



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : commande électrique

Réalisé par :

Manaoui Talb Mohammed Lakhder

Bekkari Abdenmour

Thème :

**Model Predictive Control of the Solar Power
Conversion Chain for Seamless Grid Integration in
Photovoltaic Systems**

Date de soutenance :/..... /2026 devant le Jury :

- Chikha Said	MCA	Encadreur
-	Professeur	Examineur
-	Professeur	Examineur

2025/2026

Dédicace

Je dédie le fruit de mes années d'efforts, de persévérance et de sacrifice à ceux qui ont toujours cru en moi et qui ont été ma plus grande source de motivation.

À mes très chers parents,

Aucun mot ne saurait exprimer toute ma reconnaissance pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices, votre soutien constant et vos prières qui m'ont accompagné à chaque étape de ma vie. Si ce mémoire a une valeur, vous en êtes l'origine ; si cet accomplissement existe aujourd'hui, c'est grâce à vous après Allah.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur encouragement et leur présence à mes côtés dans les moments difficiles.

À tous mes enseignants, qui ont éclairé mon chemin par leur savoir et leurs conseils.

À mon encadreur, Mr Chikha Saïd, en témoignage de mon profond respect et de ma gratitude pour son accompagnement précieux.

À mes amis sincères et à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Je dédie humblement ce travail à tous ceux qui ont laissé une empreinte positive dans mon parcours académique et personnel.

« Le véritable succès n'est pas seulement d'atteindre le sommet, mais de ne jamais oublier ceux qui nous ont aidés à y parvenir. »

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, le Premier et le Dernier, l'Apparent et le Caché, qui nous a comblés de Ses innombrables bienfaits et nous a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous adressons nos salutations et nos prières les plus sincères à notre Prophète Mohammed ﷺ, qui a exhorté les hommes à rechercher le savoir et à emprunter le chemin de la connaissance.

Nos remerciements les plus respectueux et les plus profonds s'adressent à notre encadreur, Mr Chikha Saïd, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude et de notre grand respect.

Nous exprimons également nos sincères remerciements à tous les enseignants du Département de Génie Électrique ainsi qu'à l'ensemble du personnel de la Faculté de Technologie pour les connaissances, l'encadrement et les efforts qu'ils nous ont apportés durant notre parcours universitaire.

Nous remercions enfin toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Qu'Allah nous accorde la réussite, la sagesse, la guidance et fasse de ce travail une source de bien et de bénéfice.

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Résumé	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VI
Introduction générale	1
Overview sur les systèmes de conversion d'énergie solaire	2
Introduction	3
1.2 Historique	3
1.3 La conversion photovoltaïque	3
1.3. 1 Principe de la conversion photovoltaïque	4
1.3.2 Répartition du rayonnement solaire	5
1.4 Le générateur photovoltaïque	6
1.4.1 Principe	6
1.4.2 Description générale	6
1.5 Connexion directe (source charge)	8
1.5.1 Principe de fonctionnement	8
1.5.2 Avantages de la connexion directe	9
1.5.3 Inconvénients de la connexion directe	9
1.5.4 Applications pratiques ..	10
1.6 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une Charge	10
1.6.1 Rôles principaux de l'étage d'adaptation	10
1.6.2 Principaux types utilisés	10
1.6.3 Importance dans les systèmes photovoltaïques	10
1.7 Étage d'adaptation en utilisant un convertisseur DC-DC	10
1.7.1 Rôles principaux du convertisseur DC-DC	11
1.7.2 Principaux types de convertisseurs DC-DC	11
1.7.3 Principe de commande	12
1.7.4 Lien avec le MPPT	12
1.8 Fonctionnement d'un générateur PV à sa Puissance Maximale	12
1.8.1 Principe	12
1. 9 Les commandes MPPT	13
1.9.1 Principe du MPPT	13

1.9.2 Fonctionnement simplifié	14
1.9. 3Importance dans ton projet	15
1.10 Conclusion	15
Chapitre 2 : Modélisation de la chaine de conversion d'énergie photovoltaïque	
2.1 Introduction	17
2.2 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV).....	17
2.2.1 Performances du GPV	18
2.2.2 Influence de la température	21
2.2.3 Association des Cellules photovoltaïques en Série	23
2.2.4 Association des cellules photovoltaïques en parallèle	24
2.3 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC	26
2.4 Convertisseur Buck-Boost	27
24.1 Modélisation et analyse de fonctionnement du hacheur Buck-Boost.....	29
2.5 Modélisation du Bus Continu	31
2.6 Modélisation de l'onduleur de tension	32
2.7 Modélisation du réseau électrique	34
2.8 Conclusion	36
Chapitre 3 Fonctionnement d'une chaine de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique	
3.1 Introduction	38
3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal	38
3.2.1 Généralités	38
3.2.2 Les premiers types de commande MPPT	39
3.2.3 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)	41
3.3 Philosophie de la commande prédictive à états finis (FS-MPC)	44
3.4 Commande FS-MPC de l'onduleur raccorder au réseau électrique	45
3.4.1 Modèle continu de la liaison au réseau	45
3.4.2 Modèle discret de la liaison au réseau	46
3.4.3 Fonction du coût pour le contrôle de l'onduleur	46
3.5 Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT.	47
3.5.1 l'efficacité du système en termes de changement de changement d'irradiance	47
3.5.2 Test d'efficacité du système en termes de changement de température...	51
3.6 Conclusion.....	54

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Vecteurs de tension de l'onduleur triphasé à deux niveaux et états de commutation associés.....	33
---	----

Liste des figures

Figure 1.1 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous l'effet du rayonnement solaire	4
Figure 1.2 : Répartition du rayonnement solaire reçu par un panneau photovoltaïque (rayonnement direct, diffus et réfléchi).....	5
Figure 1.3 : Chaîne de conversion de puissance photovoltaïque pour l'intégration au réseau électrique	6
Figure 1.4 : Connexion série-parallèle des panneaux photovoltaïques	9
Figure 1.5 : Connexion d'un GPV à une charge a travers un étage d'adaptation.....	11
Figure 1.6 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	13
Figure 1.7 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque avec commande MPPT et unité de conditionnement de puissance.....	14
Figure 2.1 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure 2.2 : Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire.....	19
Figure 2.3: Caractéristique $I(V)$ pour d'éclairement ($T = 25^{\circ}C$).....	20
Figure 2.4 : Caractéristique (V) pour d'éclairement ($T = 25^{\circ}C$).....	20
Figure 2.5: Caractéristique $I(V)$ pour température.....	21
Figure 2.6: Caractéristique $P(V)$ pour température.....	22
Figure 2.7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de cellules en Série.....	24
Figure 2.8 : Caractéristique $P(V)$ pour différents nombres de cellule en série.....	24
Figure 2.9: Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	25
Figure 2.10 :Caractéristique $P(V)$ pour différents nombres de cellule en parallèle.....	26
Figure 2.11 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.....	27
Figure 2 .12 : Schéma de control du MPPT.....	28
Figure 2.13 : La structure du hacheur dans l'état de fermeture de l'interrupteur H	29

Figure 2.14 : La structure du hacheur dans l'état d'ouverture de l'interrupteur H.....	30
Figure 2.15 : Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension.....	32
Figure 2.18: Présentation du vecteur de tension.....	34
Figure 3.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.....	39
Figure 3.2 : Principe de la première commande MPPT numérique.....	40
Figure 3.3 : Schéma de principe de la commande MPPT de type P&O.....	42
Figure 3.3 : Organigramme de la méthode P&O.....	43
Figure 3.4 : Schéma de Principe de la commande prédictive.....	45
Figure 3.6 : Profile de variation d'éclairement (25°C).....	48
Figure 3.7 : courants injectés dans le réseau électrique (en phase).....	48
Figure 3.8 : Réponse de la tension de bus continue en fonction de temps et la variation d'éclairement.....	49
Figure 3.9 : Zoom sur la réponse de bus continue Vdc.....	49
Figure 3.10 : Puissance de sortie du GPV.....	50
Figure 3.11 : Courant de sortie de GPV.....	50
Figure 3.12 : Profile de variation dans la température.....	51
Figure 3.13 : Courants injectés dans le réseau électrique.....	51
Figure 3.14 : Zoom sur les courants injectés dans le réseau électrique.....	52
Figure 3.15 : Réponse du bus continue.....	52
Figure 3.16 : Puissance du GPV.....	53
Figure 3.17 : Courant du GPV.....	53
Figure 3.18 : Spectre d'harmonique de courant.....	54

LISTE DES ABREVIATIONS.

TABLEAU 1 LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	
Abréviation	Signification
AC	Alternating Current (Courant alternatif)
ANN	Artificial Neural Network (Réseau de neurones artificiels)
API	Automates Programmables Industriels
Buck	Convertisseur abaisseur
Buck-Boost	Convertisseur abaisseur/élevateur
DC	Direct Current (Courant continu)
DC Bus	Bus Continu
DC-DC	Convertisseur Continu-Continu
DC/AC	Conversion Continu-Alternatif
GPV	Générateur Photovoltaïque
HV	High Voltage (Haute tension)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée)
I-V	Courant-Tension
LV	Low Voltage (Basse tension)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor à effet de champ à oxyde métallique)
MPC	Model Predictive Control (Commande prédictive basée modèle)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Poursuite du point de puissance maximale)
MPP	Maximum Power Point (Point de puissance maximale)
P-N	Jonction Positive-Négative
P-V	Puissance-Tension
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)
SVM	Space Vector Modulation (Modulation vectorielle spatiale)

TABLEAU 2
LISTE DES ABRÉVIATIONS DES GRANDEURS ET PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES

Symbole / Abréviation	Signification
C	Capacité (Condensateur)
D	Rapport cyclique (Duty cycle)
E_g	Énergie de bande interdite (Band Gap Energy)
I	Courant
I_{cc}	Courant de court-circuit
I_{op}	Courant optimal (au point de puissance maximale)
I_o	Courant de saturation
K	Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
L	Inductance (Inducteur)
N_p	Nombre de cellules en parallèle
N_s	Nombre de cellules en série
P	Puissance
P_{max}	Puissance maximale
q	Charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
R	Résistance
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance shunt (Résistance parallèle)
T	Température (en Kelvin, K)
V	Tension
V_{dc}	Tension du bus continu
V_{oc}	Tension de circuit ouvert
V_{op}	Tension optimale (au point de puissance maximale)

TABLEAU 3
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES – CHAPITRE 3

Abréviation	Signification
AC	Alternating Current (Courant Alternatif)
DC	Direct Current (Courant Continu)
DC-DC	Convertisseur Continu-Continu
DC/AC	Convertisseur Continu-Alternatif
FS-MPC	Finite Set Model Predictive Control (Commande Prédictive à États Finis)
GPV	Générateur Photovoltaïque
HV	High Voltage (Haute Tension)
LV	Low Voltage (Basse Tension)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Poursuite du Point de Puissance Maximale)
MPP	Maximum Power Point (Point de Puissance Maximale)
PPM	Point de Puissance Maximale
P&O	Perturb and Observe (Perturber et Observer)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion)
PV	Photovoltaïque
PV Array	Champ Photovoltaïque
Boost	Convertisseur Survolteur
DC Bus	Bus Continu
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolaire à Grille Isolée)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor à Effet de Champ à Oxyde Métallique)
THD	Total Harmonic Distortion (Distorsion Harmonique Totale)
PCC	Point of Common Coupling (Point de Couplage Commun)
MATLAB	MATrix LABoratory (Environnement de Simulation et de Calcul)
Simulink	Plateforme de Modélisation et de Simulation sous MATLAB
SVM	Space Vector Modulation (Modulation Vectorielle Spatiale)

Introduction Générale

L'augmentation continue de la demande mondiale en énergie, associée aux préoccupations environnementales liées aux émissions de gaz à effet de serre et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, a conduit à un intérêt croissant pour les énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place prépondérante grâce à son abondance, sa disponibilité et son faible impact environnemental.

Cependant, la nature intermittente de la ressource solaire ainsi que les variations des conditions climatiques, telles que l'irradiance et la température, influencent directement les performances des systèmes photovoltaïques.

Afin d'exploiter efficacement l'énergie disponible et d'assurer une injection de puissance de haute qualité dans le réseau électrique, il est indispensable de mettre en œuvre des techniques de commande avancées capables d'optimiser le fonctionnement de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Dans ce contexte, la commande prédictive basée modèle (Model Predictive Control – MPC) constitue l'une des approches les plus prometteuses pour les systèmes de conversion d'énergie modernes. Grâce à sa capacité de prédiction du comportement futur du système et à sa prise en compte des contraintes de fonctionnement, elle permet d'améliorer les performances dynamiques, la stabilité et la qualité de l'énergie injectée au réseau.

Le présent mémoire, intitulé « Model Predictive Control of the Solar Power Conversion Chain for Seamless Grid Integration in Photovoltaic Systems », porte sur l'étude, la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque raccordée au réseau électrique. L'objectif principal consiste à développer une stratégie de commande performante permettant d'assurer l'extraction maximale de la puissance disponible, la régulation efficace des grandeurs électriques et une intégration harmonieuse de l'énergie photovoltaïque au réseau.

Pour atteindre cet objectif, le premier chapitre est consacré à l'étude générale des systèmes photovoltaïques et de la chaîne de conversion associée. Le deuxième chapitre présente la modélisation mathématique des différents éléments constituant le système photovoltaïque. Enfin, le troisième chapitre est dédié à l'application de la commande MPPT de type Perturb and Observe (P&O) ainsi qu'à la commande prédictive à états finis (FS-MPC) de l'onduleur connecté au réseau, suivies de simulations sous MATLAB/Simulink permettant d'évaluer les performances du système proposé.

Chapitre 1

Overview sur les systèmes de conversion d'énergie solaire

1.1 Introduction

Face à l'augmentation de la demande énergétique et aux enjeux environnementaux, l'énergie solaire photovoltaïque s'impose comme une solution durable et prometteuse. Toutefois, la puissance produite par les panneaux photovoltaïques dépend fortement des conditions climatiques telles que l'irradiation solaire et la température, ce qui affecte les performances du système et la qualité de l'énergie injectée au réseau.

Pour améliorer l'exploitation de cette source d'énergie, il est nécessaire d'utiliser des chaînes de conversion performantes associées à des stratégies de commande avancées. Parmi celles-ci, la Commande Prédictive (Model Predictive Control - MPC) se distingue par sa capacité à anticiper le comportement du système et à optimiser son fonctionnement tout en respectant les contraintes opérationnelles.

Ce travail porte sur l'étude et l'application de la commande prédictive à la chaîne de conversion photovoltaïque afin d'assurer un transfert optimal de la puissance et une intégration harmonieuse au réseau électrique. L'objectif est d'améliorer les performances dynamiques du système, de garantir une meilleure qualité de l'énergie injectée et de renforcer la stabilité globale de l'installation photovoltaïque.

1.2 Historique

L'histoire de l'énergie photovoltaïque remonte à l'année 1839, lorsque le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en observant l'apparition d'une tension électrique sous l'action de la lumière sur certains matériaux. Cette découverte constitue la base fondamentale des futures cellules solaires.

Au début du XXe siècle, les travaux d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique ont permis de mieux comprendre l'interaction entre la lumière et la matière, ouvrant ainsi la voie au développement des dispositifs photovoltaïques modernes.

En 1954, Bell Laboratories met au point la première cellule photovoltaïque en silicium ayant un rendement exploitable. Cette avancée marque le début de l'utilisation industrielle de l'énergie solaire, notamment dans le domaine spatial pour l'alimentation des satellites.

En 1954, Bell Laboratories met au point la première cellule photovoltaïque en silicium ayant un rendement exploitable. Cette avancée marque le début de l'utilisation industrielle de l'énergie solaire, notamment dans le domaine spatial pour l'alimentation des satellites.

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est devenue l'une des principales sources d'énergie renouvelable au monde. Son développement s'accompagne de nouvelles exigences de commande intelligente, de stockage énergétique et d'intégration réseau, domaines dans lesquels la commande prédictive MPC joue un rôle majeur. [1]

1.3 La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque désigne le processus de transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs. Cette technologie repose sur l'effet photovoltaïque, selon lequel les photons incidents libèrent des charges électriques à l'intérieur de la jonction semi-conductrice, générant ainsi une tension et un courant continu exploitables.

Dans les installations modernes, plusieurs cellules sont associées en série et en parallèle pour former des modules puis des générateurs photovoltaïques capables de fournir une puissance adaptée aux besoins domestiques ou industriels. Cette énergie produite sous forme continue peut ensuite être convertie par des convertisseurs électroniques pour alimenter des charges ou être injectée dans le réseau électrique.

Le rendement de conversion dépend de plusieurs paramètres, notamment l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, l'orientation du panneau ainsi que la qualité des composants utilisés. Pour améliorer l'exploitation énergétique, les systèmes photovoltaïques modernes utilisent des stratégies MPPT afin de fonctionner au point de puissance maximale. [2]

1.3.1 Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque repose sur l'absorption des photons issus du rayonnement solaire par un matériau semi-conducteur, généralement le silicium. Lorsque l'énergie des photons est suffisante, des électrons sont libérés de leurs liaisons atomiques, créant des paires électron-trou.

Sous l'effet du champ électrique interne de la jonction P-N, les électrons et les trous sont séparés et déplacés vers des électrodes opposées. Ce déplacement ordonné des charges crée un courant électrique continu lorsqu'une charge externe est connectée au circuit.

Une cellule photovoltaïque produit généralement une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V, ce qui nécessite l'association de plusieurs cellules pour obtenir des niveaux de tension et de puissance plus élevés.

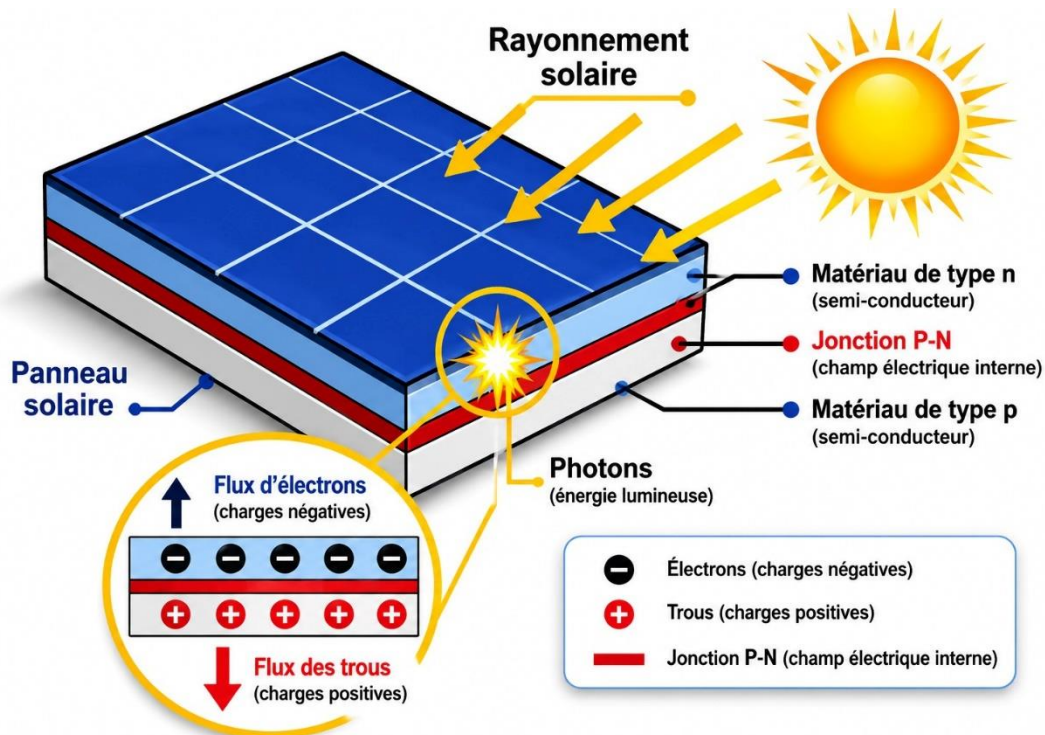


Figure 1.1 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous l'effet du rayonnement solaire.

