economics of Climate Change: The Stern Review — Cambridge University Press, 2007.

[41] S. Pacala, R. Socolow — Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years — Science, vol. 305, pp. 968–972, 2004.

Chapitre II :

2.1 — Introduction : énergies renouvelables et énergie solaire [42][43][44][59]

[42] REN21 — Renewables Global Status Report — REN21 Secretariat, Paris, 2023.

[43] B.K. Sovacool — Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power — Energy Policy, vol. 36, no. 8, pp. 2950–2963, 2008.

[44] D.P. Hohm, M.E. Ropp — Comparative study of maximum power point tracking algorithms — Progress in Photovoltaics, vol. 11, pp. 47–62, 2003.

[45] T. Eser, P.L. Chapman — Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques — IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.

2.2 — Définition du photovoltaïque et types de cellules solaires [46][47][48][49][64]

[46] A. Goetzberger, C. Hebling, H.W. Schock — Photovoltaic materials, history, status and outlook — Materials Science and Engineering: R, vol. 40, pp. 1–46, 2003.

[47] A. Luque, S. Hegedus (eds.) — Handbook of Photovoltaic Science and Engineering — Wiley, 2nd ed., 2011.

[48] J.A. Duffie, W.A. Beckman — Solar Engineering of Thermal Processes — Wiley, 4th ed., 2013.

[49] R. Messenger, J. Ventre — Photovoltaic Systems Engineering — CRC Press, 3rd ed., 2010.

[50] H. Häberlin — Photovoltaik — Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen — Electrosuisse, 2010.

REFERENCES

2.3 — Modélisation électrique de la cellule PV (Circuit diode équivalent) [51][52][53][68]

[51] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Filho — Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays — IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.

[52] D.S.H. Chan, J.C.H. Phang — Analytical methods for the extraction of solar-cell single and double-diode model parameters — IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 34, no. 2, pp. 286–293, 1987.

[53] K.H. Hussein et al. — Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions — IEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution, vol. 142, no. 1, pp. 59–64, 1995.

[54] W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman — Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance — Solar Energy, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, 2006.

2.4 — Courbes I-V / P-V et effet du rayonnement et de la température [55][70]

[55] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N.C. Voulgaris — Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system — IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 1, pp. 46–54, 2001.

[56] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli — Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems — CRC Press, 2013.

2.5 — Systèmes photovoltaïques et convertisseur Boost [57][58][59][60]

[57] B. Subudhi, R. Pradhan — A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems — IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2013.

[58] R.W. Erickson, D. Maksimović — Fundamentals of Power Electronics — Springer, 3rd ed., 2020.

[59] S. Luo, Z. Ye, R.L. Lin, F.C. Lee — A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules — IEEE PESC Conference, vol. 2, pp. 901–908, 1999.

[60] C. Liu, B. Wu, R. Cheung — Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems — Canadian Solar Buildings Conference, Montreal, 2004.

REFERENCES

2.6 — Algorithme P&O (Perturb & Observe) [61][62][63]

[61] A. Safari, S. Mekhilef — Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter — IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1154–1161, 2011.

[62] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli — Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method — IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.

[63] A. Pandey, N. Dasgupta, A.K. Mukerjee — A Simple Single-Sensor MPPT Solution — IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 698–700, 2007.

2.7 — Algorithme (Incremental Conductance) [44][64]

[44] D.P. Hohm, M.E. Ropp — Comparative study of maximum power point tracking algorithms — Progress in Photovoltaics, vol. 11, pp. 47–62, 2003.

[64] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, Y. Kang — A variable step size INC MPPT method for PV systems — IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, 2008.

3.1 Introduction

[65] M. A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications. Prentice Hall, 1982.

[66] T. Markvart et L. Castañer, Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation. Elsevier, 2005.

[67] J.-P. Dunlop, Photovoltaic Systems, 3rd ed. American Technical Publishers, 2012.

[68] R. Messenger et J. Ventre, Photovoltaic Systems Engineering, 3rd ed. CRC Press, 2010.

3.2 Structure globale du système photovoltaïque

[69] R. Teodorescu, M. Liserre et P. Rodriguez, Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley & Sons, 2011.

[70] F. Blaabjerg et al., « Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, n° 5, pp. 1398–1409, 2006.

[71] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall, 2002.

REFERENCES

[72] D. Sera, R. Teodorescu et P. Rodriguez, « PV panel model based on datasheet values », in Proc. IEEE ISIE, 2007, pp. 2392–2396.

3.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur

[73] N. Mohan, T. M. Undeland et W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2003.

[74] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2011.

[75] P. C. Krause, O. Wasynczuk et S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 2nd ed. IEEE Press / Wiley, 2002.

[76] A. Emadi, Energy-Efficient Electric Motors, 3rd ed. Marcel Dekker, 2005.

3.4 Onduleur monophasé et triphasé

[77] D. G. Holmes et T. A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. IEEE Press / Wiley-Interscience, 2003.

[78] J. M. Carrasco et al., « Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, n° 4, pp. 1002–1016, 2006.

3.4.1 Onduleur monophasé

[79] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen et F. Blaabjerg, « A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, n° 5, pp. 1292–1306, 2005.

[80] H. Patel et V. Agarwal, « MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics », IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, n° 1, pp. 302–310, 2008.

3.4.2 Onduleur triphasé

[81] R. Teodorescu et F. Blaabjerg, « Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode », IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, n° 5, pp. 1323–1332, 2004.

