



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de la Technologie

Filière: Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Option : Réseaux Electriques

Par : ARIGUE Imad - YAHYAOUY Messaoud

Thème

**Commande prédictive d'un système photovoltaïque
connecté au réseau**

Devant le jury composé de :

Dr. Boughazala Med Saleh	Président	Université d'El Oued
Dr. Zebidi Messouad	Examineur	Université d'El Oued
Dr. SERHOUD Hicham	Encadreur	Université d'El Oued
Dr. MAHMOUDI Manal	Co-Encadré par	Université d'El Oued

2025-2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers le Dieu Tout-Puissant (Allah), dont la guidance, la miséricorde et les bénédictions ont été une source constante de force et d'inspiration tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons également remercier les honorables membres du jury pour le temps qu'ils nous ont accordé, leur évaluation critique et leurs remarques constructives qui ont contribué à enrichir cette recherche et à en élever la qualité académique.

Nous adressons nos remerciements les plus particuliers et les plus profonds à notre encadreur, le Professeur **Serhoud Hicham**, dont le soutien indéfectible, les conseils académiques et les encouragements continus ont été le principal moteur menant ce travail à sa réussite. Son encadrement et ses orientations ont joué un rôle essentiel dans la structuration du contenu et de la direction de ce mémoire.

Nous sommes également reconnaissants envers toutes les personnes qui ont contribué, que ce soit sur le plan académique ou technique, à l'aboutissement de ce travail. Votre soutien, direct ou indirect, a été profondément apprécié.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude la plus sincère à tous nos collègues et amis de la **promotion**. Leur camaraderie, leur soutien moral et leurs encouragements ont rendu ce parcours académique non seulement fructueux, mais aussi enrichissant et inoubliable.

Dédicace

Au nom d'Allah le tout-puissant, qui est toujours à mes côtés

Je dédie ce travail :

À Mes chers parents ;

Aucune dédicace ne saurait traduire l'ampleur de ma dette envers eux. Pour leur Bienveillance, leur amour et leur soutien constant, je leur adresse ici le témoignage

Sincère de ma profonde affection et de ma gratitude infinie.

À mes frères et Mes sœurs ;

À ma grande famille ;

Et à tous mes amis ;

À Tous ceux qui me sont chers.

IMAD

Dédicace

Au nom d'Allah le tout-puissant, qui est toujours à mes côtés

Je dédie ce travail :

À Mes chers parents ;

Aucune dédicace ne saurait traduire l'ampleur de ma dette envers eux. Pour leur bienveillance, leur amour et leur soutien constant, je leur adresse ici le témoignage sincère de ma profonde affection et de ma gratitude infinie.

À mes frères et Ma sœurs ;

À ma grande famille ;

Et à tous mes amis ;

À Tous ceux qui me sont chers.

Messaoud

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	III
Dédicace.....	IV
Dédicace.....	V
Sommaire	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
Résumé :	XVI
:الملخص.....	XVI
Abstract :.....	XVII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	3
I.1. Introduction	4
I.2. Définition de l'énergie renouvelable	4
I.3. L'énergie solaire.....	4
I.4. Rayonnement solaire	5
I.4.1. Le rayonnement direct.....	5
I.4.2. Le rayonnement diffus.....	5
I.4.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	6
I.4.4. Le rayonnement global.....	6
I.5. Les panneaux solaires	7
I.5.1. Définition	7
I.5.2. La cellule PV	7
I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	7
I.6. Type et rendement des cellules photovoltaïques	8
I.6.1. Les panneaux monocristallins	8
I.6.2. Les panneaux polycristallins	8
I.6.3. Les panneaux amorphes	9
I.7. Les différents branchements des panneaux PV	10
I.7.1. Le branchement en série.....	10
I.7.2. Le branchement en parallèle.....	11
I.7.3. Le branchement en série-parallèle.....	12

I.8.	Classification des systèmes PV	12
I.8.1.	Les systèmes autonomes	12
I.8.2.	Les systèmes PV hybrides	13
I.8.3.	Les systèmes raccordés aux réseaux	14
I.9.	Autorisation de connexion au réseau	14
I.10.	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	15
I.11.	Conclusion	16
Chapitre II :	Poursuite Du Point De Puissance Maximal (MPPT)	17
II.1.	Introduction	18
II.2.	Modélisation d'une cellule PV	18
II.3.	Paramètres électriques du module photovoltaïque	19
II.3.1.	Tension de circuit ouvert	19
II.3.2.	Courant de court-circuit	20
II.3.3.	Puissance maximale	20
II.3.4.	Facteur de forme	20
II.3.5.	Rendement	20
II.4.	Simulation du module PV KC200GT	21
II.4.1.	Influence de la température	24
II.4.2.	Influence de l'éclairement	24
II.5.	Modélisation des convertisseurs	25
II.5.1.	Définition	25
II.5.2.	Les différents types de convertisseurs	26
II.5.3.	Convertisseurs DC-DC ou hacheurs	27
II.6.	Poursuite du point de puissance maximale	30
II.6.1.	Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC	31
II.6.2.	Méthode de poursuite du point de puissance maximale	32
II.6.3.	Simulation de la méthode MPPT	37
II.7.	Conclusion	41
Chapitre III :	Commande Prédictive D'un Système Photovoltaïques Connecté Au Réseau	42
III.1.	Introduction	43
III.2.	Système connecté au réseau	43
III.3.	Structure générale d'un système photovoltaïque	44
III.3.1.	Systèmes PV connectés directement au réseau	44
III.3.2.	Système à bus continu intermédiaire	46

III.4. Système photovoltaïque connecté au réseau proposé.....	47
III.5. La charge	48
III.6. La Modélisation de l'interface réseaux.....	48
III.7. Modélisation et commande de l'onduleur de tension	49
III.7.1. Commande de l'onduleur triphasé	50
III.8. Boucle à verrouillage de phase (P.L.L)	51
III.9. Filtre.....	51
III.10. Commande prédictive d'un système photovoltaïque connecté au Réseau	52
III.10.1. Algorithme de commande prédictive :	54
III.10.2. Courants injectés.....	56
III.10.3. Fonction de coût	56
III.11. Simulation et Résultats d'un système	56
III.12. Résultat des simulations.....	57
III.13. Conclusion	62
Conclusion générale	65
Références	68

Liste des figures

Figure I.1: Différents composants du rayonnement.....	6
Figure I.2 : Rayonnement solaire capté un plan sur horizontal et incliné.....	7
Figure I.3 : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.....	7
Figure I.4 : Structure d'une cellule photovoltaïque	8
Figure I.5: Le branchement en série.....	11
Figure I.6: Le branchement en parallèle	11
Figure I.7: Le branchement en série-parallèle	12
Figure I.8: Système PV autonome	13
Figure I.9: Systèmes PV hybrides.....	13
Figure I.10: Les systèmes raccordés aux réseaux	14
Figure II.1: Schéma équivalent de cellule PV	18
Figure II.2: Schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.	22
Figure II.3: Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire photovoltaïque	22
Figure II.4: Schéma de simulation du module PV de type « KC200GT »	23
Figure II.5: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents température et un éclairement $E=1000$ (W/m ²).	24
Figure II.6: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}\text{C}$	25
Figure II.7: Différents types de convertisseurs statiques.....	26
Figure II.8: Schéma électrique du convertisseur élévateur.....	27
Figure II.9: Caractéristique de la tension et du courant du hacheur élévateur [6].....	28
Figure II.10: Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC	29
Figure II.11: Rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.....	29
Figure II.12: Courant de sortie d'un convertisseur DC-DC.....	30
Figure II.13: Tension de sortie d'un convertisseur DC-DC.....	30
Figure II.14: Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.....	32
Figure II.15: Caractéristique du point de puissance maximale MPP.....	33
Figure II.16: Caractéristique Puissance-Tension d'un module photovoltaïque.....	34
Figure II.17: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	35
Figure II.18: Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation [25]	35
Figure II.19: Méthode avec de la contre réaction en courant	37
Figure II.20: Schéma de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT	37
Figure II.21: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P & O). .	37
Figure II.22: Programme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P & O).	38

Figure II.23: Schéma SIMULINK pour la commande MPPT avec méthode P&O	38
Figure II.24: Variation de l'éclairement.	39
Figure II.25: Variation de la température	39
Figure II.26: Courbe de puissance.....	40
Figure II.27: Courb du couran.	40
Figure II.28: Rapport cyclique (d).	40
Figure II.29 : Courbes de tension de PV.....	40
Figure II.30: Résultats de simulation des courbes de tension de charge.	41
Figure III.1: Schéma d'un système connecté au réseau.	44
Figure III.2: Modules PV en série vers un seul onduleur.....	45
Figure III.3: Bus à basse tension alternative	46
Figure III.4: Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [46].....	47
Figure III.5: Modèle Simulink d'un réseau PV triphasé connecté au réseau électrique.	48
Figure III.6: Schéma bloc de réseau électrique sur MATLAB -Simulink.....	49
Figure III.7: Schéma bloc d'un onduleur sur MATLAB -Simulink.....	50
Figure III.8: Signale de la commande MLI	51
Figure III.9: Schéma bloc d'un filtre RL sur MATLAB -Simulink.	52
Figure III.10: Schéma global de la commande du système photovoltaïque connecté au réseau.....	53
Figure III.11: Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif.....	56
Figure III.12: Irradiation.....	58
Figure III.13: Température	58
Figure III.14: MPPT du PV	58
Figure III.15: Courbe de tension aux bornes du condensateur et sa référence	59
Figure III.16: Courbe de tension du PV	59
Figure III.17: Courbe de courant du PV	59
Figure III.18: Courbe de Puissance générée PV	60
Figure III.19: Caractéristique MPPT de la tension et de la puissance du PV.....	60
Figure III.20: Courbe de zoom courant à la sortie de l'onduleur	60
Figure III.21: Caractéristique de la puissance active P et de la puissance réactive Q injecter dans le réseau.....	61
Figure III.22: Zoom phase de tension du réseau et courant.....	61

Liste des tableaux

Tableau I.1: Les différents types des cellules avec leur rendement.....	9
Tableau I.2: Les différents types des cellules photovoltaïques.	10
Tableau II.1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque KC200GT.....	21
Tableau II.2: Les paramètres du convertisseur.....	39

Liste de symboles

AC (Alternating Current) : Courant Alternatif (CA).

C : Vitesse de la lumière.

CST : Conditions Standards de Test.

d – q : Repère orthogonal synchrone en rotation (Transformation de Park).

DC (Direct Current) : Courant Continu (CC).

E: Éclairement solaire reçu dans le plan de la cellule.

g (ou **g_c**) : Fonction de coût mathématique minimisée par l'algorithme MPC.

g_{opt} : Valeur minimale optimale de la fonction de coût retenue pour commuter l'onduleur.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

h : Constante de Planck.

k : Indice de l'instant d'échantillonnage actuel (Discrétisation).

k+1 : Indice de l'instant futur prédit (Horizon de prédiction).

L_f : Inductance du filtre de couplage de l'onduleur au réseau.

MPC (Model Predictive Control) : Commande Prédictive (basée sur le modèle).

MPP (Maximum Power Point) : Point de Puissance Maximale.

MPPT (Maximum Power Point Tracking) : Recherche / Suivi du Point de Puissance Maximale.

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

P : Puissance active totale injectée ou consommée.

P&O (Perturb and Observe) : Perturbation et Observation.

PLL (Phase Locked Loop) : Boucle à Verrouillage de Phase.

PV : Photovoltaïque.

Q : Puissance réactive échangée avec le système.

R_f : Résistance propre du filtre de couplage au réseau électrique.

THD : Total Harmonic Distortion

T_s : Temps ou période d'échantillonnage de la commande numérique.

V_{dc} : Tension du bus continu intermédiaire alimentant l'onduleur.

VSI (Voltage-Source Inverter) : Onduleur de tension.

α - β : Repère orthogonal stationnaire à deux coordonnées (Transformation de Clarke).

λ : Longueur d'onde ou densité d'énergie du rayonnement.

ω : Pulsation ou fréquence angulaire de la tension du réseau.

Résumé

Résumé :

Ce mémoire présente l'étude, la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque (PV) connecté au réseau électrique. L'objectif principal est d'améliorer la qualité de l'énergie injectée et d'optimiser le rendement global du système face aux variations climatiques. La chaîne de conversion étudiée est constituée d'un générateur PV, d'un hacheur survolteur (Boost) contrôlé par les algorithmes MPPT (incluant une étude la méthode P&O sous conditions d'ombrage partiel), et d'un onduleur triphasé à deux niveaux. L'apport majeur de ce travail réside dans l'application de la Commande Prédictive (MPC) pour le contrôle de l'onduleur. Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink démontrent la supériorité de cette approche par rapport aux régulateurs classiques, offrant une dynamique ultra-rapide, une régulation robuste de la tension du bus continu

Mots clés : Système Photovoltaïque (PV), Onduleur, Commande Prédictive (MPC), Poursuite Du Point De Puissance Maximal (MPPT),

الملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة، نمذجة، والتحكم في نظام كهروضوئي (PV) متصل بالشبكة الكهربائية. الهدف الرئيسي هو تحسين جودة الطاقة المحقونة ورفع المردود الإجمالي للنظام في ظل التغيرات المناخية. تتكون سلسلة التحويل المدروسة من مولد كهروضوئي، محول رافع للجهد (Boost) يتم التحكم فيه بواسطة خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة القصوى - (MPPT) متضمنة دراسة تفصيلية لخوارزمية (P&O) تحت ظروف التظليل الجزئي - بالإضافة إلى عاكس ثلاثي الطور بمستويين. تكمن المساهمة الرئيسية لهذا العمل في تطبيق استراتيجية التحكم التنبئي ذي الحالات المنتهية (MPC) للتحكم في العاكس المربوط بالشبكة. أثبتت نتائج المحاكاة المنجزة في بيئة MATLAB/Simulink تفوق هذه المقاربة على المنظمات الكلاسيكية، حيث أظهرت استجابة ديناميكية فائقة السرعة، تنظيمًا قويًا لجهد الناقل المستمر (V_{dc})، حقن تيار بمعامل استطاعة موحد.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، الربط بالشبكة، تقنية (P&O) MPPT، عاكس ثلاثي الطور، التحكم التنبئي (MPC)، التشوه التوافقي (THD)

Abstract :

This thesis presents the study, modeling, and control of a grid-connected photovoltaic (PV) system. The main objective is to improve the quality of the injected power and optimize the overall system efficiency under varying climatic conditions. The studied energy conversion chain consists of a PV generator, a Boost DC-DC converter controlled by Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms (including a study of the P&O method under partial shading conditions), and a two-level three-phase inverter. The major contribution of this work lies in the application of Model Predictive Control (MPC) for the inverter control. The simulation results obtained using MATLAB/Simulink demonstrate the superiority of this approach compared to classical regulators, providing an ultra-fast dynamic response, robust regulation of the DC bus voltage, a unity power factor.

Keywords : Photovoltaic System (PV), Inverter, Model Predictive Control (MPC), Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'augmentation constante de la demande en énergie électrique mondiale et à l'épuisement inévitable des ressources fossiles, la transition vers des sources d'énergie durables s'impose aujourd'hui comme une nécessité absolue. Cette démarche est vitale pour limiter les émissions polluantes et répondre aux besoins énergétiques croissants d'une manière respectueuse de l'environnement. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue comme l'une des solutions les plus prometteuses et écologiques [1].

L'intégration de ces systèmes photovoltaïques (PV) au réseau électrique public a considérablement évolué au cours des dernières décennies. Cette interconnexion repose intrinsèquement sur des convertisseurs statiques de puissance, et plus particulièrement sur l'onduleur, qui joue un rôle central. Ce dernier assure non seulement la conversion du courant continu (DC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau, mais il doit également garantir la qualité de l'énergie injectée et la stabilité du système face aux fluctuations météorologiques[2].

Pour optimiser les performances de ces onduleurs et satisfaire aux exigences strictes de connexion au réseau, l'application de stratégies de commande performantes est indispensable. Traditionnellement, le contrôle des onduleurs s'appuie sur des régulateurs classiques (tels que les correcteurs PI), qui peuvent présenter certaines limites opérationnelles en termes de temps de réponse dynamique et de robustesse face aux perturbations. Pour surmonter ces défis, la Commande Prédictive à base de Modèle (MPC - Model Predictive Control) a émergé comme une alternative technologique puissante et attractive.

La stratégie MPC, et plus spécifiquement la commande prédictive à états finis (MPC), exploite un modèle mathématique rigoureux de l'onduleur et du filtre pour anticiper le comportement futur du système sur un horizon temporel donné. Elle évalue un nombre fini d'états de commutation de l'onduleur et sélectionne, à chaque instant d'échantillonnage, l'état optimal qui minimise une fonction de coût prédéfinie. Cette approche se caractérise par sa réponse dynamique exceptionnellement rapide, sa capacité à gérer facilement les non-linéarités, et l'intégration directe des contraintes du système sans nécessiter de boucle de modulation (MLI) complexe.

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif principal de ce mémoire, qui vise à étudier et à implémenter la stratégie de commande prédictive (MPC) sur un onduleur triphasé à deux niveaux,

intégré dans un système photovoltaïque connecté au réseau, afin d'en optimiser le rendement et la qualité d'énergie.

Pour mener à bien cette étude, notre travail est structuré autour de trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré aux généralités sur l'énergie solaire. Il aborde le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques électriques, ainsi que les différentes architectures des systèmes PV (autonomes, hybrides et connectés au réseau).
- **Le deuxième chapitre** traite la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Il détaille l'étude du convertisseur statiques (hacheur) et expose les différentes techniques algorithmiques d'extraction du point de puissance maximale (MPPT).
- **Le troisième chapitre** constitue le cœur de ce travail. Il est dédié à l'application détaillée de la commande prédictive (MPC) à l'onduleur connecté au réseau. Il présente la structure de contrôle, le modèle mathématique de prédiction, la fonction de coût, et se clôture par la validation des performances du système global à travers des simulations numériques sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Récemment, l'intégration des sources d'énergie renouvelable au réseau électrique a fait l'objet de nombreuses études de recherche. Cet intérêt est motivé par les qualités importantes de ces sources, notamment leur caractère propre et durable. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie photovoltaïque se distingue en devenant progressivement aussi compétitive que les sources d'énergie traditionnelles [1]

Dans ce chapitre on va essayer de donner une idée générale sur l'énergie solaire, les différents types des systèmes photovoltaïques et quelques concepts qui vont nous aider à bien rentrer dans le thème.

I.2. Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables peuvent être définies comme des énergies issues de ressources naturelles inépuisables et constamment renouvelées. Les énergies renouvelables sont également connues comme l'énergie issue de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à ce qui est consommé. L'énergie renouvelable est également appelée par plusieurs termes, y compris énergie propre et énergie respectueuse de l'environnement. Les utilisations des énergies renouvelables se concentrent dans la production d'énergie électrique [2], Parmi les principales formes d'énergies renouvelables, on retrouve :

- L'énergie solaire, qui exploite le rayonnement du soleil pour produire de l'électricité et de la chaleur.
- L'énergie éolienne : générée grâce à la force du vent.
- L'énergie hydraulique : obtenue par la puissance de l'eau en mouvement.
- La biomasse : issue de la valorisation de matières organiques.
- La géothermie : qui utilise la chaleur interne de la Terre.

I.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge. L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

La latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat loc.

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 (km/s), les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360(W/m²).

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 (W/m²) à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [3] :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (I.1)$$

- λ : La longueur d'onde du rayonnement (m).
- h : la constante de planck.
- C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.24}{\lambda} \quad (I.2)$$

I.4. Rayonnement solaire

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C [4].

I.4.1. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

I.4.2. Le rayonnement diffus

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

I.4.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....) [4].

I.4.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [4].

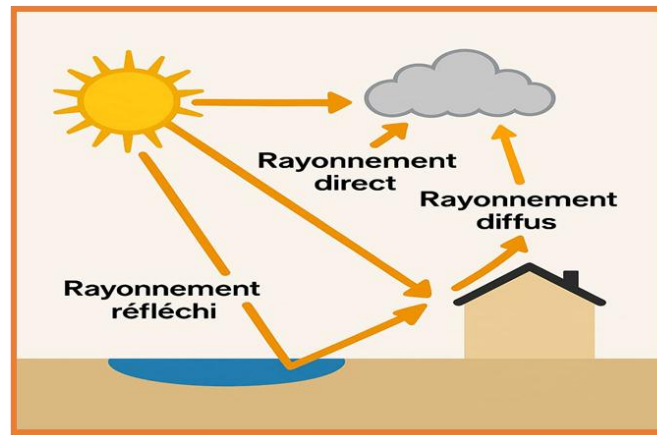


Figure I.1: Différents composants du rayonnement

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [5]

Dans la figure (I.2) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

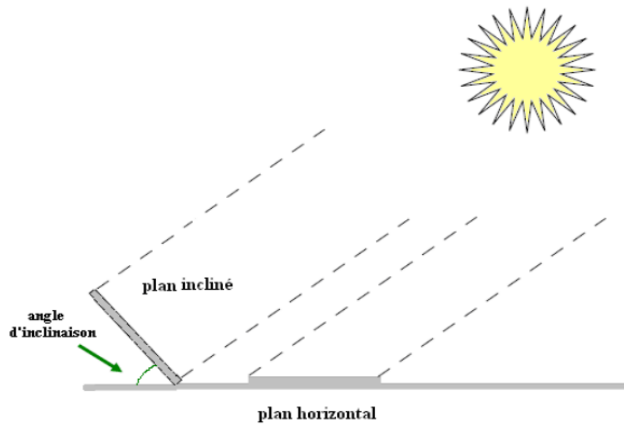


Figure I.2 : Rayonnement solaire capté un plan sur horizontal et incliné

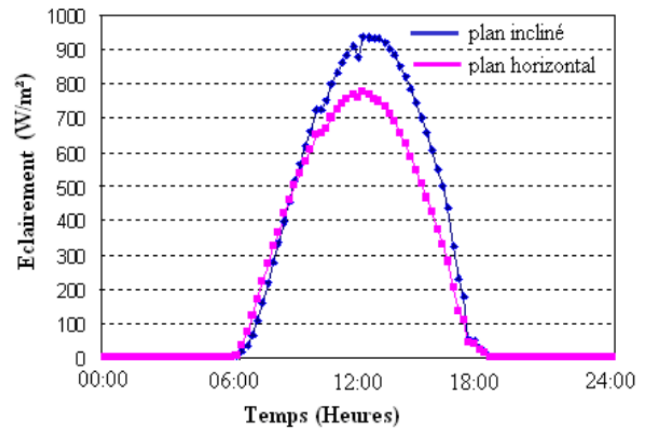


Figure I.3 : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.

