

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Mohamed Seddik Benyahia–Jijel



**Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique**

**PROJET DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
MASTER EN AUTOMATIQUE**

OPTION : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

**Commande par mode glissant d'un système
photovoltaïque connecté à un réseau
monophasé via double étages**

Réalisé par :

- ***Serhane Mouad***
- ***Merrouche Younes***

Encadré par :

Dr. Doudou Sofiane

Promotion 2020

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes sans les quelles ces années d'études n'auraient été que le pâle reflet de celles que nous avons passées.

*Nos sincères remerciements à notre encadreur **Mr. Doudou Sofiane** qui nous a bien encadré et nous a encouragé tout au long de notre travail.*

*Nous tenons à remercier **Mr. Boubekri Nouraddine** de son aide.*

*Nous remercions également les membres du jury, **Boubakir***

***Ahsen** président jury, **Khebache Hicham** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.*

Enfin nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à:
A Mes très chers parents, ma profonde gratitude et mon
incontestable
Reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me
contentés, toute la
Confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont
vous m'entourez;
A mes frères, ma sœur et ma grande mère pour leurs
soutiens et leurs amours;
A toute ma famille, et mes amis;
A Tous mes camarades de la promotion;
A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer;
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour
que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

Serhane Mouad

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à:
A Mes très chers parents, ma profonde gratitude et mon
incontestable
Reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me
contentés, toute la
Confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont
vous m'entourez;
A mes frères, et mes sœurs pour leurs soutiens et leurs
amours;
A mon beau-frère le docteur Bakha Chafik;
A toute ma famille, et mes amis;
A Tous mes camarades de la promotion;
A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer;
A mon cher ami Rouikha Alaeddine;
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour
que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie solaire.....	3
I.3. Types d'installations photovoltaïques	4
I.3.1. Systèmes PV autonomes	4
I.3.2. Systèmes PV connectés au réseau.....	5
I.4. Cellule photovoltaïque.....	5
I.4.1. Rendement d'une cellule PV	6
I.4.2. Types de cellules PV.....	6
I.4.3. Modélisation d'une cellule PV.....	7
I.4.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	9
I.5. Module photovoltaïque	11
I.5.1. Association des modules photovoltaïques	10
I.5.2. Modélisation d'un module PV.....	12
I.6. Simulation d'un générateur photovoltaïque.....	12
I.7. Commandes MPPT.....	14
I.7.1. Classification des commandes MPPT.....	14
I.7.1.1 MPPPT indirect.....	14
I.7.1.2 MPPT direct.....	15
I.7.2. Quelques Algorithme MPPT	15
I.7.2.1. Algorithme de perturber et observer (P&O)	15
I.7.2.2. Algorithme d'incrément de la conductance (INC).....	16
I.7.2.3. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension Voc.....	17
I.7.2.4. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant Icc.....	17
I.8. Conclusion.....	18

Chapitre II : Généralités sur les réseaux électriques

II.1.	Introduction.....	19
II.2.	Réseau électrique.....	19
II.3.	Organisation des réseaux électriques	19
II.4.	Architecture des réseaux électriques.....	20
II.4.1.	Réseau de transport THT.....	20
II.4.2.	Réseau de répartition HTB.....	21
II.4.3.	Réseau de distribution HTA	21
II.4.4.	Réseau de livraison BTA.....	21
II.5.	Centrales électriques.....	21
II.5.1.	Centrales thermiques	22
II.5.2.	Centrales nucléaires	22
II.5.3.	Centrales hydroélectriques	23
II.5.4.	Centrales éoliennes	24
II.5.5.	Centrales solaires	24
II.6.	Postes électriques	24
II.7.	Lignes électriques.....	25
II.8.	Harmoniques électriques.....	26
II.8.1.	Symptômes et conséquences des harmoniques.....	28
II.8.2.	Indicateurs essentiels de la distorsion harmonique.....	29
II.8.2.1.	Taux de distorsion	29
II.8.2.2.	Facteur de puissance.....	29
II.8.2.3.	Facteur de crête	30
II.8.2.4.	Spectre harmonique.....	30
II.8.3.	Compensation des courants harmoniques.....	30
II.8.3.1.	Solutions classiques.....	30
II.8.3.2.	Solutions modernes.....	31
II.9.	Conclusion.....	31

Chapitre III : Commande par MG d'un système PV connecté au réseau monophasé

III.1.	Introduction.....	32
--------	-------------------	----

III.2.	Concepts de base de la commande par mode glissant.....	32
III.2.1.	Principe de la commande par mode glissant.	32
III.2.2.	Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant.....	33
III.2.3.	Synthèse de la loi de commande par mode glissant	34
III.3.3.1.	Choix de la surface de glissement.....	34
III.3.3.2.	Condition d'existence du mode de glissement (attractivité).....	35
III.3.3.3.	Synthèse de la loi de commande.....	35
III.2.4.	Phénomène de broutement.....	36
III.3.	Description et modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau	38
III.3.1.	Modèle mathématique de système global.....	39
III.4.	Synthèse du contrôleur et analyse de la stabilité.....	39
III.4.1.	Commande MPPT.....	39
III.4.2.	Contrôle de facteur de puissance dans le réseau.....	41
III.4.3.	Régulation de la tension du bus continu.....	42
III.5.	Simulation et résultats.....	43
III.6.	Conclusion	47

Conclusion générale

Conclusion générale.....	48
--------------------------	----

Bibliographie

Bibliographie	50
---------------------	----

Liste des figures

----- Chapitre I -----

Figure I.1. Connexion directe d'un panneau photovoltaïque.....	4
Figure I.2. Connexion d'un panneau photovoltaïque via un étage d'adaptation.....	4
Figure I.1. Système photovoltaïque connecté au réseau.....	5
Figure I.4. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.5. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.6. Caractéristiques électriques d'une cellule PV	9
Figure I.7. Association des modules photovoltaïques en série	10
Figure I.8. Association des modules photovoltaïques en parallèle	11
Figure I.9. Association mixte des modules photovoltaïques	11
Figure I.10. Effet de l'éclairement sur le fonctionnement de GPV.....	13
Figure I.11. Effet de la température sur le fonctionnement de GPV.....	13
Figure I.12. Principe de la commande MPPT.....	14
Figure I.13. Organigramme de l'algorithme 'P&O'.....	15
Figure I.14. Organigramme de l'algorithme 'INC'.....	16
Figure I.15. Organigramme de l'algorithme FCO.....	17
Figure I.16. Organigramme de l'algorithme FCC.....	18

----- Chapitre II -----

Figure II.1. Organisation d'un réseau électrique.....	20
Figure II.2. Centrale thermique à flamme	22
Figure II.3. Centrale nucléaire.....	23
Figure II.4. Centrale hydroélectrique.....	23
Figure II.5. Schéma de principe d'une production éolienne.....	24
Figure II.6. Centrales solaires.....	25
Figure II.7. Exemple de distorsion harmonique en courant.....	26
Figure II.8. Décomposition en série de Fourier d'un courant irrégulier.....	27
Figure II.9. Spectre d'un courant absorbé.....	30

----- Chapitre III -----

Figure III.1. Plans de phase en mode glissant.....	33
Figure III.2. Attractivité de la surface.....	35
Figure III.3. Phénomène de broutement.....	36
Figure III.4. Fonction Sat.....	37
Figure III.5. Fonction tangente hyperbolique.....	37
Figure III.6. Configuration d'un système de pv connecté à un réseau monohasé via double étages.....	38
Figure III.7. Schéma du contrôleur proposé.....	43
Figure III.8. Puissance générée par le générateur GPV $P(w)$	44

Figure III.9. Tension du bus continu $V_{dc}(V)$	45
Figure III.10. Courant de réseau $i_g(A)$	45
Figure III.11. Signal de control u_1	46
Figure III.12. Signal de control u_2	46
Figure III.13. Signal de control β	46

Liste des tableaux

----- Chapitre I -----

Tableau I.1 : Types des cellules PV.....6

Tableau I.2 : Caractéristique du module photovoltaïque **SM55**.....12

----- Chapitre III -----

Tableau III.1. Paramètres du système.....43

Tableau III.2. Paramères du contrôleur.....44

Introduction générale

Au cours ces dernières décennies, la plupart des pays ont décidé de concentrer la recherche sur le développement des sources d'énergie propre et durable. Cette tendance est due à l'augmentation spectaculaire de la consommation d'énergie, réduction des réserves d'énergie de fossiles carburants et l'exigence de préservation de l'environnement.

En fait, il existe plusieurs sources d'énergie renouvelable : énergies éolienne, géothermique, photovoltaïque et hydraulique. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leur utilisation réduit la pollution et la production de gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote, qui sont responsables de réchauffement climatique. En particulier, l'énergie solaire produite par les systèmes photovoltaïque (PVSs) est considérée comme l'une des énergies les plus utilisées, en raison de ces plusieurs caractéristiques, par exemple haute fiabilité, simplicité d'allocation, absence de coût du carburant, faible entretien et manque de bruit dû à l'absence de pièces mobiles. Une autre raison est le développement rapide de la technologie des cellules solaires ces dernières années, qui a amélioré leur efficacité et leur fiabilité.

