



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Energie renouvelable

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Khemissi Abdelatif

Le :

Commande d'une installation PV intégrée au réseau électrique

Jury :

Dr	ABDEDDAIM Sabrina	Pr	Université de Biskra	Encadrante
Dr	SAADI Aicha	MCA	Université de Biskra	Présidente
Dr	Derradji Belloum Karima	MAA	Université de Biskra	Examinatrice



Année universitaire : 2024/2025

Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Energie renouvelable

Réf. :

Commande d'une installation PV intégrée au réseau électrique

Le :

Présenté par : Khemissi Abdelatif
Avis favorable de l'encadreur : Dr. ABDEDDAIM Sabrina

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

ملخص – Résumé – Abstract

Abstract : This thesis focuses on the study, modeling, and control of a grid-connected photovoltaic (PV) system. In the context of the global energy transition, the integration of renewable energy, particularly solar power, offers a promising solution to meet the growing energy demand while reducing environmental impact. The work presents various energy conversion structures and models key components such as the PV generator, the DC/DC converter, and the inverter. Special emphasis is placed on the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique to optimize power extraction, as well as on inverter control using the hysteresis method to ensure stable grid injection. Simulation results are provided to validate the effectiveness of the proposed control strategies.

Keywords: Photovoltaic system, grid-connected, renewable energy, solar power, modeling, DC/DC converter, inverter, Maximum Power Point Tracking (MPPT), hysteresis control, energy conversion, simulation, control strategies.

ملخص: يتناول هذا البحث دراسة نظام كهروضوئي متصل بالشبكة الكهربائية، من حيث النمذجة والتحكم، في إطار التحول العالمي نحو الطاقات المتجددة. يُعتبر استخدام الطاقة الشمسية أحد الحلول الفعالة لمواجهة التحديات البيئية وتلبية الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية. يركز هذا العمل على تحليل المكونات الأساسية في سلسلة التحويل، مثل المولد الكهروضوئي، ومحول التيار المستمر (DC/DC)، والعاكس (الإنفرتر). كما تم تطبيق تقنيات تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) لزيادة كفاءة استخراج الطاقة، بالإضافة إلى اعتماد استراتيجية التحكم بطريقة التباطؤ (الهسترة) لضمان التوافق وجودة الربط مع الشبكة. وقد تم إجراء محاكاة للتحقق من فعالية الأداء وتحسين استقرار النظام الكهروضوئي ضمن بيئة الشبكة.

كلمات مفتاحية: نظام كهروضوئي، مرتبط بالشبكة، طاقة متجددة، طاقة شمسية، النمذجة، محول تيار مستمر/تيار مستمر، العاكس، تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT)، التحكم بالتباطؤ، تحويل الطاقة، المحاكاة، استراتيجيات التحكم.

Résumé : Ce mémoire porte sur l'étude, la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique. Dans un contexte de transition énergétique, l'intégration des énergies renouvelables, en particulier le solaire photovoltaïque, représente une solution prometteuse pour répondre à la demande croissante en énergie tout en réduisant l'empreinte carbone. Le travail présenté explore les différentes structures de conversion, la modélisation des composants clés tels que le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC et l'onduleur. Une attention particulière est portée à la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour maximiser la puissance extraite, ainsi qu'à la commande de l'onduleur par la méthode d'hystérésis afin d'assurer une injection stable dans le réseau. Des simulations ont été réalisées afin de valider les performances des stratégies de commande adoptées.

Mots clés : Système photovoltaïque, connecté au réseau, énergie renouvelable, énergie solaire, modélisation, convertisseur DC/DC, onduleur, suivi du point de puissance maximale (MPPT), commande par hystérésis, conversion d'énergie, simulation, stratégies de commande.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À tous ceux qui ont été une source de soutien et d'inspiration tout au long de mon parcours.

À ma mère, pour son amour inconditionnel et ses encouragements constants. Ta sagesse et ta persévérance m'ont guidé chaque jour.

À mon père, pour sa confiance en moi et ses précieux conseils.

À ma sœur, pour sa complicité et son soutien sans faille.

À toute ma famille, pour leur amour et leur soutien indéfectible.

Vos encouragements et votre présence ont été essentiels à ma réussite.

À tous mes amis surtout Haithem, Imane et Juge Lele, pour leur soutien moral. Vos mots de réconfort et votre positivité ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de cette aventure.

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Allah, tout puissant pour la volonté, la santé et de m'avoir donné la patience d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Dr Abdeddaim Sabrina, qui m'a encadré tout au long de ce mémoire et qui m'a fait partager ses brillantes idées.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les enseignants de spécialité Réseaux électriques pour leurs efforts durant toutes mes années d'étude ainsi que les membres jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce modeste travail.

Table des matières

Résumé/ abstract/ ملخص	I
Table des matières	IV
Table des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction Générale	1

Chapitre I. Généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau..... 2

I.1. Introduction	3
I.2. Contexte politique et environnemental mondial	3
I.3. Energie photovoltaïque.....	5
I.4. Applications des systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque.....	6
I.4.1. Système autonome.....	6
I.4.2. Système connecté au réseau électrique.....	6
I.5. Systèmes PV connectés au réseau	7
I.5.1. Fonctionnalités générales des systèmes PV connectés au réseau	7
I.5.2. Normes des installations PV connectés au réseau	7
I.5.3. Les topologies des installations PV.....	8
I.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	10
I.6.1. Avantages	10
I.6.2. Inconvénients	10
I.7. Conclusion.....	11

Chapitre II. Modélisation de la chaine PV connectée au réseau 12

II.1. Introduction :	13
II.2. Description du système à étudier	13
II.3. Principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques	14
II.3.1. Modules photovoltaïques.....	14
II.3.2. L'effet photovoltaïque	14
II.3.3. Conversion de l'énergie solaire en électricité	15
II.3.4. Association des panneaux PV.....	16
II.3.5. Modules photovoltaïques	19
II.3.6. Caractéristiques et performances des systèmes photovoltaïques	20
II.3.7. Principe et modélisation du générateur photovoltaïque :	23

II.4.	Les Hacheurs	25
II.4.1.	Type des hacheurs :.....	25
II.4.2.	Modélisation du convertisseur DC/DC (Hacheur Boost) :.....	28
II.5.	Les onduleurs	29
II.5.1.	Structure d'un onduleur triphasé :.....	29
II.5.2.	Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur).....	29
II.6.	Modélisation de la liaison au réseau	30
II.6.1.	Modèle du bus continu	30
II.6.2.	Modèle du filtre coté réseau.....	31
II.6.3.	Phase Locked Loop (PLL)	32
II.7.	Conclusion :.....	33
Chapitre III.	Commande de la chaine PV.....	34
III.1.	Introduction	35
III.2.	Commande du convertisseur DC/DC pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) 35	
III.2.1.	Principe général de la poursuite du point de puissance maximale.....	35
III.2.2.	Méthodes de MPPT :.....	36
III.3.	Commande de l'onduleur :	45
III.3.1.	Commande par hystérésis :.....	45
III.3.2.	Stratégie de commande du flux de puissance injecté.....	47
III.4.	Conclusion	48
Chapitre IV.	Résultats de Simulation	49
IV.1.	Introduction	50
IV.2.	Résultats de Simulation	50
IV.2.1.	Résultat pour un éclairage constant.....	51
IV.2.2.	Résultat pour un éclairage Variable	55
IV.3.	Conclusion.....	59
Conclusion Générale	60	
Références	61	

Table des figures

- Figure I.1 – La consommation Mondiale de l'électricité (Source IEA 2025)
- Figure I.2 – Les émissions totales de gaz polluants dans le monde (Source IEA 2025)
- Figure I.3 – Structure d'un système photovoltaïque autonome
- Figure I.4 – Structure d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique
- Figure I.5 – Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique
- Figure I.6 – Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique
- Figure I.7 – Classement des onduleurs photovoltaïques
- Figure II.1 – Schéma synoptique du système de production photovoltaïque
- Figure II.2 – Représentation schématique d'une cellule solaire
- Figure II.3 – Association des modules en série
- Figure II.4 – Caractéristique résultante d'un groupement en série d'une cellule identique
- Figure II.5 – Association des modules en parallèle
- Figure II.6 – Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques
- Figure II.7 – Association mixte des modules
- Figure II.8 – Caractéristique d'un groupement mixte
- Figure II.9 – Exemple de caractéristique courant-tension d'un module
- Figure II.10 – La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement
- Figure II.11 – La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement
- Figure II.12 – La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de température
- Figure II.13 – La caractéristique $P=f(V)$ en fonction de température
- Figure II.14 – Circuit équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque
- Figure II.15 – Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule diode
- Figure II.16 – Symbole d'un convertisseur DC-DC
- Figure II.17 – Schéma électrique d'un hacheur boost
- Figure II.18 – Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost
- Figure II.19 – Schéma électrique d'un hacheur boost fermé
- Figure II.20 – Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert
- Figure II.21 – Circuit du convertisseur DC-DC Boost
- Figure II.22 – Schéma de l'onduleur de la tension
- Figure II.23 – Modèle de la liaison au réseau
- Figure II.24 – Structure de principe d'une PLL triphasée
- Figure III.1 – Caractéristique du système PV pour les trois cas : $R_{ch} < R_{opt}$, $R_{ch} = R_{opt}$, $R_{ch} > R_{opt}$
- Figure III.2 – Architecture du système réalisé du hacheur avec les MPPT
- Figure III.3 – Caractéristique (P_{pv} , V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque
- Figure III.4 – Organigramme de la méthode Perturbation et Observation
- Figure III.5 – Principe de la commande MPPT par mode glissant
- Figure III.6 – Structure du contrôleur MPPT flou
- Figure III.7 – Poursuite du point de puissance maximal par la méthode Incrément de conductance
- Figure III.8 – Organigramme de l'algorithme Incrément de Conductance
- Figure III.9 – Commande MLI à bande hystérésis
- Figure III.10 – Principe de fonctionnement du correcteur à hystérésis
- Figure III.11 – Simulation de la commande hystérésis
- Figure III.12 – Contrôle du convertisseur côté réseau

Figure IV.1 Schéma bloc d'une centrale PV connectée au réseau en MATLAB-SIMULINK.

Figure IV.2 Tension de sortie de GPV pour un éclairement constant.

Figure IV.3 Courant de sortie de GPV pour un éclairement constant.

Figure IV.4 La puissance à la sortie de GPV pour un éclairement constant.

Figure IV.5 Les allures de la tension référence et mesurée de bus continu pour un éclairement constant.

Figure IV.6 Les allures des courantes de référence et des courants mesurés pour un éclairement constant.

Figure IV.7 Les allures des tensions V_{abc} côté réseau et les courants I_{abc} injectés par l'onduleur pour un éclairement constant.

Figure IV.8 les allures de la puissance active et réactive injectées par l'onduleur pour un éclairement constant.

Figure IV.9 Profil de l'éclairement solaire.

Figure IV.10 Allure de puissance GPV avec une variation d'éclairement.

Figure IV.11 Tension de sortie de GPV pour un éclairement variable.

Figure IV.12 Courant de sortie de GPV pour un éclairement variable

Figure IV.13 Les allures de la tension de référence et la tension de bus continu pour un éclairement variable.

Figure IV.14 Les allures des courantes de référence et des courants mesurés pour un éclairement variable.

Figure IV.15 Les allures des tensions V_{abc} côté réseau et les courants I_{abc} injectés par l'onduleur pour un éclairement variable.

Figure IV.16 les allures de la puissance active et réactive injectées par l'onduleur pour un éclairement variable.

Liste des tableaux

Tableau I.1 – Résumé des Normes pour les installations PV connectées au réseau

Tableau I.2 – Caractéristiques techniques de différentes architectures PV

Tableau III.1 – Table des règles d'inférence

Tableau IV.1 – Caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans les conditions standards

Liste des abréviations

AIE : Agence Internationale de l'Énergie

CEI : Commission Électrotechnique Internationale

CEM : Compatibilité Électromagnétique

DC : Direct Current (Courant Continu)

FNDAE : Fonds National pour le Développement des Aires Electrifiées

FPGA : Field-Programmable Gate Array

GPV : Générateur Photovoltaïque

IEA: International Energy Agency

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IR : InfraRouge

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

MPPT : Maximum Power Point Tracking

NF : Norme Française

OND : Onduleur

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

PV : Photovoltaïque

PWM : Pulse Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion)

STC : Standard Test Conditions

THD: Total Harmonic Distortion (Distorsion Harmonique Totale)

WWF: World Wide Fund for Nature

Introduction Générale

La croissance continue de la population mondiale, l'industrialisation rapide et l'urbanisation ont entraîné une hausse considérable de la demande énergétique au cours des dernières décennies. Cette dépendance excessive aux sources d'énergie conventionnelles, telles que les combustibles fossiles, a non seulement engendré une pression croissante sur les ressources naturelles, mais elle a également contribué de manière significative au réchauffement climatique et aux déséquilibres environnementaux. Face à cette situation préoccupante, la communauté internationale s'est engagée dans une transition énergétique urgente, favorisant le développement et l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes électriques actuels.

Parmi les différentes formes d'énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque se démarque par son potentiel illimité, sa disponibilité géographique étendue et sa capacité à s'intégrer facilement dans divers environnements, qu'ils soient isolés ou connectés à un réseau. Grâce aux avancées technologiques, les systèmes photovoltaïques (PV) sont devenus plus efficaces, plus abordables et plus stables, ce qui a favorisé leur déploiement à grande échelle dans de nombreux pays. Toutefois, l'injection d'énergie issue de ces sources intermittentes dans le réseau pose plusieurs défis techniques, notamment en termes de stabilité, de qualité de l'énergie injectée et de contrôle de la puissance délivrée.

Ce travail de mémoire s'inscrit dans cette dynamique. Il a pour objectif principal d'étudier, de modéliser, de commander et de simuler une installation photovoltaïque connectée au réseau électrique. Dans le premier chapitre, une vue d'ensemble des systèmes photovoltaïques est présentée, en mettant l'accent sur leurs composants, les différentes architectures possibles, et les normes à respecter pour une intégration conforme au réseau. Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation des éléments de la chaîne PV, notamment le générateur, le convertisseur DC/DC et l'onduleur, tout en évitant les détails spécifiques à la commande. Ensuite, le troisième chapitre est dédié aux stratégies de commande, en particulier la poursuite du point de puissance maximale (MPPT), la commande du convertisseur Boost, ainsi que la commande de l'onduleur via la méthode d'hystérésis. Enfin, le quatrième chapitre propose une simulation complète du système étudié à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, afin de valider les performances des solutions proposées dans les chapitres précédents, tant dans des conditions constantes que variables d'éclairement et de charge.

À travers cette étude, nous cherchons à contribuer, à notre échelle, à la compréhension et à l'optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques modernes. L'objectif est de proposer des solutions concrètes et efficaces qui puissent répondre aux besoins croissants en énergie, tout en respectant les exigences de durabilité et de stabilité des systèmes électriques.

Chapitre I.

Généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

I.1. Introduction

Face aux enjeux environnementaux et à la raréfaction des ressources fossiles, la transition vers des énergies renouvelables est devenue une priorité mondiale. Parmi ces sources d'énergie, le photovoltaïque occupe une place de plus en plus importante grâce à sa capacité à produire de l'électricité propre et durable. En convertissant directement l'énergie solaire en électricité, les systèmes photovoltaïques offrent une alternative prometteuse aux moyens de production conventionnels.

L'une des configurations les plus répandues est l'intégration des installations photovoltaïques au réseau électrique. Ce type de système permet non seulement de répondre à une partie des besoins énergétiques locaux, mais aussi d'injecter l'excédent de production dans le réseau, contribuant ainsi à la décentralisation de l'énergie et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, malgré leurs nombreux avantages, ces systèmes posent des défis techniques et économiques liés notamment à l'intermittence de la production et à la nécessité d'une infrastructure adaptée.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principes fondamentaux des systèmes photovoltaïques connectés au réseau, leurs composants essentiels, leurs caractéristiques de fonctionnement ainsi que leurs avantages et limites. Nous examinerons également les aspects réglementaires et les perspectives d'évolution de cette technologie.

I.2. Contexte politique et environnemental mondial

Au début du 20^e siècle, les impacts environnementaux liés à notre mode de vie ont commencé à se manifester de manière plus significative : épuisement progressif des ressources énergétiques primaires, aggravation du changement climatique, pollution généralisée, etc. Face à ces enjeux préoccupants, la prise de conscience collective a progressivement évolué, mettant en évidence l'importance de réévaluer notre rapport à l'énergie et à l'environnement. C'est dans ce contexte qu'est née la notion de développement durable, un concept visant à concilier les besoins humains avec la préservation de la planète. En 1987, la Commission des Nations Unies sur l'environnement et le développement a défini cette notion comme le fait de « *répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* ». L'objectif est ainsi de garantir l'accès aux ressources essentielles, en particulier l'énergie, tout en adoptant des politiques visant à réduire l'impact négatif des activités humaines sur le climat.

Dans cette dynamique, le WWF (World Wide Fund for Nature) a introduit le concept d'empreinte écologique mondiale, un indicateur qui mesure la surface terrestre nécessaire pour répondre aux besoins d'une population en matière de ressources et de services. Selon son rapport publié en 2004, la consommation de ressources naturelles dépasse déjà de plus de 20 % ce que la planète est capable de régénérer dans une période donnée. L'énergie représente à elle seule plus de la moitié de cette empreinte, et cette part continue d'augmenter avec le temps. Le rapport du WWF de 2014 va plus loin, estimant qu'il faudrait aujourd'hui l'équivalent d'une planète et demie pour subvenir durablement aux besoins de l'humanité. Cela signifie que depuis plusieurs décennies, nous vivons au-dessus des capacités réelles de notre écosystème.

Parallèlement, les données de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) montrent une croissance très rapide de la consommation énergétique mondiale. Celle-ci est passée d'environ

10 896,9 TWh en 1990 à plus de 25 000 TWh en 2019 (Figure I.1). Et selon les prévisions, cette tendance haussière pourrait atteindre une augmentation de 56 % d'ici 2040. Ce bond impressionnant pose deux défis majeurs. D'une part, il aggrave les problèmes environnementaux liés aux émissions de gaz à effet de serre, en grande partie issus des énergies fossiles, qui dominent encore largement le mix énergétique mondial. D'autre part, il met en évidence la fragilité de notre dépendance à des ressources non renouvelables, dont l'épuisement semble inévitable à moyen ou long terme.

Enfin, il est aujourd'hui reconnu que ces mêmes énergies fossiles sont responsables d'une pollution atmosphérique importante, mais aussi d'une part significative des gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Cette réalité soulève de nombreuses inquiétudes quant à l'avenir de notre planète et impose une transition énergétique vers des alternatives plus propres et durables. (Figure I.2) [1].

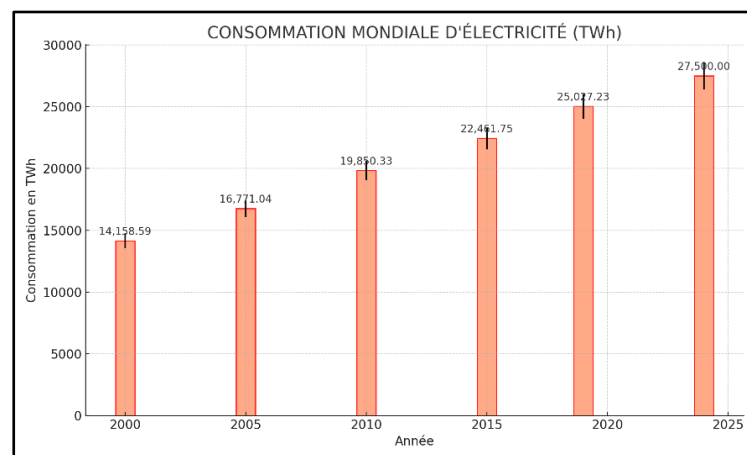


Fig I.1 La consommation Mondiale de l'électricité (Source IEA 2025)

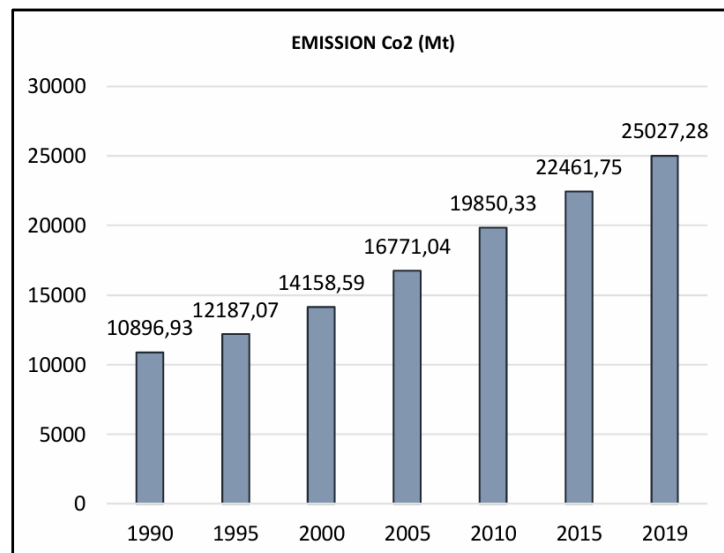


Fig I.2 Les émissions totales de gaz polluants dans le monde (Source IEA 2025).

La lutte contre le changement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre sont devenues des priorités majeures pour les pays industrialisés. Face à la nécessité de diminuer notre dépendance aux énergies fossiles, le recours aux énergies renouvelables s'impose comme une réponse à la fois réaliste et durable. Ces sources d'énergie, à la fois

propres, abondantes et inépuisables, offrent une alternative prometteuse pour répondre à nos besoins énergétiques tout en respectant l'environnement. Leur grande disponibilité, sous des formes variées comme le solaire, l'éolien ou l'hydraulique, en fait aujourd'hui un domaine d'étude particulièrement dynamique. Ces dernières années, de nombreux efforts de recherche et d'innovation ont permis des avancées technologiques notables, rendant leur intégration dans les réseaux électriques de plus en plus efficace et accessible [1].

I.3. Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque, en tant que source d'énergie renouvelable, joue un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale. Elle repose sur la conversion directe de la lumière solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques principalement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, exploitent l'effet photoélectrique pour générer un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière solaire. Ces cellules sont assemblées en modules, qui peuvent être connectés en série ou en parallèle pour former des systèmes adaptés à diverses applications, allant de l'alimentation de petits appareils à la production d'électricité à l'échelle industrielle [2].

Les modules photovoltaïques sont caractérisés par plusieurs paramètres clés :

- **Puissance nominale** : exprimée en watts-crête (WC), elle indique la puissance maximale que le module peut produire dans des conditions standard.
- **Rendement** : le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue.
- **Facteur de forme** : indicateur de la qualité de la cellule en termes de tension et de courant.
- **Température de fonctionnement** : la performance des modules peut diminuer avec l'augmentation de la température.

Ces spécifications sont essentielles pour le dimensionnement et l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

Il existe plusieurs normes qui régissent la fabrication, l'installation et l'exploitation des systèmes photovoltaïques [3] :

NF EN 61730-2 Août 2007 : Qualification pour la sûreté de fonctionnement des modules photovoltaïques (PV)- Partie 2 : exigences pour les essais

NF EN 61727 Septembre 1996 : Systèmes photovoltaïques (PV)- Caractéristiques de l'interface de raccordement au réseau.

IEC 61723 : Guide de sécurité pour les systèmes PV raccordés au réseau montés sur les bâtiments.

NF C17-100 Décembre 1997 Protection contre la foudre- Protection des structures contre la foudre- Installation de paratonnerres.

CEI 60364-7-712 :2002 Mai 2002 Installations électriques des bâtiments- Partie 7-712 : règles pour les installations et emplacements spéciaux- Alimentations photovoltaïques solaires (PV)

NF EN 61173 Février 1995 Protection contre les surtensions des systèmes photovoltaïques (PV) de production d'énergie- Guide

DIN VDE 0126 : spécifications du fonctionnement de l'onduleur

CEI 61000-3-2 : Compatibilité électromagnétique (CEM) de l'onduleur.