I.5. Les panneaux solaires

I.5.1. Définition

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée.

I.5.2. La cellule PV

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [6].

I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [7].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (I-4) ci-dessous.

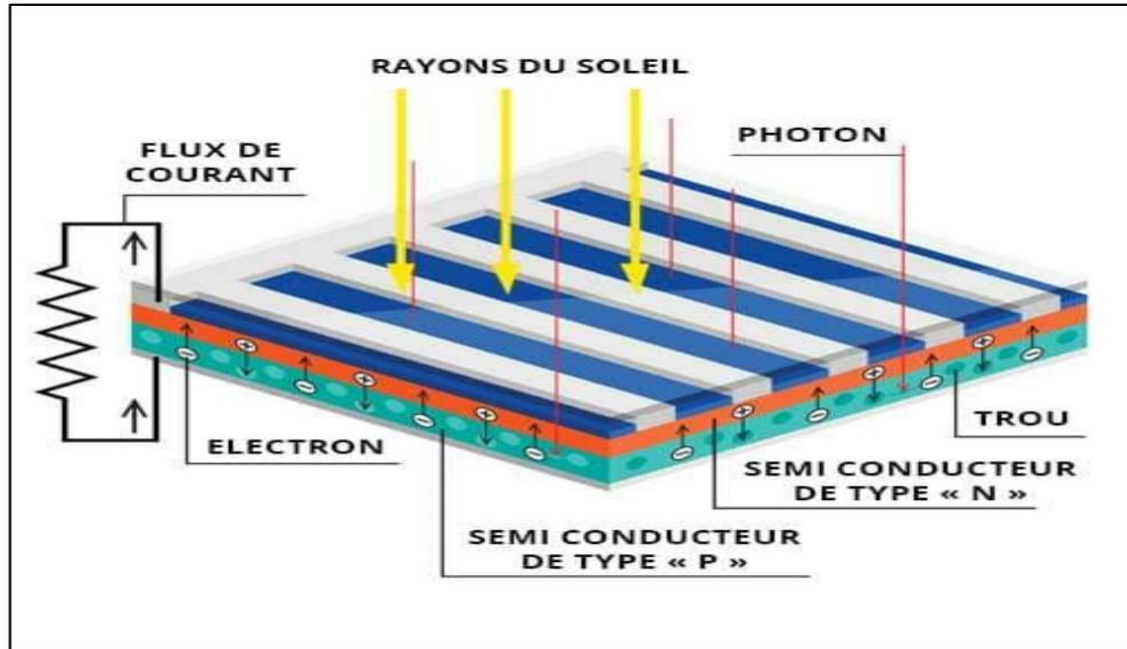


Figure I.4 : Structure d'une cellule photovoltaïque

I.6. Type et rendement des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle. [8]

I.6.1. Les panneaux monocristallins

Sont composés de cristaux de silicium de grande pureté. Le lingot de silicium monocristallin a une forme cylindrique, un diamètre de 13-20 cm et une longueur de 200 cm, et est obtenu par la croissance d'un cristal filiforme en lente rotation. Ce cylindre est ensuite coupé en plaquettes de 200-500 μm d'épaisseur et la surface est traitée pour obtenir des « micro rainures » visant à minimiser les pertes par réflexion. Le principal avantage de ces cellules est leur efficacité (15 à 18%). [8]

I.6.2. Les panneaux polycristallins

Les cristaux constituant les cellules s'agrégent en prenant différentes formes et sens. En fait, les irisations typiques des cellules en silicium polycristallin sont causées par les différents sens des cristaux et donc par le comportement différent par rapport à la lumière. Le lingot de silicium polycristallin est obtenu en faisant fondre et en coulant le silicium dans un moule en forme de

parallélépipède. Les plaquettes ainsi obtenues ont une forme carrée et des stries caractéristiques de 180-300 μ m d'épaisseur. L'efficacité est inférieure à celle du silicium monocristallin (12 à 14%).[8]

I.6.3. Les panneaux amorphes

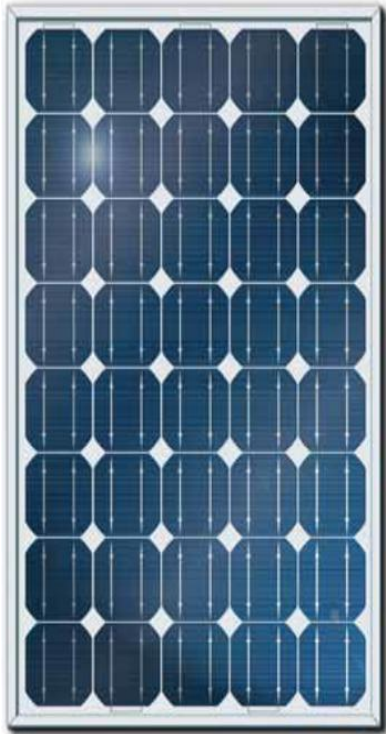
Le silicium amorphe (a-Si) a été le premier matériau utilisé pour réaliser une cellule solaire en couche mince grâce à sa forte absorption. Cependant, le rendement de conversion reste médiocre à cause du taux de recombinaison élevé qui caractérise la structure amorphe, il est situé entre (8% et 10%).[8]

Le tableau suivant (I-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Tableau I.1: Les différents types des cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement en Laboratoire	Rendement production
Silicium monocristallin (mSi)	24,7%	15 à 18%
Silicium polycristallin (p-Si)	19,8%	12 à 14 %
Silicium amorphe (a-Si)	13%	8-10%

Tableau I.2: Les différents types des cellules photovoltaïques.

		
Silicium monocristallin (mSi)	Silicium polycristallin (p-Si)	Silicium amorphe (a-Si)

I.7. Les différents branchements des panneaux PV

La « chaîne de panneaux solaires » est le concept le plus fondamental et le plus important dans le câblage des panneaux solaires. Il s'agit simplement de plusieurs modules photovoltaïques câblés en série ou en parallèle.

I.7.1. Le branchement en série

Les panneaux solaires disposent de bornes positives et négatives. Le câblage de panneaux solaires en série signifie le câblage de la borne positive d'un module à la borne négative des éléments suivants, et ainsi de suite pour l'ensemble de la chaîne. Ce type de câblage augmente la tension de sortie, qui peut être mesurée aux bornes disponibles.

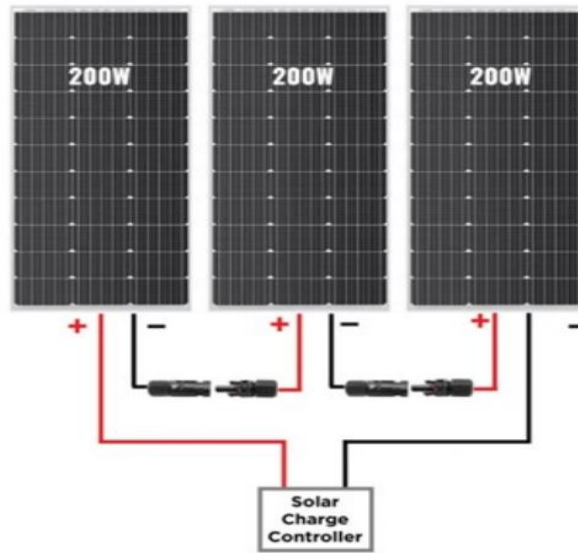


Figure I.5: Le branchement en série

I.7.2. Le branchement en parallèle

Le câblage des panneaux solaires en parallèle augmente le courant de sortie, tout en maintenant la tension constante. Le courant de sortie est la somme de tous les courants générés par les modules dans la chaîne. Les panneaux solaires câblés en parallèle doivent également respecter les réglementations NEC. Cela inclut la taille des conducteurs et les dispositifs de surintensité. Ceci est calculé en surdimensionnant le courant de court-circuit (I_{sc}) de 125 %, compte tenu du nombre de modules dans le système, comme spécifié à l'article 690.8 du NEC. [9]

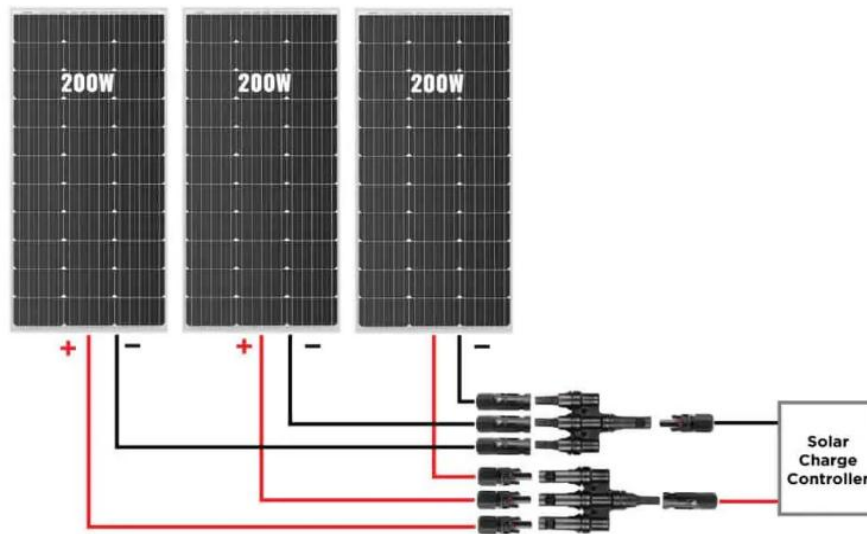


Figure I.6: Le branchement en parallèle

I.7.3. Le branchement en série-parallèle

Il existe un câblage de panneau solaire combinant des connexions en série et parallèles, connu sous le nom de série-parallèle. Cette connexion connecte les panneaux solaires en série en connectant des bornes positives à négatives pour augmenter la tension et relie ces chaînes en parallèle. Toutes les chaînes de panneaux solaires connectées en parallèle doivent présenter la même tension, et elles doivent également être conformes aux normes NEC 690.7, NEC 690.8(A)(1) et NEC 690.8(A)(2). Les modules doivent être du même modèle dans tous les cas afin de fournir des performances optimales sur le système.

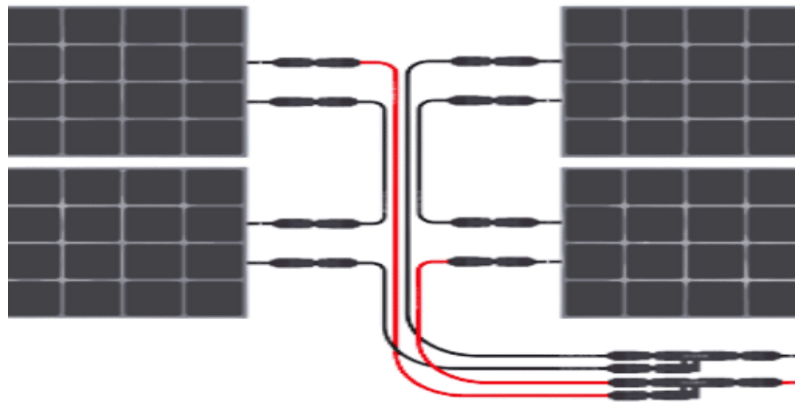


Figure I.7: Le branchement en série-parallèle

I.8. Classification des systèmes PV

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de systèmes PV : comme les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes raccordés au réseau.

I.8.1. Les systèmes autonomes

Une installation PV autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Cette installation est utilisée pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés, comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau. [10].

Ces systèmes se subdivisent en deux catégories principales :

- **Systèmes au fil du soleil** : L'énergie est consommée directement sans stockage intermédiaire.
- **Systèmes avec stockage** : L'électricité excédentaire est stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

Le schéma général d'un système PV autonome est représenté sur la figure (I.8).

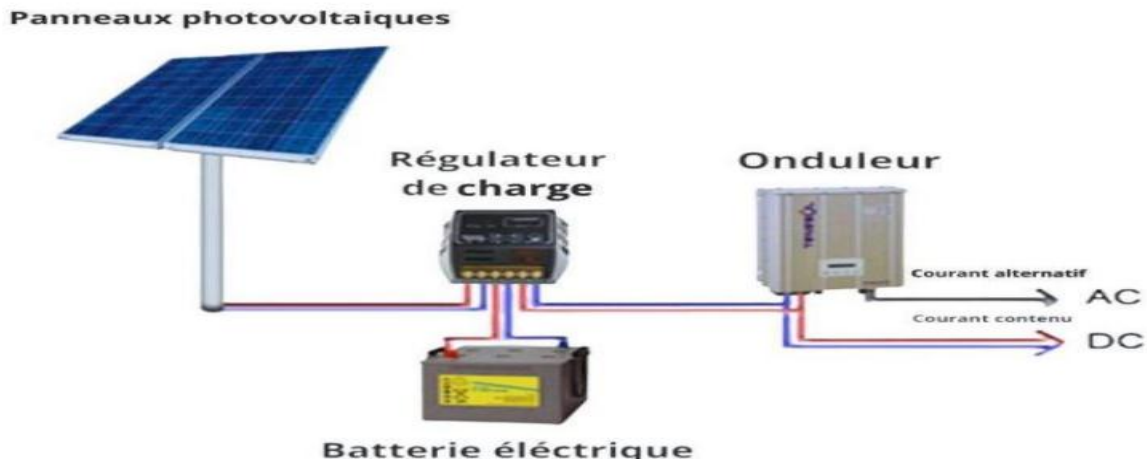


Figure I.8: Système PV autonome

I.8.2. Les systèmes PV hybrides

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité. Ces systèmes s'appliquent particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système PV seul avec les batteries [11].

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [12]. Un système hybride est représenté par la figure (I.9).

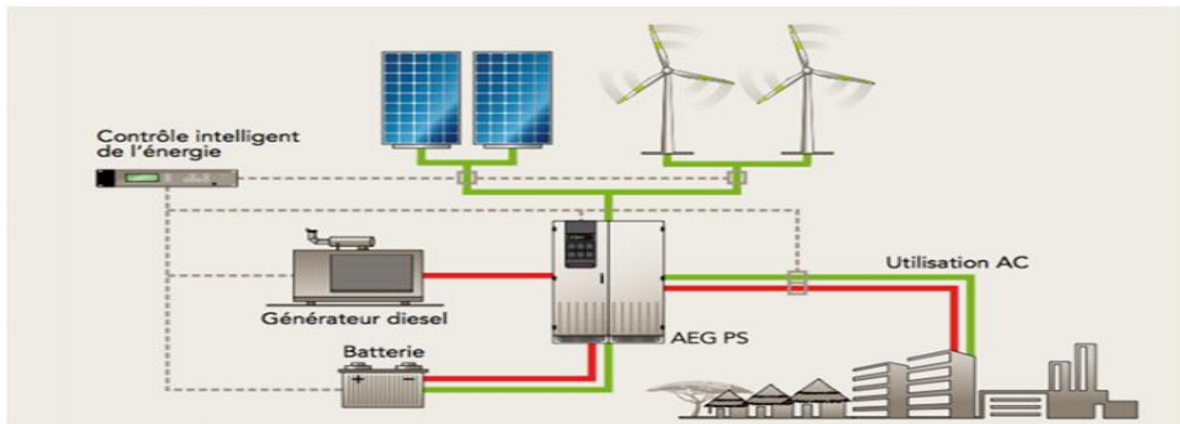


Figure I.9: Systèmes PV hybrides

I.8.3. Les systèmes raccordés aux réseaux

Dans ces systèmes PV, le générateur PV est couplé directement au réseau électrique. Le système PV raccordé au réseau est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau. La structure d'un système PV connecté au réseau est montrée par la figure (I.10) [13]

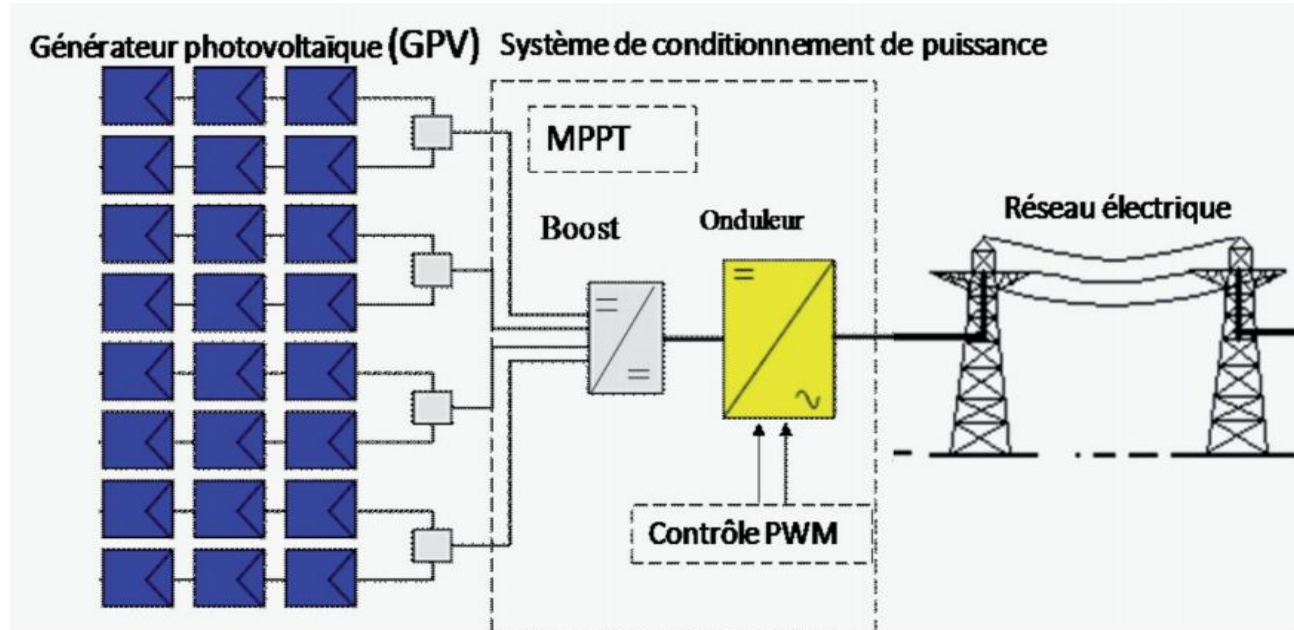


Figure I.10: Les systèmes raccordés aux réseaux

I.9. Autorisation de connexion au réseau

Pour obtenir l'autorisation de connecter une installation photovoltaïque au réseau électrique, le producteur doit démontrer que son installation respecte certaines exigences essentielles relatives à la sécurité et à la qualité de l'énergie [14] :

- **Sécurité**

Les systèmes photovoltaïques doivent gérer le risque de fonctionnement en îlot, où une partie du réseau reste alimentée alors qu'elle est isolée du reste du réseau, par exemple lors d'une maintenance ou en cas de défaillance détectée. Pour prévenir les risques pour la sécurité des personnes et des équipements, il est impératif que chaque onduleur puisse détecter ce scénario et se déconnecter rapidement du réseau.

• Qualité de l'énergie

Le principal problème rencontré avec les onduleurs connectés au réseau est l'émission de courants à des fréquences différentes de celle du réseau. Les normes pertinentes, telles que l'IEC 61727 et l'IEEE 1547-2003, limitent le taux d'harmoniques total (THD) à 5%. Un autre problème potentiel est l'injection de composantes de courant continu dans le réseau. De plus, le gestionnaire du réseau peut imposer des restrictions sur le facteur de puissance de l'énergie fournie. Un facteur de puissance autre que 1 implique un échange de puissance réactive en plus de la puissance active, ce qui est possible même lors de la fourniture de puissance active. Le facteur de puissance idéal est de 1, indiquant l'absence d'harmoniques indésirables et de puissance réactive.

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente plusieurs avantages :

- Elle est propre, respectueuse de l'environnement, n'émet pas de gaz à effet de serre et ne génère aucun déchet polluant.
- Elle repose sur des composants fiables, dotés d'une longue durée de vie et nécessitant peu d'entretien.
- Les coûts d'exploitation sont faibles, grâce à une maintenance réduite et à l'utilisation d'un personnel peu nombreux et ne requérant pas de qualifications techniques élevées.

Cependant, cette source d'énergie comporte également certains inconvénients :

- La fabrication des panneaux solaires repose sur des technologies avancées, nécessitant des investissements importants en équipements ainsi qu'en recherche et développement.
- Il s'agit d'une énergie intermittente, dont la production dépend fortement de l'ensoleillement, ce qui la rend variable et difficile à prévoir.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les concepts fondamentaux des systèmes photovoltaïques (PV). Nous avons commencé par expliquer la nature et l'importance de l'énergie solaire, puis le principe de fonctionnement de la conversion photovoltaïque. Une classification détaillée des cellules PV a été présentée, mettant en évidence leurs structures et caractéristiques électriques. De plus, nous avons exploré les principaux types de systèmes PV et leurs configurations, y compris les connexions en série, parallèles et hybrides. Les avantages et les limites de chaque configuration ont également été discutés afin de fournir une compréhension complète de leurs applications pratiques. Cette connaissance fondamentale prépare le prochain chapitre, qui porte sur l'extraction de la puissance maximale des systèmes PV grâce aux techniques MPPT.

***Chapitre II : Poursuite Du
Point De Puissance Maximal
(MPPT)***

II.1. Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP.

Cette simulation digitale sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et identifier en détail les pertes à travers le système.

a pour but l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté à un hacheur survolteur « boost » avec une commande MPPT numérique « perturbation et observation ».

II.2. Modélisation d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode.