1.3.2 Répartition du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire reçu à la surface terrestre se répartit en plusieurs composantes principales :

Rayonnement direct

Il provient directement du soleil sans modification importante par l'atmosphère.

Rayonnement diffus

Il résulte de la diffusion de la lumière par les molécules d'air, les nuages et les particules atmosphériques.

Rayonnement réfléchi (Albédo)

Il correspond à la partie réfléchi par le sol, l'eau, la neige ou les bâtiments environnants.

Rayonnement global

Il représente la somme du rayonnement direct, diffus et réfléchi reçu par une surface donnée.

La quantité d'énergie solaire reçue dépend de plusieurs facteurs :

- Position géographique
- Saison
- Heure de la journée
- Inclinaison du panneau
- Conditions météorologiques

Ces paramètres influencent directement la puissance produite par les systèmes photovoltaïques.

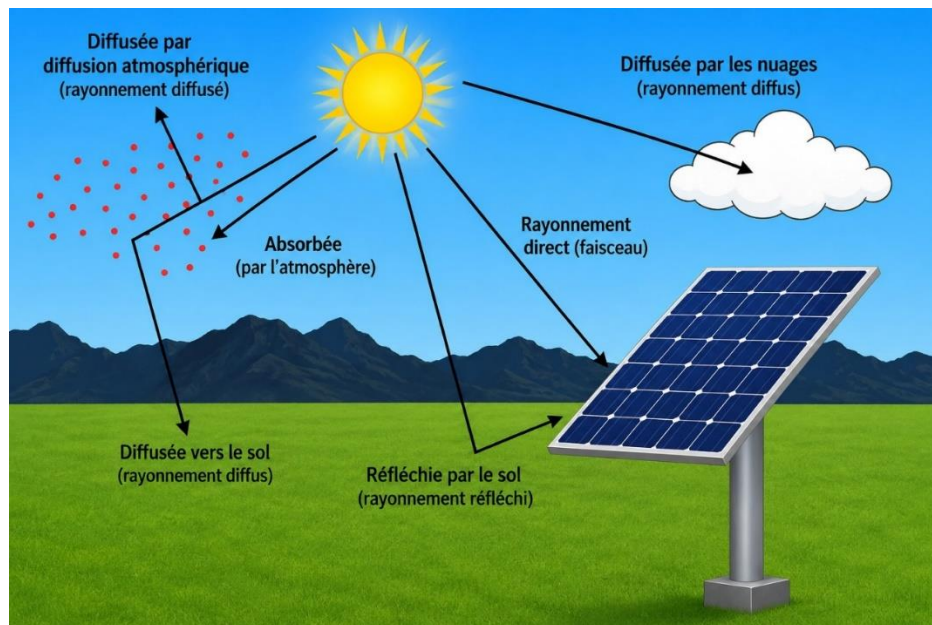


Figure 1.2 : Répartition du rayonnement solaire reçu par un panneau photovoltaïque (rayonnement direct, diffus et réfléchi).

1.4. Le générateur photovoltaïque.

1.4.1 Principe

Le principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque. Lorsqu'un rayonnement solaire frappe la surface des cellules photovoltaïques, les photons incidents transmettent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur. Cela provoque la libération de charges électriques et crée une différence de potentiel entre les bornes de la cellule.

Lorsqu'une charge externe est connectée, un courant continu circule dans le circuit. Une seule cellule produisant une tension limitée (environ 0,5 à 0,6 V), plusieurs cellules sont associées afin d'obtenir une puissance utilisable. [3]

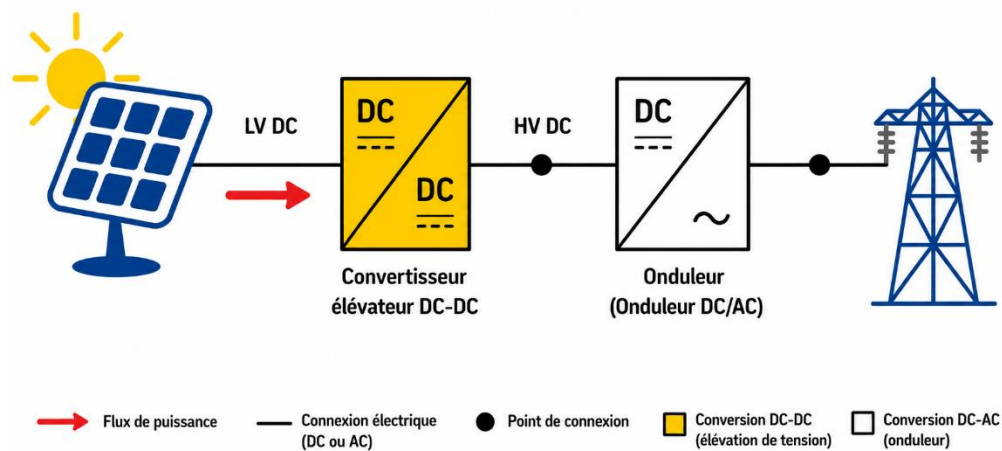


Figure 1.3 : Chaîne de conversion de puissance photovoltaïque pour l'intégration au réseau électrique

1.4.2 Description générale

La figure 1.3 représente l'architecture d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, composé d'un champ photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC élévateur, d'un onduleur et du réseau public. Ce type de configuration permet de convertir efficacement l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques en énergie électrique compatible avec le réseau, tout en assurant une injection stable et optimisée de la puissance générée.

1.4.2.1 Champ photovoltaïque (PV Array)

Le champ photovoltaïque constitue la source principale d'énergie renouvelable du système. Il transforme le rayonnement solaire en énergie électrique sous forme de courant continu (DC) à basse tension (LV : Low Voltage).

Fonctions :

- Production d'énergie propre
- Alimentation directe du système
- Recharge éventuelle de la batterie

La puissance produite dépend :

- De l'irradiation solaire
- De la température
- De l'état des panneaux

1.4.2.2 Convertisseur DC-DC élévateur (Step-Up Converter)

La tension issue du générateur photovoltaïque étant relativement faible, elle passe par un convertisseur élévateur DC-DC.

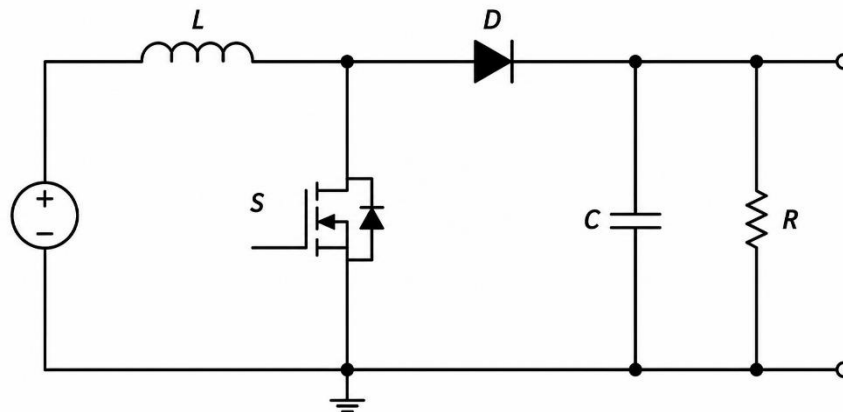


Figure 1.4 : Schéma électrique du convertisseur élévateur DC-DC (Boost Converter).

Rôle :

- Augmenter la tension continue
- Adapter le niveau de tension au bus continu
- Optimiser le point de fonctionnement du générateur PV
- Dans les systèmes modernes, ce convertisseur est généralement associé à une commande MPPT pour extraire la puissance maximale disponible.

1.4.2.2.1 Mode de fonctionnement

Lorsque la tension produite par le champ photovoltaïque est inférieure à la tension du bus continu, le convertisseur augmente cette tension afin d'assurer un transfert correct de l'énergie vers l'étage suivant.

Rôle principal:

- Elévation et adaptation de la tension continue
- Amélioration du transfert de puissance
- Maintien d'une tension DC stable
- Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque
- Support des techniques de commande MPPT

1.4.2.3 Bus continu haute tension (HV DC Bus)

Le bus continu haute tension constitue l'élément central de la chaîne de conversion photovoltaïque. Il assure la liaison énergétique entre le convertisseur DC-DC issu du champ photovoltaïque et l'onduleur chargé de l'injection au réseau électrique.

1.4.2.3.1 Importance du bus continu

Transfert de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque;

Maintien d'un niveau de tension continu stable

Alimentation de l'onduleur en énergie continue

Amélioration de la continuité de fonctionnement du système

Réduction des fluctuations de puissance dans la chaîne de conversion

1.4.2.4 Onduleur (Inverter DC/AC)

L'onduleur convertit la tension continue du bus DC en tension alternative (AC) compatible avec les charges domestiques et le réseau électrique.

Fonctions :

- Alimentation de la maison
- Injection du surplus vers le réseau
- Synchronisation tension/fréquence/phase
- Amélioration du facteur de puissance

1.4.2.5 Réseau électrique (Utility Grid)

Le réseau public joue un rôle complémentaire :

En déficit de production :

- Il fournit l'énergie manquante.

En excédent de production :

- Il reçoit l'énergie injectée par le système photovoltaïque.

1.5 Connexion directe (source charge)

La connexion directe source-charge représente la configuration la plus simple d'un système photovoltaïque. Dans ce mode de fonctionnement, le générateur photovoltaïque (source) est relié directement à la charge électrique sans passer par un convertisseur d'adaptation intermédiaire. L'énergie produite par les panneaux est donc consommée immédiatement par la charge. Cette structure est souvent utilisée dans les petites applications autonomes telles que le pompage solaire, la ventilation, l'éclairage DC ou les capteurs isolés. [4]

1.5.1 Principe de fonctionnement

Le générateur photovoltaïque délivre une tension et un courant variables selon:

- L'irradiation solaire
- La température
- Les caractéristiques du panneau
- La charge connectée

Lorsque la charge est branchée directement aux bornes du panneau, le point de fonctionnement du système est imposé par l'intersection entre

- La courbe I-V du panneau photovoltaïque
- La caractéristique électrique de la charge

Ainsi, le générateur ne fonctionne pas nécessairement au point de puissance maximale (MPP), ce qui entraîne souvent une perte énergétique.

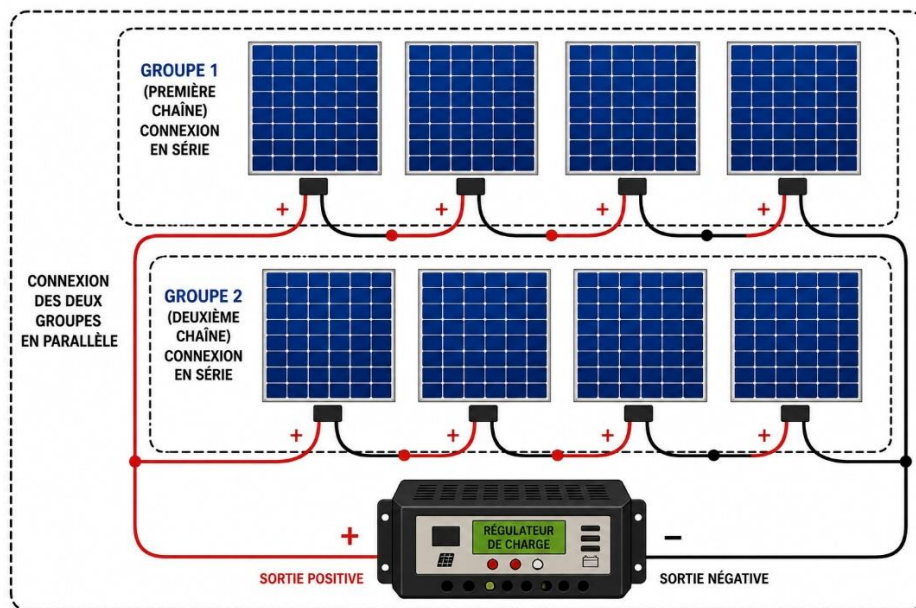


Figure 1.5 : Connexion série-parallèle des panneaux photovoltaïques.

1.5.2 Avantages de la connexion directe

Simplicité de réalisation :

Pas besoin de convertisseur électronique.

Coût réduit :

Moins de composants.

Fiabilité élevée :

Structure simple avec peu de maintenance.

Rendement correct pour petites puissances :

Applications de faible coût.

1.5.3 Inconvénients de la connexion directe

Pas de MPPT :

- Le panneau ne travaille pas au point optimal.

Rendement faible en conditions variables :

- Variation importante avec le climat.

Mauvaise adaptation source-charge :

- Si la charge change, la puissance chute.

Tension instable :

- Non adaptée aux charges sensibles.

1.5.4 Applications pratiques

Utilisée dans:

- Pompage d'eau solaire DC
- Ventilation solaire
- Éclairage simple
- Charge batterie basique
- Instrumentation isolée

1.6 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une Charge

L'étage d'adaptation est un dispositif électronique placé entre le générateur photovoltaïque et la charge afin d'assurer un transfert optimal de l'énergie produite. Comme les caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque varient en fonction de l'irradiation solaire, de la température et du niveau de charge, une connexion directe ne permet pas toujours un fonctionnement efficace. L'étage d'adaptation devient donc nécessaire pour ajuster la tension, le courant et la puissance délivrés à la charge. [5]

1.6.1 Rôles principaux de l'étage d'adaptation:

- Adapter la tension du générateur photovoltaïque aux besoins de la charge
- Améliorer le rendement global du système
- Permettre l'extraction de la puissance maximale disponible
- Protéger la charge contre les variations électriques
- Stabiliser le fonctionnement du système

1.6.2 Principaux types utilisés :

- Convertisseur DC-DC

Le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Il peut être :

- **Boost** : élévateur de tension
- **Buck** : abaisseur de tension
- **Buck-Boost** : élévateur/abaaisseur

1.6.3 Importance dans les systèmes photovoltaïques

L'étage d'adaptation permet au générateur photovoltaïque de fonctionner près du point de puissance maximale (MPP) grâce aux techniques MPPT, ce qui augmente significativement l'énergie récupérée.

1.7 Étage d'adaptation en utilisant un convertisseur DC-DC

L'étage d'adaptation utilisant un convertisseur DC-DC est largement employé dans les systèmes photovoltaïques afin d'assurer la compatibilité électrique entre le générateur photovoltaïque et la charge ou la chaîne de conversion. Ce convertisseur permet de modifier le niveau de tension continue produit par les panneaux solaires, tout en optimisant le transfert de puissance.

Le générateur photovoltaïque délivre une tension variable selon les conditions climatiques. Le convertisseur DC-DC intervient alors pour maintenir une tension adaptée et garantir un fonctionnement stable du système. [2]

1.7.1 Rôles principaux du convertisseur DC-DC:

- Adaptation de la tension continue
- Amélioration du rendement énergétique
- Fonctionnement au point de puissance maximale (MPP)
- Stabilisation de la sortie
- Protection de la charge
- Réduction des pertes énergétiques

1.7.2 Principaux types de convertisseurs DC-DC:

1.7.2.1 Convertisseur Buck (abaisseur)

Réduit la tension de sortie lorsque la tension PV est supérieure à celle requise par la charge.

1.7.2.2 Convertisseur Boost (élevateur)

Augmente la tension lorsque la tension du générateur photovoltaïque est insuffisante.

1.7.2.3 Convertisseur Buck-Boost

Permet d'augmenter ou de diminuer la tension selon les besoins du système.

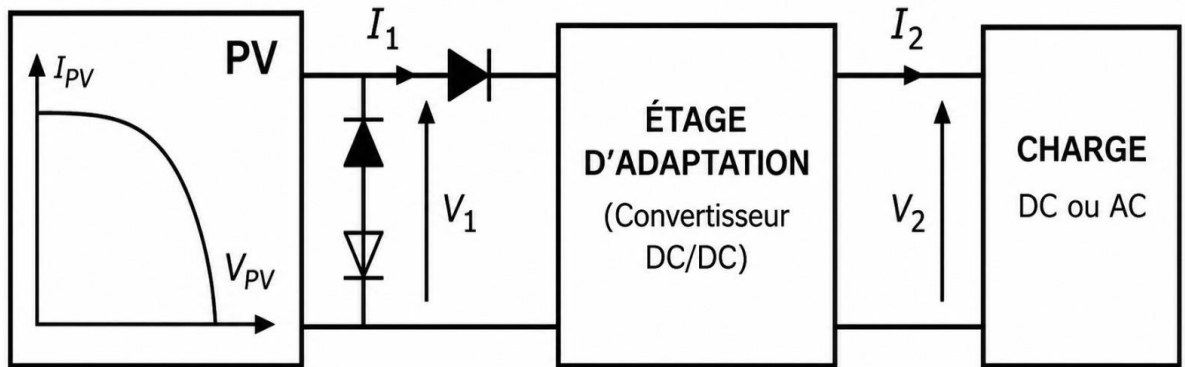


Figure 1.6 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

1.7.3 Principe de commande

Le fonctionnement du convertisseur repose sur la variation du rapport cyclique (Duty Cycle) du signal de commande appliqué à l'interrupteur électronique.

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (1.3)$$

où:

D : Rapport cyclique

T_{on} : Durée de conduction

T : Période de commutation

En modifiant D , on contrôle la tension de sortie.

1.7.4 Lien avec le MPPT

Dans les systèmes photovoltaïques, le convertisseur DC-DC est généralement piloté par un algorithme MPPT, qui ajuste automatiquement le rapport cyclique afin de maintenir le générateur au point de puissance maximale.

1.8 Fonctionnement d'un générateur PV à sa Puissance Maximale

Le générateur photovoltaïque possède un point de fonctionnement particulier appelé point de puissance maximale (Maximum Power Point – MPP), où le produit de la tension et du courant atteint sa valeur la plus élevée. En raison des variations climatiques telles que l'irradiation solaire et la température, ce point se déplace continuellement. Il est donc

nécessaire d'adapter en permanence le fonctionnement du générateur afin d'extraire la puissance maximale disponible.[6]

Le fonctionnement au MPP permet:

- 2 Maximisation de l'énergie produite
- 3 Amélioration du rendement global
- 4 Réduction des pertes énergétiques
- 5 Alimentation optimale de la charge ou du réseau

1.8.1 Principe

Le principe consiste à ajuster la tension ou le courant du générateur photovoltaïque à l'aide d'un convertisseur DC-DC commandé par une méthode MPPT, afin de maintenir le système au voisinage du point de puissance maximale.

La puissance du générateur est donnée par:

$$P = V \times I \quad (1.4)$$

Le point optimal est atteint lorsque:

$$\frac{dP}{dV}=0 \quad (1.5)$$

Cela signifie que toute variation de tension autour de ce point provoque une diminution de la puissance produite.