GUIDE EDF/ARD (2003) : Accès au réseau basse tension pour les installations photovoltaïques – conditions techniques et contractuelles de raccordement.

GUIDE SER/ADEME : spécifications techniques relatives à la protection des biens et des personnes pour les installations photovoltaïques raccordées au réseau (juin 2006).

UTE C15-105 Juillet 2003 : Installations électriques à basse tension- Guide pratique- Détermination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection- Méthodes pratiques.

I.4. Applications des systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque

Il existe deux grandes catégories de systèmes de production d'énergie photovoltaïque :

Les systèmes autonomes et ceux connectés au réseau électrique.

I.4.1. Système autonome

Ces systèmes sont conçus pour satisfaire les besoins énergétiques d'un utilisateur déconnecté du réseau électrique. L'énergie générée par les panneaux photovoltaïques peut être soit utilisée immédiatement, soit stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure, notamment en l'absence de soleil. La configuration typique de ce type de système est illustrée dans la (figure I.3) [1].

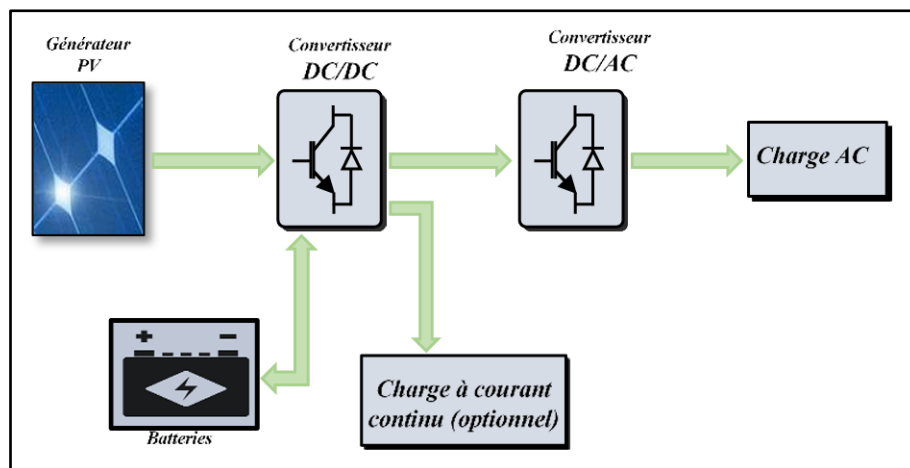


Fig I.3 Structure d'un système photovoltaïque autonome

I.4.2. Système connecté au réseau électrique

La configuration de ce type de système est illustrée dans la (figure I.4). Dans un système photovoltaïque connecté au réseau, l'énergie produite par les panneaux solaires est injectée en courant alternatif dans le réseau de distribution, selon deux modes de fonctionnement :

- L'injection totale de l'énergie produite pendant les périodes de production, sans consommation locale. Toute l'électricité générée est alors envoyée vers le réseau.
- L'injection du surplus de production, typique des installations domestiques, où l'énergie produite est d'abord consommée localement. Le surplus, c'est-à-dire la part non utilisée immédiatement, est ensuite injecté dans le réseau. Dans ce cas, le réseau joue également un rôle d'appoint en fournissant l'énergie nécessaire lorsque la production photovoltaïque est insuffisante [1].

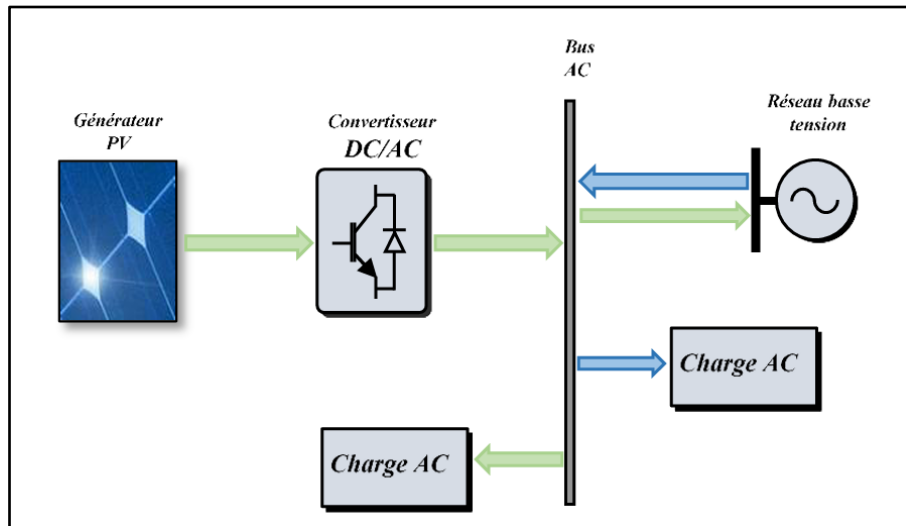


Fig I.4 Structure d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique

I.5. Systèmes PV connectés au réseau

I.5.1. Fonctionnalités générales des systèmes PV connectés au réseau

La structure générale d'un système PV est présentée dans la (figure I.5) :

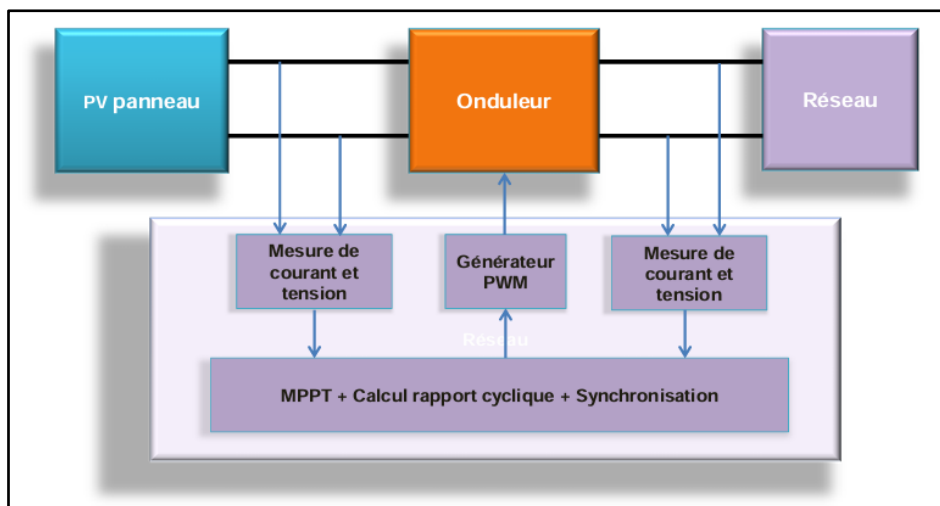


Fig I.5 Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

I.5.2. Normes des installations PV connectés au réseau

Dès lors qu'un onduleur est raccordé au réseau dans une installation photovoltaïque, il est impératif de respecter un ensemble de normes et de recommandations établies par les

instances internationales en charge de la distribution d'énergie. Parmi celles-ci, les normes IEEE, IEC et EN, fréquemment citées dans le domaine, fixent les exigences techniques nécessaires pour assurer une intégration sûre et fiable. Elles visent notamment à garantir une qualité d'énergie conforme, en limitant les perturbations harmoniques, en assurant la détection rapide des défauts réseau, et en prévenant les problèmes liés aux défauts d'isolement ou de mise à la terre [4].

Référence	IEC61727		IEEE1547		EN61000-3-2	
Puissance nominale	10 kW		30 kW		16 A*230 V = 3.7 kW	
Limitation en (%) des courants harmoniques	Rang (n)	THD %	Rang (n)	THD %	Rang (n)	THD %
	(3-9)	4.0 %	(2-10)	4.0 %	(3)	2.3 %
	(11-15)	2.0 %	(11-16)	2.0 %	(5)	1.14 %
	(17-21)	1.5 %	(17-22)	1.5 %	(7)	0.77 %
	(23-33)	0.6 %	(23-34)	0.6 %	(9)	0.4 %
			(>35)	0.3 %	(11)	0.33 %
				(13)	0.21 %	
				(15-39)		
THD du courant	5.0 %					
Facteur de puissance à 50% de la puissance nominale	0.9 %					
Injection du courant continu	< 1 % du courant nominal		< 0.5 % du Courant nominal		< 0.22 % pour un demi- pont (50W)	
Intervalle de tension	85 % - 110 % (196 V- 253V)		88 % - 110 % (97 V- 121V)			
Intervalle de fréquence	50 $\pm$ 1 Hz		59.3 Hz à 60.5			

Tableau I.1: Résumé des Normes pour les installations PV connectées au réseau.

I.5.3. Les topologies des installations PV

L'onduleur joue un rôle crucial en transformant le courant électrique continu généré par le champ photovoltaïque (PV) en un courant alternatif qui peut être injecté dans le réseau, qu'il s'agisse d'un réseau de distribution, de transport ou d'un mini-réseau autonome. En plus de la fiabilité et du coût, un aspect fondamental dans la conception de l'onduleur est son rendement de conversion DC/AC, du point de vue de l'utilisateur. Les onduleurs modernes affichent des rendements très élevés ; par exemple, Power Electronics produit des onduleurs capables

d'atteindre un rendement allant jusqu'à 97,8 % pour des puissances de quelques mégawatts. Comme tout système électronique, la durée de vie de l'onduleur est limitée, généralement entre 10 et 15 ans. Actuellement, on distingue principalement trois topologies, ou architectures électriques, de systèmes photovoltaïques (associations de modules PV et d'onduleurs), comme illustré dans la (figure I.6) :

- Système avec onduleur centralisé : un ou plusieurs grands onduleurs dimensionnés selon la puissance totale de la centrale PV, chaque onduleur étant alimenté par un champ PV composé de sous-champs, eux-mêmes constitués de chaînes parallèles de modules.
- Système avec onduleurs de chaînes : la centrale comprend un nombre important d'onduleurs, chacun étant alimenté par une ou plusieurs chaînes parallèles de modules PV. Cette option est particulièrement nécessaire lorsque plusieurs champs de modules sont orientés différemment.
- Système avec onduleurs intégrés aux modules PV (ou micro-onduleurs) : un onduleur est associé à 1 à 4 modules, en général.

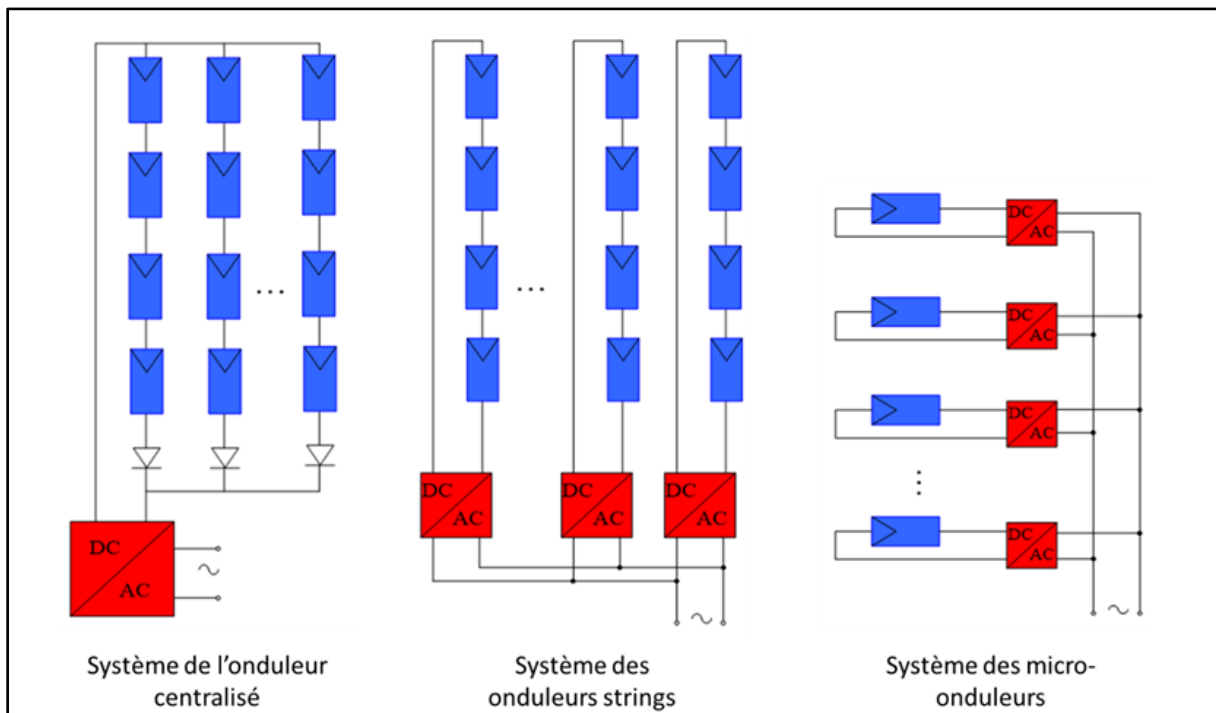


Fig I.6 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique

Le tableau récapitule les caractéristiques des différentes structures citées précédemment

	Onduleur Central	Onduleur String	Onduleur Intégré
Tension PV	340-800V	150-800V	17-90V
Pertes DC	~ 1-5% (en fonction de la tension et de la distance)	~ 1% (en fonction de la tension et de la distance)	Négligeable
Rendement	95%-97%	92%-96%	87%-93%
Maintenance	Simple	Difficile	Difficile

Tableau I.2 Caractéristiques techniques de différentes architectures PV

L'isolement galvanique de l'onduleur connecté au réseau est soumis aux normes en vigueur dans chaque pays. Par exemple, aux États-Unis, l'isolement galvanique est toujours requis. Pour assurer cet isolement, on utilise un transformateur basse fréquence (BF) ou haute fréquence (HF). Bien que cette dernière option soit plus compacte, il est crucial de prêter attention à la conception des transformateurs afin de minimiser les pertes, car celles-ci affecteront également le système photovoltaïque (PV) [4]. C'est pourquoi l'onduleur sans transformateur présente généralement le meilleur rendement et un coût réduit. Différents types d'onduleurs photovoltaïques sont illustrés dans la (figure I.7) :

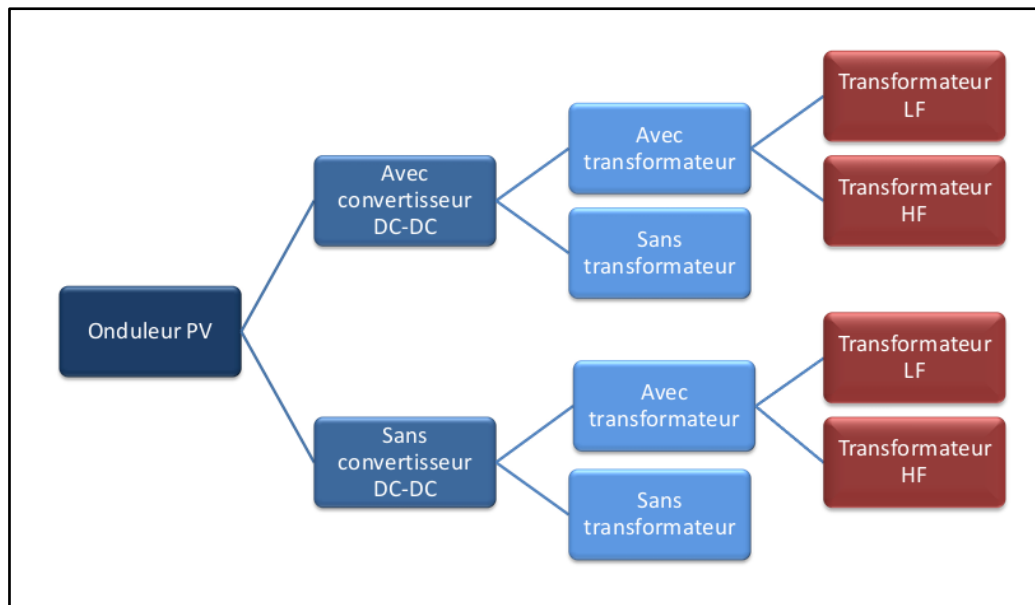


Fig I.7 Classement des onduleurs photovoltaïques

I.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.6.1. Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [5].

I.6.2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une

cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I.7. Conclusion

L'exploration des systèmes photovoltaïques connectés au réseau a permis de mieux comprendre leur importance dans le contexte de la transition énergétique actuelle. Ce type de production décentralisée représente une alternative concrète face à l'épuisement des ressources fossiles et aux enjeux environnementaux croissants. À travers l'étude des composants, des différentes configurations d'installation, et des normes techniques en vigueur, il devient évident que ces systèmes combinent à la fois simplicité de mise en œuvre, efficacité énergétique, et adaptabilité. Toutefois, leur intégration au réseau n'est pas exempte de contraintes, qu'il s'agisse de l'intermittence de la production, de la nécessité de garantir la stabilité électrique, ou encore de la conformité aux exigences réglementaires. Ce premier chapitre a donc posé les bases techniques et contextuelles nécessaires pour aborder, dans les chapitres suivants, les aspects liés à la modélisation, au contrôle et à l'optimisation de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Chapitre II.

Modélisation de la chaine PV connectée au réseau

II.1. Introduction :

Dans le contexte de la transition énergétique actuelle, l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) au réseau électrique représente un enjeu crucial. Ces systèmes facilitent une production décentralisée d'énergie renouvelable, mais leur performance optimale requiert une modélisation précise afin d'améliorer leur efficacité et leur interaction avec le réseau électrique. Une modélisation adéquate permet d'analyser le comportement du système sous différentes conditions climatiques, d'optimiser la conversion d'énergie et d'assurer une injection stable dans le réseau. Un système PV connecté au réseau se compose de plusieurs éléments clés, notamment le générateur photovoltaïque, les convertisseurs d'énergie et les dispositifs de contrôle. La modélisation du générateur est essentielle pour étudier l'influence de l'irradiation et de la température sur la production d'électricité. Les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) garantissent une extraction optimale de l'énergie. L'onduleur et les convertisseurs de puissance jouent un rôle fondamental dans l'adaptation et l'injection de l'énergie produite. Enfin, la synchronisation avec le réseau est indispensable pour assurer la stabilité du système. Ce chapitre présente les modèles mathématiques employés pour optimiser la chaîne PV connectée au réseau, constituant ainsi une base solide pour la simulation et l'analyse de ses performances en conditions réelles.

II.2. Description du système à étudier

Le système de conversion photovoltaïque à étudier est un système connecté au réseau électrique, tel qu'il est représenté sur la (figure II.1) :

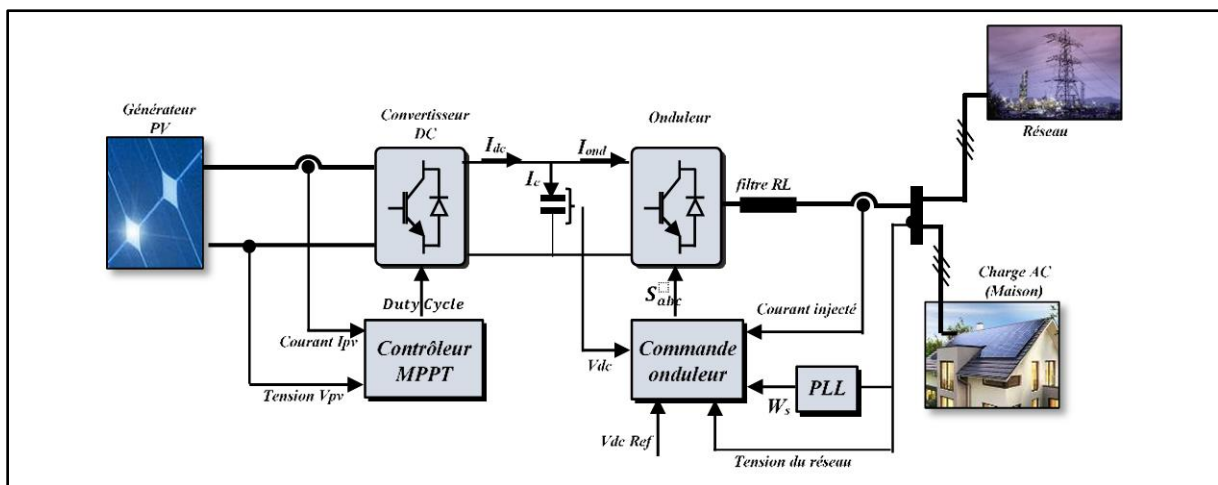


Fig II.1 Schéma synoptique du système de production photovoltaïque.

Le système est constitué d'un générateur photovoltaïque relié à un étage d'adaptation, intégrant un convertisseur DC/DC (Boost) qui assure la poursuite du point de puissance maximale. L'ensemble est connecté au réseau de distribution basse tension via un onduleur triphasé, conçu pour transférer l'intégralité de l'énergie générée par les panneaux solaires vers un bâtiment à faible consommation, afin de satisfaire ses besoins en énergie électrique. Tout excédent d'énergie produite sera injecté dans le réseau [1].

II.3. Principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques

II.3.1. Modules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque opère grâce à un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Ce phénomène se manifeste lorsque la lumière atteint la surface de la cellule, entraînant la génération d'une force électromotrice. La tension produite oscille généralement entre 0,3 et 0,7 V, en fonction du matériau employé, de sa configuration et de la température de la cellule.

II.3.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène qui permet de convertir l'énergie solaire, sous forme de photons, en électricité grâce à une cellule solaire composée de matériaux semi-conducteurs. Ce processus se déroule en trois étapes principales :

- Absorption des photons provenant de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.
- Extraction et circulation des charges électriques dans un circuit externe.

Une cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium dopées différemment : l'une de type P et l'autre de type N. Cette configuration forme une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsqu'un photon est absorbé par la cellule, son énergie est transmise aux électrons situés dans la jonction, provoquant ainsi la séparation des charges. Les électrons (charges négatives) sont dirigés vers la couche N, tandis que les trous (charges positives) migrent vers la couche P, créant ainsi une différence de potentiel entre les deux couches.

Sous l'effet de cette tension, les électrons franchissent la barrière de potentiel et génèrent un courant électrique continu. Ce courant est collecté grâce à des électrodes métalliques déposées sur les couches semi-conductrices. L'électrode supérieure est constituée d'une grille fine qui laisse passer la lumière, tandis que l'électrode inférieure assure la connexion électrique.

La tension maximale obtenue, appelée tension de circuit ouvert (V_{oc}), est d'environ 0,6 V lorsque le circuit est ouvert. En revanche, le courant maximal, appelé courant de court-circuit (I_{sc}), se produit lorsque les bornes de la cellule sont directement reliées, et il dépend principalement du niveau d'ensoleillement [6].

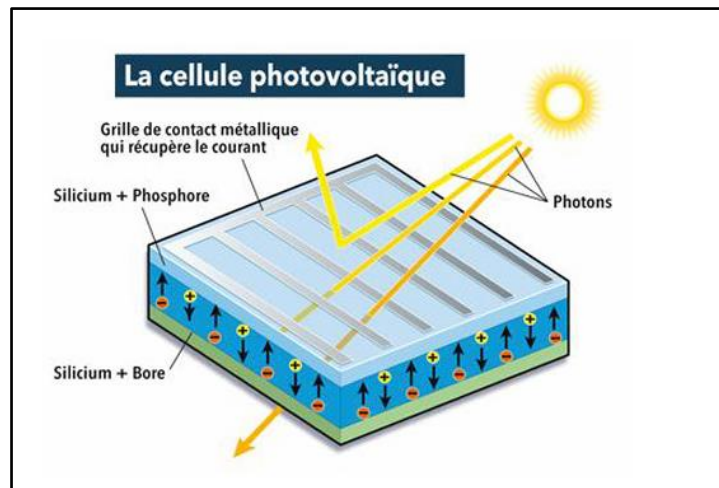


Fig II.2 Représentation schématique d'une cellule solaire

II.3.3. Conversion de l'énergie solaire en électricité

L'énergie solaire photovoltaïque exploite la lumière du soleil pour transformer l'énergie des photons en électricité. La lumière solaire (photons) transfère son énergie aux électrons présents dans un semi-conducteur, qui constitue une cellule photovoltaïque. Ce processus, connu sous le nom d'effet photovoltaïque, se déroule sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le terme « photovoltaïque » rend hommage au physicien Alessandro Volta, qui a joué un rôle crucial dans la recherche en électricité [7].