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure suivant [15] :

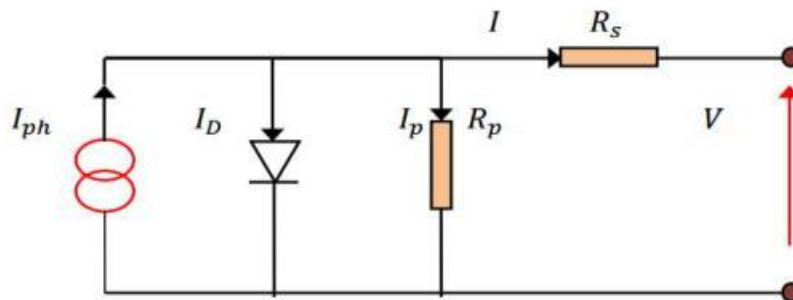


Figure II.1: Schéma équivalent de cellule PV

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant I_{ph} caractérisant le photo-courant, une résistance série R_s représentant les pertes par effet joule, et une résistance shunte R_{ph} caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure le contact arrière qu'est généralement très supérieure à R_s [16].

Selon la loi des nœuds, l'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

Où I_{ph} est le photo-courant qui est constant pour un ensoleillement donné et la diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique Courant-Tension est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_{pv}}{nV_t}} - 1 \right) \quad (II.2)$$

Où I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_0 est le courant de saturation, $V_t = \frac{KT}{q}$ est le potentielle thermique, K est la constante de Boltzmann $K = 1.38.10^{-23} J/K$, q est la charge électrique élémentaire d'électron $q = 1.6.10^{-19} C$, n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 2$) et T est la température effective des cellules en Kelvin (K). Alors, nous pouvons décrire le modèle mathématique de la cellule PV par [17]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{v_{pv}}{nV_t}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

Le modèle mathématique pour la caractéristique Courant-Tension d'une cellule PV est donné par:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_s)}{nV_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_s)}{R_{ph}} \quad (II.4)$$

Une cellule PV seule ne peut pas fournir suffisamment de puissance afin d'alimenter une charge ou le réseau électrique. Il convient donc d'associer ces cellules entre elles dans le but de fournir plus de puissance. Donc, Le modèle développé pour une cellule PV, peut être entendu au cas du raccordement des cellules en série et en parallèle afin d'obtenir le modèle d'un module PV. Une association en série augmentera la tension de sortie du panneau solaire tandis qu'une association en parallèles augmentera le courant fournit à la charge.

II.3. Paramètres électriques du module photovoltaïque

Les différents paramètres caractérisant un module photovoltaïque sont la tension de circuit ouvert, courant de court-circuit, puissance maximale, facteur de forme et rendement. Ils sont extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différents modules éclairés dans des conditions identiques

II.3.1. Tension de circuit ouvert

Si on place un module sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension maximale continue, dite tension à circuit ouvert V_{CO}

$$V_{CO} = N_S 0.6 \text{ V} \quad (\text{II.5})$$

Où 0.6V est la tension pour une cellule PV élémentaire et N_S est le nombre de cellules. On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du module PV [18]

II.3.2. Courant de court-circuit

Lorsqu'on place le module PV en court-circuit, il débite son courant maximal à tension nulle. On dit courant de court-circuit I_{cc} . On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du module. Dans les modules PV au silicium, le courant est de l'ordre de 12mA/cm² [18].

II.3.3. Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par un module photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes du module). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) de la courbe Courant-Tension

$$P_{MAX} = I_{OPT} V_{OPT} \quad (\text{II.6})$$

II.3.4. Facteur de forme

On appelle facteur de forme le rapport entre la puissance maximale fournie par le module PV P_{MAX} (I_{OPT} , V_{OPT}), et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert V_{CO} (c'est à dire la puissance maximale d'un module idéal).

$$ff = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.7})$$

Le facteur de forme indique la qualité du module; plus il s'approche de l'unité plus le module est performant, Il est de l'ordre de 0.7 pour les modules performants ; et diminue avec la température [19].

II.3.5. Rendement

Le rendement énergétique d'un module PV est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par le module P_{MAX} (I_{OPT} , V_{OPT}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{inc}} \quad (\text{II.8})$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale du module Pv. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.4. Simulation du module PV KC200GT

Pour réaliser la modélisation d'un module photovoltaïque, nous avons utilisé le langage MATLAB comme outil de test et de simulation. Nous faisons une simulation des différents effets sur les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension telle que, l'influence de l'éclairement et de la température ainsi le regroupement des modules PV en série et en parallèle.

Pour cela, nous avons choisi le module photovoltaïque KC200GT de chez KS Solaire constitué de 54 cellules photovoltaïques élémentaires en silicium monocristallin en séries. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) et une puissance maximale de 200.143 W, un courant optimal de 7.61A sous une tension optimale de 26.3V. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tableau II.1: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque KC200GT

Caractéristiques	Valeurs
Nombre de cellule en série par panneau (Ns)	54
Puissance maximale (P_max)	200.143 W
Courant de court-circuit (I_cc)	8.21 A
Tension de circuit ouvert (v_co)	32.9 V
Courant au point de MPP (I_opt)	7.61 A
Tension au point de MPP (v_opt)	26.3 V
Coefficient de température de (v_co)	26.3 (% /deg.C)
Coefficient de température de (I_cc)	-0.35502 (% /deg.C)

Le schéma de simulation du générateur PV composé d'un module PV de type «KC200GT» en l'environnement MATLAB-Simulink est représenté par la figure suivante :

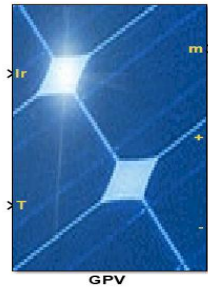


Figure II.2: Schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.

Avec deux variables d'entrée :

E : ensoleillement dans le plan de la cellule (W/m^2)

T : température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$)

Et deux variables de sortie :

I : intensité du courant fourni par la cellule

V : tension aux bornes de la cellule

d'un module PV est caractérisé par ses courbes électriques, illustrant la relation entre le courant et la tension (I-V) ainsi que la puissance et la tension (P-V). Ces courbes permettent d'analyser l'évolution du courant et de la puissance produite en fonction de la tension appliquée aux bornes du module solaire, allant d'une condition de court-circuit à un circuit ouvert, comme représenté sur la figure (II.3). Les principaux paramètres électriques déduits de ces courbes incluent le courant de court-circuit, la tension de claquage, la puissance maximale et le facteur de forme.

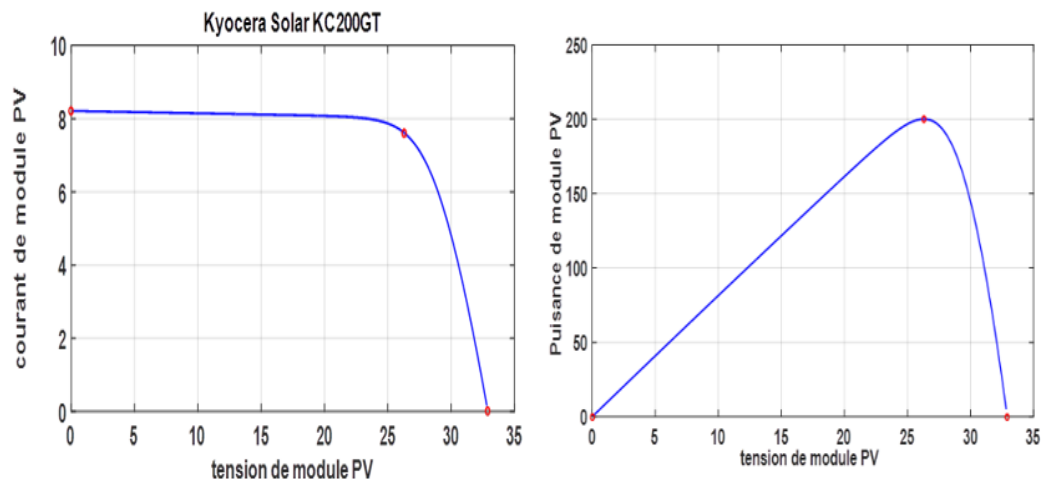


Figure II.3: Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire photovoltaïque

Cette caractéristique peut être divisée en trois intervalles différents :

- **Intervalle I** : le module solaire est considéré comme une source de courant Par conséquent, le courant est constant et la tension est variable.
- **Intervalle II** : le coude correspondant à la caractéristique, la zone médiane entre les deux zones suivantes, représentant la zone d'opération préférée. Le générateur peut déterminer le meilleur point (caractérisé par une puissance maximale).
- **Intervalle III** : l'intervalle de temps où la cellule solaire est considérée comme la source Tension, car la tension est constante et le courant est variable.

Pour étudier l'effet d'influence de l'éclairement et de la température sur le module photovoltaïque, nous

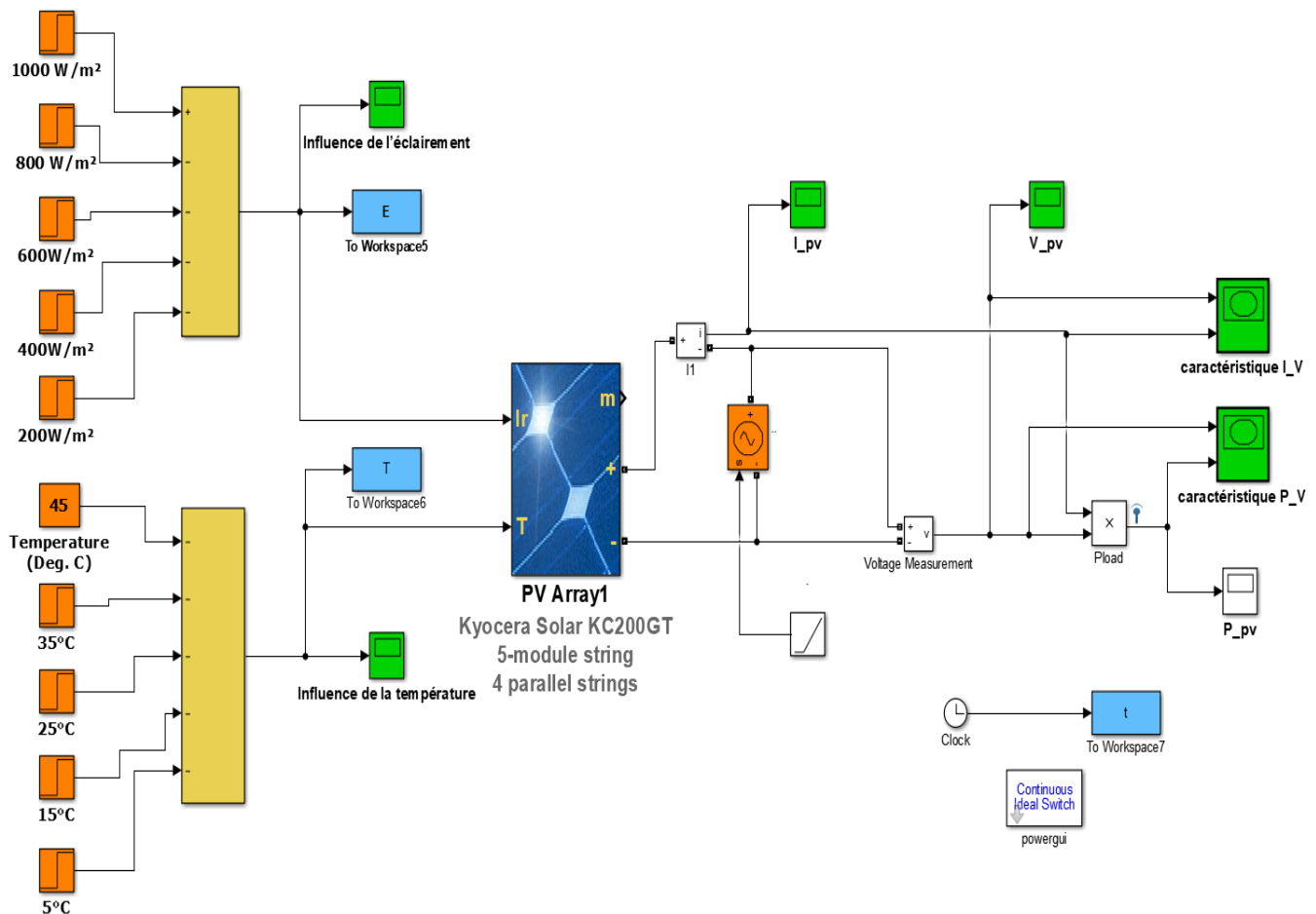
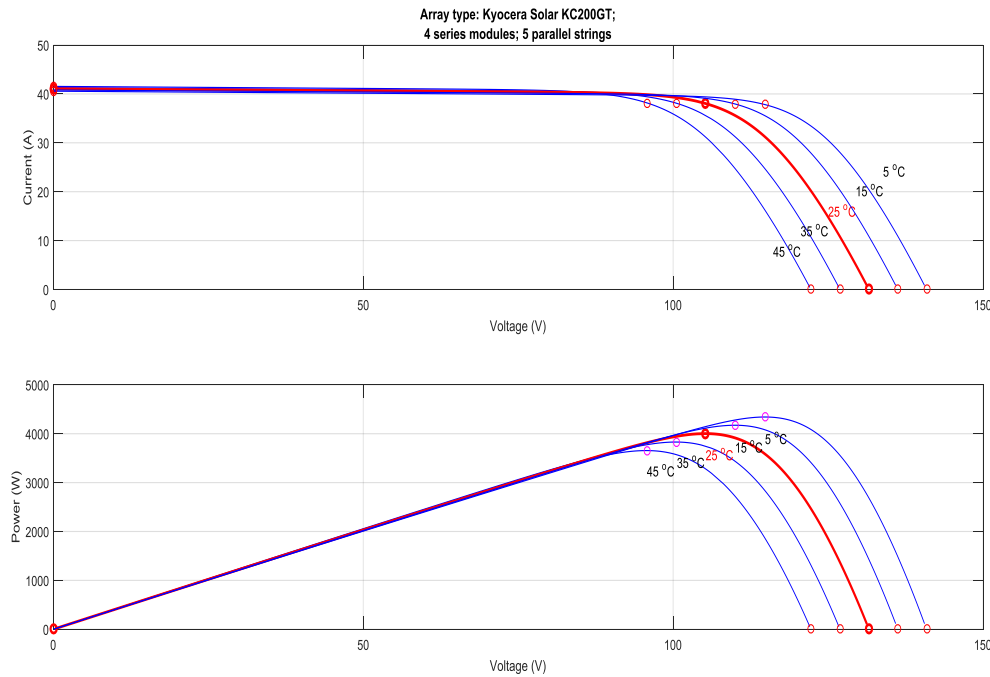


Figure II.4: Schéma de simulation du module PV de type « KC200GT »

II.4.1. Influence de la température

Le figure (II.5) montrent les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque KC200GT pour différentes valeurs de température, à un éclairement constant 1000 (W/m²).



un éclairement constant 1000 (W/m²).

Figure II.5: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents température et un éclairement $E=1000$ (W/m²).

Sur le figure II.5 On observe que la tension de circuit ouvert diminue considérablement lorsque la température augmente.

Par contre, le courant court-circuit augmente légèrement. On peut remarquer du que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale.

II.4.2. Influence de l'éclairement

Le figure (II.6) montrent les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque KC200GT pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante 25°C.

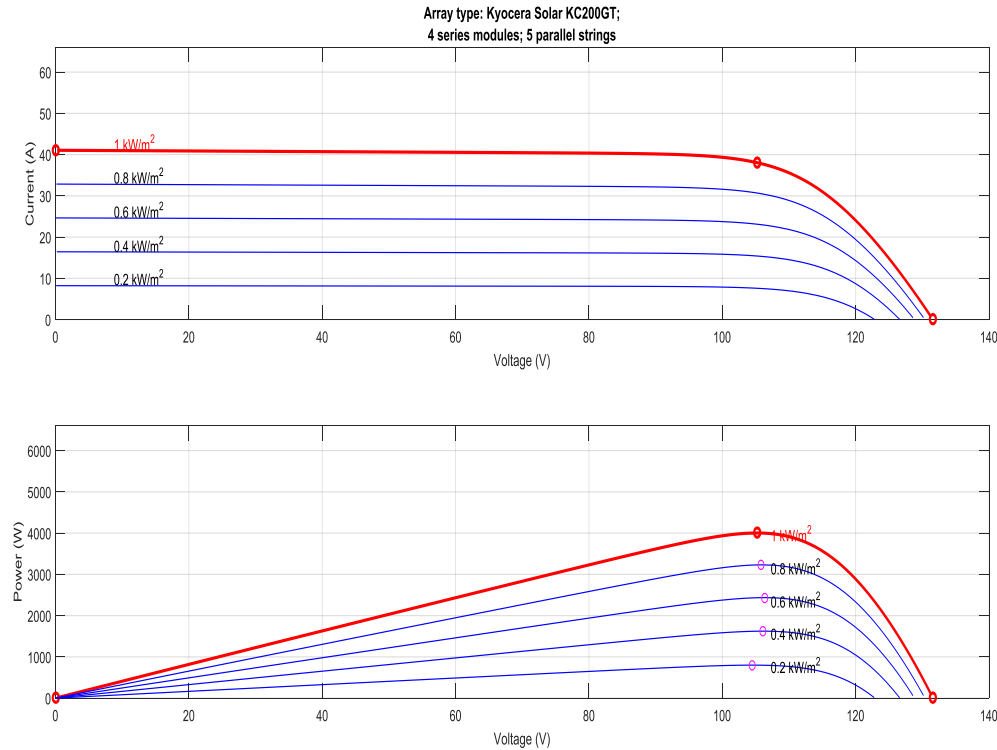


Figure II.6: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

Sur le figure II.6 on remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ et une température de 25°C

II.5. Modélisation des convertisseurs

II.5.1. Définition

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électroniques de puissance basés sur la technologie des semi-conducteurs, conçus pour convertir l'énergie électrique en une forme appropriée pour alimenter divers types de charges. Ces convertisseurs jouent un rôle crucial dans la régulation de la tension et/ou de la fréquence pour assurer la compatibilité entre l'énergie générée et le système électrique, en utilisant des composants spécialisés de gestion d'énergie et des dispositifs de commutation.

II.5.2. Les différents types de convertisseurs

Les convertisseurs statiques permettent de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases). Cette transformation s'effectue par des systèmes complexes, réalisés à partir des composants électroniques utilisés comme interrupteurs [19].

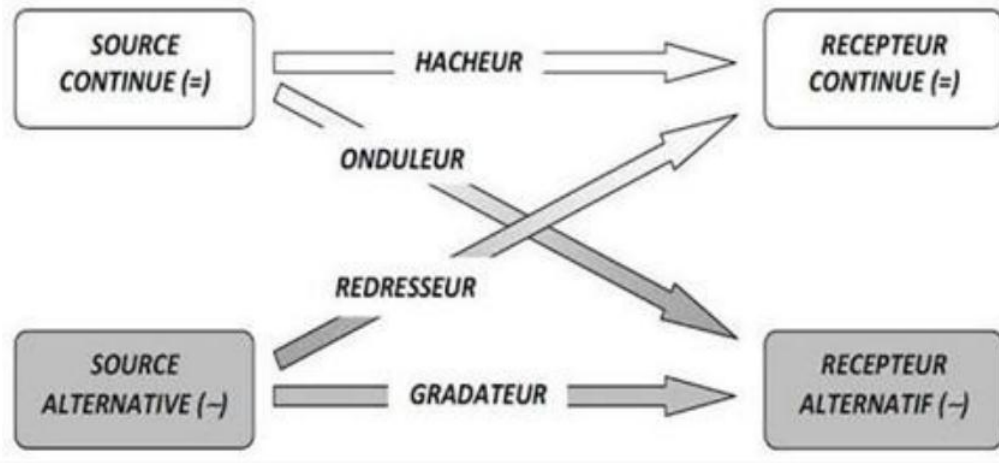


Figure II.7: Différents types de convertisseurs statiques

- **Redresseurs** : Le convertisseur alternatif-continu est un convertisseur destiné à alimenter une charge de type continu. Celui-ci est à base de diodes et thyristors. Par exemple il est utilisé pour l'alimentation du moteur à courant continu, chargeur de batterie d'accumulateur, variateur de vitesse d'un moteur à courant continu, etc.
- **Hacheurs** : le convertisseur continu-continu permet de modifier la valeur de la tension d'une source tension continue avec un rendement élevé. Il existe des hacheurs survolteur, des hacheurs dévolteur, des hacheurs survolteur- survolteur et des hacheurs séries. Celui-ci est utilisé dans la variation de vitesse des moteurs à courant continu.
- **Gradateurs** : le convertisseur alternatif-alternatif est un dispositif de l'électronique de puissance destiné à modifier un signal électrique dans le but de faire varier sa tension efficace de sortie et de modifier ainsi la puissance dans la charge tout en conservant la fréquence. Il est souvent utilisé dans l'éclairagisme, l'électrothermie, démarrage des moteurs asynchrones, etc.
- **Onduleurs** : le convertisseur continu-alternatif est un dispositif de l'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et courants alternatifs à partir d'une source

d'énergie continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. Il est souvent utilisé dans les entraînements à vitesse variable.

II.5.3. Convertisseurs DC-DC ou hacheurs

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés, dans le cadre d'un système photovoltaïque pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV (source continue) avec différentes charges pour effectuer le transfert de la puissance maximale.

La source et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). Leur rôle dans ce cas, consiste à maintenir le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

On distingue 3 types de convertisseurs non-isolés les plus répandus :

- Hacheur dévolteur (ou Buck),
- Hacheur survolteur (ou Boost),
- Hacheur dévolteur- survolteur (Buck-Boost).

Le convertisseur est choisi en fonction de la charge à alimenter.

II.5.3.1. L'hacheur survolteur (Boost)

L'hacheur survolteur est également connu sous le nom de convertisseur step-up. Il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute. Il se compose d'une source de tension d'entrée continue V_e , d'une inductance L , d'un interrupteur S , d'une diode, et deux condensateurs C_1 et C_2 . La figure II.6 montre le schéma électrique du convertisseur survolteur.