Les systèmes PV peuvent rencontrés en deux mode : autonome et mode connecté au réseau. Le premier mode nécessite des banques de batteries pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques, et il est généralement utilisé pour les systèmes à faible puissance, tels que les applications résidentielles. L'inconvénient majeur de cette installation est le coût, la masse et l'entretien régulier des batteries. Les PVSs connectés au réseau sont utilisés pour les applications à haute puissance, qui consistent à injecter la puissance maximale extraite du système PV vers le réseau, avec un facteur de puissance quasi-unitaire malgré les changements climatiques.

La gestion de l'énergie entre les panneaux PV et le réseau électrique est effectuée au moyen de convertisseurs de puissance. À cet égard, on distingue deux topologies principales. La première est que les panneaux sont connecté au réseau via double étage : un convertisseur de puissance DC/DC agissant comme traqueur du point de puissance maximale (MPP) et un onduleur DC/AC pour la correction du facteur de puissance (PFC). En deuxième topologie, appelée système PV connecté au réseau via un seul étage, le réseau est directement connecté aux sources PV via un onduleur DC/AC afin de répondre aux exigences MPPT (Maximum Power Point Tracking) et PFC. D'autres problèmes de commande des systèmes connectés au réseau sont rencontrés comme le contrôle de la tension du bus DC pour garantir un bon fonctionnement de MPPT, haute qualité de la puissance injectée et synchronisation du réseau.

L'objectif de ce manuscrit est de présenter une approche par mode glissant (MG) pour commander un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé à travers deux étages d'adaptation. Le but de la commande est de forcer le générateur PV à délivrer sa puissance maximale puis l'injecter dans le réseau avec un facteur puissance maximal égal à 1.

Le mémoire est divisé en trois chapitres, organisé comme suit :

Dans le 1^{er} chapitre, on donne des définitions sur l'énergie solaire, types d'installations photovoltaïques, cellule photovoltaïque, module photovoltaïque et on réalise des simulations numériques, sous l'environnement Matlab, d'un générateur photovoltaïque afin d'étudier ces caractéristiques et analyser l'influence de changement des conditions climatique sur son fonctionnement. On présente également le problème MPPT et quelques algorithmes utilisés pour le résoudre.

Dans le 2^{ème} chapitre, on définit les différentes notions rencontrées dans les réseaux électriques: centrales électriques, postes électriques et lignes électriques. On présente également la notion des harmoniques électriques et les méthodes utilisées pour atténuer ces effets.

Dans le 3^{ème} chapitre, on présente les concepts de base de la commande par mode glissant. Ensuite, on donne la modélisation mathématique du système PV connecté au réseau monophasé via double étages. Après, on présente une stratégie de commande par mode glissant d'ordre un pour contrôler la gestion de l'énergie dans le système. Enfin, on valide l'approche par des simulations numériques sous l'environnement Matlab.

On termine ce mémoire par la présentation de l'ensemble des travaux réalisés et donner les perspectives envisagées.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, L'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but en utilisant plusieurs types de procédés parmi eux le moyen dit cellule photovoltaïque.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement des systèmes photovoltaïque dont l'élément de base est la cellule PV. On commence ce chapitre par donner des brefs rappels sur l'énergie solaire et l'effet photovoltaïque. Ensuite, on présente les notions suivantes : cellule photovoltaïque, associations des cellules PV et les générateurs photovoltaïques. Par la suite, on simule le module photovoltaïque **SM55** sous l'effet de la variation des conditions métrologiques. En fin, on présente le principe de la commande MPPT et quelques algorithmes utilisés pour réaliser cette commande.

I.2. Energie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite selon plusieurs procédés [1].

➤ **Energie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité [1].

➤ **Energie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux photovoltaïques. Le fonctionnement de ces panneaux est basé sur l'effet photovoltaïque dont le principe est comme suit : lorsqu'un photon d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap est absorbé par le matériau semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou derrière lui, d'où l'apparition d'une paire électron- trou, c'est la génération des charges libres [2].

I.3. Types d'installations photovoltaïques

Il existe deux types d'installations photovoltaïques: Système PV autonome et Système PV connectés au réseau.

I.3.1. Systèmes PV autonomes

Le but de cette installation est d'assurer l'énergie demandée par la charge en tout temps. Ce type installation est utilisée dans des endroits qui ne sont pas connectés au réseau, citons par exemple: les sites isolés (îles, en montagnes, désert), les éclairages publics. Deux types de connexion sont distingués : directe et indirecte.

Dans la configuration directe illustrée par la figure (I.1), une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit à effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge. L'inconvénient majeur de cette connexion est la dépendance entre la puissance fournie par le générateur et la charge.

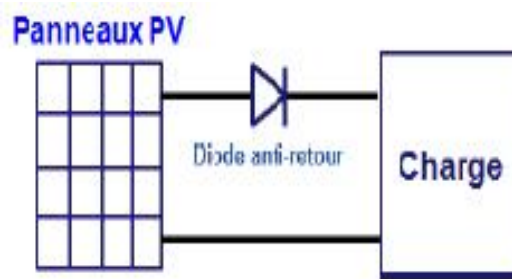


Figure I.1: Connexion directe d'un panneau photovoltaïque.

Dans la connexion indirecte montrée par la figure (I.2), un dispositif d'adaptation (convertisseur DC/DC) muni d'un régulateur MPPT est introduit pour optimiser la production d'énergie à chaque instant.

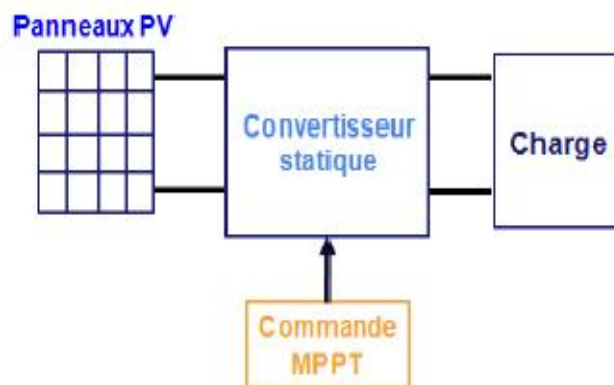


Figure I.2: Connexion d'un panneau photovoltaïque via un étage d'adaptation.

I.3.2. Systèmes PV connectés au réseau

Dans ce type d'installation, les panneaux sont couplés directement au réseau électrique via un seul convertisseur DC/AC (Voir la figure (I.3)), ou à travers deux étages de conversion DC/DC et DC/AC. L'énergie produite par le PV est consommée sur place par le site et l'excédent de production est injecté au réseau en cas. Lorsque la production du générateur photovoltaïque est limitée, c'est le réseau qui va alimenter le site.

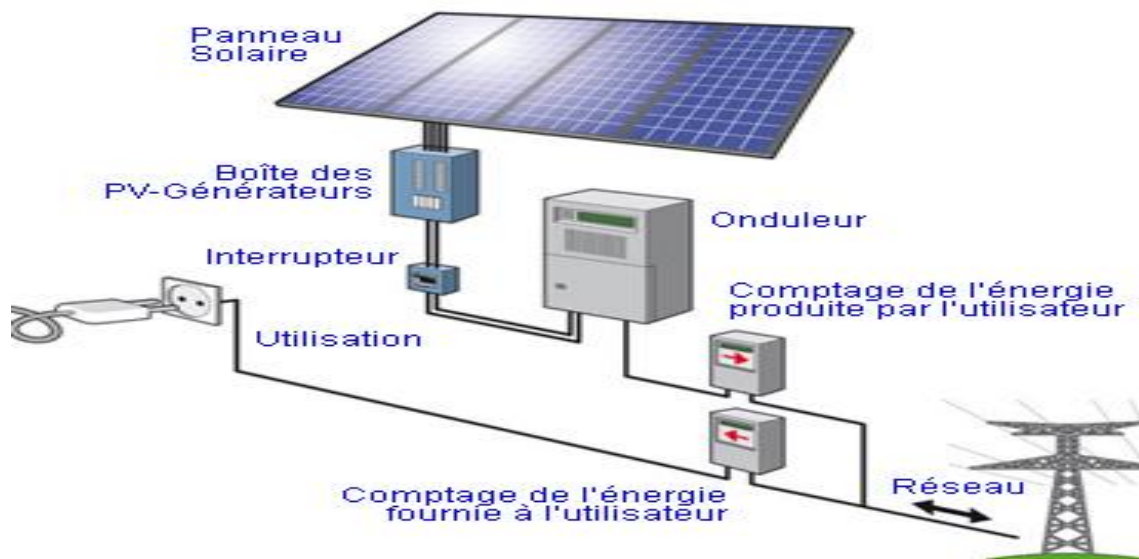


Figure I.3: Système photovoltaïque connecté au réseau.

I.4. Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque (photopile) forme l'élément de base du générateur photovoltaïque. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium. Elle convertit l'énergie des photons en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque comme le montre la figure (I.4). Le principe de ce phénomène est donné comme suit: Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou (appelée également jonction P-N), de même énergie électrique. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique.