II.3.3.1. Principe de la conversion photovoltaïque

a. Le semi-conducteur

Les matériaux semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le germanium (Ge) et le sélénium (Se), ainsi que certains composés comme l'arséniure de gallium (GaAs) et le tellure de cadmium (CdTe), sont essentiels dans la fabrication des cellules photovoltaïques. Cependant, les cellules solaires à base de GaAs sont coûteuses à produire et sont principalement réservées aux applications spatiales. Aujourd'hui, la majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de silicium cristallin, en raison de ses propriétés avantageuses.

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est bien inférieure à celle des métaux. Pour qu'un électron lié à son atome dans la bande de valence devienne libre et contribue à la conduction du courant, il doit recevoir une quantité minimale d'énergie. Cette énergie lui permet d'atteindre des niveaux énergétiques plus élevés, dans la bande de conduction. Ce seuil énergétique, appelé "band gap" (E_g), s'exprime en électronvolts (eV) et varie selon le matériau semi-conducteur. Pour les applications photovoltaïques, il se situe généralement entre 1,0 et 1,8 eV.

b. Deux types de dopage sont possibles

- **Le dopage de type n (négatif)** consiste à ajouter à la structure cristalline d'un semi-conducteur des atomes étrangers capables de libérer un électron supplémentaire (charge négative). Ces électrons peuvent alors circuler librement dans le cristal. Par

exemple, le phosphore (P) est couramment utilisé pour doper le silicium (Si) de cette manière, ce qui permet d'augmenter considérablement la concentration en électrons libres dans le matériau.

- **Le dopage de type p (positif)**, quant à lui, repose sur l'ajout d'atomes qui créent des "trous" dans le réseau cristallin, c'est-à-dire des absences d'électrons qui facilitent la conduction électrique. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque les deux types de dopage (n et p) sont appliqués de part et d'autre d'une cellule photovoltaïque, les charges libres (électrons et trous) se recombinent, générant ainsi un champ électrique constant dû à la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Ce champ électrique permet aux charges produites par l'absorption du rayonnement solaire de circuler, contribuant ainsi au courant électrique généré par la cellule [5].

II.3.4. Association des panneaux PV

II.3.4.1. Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont parcourues par le même courant. La caractéristique résultante de ce type de groupement est obtenue en additionnant les tensions pour un courant donné [8].

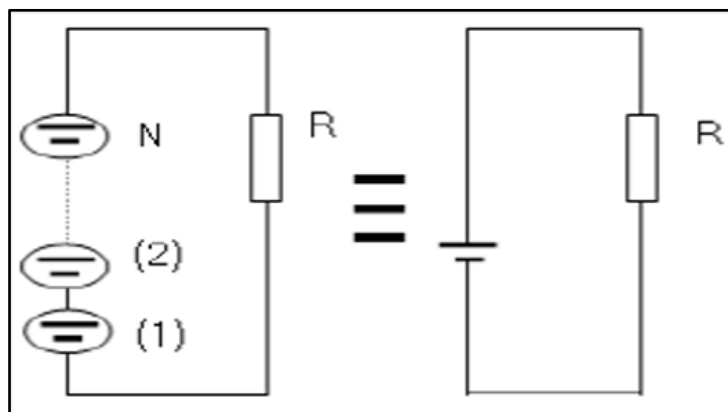


Fig II.3 Association des modules en série

La Figure II.4 montre la caractéristique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de ns cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

Avec :

$I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = nsV_{co}$: la tension de circuit ouvert.

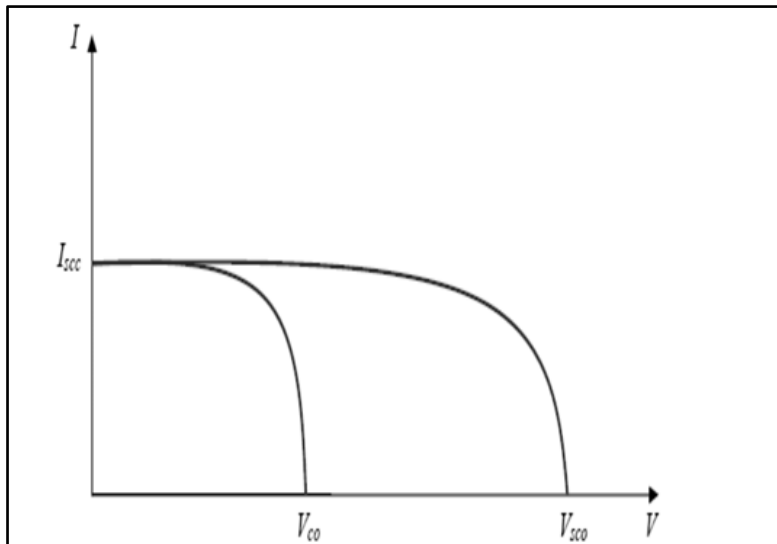


Fig II.4 Caractéristique résultante d'un groupement en série d'une cellule identique

II.3.4.2. Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, où chaque cellule est soumise à la même tension, les intensités s'additionnent. Ainsi, la caractéristique résultante est obtenue par l'addition des courants à une tension donnée. [8]

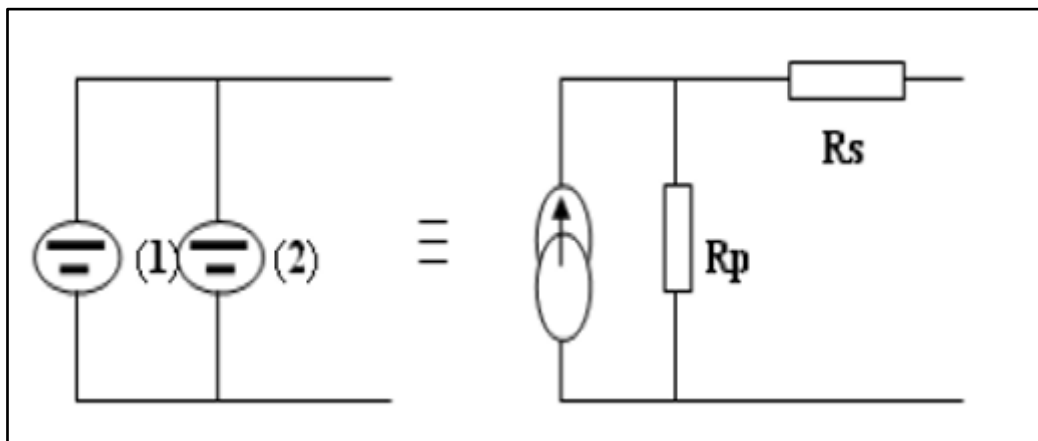


Fig II.5 Association des modules en parallèle

La (figure II.6) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

$I_{pcc} = nI_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

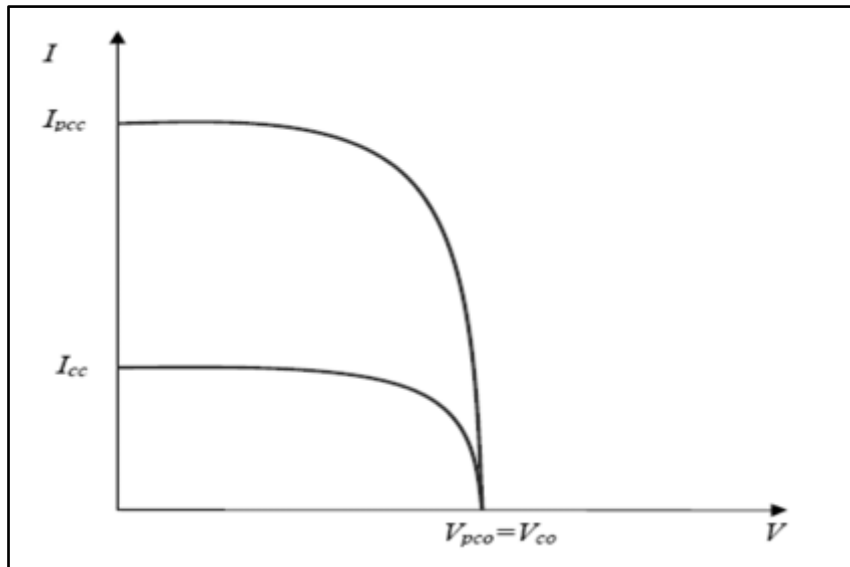


Fig II.6 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques

II.3.4.3. Association mixte (série-parallèle)

Le générateur photovoltaïque est composé d'un réseau en série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques, organisés en panneaux. La caractéristique électrique globale courant/tension du système photovoltaïque se déduit théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires, supposées identiques. Cela se fait par deux rapports d'affinité : ns parallèlement à l'axe des tensions et np parallèlement à l'axe des courants. [8]

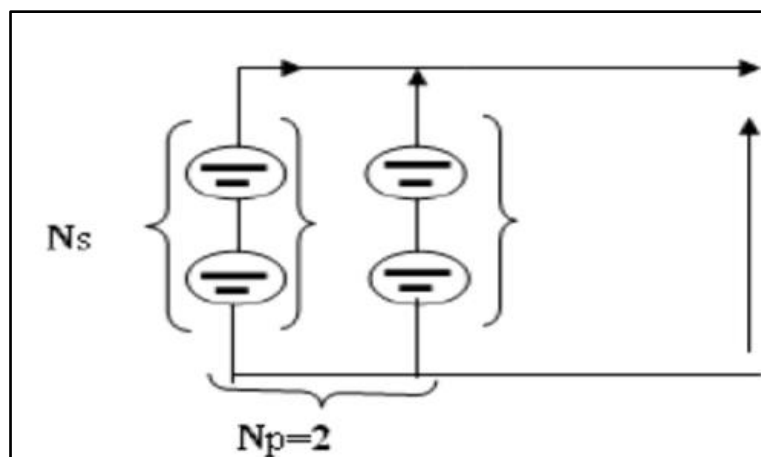


Fig II.7 Association mixte des modules

Ainsi que l'illustre-la (figure II.7), ns et np étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{co} = n_s \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

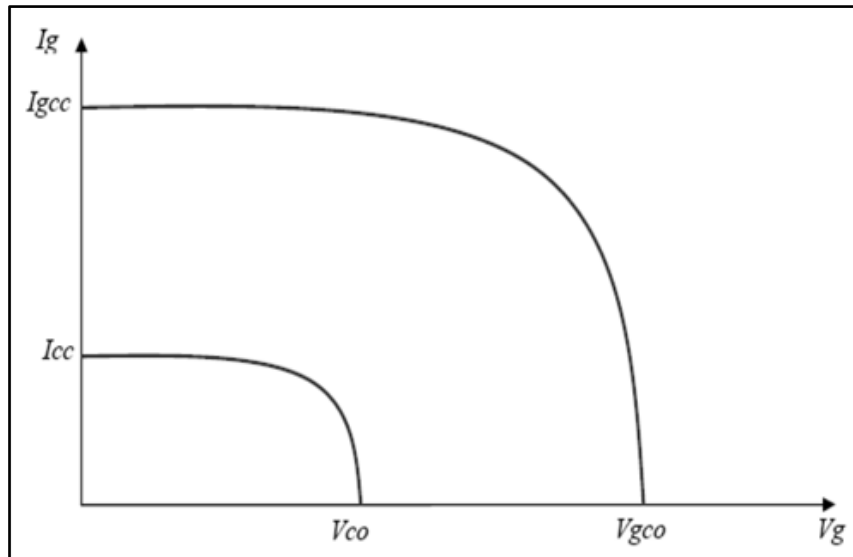


Fig II.8 Caractéristique d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont conçus pour augmenter la tension par association en série ou le courant par association en parallèle, en combinant un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc employé pour créer un module photovoltaïque (ou panneau photovoltaïque) répondant aux caractéristiques souhaitées, avec un courant et une tension adéquate [8].

II.3.5. Modules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque, également connue sous le nom de photopile, constitue l'unité fondamentale d'un système solaire. Fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs, elle a pour fonction de convertir directement la lumière en électricité.

Les cellules photovoltaïques se composent de plusieurs éléments essentiels :

- Une fine couche semi-conductrice, généralement en silicium, un matériau dont la conductivité électrique est relativement élevée. Cette couche possède une bande interdite, agissant comme une barrière d'énergie qui empêche les électrons de circuler librement sans une excitation extérieure. Ses propriétés électroniques peuvent également être ajustées pour optimiser les performances de la cellule.
- Une couche anti-reflet qui permet une pénétration maximale des rayons solaires.
- Une grille conductrice sur le dessus, ou cathode, et un métal conducteur sur le dessous, ou anode.
- Les modèles les plus récents intègrent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps à l'intérieur pour améliorer le rendement.

Une cellule photovoltaïque fonctionne grâce à un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Ce phénomène génère une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension produite varie généralement entre 0,3 V et 0,7 V, en fonction du type de matériau utilisé, de son agencement, ainsi que de facteurs externes tels que la température et le vieillissement de la cellule [9].

II.3.5.1. Types de panneaux solaires photovoltaïques

En fonction de la qualité du semi-conducteur utilisé, il existe quatre principales technologies de fabrication des panneaux photovoltaïques. Chaque type de panneau présente ses propres avantages et inconvénients [10] [11] :

- **Panneaux solaires amorphes** : La plupart des panneaux solaires amorphes offrent des puissances de sortie relativement faibles. Ils conviennent bien aux installations de petite taille, allant jusqu'à environ 300 watts, mais ne sont pas idéaux pour des installations plus grandes, où un plus grand nombre de panneaux serait nécessaire. Les coûts additionnels de montage et de câblage de ces panneaux supplémentaires peuvent annuler leur avantage de coût. Actuellement, ces panneaux sont les moins efficaces disponibles, avec un taux de conversion d'environ 6 à 8 %.
- **Panneaux solaires polycristallins** : Ces panneaux sont fabriqués à partir de multiples cellules solaires, chacune constituée de gaufres de cristaux de silicium, avec des niveaux d'efficacité variant de 12 à 16 %. Le processus de fabrication des panneaux solaires polycristallins est complexe, ce qui les rend coûteux à l'achat.
- **Panneaux solaires monocristallins** : Fabriqués à partir de cellules solaires plus petites, chacun étant issu d'une seule plaquette en cristal de silicium, ces panneaux sont parmi les plus efficaces disponibles aujourd'hui, avec des niveaux d'efficacité allant de 15 à 19 %.
- **Panneaux solaires hybrides** : Ces panneaux combinent des cellules solaires monocristallines avec des couches minces amorphes entre chaque cellule monocristalline. Cette combinaison offre les avantages de l'efficacité des panneaux monocristallins tout en améliorant les performances en conditions d'ombre et à haute température grâce à la technologie amorphe. Les panneaux hybrides affichent des niveaux d'efficacité compris entre 18 et 22 %.

II.3.6. Caractéristiques et performances des systèmes photovoltaïques

II.3.6.1. Puissance crête :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . En France l'éclairement maximum reçu, la puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir.

II.3.6.1. Rendement :

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

II.3.6.2. Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale P_o et la puissance maximale P_m que peut avoir la cellule : V_{co}, I_{cc} .

II.3.6.3. Caractéristique courant-tension d'un module :

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [12].

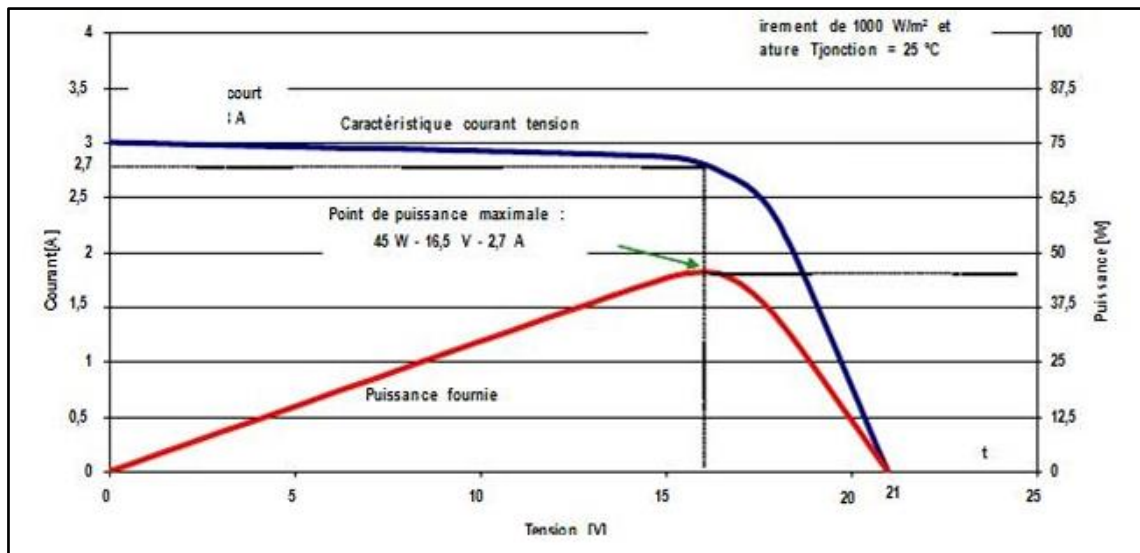


Fig II.9 Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

II.3.6.4. Influence de l'Éclairement :

Les figures présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

Nous avons fixé la température pour différents éclairagements [13].

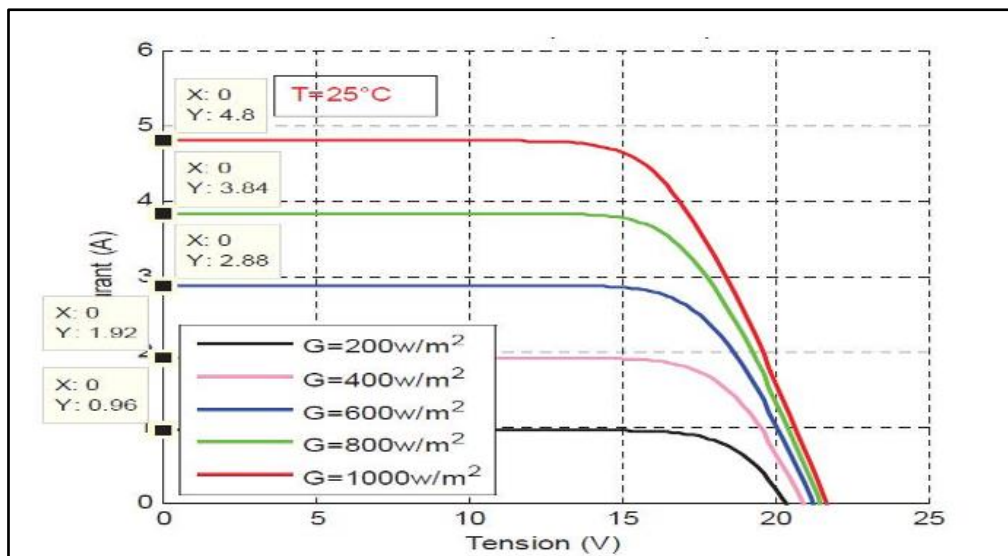


Fig II.10 La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement

On remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=4.8\text{A}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ le courant $I_{sc}=3.84\text{A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement [13].

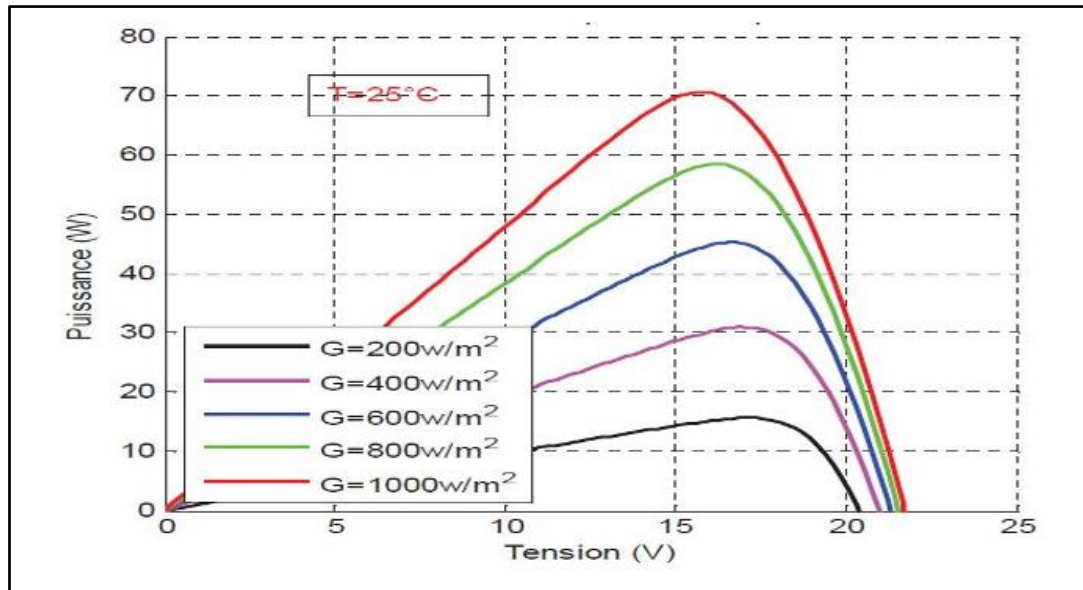


Fig II.11 La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement

II.3.6.1. Influence de la Température :

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figures II.11 II.12 d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures [13]:

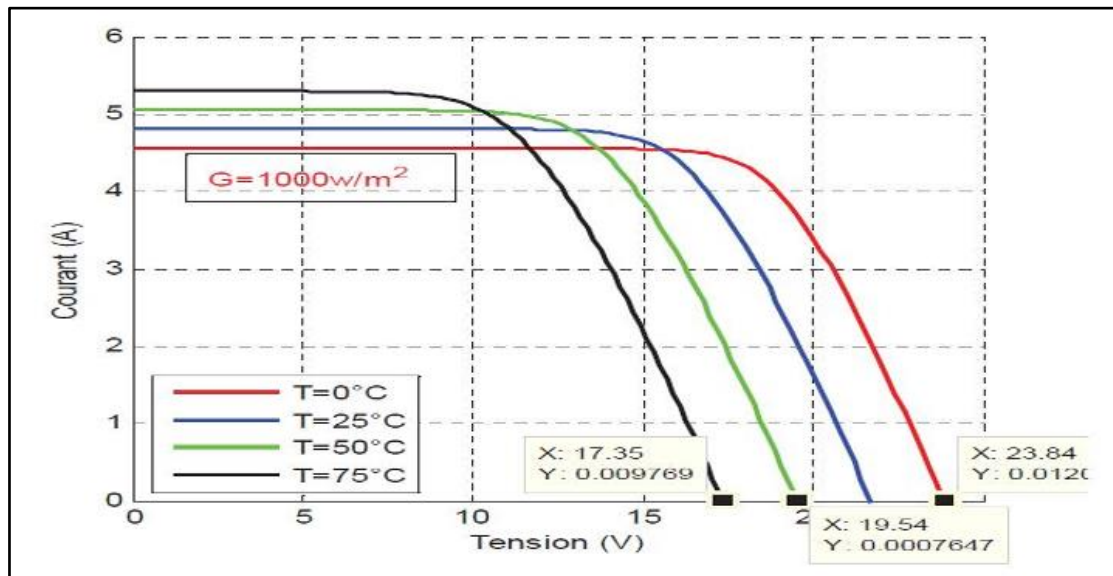


Fig II.12 La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température

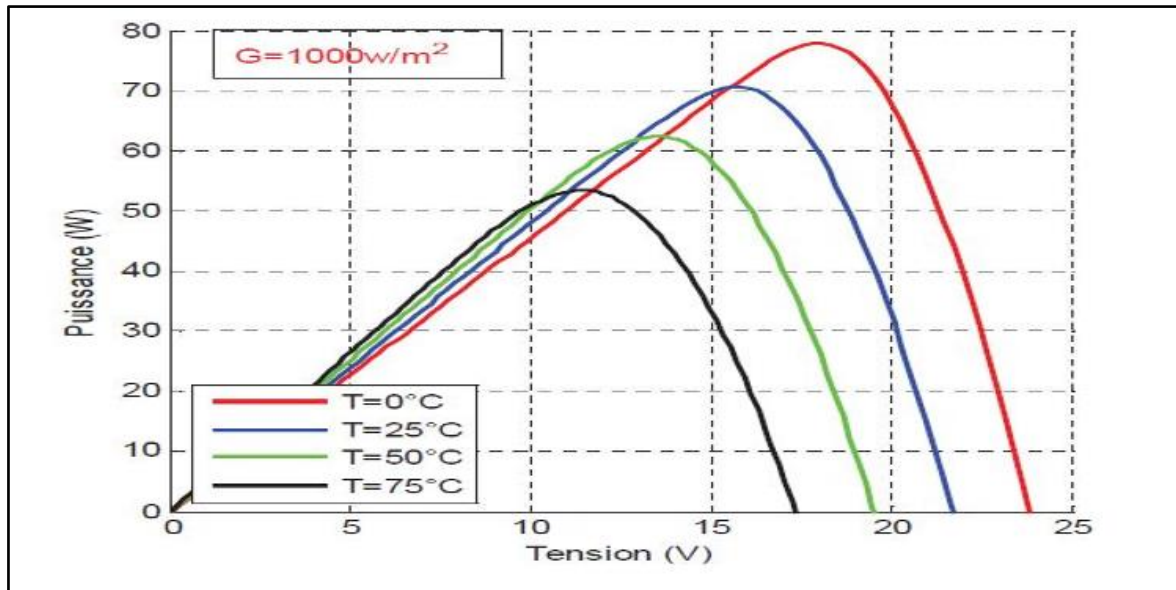


Fig II.13 La caractéristique de $P = f(V)$ en fonction de température

Nous observons que le courant varie en fonction de la température, car il augmente légèrement à mesure que la température s'élève. En revanche, nous constatons que la température a un impact négatif sur la tension à circuit ouvert. Lorsque la température augmente, la tension à circuit ouvert diminue. De plus, la puissance maximale du générateur diminue également avec l'augmentation de la température [13].