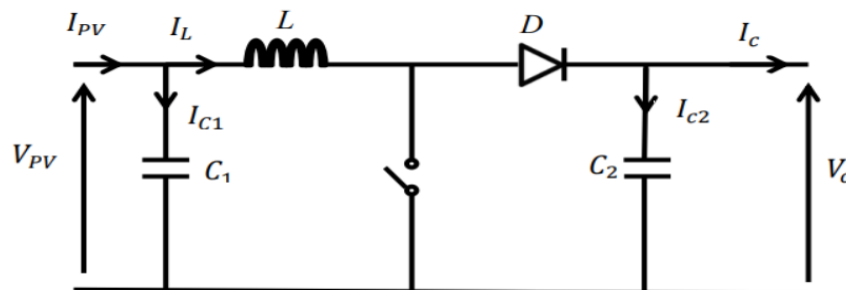


Figure II.8: Schéma électrique du convertisseur élévateur

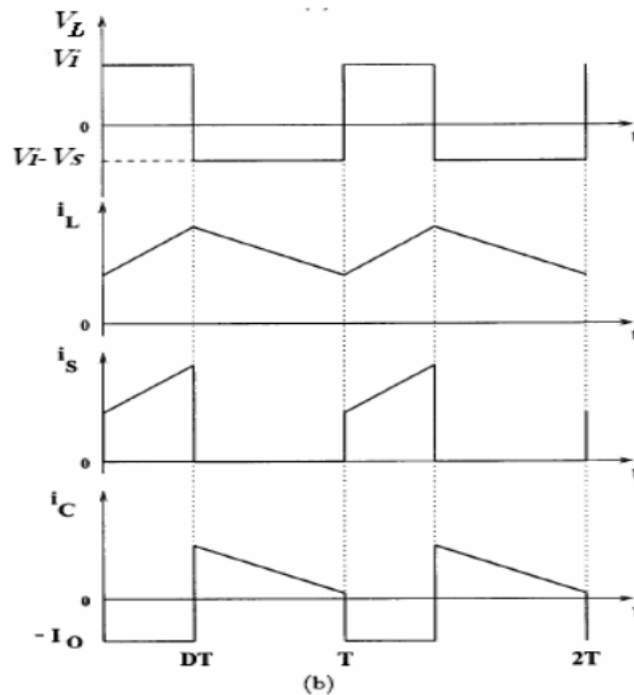
La tension et le courant de la charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont donnés par [20]:

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_i \quad \text{II.7)}$$

$$I_c = (1 - \alpha) I_l \quad \text{(II.8)}$$

Comme le présente la Figure II.8, lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off).

Et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la Figure II.9,



comme suit :

Figure II.9: Caractéristique de la tension et du courant du hacheur élévateur [6]

II.5.3.2. Simulation d'hacheur survolteur

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation et nous prenons ($E=100V$, $L= 1e-3 H$, $R=200$, $D= variable$).

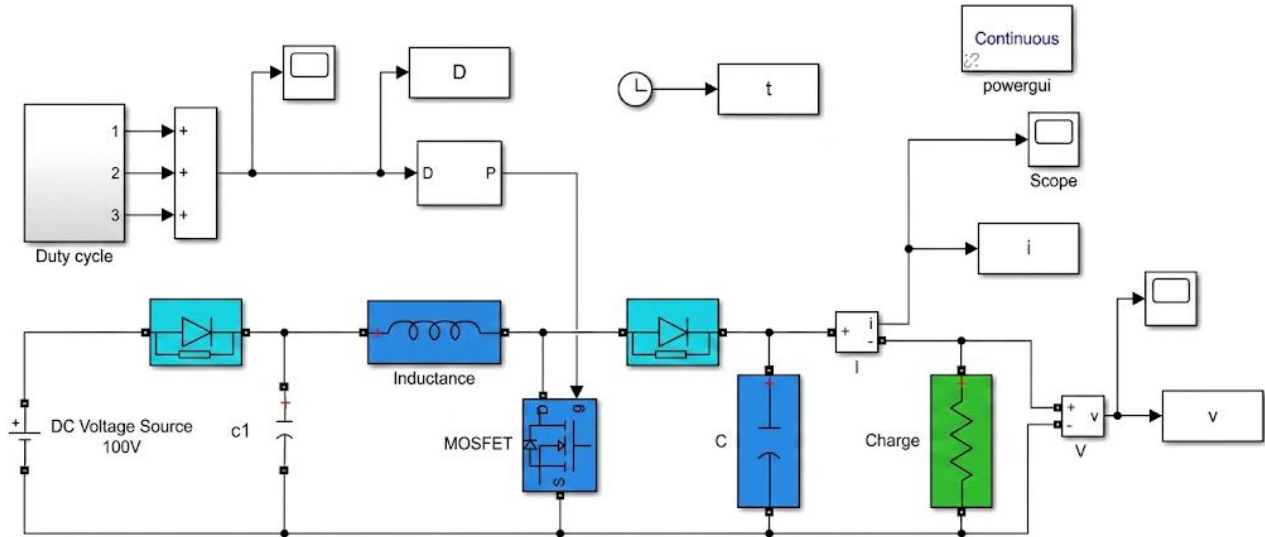


Figure II.10: Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC

Les Résultats de simulation d'un convertisseur DC-DC

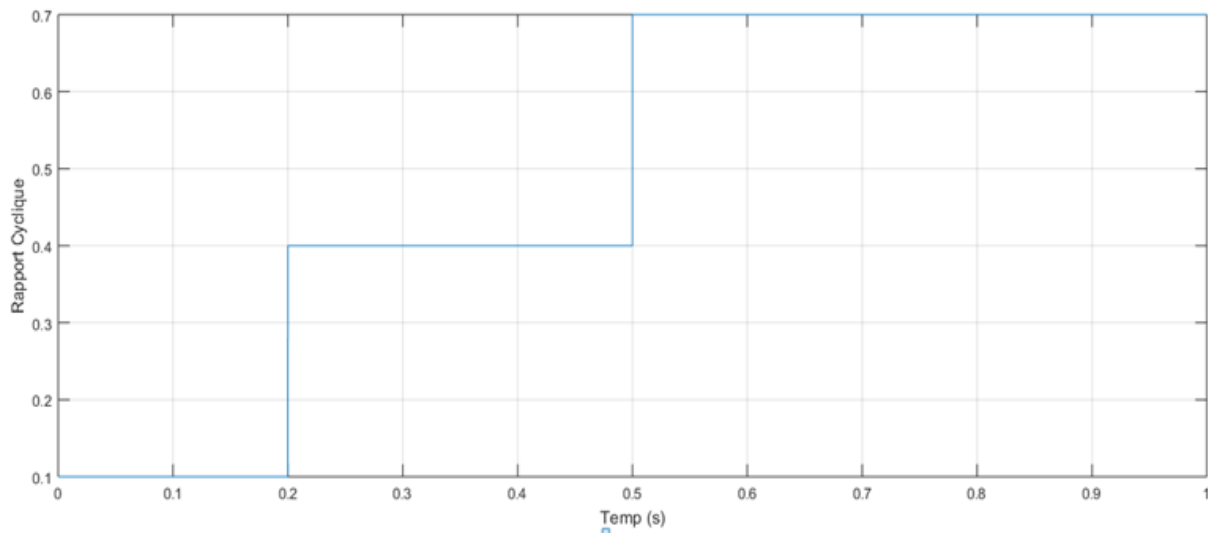


Figure II.11: Rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.

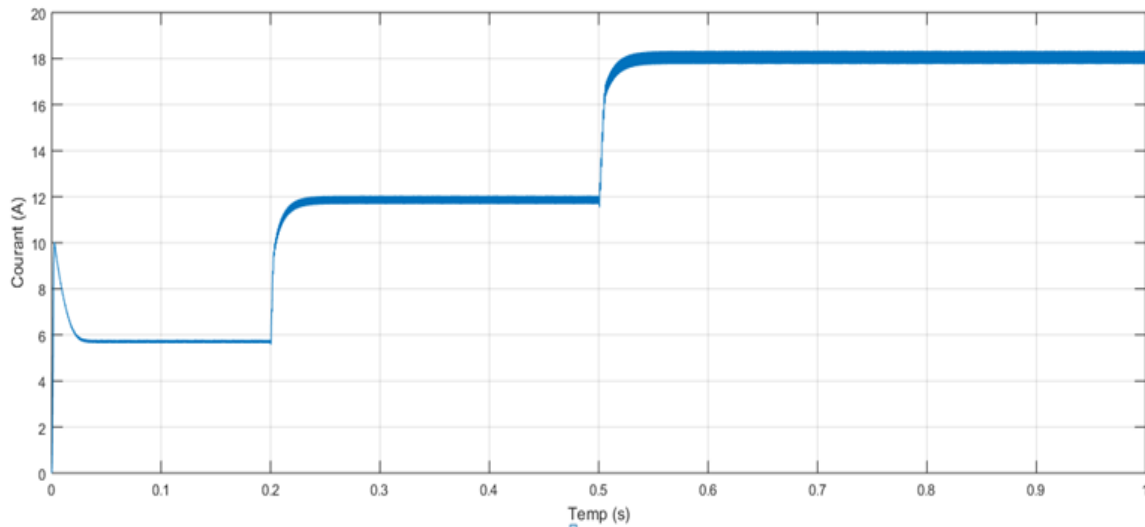


Figure II.12: Courant de sortie d'un convertisseur DC-DC.

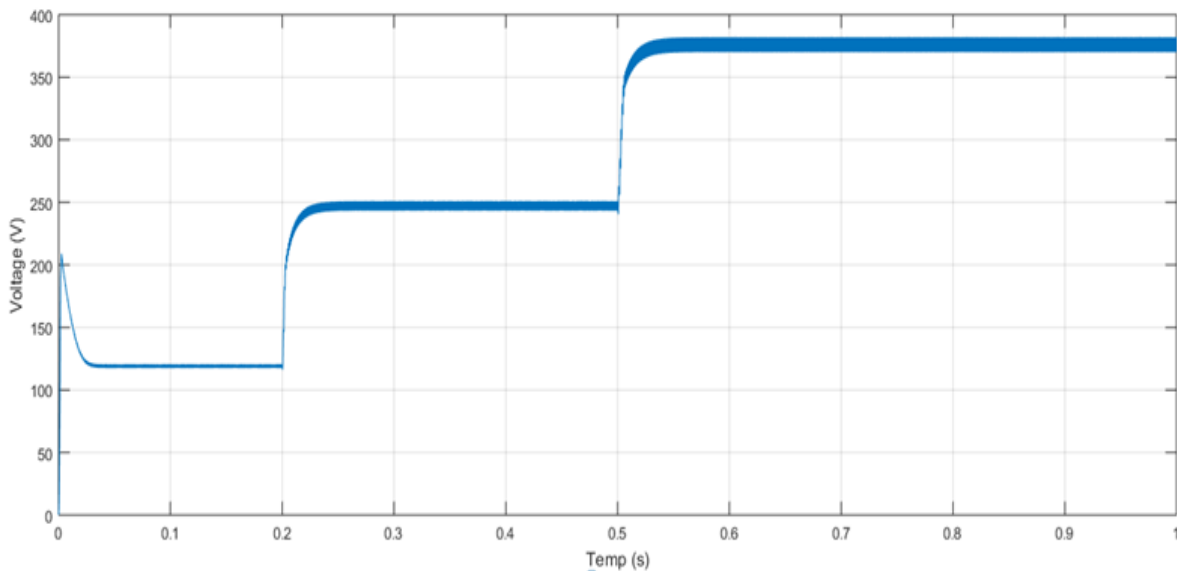
Figure II.13: Tension de sortie d'un convertisseur DC-DC.

Où l'on remarque une légère oscillation au décollage d'environ 0,01 seconde pour revenir à sa valeur et se fixer à une certaine valeur.

Il montre également la relation directe entre les changements du rapport cyclique, car son augmentation s'accompagne d'une augmentation du niveau de courant et de tension qui sort.

II.6. Poursuite du point de puissance maximale

L'amélioration du rendement du système PV nécessite la maximisation de la puissance du



générateur PV. Cela est possible si le point de fonctionnement est bien choisi en adaptant

l'impédance de la charge à la source de tension. Le convertisseur DC-DC jouera le rôle d'un adaptateur d'impédance assurant ainsi le fonctionnement au point optimal qui permet de produire la puissance maximale du générateur PV [21].

Donc, la maximisation de puissance d'une source photovoltaïque, revient à chercher ce point de fonctionnement optimal. Cette commande est nommée suiveur du point de puissance maximale. Ces méthodes MPPT sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles sont basées sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant et de tension du module et la multiplication de ces deux grandeurs. Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel. Il existe plusieurs types des commandes MPPT, parmi lesquels, on présente le principe des quelques méthodes MPPT, comme la méthode du courant constant, méthode à tension de référence fixe et méthode avec contre réaction du courant. Cette dernière méthode est utilisée dans notre travail à cause sa facilité d'implémentation.

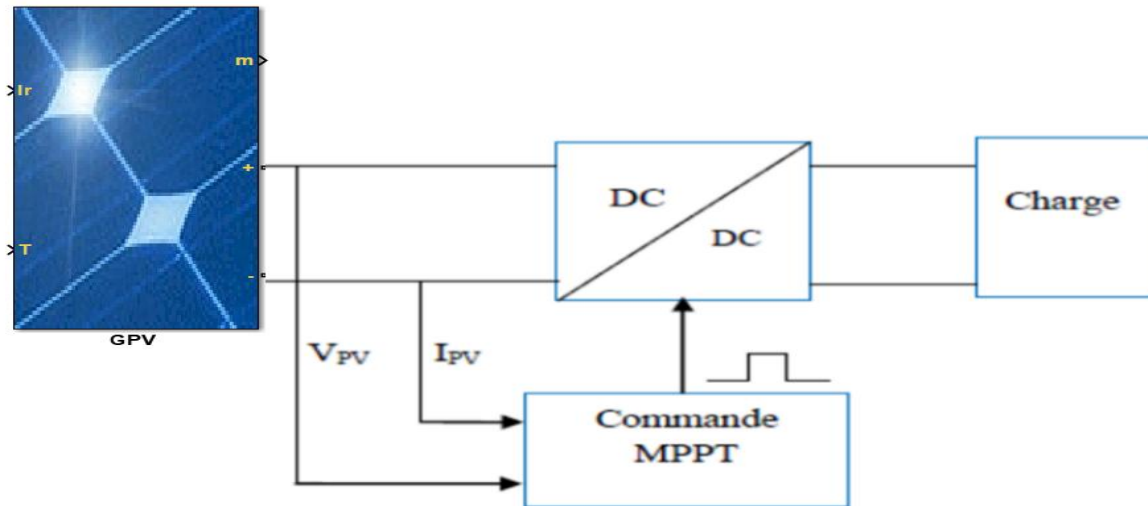
II.6.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC

La Figure II.14 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (PPM) selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, (P&O).

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrémales

présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du (PPM). Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme



parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie [22]

Figure II.14: Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC

II.6.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale

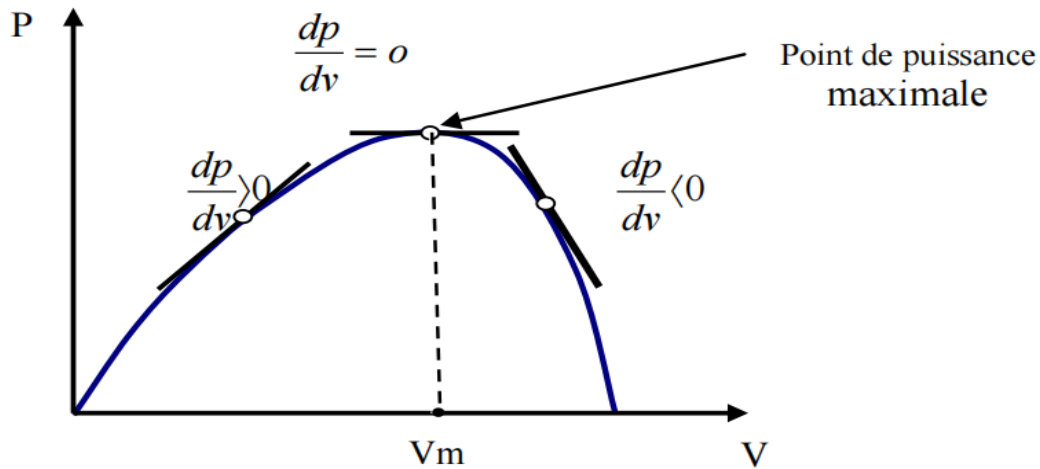
Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance.

Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont [23]:

- Méthodes de la dérivée de la puissance
- Méthodes à contre réaction de la tension

II.6.2.1. Méthode de la dérivée de la puissance :

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P_v = f(V_p)$ obtenue directement de la caractéristique du (GPV)). Le point de puissance maximale (PPM)



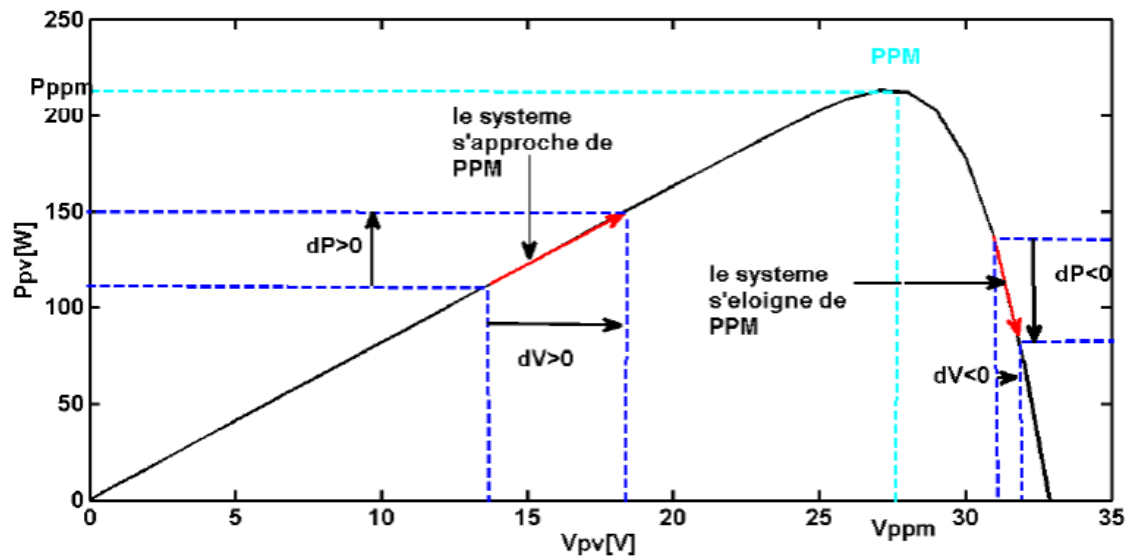
est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque ($\frac{dP_v}{dV_p} = 0$) Le point de puissance maximale (PPM) est donné par la Figure II.15 [23] :

Figure II.15: Caractéristique du point de puissance maximale MPP

II.6.2.1.1 Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O)

Si plus généralement, on désire suivre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation, (P & Q). C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence (V_{ref}), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du



cycle précédent [22].

Figure II.16: Caractéristique Puissance-Tension d'un module photovoltaïque

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) est donné par la Figure II.17. $D = \alpha$: Rapport cyclique.