I.4.1. Rendement d'une cellule PV

C'est le rapport entre la quantité d'énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie lumineuse et la quantité d'énergie solaire reçue par une cellule.

$$n[\%] = 100 * \frac{P(\text{produite})}{P(\text{incidence})} = 100 * \frac{P_{\text{max}}}{G \cdot A} \quad (\text{I.1})$$

avec: G : éclairement (W/m^2) ; A : surface de la cellule (m^2)

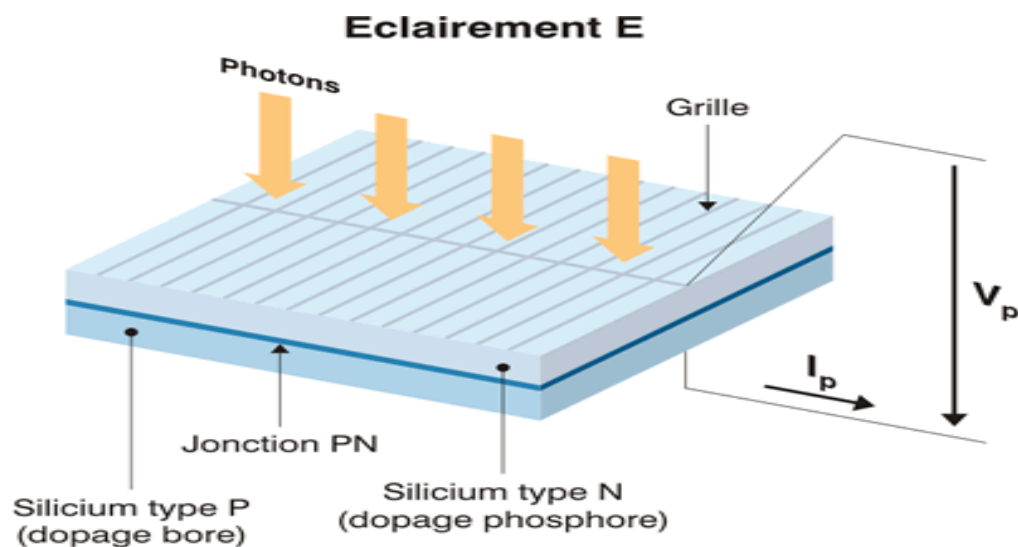


Figure I.4: Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.4.2. Types des cellules PV

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle montrées par le tableau suivant :

Type de cellule	Monocristalline	Polycristalline	Amorphe
rendement	De 12 à 18%	De 11 à 15%	De 5 à 8%
avantages	Meilleur rendement	Bon rendement	Faible coût
Inconvénients	coût de production élevé	coût de production élevé	Très faible rendement

Tableau I.1: Types des cellules PV.

I.4.3. Modélisation d'une cellule PV

Une cellule PV peut être modélisée par circuit électrique donné par la figure ci-dessous:

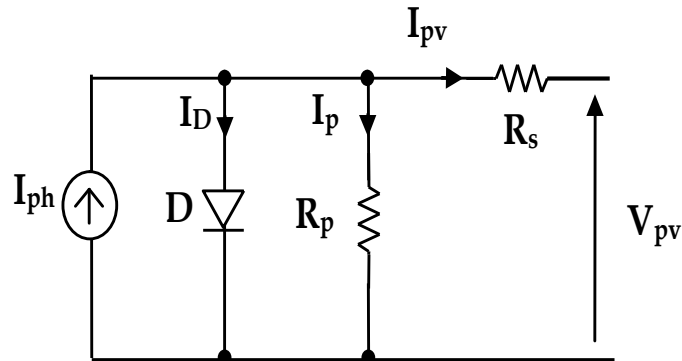


Figure I.5: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (I.2)$$

où

I_{pv} : Courant fourni par la cellule

I_{ph} : Photo-courant est proportionnel à l'irradiation, et très proche au courant de court-circuit dans les conditions standards. Son expression est donnée comme suit :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc} \quad (I.3)$$

G : Irradiation solaire en W/m^2 .

G_{ref} : Valeur nominal de l'irradiation solaire ($1000W/m^2$).

I_{cc} : Courant de court-circuit (c.-à-d., le courant lorsque la tension appliquée à la cellule est nulle donnée par :

$$I_{cc} = I_{cc_ref} + K_i(T - T_{ref}) \quad (I.4)$$

I_{cc_ref} : Courant de court-circuit aux conditions standards.

K_i : Coefficient de la température du courant de court-circuit.

T : Température de la cellule en kelvin = $273+T$ (en degrés)

T_{ref} : 25 degrés=298 kelvin.

I_D : Courant de la diode

$$I_D = I_{sat} \left(e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{nV_T}} - 1 \right) \quad (I.5)$$

I_{sat} : Courant de saturation de diode, dépendant de la température

$$I_{sat} = I_{sat_ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left(\frac{-qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)} \quad (I.6)$$

I_{sat_ref} : Courant de saturation de référence (aux conditions standards)

$$I_{sat_ref} = \frac{I_{cc_ref}}{e^{\left(\frac{V_{co_ref}}{nV_{Tref}} \right) - 1}} \quad (I.7)$$

V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule

R_S : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

R_p : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique

V_T : Tension thermique

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (I.8)$$

K : Constante de Boltzmann ($K = 1,381. 10^{-23} J/K$)

q : Charge de l'électron ($q = 1,602. 10^{-19} C$)

E_g : Energie de la bande de gap.

V_{co_ref} : Tension du circuit ouvert aux conditions standard.

I_p : Courant dérivé par la résistance parallèle

$$I_p = \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_p} \quad (I.9)$$

I.4.4. Paramètres d'un module photovoltaïque

➤ **Caractéristique courant-tension $I(V)$** : Cette caractéristique dépend de la puissance du rayonnement reçu par unité de surface (grandeur appelée éclairement (W / m^2)). Ses principaux paramètres sont les suivants [5]:

- **Courant de court-circuit (I_{cc})** : est directement proportionnel à l'éclairement et à la surface de la cellule. Il est obtenu lorsqu' on place le module PV en court-circuit ($V_{oc}=0$) et cela représente le courant maximal généré par la cellule photovoltaïque.
- **Tension de circuit ouvert (V_{oc})** : est directement proportionnelle à la température. Elle est produite dans des conditions de circuit ouvert ($I_{cc} = 0$). Elle représente la tension maximale générée par le panneau photovoltaïque.
- **Point de puissance maximale (PPM)** : représente le point pour lequel le produit $V \times I$ est maximal. Il se trouve sur le coude de la courbe. La puissance maximale (P_{max}) correspond à une tension maximale V_{mpp} et un courant maximal I_{mpp} .

$$P_{max} = V_{mmp} * I_{mmp} \quad (I.10)$$

Chaque panneau est donc caractérisé par quatre valeurs (V_{oc} , I_{cc} , I_{mpp} et V_{mpp}) qui sont mesurées dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire un éclairement de $1000 W/m^2$ et une température de $25^\circ C$.

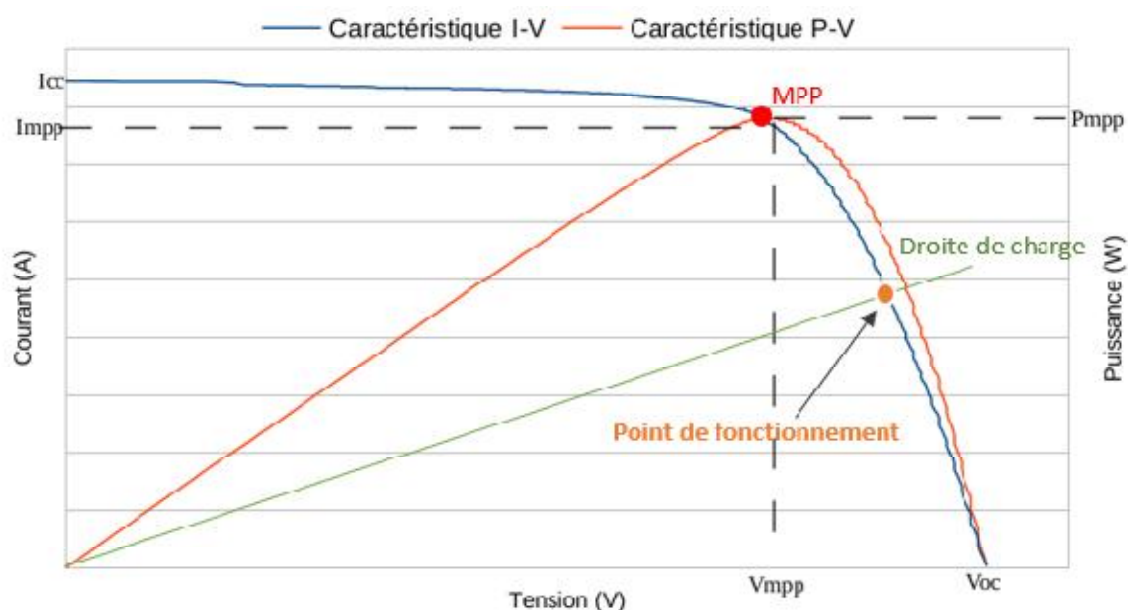


Figure I.6: Caractéristiques électriques d'une cellule PV.

➤ **Facteur de forme FF (Fill Factor) :** C'est le rapport entre la puissance maximale (P_{max}) fournie par le module PV et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit ouvert [5] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{oc}} \quad (I.11)$$

I.5. Module photovoltaïque

Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées dans une encapsule afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes:

➤ Association des modules photovoltaïques

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire [3].

➤ **Association en série :** Les modules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Comme illustré sur la figure (I.7), le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules [4].