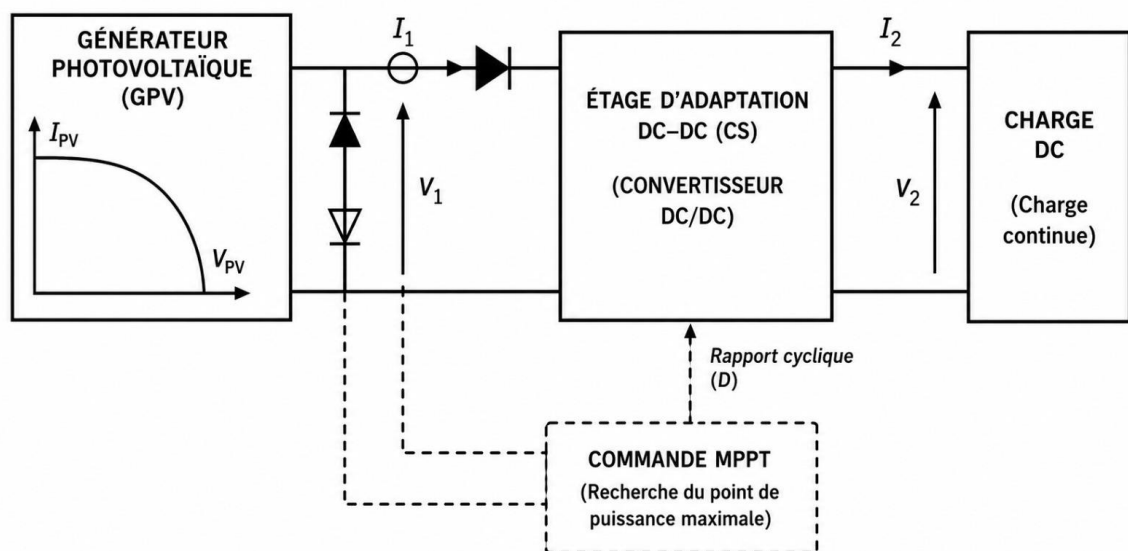


Figure 1.7 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

1.9 Les commandes MPPT

Les commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking) regroupent l'ensemble des techniques de contrôle utilisées pour maintenir le générateur photovoltaïque au voisinage de son point de puissance maximale (MPP) malgré les variations d'irradiation solaire, de température et de charge.

Comme la caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque est non linéaire, le point optimal change continuellement selon les conditions climatiques. Les commandes MPPT permettent donc d'extraire la puissance maximale disponible à chaque instant [7]
L'utilisation d'une commande MPPT améliore:

- Le rendement énergétique du système
- La quantité d'énergie récupérée
- La stabilité de fonctionnement
- Les performances du convertisseur DC-DC
- L'efficacité globale de la chaîne photovoltaïque

1.9.1 Principe du MPPT

Le principe du MPPT consiste à mesurer en permanence les grandeurs électriques du générateur photovoltaïque (tension et courant), puis à commander un convertisseur DC-DC afin d'ajuster le point de fonctionnement vers la zone où la puissance produite est maximale.

La puissance instantanée est donnée par:

$$P = V \times I \quad (1.6)$$

Le point maximal est obtenu lorsque :

$$\frac{dP}{dV}=0 \quad (1.7)$$

Le contrôleur MPPT agit généralement sur le rapport cyclique du convertisseur :

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (1.8)$$

où:

D : Rapport cyclique

T_{on} : Durée de conduction

T : Période de commutation

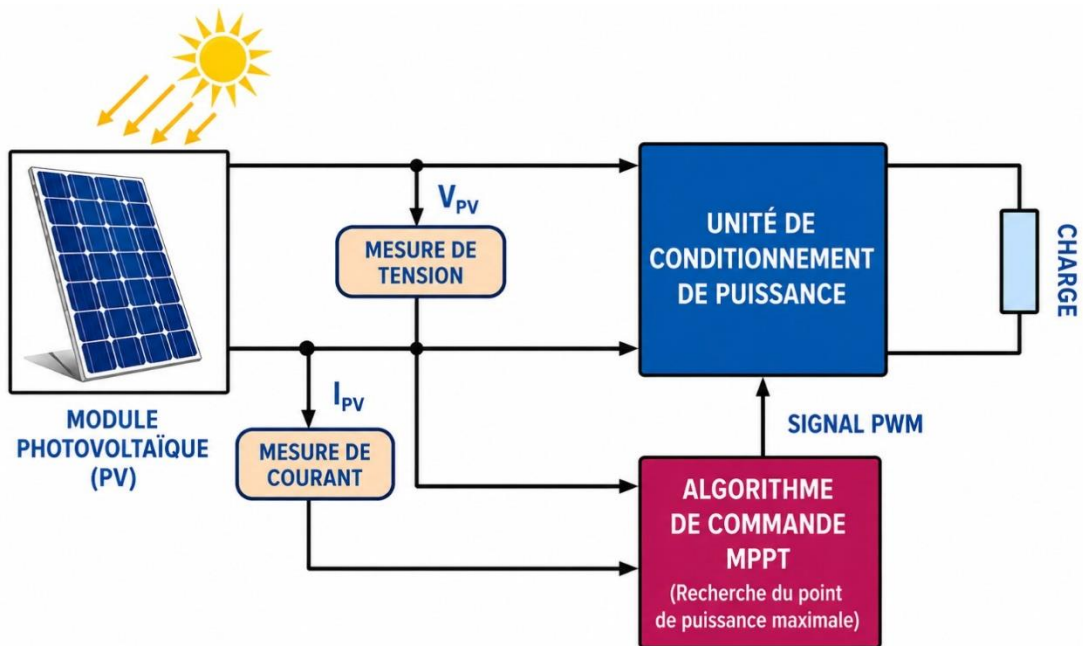


Figure 1.8 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque avec commande MPPT et unité de conditionnement de puissance.

1.9.2 Fonctionnement simplifié :

1. Mesure de V_{pv} et I_{pv}
2. Calcul de la puissance
3. Décision de correction
4. Commande du convertisseur
5. Convergence vers le point MPP.

1.9.3 Importance dans ton projet

Dans ton mémoire :

Model Predictive Control of the Solar Power Conversion Chain for Seamless Grid Integration in Photovoltaic Systems le MPPT représente la première étape d'optimisation énergétique avant

- La conversion DC/AC
- La régulation du bus DC
- L'injection réseau

La commande prédictive MPC peut remplacer les méthodes classiques MPPT pour obtenir de meilleures performances dynamiques.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, une étude générale sur les systèmes photovoltaïques et les commandes classiques MPPT a été présentée. Nous avons d'abord rappelé l'importance croissante de l'énergie solaire photovoltaïque comme solution durable face à l'épuisement des ressources conventionnelles et aux contraintes environnementales actuelles.

Ensuite, le principe de la conversion photovoltaïque a été exposé, en mettant en évidence le rôle des cellules solaires dans la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique continue. La structure du générateur photovoltaïque, ses principales caractéristiques électriques ainsi que l'influence des paramètres climatiques, notamment l'irradiation solaire et la température, ont également été étudiées.

Nous avons également présenté les étages d'adaptation entre la source photovoltaïque et la charge, en particulier l'utilisation des convertisseurs DC-DC, indispensables pour adapter la tension produite et améliorer le transfert de puissance.

L'ensemble des notions développées dans ce chapitre constitue donc une base théorique indispensable pour aborder, dans les chapitres suivants, la modélisation avancée de la chaîne de conversion photovoltaïque ainsi que l'application de la commande prédictive (Model Predictive Control) pour assurer une intégration efficace et stable au réseau électrique.

Chapitre 2

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

2.1 Introduction

Dans le cadre des systèmes photovoltaïques modernes, la modélisation constitue une étape essentielle pour analyser, concevoir et optimiser les performances de la chaîne de conversion de puissance. En effet, le comportement du générateur photovoltaïque ainsi que celui des différents convertisseurs électroniques dépendent fortement des conditions environnementales et des paramètres internes du système.

La chaîne de conversion photovoltaïque comprend plusieurs éléments principaux, notamment le générateur PV, le convertisseur DC/DC, le bus continu, l'onduleur DC/AC et le réseau électrique. Chacun de ces blocs possède une dynamique propre qui doit être modélisée avec précision afin de garantir un fonctionnement stable et efficace, en particulier dans les systèmes connectés au réseau.

La modélisation mathématique permet ainsi de décrire les relations entre les grandeurs électriques telles que la tension, le courant et la puissance. Elle constitue également la base fondamentale pour la simulation numérique et le développement des stratégies de commande avancées, telles que la commande prédictive (Model Predictive Control – MPC), utilisée pour améliorer la qualité de l'énergie et assurer une intégration optimale au réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation détaillée des différents éléments constituant la chaîne de conversion photovoltaïque. Nous commencerons par le modèle du générateur photovoltaïque, puis nous étudierons les convertisseurs DC-DC, le bus continu, l'onduleur ainsi que le modèle du réseau électrique. Enfin, une modélisation globale du système sera établie afin de préparer l'application des techniques de commande avancées dans le chapitre suivant.

2.2 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base d'un panneau solaire. Un module photovoltaïque est obtenu par l'association de plusieurs cellules connectées en série et/ou en parallèle afin d'augmenter la tension et la puissance délivrées.

Dans le cas d'une cellule élémentaire, son comportement électrique peut être représenté par un modèle équivalent composé d'une source de courant, d'une diode ainsi que de deux résistances internes. Ce modèle, appelé modèle à une diode, est le plus utilisé grâce à sa simplicité et à sa bonne précision pour l'analyse des systèmes photovoltaïques.

Bien qu'il existe également des modèles plus complexes, tels que le modèle à deux diodes, le modèle à une diode reste le plus adapté dans cette étude.

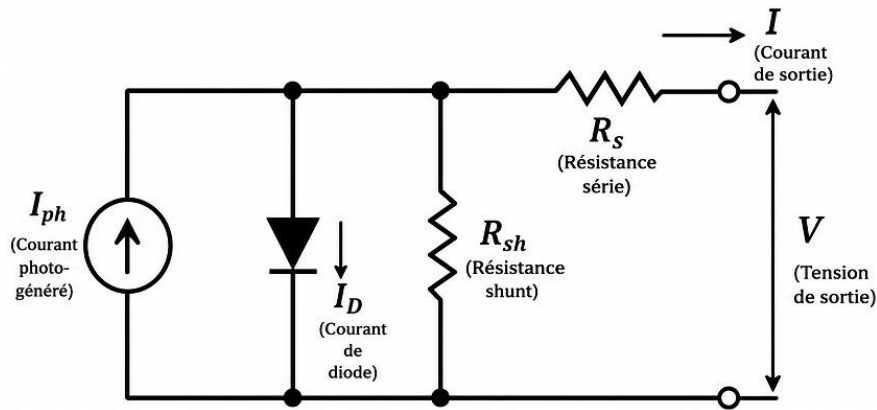


Figure 2.1 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

La cellule photovoltaïque réelle comporte une résistance série R_s ainsi qu'une résistance parallèle appelée résistance shunt R_{sh} . Ces deux paramètres influencent directement la caractéristique courant-tension $I = f(V)$ de la cellule photovoltaïque.

- **La résistance série R_s**

Elle traduit les pertes ohmiques internes de la cellule photovoltaïque. Sa valeur dépend principalement de la résistivité du matériau semi-conducteur, des contacts métalliques ainsi que des connexions des grilles collectrices. Une augmentation de cette résistance entraîne une diminution du rendement de la cellule. [8]

- **La résistance shunt R_{sh}**

Elle représente les courants de fuite apparaissant au niveau de la jonction de la cellule. Cette résistance est liée principalement à la qualité de fabrication et aux défauts internes de la photopile. Une faible valeur de R_{sh} provoque des pertes de courant et dégrade les performances du générateur photovoltaïque. [9]

2.2.1 Performances du GPV :

Caractéristique Courant-Tension :

La figure 2.2 présente la courbe caractéristique courant-tension ($I - V$) d'une cellule photovoltaïque sous des conditions standards d'essai, avec un éclairement de $1000W/m^2$ et une température de fonctionnement de $25^\circ C$.

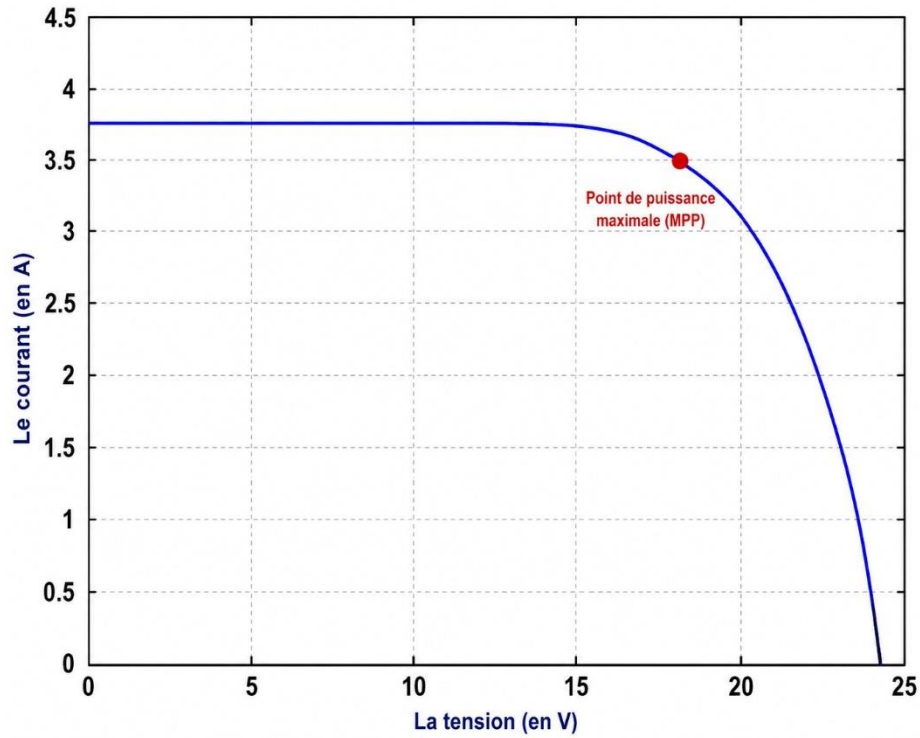


Figure 2.2 : Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire.

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par:

$$P_{max} = V_{op} \times I_{op} \quad (2.1)$$

Caractéristique Courant-Tension:

En faisant varier l'irradiation solaire entre 200 et 1000 W/m^2 avec un incrément de 200 W/m^2 , les figures 2.3 et 2.4 illustrent respectivement les caractéristiques courant-tension ($I - V$) et puissance-tension ($P - V$) du module photovoltaïque sous différents niveaux d'éclairement.

La figure 2.3 montre l'évolution de la puissance fournie par la cellule photovoltaïque en fonction de la tension pour plusieurs niveaux d'irradiation solaire. Cette représentation permet de mettre en évidence l'effet de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension $P(V)$.

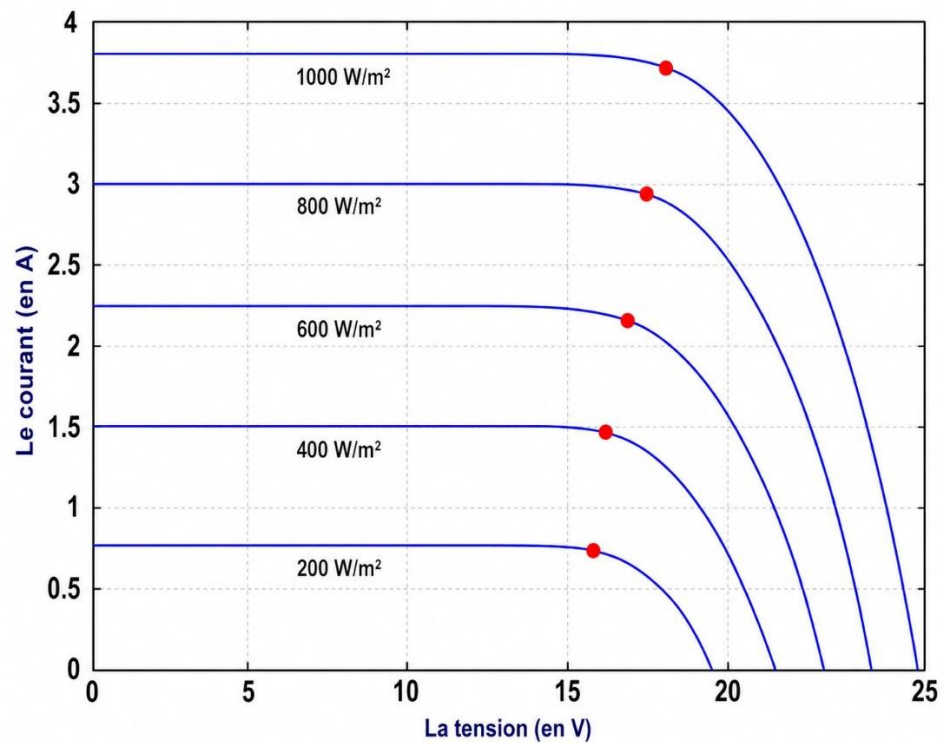


Figure 2.3: Caractéristique $I(V)$ pour d'éclairement ($T = 25^\circ\text{C}$).

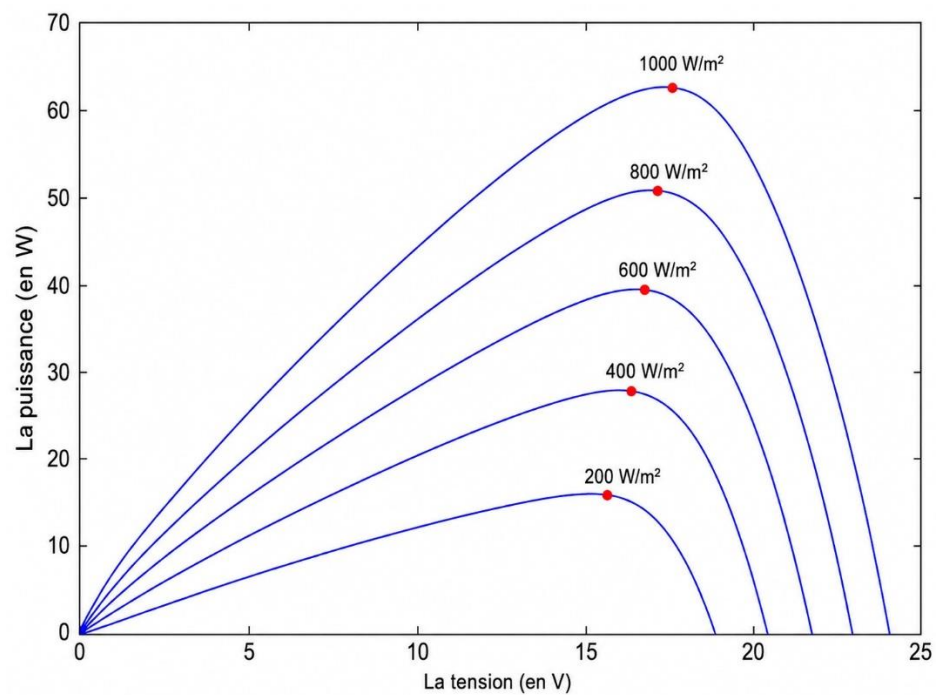


Figure 2.4 : Caractéristique $P(V)$ pour d'éclairement ($T = 25^\circ\text{C}$).