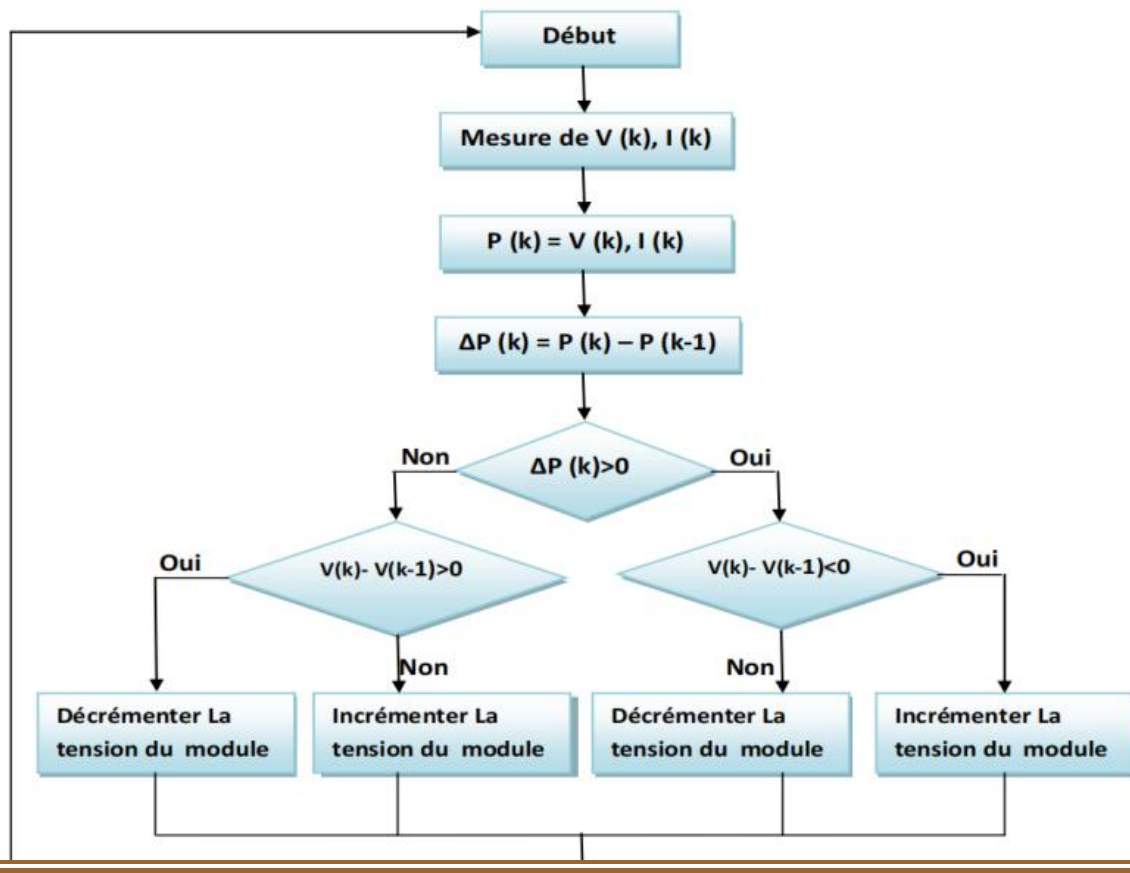


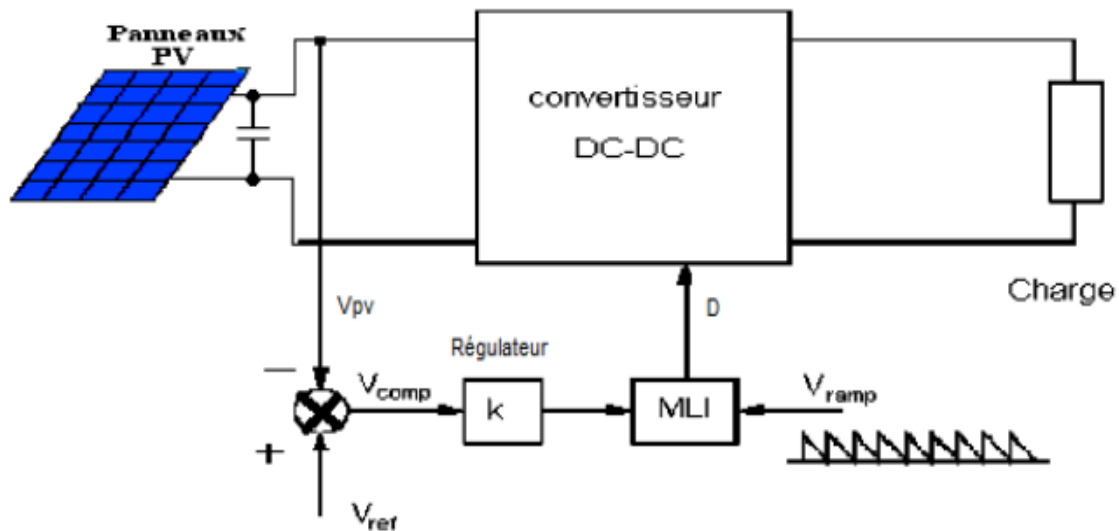
Figure II.17: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

Si une augmentation de l'ensoleillement, on aura donc une augmentation à la puissance du panneau. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance. Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « Oui » de condition $\Delta P(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O.[24]

II.6.2.2. Méthode à contre réaction de la tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence.

Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure II.18 [25]:

**Figure II.18:** Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation [25]

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes et parmi lesquels, on présente :

II.6.2.2.1 Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC). Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (Figure III.18), relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau

avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année [25].

II.6.2.3. Méthode avec contre réaction du courant

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de (I_{pv}) et (V_p) a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [25].

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment

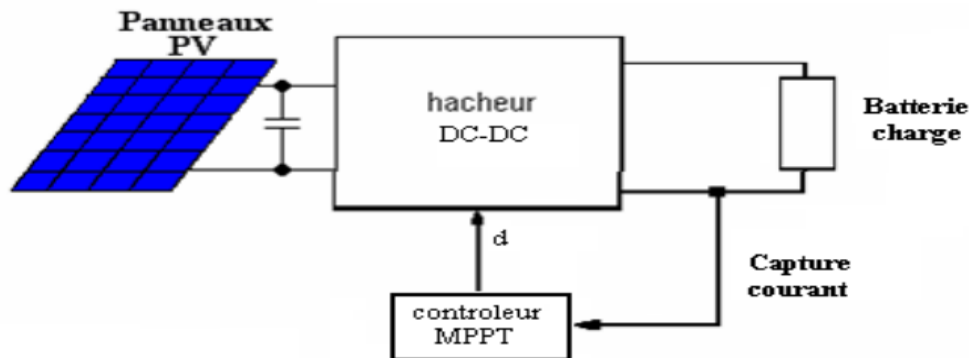
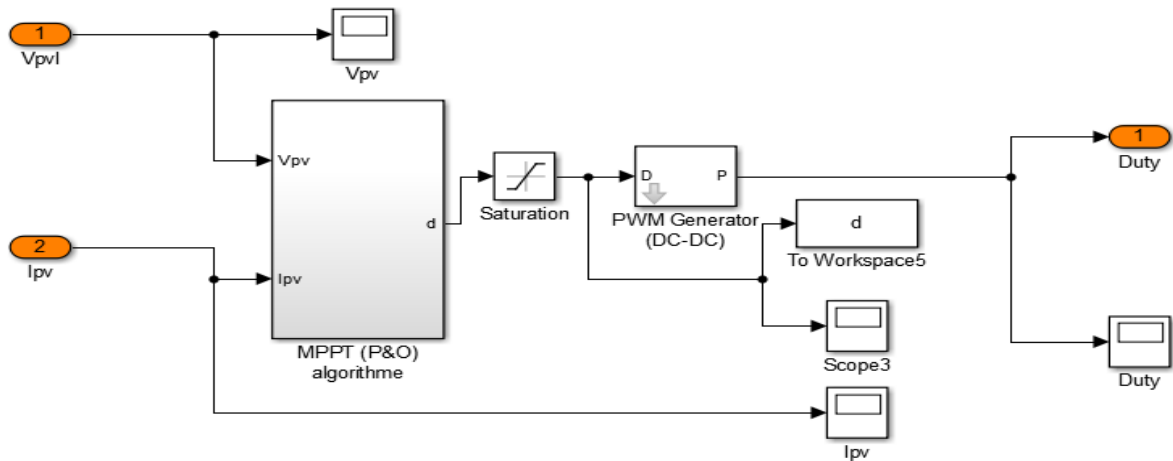
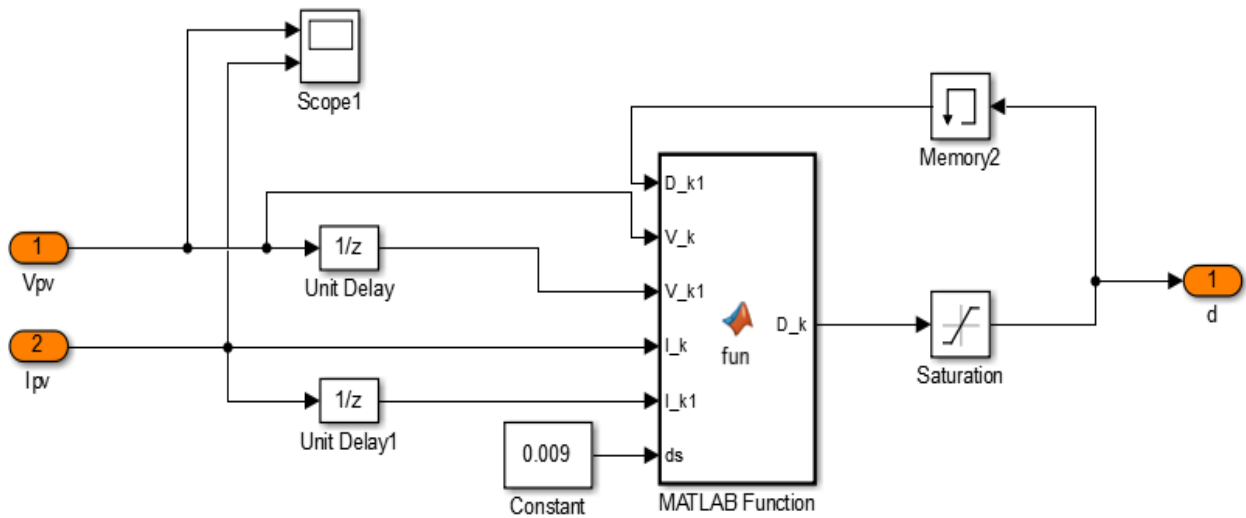


Figure II.19: Méthode avec de la contre réaction en courant**II.6.3. Simulation de la méthode MPPT**

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O avec PWM.



La figure (II.20) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

Figure II.20: Schéma de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT**Figure II.21:** Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P & O).

```

1  function D_k = fun (D_k1,V_k,V_k1,I_k,I_k1,ds)
2  -   P_k1=I_k1*V_k1;
3  -   P_k=I_k*V_k;
4  -   dP=P_k1-P_k;
5  -   dV=V_k-V_k1;
6  -   if dP>0
7  -       if dV>0
8  -       D_k=D_k1+ds;
9  -       else
10 -       D_k=D_k1-ds;
11 -       end
12 -   else
13 -       if dV>0
14 -       D_k=D_k1-ds;
15 -       else
16 -       D_k=D_k1+ds;
17 -       end
18 -   end

```

Figure II.22: Programme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P & O).

II.6.3.1. Bloc du système avec MPPT

La simulation du schéma général avec la méthode P&O s'illustre comme suit :

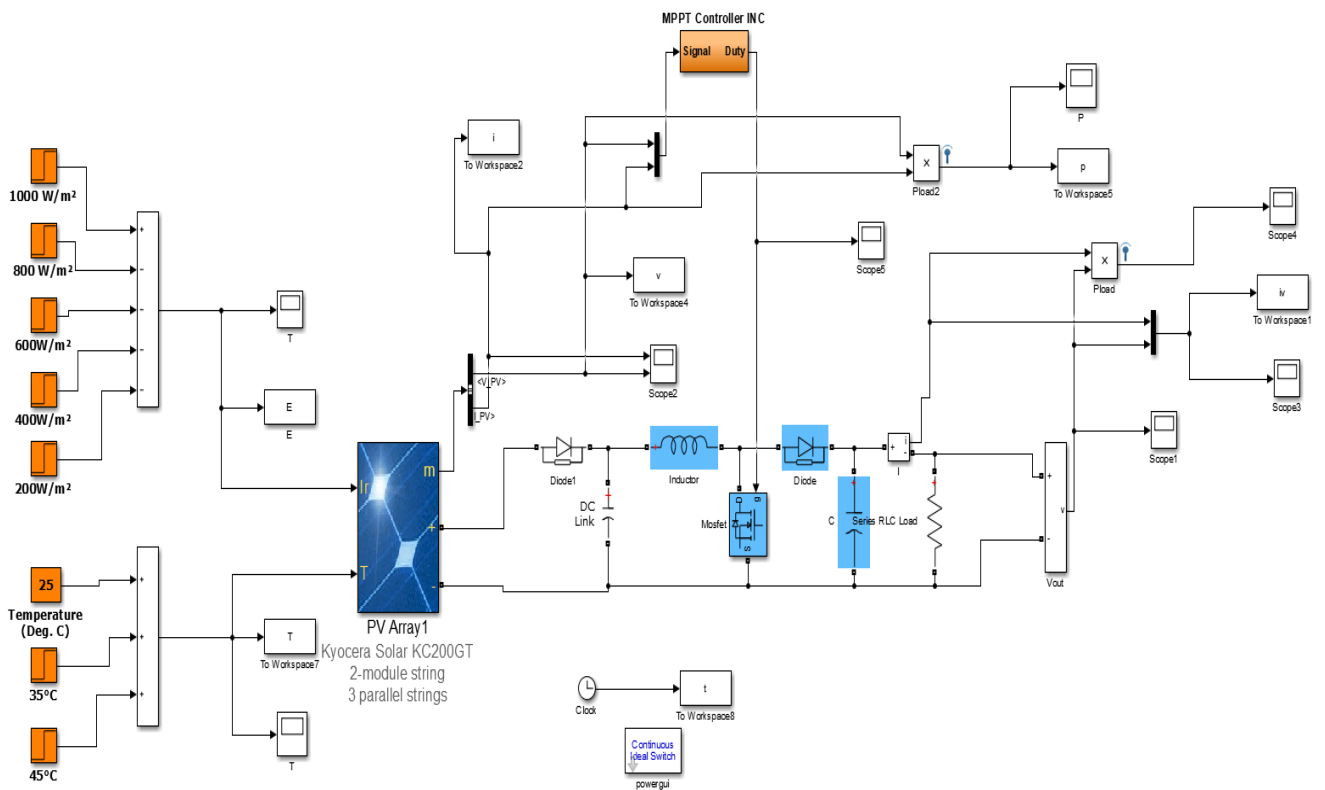


Figure II.23: Schéma SIMULINK pour la commande MPPT avec méthode P&O

II.6.3.2. Simulation Méthode de perturbe et observe (P&O)

Pour l'éclairement de (1000-800-600-400-200 W/m²) et la température variable (25-35-45°C) Et les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant :

Tableau II.2: Les paramètres du convertisseur.

Paramètre	Nom	Valeur
L_i	Inductance du convertisseur	4 mH
C_i	Capacité d'entrée	4700 uF
C_o	Capacité de sortie	470 UF
R	Resistance de charge	200Ω

II.6.3.3. Les Résultats de simulation :

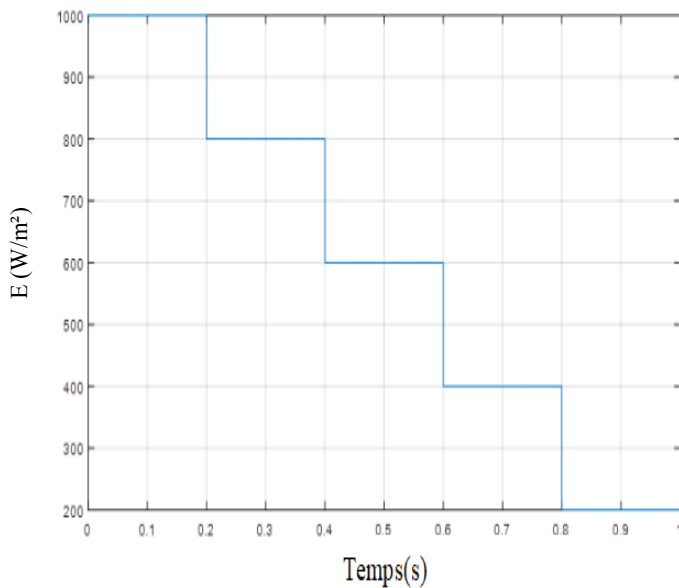


Figure II.24: Variation de l'éclairement.

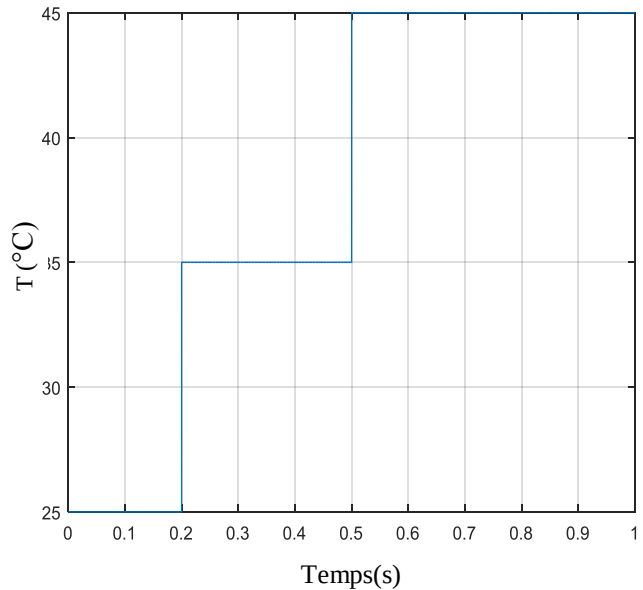


Figure II.25: Variation de la température

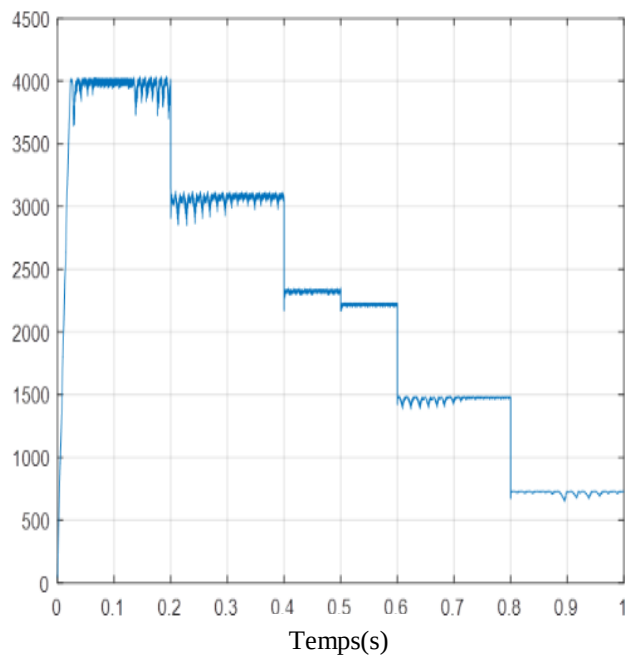


Figure II.26: Courbe de puissance.

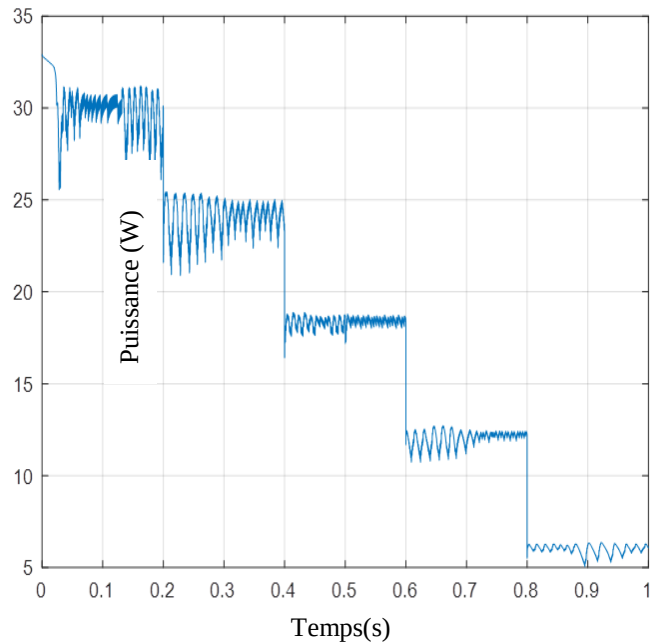


Figure II.27: Courbe du courant.

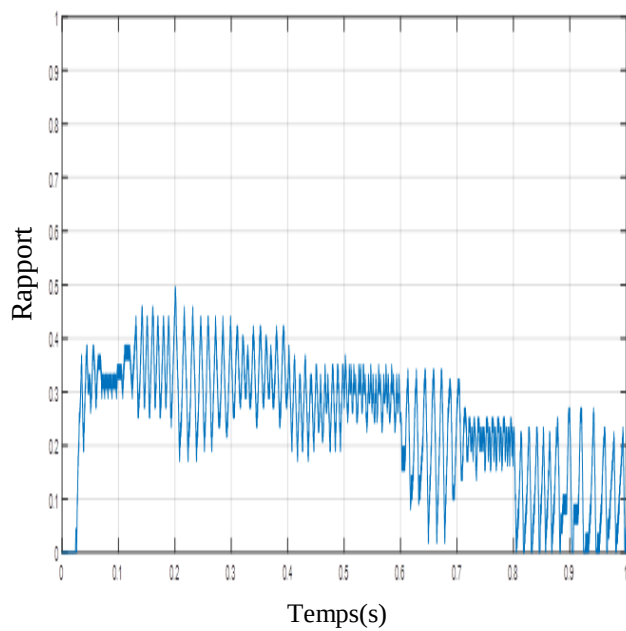


Figure II.28: Rapport cyclique (d).

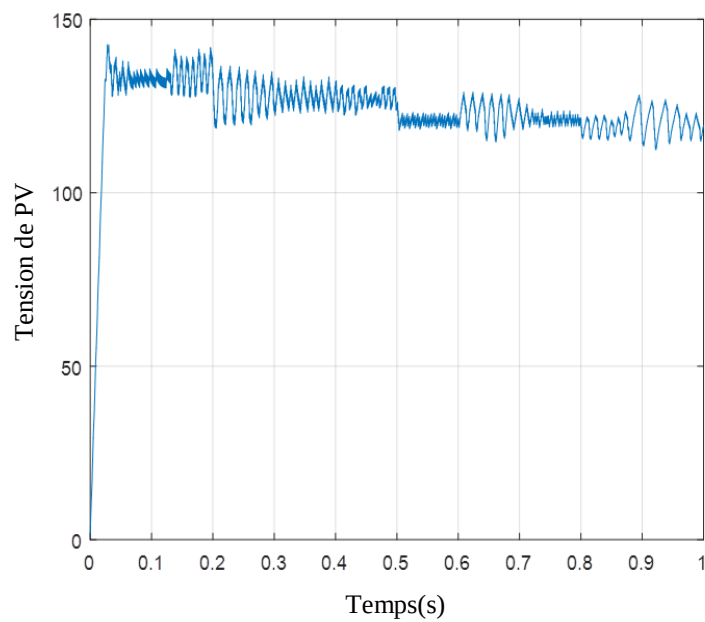


Figure II.29 : Courbe de tension de PV

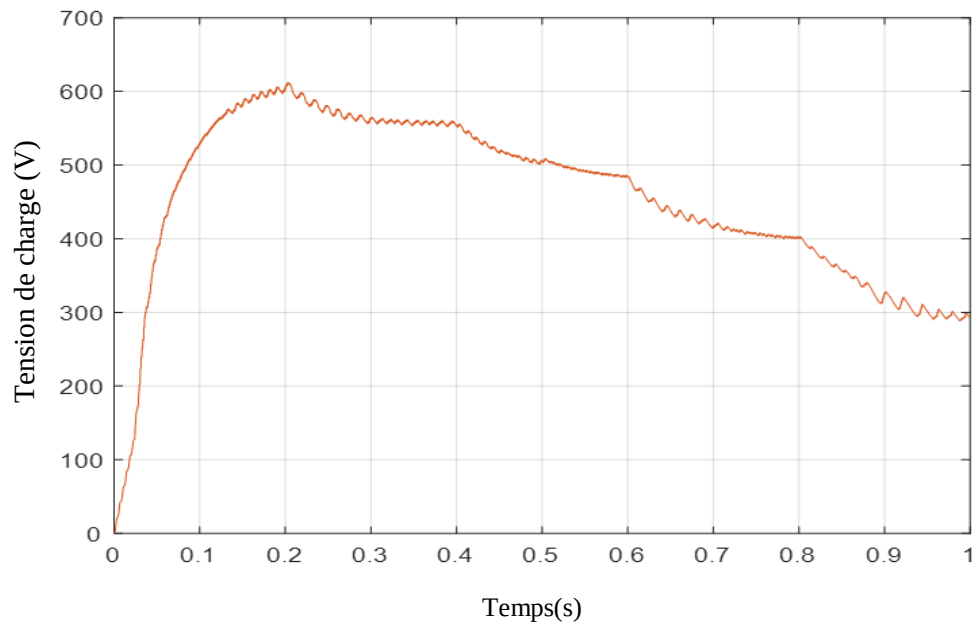


Figure II.30: Résultats de simulation des courbes de tension de charge.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur MPPT par la méthode P&O a des meilleures performances comme le montre la figure II.26, avec petit des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

II.7. Conclusion

Ce chapitre a analysé l'algorithme P&O MPPT intégré à un convertisseur DC-DC, en soulignant son rôle dans l'optimisation de l'extraction d'énergie photovoltaïque. La modélisation mathématique du système PV a été examinée en parallèle de l'algorithme MPPT, démontrant le comportement opérationnel du système dans des conditions variables.