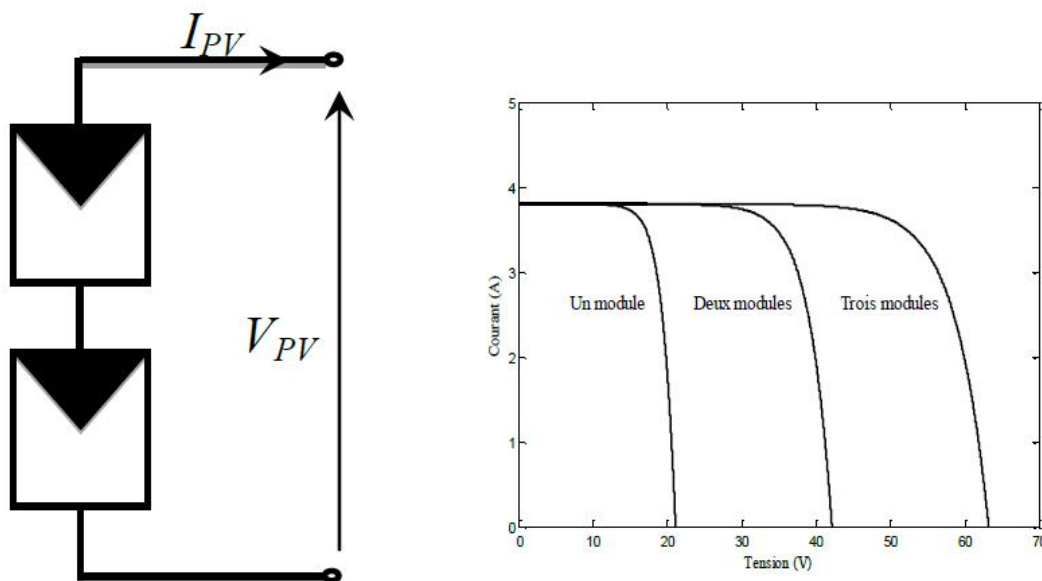


Figure I.7: Association des modules photovoltaïques en série.

➤ **Association en parallèle :** Lorsque les cellules sont connectées en parallèle, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante. Il faudra donc apparaitre les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur puissant comme il est montré sur la figure (I.8) [4].

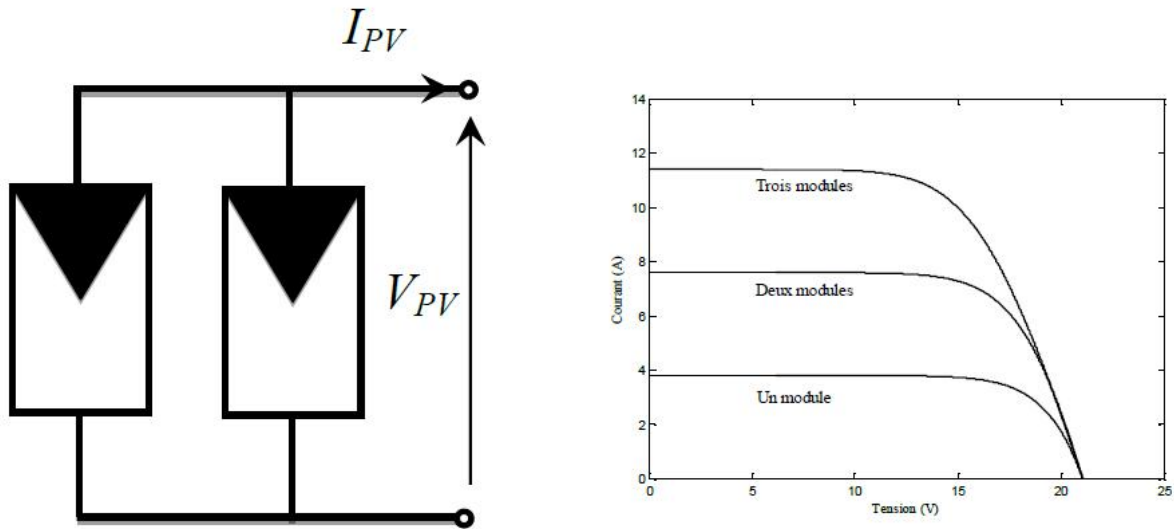


Figure I.8: Association des modules photovoltaïques en parallèle.

➤ **Association mixte (série et parallèle) :** Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il faut associer les modules en série et en parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. Figure (I.9) montre un exemple de couplage mixte [4].

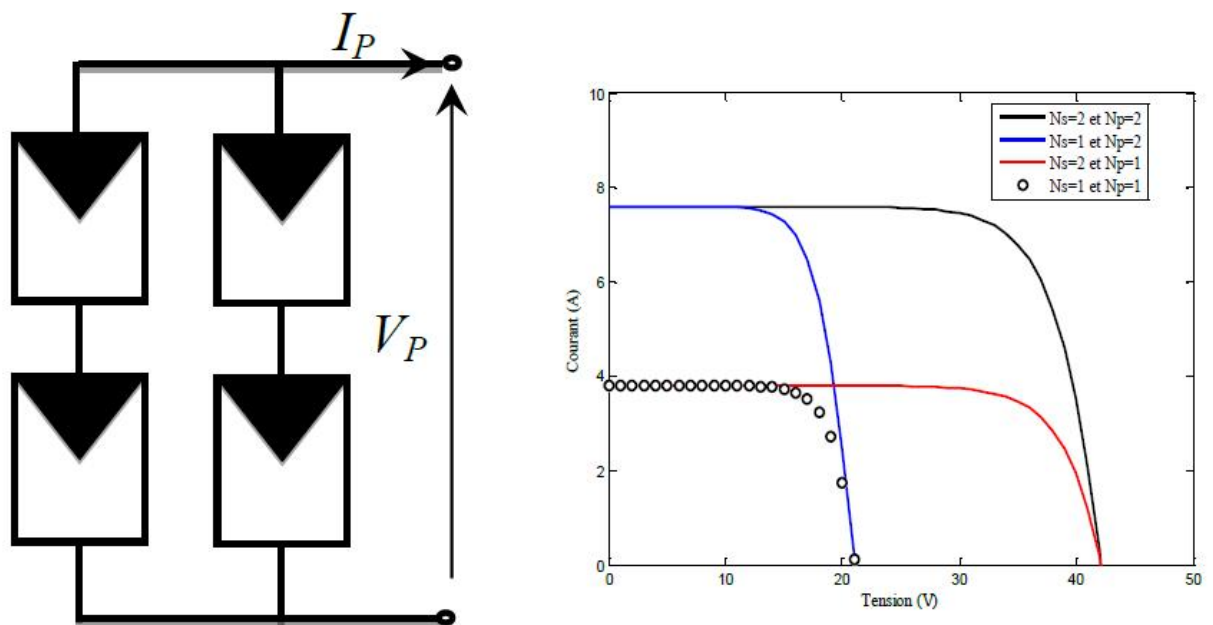


Figure I.9 : Association mixte des modules photovoltaïques.

I.5.1. Modélisation d'un module PV

Si on suppose que toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, alors le modèle mathématique du GPV peut être donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} I_{pv} R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} R_s I_{pv}}{\frac{N_p}{N_s} R_{sh}} \quad (I. 12)$$

où N_s est le nombre de cellules en série et N_p le nombre de cellules en parallèle.

I.6. Simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Le module photovoltaïque **SM55**, composé de 36 cellules monocristallin connectées en série, fournit une puissance crête de 55W dans les conditions standards. Le tableau suivant résume les caractéristiques électriques et thermiques du module dans les conditions standard.

Puissance crête P_{max} (W)	55W
Tolérance de puissance	10%
Courant à puissance maximal I_{pm} (A)	3.15A
tension à puissance maximal V_{pm} (V)	17.4A
Tensions en circuit ouvert V_{co} (V)	21.7V
Courant de court-circuit I_{cc} (A)	3.45A
N ; Ki	1.7404 ; 0.00479
Eg(énergie de la Bande de gap)	1.1 eV
Rs	0.1124
Rsh	6500

Tableau I.2 : Caractéristiques du module photovoltaïque **SM55**.

➤ **Influence de l'éclairement** : On fixe la température à 25 degrés et on fait varier l'éclairement comme suit : 400,600, 800 puis 1000 W/m^2 , on obtient les résultats de simulation montrés par la figure (I.10). On remarque que le courant de court-circuit (I_{cc}) varie directement avec le rayonnement lumineux. Cependant, la tension restant relativement constante. Et par conséquent la puissance maximale variée proportionnellement avec l'éclairement.