2.2.2 Influence de la température:

La température constitue l'un des paramètres les plus influents sur les performances électriques d'un générateur photovoltaïque. Lorsque la température des cellules photovoltaïques augmente, les caractéristiques électriques du module subissent des variations importantes, notamment au niveau de la tension de sortie, du courant et de la puissance maximale délivrée.

En général, l'augmentation de la température provoque une diminution de la tension de circuit ouvert V_{oc} , tandis que le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement. Cependant, la diminution de la tension reste plus importante que l'augmentation du courant, ce qui entraîne une baisse de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

La caractéristique courant-tension ($I - V$) se déplace alors vers des tensions plus faibles lorsque la température augmente. De même, la courbe puissance-tension ($P - V$) montre une réduction progressive de la puissance maximale disponible. Ce phénomène affecte directement le rendement global du système photovoltaïque et justifie l'utilisation des techniques MPPT afin d'assurer un fonctionnement optimal malgré les variations thermiques.[10]

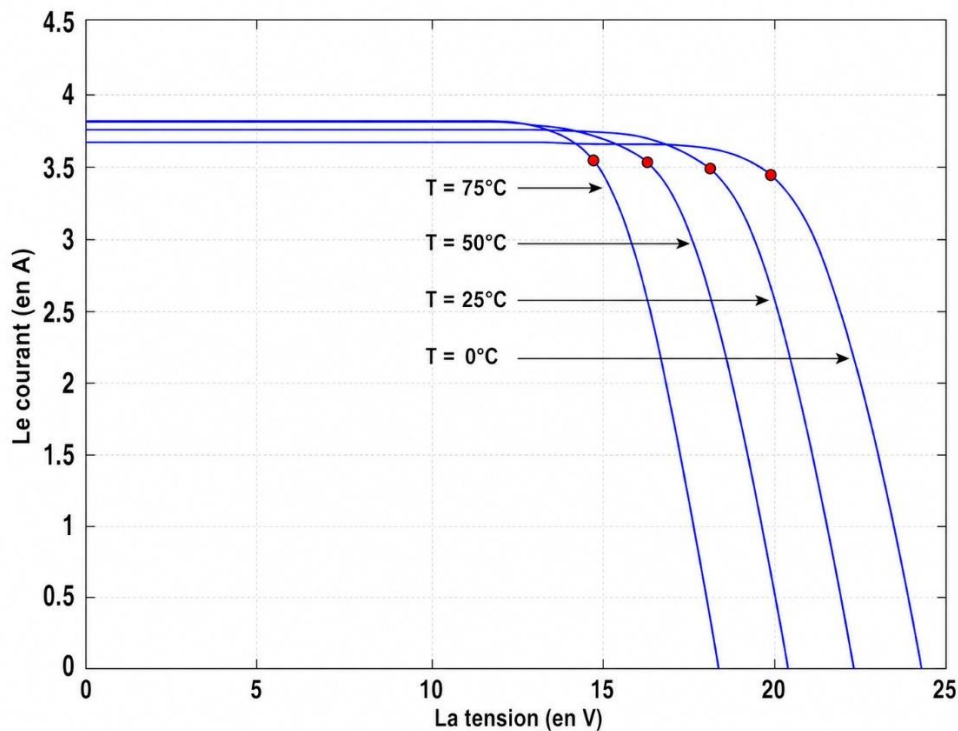


Figure 2.5: Caractéristique $I(V)$ pour température.

Caractéristiques principales:

La courbe $I-V$ montre l'évolution du courant en fonction de la tension pour plusieurs températures de fonctionnement.

Observations importantes :

- Lorsque la température augmente, la tension de sortie diminue progressivement
- Le courant de court-circuit I_{sc} varie légèrement
- La tension à vide V_{oc} subit une diminution importante
- Le point de puissance maximale se déplace vers des tensions plus faibles
- Les performances globales du générateur photovoltaïque diminuent avec l'augmentation de la température.
- **Interprétation physique:**

L'augmentation de la température provoque une élévation de l'agitation thermique dans le semi-conducteur, ce qui réduit la tension générée par la jonction PN.

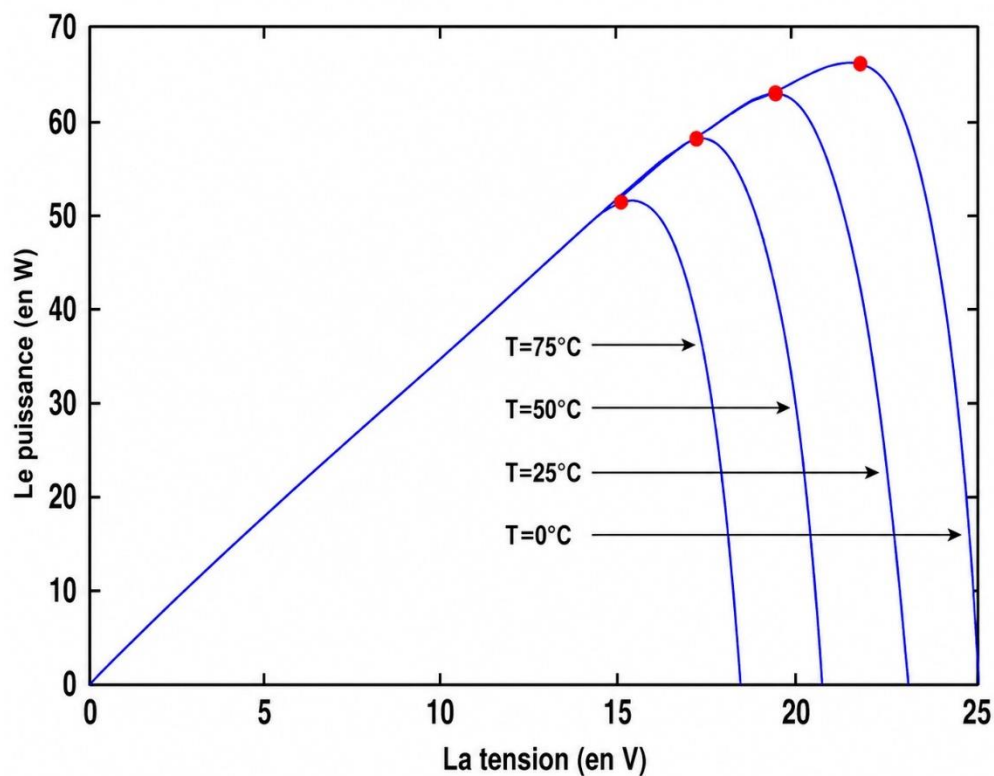


Figure 2.6: Caractéristique $P(V)$ pour température.

Caractéristiques principales :

La courbe $P - V$ représente la variation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de la tension.

Observations importantes:

- La puissance maximale diminue lorsque la température augmente
- Le sommet de la courbe P_{max} se déplace vers des tensions plus faibles
- Les températures élevées réduisent le rendement énergétique du panneau
- Le point MPP change continuellement selon la température.

Interprétation physique:

Une augmentation de la température réduit principalement la tension du module photovoltaïque, ce qui entraîne directement une diminution de la puissance maximale produite.

2.2.3 Association des Cellules photovoltaïques en Série :

L'association des cellules photovoltaïques en série est utilisée afin d'augmenter la tension de sortie du générateur photovoltaïque tout en conservant le même courant électrique. Dans cette configuration, la borne positive d'une cellule est reliée à la borne négative de la cellule suivante, formant ainsi une chaîne de cellules appelée module photovoltaïque.

Lorsque plusieurs cellules sont connectées en série, les tensions individuelles s'additionnent alors que le courant reste identique dans l'ensemble de la chaîne. Cette méthode est largement utilisée dans les systèmes photovoltaïques nécessitant une tension élevée pour alimenter les convertisseurs DC-DC, les onduleurs ou les charges électriques. [11]

La tension totale du générateur photovoltaïque connecté en série peut être exprimée par :

$$V_{total} = N_s \times V_{cellule} \quad (2.2)$$

où :

- N_s : nombre de cellules connectées en série
- $V_{cellule}$: tension produite par une cellule photovoltaïque.

Le courant total reste égal au courant d'une seule cellule :

$$I_{total} = I_{cellule} \quad (2.3)$$

Ce type d'association est le plus fréquemment adopté dans la fabrication des modules photovoltaïques commerciaux.

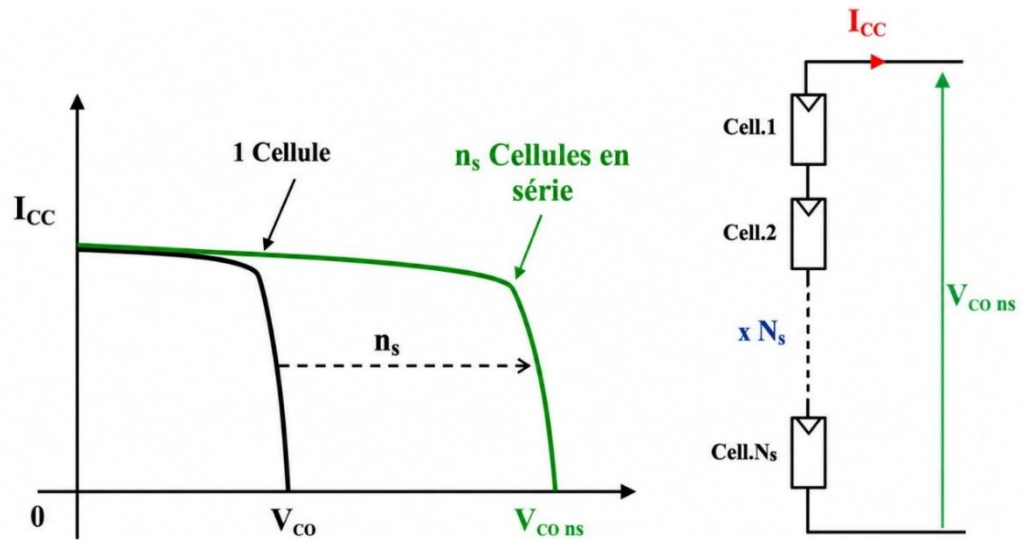


Figure 2.7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.

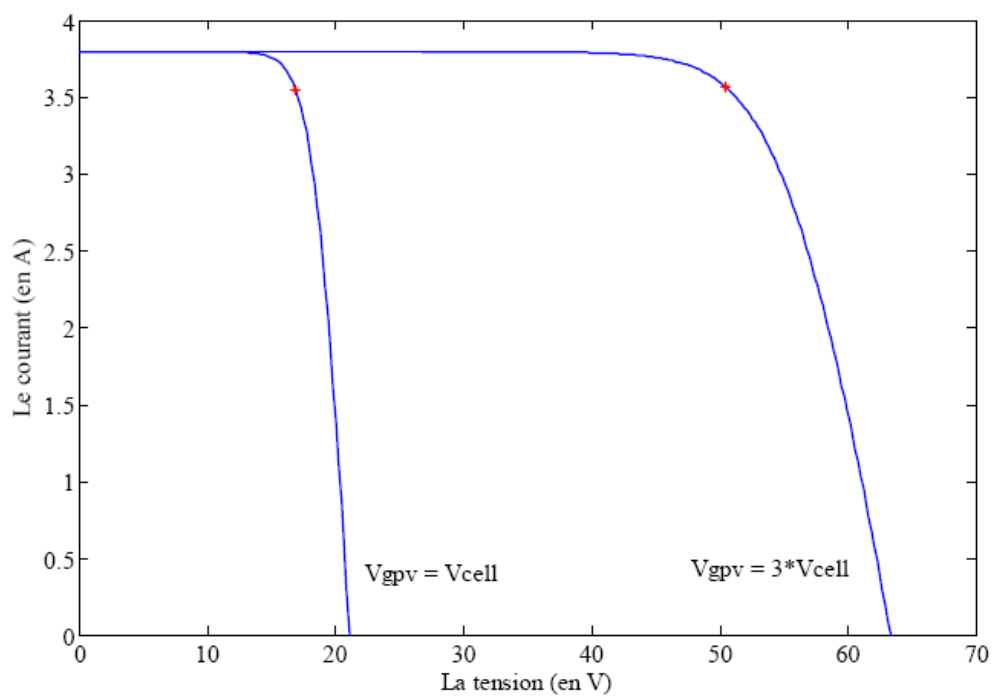


Figure 2.8 : Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en série.

2.2.4 Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

L'association des cellules photovoltaïques en parallèle est utilisée principalement pour augmenter le courant fourni par le générateur photovoltaïque tout en maintenant une tension de sortie pratiquement constante. Dans cette configuration, toutes les bornes positives des cellules sont reliées ensemble, de même que les bornes négatives.

Lorsque plusieurs cellules sont connectées en parallèle, les courants produits par chaque cellule s'additionnent alors que la tension reste identique à celle d'une seule cellule photovoltaïque. Cette méthode est souvent employée dans les applications nécessitant une forte intensité de courant.

Le courant total du générateur photovoltaïque peut être exprimé par :

$$I_{total} = N_p \times I_{cellule} \quad (2.4)$$

où :

- N_p : nombre de cellules connectées en parallèle.
- $I_{cellule}$: courant délivré par une cellule photovoltaïque.

La tension totale reste pratiquement constante :

$$V_{total} = V_{cellule} \quad (2.5)$$

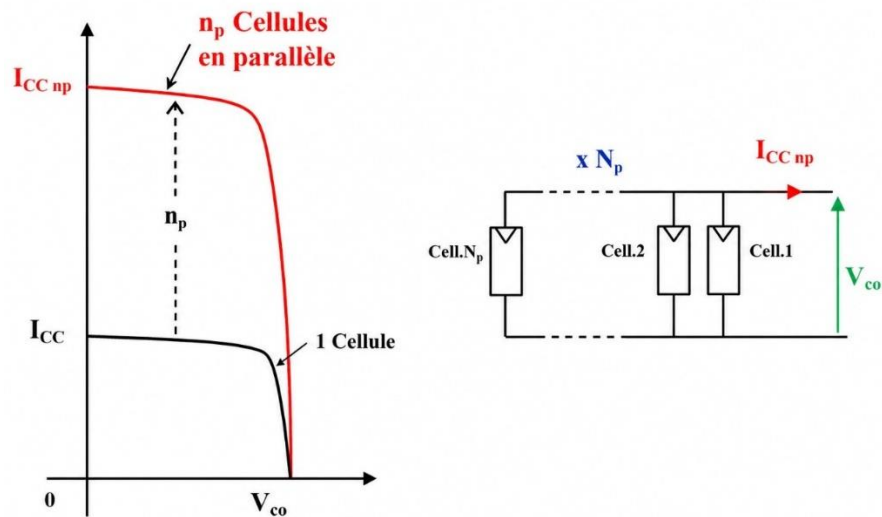


Figure 2.9: Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

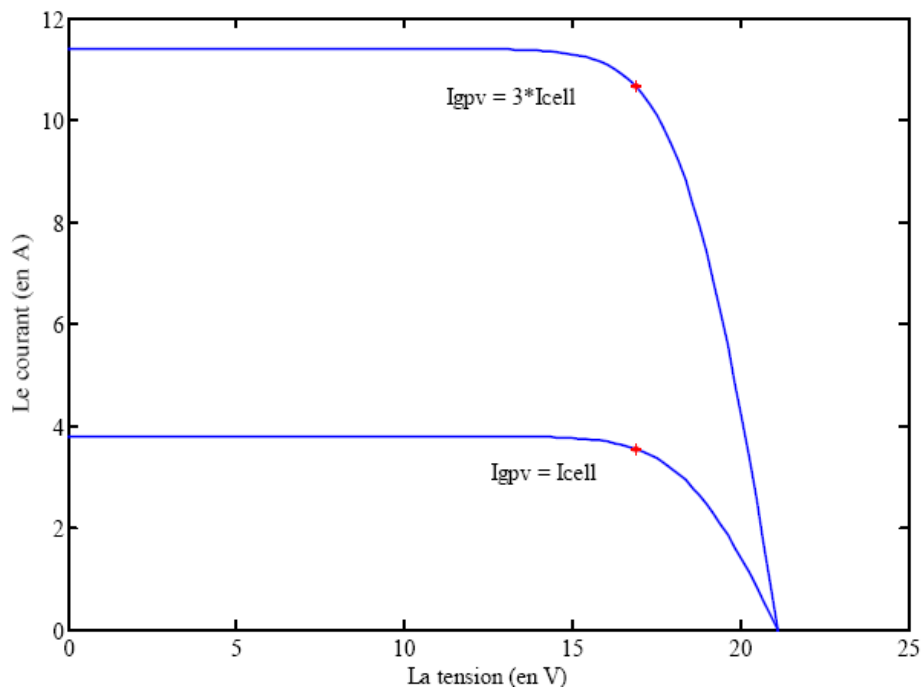


Figure 2.10 :Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en parallèle.

2.3 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC :

L'étage d'adaptation DC-DC est un convertisseur électronique placé entre le générateur photovoltaïque et la charge ou le bus continu. Son rôle principal est d'adapter le niveau de tension et de courant afin d'assurer un transfert optimal de puissance.

Dans les systèmes photovoltaïques, cet étage est généralement associé à une commande MPPT permettant au générateur PV de fonctionner au voisinage du point de puissance maximale quelles que soient les variations de l'éclairement solaire ou de la température.[12]

L'étage d'adaptation fonctionne grâce à une commutation rapide d'un interrupteur électronique commandé par un signal PWM. En modifiant le rapport cyclique, le convertisseur peut :

- Augmenter la tension (Boost)
- Diminuer la tension (Buck)
- Ou réaliser les deux fonctions (Buck-Boost).

Les principaux composants d'un convertisseur DC-DC sont :

- Un interrupteur électronique (MOSFET ou IGBT)
- Une inductance
- Une diode
- Un condensateur de filtrage.

Les fonctions essentielles de cet étage sont :

- L'adaptation de tension entre le GPV et la charge
- L'optimisation du transfert de puissance
- La stabilisation de la tension du bus continu
- L'amélioration du rendement énergétique du système photovoltaïque.

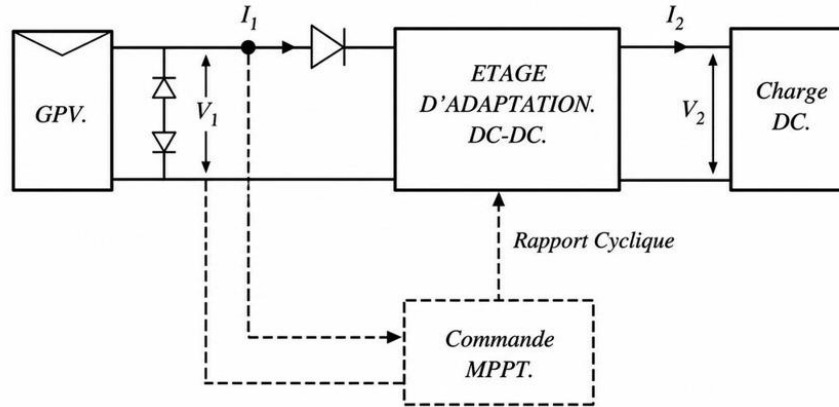


Figure 2.11 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.

2.4 Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un hacheur DC-DC capable de fournir une tension de sortie supérieure ou inférieure à la tension d'entrée selon le rapport cyclique appliqué à l'interrupteur de commande. Ce type de convertisseur est largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques afin d'assurer l'adaptation énergétique entre le générateur photovoltaïque et la charge ou le bus continu. [13]

Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost repose sur deux états principaux :

- **Etat ON (interrupteur fermé) :**

L'énergie est stockée dans l'inductance tandis que la diode est bloquée. Le courant dans l'inductance augmente progressivement.