[82] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan et F. Blaabjerg, Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press, 2002.

REFERENCES

[83] A. Nabae, I. Takahashi et H. Akagi, « A new neutral-point-clamped PWM inverter », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-17, n° 5, pp. 518–523, 1981.

3.5 Commande PWM

[84] D. G. Holmes et T. A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. IEEE Press / Wiley-Interscience, 2003.

[85] H. W. van der Broeck, H.-C. Skudelny et G. V. Stanke, « Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, n° 1, pp. 142–150, 1988.

[86] J. Rodriguez, J.-S. Lai et F. Z. Peng, « Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, n° 4, pp. 724–738, 2002.

3.5.1 Principe de la PWM

[87] G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutati et G. Sciutto, « A new multilevel PWM method: A theoretical analysis », IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, n° 3, pp. 497–505, 1992.

[89] A. M. Hava, R. J. Kerkman et T. A. Lipo, « Simple analytical and graphical methods for carrier-based PWM-VSI drives », IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, n° 1, pp. 49–61, 1999.

[90] K. Zhou et D. Wang, « Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: A comprehensive analysis », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, n° 1, pp. 186–196, 2002.

3.6 Simulation d'un onduleur triphasé en pont à commande MLI

[91] MathWorks, MATLAB/Simulink – SimPowerSystems User's Guide. The MathWorks Inc., 2021.

[92] V. Kaura et V. Blasko, « Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, n° 1, pp. 58–63, 1997.

[93] S. Kouro et al., « Recent advances and industrial applications of multilevel converters », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, n° 8, pp. 2553–2580, 2010.

3.6.1 Tensions simples à la sortie de l'onduleur

[94] P. Kundur, Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994.

REFERENCES

[95] J. Holtz, « Pulsewidth modulation for electronic power conversion », Proc. IEEE, vol. 82, n° 8, pp. 1194–1214, 1994.

3.6.2 Tensions composées à la sortie de l'onduleur

[96] B. Wu, High-Power Converters and AC Drives. IEEE Press / Wiley, 2006.

[97] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, 4th ed. Pearson, 2013.

3.6.3 Courants de ligne à la sortie de l'onduleur

[98] A. Emadi, A. Khaligh, Z. Nie et Y. J. Lee, Integrated Power Electronic Converters and Digital Control. CRC Press, 2009.

[99] L. Malesani et P. Tomasin, « PWM current control techniques of voltage source converters – A survey », in Proc. IEEE IECON, 1993, pp. 670–675.

3.7 Analyse des perturbations harmoniques dans l'onduleur

[100] A. Baghini, Handbook of Power Quality. John Wiley & Sons, 2008.

[101] IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2014.

[102] J. Arrillaga et N. R. Watson, Power System Harmonics, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2003.

3.7.1 Origine de la déformation des signaux

[103] E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara et T. J. E. Miller, Power Electronic Control in Electrical Systems. Newnes, 2002.

[104] W. Xu, « Component modeling issues for power quality assessment », IEEE Power Eng. Rev., vol. 21, n° 11, pp. 12–17, 2001.

3.7.2 Notion d'harmoniques

[105] J. Arrillaga et N. R. Watson, Power System Harmonics, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2003.

[106] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso et H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2nd ed. McGraw-Hill, 2002.

REFERENCES

[107] G. J. Wakileh, *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design*. Springer, 2001.

3.7.3 Sources des harmoniques

[108] T. M. Blooming et D. J. Carnovale, « Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits », in *Proc. IEEE IAS*, 2006.

[109] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller et M. J. Samotyj, « Voltage sags in industrial systems », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, n° 2, pp. 397–403, 1993.

[110] A. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. IEEE Press / Wiley, 2010.

3.7.4 Charges linéaires et non linéaires

[111] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso et H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2002.

[112] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury et M. J. Samotyj, « An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads », *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 10, n° 1, pp. 467–473, 1995.

3.7.5 Méthodes de filtrage des harmoniques

[113] B. Singh, K. Al-Haddad et A. Chandra, « A review of active filters for power quality improvement », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, n° 5, pp. 960–971, 1999.

[114] H. Akagi, E. H. Watanabe et M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. IEEE Press / Wiley, 2007.

[115] H. Akagi, « New trends in active filters for power conditioning », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, n° 6, pp. 1312–1322, 1996.

[116] S. Bhattacharya, T. M. Frank, D. M. Divan et B. Banerjee, « Active filter system implementation », *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 4, n° 5, pp. 47–63, 1998.

3.8 Application d'un filtre LC à la sortie de l'onduleur et analyse des résultats

[117] M. Liserre, F. Blaabjerg et S. Hansen, « Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, n° 5, pp. 1281–1291, 2005.

REFERENCES

[118] R. Peña-Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, R. Sebastián, J. Dannehl et F. W. Fuchs, « Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, n° 6, pp. 2642–2646, 2013.

[119] J. Dannehl, F. W. Fuchs, S. Hansen et P. B. Thøgersen, « Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with LCL filters », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, n° 4, pp. 1509–1517, 2010.

[120] E. Twining et D. G. Holmes, « Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, n° 3, pp. 888–895, 2003.

3.9 Conclusion

[121] F. Blaabjerg, Z. Chen et S. B. Kjaer, « Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, n° 5, pp. 1184–1194, 2004.

[122] S. Kouro et al., « Recent advances and industrial applications of multilevel converters », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 8, pp. 2553–2580, 2010.