II.3.7. Principe et modélisation du générateur photovoltaïque :

Pour modéliser un générateur photovoltaïque, il est crucial de s'appuyer sur le fonctionnement de la cellule photovoltaïque elle-même. Comparable à une jonction PN, semblable à celle d'une diode utilisée en électronique, la cellule est souvent représentée par un générateur de Norton. L'intensité du courant fournie par ce modèle dépend directement de l'éclairement reçu, ainsi que des pertes ohmiques, modélisées par une résistance représentant les conducteurs de connexion. Plusieurs circuits équivalents ont été proposés dans la littérature pour décrire avec précision le comportement électrique de la cellule photovoltaïque [14] [15].

- Le modèle idéal est illustré par le circuit de la figure II.14, composé d'une seule diode, en négligeant le courant de fuite au niveau de la jonction, et caractérisé par une résistance shunt R_{sh} qui est omise dans ce modèle.

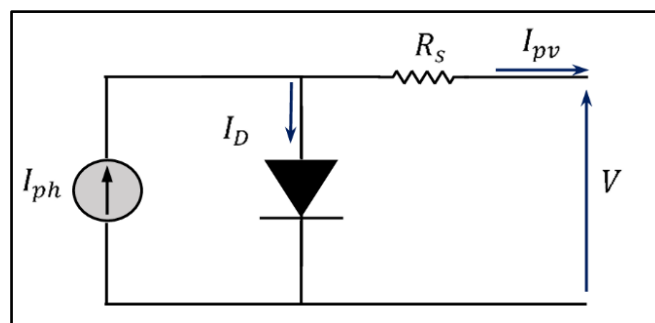


Fig II.14 Circuit équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque

Le courant du module constitué de (Ns, Np) cellules est donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_{rs} * \left(e^{\left(\frac{q \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p} \right)}{a \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (II.1)$$

Où q représente la charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C), K est la constante de Boltzmann, a est le facteur d'idéalité de la diode, T est la température de la cellule en Kelvin et V_{pv} la tension du module photovoltaïque.

I_{rs} Est le courant de saturation inverse de la cellule à la température T , il varie en fonction de la température selon l'équation suivante :

$$I_{rs} = I_0 \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{E_g}{a \cdot K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (II.2)$$

Où I_0 est le courant de saturation inverse à la température de référence T_r de la cellule et E_g est l'énergie de bande interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule. Le courant photonique I_{ph} varie en fonction de la température et le rayonnement de la cellule comme suit :

$$I_{ph} = [I_{sc0} + K_i(T - T_r)] * \frac{G}{1000} \quad (II.3)$$

I_{sc0} Est le courant de court-circuit à la température et à l'éclairement de référence, G correspond au rayonnement instantané ($Watt/m^2$) et G_{ref} est l'éclairement de référence. K_i Est le coefficient de température du matériau.

- Le modèle à une seule diode et avec une résistance shunt caractérisant les pertes de courant est le plus couramment utilisé pour modéliser la conversion de l'énergie photovoltaïque dans une cellule. Le circuit équivalent est représenté par la figure II.15

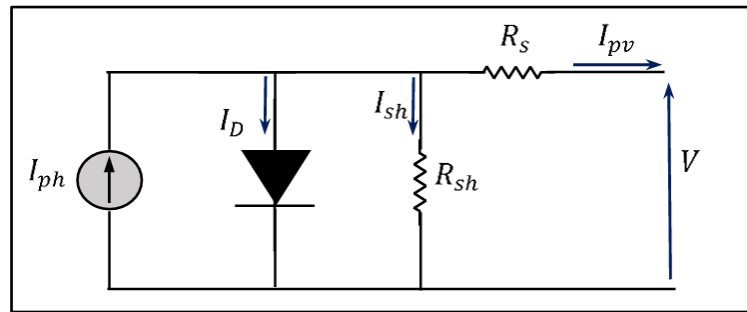


Fig II.15 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule diode

Le courant généré par le module photovoltaïque est régi par la relation suivante :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_{rs} * \left(e^{\left(\frac{q \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p} \right)}{a \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_p} \right) \quad (II.4)$$

II.4. Les Hacheurs

L'hacheur est un convertisseur continu/continu qui permet de transformer une énergie continue d'un certain niveau de tension ou de courant en une énergie continue d'un autre niveau. Il est principalement utilisé pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour alimenter une charge en courant continu [16].

L'hacheur est constitué de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui permet aux hacheurs d'atteindre un rendement élevé [17].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [18].

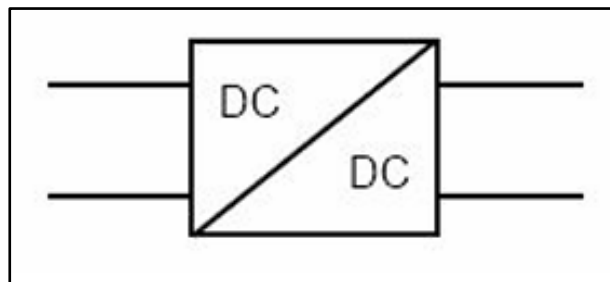


Fig II.16 Symbole d'un convertisseur DC-DC.

II.4.1. Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [19].

- Des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- Des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- Hacheur abaisseur (ou buck),
- Hacheur élévateur (ou boost),
- Hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

II.4.1.1. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [20].

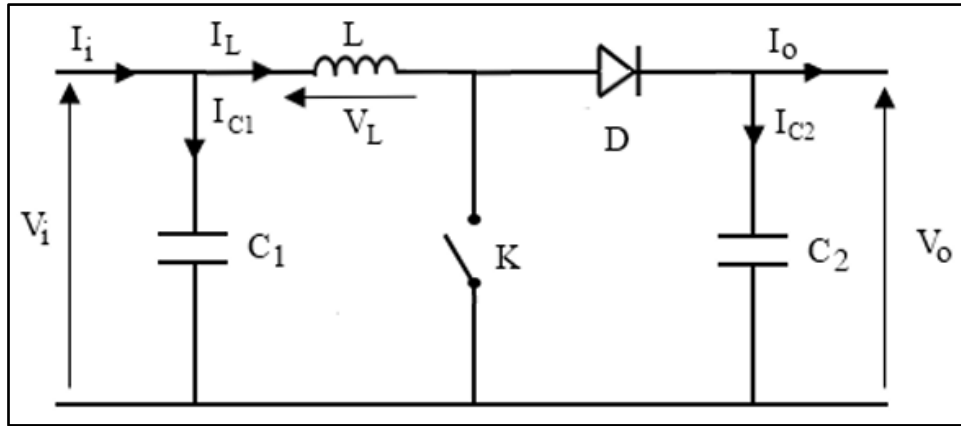


Fig II.17 Schéma électrique d'un hacheur boost

II.4.1.2. Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_o$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [21] :

$$V_o(1 - \alpha) = V_i \quad (II.5)$$

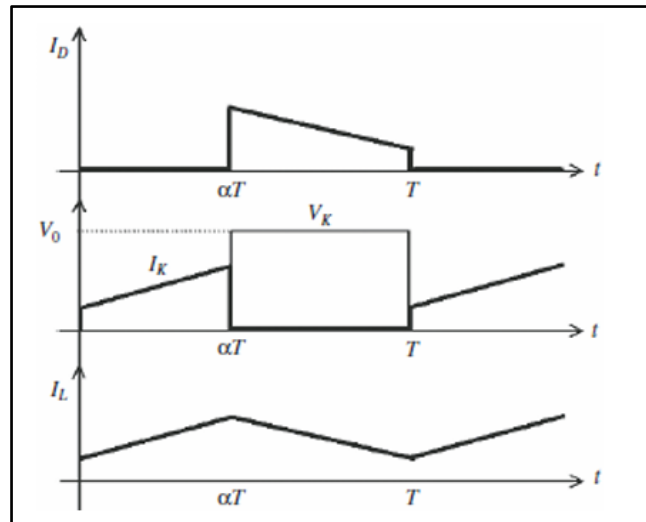


Fig II.18 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

II.4.1.3. Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions de l'hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la (figure II.19), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé d'entre $[0, \alpha T_e]$ [22].

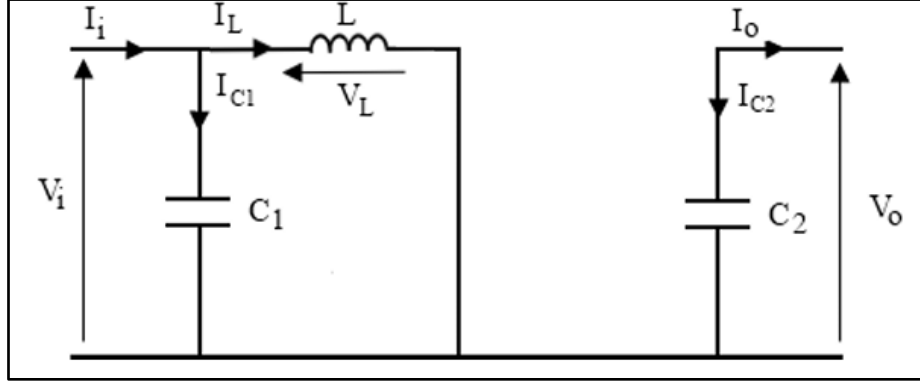


Fig II.19 Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.6)$$

$$I_{C2}(t) = C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad ((II.7)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (II.8)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

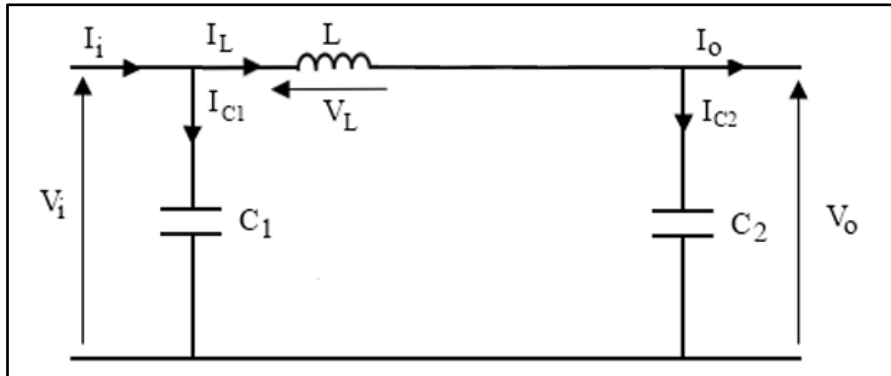


Fig II.20 Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.9)$$

$$I_{C2}(t) = C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (II.10)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (II.11)$$

II.4.2. Modélisation du convertisseur DC/DC (Hacheur Boost) :

L'étage d'adaptation joue un rôle crucial dans un système photovoltaïque. Il est généralement constitué d'un ou plusieurs convertisseurs qui ajustent la tension générée par le générateur photovoltaïque (GPV) à celle requise par la charge. Dans ce contexte, nous employons un convertisseur continu-continu de type Boost (élevateur), qui s'intercale entre le GPV et la charge. Ce dispositif permet non seulement d'augmenter la tension fournie par les panneaux afin qu'elle soit compatible avec celle de la charge, mais il sert également de plateforme pour l'implémentation des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Le schéma de fonctionnement du convertisseur Boost est illustré dans la figure ci-dessous :

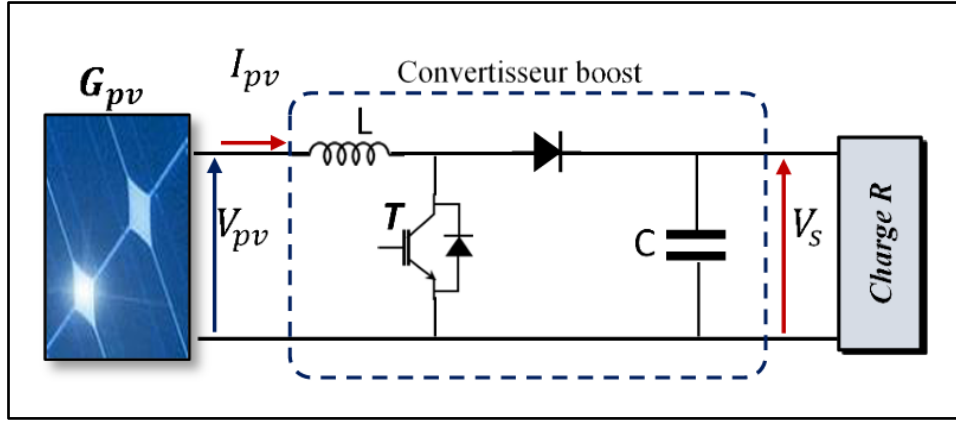


Fig II.21 Circuit du convertisseur DC-DC Boost

Le modèle mathématique est obtenu en appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit précédent en considérant le régime de fonctionnement et l'état de l'interrupteur 'T' [23].

$$\begin{cases} L \frac{dI_{pv}}{dt} = V_{pv} - (1-\alpha)V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = (1-\alpha)I_{pv} - \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (II.12)$$

α : étant le rapport cyclique.

Les équations dynamiques du courant dans l'inductance et de la tension aux bornes du condensateur sont réécrites dans l'espace d'état, en posant $x_1 = I_{pv}$ et $x_2 = V_s$, sous la forme $\dot{X} = AX + BU$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-\alpha}{L} \\ \frac{1-\alpha}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{pv} \quad (II.13)$$

Dans ce modèle, les variables d'état considérées sont le courant circulant dans l'inductance et la tension de sortie aux bornes du condensateur C.

II.5. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique qui transforme l'énergie électrique continue (DC) en énergie alternative (AC). Cette conversion est réalisée grâce à un système de commande basé sur des semi-conducteurs. L'onduleur permet ainsi de générer une tension alternative dont la fréquence et l'amplitude peuvent être ajustées en fonction des besoins du récepteur, en appliquant une séquence de commande adaptée. [24]

II.5.1. Structure d'un onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. Sa structure repose sur l'association en parallèle de trois bras, chaque bras se compose de deux interrupteurs. Leur fonctionnement doit être complémentaire pour éviter le court-circuit de la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et se compose d'un transistor de puissance commandes associés à deux diodes en parallèle monophasés en demi-point ou en pont, produisant trois tensions de sortie déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

II.5.2. Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur)

L'onduleur de tension génère à sa sortie des signaux de tension sous forme d'ondes en créneaux, modulées en largeur d'impulsions (MLI ou PWM en anglais). Afin de lisser ces signaux et d'améliorer la qualité du courant injecté, une inductance est insérée entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau, que ce soit pour un système monophasé ou triphasé. Ce composant joue le rôle de filtre et permet d'obtenir des courants en sortie présentant une forme quasi sinusoïdale, conforme aux exigences de qualité de l'énergie.

L'onduleur triphasé a pour fonction principale d'assurer le transfert de la puissance générée par le champ photovoltaïque vers le réseau électrique. Il est constitué de trois bras de commutation, chacun formé de deux interrupteurs électroniques. Chaque interrupteur est composé d'un transistor associé à une diode montée en antiparallèle [8]. Lorsqu'il est commandé, chaque bras agit comme un commutateur à deux états, permettant de générer deux niveaux de tension en sortie, nécessaires à la synthèse de la tension alternative injectée dans le réseau.

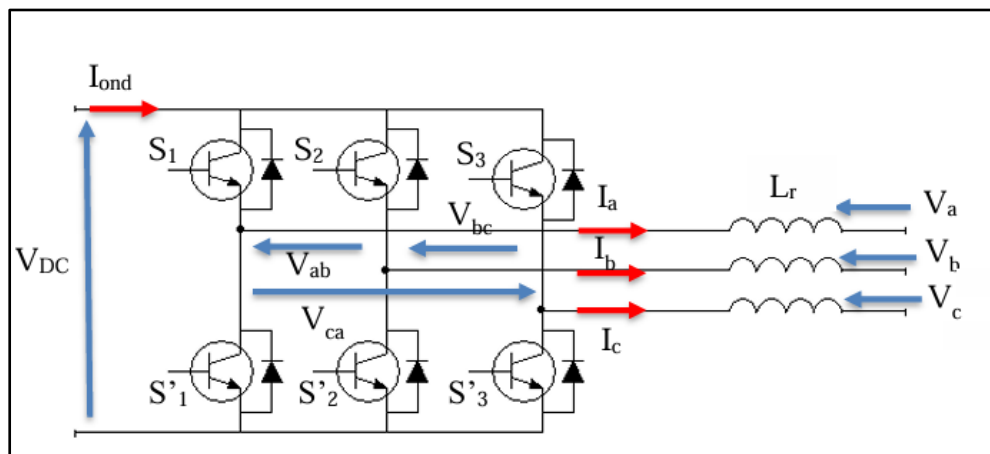


Fig II.22 Schéma de l'onduleur de la tension

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F qui détermine ses états de conduction :

$$F1 = \begin{cases} 1 & \text{si } S1 \text{ passant et } S'1 \text{ ouvert.} \\ 0 & \text{si } S'1 \text{ passant et } S1 \text{ ouvert.} \end{cases}$$

$$F2 = \begin{cases} 1 & \text{si } S2 \text{ passant et } S'2 \text{ ouvert.} \\ 0 & \text{si } S'2 \text{ passant et } S2 \text{ ouvert.} \end{cases}$$

$$F3 = \begin{cases} 1 & \text{si } S3 \text{ passant et } S'3 \text{ ouvert.} \\ 0 & \text{si } S'3 \text{ passant et } S3 \text{ ouvert.} \end{cases}$$

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont liées aux fonctions de connexion S via les équations suivantes :

$$V_{ab} = V_{DC}(S_1 - S_2) \quad (\text{II.14})$$

$$V_{bc} = V_{DC}(S_2 - S_3) \quad (\text{II.15})$$

$$V_{ca} = V_{DC}(S_3 - S_1) \quad (\text{II.16})$$

Par voie conséquence les tensions simples Va, Vb, Vc sont alors synthétisées ainsi [25] :

$$V_a = \frac{V_{DC}}{3}(2S_1 - S_2 - S_3) \quad (\text{II.17})$$

$$V_b = \frac{V_{DC}}{3}(2S_2 - S_1 - S_3) \quad (\text{II.18})$$

$$V_c = \frac{V_{DC}}{3}(2S_3 - S_1 - S_2) \quad (\text{II.19})$$

En définitif, l'équation matricielle suivante permet de modéliser l'onduleur de tension à deux niveaux :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$I_{ond} = S_1 I_a + S_2 I_b + S_3 I_c \quad (\text{II.21})$$

II.6. Modélisation de la liaison au réseau

II.6.1. Modèle du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (\text{II.22})$$

Le courant du condensateur de filtrage est issu d'un nœud où circulent le courant du GPV et le courant modulé par le convertisseur :

$$i_c = I_{pv} - i_{ond} \quad (\text{II.23})$$

En fonction des états de commutation (S_a, S_b, S_c), le courant à l'entrée de l'onduleur peut s'écrire comme suit :

$$i_{ond} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{II.24})$$

II.6.2. Modèle du filtre coté réseau

Les équations dynamiques de la liaison du convertisseur avec le filtre inductif et le réseau sont décrits par le système d'équations :

$$\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{P1} \\ V_{P2} \\ V_{P3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant les tensions modulées de sortie du convertisseur (V_{m1}, V_{m2}, V_{m3}) par leurs expressions :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

On obtient le système d'équations :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{P1} \\ V_{P2} \\ V_{P3} \end{bmatrix} + \frac{V_{DC}}{3L} \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & +2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & +2S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

En considérant une modulation sinusoïdale des états de commutation, le système d'équations décrit la transformation dans le plan de PARK pour un référentiel lié au champ tournant du réseau :

$$\begin{bmatrix} V_{md} \\ V_{mq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L\omega_s \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{pd} \\ V_{pq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

En considérant les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{bmatrix} e_{cd} \\ e_{cq} \end{bmatrix} = L\omega_s \begin{bmatrix} +I_d \\ -I_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

De même, les tensions aux bornes des filtre inductifs sont définis par :

$$\begin{bmatrix} V_{fd} \\ V_{fq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{md} \\ V_{mq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{cq} \\ e_{cd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{pd} \\ V_{pq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Les équations différentielles peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{fd} \\ V_{fq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

La figure II.23 présente le modèle de la liaison avec le réseau.

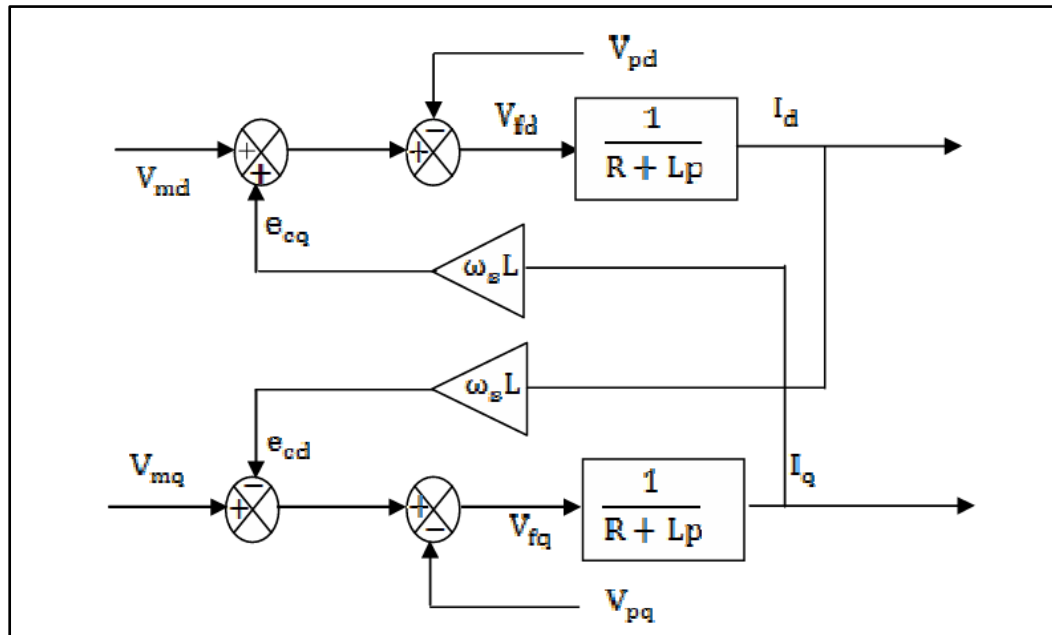


Fig II.23 Modèle de la liaison au réseau.