- **Etat OFF (interrupteur ouvert) :**

L'énergie emmagasinée dans l'inductance est transférée vers la charge à travers la diode, ce qui permet d'alimenter la sortie.

Ce mode de fonctionnement permet d'obtenir une tension de sortie contrôlée et adaptée aux besoins du système photovoltaïque.

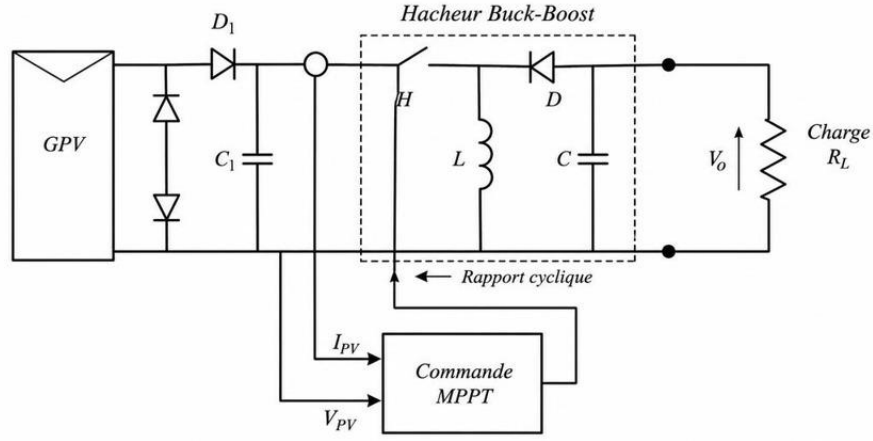


Figure 2. 12 : Schéma de control du MPPT.

La figure (2.12) présente le schéma global de commande MPPT adopté dans cette étude. L'étage d'adaptation utilisé est basé sur un convertisseur Buck-Boost permettant d'obtenir une plus grande flexibilité dans l'adaptation de la charge grâce à la variation du rapport cyclique. Afin d'assurer la protection du générateur photovoltaïque contre le retour du courant, une diode anti-retour D_1 a été intégrée au système.

Le convertisseur Buck-Boost est capable de fournir une tension de sortie soit supérieure, soit inférieure à la tension d'entrée selon le mode de fonctionnement imposé par la commande. Il est constitué principalement d'une source photovoltaïque, d'un interrupteur commandé H , d'une inductance L , d'une diode D , d'un condensateur de filtrage d'entrée C_1 , d'un condensateur de sortie C , ainsi que d'une charge résistive R_L .

Le pilotage de l'interrupteur par la technique PWM permet de contrôler efficacement le transfert de puissance et d'assurer le fonctionnement du générateur photovoltaïque au voisinage du point de puissance maximale.

Dans le cas d'un convertisseur DVC-DC on choisit comme variable d'état le vecteur :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{pv} \\ i_L \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\text{sa dérivée : } \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_0}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.4.1 Modélisation et analyse de fonctionnement du hacheur Buck-Boost :

Le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost peut être étudié selon deux intervalles correspondant aux états de commutation de l'interrupteur commandé H .

- Pendant l'intervalle $0 \leq t \leq dT$

Durant cette phase, l'interrupteur H est fermé tandis que la diode D est bloquée. L'inductance L emmagasine l'énergie provenant du générateur photovoltaïque, ce qui provoque une augmentation progressive du courant dans l'inductance.

Le condensateur de sortie assure l'alimentation de la charge pendant cette période.

Les équations du fonctionnement sont données par :

$$V_L = V_{pv} \quad (2.8)$$

Et :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \quad (2.9)$$

L'interrupteur H est fermé ($H = 1$), la diode D ayant un potentiel négatif à ses bornes se trouvant bloquée. La structure du hacheur pour cet état devienne comme suit :

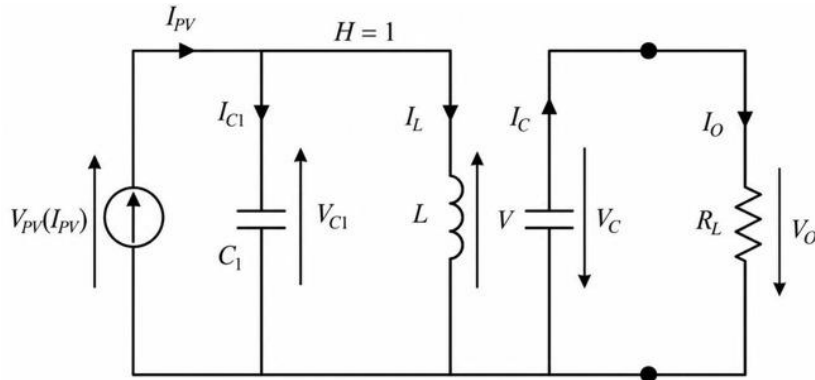


Figure 2.13 : La structure du hacheur dans l'état de fermeture de l'interrupteur H .

Les équations différentielles qui régissent la dynamique du vecteur d'état sont données par :

$$\begin{cases} \dot{V}_{PV} = \frac{i_{PV}}{C_1} - \frac{i_L}{C_1} \\ i_L = \frac{V_{PV}}{L} \\ \dot{V}_O = -\frac{V_O}{CR_L} \end{cases} \quad (2.10)$$

• Pendant l'intervalle $dT \leq t \leq T$:

Durant cette phase, l'interrupteur H est ouvert tandis que la diode D devient passante. L'énergie précédemment stockée dans l'inductance L est transférée vers le condensateur de sortie et la charge R_L . Le courant dans l'inductance décroît progressivement jusqu'au début du cycle suivant.

Le condensateur de sortie assure également le filtrage de la tension afin de maintenir une tension de sortie stable.

L'interrupteur H est ouvert ($H=0$), la diode D devient passante. La structure du hacheur pour cet état devienne comme suit :

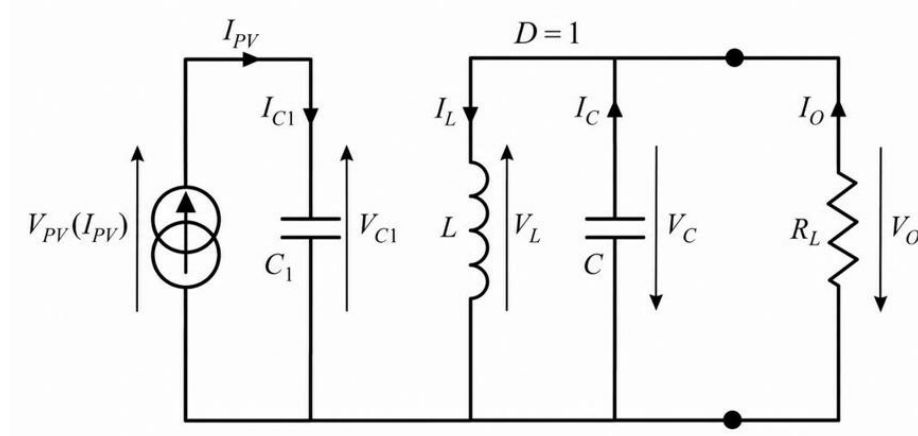


Figure 2.14 : La structure du hacheur dans l'état d'ouverture de l'interrupteur H .

Les équations différentielles de cet état sont comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \dot{V}_{PV} = \frac{I_{PV}}{C_1} \\ \frac{di_L}{dt} = \dot{i}_L = -\frac{V_0}{L} \\ \frac{dV_0}{dt} = \dot{V}_0 = \frac{i_L}{C} - \frac{V_0}{CR_L} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \dot{V}_{PV} = \frac{I_{PV}}{C_1} - \frac{i_L}{C_1} u \\ \frac{di_L}{dt} = \dot{i}_L = -\frac{V_0}{L} + \frac{u}{L} (V_{PV} + V_0) \\ \frac{dV_0}{dt} = \dot{V}_0 = -\frac{i_L}{C} u - \frac{V_0}{CR_L} + \frac{i_L}{C} \end{cases} \quad (2.12)$$

Notons que le système d'équations (2.26) peut-être écrit sous la forme générale d'un système non-linéaire invariant dans le temps par :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.13)$$

$$f(X) = \begin{bmatrix} \frac{I_{PV}}{C_e} \\ -\frac{V_{dc}}{L} \\ \frac{i_L}{C} - \frac{i_e}{C} \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{i_L}{C_e} \\ \frac{V_{PV} + V_{dc}}{L} \\ -\frac{i_L}{C} \end{bmatrix}$$

2.5 Modélisation du Bus Continu :

Le bus continu (DC Bus) représente un élément fondamental dans la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Il assure la liaison énergétique entre le convertisseur DC-DC, l'onduleur et éventuellement les systèmes de stockage. Son rôle principal consiste à stabiliser la tension continue et à garantir un transfert efficace de puissance entre les différentes parties du système photovoltaïque. [14]

Dans les systèmes raccordés au réseau, le bus continu agit comme une interface énergétique intermédiaire permettant de découpler dynamiquement le côté production photovoltaïque du côté réseau électrique.

Rôle du Bus Continu :

Le bus continu assure plusieurs fonctions importantes :

- Stabilisation de la tension continue
- Stockage temporaire de l'énergie électrique
- Alimentation de l'onduleur
- Réduction des fluctuations de puissance
- Amélioration de la qualité énergétique.

Equation dynamique du Bus Continu :

L'évolution de la tension du bus continu est donnée par :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc} - I_{ond} \quad (2.14)$$

où :

- C_{dc} : capacité du condensateur du bus continu
- V_{dc} : tension du bus continu
- I_{dc} : courant fourni par le convertisseur photovoltaïque
- I_{ond} : courant absorbé par l'onduleur.

Cette relation montre que la tension du bus dépend directement de l'équilibre énergétique entre la puissance injectée et la puissance consommée.

2.6 Modélisation de l'onduleur de tension :

Les onduleurs de tension triphasés sont largement utilisés dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique afin d'assurer la conversion de l'énergie continue produite par le générateur photovoltaïque en énergie alternative triphasée.

Un onduleur triphasé est généralement constitué de trois bras de commutation, chaque bras comportant deux interrupteurs électroniques montés en série. Ces interrupteurs forment une cellule de commutation dont le fonctionnement doit être strictement complémentaire afin d'éviter tout court-circuit direct de la source continue.

Les composants de commutation utilisés sont généralement des transistors de puissance, tels que les MOSFET ou les IGBT, associés à des diodes antiparallèles permettant la circulation bidirectionnelle du courant. Dans certaines applications industrielles, des thyristors peuvent également être utilisés.

L'onduleur joue un rôle essentiel dans :

- L'injection de la puissance photovoltaïque vers le réseau
- Le contrôle des puissances active et réactive
- La synchronisation avec le réseau électrique
- L'amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite.

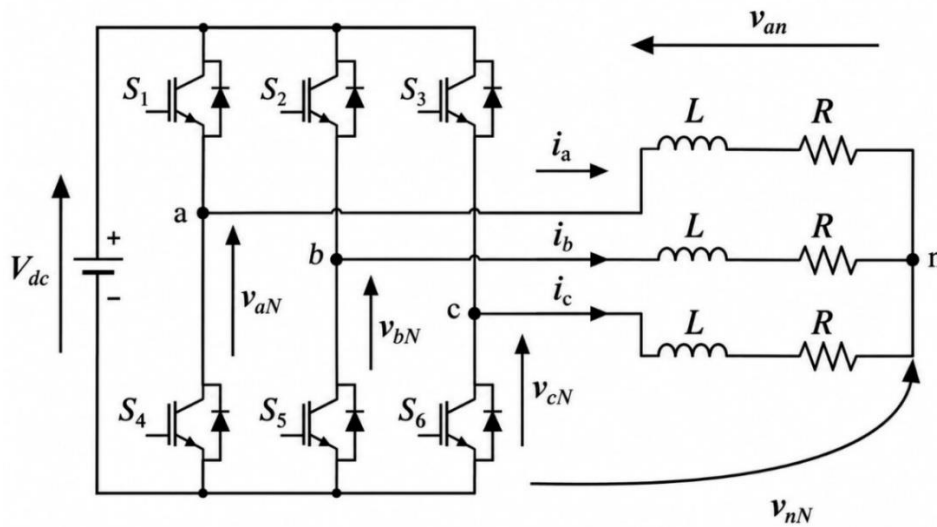


Figure 2.15 : Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension.

L'état de commutation des interrupteurs de puissance $S_x (x = 1 \dots 6)$.

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{si } S1 \text{ on et } S4 \text{ off} \\ 0 & \text{si } S1 \text{ on et } S4 \text{ on} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{si } S2 \text{ on et } S5 \text{ off} \\ 0 & \text{si } S2 \text{ on et } S5 \text{ on} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{si } S3 \text{ on et } S6 \text{ off} \\ 0 & \text{si } S3 \text{ on et } S6 \text{ on} \end{cases} \quad (2.17)$$

Ces signaux de commutation définissent la valeur des tensions de sortie et V_{dc} est la tension de la source.

$$V_{an} = S_a V_{dc} \quad (2.18)$$

$$V_{bn} = S_b V_{dc} \quad (2.19)$$

$$V_{cn} = S_c V_{dc} \quad (2.20)$$

Considérant le vecteur unitaire a qui représente le déphasage de 120° entre les phases, le vecteur tension de sortie peut être défini comme :

$$V = \frac{2}{3} (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad (2.21)$$

Tableau 2.1 :

Etats de commutation :

S_a	S_b	S_c	V
0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2}{3} V_{dc}$
1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	1	$-\frac{2}{3} V_{dc}$
0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	1	1	0

Tableau 2.1 : Vecteurs de tension de l'onduleur triphasé à deux niveaux et états de commutation associés.

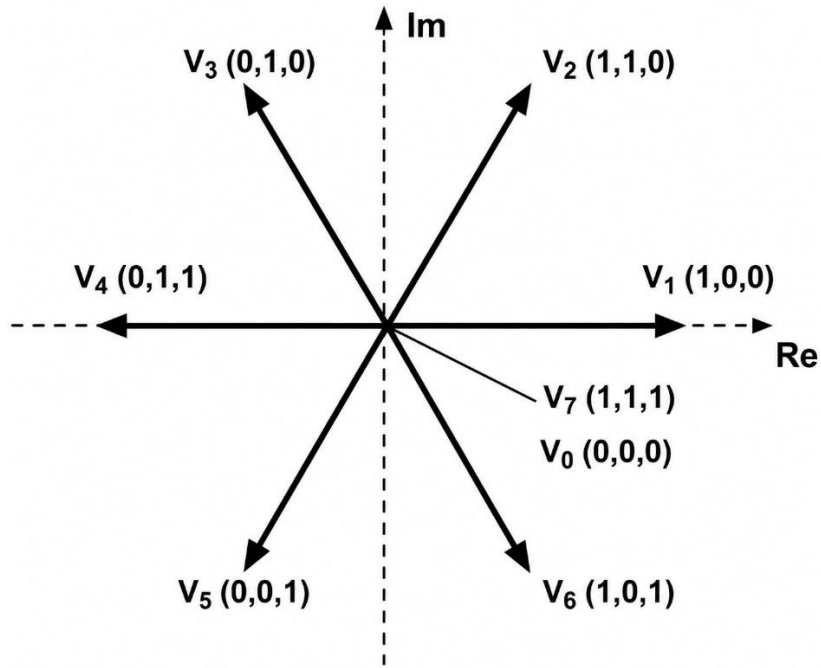


Figure 2.18: Présentation du vecteur de tension.

2.7 Modélisation du réseau électrique

L'onduleur de tension raccordé au réseau constitue un élément essentiel dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Son rôle principal est de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque et du bus continu en une tension alternative triphasée compatible avec le réseau électrique.

L'onduleur utilisé dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau est généralement un onduleur triphasé à deux niveaux composé de trois bras de commutation, chaque bras comportant deux interrupteurs commandés de manière complémentaire afin d'éviter le court-circuit de la source continue.

Le fonctionnement de l'onduleur repose sur des composants électroniques de puissance tels que les IGBT ou les MOSFET associés à des diodes antiparallèles. La commande des interrupteurs est réalisée par des techniques de modulation PWM (Pulse Width Modulation), permettant d'obtenir des tensions de sortie quasi sinusoïdales avec un faible taux d'harmoniques.

Dans le modèle mathématique de l'onduleur, les tensions de phase V_{an} , V_{bn} et V_{cn} représentent les tensions phase-neutre générées par l'onduleur. En appliquant les différentes combinaisons des signaux de commande S_a , S_b et S_c , huit états de commutation peuvent être obtenus. Toutefois, deux états correspondent au même vecteur nul, ce qui conduit finalement à sept vecteurs de tension distincts dans le plan complexe. Ces vecteurs sont utilisés dans les stratégies modernes de commande vectorielle et de modulation spatiale (SVM). [15]

Définitions des vecteurs :

$V_s(a, b, c) = [v_{sa} v_{sb} v_{sc}]^T$: le vecteur des tensions de la source

$V_f(a, b, c) = [v_{fa} v_{fb} v_{fc}]^T$: le vecteur de tension de l'onduleur relativement au nœud N

$V_f(a, b, c)K = [v_{faK} v_{fbK} v_{fcK}]^T$: le vecteur des tensions de l'onduleur relativement au nœud K

$i_s(a, b, c) = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T$: le vecteur des courants de source d'alimentation

$i_c(a, b, c) = [i_{ca} i_{cb} i_{cc}]^T$: le vecteur des courants de la charge non linéaire

$i_f(a, b, c) = [i_{fa} i_{fb} i_{fc}]^T$: le vecteur des courants du filtre

V_{dc} : la tension de la capacité de stockage

V_{nk} : la tension entre les nœuds N et K

En appliquant la loi des mailles, les expressions du vecteur $v_{f(a,b,c)}$ sont définies par :

$$v_{fa} = v_{sa} - L_f \frac{di_{fa}}{dt} - Ri_{fa} = s_a v_{dc} - v_{NK} \quad (2.22)$$

$$v_{fb} = v_{sb} - L_f \frac{di_{fb}}{dt} - Ri_{fb} = s_b v_{dc} - v_{NK} \quad (2.23)$$

$$v_{fc} = v_{sc} - L_f \frac{di_{fc}}{dt} - Ri_{fc} = s_c v_{dc} - v_{NK} \quad (2.24)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (2.25)$$

$$x_{abc} = abc_{T\alpha\beta} x_{\alpha\beta} \quad (2.26)$$

$$\alpha\beta_{Tabc} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, abc_{T\alpha\beta} = \frac{2}{3k} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\frac{di_{fa}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fa} - \frac{V_{dc}}{L_f} u_{\alpha} + \frac{1}{L_f} v_{s\alpha} \quad (2.28)$$

$$\frac{di_{f\beta}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{f\beta} - \frac{V_{dc}}{L_f} u_{\beta} + \frac{1}{L_f} v_{s\beta} \quad (2.29)$$

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des principaux éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. L'étude a d'abord porté sur le générateur photovoltaïque à travers son modèle électrique et l'analyse de ses caractéristiques I-V et P-V sous différentes conditions d'irradiation et de température. L'influence des associations en série et en parallèle des cellules photovoltaïques sur les performances du générateur a également été mise en évidence.