Les courbes P-V et V-I obtenues grâce aux simulations MATLAB illustrent la dépendance des performances photovoltaïques aux variations de température et d'éclairement énergétique. Les résultats confirment que le système PV fonctionne systématiquement près du maximum d'efficacité, en maintenant la stabilité autour du point MPP malgré les fluctuations soudaines de l'irradiation solaire et de la température ambiante.

***Chapitre III : Commande
Prédictive D'un Système
Photovoltaïques Connecté Au
Réseau***

III.1. Introduction

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) au réseau exige des stratégies de commande très performantes. Traditionnellement, le contrôle repose sur des régulateurs classiques (PI), qui présentent des limites opérationnelles telles qu'un temps de réponse lent et l'apparition de distorsions harmoniques de basse fréquence pour pallier ces insuffisances, la Commande Prédictive à base de Modèle (MPC) s'impose comme une alternative optimale. Contrairement à l'approche classique, la MPC exploite un modèle mathématique pour anticiper le comportement futur du système et applique l'état de commutation optimal qui minimise une fonction de coût prédéfinie.

L'adoption de la commande prédictive (MPC) dans notre étude se justifie par sa grande simplicité, sa réponse dynamique rapide, et sa capacité à intégrer directement les contraintes et non-linéarités du système. Ce chapitre est donc consacré à la formulation mathématique du modèle prédictif et de sa fonction de coût, suivie d'une validation des performances de cette commande robuste appliquée à notre système PV via des simulations numériques.

III.2. Système connecté au réseau

Le système PV connecté au réseau proposé dans cette étude, illustré à la Figure (I I I.1), fonctionne en connectant le champ photovoltaïque (PV) en parallèle avec le réseau électrique public. Ces systèmes sont conçus pour injecter directement l'énergie électrique générée dans le réseau public, assurant ainsi une intégration efficace avec l'infrastructure électrique existante. Dans de telles configurations, l'énergie électrique CC produite par les modules photovoltaïques est convertie en courant alternatif (CA) par un onduleur CC-CA, qui joue un rôle crucial dans le fonctionnement du système. Cet onduleur non seulement maximise l'extraction de puissance du champ photovoltaïque, mais il garantit également la conformité aux normes de tension et de fréquence du réseau, permettant une injection stable d'énergie dans le réseau ou une alimentation directe des charges locales. Contrairement aux systèmes PV hors réseau, qui dépendent du stockage par batterie, les systèmes connectés au réseau exploitent l'onduleur comme composant central, éliminant ainsi efficacement le besoin de stockage d'énergie. L'onduleur est donc le cœur du contrôle et de la gestion de l'énergie du système, assurant une interaction fluide entre l'unité de génération PV et le réseau électrique tout en optimisant le flux d'énergie et en maintenant la stabilité opérationnelle.

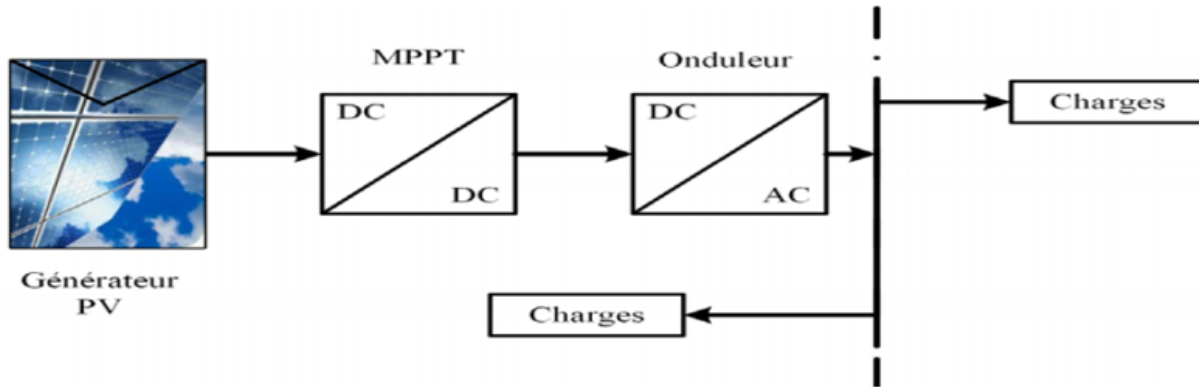


Figure III.1: Schéma d'un système connecté au réseau.

III.3. Structure générale d'un système photovoltaïque

Les installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique se classent principalement en deux catégories structurelles distinctes, chacune présentant des caractéristiques techniques spécifiques :

Les systèmes à connexion directe au réseau : cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

Le système à bus continu intermédiaire : Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [26].

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230V).

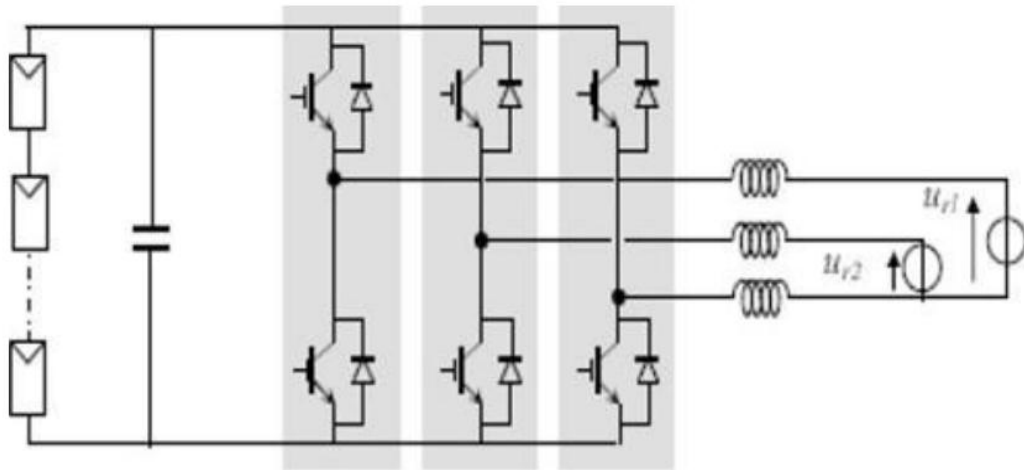
Dans la suite de cette partie, différents montages seront décrits, en précisant leurs avantages et inconvénients.

III.3.1. Systèmes PV connectés directement au réseau

- **Structure à convertisseur unique**

Le dispositif présenté par la Figure III.2 est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. On associe plusieurs modules photovoltaïques en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur

de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau. L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus, le contrôle du point de puissance maximum de la puissance est voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure



interne et d'ensoleillement [27]

Figure III.2: Modules PV en série vers un seul onduleur.

- **Structure avec bus à basse tension alternative**

La figure III.3 montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V – 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité des personnels. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par les modules (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement [28].

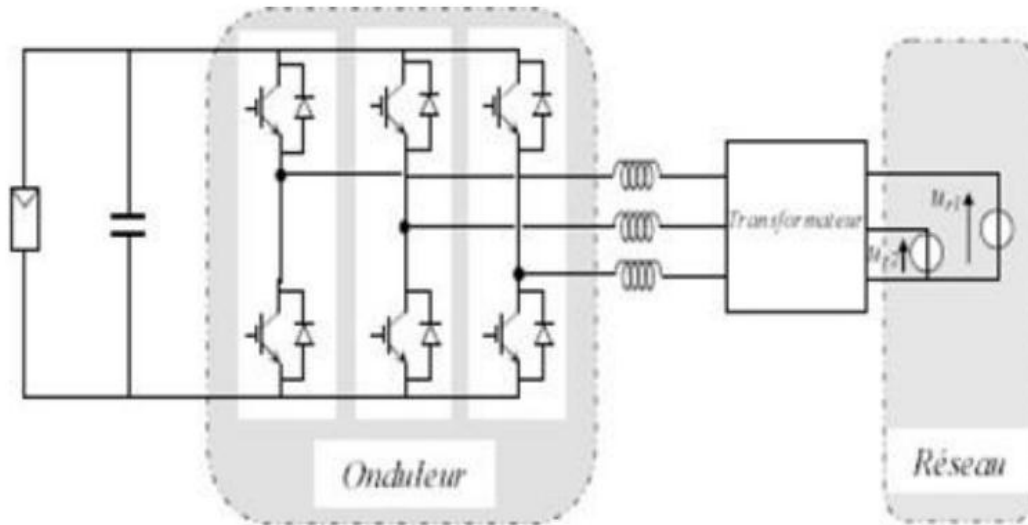


Figure III.3: Bus à basse tension alternative

III.3.2. Système à bus continu intermédiaire

Pour ce système on peut citer les structures suivantes :

- **Structure avec convertisseur forward** : présentant un convertisseur à l'avant qui est capable d'augmenter la tension en série du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension souvent désirée).
- **Structure avec convertisseur de type Fly-back** : une structure à base d'un convertisseur de type Fly-back qui élève la tension sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désirée. La caractéristique principale du Fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique. Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure une tension constante et le transfert de puissance vers le réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qui augmente le coût de l'installation.
- **Structure avec hacheur et onduleur** : elle comporte hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de (100 V) délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élérer la tension en sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation ".

L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible [28].

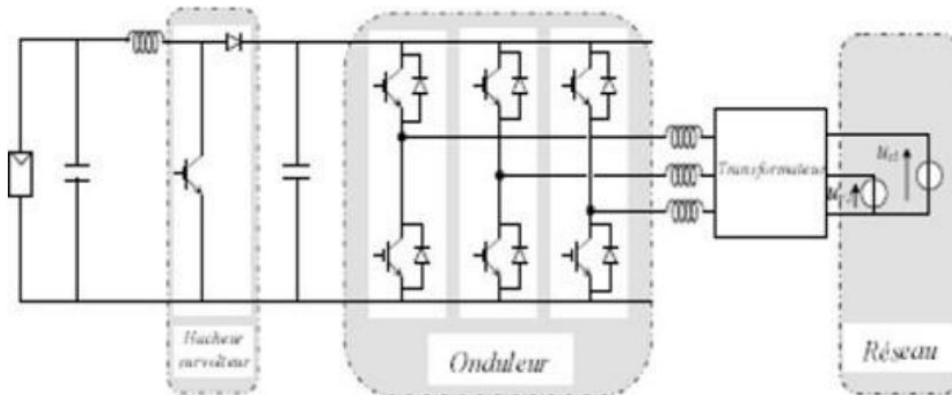


Figure III.4: Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [46].

III.4. Système photovoltaïque connecté au réseau proposé

Le système photovoltaïque (PV) résidentiel connecté au réseau proposé, illustré à la figure (III.5), intègre tous les composants essentiels nécessaires à une conversion efficace de l'énergie solaire et à une intégration transparente du réseau. Ces composants comprennent un générateur photovoltaïque, un convertisseur CC-CC d'amplification, un contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT), un onduleur de source de tension (VSI), un transformateur et la connexion au réseau électrique.

Le système PV fonctionne dans des conditions environnementales fluctuantes, principalement influencées par les variations de température et d'irradiation solaire. Une évaluation des performances est réalisée dans la section de simulation, où la température varie de 25°C à 35°C, tandis que l'irradiance diminue progressivement de 1000 (W/m²) à 600 (W/m²). L'impact de ces variations sur la puissance de sortie du système PV est analysé en profondeur afin d'évaluer son adaptabilité et son efficacité.

Pour optimiser l'extraction de puissance, l'algorithme MPPT de perturbation et de l'observation (P&Q) est mis en œuvre pour réguler la commutation de l'hacheur élévateur. En mesurant en continu la tension et le courant du réseau PV, le contrôleur MPPT ajuste dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur, garantissant une collecte maximale de puissance dans diverses conditions

de fonctionnement. Cette méthodologie de contrôle améliore les performances du système, sa stabilité et son efficacité d'utilisation de l'énergie, rendant le système PV connecté au réseau plus fiable et adaptable aux scénarios réels.

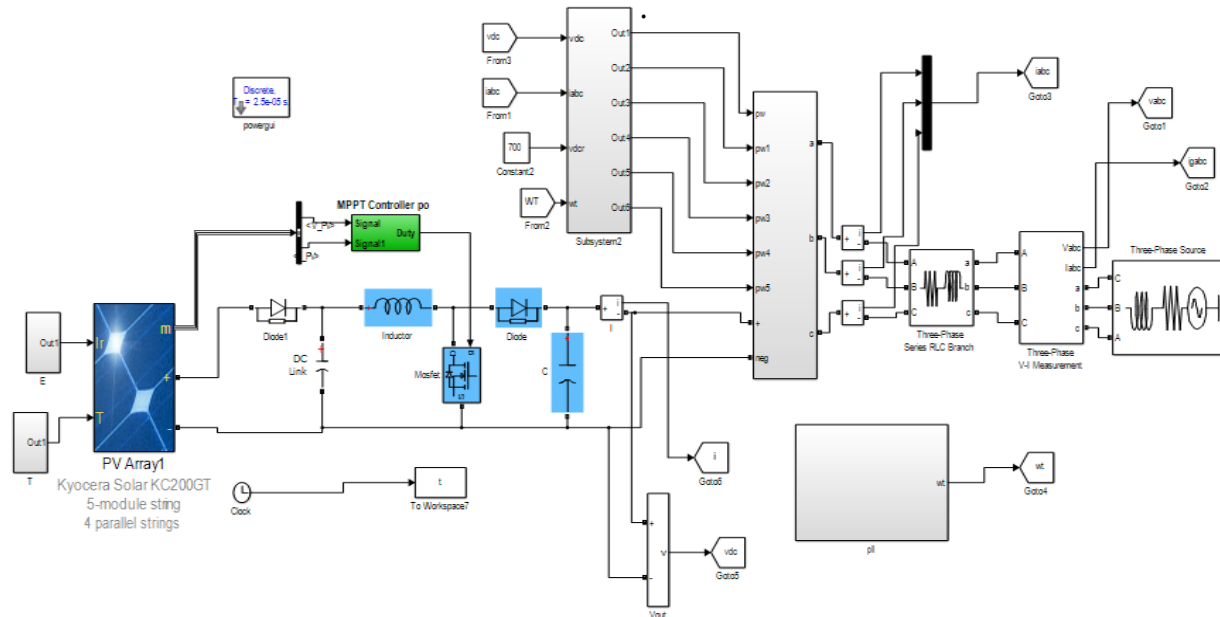


Figure III.5: Modèle Simulink d'un réseau PV triphasé connecté au réseau électrique.

III.5. La charge

Dans cette étude, une charge résistive-inductive (RL) équilibrée est intégrée du côté alternatif du système. Ce type de charge est largement utilisé dans la simulation et les études analytiques pour représenter efficacement les appareils typiques des consommateurs, assurant une distribution uniforme de l'énergie à travers les trois phases. Le maintien d'un fonctionnement en phase équilibrée est fondamental pour évaluer avec précision les performances du système photovoltaïque connecté au réseau, car il permet une évaluation complète de la stabilité, de l'efficacité et du comportement dynamique du système dans des conditions de fonctionnement réelles.

III.6. La Modélisation de l'interface réseaux

Le réseau électrique est modélisé comme une source de tension triphasée, caractérisée par une tension RMS ligne à ligne de 380 V. Cette représentation du réseau est directement connectée au système photovoltaïque (PV), comme illustré dans la figure (III.6).

Ce modèle simplifié facilite une analyse complète de l'interaction du réseau, de la synchronisation

de tension et du comportement d'injection de puissance dans des conditions de fonctionnement standard. En établissant un cadre clair pour évaluer la réponse du système, cette approche de modélisation améliore la précision des évaluations de performance et fournit des informations précieuses sur la dynamique des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

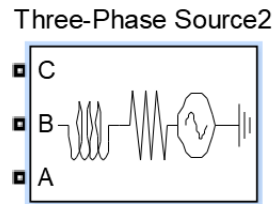


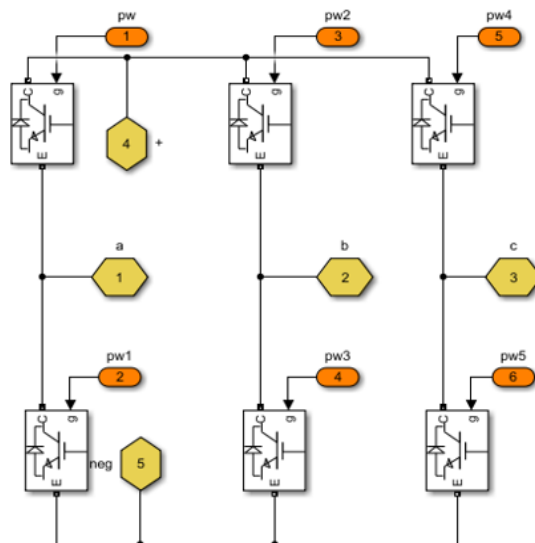
Figure III.6: Schéma bloc de réseau électrique sur MATLAB -Simulink.

III.7. Modélisation et commande de l'onduleur de tension

L'onduleur est l'interface principale entre le champ PV et le réseau électrique. Il convertit le courant/tension continu du champ PV en courant/tension alternatif compatible avec le réseau électrique. On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). Ainsi l'onduleur intègre deux (2) fonctions principales essentielle au raccordement :

- Conversion du courant continu en courant Alternatif.
- Couplage/découplage du réseau électrique.

Dans ce projet, nous utilisé d'un onduleur triphasé à deux niveaux, comme le montre la figure



(III.7).

Figure III.7: Schéma bloc d'un onduleur sur MATLAB -Simulink.

États d'un bras et états de l'onduleur : Chaque bras de l'onduleur a deux états possibles :

État 1 : L'interrupteur du haut est fermé, tandis que l'interrupteur du bas est ouvert. La tension de sortie par rapport au neutre de la source est donc égale à V_{dc} .

État 0 : L'interrupteur du haut est ouvert, tandis que l'interrupteur du bas est fermé. La tension de sortie par rapport au neutre de la source est donc égale à 0V.

Étant donné que chaque bras peut avoir deux états, l'onduleur entier possède $2^3 = 8$ états : PPP, PPN, PNN, PNP, NNN, NNP, NPP et NPN.

Ils sont identifiés en indiquant les états des trois bras de l'onduleur (état P ou état N).

L'état PNN indique que le premier bras est à l'état P, le deuxième est à l'état N et le troisième est à l'état N [27].

Si on applique la transformation de Clarke on obtient : $V_s = V_\alpha + j V_\beta$ Ce vecteur peut prendre huit (8) positions discrètes dans le plan (α - β) correspondantes aux états de l'onduleur.

III.7.1. Commande de l'onduleur triphasé

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Plusieurs méthodes de commande peuvent être utilisées [29] :

- Commande par hystérésis.
- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).
- La commande symétrique (Pleine onde) ;
- La commande décalée (à 120°) ;

III.7.1.1. Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI)

La MLI permet de former à la sortie d'un onduleur chaque alternance de la tension à l'aide d'une succession de créneaux rectangulaires, dont la largeur varie suivant une loi de commande qui a pour but de :

- Repousser les harmoniques à des fréquences élevées pour faciliter leur filtrage ;
- Faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie ;
- Faire varier la fréquence du fondamental de la tension de sortie

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse.

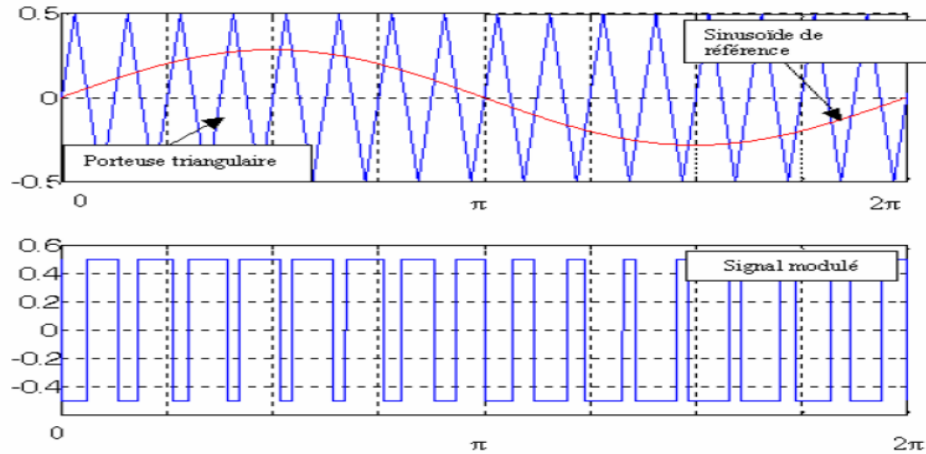


Figure III.8: Signale de la commande MLI

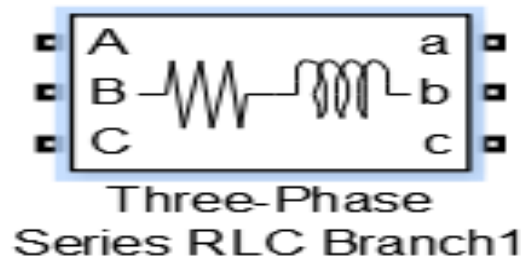
III.8. Boucle à verrouillage de phase (P.L.L)

Les informations de phase du réseau sont obtenues à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (PLL), qui joue un rôle essentiel dans la réalisation d'une synchronisation précise dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Le modèle Simulink de la structure PLL, illustré dans la figure III.5, permet une estimation précise de l'angle de phase du réseau, assurant ainsi une intégration sans faille de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique.