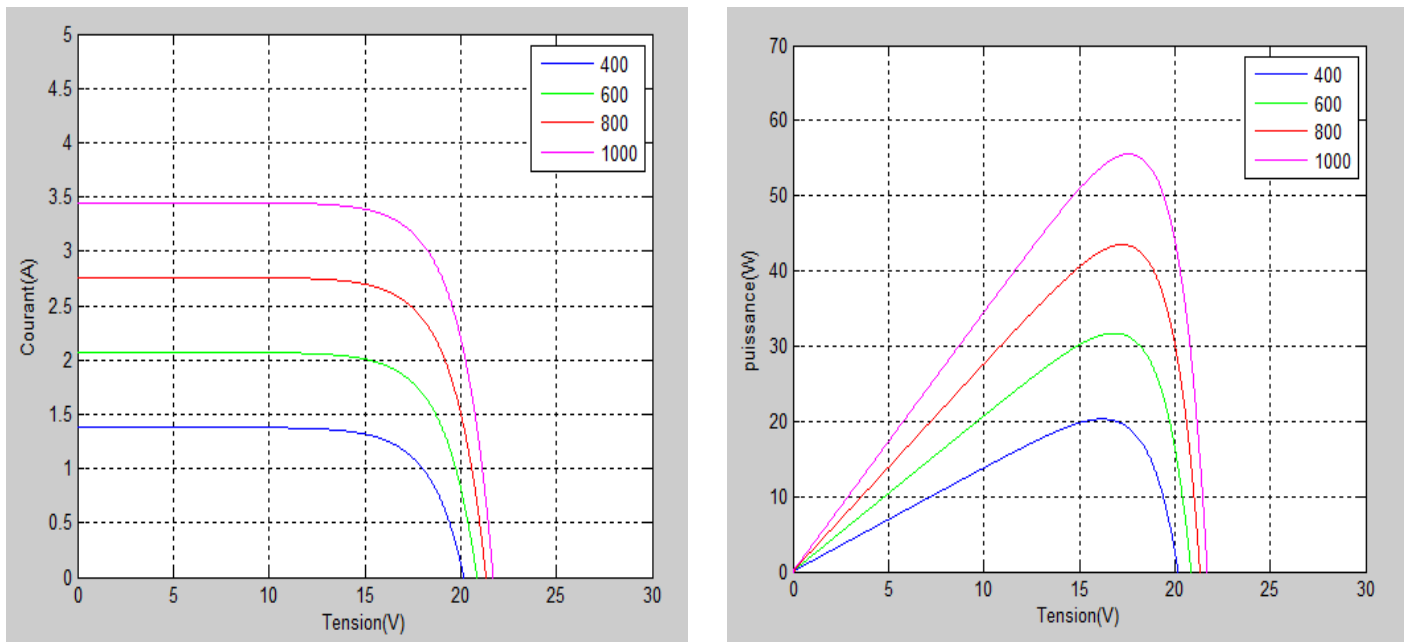


Figure I.10 : Effet de l'éclairement sur le fonctionnement de GPV.

➤ **Influence de la température :** On fixe l'éclairement à 1000W/m^2 et on fait varier la température comme suit : 25,40 puis 50 degrés. On obtient les résultats de simulation montrés par la figure (I.11). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert (V_{oc}) baisse lorsque la température augmente. Et par conséquent la puissance maximale variée inversement avec la température.

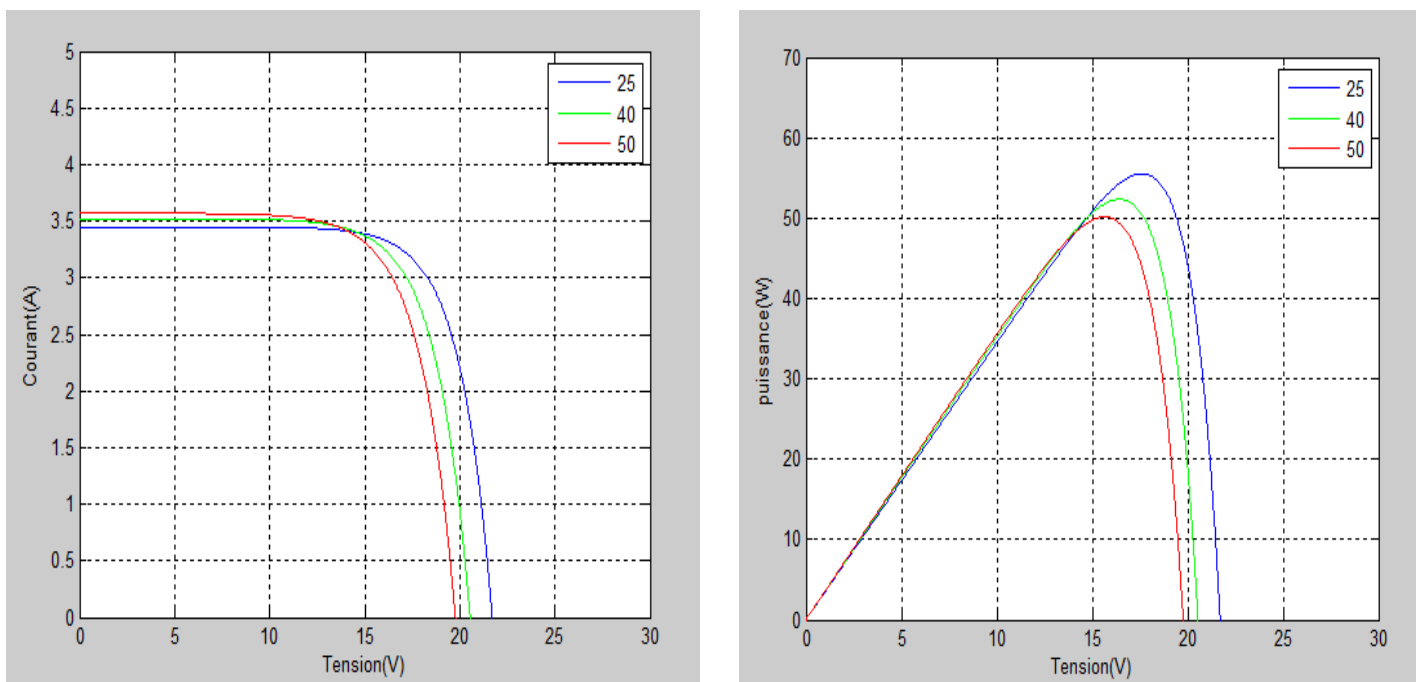


Figure I.11: Effet de la température sur le GPV.

I.7. Commandes MPPT

La commande MPPT, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation comme le montre la figure (I.12), fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de la puissance que le GPV peut fournir. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{ppm} et I_{ppm}) [6].

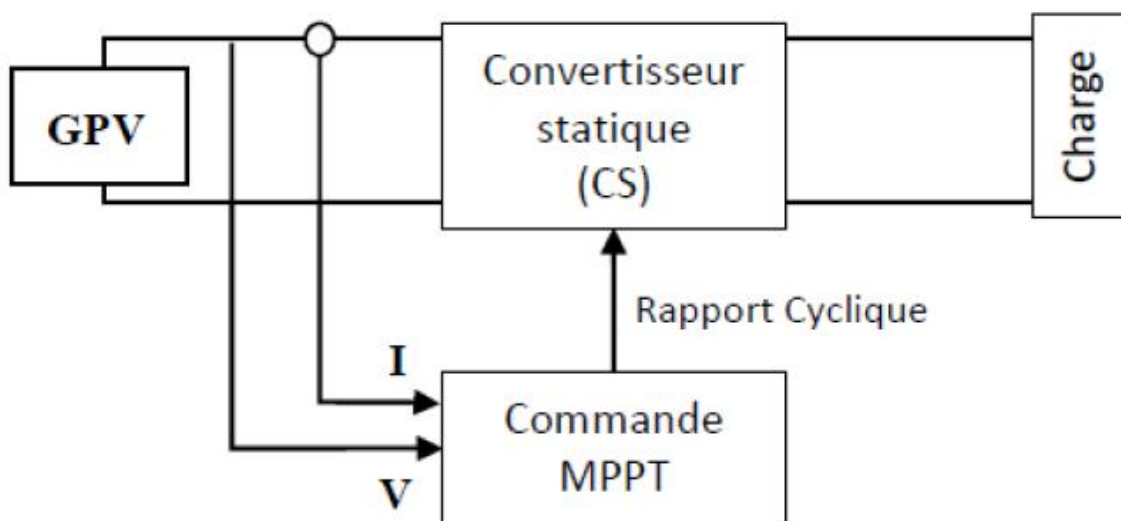


Figure I.12: Principe de la commande MPPT.

I.7.1. Classification des commandes MPPT

On peut classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent : Direct et indirect.

I.7.2.1. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le modèle mathématique du générateur PV et la position approximative du MPP. L'estimation du point de fonctionnement du GPV est réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. L'idée de base est d'établir une poursuite de la puissance maximale (ou la tension optimale). Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles

sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [7-8].

I.7.2.2. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT utilise un algorithme de recherche qui détermine le point de fonctionnement optimal (MPP), sans interruption du fonctionnement, à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système.