II.6.3. Phase Locked Loop (PLL)

Pour connecter des sources photovoltaïques au réseau électrique, il est essentiel de synchroniser la tension alternative du générateur photovoltaïque, c'est-à-dire les courants injectés, avec celle du réseau. C'est pourquoi il est nécessaire de disposer des informations concernant la phase et la fréquence de la tension du réseau [26].

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes classiques telles que :

- « Zero Crossing » qui utilise une logique de OU exclusif ;
- Méthode de filtrage de la tension comme $\alpha\beta$ filtre ou dq filtre.
- Méthode PLL (Phase Locked Loop)

La méthode PLL se distingue par son efficacité remarquable et sa structure variée, qui se compose systématiquement de trois blocs : un détecteur de phase, un correcteur et un oscillateur commandé en tension.

Dans le cadre d'un système triphasé, les techniques avancées de PLL permettent d'assurer une poursuite robuste de la phase du réseau, même en présence de perturbations potentielles telles que des sauts de phase, des creux et des bosses de tension, des harmoniques, ainsi que des sauts de fréquence [26].

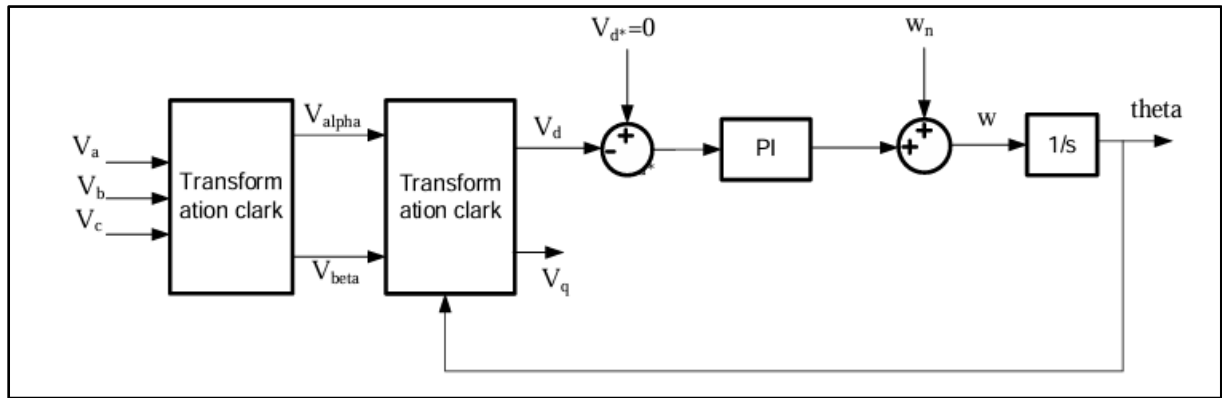


Fig II.24 Structure de principe d'une PLL triphasée

II.7. Conclusion :

La recherche présentée dans ce chapitre a permis de modéliser les éléments clés de la chaîne de conversion d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Le générateur photovoltaïque a été modélisé à l'aide de divers modèles électriques, facilitant ainsi une compréhension approfondie de son comportement et de ses interactions avec le système global. L'analyse du convertisseur DC/DC de type Boost a mis en lumière son rôle crucial dans l'adaptation de la tension et l'extraction optimale de puissance. Cette modélisation a été étendue par une étude dans l'espace d'état, visant à optimiser la mise en œuvre de stratégies de commande efficaces, telles que la commande en mode glissant. De plus, plusieurs méthodes de suivi du point de puissance maximal (MPPT) ont été examinées, allant des techniques traditionnelles à des approches avancées telles que la commande par logique floue, reconnues pour leur robustesse et leur facilité d'implémentation. L'ensemble de ces éléments constitue une base fondamentale pour le développement des lois de commande qui seront explorées dans le chapitre suivant.

Chapitre III.

Commande de la chaine PV

III.1. Introduction

La performance d'un système photovoltaïque est étroitement liée à la qualité de sa gestion. Pour maximiser l'énergie extraite, il est impératif d'adopter une stratégie efficace de suivi du point de puissance maximale (MPPT), en intervenant sur le convertisseur DC/DC. Par ailleurs, la conversion de l'énergie continue en courant alternatif nécessite une gestion précise de l'onduleur, notamment à travers des techniques telles que la commande par hystérésis. L'ensemble de ces approches contribue à optimiser la production, à améliorer la stabilité du système et à garantir une injection d'énergie conforme aux exigences du réseau.

III.2. Commande du convertisseur DC/DC pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT)

III.2.1. Principe général de la poursuite du point de puissance maximale

Les courbes $P = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque illustrent l'existence d'un point de puissance maximale, qui est fortement influencé par les conditions climatiques, notamment la température et l'irradiation. Cependant, le point de fonctionnement réel du système dépend non seulement de ces facteurs environnementaux, mais également de la nature de la charge connectée. Pour permettre au générateur photovoltaïque de fonctionner en permanence à son point de puissance maximale, quelles que soient les variations climatiques ou les fluctuations de charge, des techniques spécifiques d'extraction de puissance sont mises en œuvre à l'aide de convertisseurs statiques. Ces méthodes reposent généralement sur des algorithmes itératifs qui ajustent dynamiquement le point de fonctionnement du système afin de le faire converger vers la puissance maximale disponible. L'ensemble de ces techniques se divise en deux grandes catégories [27].

- Les méthodes indirectes sont souvent spécifiques à chaque type de panneau et ne peuvent pas être généralisées. Elles reposent sur une base de données qui compile les caractéristiques des panneaux photovoltaïques dans diverses conditions climatiques, incluant des techniques telles que la méthode d'ajustement de courbe, la méthode de la table de correspondance (Look-up table) et la méthode de la tension en circuit ouvert du générateur, entre autres.
- Les méthodes directes, quant à elles, s'appuient sur la mesure continue de la tension et du courant du panneau, avec un algorithme fondé sur la variation de ces mesures. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées, on trouve la méthode Perturb & Observe et la méthode de l'incrément de conductance.

Le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque repose sur sa capacité à opérer au niveau du point de puissance maximale de ses caractéristiques. Pour atteindre cet objectif, des lois de commande spécifiques ont été développées. Connue sous le nom de « recherche du point de puissance maximale » ou *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) en anglais, cette stratégie vise à ajuster en permanence le point de fonctionnement du générateur afin de garantir une adaptation optimale à la charge. Ce réglage dynamique permet ainsi de transférer, à chaque instant, la quantité maximale d'énergie disponible [28].

Pour un éclairement et température donnés, les caractéristiques I-V et I-P du générateur Photovoltaïque connecté à la charge résistive R_{ch} Il apparaît que :

Le générateur PV fonctionne à sa puissance maximale (P_{max}) lorsque :

$$V_{pv} = V_{opt}, I_{pv} = I_{opt} \quad (III.1)$$

$$R_{ch} = R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (III.2)$$

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} = P_{max} = V_{opt} * I_{opt} \quad (III.3)$$

Pour un éclairement donné, la condition optimale de fonctionnement des générateurs photovoltaïques est alors caractérisée par une tension V_{opt} et un courant I_{opt} . Le produit V_{opt} par I_{opt} constitue ainsi le maximum de puissance qu'on peut extraire du module photovoltaïque. Ce point est appelé point de puissance maximale (PPM) du module Photovoltaïque pour une température et un éclairement donné. Il est caractérisé par une résistance interne optimale R_{opt} du générateur photovoltaïque.

- Les points P1, P2 et PPM, Figure sont les points de fonctionnement du système dans les conditions suivantes : $R_{ch} < R_{opt}$, $R_{ch} = R_{opt}$, $R_{ch} > R_{opt}$.
- Lorsque la valeur de la charge est supérieure ou inférieure à celle correspondant aux conditions optimales (R_{opt}) la puissance fournie par le générateur est inférieure à celle optimale (P_{max}).

Donc, dans le cas d'une charge purement résistive, le point PPM correspond à une résistance optimale R_{opt} qu'il faut connecter au module, pour un éclairement bien déterminé [28].

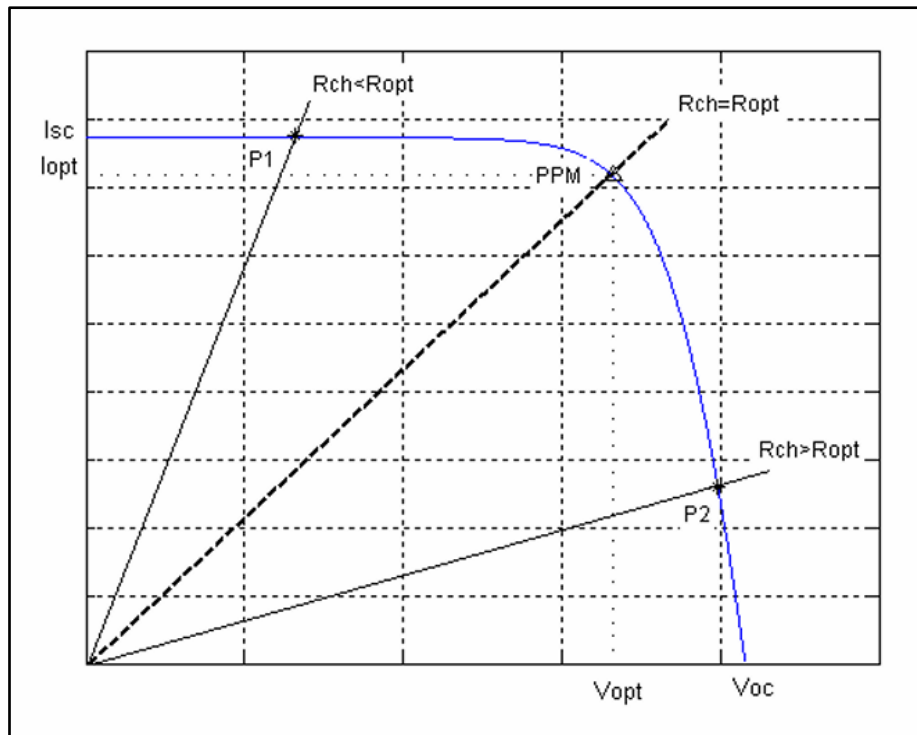


Fig III.1 Caractéristique du système PV pour les trois cas $R_{ch} < R_{opt}$, $R_{ch} = R_{opt}$, $R_{ch} > R_{opt}$.

Pour illustrer le fonctionnement de l'algorithme de recherche du point de puissance maximale dans un panneau photovoltaïque, nous allons brièvement expliquer le principe de la méthode de l'incrément de conductance.

III.2.2. Méthodes de MPPT :

De nombreux algorithmes de contrôle existent pour suivre l'MPPT d'un panneau photovoltaïque, Dans ce qui suit on va citer les différentes techniques :

- Methode Perturb and Observe (P&O)
- Commande MPPT par mode glissant
- Commande par logique flou
- Méthode de l'Incrément de conductance (Inc-Cond)
- Fraction de la tension de circuit ouvert
- Fraction du courant de court-circuit

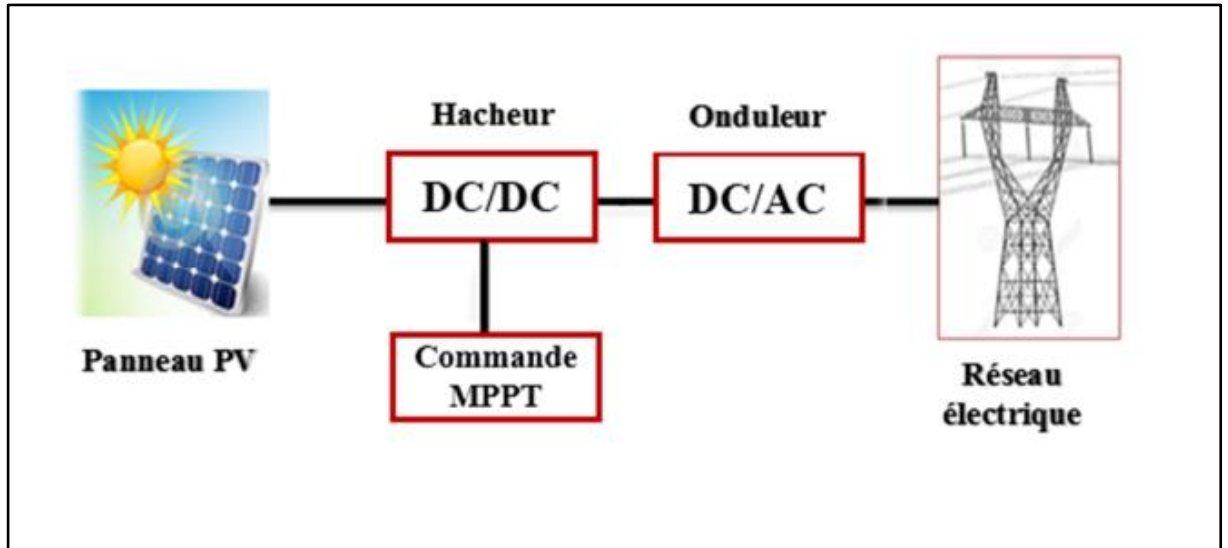


Fig III.2 Architecteur du system réalisé de l'hacheur avec les MPPT

III.2.2.1. Methode Perturb and Observe (P&O)

Cette méthode est largement adoptée en raison de sa simplicité d'implémentation. Elle nécessite seulement un nombre limité de mesures et repose sur un mécanisme de rétroaction. Le principe consiste à introduire délibérément une légère variation (positive ou négative) de la tension aux bornes du générateur photovoltaïque, avec une constante prédéfinie C . La puissance obtenue après cette perturbation est ensuite comparée à celle mesurée précédemment. Si cette perturbation entraîne une augmentation de la puissance, la variation se poursuit dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, la direction de la perturbation est inversée. En résumé, lorsque la modification de la tension permet d'accroître la puissance extraite, le système continue dans la même direction ; sinon, il ajuste sa trajectoire pour retrouver la convergence vers le point de puissance maximale [29].

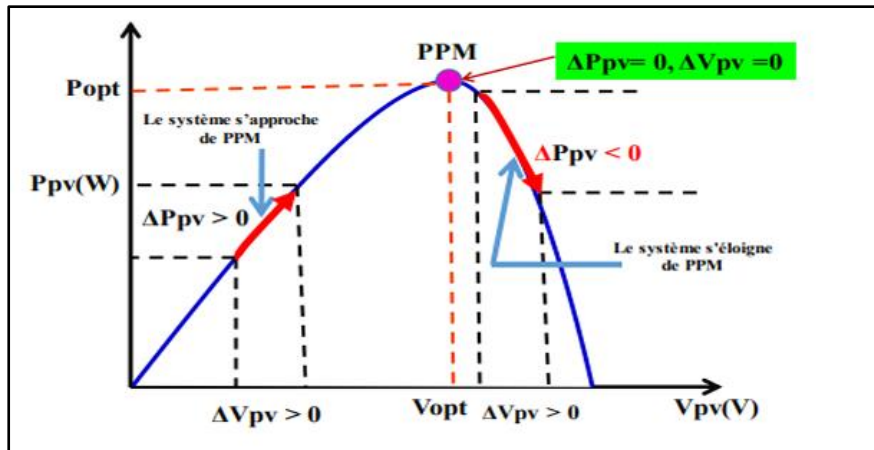


Fig III.3 Caractéristique (P_{pv}, V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure :

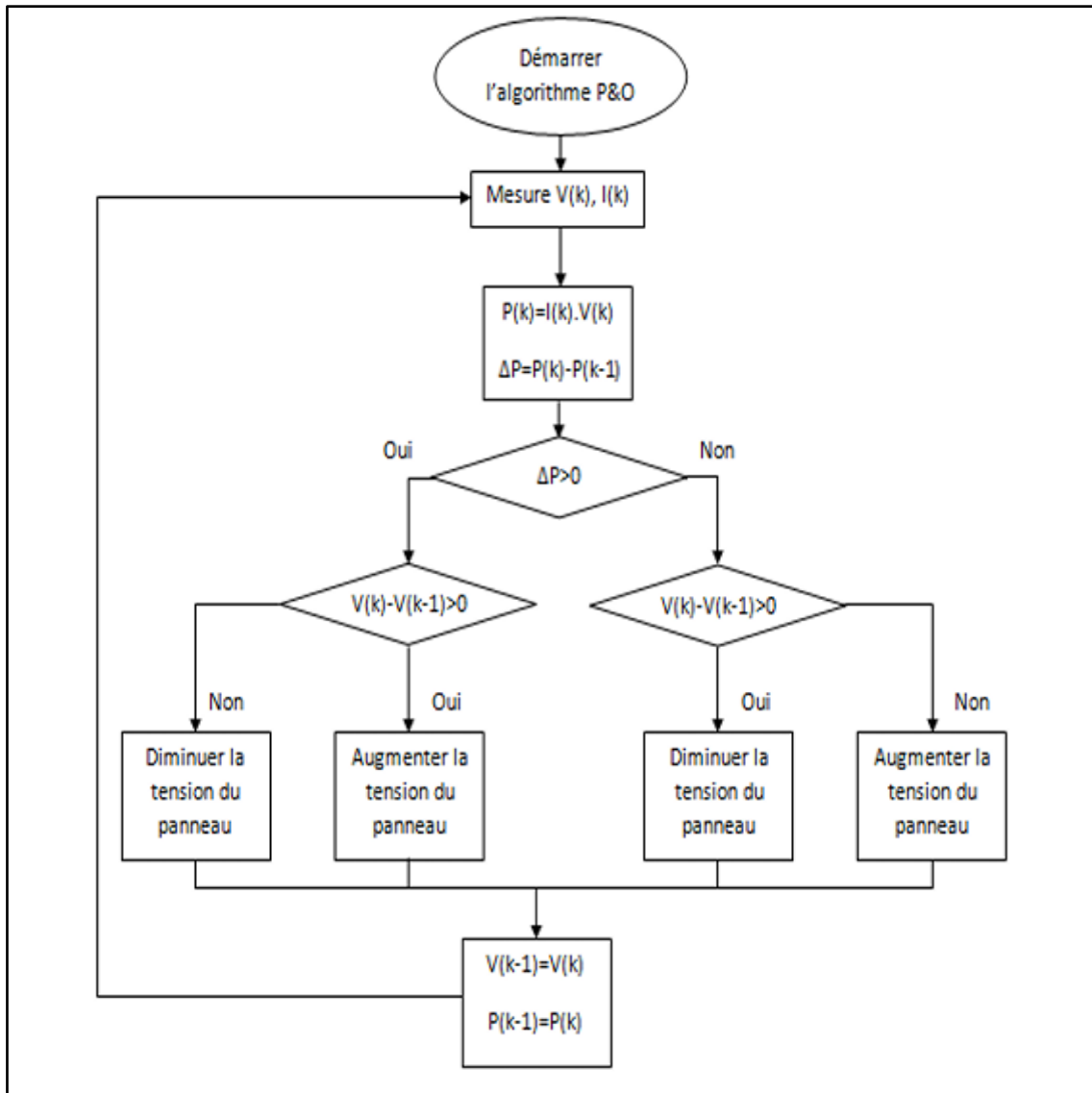


Fig III.4 Organigramme de la méthode perturbation et observation

III.2.2.2. Commande MPPT par mode glissant

L'algorithme MPPT basé sur la commande par mode glissant fait partie de la famille des commandes robustes. Cette stratégie a été largement adoptée comme méthode de régulation fiable, en particulier dans les systèmes électromécaniques confrontés à des incertitudes ou à des variations paramétriques.

Au cours des dernières années, le mode glissant d'ordre un, ainsi que des variantes de type supérieur telles que le *super twisting*, ont été appliqués avec succès au suivi du point de puissance maximale. Ce travail se concentre exclusivement sur le mode glissant d'ordre un.

Le principe de cette approche repose sur la définition d'une surface de glissement σ , construite à partir de la condition de conductance incrémentale, permettant d'extraire la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque.

$$\sigma = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} V_{pv} + I_{pv} \quad (III.4)$$

Cette analyse repose sur l'observation de la région de fonctionnement illustrée dans la figure III.5, où le rapport cyclique α peut être ajusté, soit augmenté, soit diminué, par un incrément $\Delta\alpha$ prédéfini, en fonction de la surface, afin d'atteindre le point MPP optimal.

$$a(k) = \begin{cases} a(K-1) + \Delta a & \text{pour } a > 0 \\ a(K-1) - \Delta a & \text{pour } a < 0 \end{cases} \quad (III.5)$$

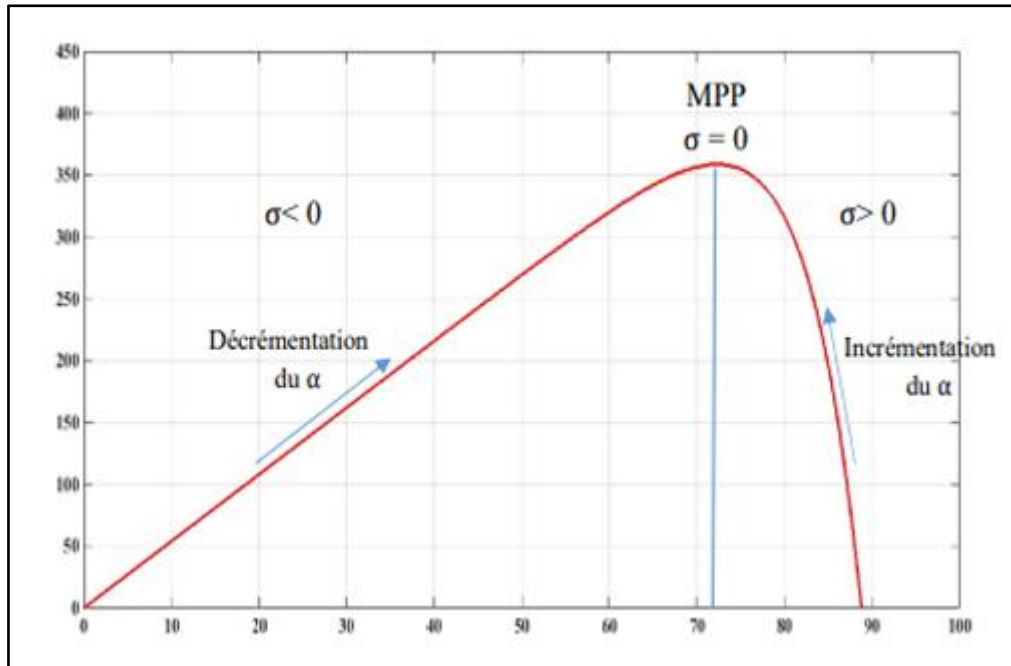


Fig III.5 Principe de la commande MPPT par mode glissant.

La structure de la commande par le mode glissant se compose de deux parties :

La première porte sur la quantité équivalente a_{eq} , et la deuxième fournit la partie stabilisante a_n .

$$a = a_{eq} + a_n \quad (III.6)$$

a_{eq} est dérivé de la condition $\sigma=0$, fournissant le rapport cyclique classique dans l'état d'équilibre. La partie de stabilisation a_n est considérée comme l'effort nécessaire pour rejoindre la condition $\sigma = 0$ quand la commande du système démarre. L'existence du mode glissant peut-être garantie en utilisant le théorème direct de la stabilité selon Lyapounov, comme suit :

On définit une quantité quadratique liée à la surface de glissement, dite fonction candidate de Lyapounov :

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (III.7)$$

Par conséquent, le gradient de la fonction coût v est dérivé comme suit :

$$V = \sigma' \sigma \quad (III.8)$$

La réalisation de $\sigma = 0$ est obtenue si l'équation 1 est maintenu semi-définie négative ($\sigma \sigma' \leq 0$). Stoline propose que la partie stabilisante de la commande a_n soit une fonction linéaire de la surface de glissement σ [30], ce qui permet d'attirer la surface de glissement vers son point d'équilibre $\sigma = 0$:

$$a_n = -K\sigma \quad (III.9)$$

Où le choix adéquat du gain K améliore la dynamique du mode de convergence. Comme le rapport cyclique doit être maintenu dans la plage $0 < \alpha < 1$

Le signal de contrôle réel est donc synthétisé comme suit :

$$a = \begin{cases} 1 & \text{pour } a \geq 1 \\ a_{eq} - K\sigma & \text{pour } 0 < a < 1 \\ 0 & \text{pour } a \leq 0 \end{cases} \quad (III.10)$$

La variation continue du rapport cyclique dans la gamme spécifiée peut être assurée, si le gain K n'est pas choisi trop grand [31]. Propose que K est ajusté inférieur ou égale à l'admittance maximale côté DC ($K \leq 1 / |R_{ch-max}|$).