Cet angle de phase est ensuite appliqué dans la transformation de (quadrature directe) des signaux de tension et de courant, permettant un contrôle et une analyse efficaces au sein d'un cadre de référence rotatif aligné avec le vecteur de tension du réseau. En utilisant cette transformation, le système réalise une régulation précise de la puissance active et réactive, améliorant ainsi la stabilité du réseau, améliorant le facteur de puissance et assurant un fonctionnement efficace du système [30].

III.9. Filtre

Dans cette conception, un filtre RL est utilisé pour interfacer l'onduleur avec le réseau, garantissant une livraison d'énergie fluide et atténuant les distorsions harmoniques indésirables. Étant donné que l'onduleur fonctionne avec des signaux de commande basés sur des impulsions, le courant de sortie contient souvent des composants harmoniques significatifs, ce qui peut compromettre la qualité de l'énergie et affecter les performances globales du système photovoltaïque connecté au réseau. Le filtre RL atténue efficacement les harmoniques de haute fréquence, lissant ainsi la forme d'onde



du courant et améliorant la qualité de l'énergie injectée dans le réseau. En réduisant la distorsion harmonique, le filtre joue un rôle crucial dans l'assurance de la stabilité du système, l'amélioration de la conformité au réseau et le maintien d'une conversion énergétique efficace au sein du système photovoltaïque.

Figure III.9: Schéma bloc d'un filtre RL sur MATLAB -Simulink.

III.10. Commande prédictive d'un système photovoltaïque connecté au Réseau

Le schéma d'un onduleur triphasé raccordé au réseau, utilisant une stratégie de commande prédictive, est illustré à la figure III.10. Cette approche utilise une fonction de coût pour minimiser l'erreur entre les courants de référence et prédits dans le cadre de référence synchrone, assurant un suivi rapide et précis du courant tout en optimisant les performances du système.

Dans ce schéma de contrôle, l'axe d du cadre synchrone est aligné avec le vecteur de tension du réseau, représentant la composante de courant actif, tandis que l'axe q, correspondant au courant réactif, est fixé à zéro pour obtenir un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. L'angle de phase de la tension du réseau est extrait à l'aide d'un bloc de boucle à verrouillage de phase (PLL), qui joue également un rôle crucial dans la régulation de la tension de liaison continue, assurant ainsi une synchronisation correcte et une stabilité de tension.

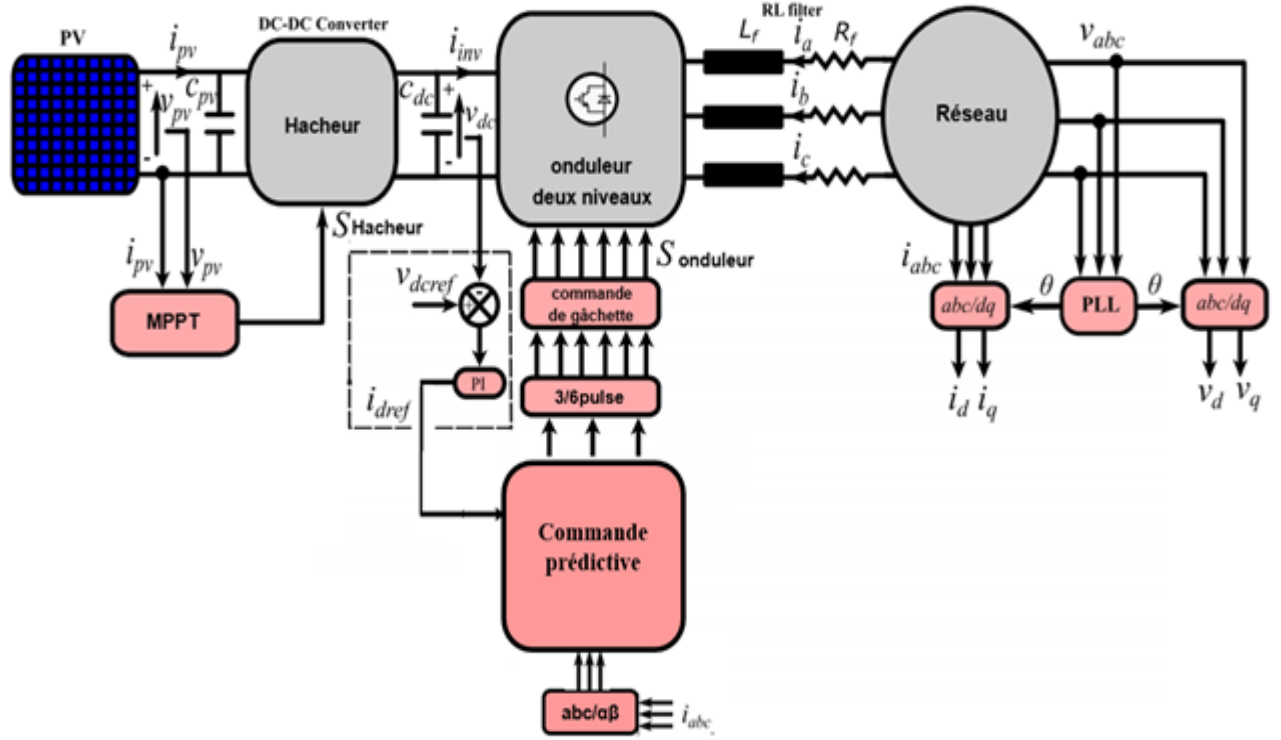


Figure III.10: Schéma global de la commande du système photovoltaïque connecté au réseau

L'onduleur à deux niveaux raccordé au réseau via un filtre RL à des fins de qualité de puissance

Le comportement de ce système peut être décrit simplement comme suit

$$V_{abc} = U_{abc} + L_f \frac{d}{dt} i_{abc} + R_f i_{abc} \quad .(III.1)$$

Où V_{abc} sont les tensions côté réseau, i_{abc} les courants de ligne, u_{abc} les tensions de sortie côté onduleur, et L_f et R_f l'inductance et la résistance du filtre, respectivement. De plus, les tensions terminales de l'onduleur à deux niveaux sont spécifiées par :

$$U_{abc} = \frac{1}{3} V_{dc} T_{abc} S_{abc} \quad (III.2)$$

T_{abc} est la matrice de transformation, qui peut être écrite comme

$$T_{abc} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Dans le référentiel stationnaire (α - β), l'équation (2) peut être réécrite comme suit

$$V_{\alpha\beta} = U_{\alpha\beta} + L_f \frac{d}{dt} i_{\alpha\beta} + R_f i_{\alpha\beta} \quad (III.4)$$

où $i_{\alpha\beta}$ sont les courants de ligne dans le repère $\alpha\beta$. En outre, les représentations des tensions dans le repère de rotation (d-q) peut être exprimé comme suit

$$V_d = U_d + Lf \frac{d}{dt} i_d + Rf i_d - \omega Lf i_q \quad (\text{III.5})$$

$$V_q = U_q + Lf \frac{d}{dt} i_q + Rf i_q - \omega Lf i_d \quad (\text{III.6})$$

où i_{dq} sont les courants de ligne dans le repère dq, et ω est la fréquence angulaire du réseau. En supposant que nous avons affaire à une configuration triphasée équilibrée, la puissance active et réactive dans les référentiels α - β et d-q est obtenue comme suit

$$P = \frac{3}{2} (V_{\alpha} i_{\alpha} + V_{\beta} i_{\beta}) \quad (\text{III.7})$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_{\beta} i_{\alpha} - V_{\alpha} i_{\beta}) \quad (\text{III.8})$$

III.10.1. Algorithme de commande prédictive :

La stratégie de commande prédictive proposée repose sur un ensemble fini d'états de commutation générés par le convertisseur statique de puissance. Le fonctionnement du système est modélisé de manière à anticiper l'évolution future des grandeurs à contrôler pour chacun de ces états. Afin d'identifier l'état de commutation optimal, un critère de sélection basé sur une fonction de coût est défini. Cette fonction évalue les écarts entre les valeurs prédites et les références souhaitées. Pour chaque combinaison d'états possibles, les variables de sortie sont prédites, et celle qui minimise la fonction de coût est retenue. Cette méthode de commande se décline selon les étapes suivantes :

- Définir la fonction de coût.
- Construire un modèle du convertisseur statique et ses possibles états de commutation.
- Construire un modèle des courants injectés pour la prédiction.

Pour anticiper l'évolution des variables évaluées par la fonction de coût, il est indispensable de disposer d'un modèle discret du système dans le domaine temporel. La discrétisation du modèle est réalisée à l'aide de la méthode d'Euler avancée, choisie pour sa simplicité de mise en œuvre et sa précision satisfaisante, éléments essentiels pour garantir des performances de commande optimales.

En appliquant cette méthode, le modèle discret du système peut être exprimé par les équations

Suivantes :
$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1)-x(k)}{T_s} \quad (\text{III.9})$$

Avec : T_s : est le temps d'échantillonnage.

$x(k+1)$ et $x(k)$: sont la valeur de la variable d'état dans le prochain temps d'échantillonnage et à l'état actuel, respectivement. L'algorithme du contrôle est illustré sur la Figure III.11 et comporte les étapes suivantes [31] [32] :

- Les courants injectés sont mesurés puis subissent une transformation suivant les coordonnées α - β . Les valeurs des courants de référence sont obtenues par la suite à partir de la grandeur de sortie de la boucle de régulation du bus continu.
- Le modèle du système est utilisé pour prédire la valeur de courant d'injection dans l'intervalle d'échantillonnage $(k+1)$, pour chaque vecteur de tension parmi les huit possibles.
- La fonction de coût (g) minimise l'erreur entre le courant de référence et prédit.
- Le vecteur de tension qui minimise l'erreur de courant est sélectionné et les signaux. La

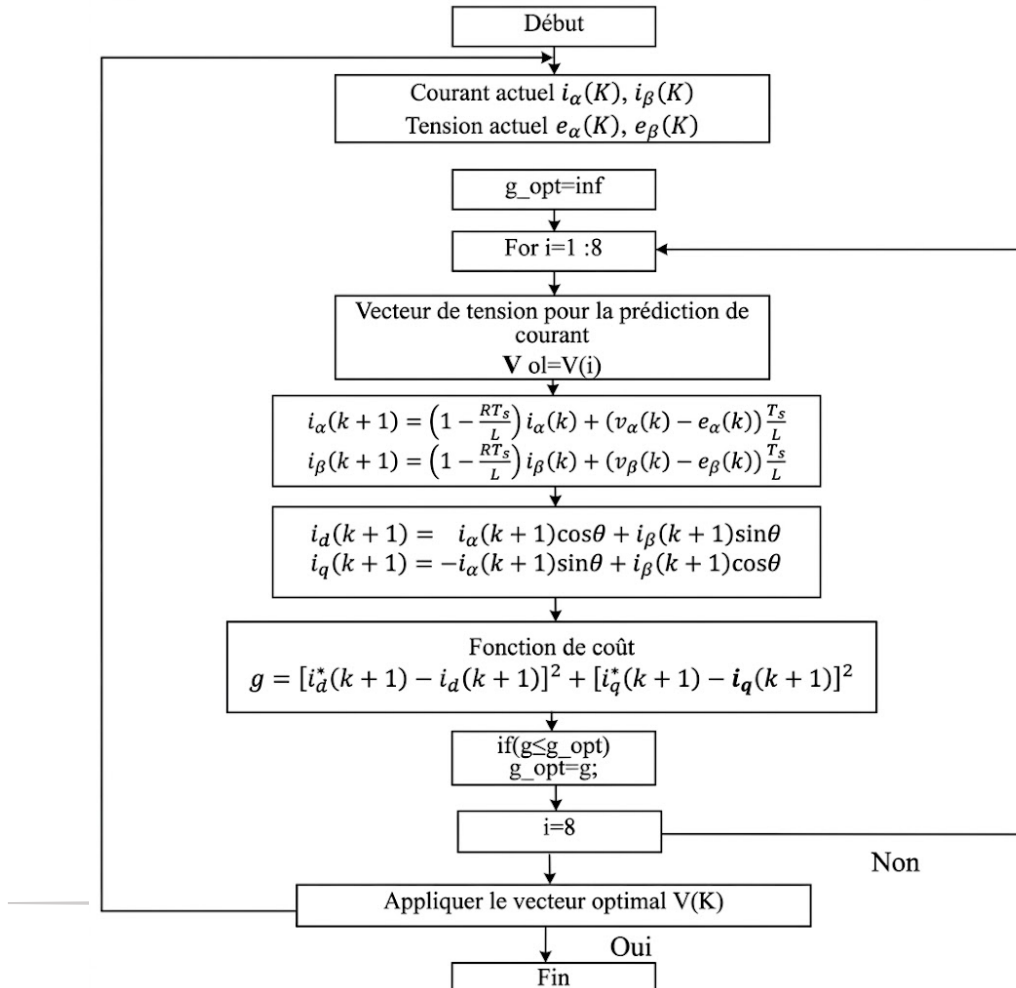


figure (III.11) indique le diagramme de l'algorithme de la commande prédictif.

Figure III.11: Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif

III.10.2. Courants injectés

Le modèle par phase du courant injecté est donné par l'équation ci-après :

$$Ri = L \frac{di}{dt} + e = v \quad (\text{III.10})$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}(v - e) \quad (\text{III.11})$$

e : est la tension de source.

v : est la tension de sortie de l'onduleur.

i : le courant injecté.

Par l'utilisation de la méthode d'Euler, l'équation (III.10) (III.11) est discrétisée afin d'obtenir une expression qui permet de prédire le futur courant à $(k + 1)$ pour les huit possibles états de commutation appliqués à l'onduleur, cette expression s'écrit sous la forme suivante :

$$i_{\alpha}(k + 1) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i_{\alpha}(k) + \frac{T_s}{L_f} (V_{\alpha}(k) - e_{\alpha}(k)) \quad (\text{III.12})$$

$$i_{\beta}(k + 1) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i_{\beta}(k) + \frac{T_s}{L_f} (V_{\beta}(k) - e_{\beta}(k)) \quad (\text{III.13})$$

III.10.3. Fonction de coût

En MPC, à chaque instant k , pour un état donné du système $x(k)$ (mesuré ou estimé), une fonction de coût est minimisée sur un horizon fini de longueur N . Cette fonction permet d'évaluer l'écart entre les prédictions du courant de sortie et le courant de référence. Dans cette étude, une fonction de coût g , formulée en coordonnées orthogonales, est utilisée pour orienter le comportement du système. Son objectif principal est de réduire l'erreur du courant de sortie, conformément à l'équation (III.14) [33-34].

$$gc = |i_{\alpha}(k + 1) - i_{\alpha \text{ ref}}(k + 1)| + |i_{\beta}(k + 1) - i_{\beta \text{ ref}}(k + 1)| \quad (\text{III.14})$$

Lorsque $i_{\alpha \text{ ref}}(k + 1)$ $i_{\beta \text{ ref}}(k + 1)$ sont les valeurs de référence du courant de grille à $k + 1$.

III.11. Simulation et Résultats d'un système

Le modèle du système a été simulé dans MATLAB/Simulink afin d'évaluer les performances du schéma de contrôle proposé dans des conditions de fonctionnement variables. Le

comportement du système a été analysé à différents niveaux d'éclairement, où l'insolation solaire a progressivement diminué de 1000 (W/m²) à 800 (W/m²), tandis que la température a augmenté de 25°C à 45°C.

Pour assurer le fonctionnement du facteur de puissance unité, le courant réactif a été maintenu à zéro dans la simulation. Les signaux de tension active et réactive générés par le contrôleur de courant ont été transformés en trois signaux de modulation, servant de références pour le générateur MPPT PWM, qui a produit la tension de sortie souhaitée.

La figure III.14 illustre la tension de sortie du panneau PV, en soulignant que malgré les fluctuations de température et d'irradiation, le panneau PV fonctionne systématiquement à sa tension maximale de puissance (MPP). De plus, le taux de service du système « shoot-through » est ajusté dynamiquement pour maintenir un courant PV de crête constant, renforçant ainsi la stabilité de la stratégie de contrôle.

Les figures III.17 et III.18 illustrent respectivement la puissance de sortie du système et le courant du réseau. Une analyse comparative entre la tension PV simulée et la puissance de sortie ainsi que les caractéristiques de puissance discutées dans la chapitre II démontre une forte corrélation, validant l'efficacité de la méthode MPPT proposée pour atteindre une conversion d'énergie optimale et une intégration stable au réseau.

III.12. Résultat des simulations

Dans cette partie, nous allons étudier le comportement dynamique et la robustesse de commande de l'ensemble du système proposé lors d'une variation de l'ensoleillement et nous allons effectuer la simulation de l'ensemble du système photovoltaïque connecté au réseau électrique, de telle sorte de faire fonctionner le système simultanément comme une source d'énergie (injection de puissance active renouvelable au réseau électrique).