I.7.2. Quelques algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Les plus populaires sont :

I.7.2.1. Algorithme de perturber et observer (P&O)

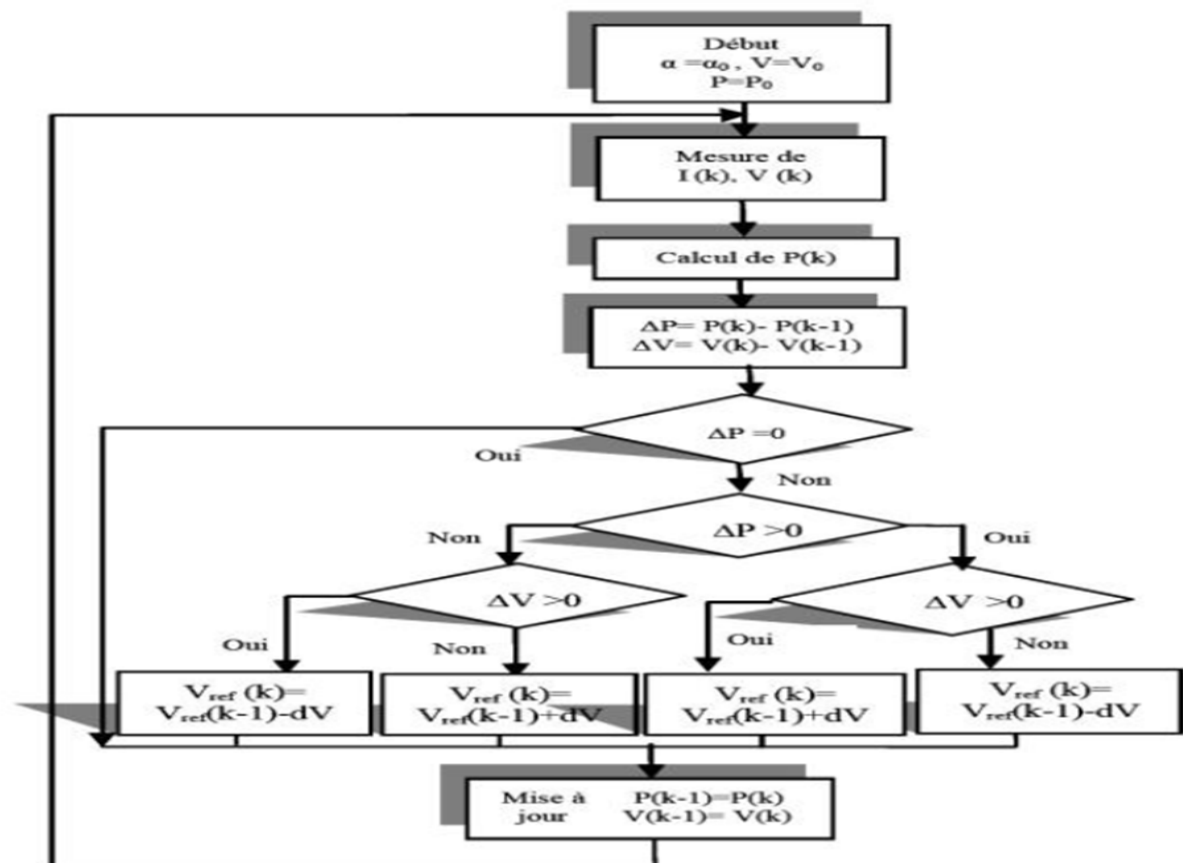


Figure I.13: Organigramme de l'algorithme 'P&O'.

Le principe de cet algorithme, illustré par la figure (I.13), est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette

perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [9].

I.7.2.1. Algorithme d'incrément de la conductance (INC)

Le principe de cet algorithme, montré par la figure (I.14), est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale 'PMP'. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'PMP' [10].

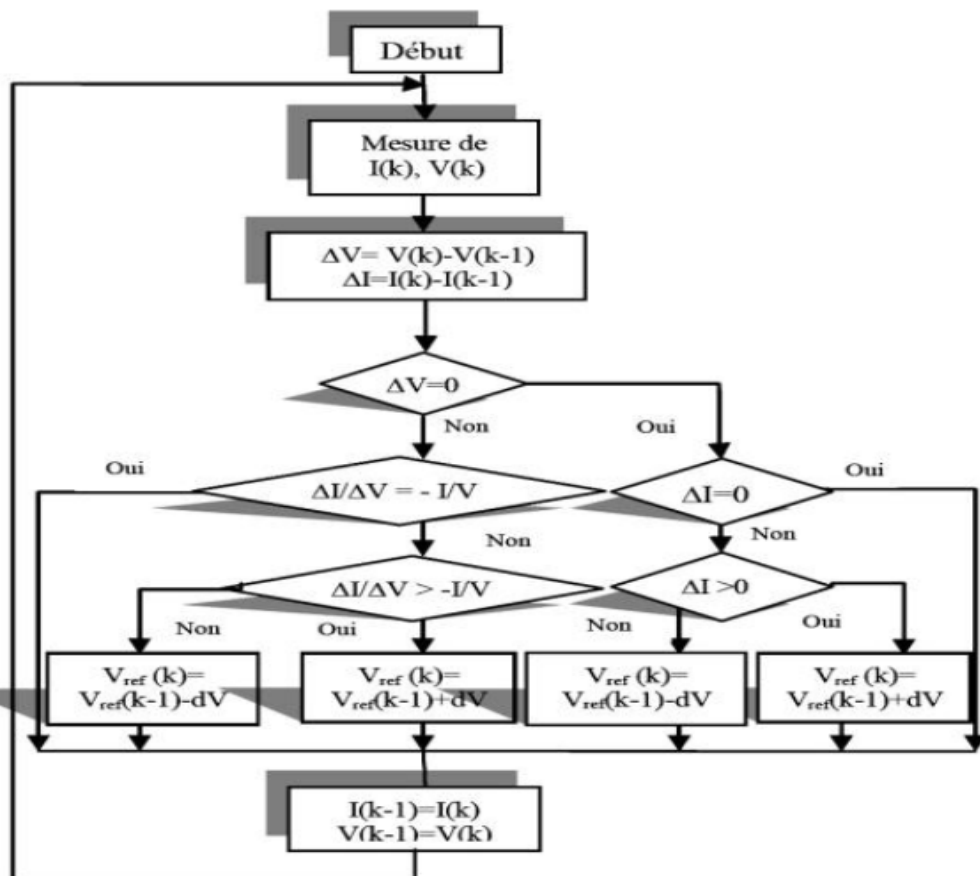


Figure I.14: Organigramme de l'algorithme 'INC'.

I.7.2.1. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{oc}

Cet algorithme, illustré par la figure (I.15), est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{mp} = K * V_{oc} \quad (I.13)$$

où k est un facteur de tension varie entre 0.73 et 0.8.

Pour déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert (V_{oc}). Par conséquent, le point defonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [11].

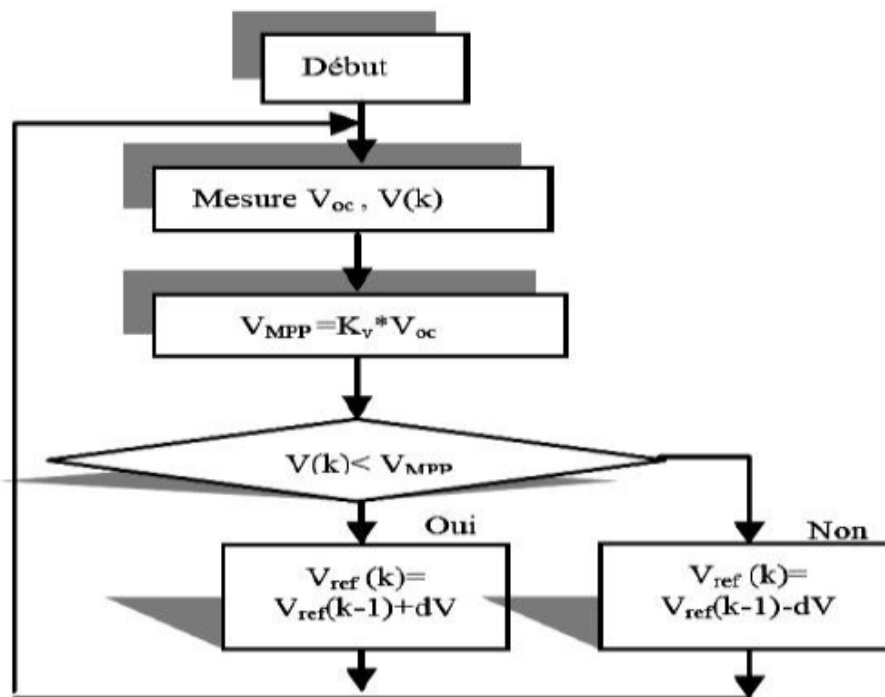


Figure I.15: Organigramme de l'algorithme FCO.

I.7.2.1. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc}

Cette technique, illustrée par la figure (I.16), est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante:

$$I_{mp} = K * I_{CC} \quad (1.14)$$

où k est un facteur de courant varie entre 0.85 et 0.92.

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale [12].