Dans notre travail, R_{ch-min} est quantifiée en fonction d'un seuil de puissance extraite au lever du soleil P_{min} , et une parfaite régulation de la tension du bus (VDC-ref).

$$|R_{ch_{max}}| = \frac{V_{2Dc-ref}}{P_{min}} \quad (III.11)$$

La commande équivalente a_{eq} est déduite, en fixant $\sigma=0$ [32]

$$a_{eq} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{dc}} \quad (III.12)$$

Qui représente en fait la valeur conventionnelle de l'hacheur boost.

III.2.2.3. Commande par logique floue

Récemment, la commande par la logique floue est utilisée pour la poursuite du point de puissance maximal (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. L'avantage de cette technique est qu'elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à contrôler qui est généralement très complexe. Elle est basée sur la connaissance parfaite du comportement du système, permettant ainsi d'établir les règles d'inférence du contrôleur flou 'FLC'. [1]

Structure du contrôleur flou :

La structure d'un contrôleur à logique floue repose sur l'utilisation d'ensembles flous, dans lesquels une variable peut appartenir simultanément à plusieurs ensembles avec des degrés d'appartenance différents. Ce principe permet de représenter des situations imprécises de manière souple et efficace. L'un des principaux avantages de la logique floue réside dans sa capacité à reproduire un raisonnement proche de celui de l'être humain, en prenant des décisions à partir d'informations incomplètes ou incertaines, tout en restant cohérente et réactive face aux variations du système. [1]

Le schéma de principe de l'algorithme MPPT basée sur la logique floue est illustré sur la figure III.6:

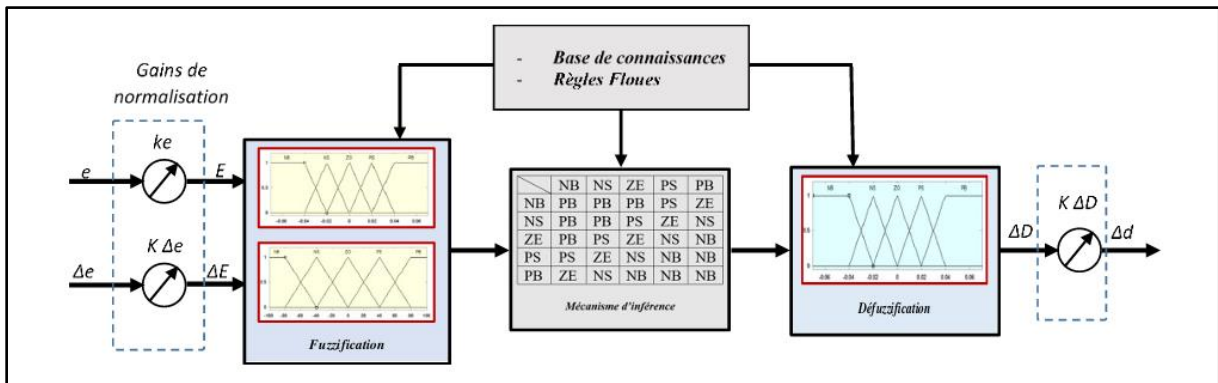


Fig III.6 Structure du contrôleur MPPT flou

Cet algorithme est basé sur deux variables d'entrée : l'erreur E et la variation de cette erreur ΔE . La variable de sortie D est le rapport cyclique à appliquer au convertisseur DC/DC.

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (III.13)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \quad (III.14)$$

Le schéma de la figure précédente contient les blocs suivants :

La fuzzification : consiste à transformer les variables d'entrée et de sortie physiques en variables linguistiques. Chaque variable linguistique divise son univers de discours en plusieurs intervalles, chacun correspondant à un ensemble flou. La valeur réelle d'une variable est alors traduite par un degré d'appartenance à ces ensembles, ce qui permet de représenter l'information de manière souple et moins rigide que dans une logique classique.

L'inférence : C'est la logique de prise de décision. Elle consiste, d'une part, à calculer le degré de vérité des différentes règles du système et, d'autre part, à associer à chacune de ces règles une valeur de sortie. Une règle floue est définie comme étant l'ensemble d'implications qui exprime le lien entre les variables linguistiques d'entrée et celles de la sortie. La forme typique d'une règle floue est :

Si<Conditions liées par des opérations flous>Alors<Action>.

L'ensemble des conclusions des règles floues proposées sont regroupée dans le tableau suivant :

E ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	ZE
NS	PB	PB	PS	ZE	NS
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PS	ZE	NS	NB	NB
PB	ZE	NS	NB	NB	NB

Tableau III.1 Table des règles d'inférence

La défuzzification : Elle est connue comme le processus de conversion de la quantité floue en quantité nette. Il existe de nombreuses méthodes disponibles pour la défuzzification. La plus courante est la méthode du centre de gravité, qui est donnée par la formule suivante :

$$\Delta d = \frac{\sum_{i=1}^n u_i m_{fi}}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (\text{III.15})$$

Avec u_i est le degré d'appartenance de la sortie m_{fi} .

III.2.2.4. Méthode de l'Incrément de conductance (Inc-Cond)

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de la conductance du GPV et ses conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (PPM) [33]. Cette conductance, qui est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV, ainsi que sa variation élémentaire (incrément) sont données respectivement par les équations suivantes :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III.16})$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.17})$$

D'autre part l'évolution de la puissance du générateur photovoltaïque renseigne sur la position du point de fonctionnement. Lorsque sa dérivée par rapport à la tension du GPV est

nulle, cela indique que le point de fonctionnement du panneau est situé sur le PPM de la courbe de puissance [33]

La relation entre l'incrément de conductance donné par l'équation et la dérivée de la puissance est décrite par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{Pv}}{dV_{Pv}} = \frac{d(I_{Pv} \cdot V_{Pv})}{dV_{Pv}} = I_{Pv} + V_{Pv} \frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}} = 0 \text{ (nulle au PPM)} \quad (\text{III.18})$$

On peut écrire alors :

$$-\frac{I_{Pv}}{V_{Pv}} = \frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}} \quad (\text{III.19})$$

Le maximum de puissance peut être suivi en comparant constamment la valeur de la conductance $\frac{I_{Pv}}{V_{Pv}}$ avec celle de l'incrément de conductance $\frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}}$. Ainsi, des conditions peuvent être établies sur la variation de la conductance pour localiser le point de fonctionnement par rapport au PPM, que l'on peut résumer par les relations suivantes :

- Si $\frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}} > -\frac{I_{Pv}}{V_{Pv}}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}} = -\frac{I_{Pv}}{V_{Pv}}$ le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}} < -\frac{I_{Pv}}{V_{Pv}}$ le point de fonctionnement est à droite du PPM.

La figure montre les performances de cette méthode qui a été implémentée sur le convertisseur Boost connecté à un panneau photovoltaïque de 150 W et simulée pour les variations d'éclairement sur une journée supposée claire.

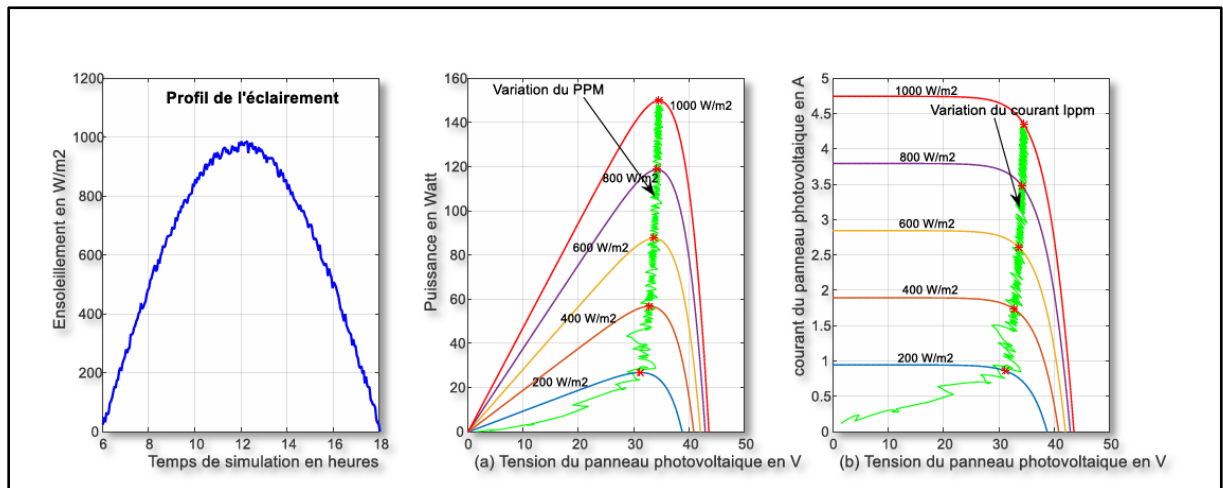


Fig III.7 Poursuite du point de puissance maximal par la méthode Incrément de conductance

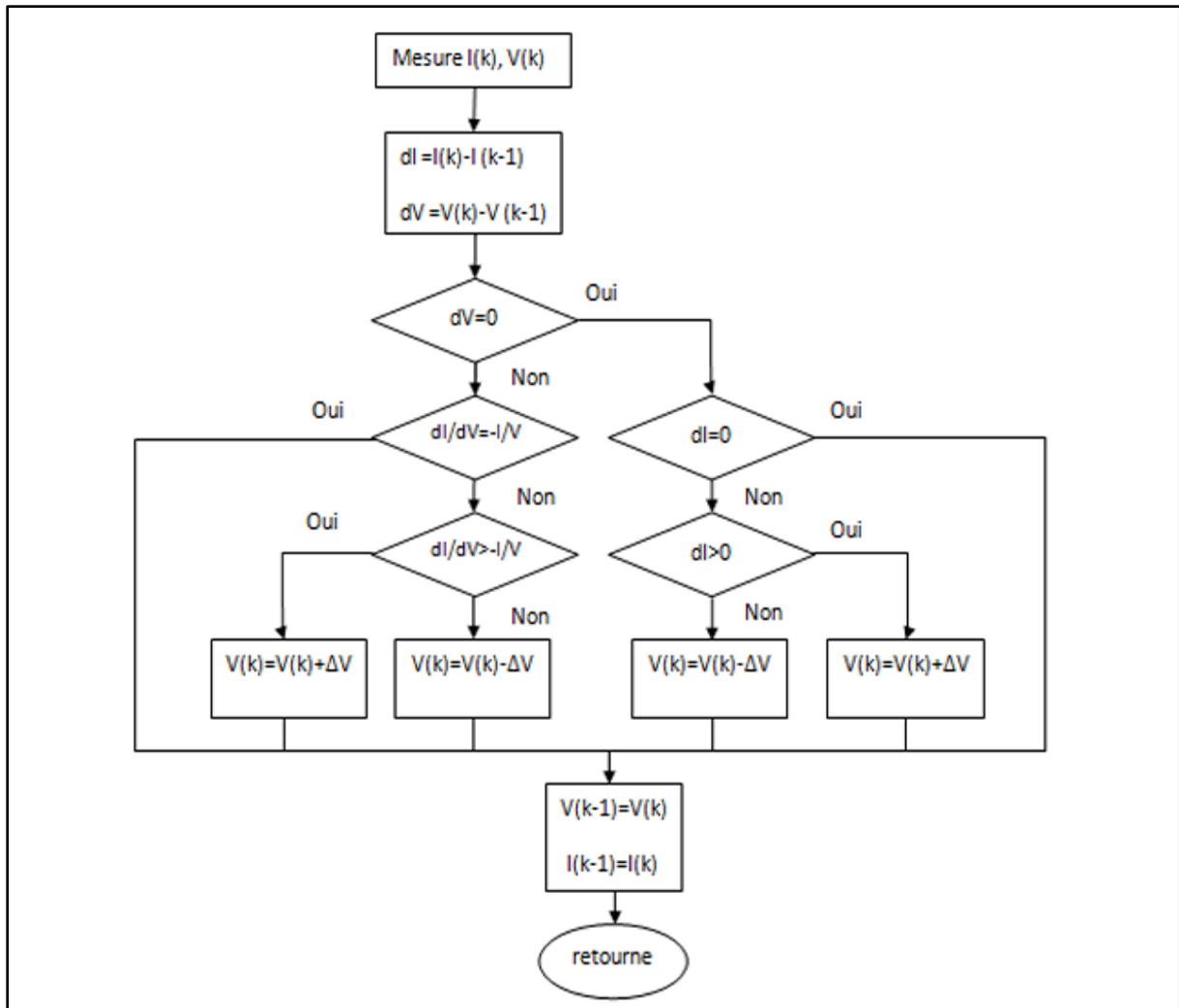


Fig III.8 Organigramme de l'algorithme (CI)

III.2.2.5. Fraction de la tension de circuit ouvert

Cette méthode utilise la relation approximativement linéaire entre la tension V_{mpp} et la tension en circuit ouvert V_{oc} , qui varie en fonction de l'éclairement et la température.

$$V_{mpp} \approx K \cdot V_{oc} \quad (III.20)$$

Avec : $0.71 \leq k \leq 0.78$.

Où k est une constante dépendante des caractéristiques du générateur photovoltaïque et il doit être déterminé à l'avance en déterminant la V_{mpp} et les V_{oc} pour les différents niveaux d'irradiation et températures. Une fois la constante de proportionnalité k est déterminée, la tension V_{mpp} peut être déterminée périodiquement par la mesure de V_{oc} . Pour mesurer les V_{oc} le convertisseur de puissance doit être arrêté momentanément pour chaque mesure donc une perte de puissance. Un autre inconvénient est que le V_{mpp} atteinte n'est pas la vraie parce que la relation est seulement une approximation [34].

III.2.2.6. Fraction du courant de court-circuit

Tout comme dans la méthode de la fraction de tension en circuit ouvert, il y a une relation sous différentes conditions atmosphériques, entre le courant de court-circuit I_{SC} et le courant de MPP (I_{MPP}):

$$I_{MPP} \approx K \cdot I_{CC} \quad (III.21)$$

Avec : $0.78 \leq k \leq 0.92$

Mesurer le courant de court-circuit pendant le fonctionnement du système est un problème. Il habituellement nécessite l'ajout d'un commutateur supplémentaire pour le convertisseur de puissance pour court-circuiter périodiquement le générateur PV et mesurer l' I_{CC} . Cette méthode présente presque les mêmes problèmes rencontrés par la fraction de la tension en circuit ouvert. [34]

III.3. Commande de l'onduleur :

La commande vise à générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs afin d'assurer que la tension produite par l'onduleur se rapproche le plus possible de la tension de référence. [35]

III.3.1. Commande par hystérésis :

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chaque courant généré dans une bande enveloppant les courants de référence. Toute violation de cette bande entraîne un ordre de commutation. En pratique, la différence entre le courant de référence et le courant mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis, dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. [35]

Un simple comparateur à hystérésis par phase introduit un signal d'erreur entre le signal réel et sa consigne. Cette erreur est ensuite comparée à la bande d'hystérésis, afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. La figure III.9 présente le principe de fonctionnement d'une telle technique, où Δh est la largeur de la bande d'hystérésis

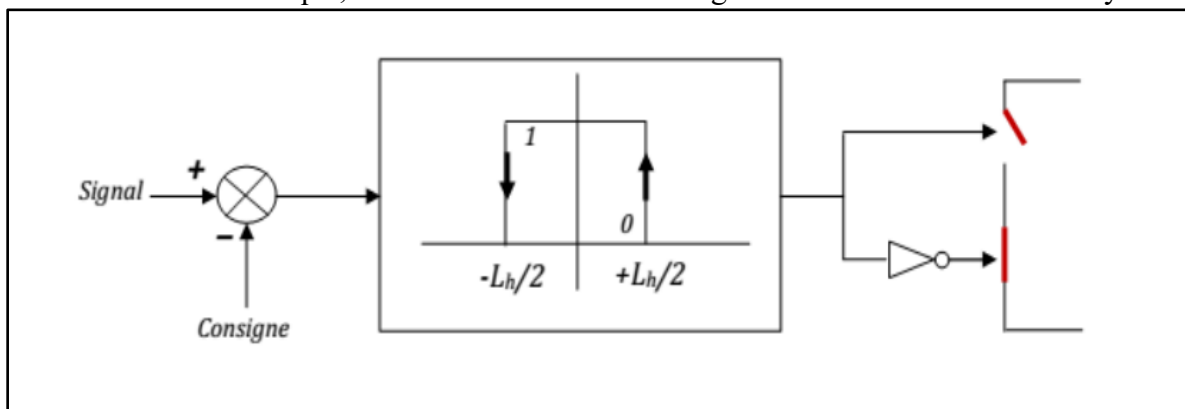


Fig III.9 Commande MLI à bande hystérésis

Ainsi, l'interrupteur s'ouvre et se ferme si l'erreur devient inférieure à $-\Delta h/2$ ou supérieure à $\Delta h/2$ respectivement, aucune commutation n'est permise si cette erreur est maintenue entre $-\Delta h/2$ et $\Delta h/2$.

L'inconvénient majeur que présente cette commande c'est la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés à cause de l'absence du contrôle de la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis.

Pour le contrôle du courant instantané d'une phase, ce dernier s'écarte de sa valeur de référence d'une valeur $\Delta h/2$, fixée par la bande du correcteur à hystérésis, ainsi, en commutant les interrupteurs du bras du redresseur correspond, le courant réel sera maintenu à l'intérieur d'une bande $\pm \Delta h/2$ entourant le courant de référence. Cette stratégie nécessite pour chaque phase ($j=a, b, c$) un correcteur à hystérésis indépendant [36].

Ces correcteurs sont à deux niveaux, chaque correcteur agit selon la différence entre le courant de référence I_{ref} et le courant réel I_j circulant dans la phase correspondante pour générer un signal de commande k_j selon la relation suivante :

$$\begin{cases} K_j = 1 \\ K_j = 0 \end{cases} \text{ si } \begin{cases} \Delta I_j = (I_{ref} - I_j) \geq \frac{L_h}{2} \\ \Delta I_j = (I_{ref} - I_j) < \frac{L_h}{2} \end{cases} \text{ pour } j = a, b, c \quad (III.22)$$

De cette façon, le signal K_j est soit égale à 1 ou à 0, selon l'état de basculement (figure III.10)

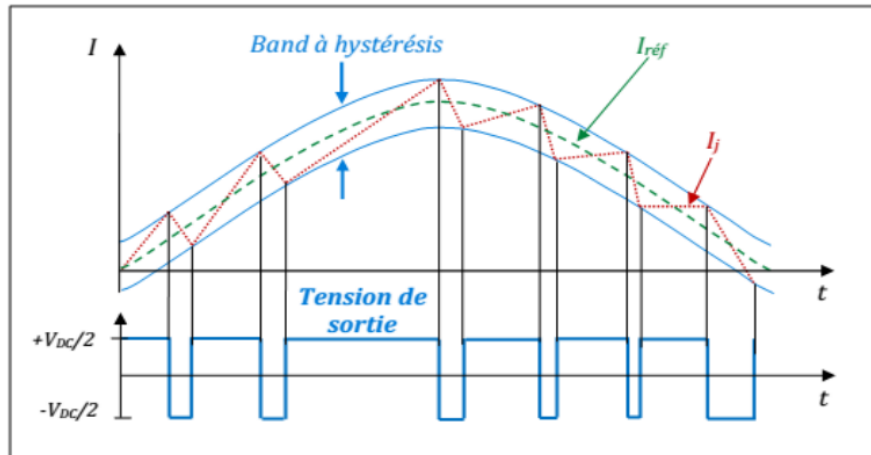


Fig III.10 Principe de fonctionnement de correcteur à hystérésis

La figure III.11, montre l'évolution du courant pour une commande par hystérésis. On remarque qu'il évolue entre les deux extrêmes et aussi que la fréquence de commutation est variable.

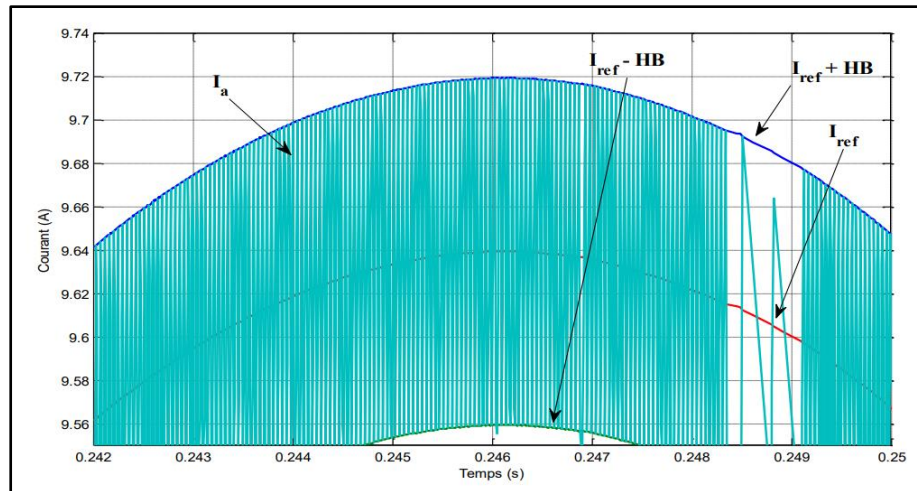


Fig III.11 Simulation de la commande hystérésis

III.3.2. Stratégie de commande du flux de puissance injecté

Lorsque le système photovoltaïque fonctionne avec un facteur de puissance unitaire, il n'injecte dans le réseau que de la puissance active. La stratégie de commande du convertisseur côté réseau vise à transférer l'intégralité de l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque vers la charge et le réseau électrique. Pour ce faire, il est essentiel d'assurer un équilibre énergétique au niveau du bus continu.

Le courant régulé I_{ond} permet de définir l'amplitude maximale I_{max} des courants de référence de l'onduleur. Ces courants sont synchronisés à la fréquence du réseau ω_s , laquelle est extraite à l'aide de la boucle à verrouillage de phase (PLL – *Phase-Locked Loop*), comme illustré dans la figure suivante [1] :

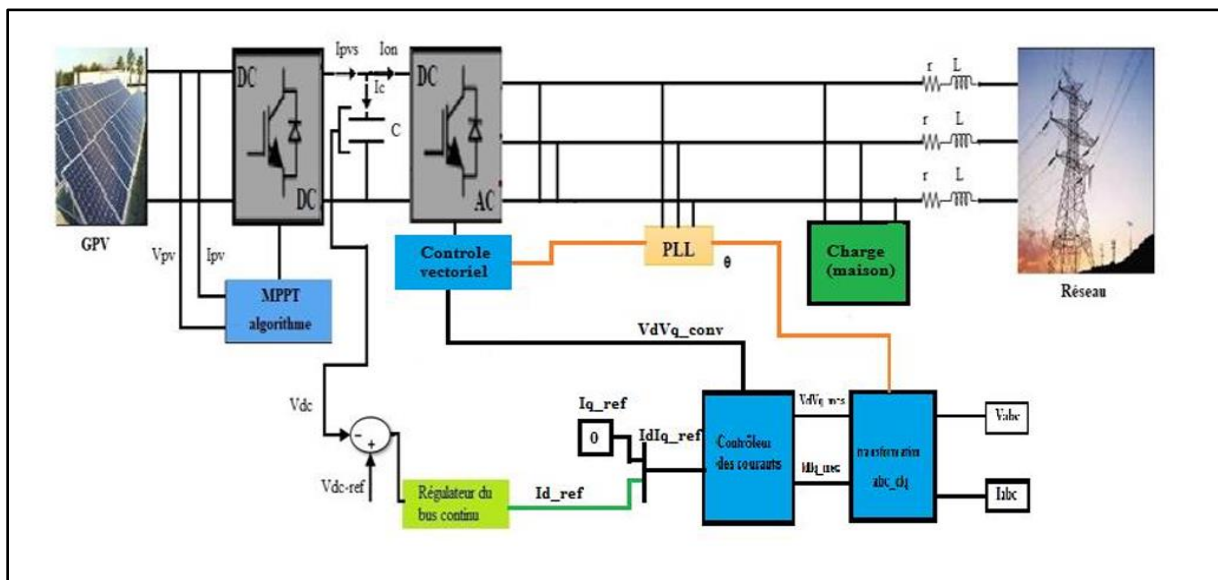


Fig III.12 Contrôle du convertisseur côté réseau.