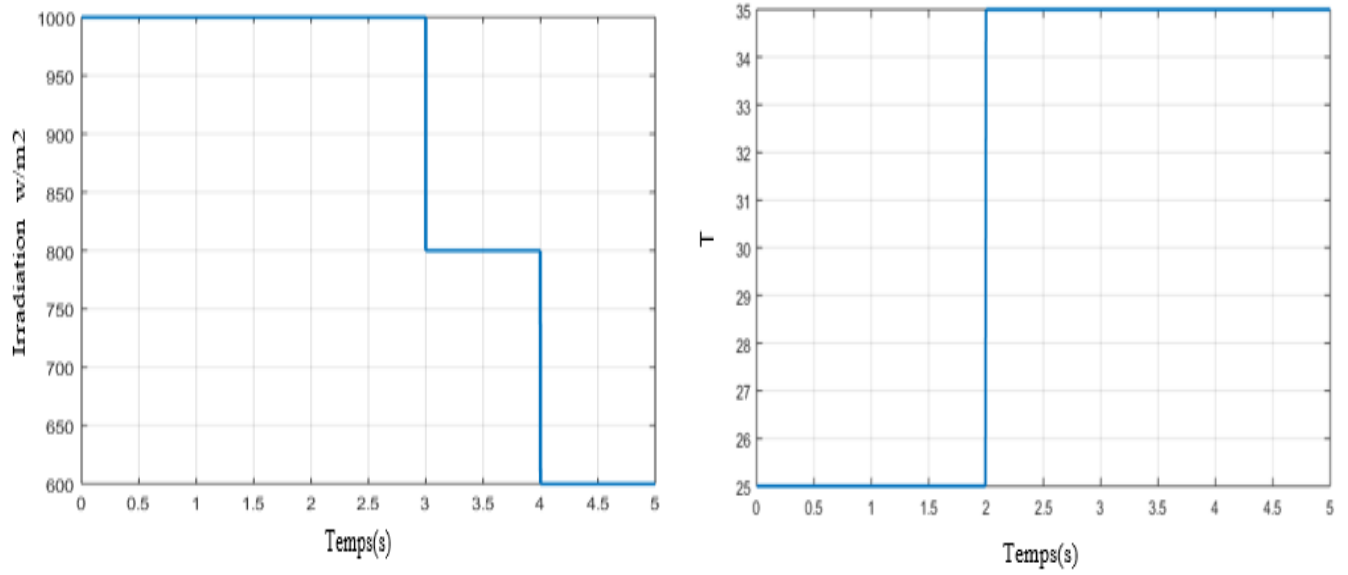


Figure III.13: Température

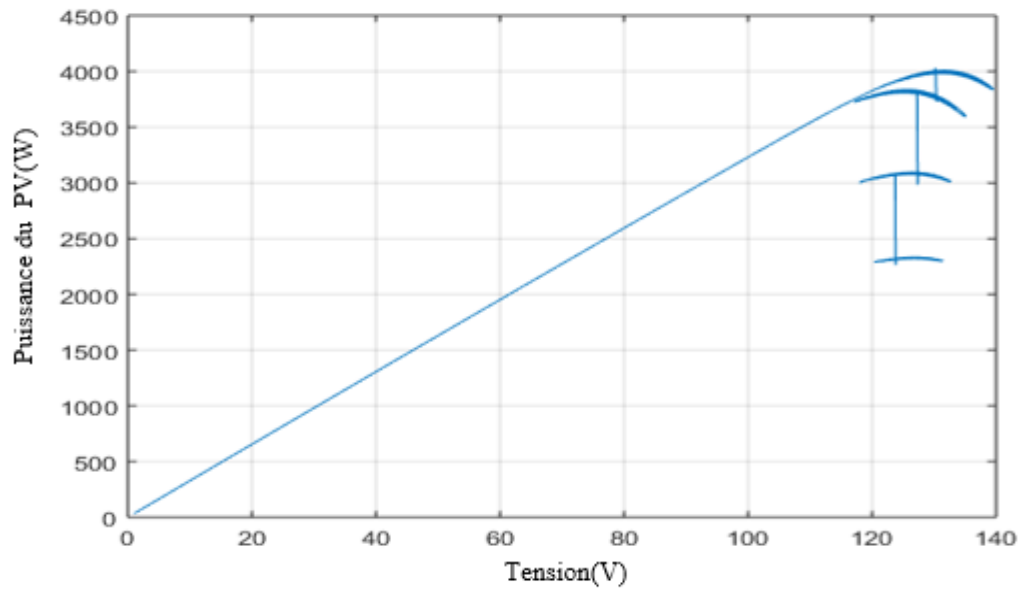


Figure III.14: MPPT du PV

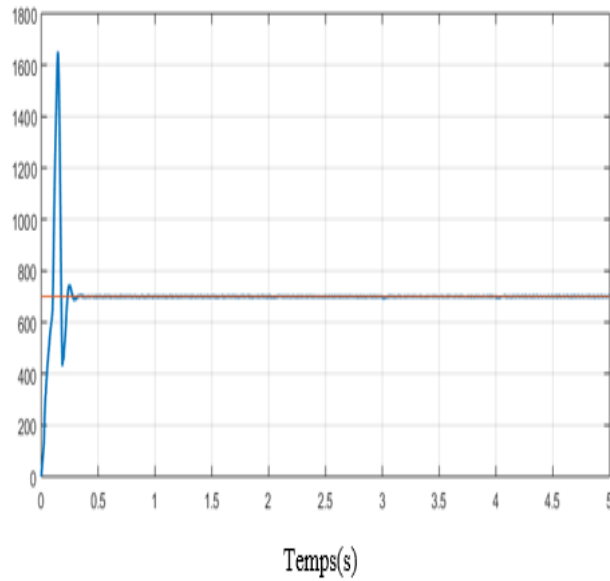


Figure III.15: Courbe de tension aux bornes du condensateur et sa référence

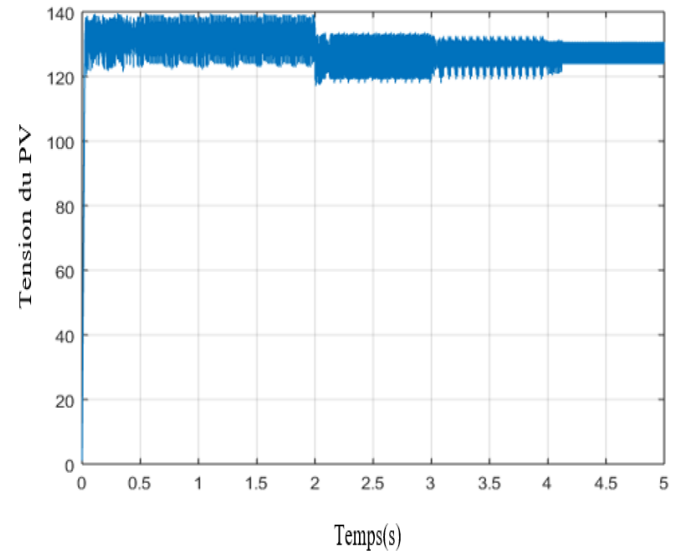


Figure III.16: Courbe de tension du PV

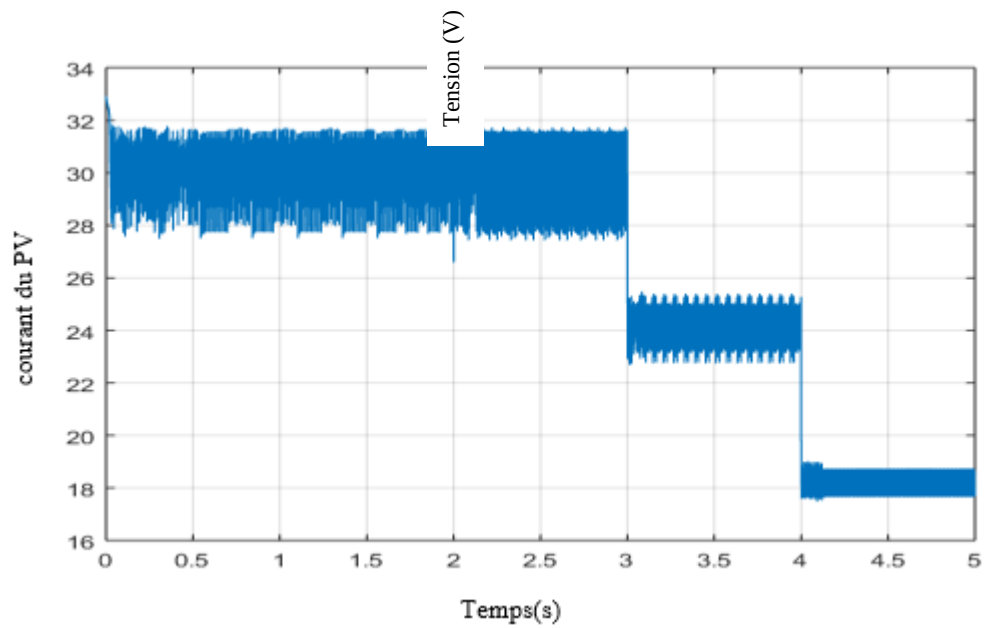


Figure III.17: Courbe de courant du PV

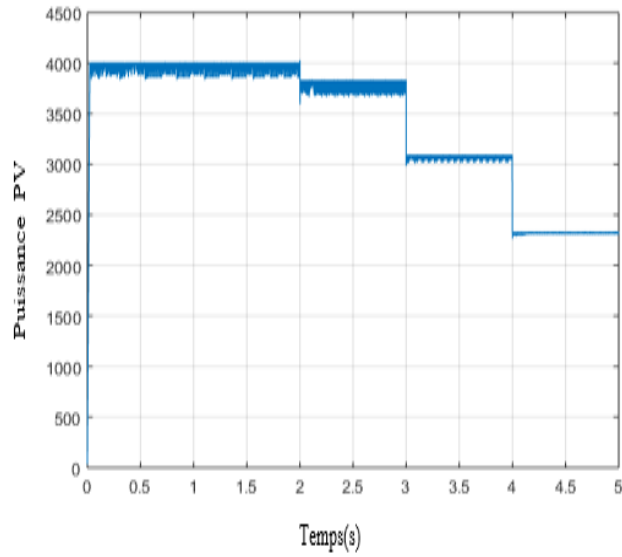


Figure III.18: Courbe de Puissance générée PV

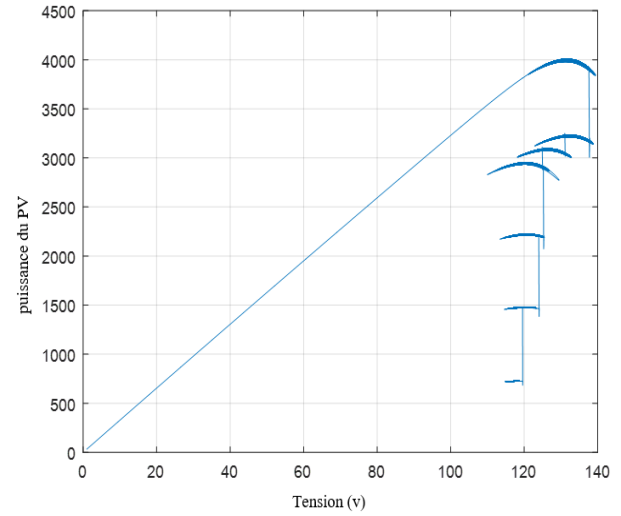


Figure III.19: Caractéristique MPPT de la tension et de la puissance du PV

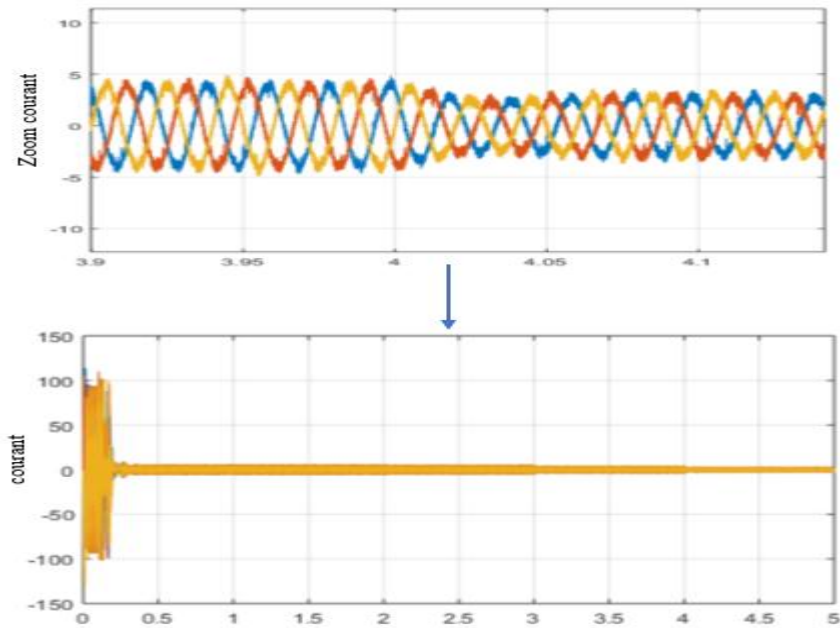


Figure III.20: Courbe de zoom courant à la sortie de l'onduleur

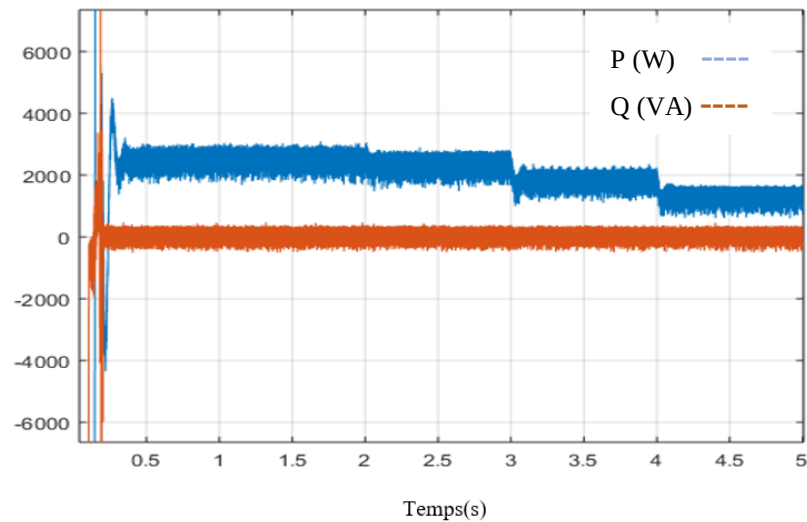


Figure III.21: Caractéristique de la puissance active P et de la puissance réactive Q injecter dans le réseau.

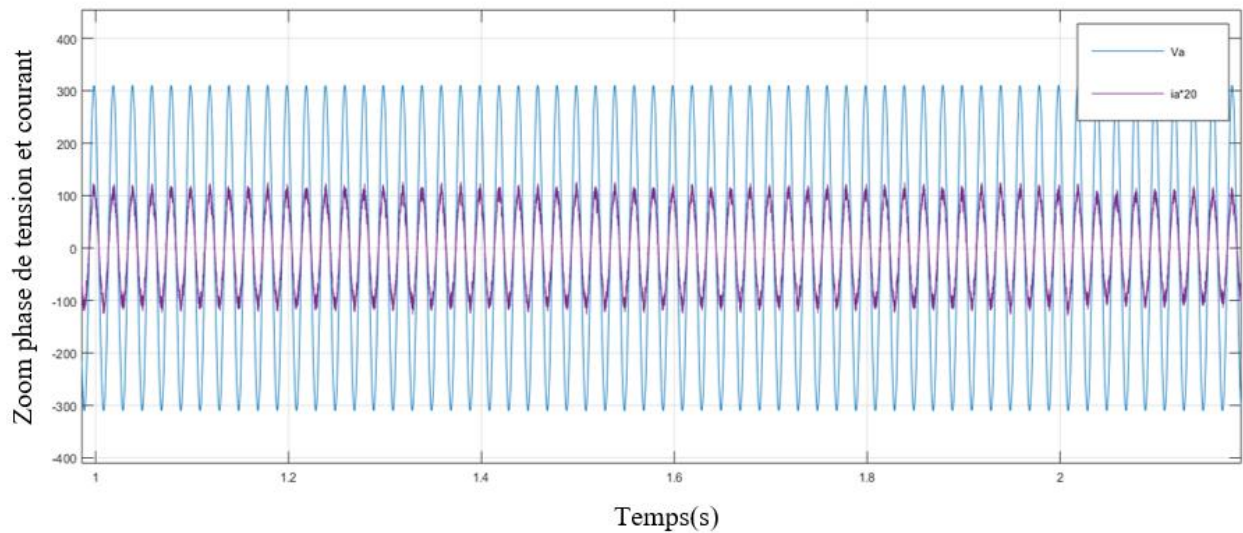


Figure III.22: Zoom phase de tension du réseau et courant

D'après les résultats de simulations obtenus de l'ensemble du système, on constate que on peut constater que la variation de l'ensoleillement ne provoque aucune perturbation au niveau des tensions de réseau. Par contre, le courant de réseau diminuée lorsque l'irradiation solaire diminuée on peut conclure que la diminution de la puissance engendrée par GPV lors de variation de l'irradiation, le réseau électrique couvre et fournit le manque de puissance active demandée par la charge.

Le courant et la tension de réseau sont parfaitement en phase durant toutes les variations

Le courant de réseau reste quasi sinusoïdal et équilibré durant toutes les variations.

La tension du Bus continu (V_{dc}) est maintenue constante et suit parfaitement sa référence ($V_{dc-ref} = 700V$) après un transitoire de l'ordre 0.7s, et tout cela grâce au mode glissant.

On peut conclure que les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement et l'efficacité de l'ensemble du système proposé. Donc, nous avons réussi d'atteindre nos objectifs de l'étude qui sont l'injection de puissance produite par le GPV dans le réseau.

Les figures 20 montrent que les courants de référence changent dynamiquement lorsque la température et l'irradiance varient afin de maintenir la tension continue à la valeur de référence comme clarifié dans les figures 16 et 17, ce qui signifie que le contrôle prédictif du courant du modèle a la capacité d'ajustement rapide du courant.

La figure 22 montre que le courant de phase est maintenu en phase avec la tension du réseau lorsque le système fonctionne à facteur de puissance unitaire.

III.13. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter de manière approfondie les méthodes de commande prédictive appliquées aux convertisseurs de puissance et aux variateurs électriques. Une attention particulière a été portée à la commande prédictive MPC, à la formulation de la fonction de coût, aux modèles des convertisseurs ainsi qu'aux techniques de prédiction en temps discret. L'application de ces approches à la poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques raccordés à un onduleur a mis en évidence des résultats satisfaisants. Les simulations réalisées ont démontré l'influence des variations d'irradiance et de température sur les performances globales du système, tout en confirmant la capacité des méthodes de commande prédictive à améliorer la stabilité, la rapidité de réponse et l'efficacité énergétique des systèmes à énergie renouvelable.

En outre, une analyse comparative détaillée entre les méthodes PSO et P&O a été effectuée dans des conditions d'ombrage partiel. Les résultats obtenus montrent que la méthode PSO présente une meilleure aptitude à suivre le point de puissance maximale malgré les variations d'ensoleillement et d'ombrage, assurant ainsi une puissance de sortie plus stable et plus proche de la valeur optimale.

Cette étude met donc en évidence la supériorité de la méthode PSO par rapport à la méthode P&O dans des conditions de fonctionnement variables et complexes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude, la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque (PV) connecté au réseau électrique, avec pour objectif principal d'optimiser le rendement énergétique global et d'améliorer la qualité de l'énergie injectée face aux variations climatiques. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une démarche progressive structurée en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons posé les fondements théoriques de l'énergie solaire et des systèmes photovoltaïques. L'étude des caractéristiques électriques des cellules PV et des différentes configurations d'intégration au réseau a permis d'établir une base solide pour comprendre les défis liés à la variabilité de la ressource solaire.

Le deuxième chapitre a été dédié à la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie. Nous avons analysé le comportement dynamique du convertisseur DC/DC (hacheur Boost) et mis en œuvre les algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Ces techniques de contrôle se sont avérées indispensables pour adapter dynamiquement la tension du générateur PV et garantir l'extraction optimale de la puissance face aux fluctuations d'ensoleillement et de température.

Le troisième chapitre, qui constitue le cœur de notre contribution, a porté sur l'application de la Commande Prédictive (MPC) à l'onduleur triphasé à deux niveaux interfacés avec le réseau électrique. Les résultats de simulation obtenus sous l'environnement MATLAB/Simulink ont formellement validé l'efficacité de cette approche de commande avancée. Contrairement aux régulateurs PI classiques, le contrôleur MPC a démontré une dynamique de réponse ultra-rapide et une robustesse remarquable, assurant une parfaite stabilité de la tension du bus continu (V_{dc}). De plus, il a garanti l'injection d'un courant réseau équilibré avec un facteur de puissance unitaire et un taux de distorsion harmonique (THD) très réduit, tout en gérant efficacement les contraintes du système sans nécessiter de modulateur MLI complexe.

Perspectives

À la lumière des résultats de simulation très encourageants de ce travail, plusieurs axes de recherche futurs peuvent être envisagés pour prolonger et enrichir cette étude :

- Validation expérimentale : Implémenter l'algorithme MPC développé sur une plateforme de prototypage en temps réel (telle qu'une carte DSP ou dSPACE) afin de confronter les performances théoriques aux contraintes pratiques d'exploitation industrielles.

- Conditions d'ombrage partiel : Intégrer des techniques d'intelligence artificielle (telles que la logique floue, les réseaux de neurones ou l'algorithme PSO) à la boucle MPPT pour optimiser l'extraction de puissance sous des conditions météorologiques sévères et complexes.
- Topologies d'onduleurs multiniveaux : Étendre l'application de la stratégie de commande prédictive à des topologies d'onduleurs multiniveaux (ex. onduleur NPC à 3 niveaux) pour réduire davantage les pertes de commutation, diminuer le THD et minimiser le stress en tension sur les interrupteurs de puissance.

Annexe :

TABLEAU 1 : Les paramètres du convertisseur

Paramètre	Nom	Valeur
L_i	Inductance du convertisseur	4 mH
C_i	Capacité d'entrée	4700 uF
C_o	Capacité de sortie	470 UF
R	Resistance de charge	200 Ω

TABLEAU 2 : Les paramètres de l'onduleur connecté au réseau

Puissance du PV	4 kW
Inductance du boost	0.1mH
Capacité du bus continu (DC-link)	3mF
Résistance du filtre R_f	0.16 Ω
Inductance du filtre L_f	0.1mH
Fréquence du réseau	50 Hz
Tension ligne-ligne du réseau	400 V
Temps d'échantillonnage TS	40 μ s

TABLEAU 3 : Les paramètres de module (KC200GT)

Puissance maximale	200.1 W
Tension de MPP	26.3V
Courant de MPP	7.61A
Tension de circuit ouvert	32.9V
Courant de court-circuit	8.21A

Références

- [1] S. Ashok, « Solar Energy », Encyclopédie, Britannica, 2023.
- [2] أ. سليمان، الطاقة المتجددة، سلسلة كتيبات تعريفية، العدد 55، صندوق النقد العربي، أبو ظبي، 2024
- [3] Othman ben seddik. fathidjaloud. Étude et optimisation d'un Sys PV. Mémoire de Master eth. Université de Ouargla 2012.
- [4] SLAMA fateh. Modelisation d'un Systeme multigénérateurs PV interconnectes au réseau électrique. Magister en eth. Université setif.
- [5] S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, département d'électrotechnique, 2018.
- [6] AkassewaTchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré.
- [7] Labouret A, Viloz M. Installations photovoltaïques : conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau. Paris : Dunod ; 2012.
- [8]. Green MA. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications. New Jersey : Prentice-Hall ; 1982.
- [9] "NEC 690.8(A)(1) and (A)(2)," National Electrical Code, [Standard].
- [10] C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 12 Décembre 2003.
- [11] G.MedYacine, D.belkacem, D.akram, « modélisation et commande d'un système PV connecte au réseau électrique utilisant DSTATCOM. » , Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla,2020
- [12] K. Ouabdelkader, H. Mersl, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia,2015.
- [13] AbbassenL., « Etude de la connexion au réseau électrique d'un centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [14] S. Oukach, « Dimensionnement des systèmes Energétiques », Cours Licence Professionnelle Energies renouvelables et procédés (LPER-P), Ecole Supérieure de Technologie-Guelmim, 2021.

- [15] B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.
- [16] AbbassenL., « Etude de la connexion au réseau électrique d'un centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [17] K. Ouabdelkader, H. Mersl, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2015.
- [18] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de Neurones », Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, Algérie, 2006.
- [19] Y AMINA AZZOUG Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque thèse de doctorat 2008
- [20] J. David Irwin, MUHAMMAD H. RASHID «Power electronics Handbook». University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright 2001 by ACADEMIC PRESS.
- [21] R. Touahir et M. A. K. Ben Zahia, « contrôleur neuronal pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque », Mémoire master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [22] S. Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [23] F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [24] A. Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003
- [25] A. Mabrouk, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique». Mémoire de magister en électricité solaire de l'école Nationale Polytechnique El Harrach, ALGER, 2008.
- [26] M. Jean-François REYNAUD. Recherches d'optimums d'énergie pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de TOULOUSE, 2011.
- [27] HESPUL. Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement Etat de l'Art et Etude des Performances, 2007.
- [28] Sofiane FELLOUAH, Siham MESBAHI « ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTE AU RESEAU » Mémoire de Fin d'Etudes 2015

- [29] J.P.Hautier, J.P.Caron, « Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande », Edition Technip, 1999.
- [30] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, Timbus A.V. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006 ; 53(5) : 1398-1409.
- [31] Ahmed, M.; Abdelrahem, M.; Kennel, R.; Hackl, Christoph, M.: An enhanced maximum power point tracking based finite-control-set model predictive control for PV systems. In: 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 1–6. IEEE (2020)
- [32] J. Rodriguez and P. Cortés, 2012. Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives, John Wiley
- [33] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V.G. Agelidis, “Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overvi.
- [34] L. Targant, S. Khalef, « Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université de Tizi Ouzou, 2017/2018.