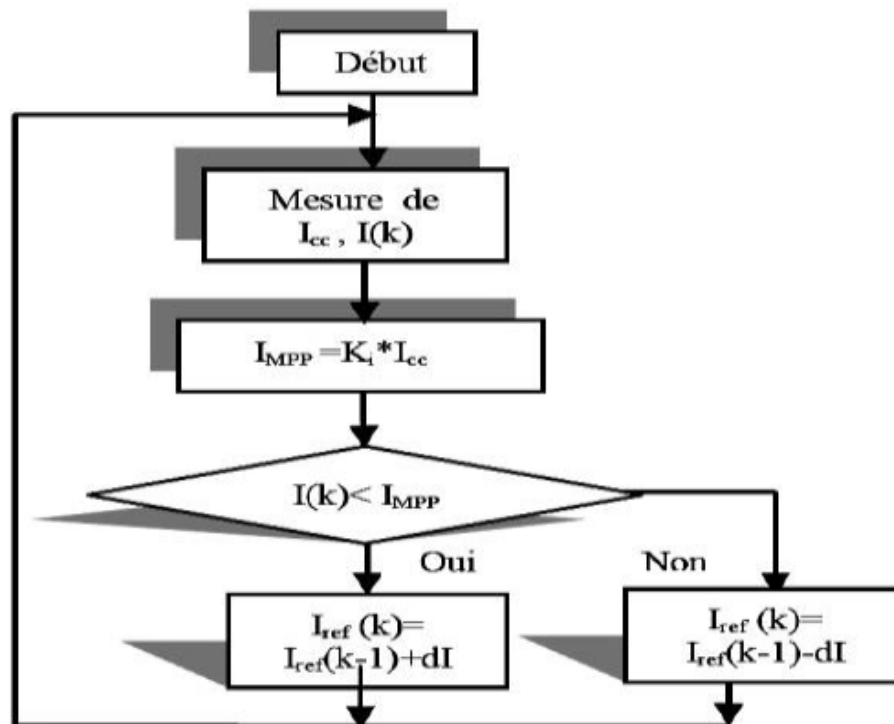


Figure I.16: Organigramme de l'algorithme FCC.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la conversion de l'énergie solaire en une énergie photovoltaïque. Cette conversion est réalisée par des panneaux PV dont l'élément unitaire est la cellule PV. L'association de plusieurs cellules en série, parallèle ou série/parallèle permet de fabriquer un module PV et d'augmenter la puissance maximale générée. La recherche de cette puissance nécessite l'introduction des convertisseurs statiques et l'utilisation des algorithmes MPPT qui sont distingués en deux classes : direct et indirect.

Chapitre II

Généralités sur les réseaux électriques

II.1. Introduction

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant est produit, il doit être amené jusqu'au consommateur à travers un réseau électrique.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les échanges électriques effectués dans les réseaux électriques. On commence ce chapitre par donner des notions de base sur les réseaux électriques. Ensuite, on présente les différents types des centrales de production, postes et les lignes électriques. Enfin, on expose le problème de la présence des harmoniques électriques et les solutions proposées dans la littérature pour remédier ces effets indésirables.

II.2. Réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production, transport et consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

II.3. Organisation des réseaux électriques

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques...etc. avec les centres de consommation (villes, usines...etc.). D'après la figure (II.1), l'énergie électrique est transportée en haute tension et/ou très haute tension pour limiter les pertes à effet Joule (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité du courant électrique), puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final. Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées [13].

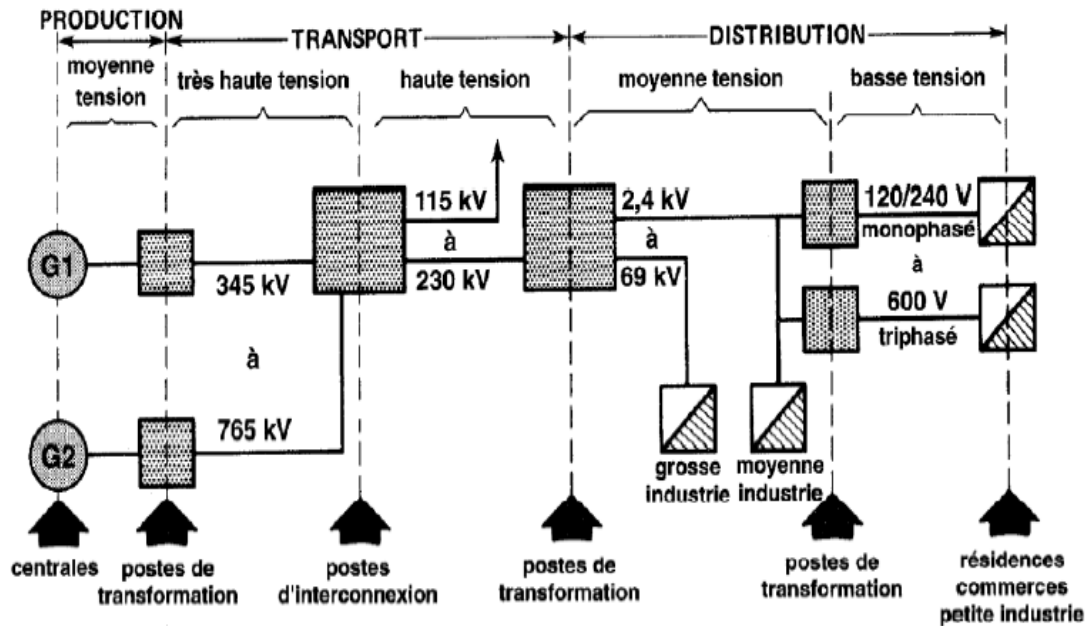


Figure II.1. Organisation d'un réseau électrique.

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau doit satisfaire les exigences suivantes :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 10\%$ de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 0,1\%$ Hz.
- Fournir l'énergie à un prix acceptable.
- Maintenir les normes de sécurité rigoureuses.
- Veillez à la protection de l'environnement.

II.4. Architecture des réseaux électriques

Architecture des réseaux électriques contient plusieurs réseaux selon le niveau de la tension et la puissance demandée.

II.4.1. Réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances. Le niveau des tensions est varié de 220 à 800 KV [14].

II.4.2. Réseau de répartition HTB

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT, soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA). La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Le niveau des tensions est varié de 50 à 200 KV [15].

II.4.3. Réseau de distribution HTA

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport. Des lignes de distribution HTA partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir. Ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements. Le niveau des tensions est varié de 1 à 50 KV [15].

II.4.4. Réseau de livraison BTA

C'est le réseau qui on est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230V (380/220 en Algérie). On le rencontre dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles. La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BTA. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement. Le réseau BTA permet de distribuer au consommateur 230 V pour le réseau monophasé (1 phase + neutre) ou 400 V pour le réseau triphasé (3 phases + neutre) [15].

II.5. Centrales électriques

Il existe cinq principaux types de centrales électriques: les centrales à combustibles fossiles dites centrales thermiques classiques, les centrales nucléaires considérées aussi comme des centrales de

type thermique, les centrales hydroélectriques, les centrales éoliennes et les centrales solaires (photovoltaïques) [16].

II.5.1. Centrales thermiques

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. On les trouve souvent près des rivières, lac et mer, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. Le principe de fonctionnement de la centrale thermique illustré par la figure (II.2) consiste à dégager une grande quantité de chaleur produit par la combustion d'un combustible (charbon, pétrole et gaz naturel) pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière.

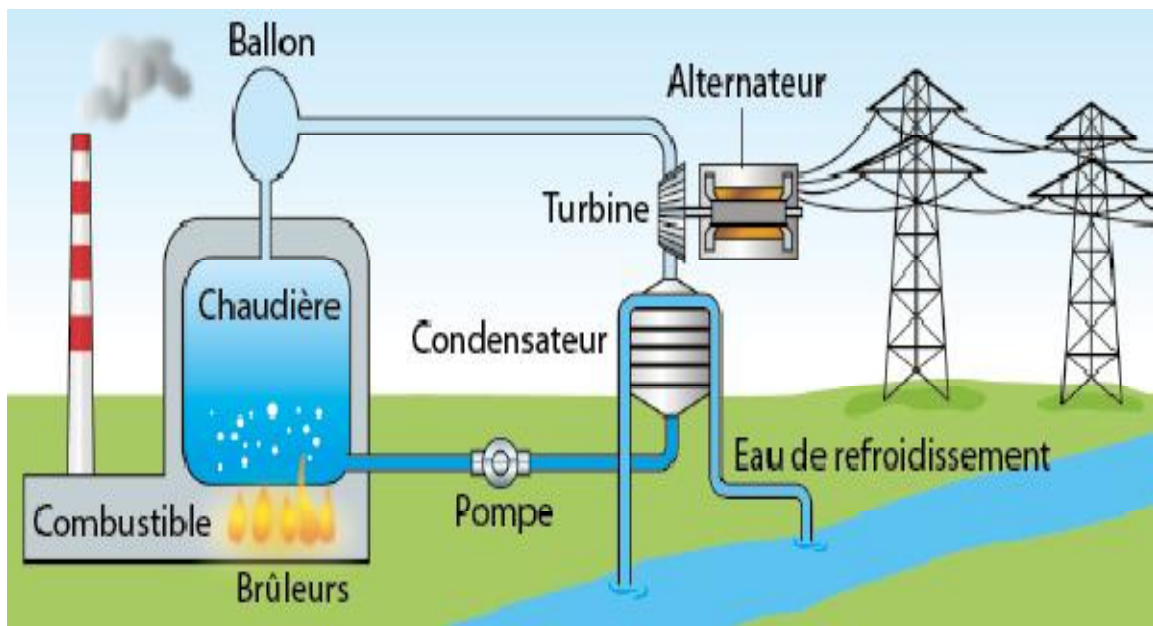


Figure II.2: Centrale thermique à flamme.

II.5.2. Centrales nucléaires

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire comme le montre la figure (II.3). L'énergie nucléaire obtenue

à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium avec la source de chaleur utilisée. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident.