Nous avons ensuite étudié l'étage d'adaptation DC-DC de type Buck-Boost ainsi que son principe de fonctionnement et sa modélisation mathématique. La modélisation du bus continu et de l'onduleur de tension a permis de décrire les échanges énergétiques au sein du système et d'établir les équations nécessaires à son analyse dynamique.

L'ensemble des modèles développés dans ce chapitre constitue une base essentielle pour la conception et la mise en œuvre des stratégies de commande avancées. Ces modèles seront exploités dans le chapitre suivant pour l'étude et l'application de la commande prédictive MPC afin d'améliorer les performances de la chaîne de conversion photovoltaïque et d'assurer une intégration optimale au réseau électrique.

Chapitre 3

Fonctionnement d'une chaîne de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et à la mise en œuvre des stratégies de commande appliquées à la chaîne de conversion photovoltaïque raccordée au réseau électrique. Dans un premier temps, la technique de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) basée sur l'algorithme Perturb and Observe (P&O) est présentée afin d'assurer l'extraction de la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque malgré les variations des conditions météorologiques. Dans un second temps, une commande prédictive à états finis (Finite Control Set Model Predictive Control – FCS-MPC) est développée pour le pilotage de l'onduleur, dans le but de garantir une injection optimale de l'énergie produite dans le réseau électrique tout en assurant de bonnes performances dynamiques.

Enfin, l'ensemble de la chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau est modélisé et simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink afin d'évaluer et de valider l'efficacité des stratégies de commande proposées.

3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal :

3.2.1 Généralités :

Dans une chaîne de conversion photovoltaïque raccordée au réseau électrique, l'extraction de la puissance maximale constitue une étape essentielle pour améliorer les performances énergétiques du système. En raison des variations climatiques, notamment l'irradiation solaire et la température, le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque change continuellement. Pour cette raison, des techniques de commande spécifiques appelées MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) sont utilisées afin de suivre en permanence le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Le principe de cette commande repose sur la recherche automatique du point de fonctionnement permettant de fournir la puissance maximale disponible, sans connaissance préalable de sa position exacte sur les caractéristiques électriques du générateur. Cette stratégie assure également une adaptation optimale entre le générateur photovoltaïque et la charge ou le réseau électrique, ce qui permet de maximiser le transfert d'énergie.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, la commande MPPT est généralement associée à un convertisseur statique DC-DC possédant des paramètres de contrôle ajustables, tels que le rapport cyclique. Ce convertisseur joue le rôle d'interface entre le générateur photovoltaïque et le reste de la chaîne de conversion, garantissant ainsi un fonctionnement optimal du système sous différentes conditions d'exploitation. [15]

La figure 3.1 présente la structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque intégrant une commande MPPT.

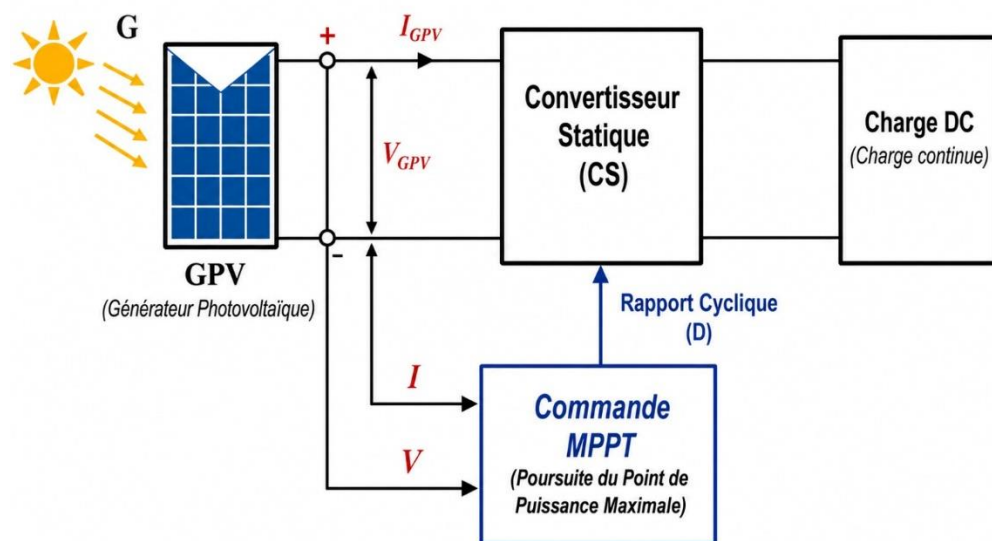


Figure 3.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.

3.2.2 Les premiers types de commande MPPT :

Les premières techniques de commande MPPT se caractérisaient par des algorithmes relativement simples, en raison des capacités limitées des microcontrôleurs disponibles à cette période. À l'origine, ces méthodes étaient principalement destinées aux applications spatiales, où les variations de température et d'irradiation étaient moins importantes que dans les systèmes photovoltaïques terrestres.

Le principe initial de la commande MPPT appliquée aux générateurs photovoltaïques a été présenté par A.F. Boehringer. Cette stratégie repose sur un algorithme de commande adaptative permettant de maintenir le générateur photovoltaïque au voisinage du point de puissance maximale (PPM), afin d'assurer une extraction optimale de l'énergie disponible. [16]

Grâce au développement des systèmes numériques, cette commande peut être entièrement implémentée par voie numérique à l'aide de microcontrôleurs ou de processeurs dédiés. La figure 3.2 illustre le principe général des premières structures de commande MPPT utilisées dans les chaînes de conversion photovoltaïques raccordées au réseau électrique. [15]

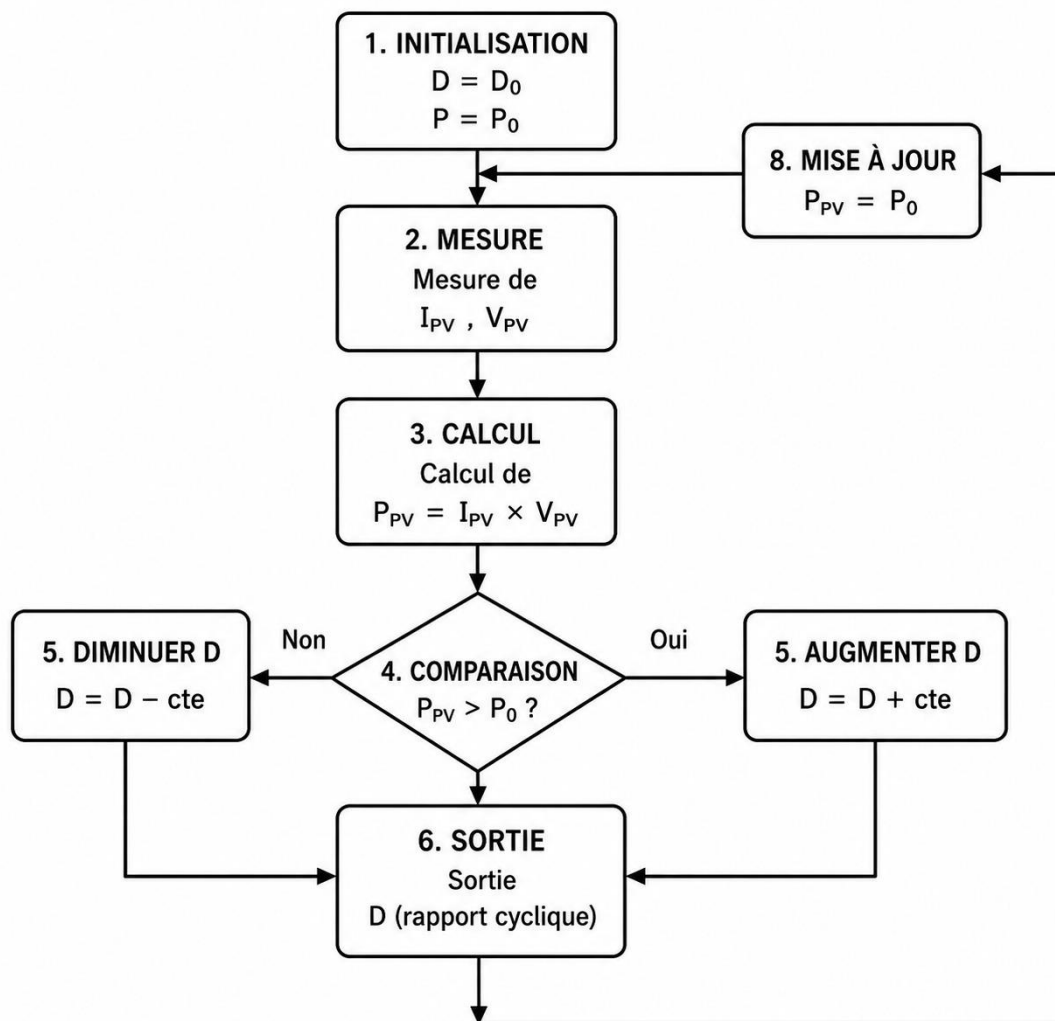


Figure 3.2 : Principe de la première commande MPPT numérique.

Le principe de cette méthode repose sur le calcul instantané de la puissance photovoltaïque à partir des valeurs mesurées du courant I_{PV} et de la tension V_{PV} . La puissance obtenue à l'instant t_i est ensuite comparée à celle mémorisée lors de l'instant précédent t_{i-1} . Selon le résultat de cette comparaison, un nouveau rapport cyclique α est déterminé puis appliqué au convertisseur statique afin de déplacer le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale.

Cette approche demeure aujourd'hui largement utilisée dans les systèmes photovoltaïques grâce à sa simplicité de mise en œuvre et à son efficacité. De plus, les avancées des systèmes numériques et des microcontrôleurs ont permis le développement d'algorithmes MPPT plus rapides et plus performants, adaptés aux chaînes de conversion photovoltaïques modernes raccordées au réseau électrique.

3.2.3 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :

La méthode MPPT de type *Perturb and Observe* (P&O) repose sur la perturbation périodique de la tension du générateur photovoltaïque V_{PV} autour de son point de fonctionnement, suivie de l'observation de l'évolution de la puissance produite P_{PV} . Cette technique permet de déterminer la direction à suivre afin d'atteindre le point de puissance maximale (PPM).

Lorsque l'application d'une légère augmentation de la tension provoque une augmentation de la puissance photovoltaïque, cela indique que le point de fonctionnement se situe avant le PPM. Dans ce cas, la perturbation est maintenue dans le même sens afin de continuer la convergence vers la puissance maximale. En revanche, si cette perturbation entraîne une diminution de la puissance, cela signifie que le point optimal a été dépassé ; la direction de perturbation doit alors être inversée pour revenir vers le PPM.

Le même principe d'analyse est appliqué lors d'une diminution de la tension. Ainsi, en observant continuellement les variations de puissance résultant des perturbations imposées à la tension photovoltaïque, l'algorithme P&O permet de localiser le point de fonctionnement optimal et d'assurer la poursuite du maximum de puissance disponible du générateur photovoltaïque.

En résumé, cette méthode ajuste continuellement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC afin de maintenir le système photovoltaïque au voisinage du point de puissance maximale

malgré les variations des conditions atmosphériques telles que l'irradiation solaire et la température.[17]

En résumé, lorsque la perturbation appliquée à la tension du générateur photovoltaïque entraîne une augmentation de la puissance P_{PV} , le système conserve le même sens de perturbation afin de poursuivre la convergence vers le point de puissance maximale (PPM). En revanche, si la puissance diminue après la perturbation, le sens de variation est inversé pour ramener le point de fonctionnement vers le nouveau PPM.

Ainsi, l'algorithme P&O ajuste continuellement le rapport cyclique du convertisseur afin d'assurer l'extraction maximale de puissance disponible du générateur photovoltaïque. La figure 3.4 présente l'organigramme classique de la méthode P&O, dans lequel l'évolution de la puissance est évaluée après chaque perturbation de la tension photovoltaïque. [17]

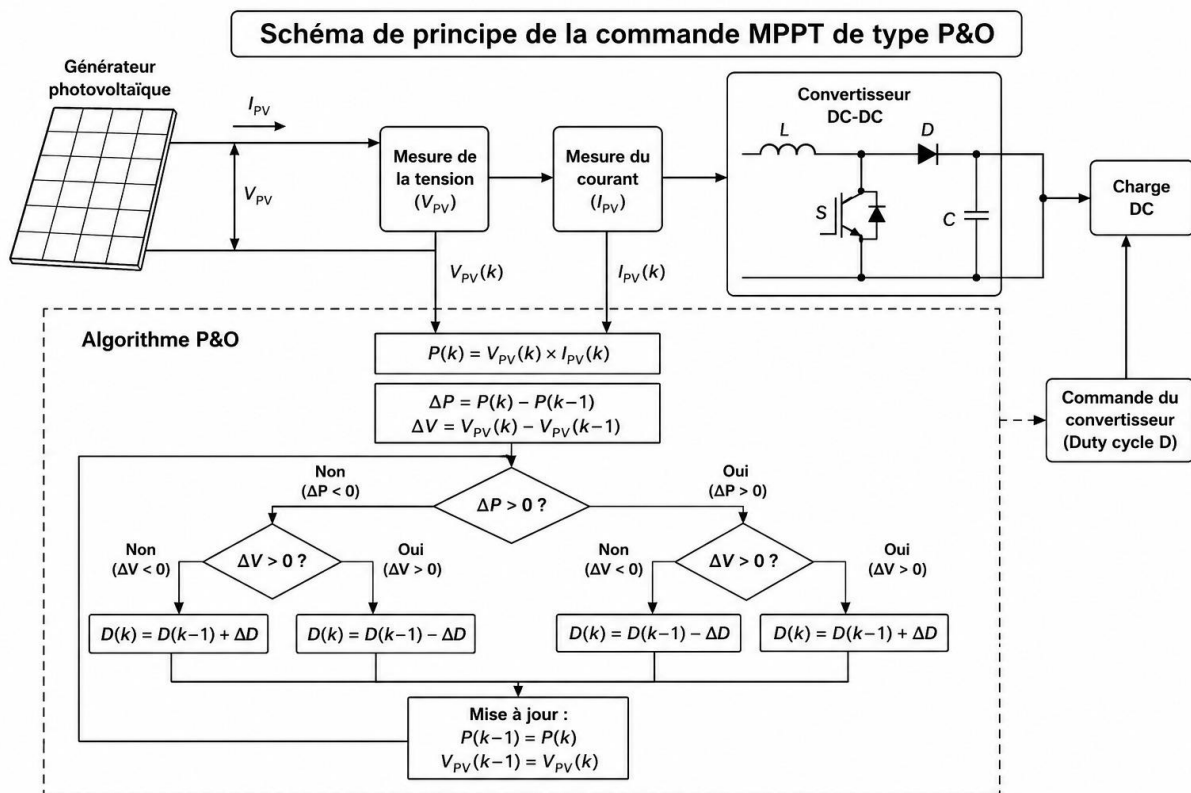


Figure 3.3 : Schéma de principe de la commande MPPT de type P&O.

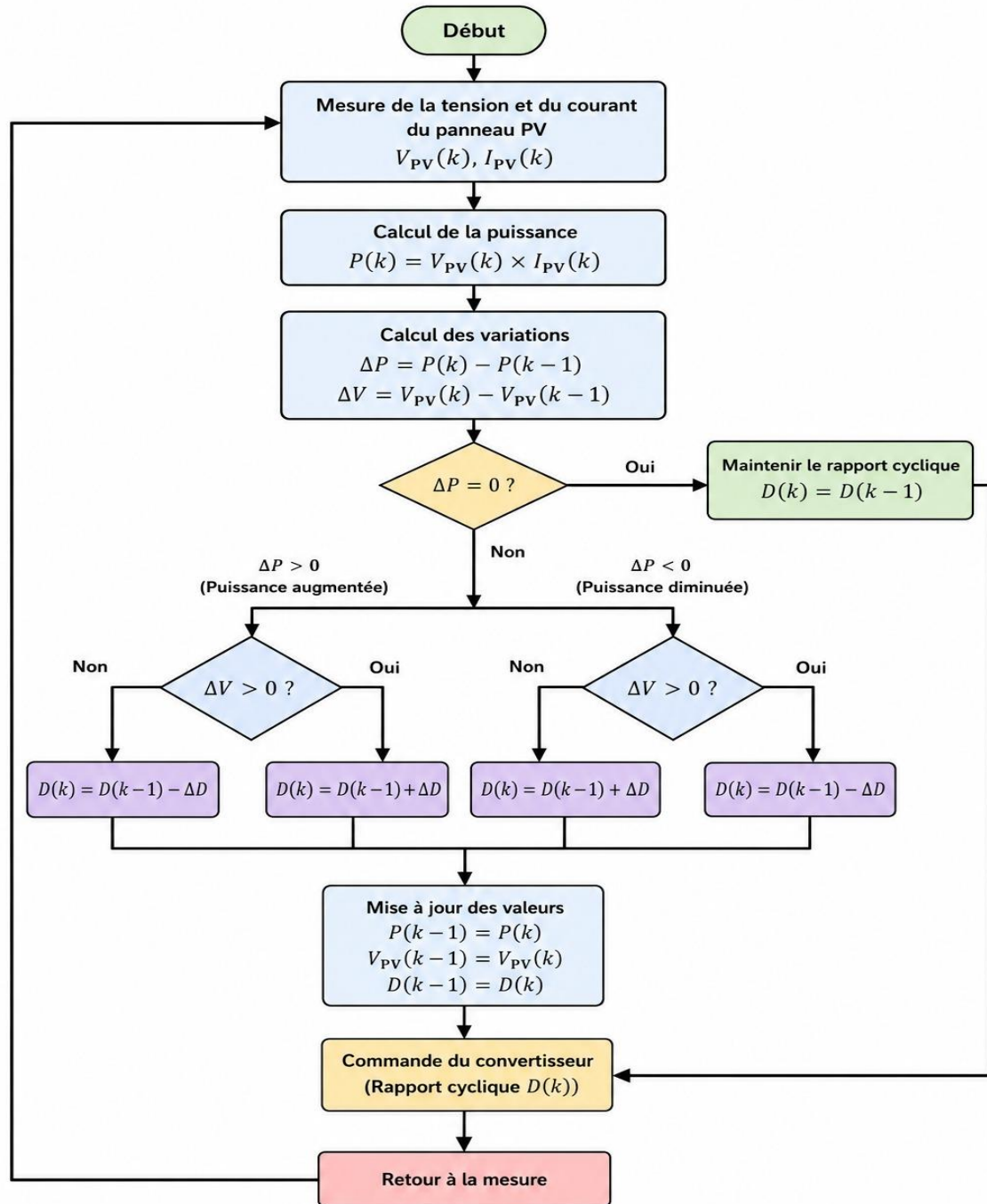


Figure 3.3 : Organigramme de la méthode P&O

La figure 3.4 illustre l'organigramme classique de la méthode MPPT de type *Perturb and Observe* (P&O), dans laquelle la variation de la puissance photovoltaïque est examinée après chaque perturbation appliquée à la tension du générateur photovoltaïque. Cette analyse permet

d'orienter le système vers le point de puissance maximale (PPM) afin d'optimiser l'extraction de l'énergie solaire.

3.3 Philosophie de la commande prédictive à états finis (FS-MPC) :

La commande prédictive à états finis (*Finite Set Model Predictive Control – FS-MPC*) repose sur un principe de prédiction du comportement futur du système à partir d'un modèle mathématique discret. Son fonctionnement peut être comparé à celui d'un conducteur automobile qui adapte continuellement ses actions en fonction de la trajectoire à suivre et des conditions de conduite observées. En tenant compte de l'évolution attendue du système sur un horizon de prédiction limité, le contrôleur sélectionne l'action de commande la plus appropriée afin d'atteindre l'objectif souhaité.