L'amplitude I_{max} des courants de référence est proportionnelle au courant I_{ond} tel que :

$$I_{max} = m \cdot I_{ond} \quad (III.23)$$

Où I_{ond} est l'amplitude du courant requis pour maintenir l'équilibre entre les puissances actives au niveau du condensateur du bus continu, exprimée par la relation suivante :

$$dE_{dc} = C \cdot V_{dcref} \cdot dV_{dc} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot V_s \cdot I_{ond} \cdot dt \quad (III.24)$$

La valeur efficace de la tension simple du réseau, notée V_s , est essentielle au point de raccordement du bâtiment (charge). La tension de référence du bus continu, désignée par V_{dcref} , est celle à laquelle la tension continue V_{dc} doit être asservie. Par conséquent, à partir de l'équation (III.24), nous pouvons déduire la fonction de transfert entre la sortie V_{dc} et la grandeur d'entrée I_{ond} .

$$\frac{V_{dc}}{I_{ond}} = \frac{3 \cdot V_s}{\sqrt{2} \cdot C \cdot V_{dcref} \cdot s} = \frac{1}{K \cdot s} \quad (III.25)$$

$$\text{Avec : } s = \frac{d}{dt}, \text{ et } K = \frac{\sqrt{2} \cdot C \cdot V_{dcref}}{3 \cdot V_s} \quad (III.26)$$

Les régulateurs à hystérésis comparent les courants synchronisés de référence avec les courants mesurés du côté du réseau afin de générer les signaux de commutation (S_a , S_b , S_c) qui sont appliqués aux interrupteurs de l'onduleur.

III.4. Conclusion

La recherche présentée dans ce chapitre a permis de modéliser et d'analyser les éléments fondamentaux de la conversion de l'énergie photovoltaïque au sein d'une chaîne intégrée au réseau. L'accent a été mis sur les convertisseurs DC/DC et DC/AC, qui jouent un rôle essentiel dans l'adaptation de la puissance générée par les panneaux photovoltaïques aux exigences du réseau électrique. À travers une modélisation rigoureuse, les divers comportements dynamiques de ces dispositifs ont été examinés, en tenant compte des variations d'ensoleillement et des fluctuations de charge. Cette analyse a également permis de mettre en évidence les stratégies de commande employées pour optimiser l'efficacité de conversion tout en garantissant une stabilité et une synchronisation optimales avec le réseau. Ces résultats constituent une base solide pour la mise en œuvre des techniques de commande qui seront développées dans le chapitre suivant, dans le but d'améliorer la performance globale du système photovoltaïque.

Chapitre IV.

Résultats de Simulation

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Ce système se compose principalement d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur de type « boost » piloté par une stratégie MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation, ainsi que d'un onduleur triphasé commandé par une technique de contrôle vectoriel.

La charge considérée dans cette étude correspond à une habitation résidentielle. L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est prioritairement destinée à couvrir les besoins de cette maison. L'excédent d'énergie généré est ensuite injecté dans le réseau électrique public.

Les résultats de simulation sont présentés pour deux scénarios distincts : dans un premier temps, avec un éclairement solaire constant, puis dans un second temps, avec des conditions variables du côté du générateur PV, afin d'évaluer la réponse dynamique du système.

L'ensemble du processus de commande de puissance, de modélisation et de simulation a été réalisé à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2. Résultats de Simulation

Le modèle photovoltaïque utilisé dans cette étude consiste en 320 panneaux photovoltaïques. Les caractéristiques du modèle du panneau utilisé sont représentées dans le tableau suivant :

Eclairement standard E	1000 W/m ²
Temperature standard T	25C°
Puissance maximale P max	315.072 W
Tension à P max ou tension optimale Vopt	54.7 V
Courant à P max ou courant optimale Iopt	5.76 A
Courant de court- circuit Isc	6.14 A
Tension à circuit ouvert Voc	64.6 V
Nombre des modules en séries	5
Nombre des modules en parallèle	64

Tableau IV.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans les Conditions standards.

La figure (IV.1) représente schéma bloc d'une centrale PV connectée au réseau en MATLAB-SIMULINK.

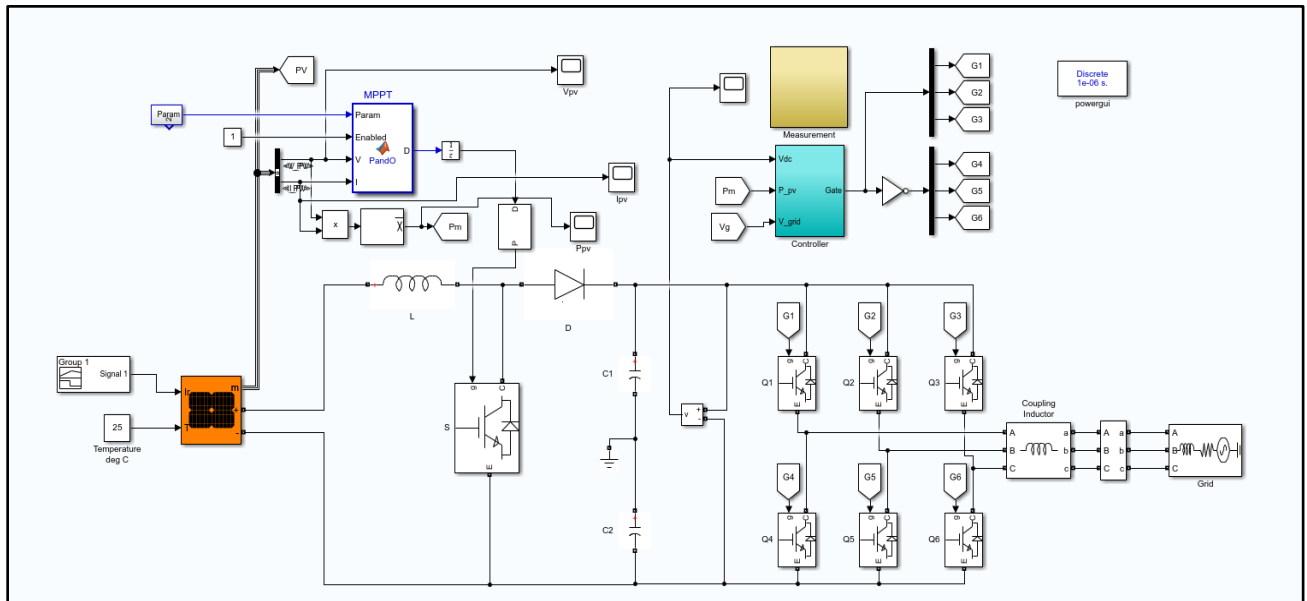


Fig IV.1 Schéma bloc d'un centrale PV connecté au réseau en MATLAB-SIMULINK.

IV.2.1. Résultat pour un éclairement constant

Dans cette partie, nous simulons le système pour un éclairement standard d'une valeur de 1000 W/m^2 et une température de 25°C en 3s. Le générateur photovoltaïque (GPV) délivre une puissance optimale P_{opt} sous conditions STC (Standard Test Conditions), évaluée à $100,8 \text{ kW}$. Cette puissance est injectée dans le réseau électrique à l'aide d'un onduleur triphasé commandé par le contrôle vectoriel.

La figure (IV.2) représente l'évolution de la tension à la sortie du GPV. Après le régime transitoire la tension se stabilisé à la valeur de 295V .

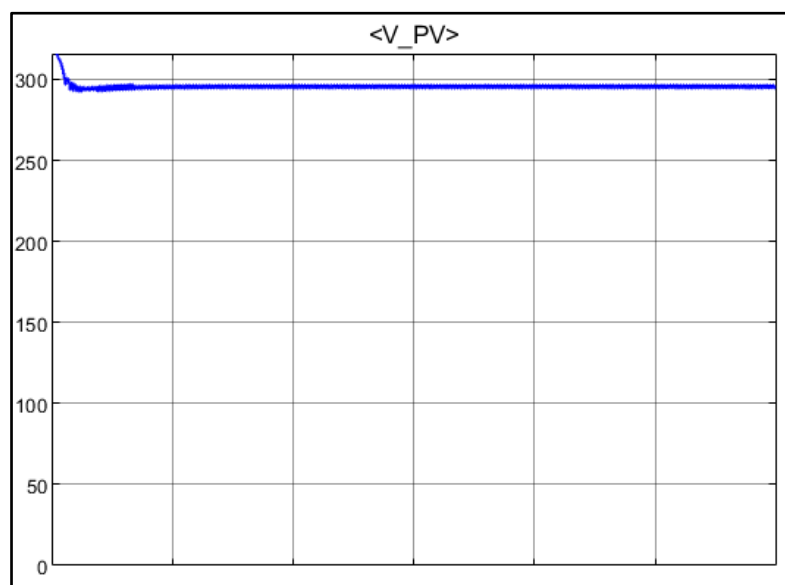


Fig IV.2 Tension de sortie de GPV pour un éclairement constant.

La figure (IV.3) représente l'allure du courant à la sortie du GPV. On remarque que la valeur du courant est fixée à la valeur de 300A après la phase transitoire.

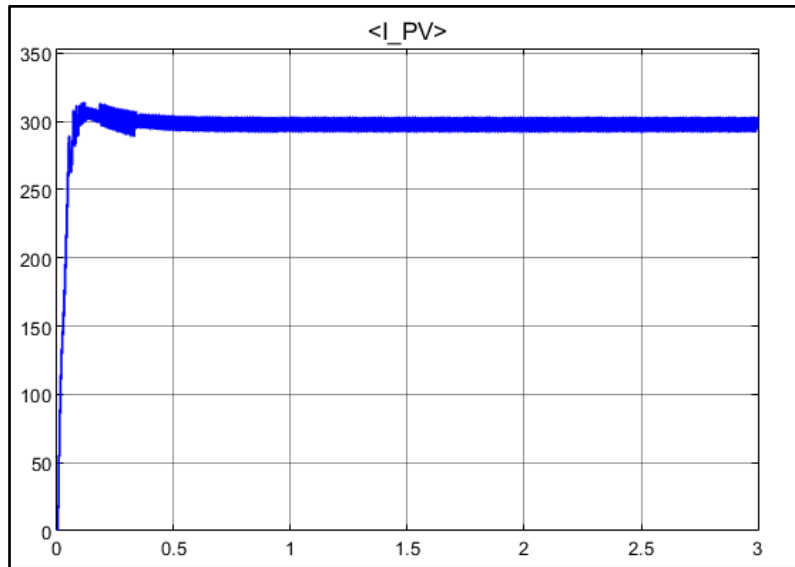


Fig IV.3 Courant de sortie de GPV pour un éclairement constant.

La figure (IV.4) représente l'allure de la puissance à la sortie de GPV. Après le régime transitoire la puissance se stabilisé à la valeur de 88KW proche a la puissance optimale.

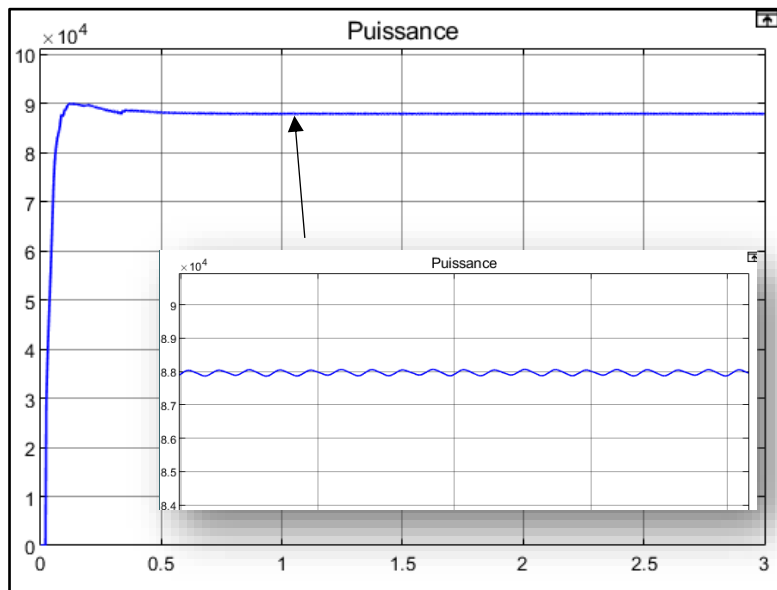


Fig IV.4 La puissance à la sortie de GPV pour un éclairement constant.

La figure (IV.5) montre les allures de la tension de référence et la tension de bus continu. On remarque un bon suivi de la valeur réelle avec sa consigne avec une erreur statique négligeable et une convergence acceptable.

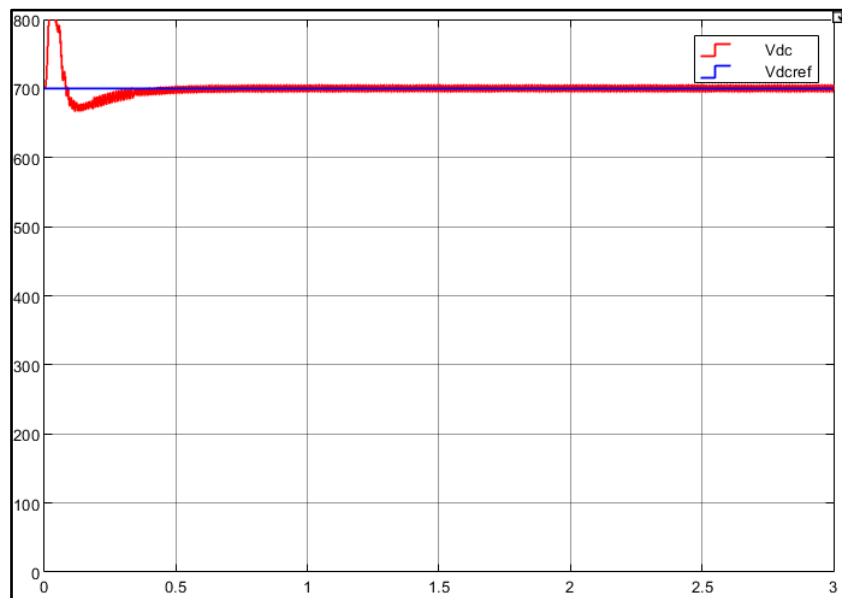


Fig IV.5 Les allures de la tension référence et mesuré de bus continu pour un éclairage constant.

La figure (IV.6) présente les courants de référence et les courants mesurés grâce à une commande par hystérésis pour un système triphasé simple connecté au réseau, en fonction du temps. On remarque que la forme des tensions est sinusoïdale, ce qui démontre que la synchronisation est efficacement assurée par le contrôle vectoriel de l'onduleur.

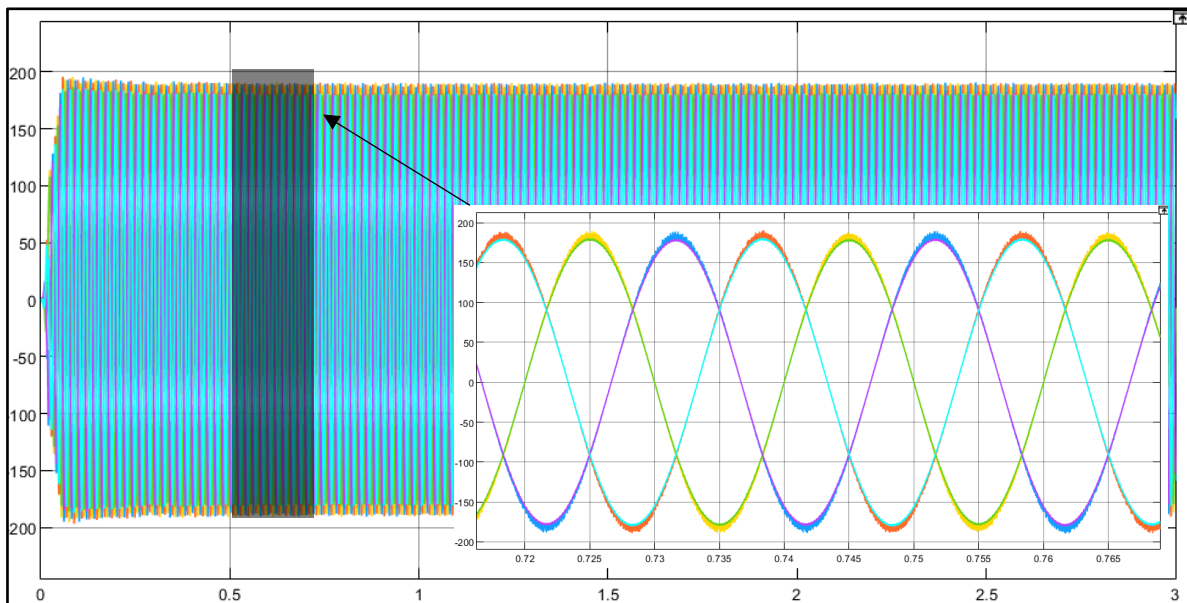


Fig IV.6 Les allures des courantes de référence et des courants mesurés pour un éclairage constant.

La figure (IV.7) illustre les formes d'onde des tensions de phase du réseau (V_a , V_b , V_c) ainsi que des courants injectés (I_a , I_b , I_c). On observe que les tensions et les courants sont sinusoïdaux et en phase, traduisant un facteur de puissance unitaire ($\cos \varphi = 1$). Dans le repère de Park ($d-q$), cette condition correspond à un courant (i_q) nulle, indiquant que l'onduleur injecte uniquement de la puissance active, sans contribution de puissance réactive.

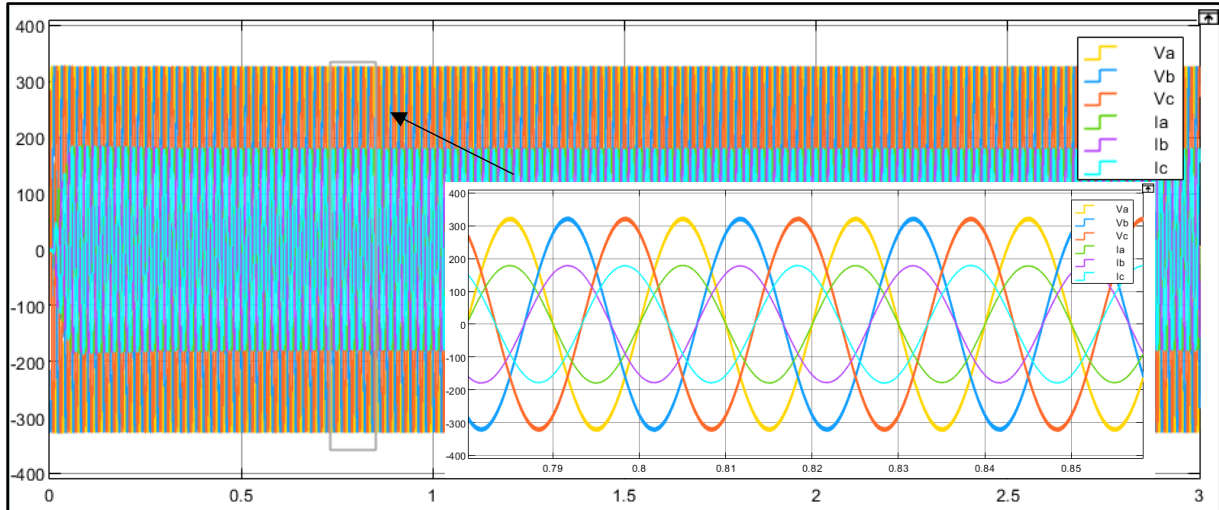


Fig IV.7 Les allures des tensions V_{abc} coté réseau et les courants I_{abc} injectés par l'onduleur pour un éclairage constant.

La figure (IV.8) présente la puissance active et réactive injectées par l'onduleur au cours du temps. La puissance active atteint rapidement une valeur stable de 88KW, indiquant une injection efficace d'énergie utile. La puissance réactive, se stabilise ensuite autour de zéro.

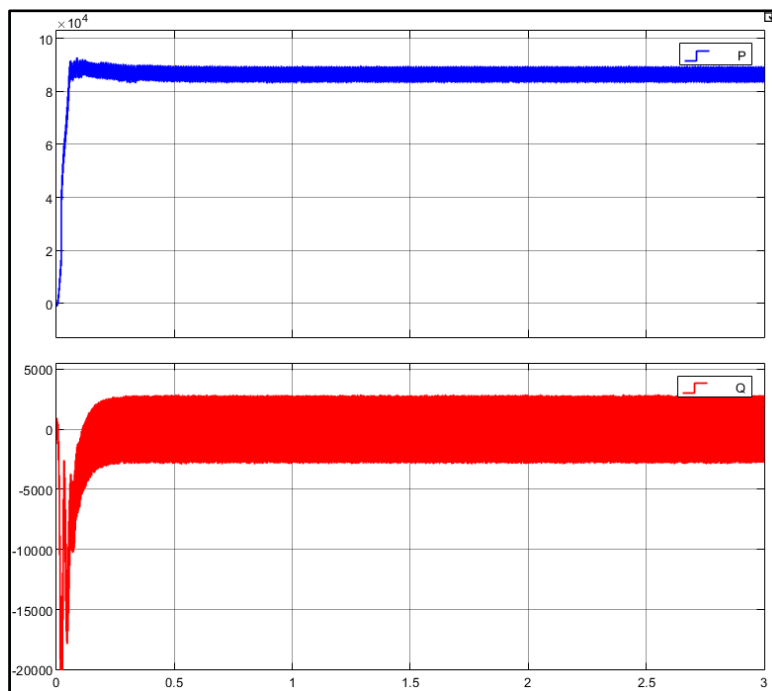


Fig IV.8 les allures de la puissance active et réactive injectées par l'onduleur pour un éclairage constant.

IV.2.2. Résultat pour un éclairage Variable

Dans cette partie, nous simulons le système pour un éclairage variable et une charge variable. Comme indiqué sur la figure (IV.9) nous varions l'éclairage de la valeur 200W/m^2 à la valeur 600W/m^2 puis à la valeur 1000W/m^2 aux instants $t=1\text{s}$ et $t=2\text{s}$ respectivement.

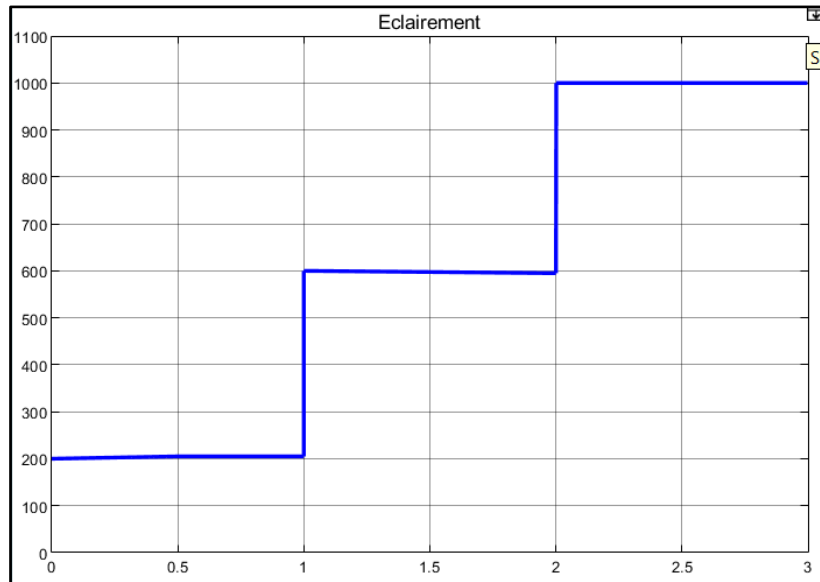


Fig IV.9 Profil de l'éclairage solaire.