Dans cette stratégie, seule la première action optimale calculée est appliquée au système durant chaque période d'échantillonnage. Ensuite, le processus de prédiction et d'optimisation est répété de manière continue à l'instant suivant, ce qui permet d'assurer une adaptation dynamique aux variations du système et des conditions de fonctionnement.

Le principe fondamental de la méthode FS-MPC consiste à utiliser explicitement un modèle numérique du convertisseur et du système électrique afin de prédire les états futurs des variables contrôlées sur un horizon fini. À partir de ces prédictions, une fonction de coût est évaluée pour chaque état de commutation possible, puis l'état minimisant cette fonction est sélectionné comme commande optimale [18].

L'un des principaux avantages de cette approche réside dans sa capacité à exploiter les informations futures de la trajectoire de référence, ce qui améliore considérablement les performances dynamiques et la précision du suivi. Pour cette raison, la commande prédictive est particulièrement adaptée aux systèmes nécessitant un contrôle rapide et précis, notamment les convertisseurs de puissance, les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, la robotique ainsi que les servomécanismes industriels [18].

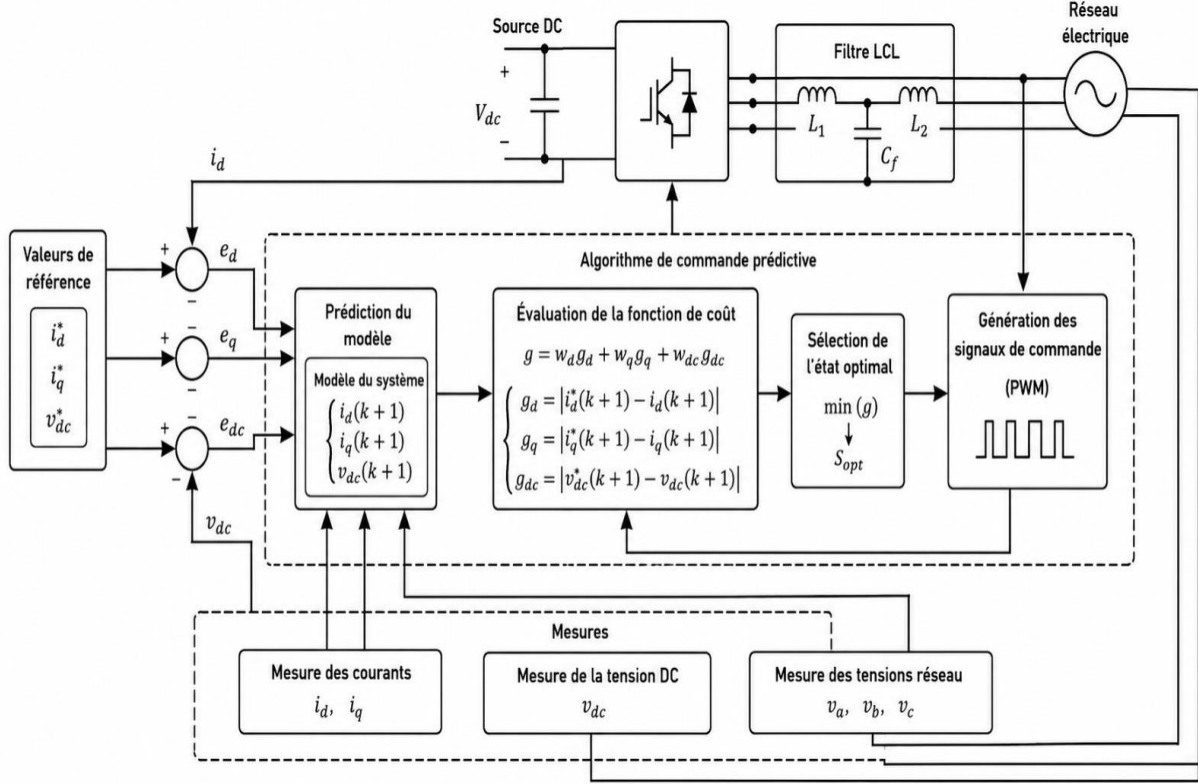


Figure 3.4 : Schéma de Principe de la commande prédictive

3.4 Commande FS-MPC de l'onduleur raccorder au réseau électrique :

La commande prédictive à ensemble fini (FS-MPC) constitue une stratégie de commande avancée basée sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système afin de prédire l'évolution future des variables contrôlées. À chaque période d'échantillonnage, l'algorithme évalue tous les états de commutation possibles de l'onduleur et sélectionne celui qui minimise une fonction de coût prédéfinie. Cette approche permet d'obtenir une réponse dynamique rapide, une excellente qualité du courant injecté ainsi qu'un contrôle précis de la puissance active et réactive échangée avec le réseau électrique. Elle est particulièrement adaptée aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau grâce à sa capacité à gérer efficacement les contraintes du système et les variations des conditions de fonctionnement.

3.4.1 Modèle continu de la liaison au réseau :

Le modèle continu de la liaison au réseau est obtenu à partir des lois de Kirchhoff appliquées au filtre de raccordement entre l'onduleur et le réseau électrique. Ce modèle décrit l'évolution

temporelle des courants injectés en fonction des tensions générées par l'onduleur et de la tension du réseau. Il est généralement exprimé sous forme d'équations différentielles dans le repère synchronisé dq , ce qui facilite la commande indépendante des composantes active et réactive du courant. Ce modèle constitue la base de la prédiction utilisée dans la stratégie FS-MPC pour assurer un transfert efficace de l'énergie photovoltaïque vers le réseau.

3.4.2 Modèle discret de la liaison au réseau:

Afin d'être implémenté numériquement dans un contrôleur temps réel, le modèle continu est discrétisé en utilisant une période d'échantillonnage T_s . Le modèle discret permet de prédire les valeurs futures des courants injectés pour chaque état de commutation possible de l'onduleur. Cette prédiction est généralement réalisée à l'instant $k + 1$ à partir des grandeurs mesurées à l'instant k . Le modèle discret représente ainsi l'élément fondamental de l'algorithme FS-MPC, puisqu'il permet d'évaluer le comportement futur du système avant l'application de la commande optimale. [19]

3.4.3 Fonction du coût pour le contrôle de l'onduleur :

L'objectif principal de la commande du courant consiste à réduire au minimum l'écart entre les courants réels mesurés et les courants de référence imposés par le système de contrôle. Dans la commande prédictive à états finis, cette condition est formulée à travers une fonction de coût permettant d'évaluer les performances de chaque état de commutation de l'onduleur.

La fonction de coût est généralement exprimée dans le repère orthogonal afin de quantifier l'erreur entre les valeurs de référence et les courants prédits par le modèle du système. Le principe consiste alors à sélectionner l'état de commutation qui minimise cette erreur, garantissant ainsi une meilleure qualité du courant injecté dans le réseau électrique :

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \quad (3.1)$$

Où $i_{\alpha}^p(k+1)$ et $i_{\beta}^p(k+1)$ représentent respectivement les composantes réelle et imaginaire du vecteur du courant prédit $i^p(k+1)$ correspondant à un vecteur de tension donné. Ces valeurs

prédites sont obtenues à partir du modèle mathématique de la charge utilisé dans la commande prédictive.

Les courants de référence $i_{\alpha}^*(k+1)$ et $i_{\beta}^*(k+1)$ correspondent aux composantes du vecteur de courant de référence $i^*(k+1)$. Afin de simplifier les calculs, on considère généralement que le courant de référence reste pratiquement constant durant une période d'échantillonnage. Ainsi, l'approximation $i^*(k+1) = i^*(k)$ est adoptée.

Cette hypothèse peut provoquer un léger retard d'un pas d'échantillonnage dans le suivi de la référence, mais cet effet demeure négligeable lorsque le système fonctionne avec une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée [18].

3.5 Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT

La simulation du système photovoltaïque avec un hacheur Boost commandé par une stratégie MPPT a été réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink afin d'évaluer les performances du système dans différentes conditions de fonctionnement. L'algorithme MPPT assure la recherche continue du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque en ajustant le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Cette stratégie permet d'optimiser l'extraction de l'énergie solaire disponible et d'améliorer le rendement global du système, même en présence de variations de l'irradiation solaire et de la température. Le hacheur Boost joue un rôle essentiel dans l'adaptation du niveau de tension fourni par les panneaux photovoltaïques avant son acheminement vers l'onduleur et le réseau électrique. [20]

3.5.1 l'efficacité du système en termes de changement de changement d'irradiance :

Dans cette étude, des simulations ont été effectuées afin d'analyser la rapidité de réponse du système face à des variations brusques de l'irradiation solaire. Pour cela, l'irradiation a été modifiée successivement selon les valeurs suivantes : $1000 \text{ W/m}^2 \rightarrow 800 \text{ W/m}^2 \rightarrow 600 \text{ W/m}^2 \rightarrow 900 \text{ W/m}^2$, tout en maintenant la température constante à 25°C .

L'objectif principal de cette analyse est d'évaluer la capacité de la commande FS-MPC associée à l'algorithme MPPT à suivre rapidement le nouveau point de puissance maximale après chaque variation d'irradiance. Les résultats de simulation montrent que le système conserve une bonne

stabilité dynamique et présente un temps de réponse rapide avec de faibles oscillations, ce qui confirme l'efficacité de la stratégie de commande utilisée pour l'extraction et l'injection optimales de la puissance photovoltaïque.

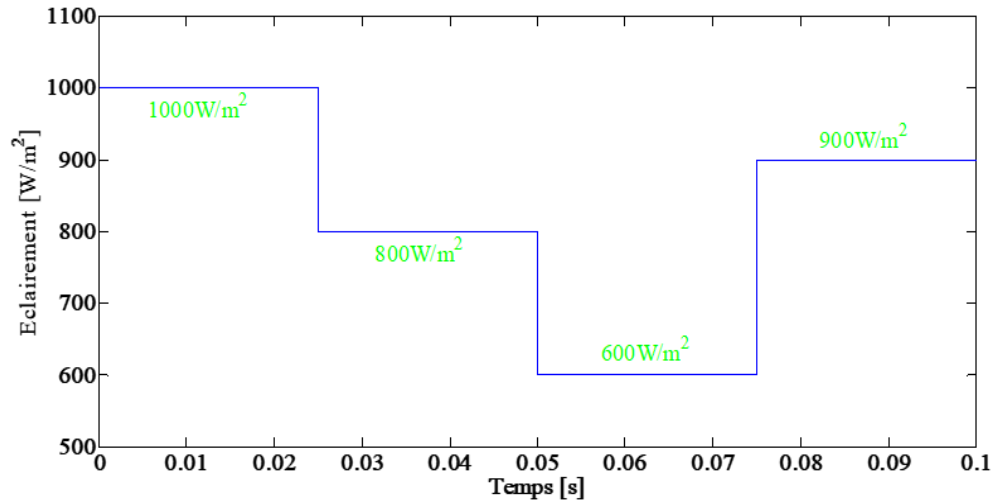


Figure 3.6 : Profile de variation d'éclairement (25°C).

La Figure 3.6 Courbe de variation du rayonnement : illustre les modifications apportées au rayonnement solaire au cours de la simulation afin de tester la réponse du système.

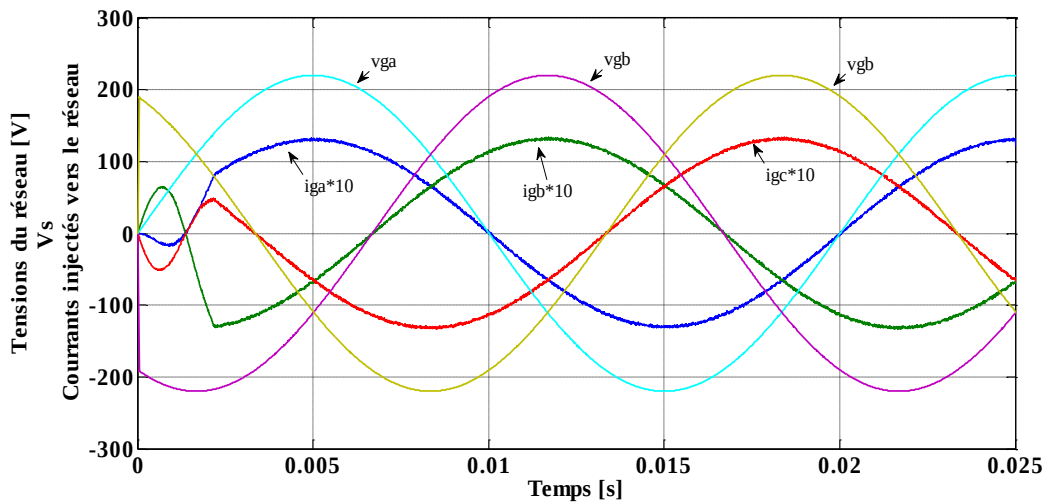


Figure 3.7 : courants injectés dans le réseau électrique (en phase)

La figure 3.7 montre la réponse du système lorsqu'un changement rapide d'irradiance se produit ($1000\text{W/m}^2 \rightarrow 800\text{W/m}^2 \rightarrow 600\text{W/m}^2 \rightarrow 900\text{W/m}^2$) avec une température de 25°C . Peut voir que le courant injectés dans le réseau électrique variés suit la variation d'irradiance et il est en phase avec la tension du réseau.

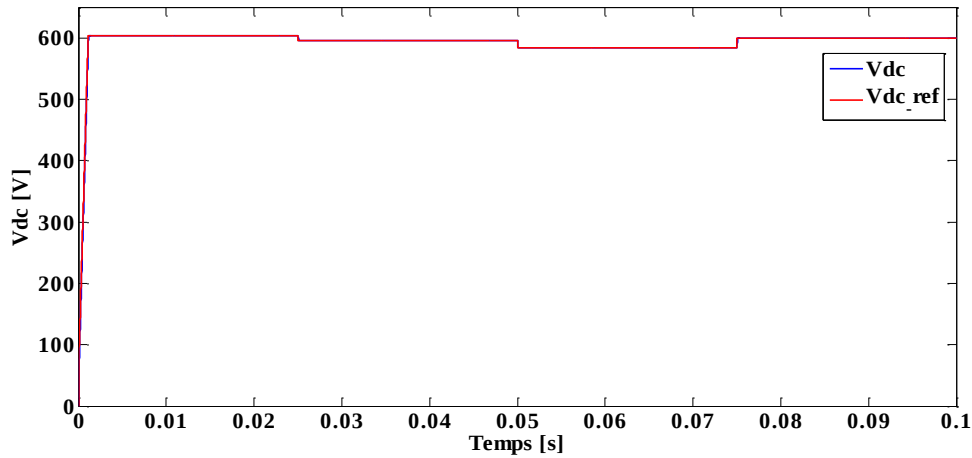


Figure 3.8 : Réponse de la tension de bus continue en fonction de temps et la variation d'éclairement

La Figure 3.8 Réponse de la tension du bus CC : La tension du bus CC reste très proche de la valeur de référence malgré les variations du rayonnement solaire.

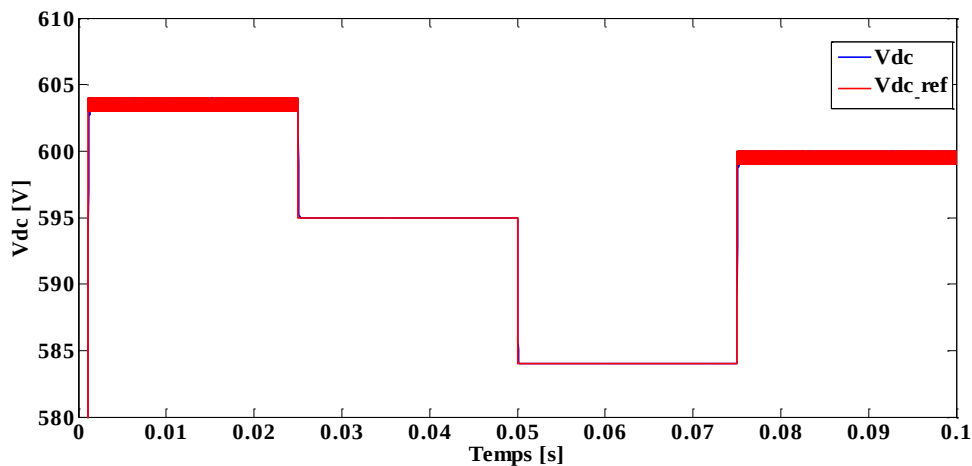


Figure 3.9 : Zoom sur la réponse de bus continue V_{dc}

La Figure 3.9 présente un agrandissement de la réponse de la tension du bus continu V_{dc} par rapport à sa valeur de référence V_{dc_ref} . On observe que la tension mesurée suit correctement

les variations de la consigne avec un temps de réponse rapide et une erreur de suivi très faible. Malgré les changements de la valeur de référence, la tension V_{dc} reste stable autour de la consigne, avec de faibles ondulations, ce qui confirme l'efficacité de la stratégie de commande dans la régulation du bus continu et le maintien de la stabilité du système photovoltaïque connecté au réseau.

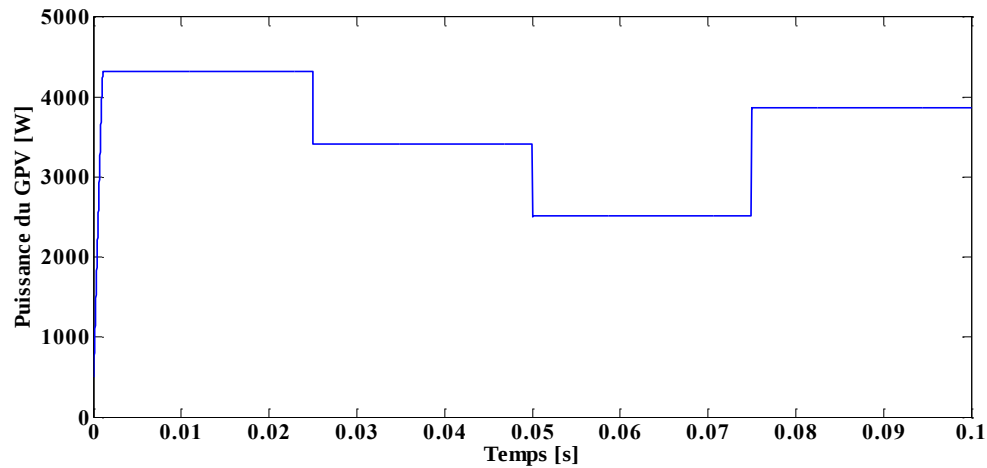


Figure 3.10 : Puissance de sortie du GPV

La Figure 3.10 Puissance de sortie du générateur photovoltaïque : varie directement en fonction des variations du rayonnement solaire, confirmant l'efficacité du MPPT pour extraire la puissance maximale.

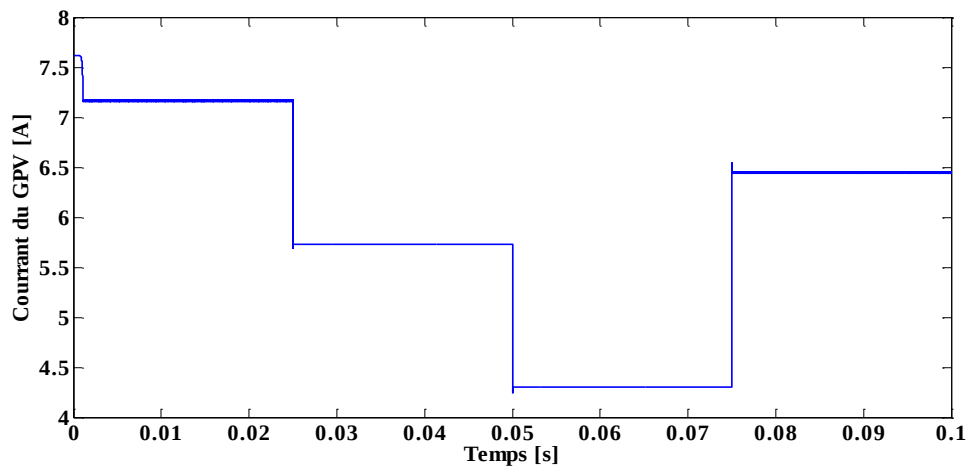


Figure 3.11 : Courant de sortie de GPV

La Figure 3.11 Courant de sortie du générateur photovoltaïque : augmente et diminue en fonction des variations du rayonnement solaire, avec une réponse rapide et sans grandes fluctuations.

3.5.2 Test d'efficacité du système en termes de changement de température :

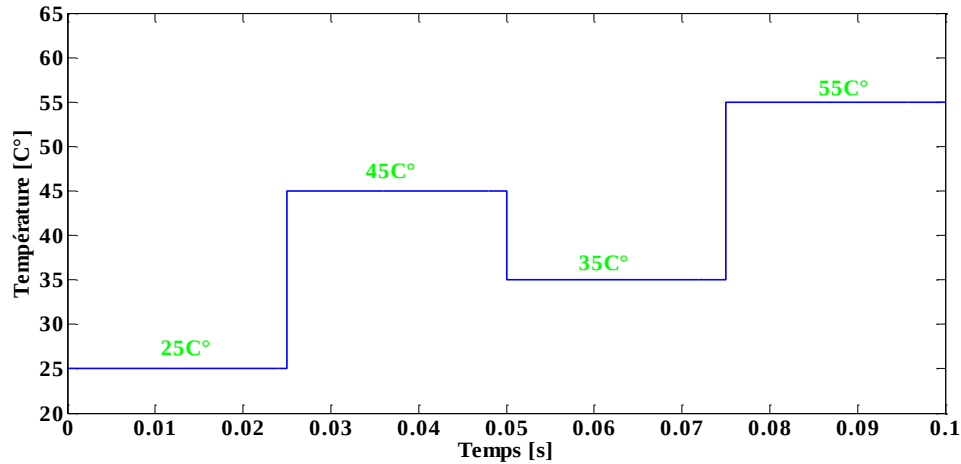


Figure 3.12 : Profile de variation dans la température.

La Figure 3.12 Courbe de variation de température : Elle illustre les différentes valeurs de chaleur appliquées au cours de la simulation afin d'étudier leur effet sur le système.

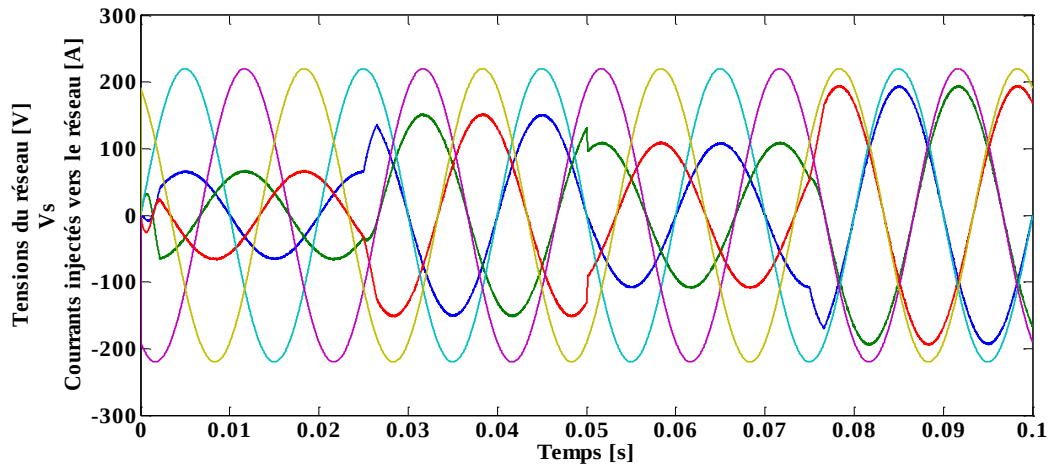


Figure 3.13 : Courants injectés dans le réseau électrique

La Figure 3.13 Courants injectés dans le réseau : Malgré la variation de température, les courants injectés sont restés stables et en harmonie avec la tension du réseau.

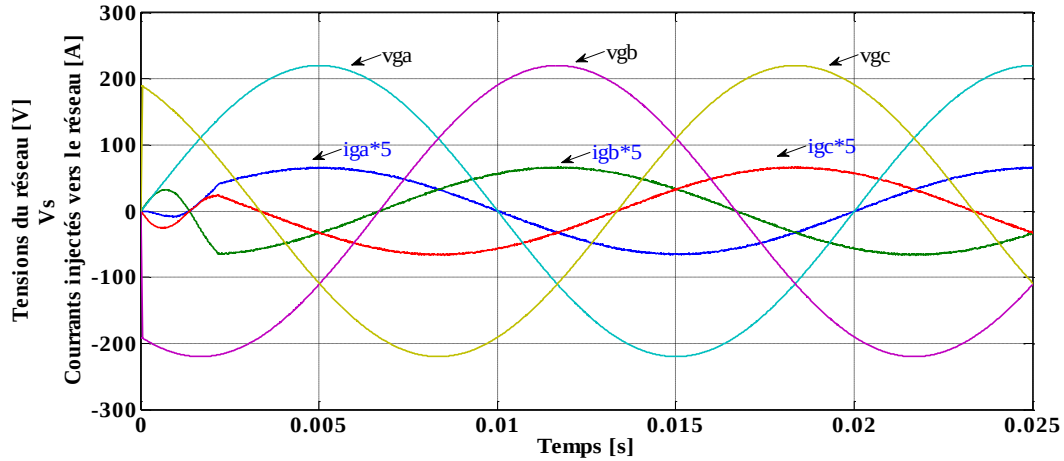


Figure 3.14 : Zoom sur les courants injectés dans le réseau électrique

La figure 3.14 présente un agrandissement des courants injectés dans le réseau électrique ainsi que les tensions triphasées du réseau. On constate que les courants injectés sont sinusoïdaux, équilibrés et suivent correctement leurs références. De plus, ils sont synchronisés avec les tensions du réseau, ce qui traduit un bon fonctionnement de la stratégie de commande de l'onduleur. Cette synchronisation permet d'assurer un transfert efficace de la puissance active vers le réseau tout en garantissant une bonne qualité de l'énergie injectée avec un faible taux de distorsion harmonique.

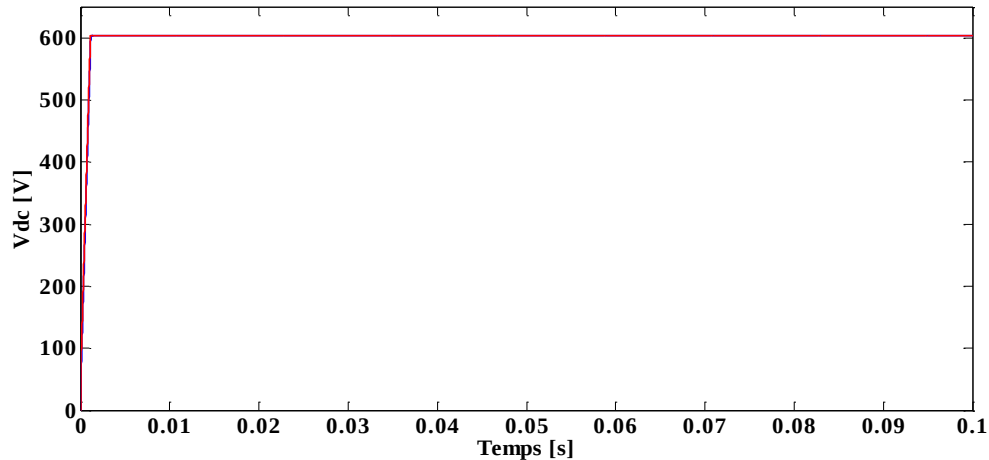


Figure 3.15 : Réponse du bus continue

La Figure 3.15 Réponse de la porteuse de tension continue : La porteuse de tension continue a maintenu une valeur quasi constante tout au long de la période de test.

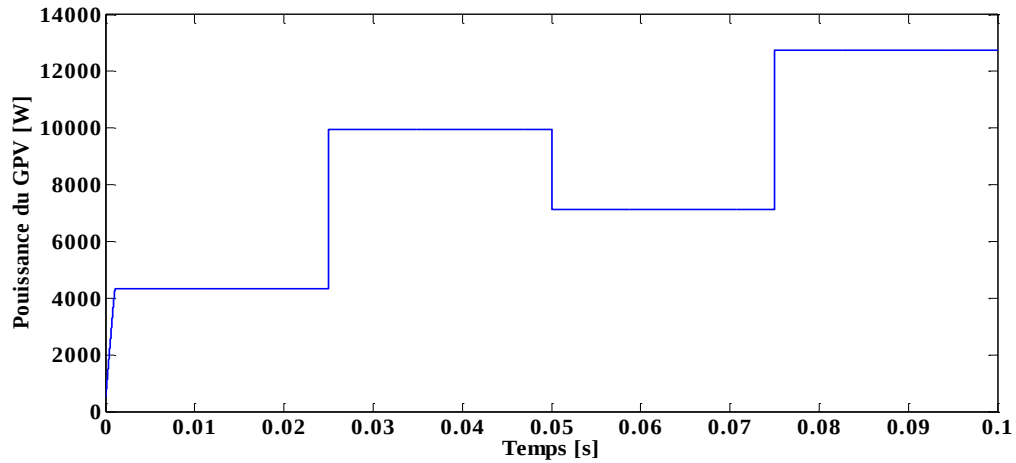


Figure 3.16 : Puissance du GPV

La Figure 3.16 La puissance du générateur photovoltaïque est affectée par la température, mais le contrôleur maintient un rendement élevé dans l'utilisation de la puissance disponible.

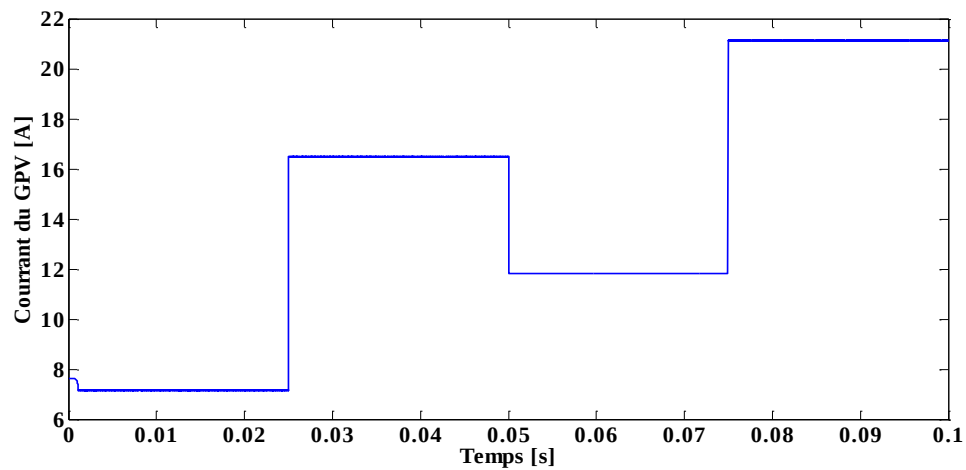


Figure 3.17 :5 Courant du GPV

La Figure 3.17 Courant du générateur photovoltaïque : varie en fonction des variations de température, tout en maintenant une stabilité globale des performances du système.

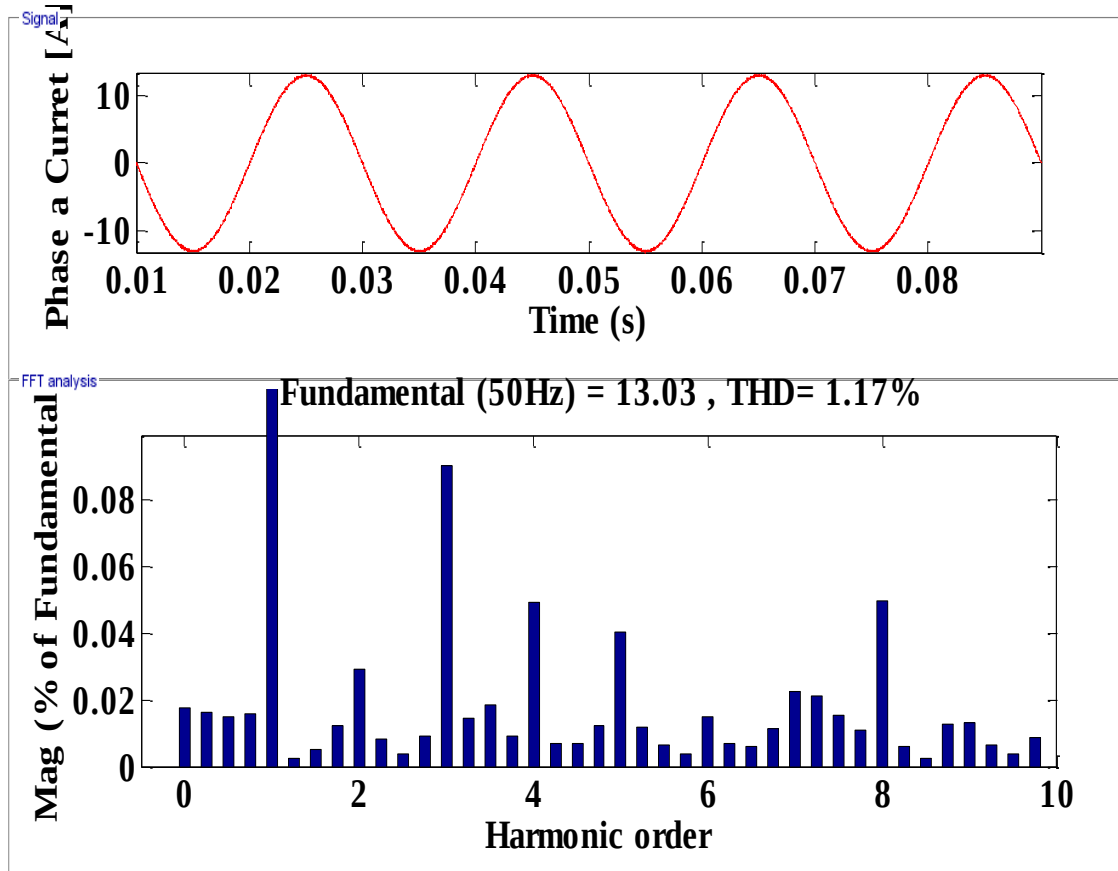


Figure 3.18 : Spectre d'harmonique de courant.

La Figure 3.18 Spectre harmonique du courant (THD) : Les résultats ont montré que la distorsion harmonique totale (THD) n'était que d'environ 1,17 %, une faible valeur indiquant une haute qualité du courant injecté dans le réseau.

Conclusion

Au terme de ce chapitre, une étude détaillée du système photovoltaïque connecté au réseau électrique a été réalisée à travers la modélisation et la simulation des différents éléments constituant la chaîne de conversion. L'intégration de l'algorithme MPPT de type P&O a permis d'assurer l'exploitation optimale du générateur photovoltaïque en recherchant en permanence le point de puissance maximale. En parallèle, l'application de la commande prédictive FS-MPC à l'onduleur a contribué à améliorer les performances dynamiques du système et à garantir une injection efficace de l'énergie produite vers le réseau électrique.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la robustesse de la stratégie de commande adoptée, notamment en termes de suivi des références, de stabilité de la tension du bus continu et de qualité des courants injectés. Ainsi, l'ensemble des simulations confirme l'efficacité de l'architecture proposée pour les applications photovoltaïques raccordées au réseau et démontre sa capacité à assurer un fonctionnement fiable et performant dans différentes conditions de fonctionnement.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié la chaîne de conversion photovoltaïque destinée à l'intégration au réseau électrique en mettant l'accent sur l'utilisation de la commande prédictive comme stratégie de contrôle avancée.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principes fondamentaux de l'énergie photovoltaïque, le fonctionnement des générateurs solaires, les convertisseurs DC-DC, les techniques MPPT ainsi que les contraintes liées à l'exploitation optimale de la puissance produite. Cette étude a montré l'importance du suivi du point de puissance maximale pour améliorer le rendement énergétique du système.

Ensuite, une modélisation détaillée des différents éléments constituant la chaîne de conversion photovoltaïque a été réalisée. Cette modélisation a permis de décrire le comportement dynamique du générateur photovoltaïque, du convertisseur DC-DC, du bus continu, de l'onduleur et de leur interaction avec le réseau électrique.

Enfin, l'application de la commande prédictive MPC a permis d'améliorer significativement les performances de la chaîne de conversion en assurant une meilleure régulation des grandeurs électriques, une réponse dynamique rapide, une réduction des oscillations et une injection de puissance plus stable vers le réseau. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de cette stratégie pour garantir une exploitation optimale de l'énergie photovoltaïque tout en respectant les exigences de qualité et de stabilité du réseau électrique.

Ainsi, la commande prédictive constitue une solution prometteuse pour les systèmes photovoltaïques modernes et représente une alternative performante aux méthodes de commande classiques. Les perspectives futures de ce travail peuvent concerner l'intégration de systèmes de stockage d'énergie, l'application de techniques d'intelligence artificielle ou encore l'implémentation expérimentale en temps réel afin d'améliorer davantage les performances et la fiabilité des installations photovoltaïques.

Résumé

Ce projet examine l'étude et le développement d'une chaîne de conversion d'énergie solaire photovoltaïque (PV) raccordée au réseau, en mettant l'accent sur l'application de la commande prédictive par modèle (MPC) afin d'améliorer les performances du système et d'assurer une intégration fluide et efficace de l'énergie produite au réseau électrique. Ce travail s'appuie sur la mise en évidence de l'importance des énergies renouvelables, en particulier de l'énergie solaire, et de la nécessité de technologies de contrôle avancées pour atténuer l'impact des variations d'irradiation solaire et de température sur les performances des systèmes PV.

Mot clé: (PV); (MPC), d'énergie solaire, température

المخلص

يتناول هذا المشروع دراسة وتطوير سلسلة تحويل الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Photovoltaic Conversion Chain) المربوطة بالشبكة الكهربائية، مع التركيز على تطبيق التحكم التنبئي المعتمد على النموذج - (Model Predictive Control - MPC) بهدف تحسين أداء النظام وضمان دمج سلس وفعال للطاقة المنتجة داخل الشبكة الكهربائية. وقد انطلق العمل من إبراز أهمية الطاقات المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية، والحاجة إلى تقنيات تحكم متقدمة لمواجهة تأثير تغيرات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة على أداء المنظومات الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: (Photovoltaic Conversion Chain)، بالشبكة الكهربائية، الطاقات المتجددة.