La figure (IV.10) représente la puissance de GPV en fonction du temps. Pour un éclairage de 200W/m^2 la puissance produite vaut la puissance maximale (17KW), après la première variation à l'instant $t=1\text{s}$ l'éclairage est égale à la valeur de 600W/m^2 et la puissance produite vaut aussi la puissance correspondante à cet éclairage (52KW), Durant la deuxième variation à l'instant $t=2\text{s}$ l'éclairage est égale à la valeur de 1000W/m^2 et la puissance produite vaut aussi la puissance correspondante à cet éclairage (88KW).

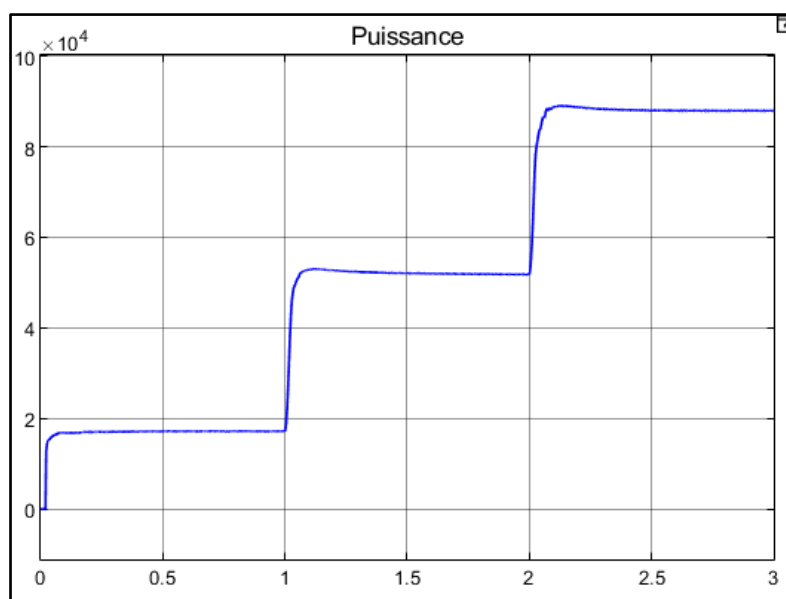


Fig IV.10 Allure de puissance GPV avec une variation d'éclairage.

La figure (IV.11) représente l'évolution de la tension à la sortie du GPV. On remarque que la tension se stabilise à la valeur 295V et qu'il y a des petites perturbations à l'instant $t=1s$ et $t=2s$ à cause de la variation à l'éclairement.

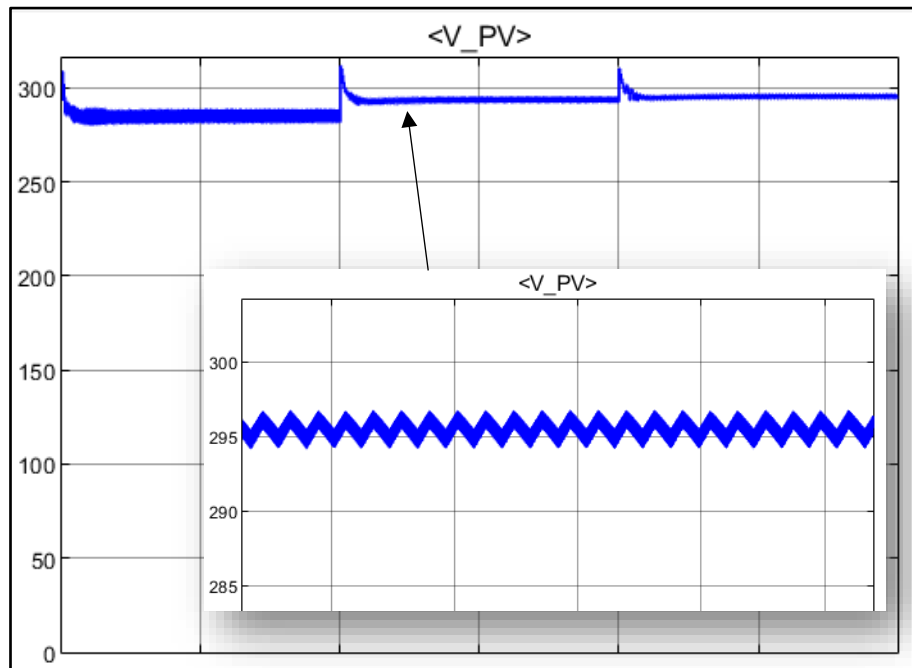


Fig IV.11 Tension de sortie de GPV pour un éclairement variable.

La figure (IV.12) représente l'allure du courant à la sortie du GPV. On remarque que la valeur du courant se change à l'instant $t=1s$ et $t=2s$ à cause de la variation à l'éclairement.

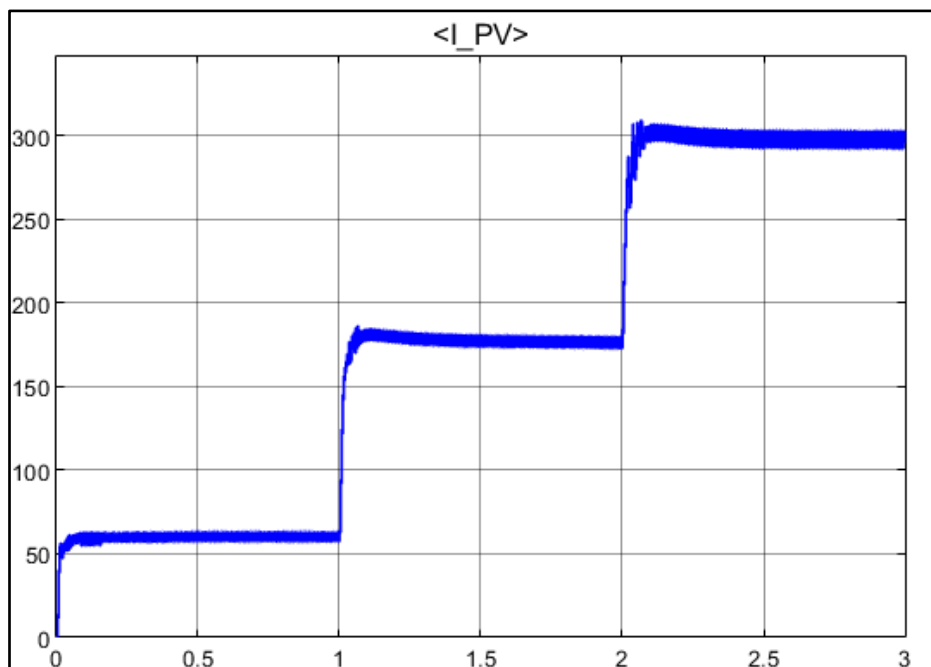


Fig IV.12 Courant de sortie de GPV pour un éclairement variable

La figure (IV.13) montre les allures de la tension de référence et la tension de bus continu en fonction du temps. On remarque que la tension de bus continu se stabilise à la valeur 700V et il y a des petites perturbations à l'instant $t=1s$ et $t=2s$ à cause de la variation à l'éclairage.

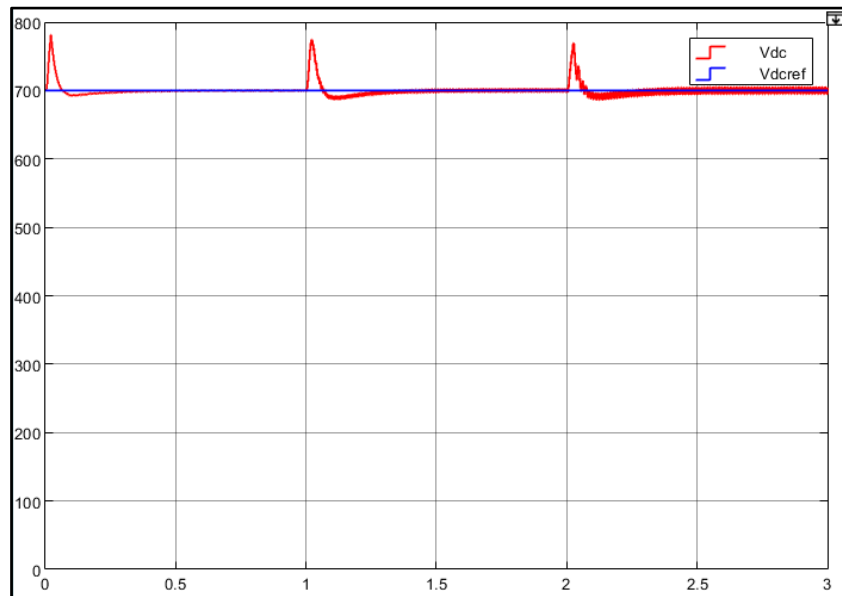


Fig IV.13 Les allures de la tension de référence et la tension de bus continu pour un éclairage variable.

La figure (IV.14) présente l'évolution, en fonction du temps, des courants de référence et des courants mesurés obtenus par une commande par hystérésis pour un système triphasé connecté au réseau. On observe des changements de l'éclairage aux instants $t=1s$ et $t=2s$, mais les courants mesurés restent parfaitement superposés aux courants de référence, sans aucun dépassement ni déphasage. Cette stabilité, malgré les variations, met en évidence la précision de la commande ainsi que la robustesse du contrôle vectoriel de l'onduleur.

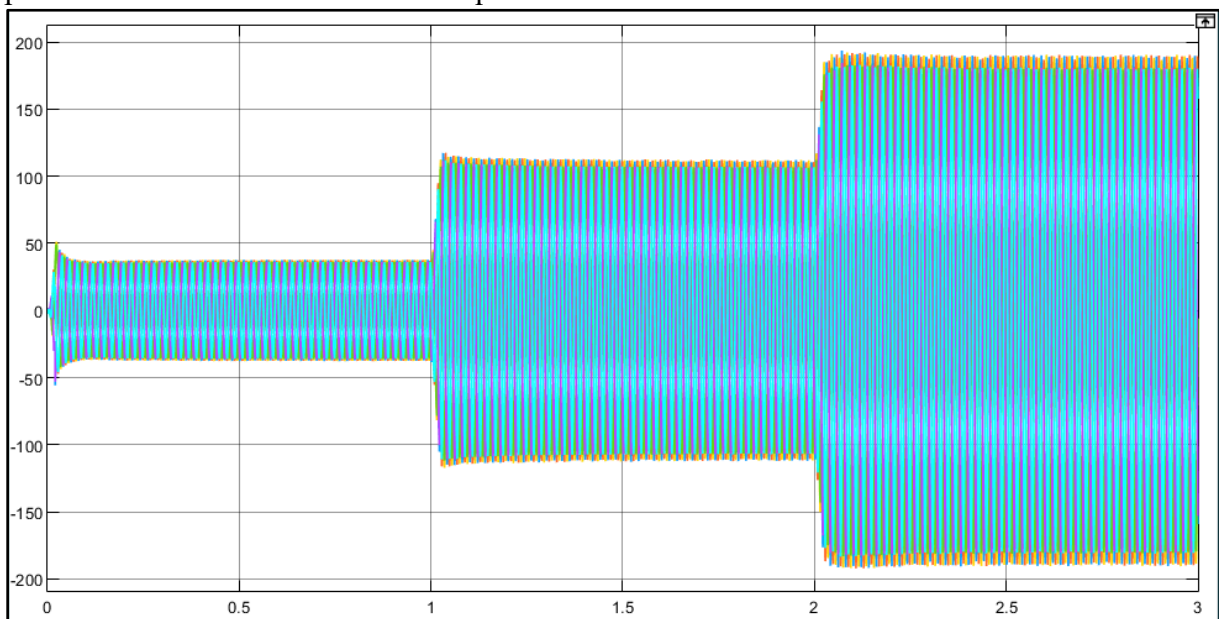


Fig IV.14 Les allures des courantes de référence et des courants mesurés pour un éclairage variable.

La figure (IV.15) illustre les formes d'onde des tensions de phase du réseau (V_a , V_b , V_c) ainsi que des courants injectés (I_a , I_b , I_c). On observe des variations de l'amplitude des courants injectés aux instants $t=1s$ et $t=2s$, en réponse aux changements de l'éclairement, traduisant un facteur de puissance unitaire ($\cos \varphi = 1$). Dans le repère de Park ($d-q$), cette condition correspond à un courant (i_q) nulle, indiquant que l'onduleur injecte uniquement de la puissance active, sans contribution de puissance réactive.

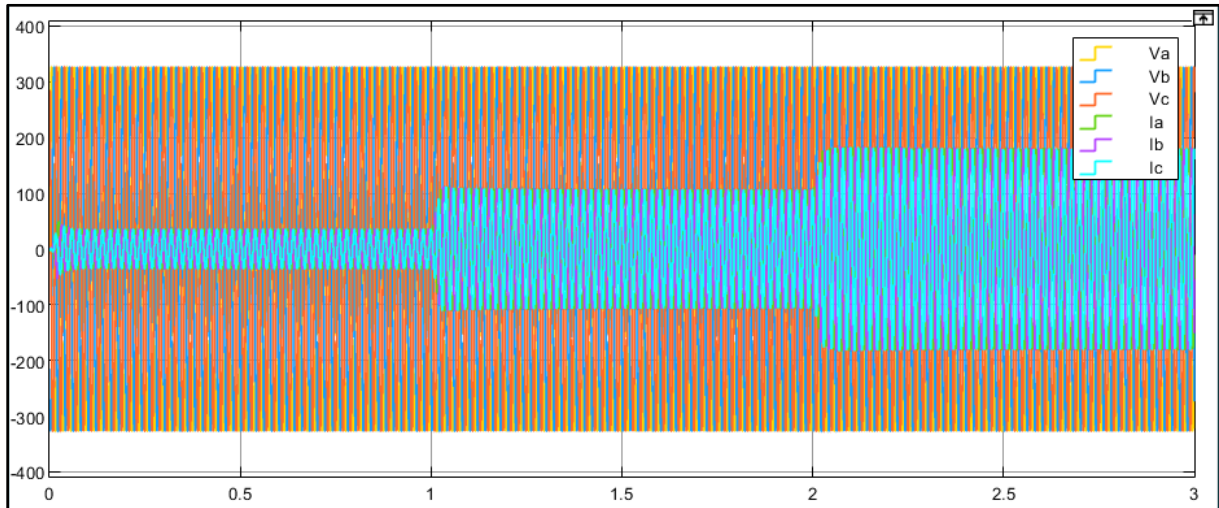


Fig IV.15 Les allures des tensions V_{abc} coté réseau et les courants I_{abc} injectés par l'onduleur pour un éclairement variable.

La figure IV.16 présente l'évolution de la puissance active et réactive injectées par l'onduleur au cours du temps. On observe que la puissance active varie aux instants $t=1s$ et $t=2s$, en réponse aux changements de l'éclairement, ce qui traduit une injection efficace de l'énergie produite. En parallèle, la puissance réactive reste nulle durant toute la période observée, confirmant que l'onduleur fonctionne avec un facteur de puissance unitaire et injecte exclusivement de la puissance active dans le réseau.

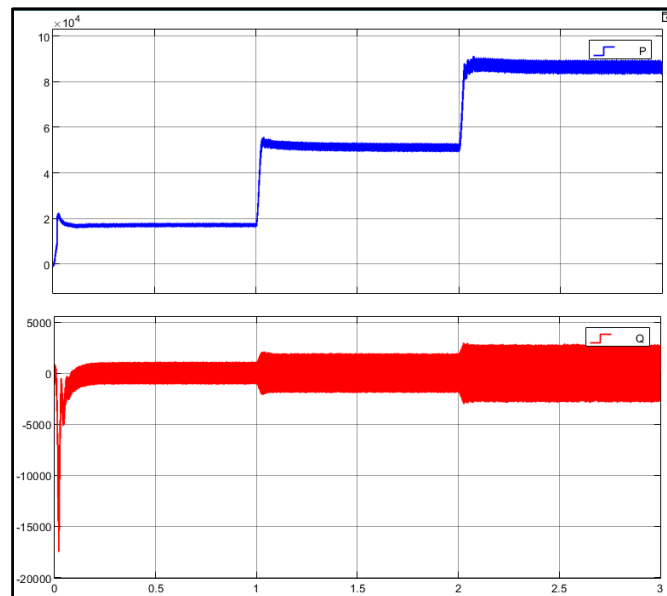


Fig IV.16 les allures de la puissance active et réactive injectées par l'onduleur pour un éclairement variable.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau avec variation de l'éclairement qui permettent de signaler les remarques suivantes :

L'approche de commande choisie donne des résultats satisfaisants. Alors que le contrôleur MPPT basé sur l'algorithme P&O permet de maximiser la puissance générée par la centrale PV, le contrôle vectoriel de l'onduleur permet de synchroniser la puissance injectée à la fréquence de réseau.

Conclusion Générale

L'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique mondial est devenue, aujourd'hui plus que jamais, une nécessité stratégique, autant pour répondre à la crise énergétique que pour réduire l'impact environnemental de la production conventionnelle. L'énergie photovoltaïque, en particulier, s'impose comme l'une des sources les plus prometteuses, grâce à sa disponibilité, sa modularité et sa compatibilité avec les objectifs de durabilité. Néanmoins, sa nature intermittente, ainsi que les exigences de qualité et de stabilité du réseau, imposent des approches techniques rigoureuses pour en assurer une intégration optimale.

Ce mémoire a permis de traiter de manière progressive et structurée les différents aspects d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Le premier chapitre a posé le cadre général de l'étude, en définissant les éléments constitutifs d'une installation PV, les différentes structures possibles, ainsi que les normes et exigences liées à leur raccordement. Le deuxième chapitre s'est attaché à la modélisation des principaux composants de la chaîne de conversion, en distinguant clairement les fonctions de chaque élément et en fournissant une base mathématique solide pour la commande. Le troisième chapitre a été consacré aux méthodes de commande, en particulier à la mise en œuvre d'un algorithme MPPT basé sur la perturbation et observation, à la régulation du convertisseur Boost, ainsi qu'à la commande de l'onduleur à l'aide de la méthode par hystérésis. Enfin, le quatrième chapitre a permis de valider l'ensemble des approches théoriques et des choix techniques à travers des simulations sous MATLAB/Simulink, dans différentes conditions d'ensoleillement et de charge.

Les résultats obtenus au terme de cette étude montrent que la combinaison d'une bonne modélisation, d'une commande adaptée et d'une analyse rigoureuse permet d'assurer une exploitation efficace et fiable d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau. Ce travail constitue une base solide pour des recherches futures, notamment dans le cadre des micro-réseaux intelligents, de l'intégration de systèmes hybrides ou encore de l'optimisation énergétique à grande échelle. En somme, cette étude contribue, à sa manière, à la dynamique globale de transition énergétique et à la promotion de solutions durables, innovantes et réalistes.

Références

- [1] A. Abdelaali, Modélisation, commande et optimisation énergétique d'un système à base de sources renouvelables : application aux bâtiments à basse consommation.
- [2] A. e. a. .. A. Herez, review on the classifications and applications of solar photovoltaic technology. AIMS Energy, 11(6), 1102-1130., (2023).
- [3] «<https://fr.scribd.com/document/471186433/Chapitre-I-Etude-bibliographie-2-1>,» [En ligne].
- [4] L. J. M.G. Molina, «' Dynamic modelling and control design of advanced photovoltaic solar system for distributed generation applications ', Journal of electrical engineering: theory and application, Vol.1, Issue. 3, pp. 141-150, 2010.».
- [5] I.Bendjamaa, «'Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque ' Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen,» 2011/2012.,.
- [6] B.Multon, "Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005..
- [7] K. Helali, «« modélisation d'une cellule photovoltaïque étude comparative » Mémoire de magister en Electrotechnique,,» Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012 .
- [8] Y. Pankow, « Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'Arts et Métiers, Paris,, décembre 2004..
- [9] M.Blhadj, « "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome "Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar,» 2007-2008..
- [10] M. Boxwell, Solar electricity handbook : a simple, practical guide to solar energydesigning and installing solar PHOTOVOLTAÏQUE systems. Greenstream Publishing Ltd, 2017. 178 p. ISBN 1907670661, 9781907670664.
- [11] S. Makhloufi, « Impact d'intégration des énergies renouvelables sur le réseau isolé d'Adrar, thèse de doctorat de Ecole Nationale Polytechnique,2017».
- [12] M. Deves, «' énergie photovoltaïque (Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales)'' document technique Rédition 2003 FNDAE n 12..
- [13] O. e. F.DJALOU, «' Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque 'Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla,» 27/06/2012. .
- [14] M. M. M. AL ANFAF, Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016.

Références

- [15] A. OI, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system, Ph.D. dissertation, California Polytechnic State University.,» 2005.
- [16] CH.Maher, «“Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque” Mémoire Master Université Sfax,» 2007-2008. .
- [17] K.Sobaihi, «“ étude et réalisation d’un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction “ Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10,».
- [18] A. B. learreta, «“ Réalisation de commandes MPPT Numériques ” Rapport de stage Projet Fin d’Etudes Universtat Rovira Virgili .,» 2006.
- [19] Philippe Barrade, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire",, press polytechnique et universitaires,, 1ère édition 2006. .
- [20] Lequeu Thierry, "Cours d’électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP,, 2004/2005 .
- [21] C. R. Bogdan Grabowski, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition,, 2008.
- [22] Abouchabana Nabil, «"Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT",Mémoire de Magister, Université de Laghouat,,» 2009.
- [23] e. a. MM. REFAAT, “Adaptive Fuzzy Logic Controller as MPPT Optimization Technique Applied to Grid-Connected PV Systems. In: Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems”, Springer, Cham. pp. 247-281, 2020..
- [24] B. Abdelkader, «" Modélisation et Diagnostic d’un Onduleur Triphasé Par l’Approche Bond Graph ”Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF,» 02/12/2009. .
- [25] P. Vas, « Electrical machines and drives: a space-vector theory approach vol. 25, Oxford University Press, 1992.».
- [26] T. LE, « Architectures électriques optimales de centrales photovoltaïques linéaires et services contribués au réseau».
- [27] h. B. f. K. B. Bendib, «A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 45, pp. 637-648, 2015».
- [28] N. AOUN, « ETUDE ET MODELISATION DES DIFFERENTS MODELES DE LACELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ETABLIS SUR BASE DE VALEURNOMINALES (P.65-66). Mémoire présente pour obtenir le diplôme de MAGISTER en Physique, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE-ALGERIA.».

Références

- [29] ZIDANE M'hamed et CHEURFA Abdelbaqi, « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Fin d'étude , Université de Bejaia, 2019.».
- [30] V. L. a. L. S. G. Notton, «Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations; Renewable energy, vol. 35, pp. 541-554, 2010».
- [31] A. A. a. T. R. D. Rekioua, «Tracking power photovoltaic system with sliding mode control strategy; Energy Procedia, vol. 36, pp. 219-230, 2013.».
- [32] N. S. D' et L. A. L. a. X. L. Souza, «Comparative study of variable size perturbation and observation maximum power point trackers for PV systems; Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 296-305, 2010.*».
- [33] C. Cabal, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Ph.D. dissertation, University of Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.».
- [34] B. MORAKECHI, ««Implémentation du contrôleur MPPT incrémental conductance sur carte FPGA. Application aux systèmes photovoltaïques » Université de blida 2012-2013».
- [35] Z. BERSALI, «Conception et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque connectée aux réseaux électrique».
- [36] W. Leonhard, «“Control of electrical drives”. Berlin: Springer; 1990.».