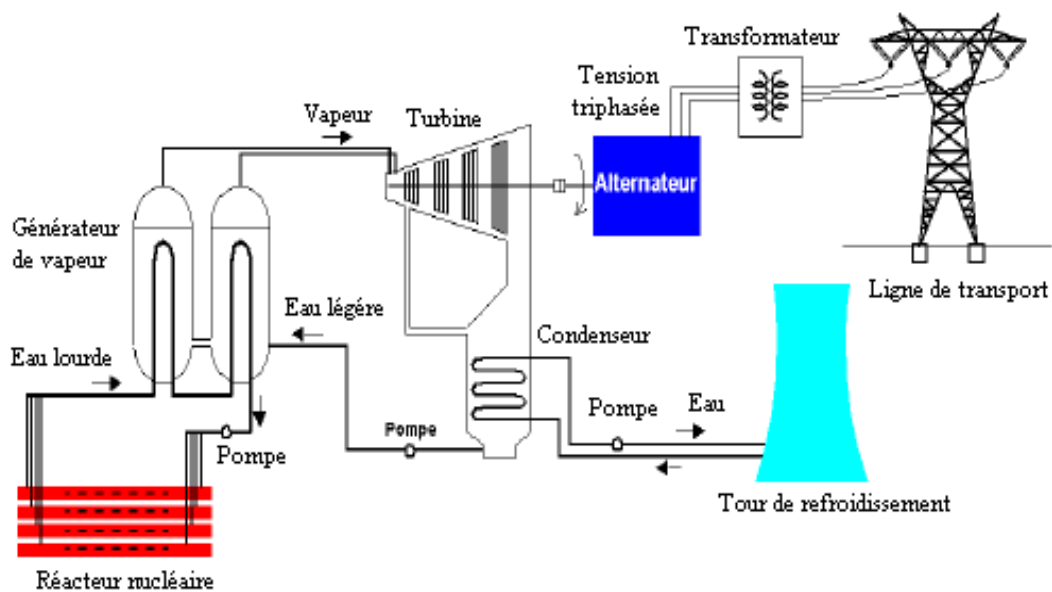


Figure II.3 : Centrale nucléaire.

II.5.3. Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique comme le montre la figure (II.4). Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

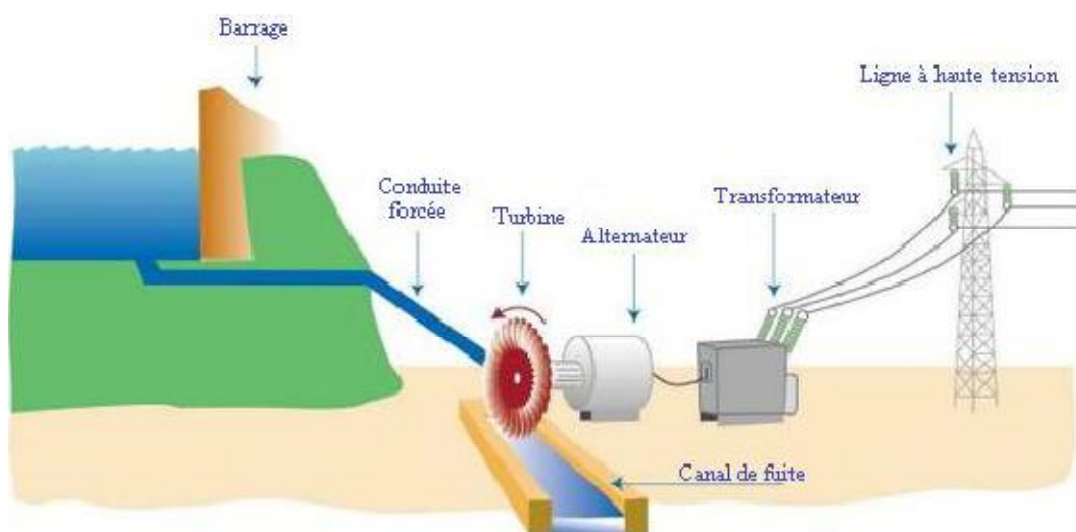


Figure II.4 : Centrale hydroélectrique.

II.5.4. Centrales éoliennes

L'énergie du vent provient de celle du soleil qui chauffe inégalement les masses d'air, provoquant des différences de pression atmosphérique et donc des mouvements de circulation de l'air. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, disponible partout (en quantités différentes) et bien sûr sans rejet polluant dans l'atmosphère. L'éolienne transforme la puissance de translation du vent en puissance de rotation. Un alternateur est mécaniquement couplé à l'axe des pales (rotor) pour produire les tensions triphasées. Un dispositif de régulation permet d'obtenir une vitesse de rotation constante compatible avec la fréquence du réseau (50Hz). La figure (II.5) présente la conversion de l'énergie éolienne en électricité.

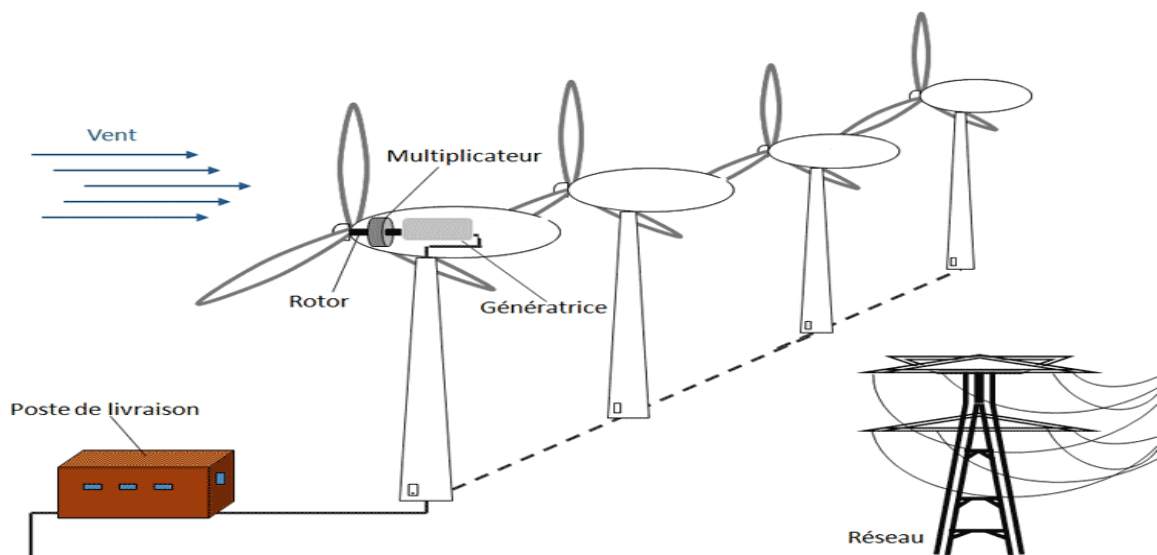


Figure II.5: Schéma de principe d'une production éolienne.

II.5.5. Centrales solaires

Un premier processus consiste à produire de l'électricité à partir de rayonnements lumineux du soleil absorbés par des panneaux (modules) photovoltaïques (voir figure (II.6)). Un autre procédé utilise des miroirs pour concentrer le flux d'énergie vers un foyer où de l'eau est vaporisée pour entraîner un alternateur.

II.6. Postes électriques

Un poste électrique assure l'interconnexion entre les différentes lignes électriques, c.-à-d., transforme le niveau de tension à autre niveau. Il existe plusieurs types de postes électriques:

- Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;
- Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques ;
- Postes élévateurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur ;
- Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels [17].

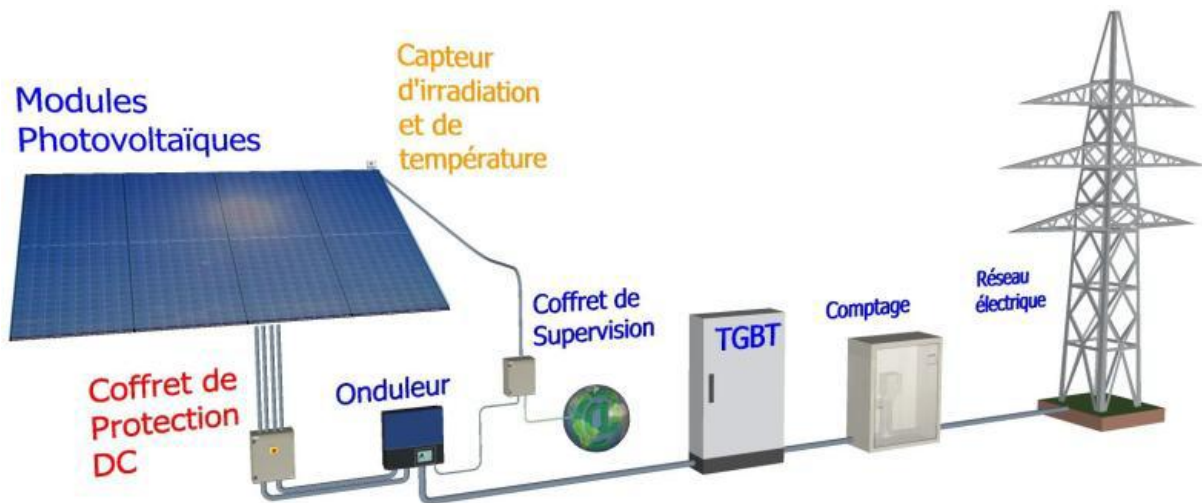


Figure II.6 : Centrales solaires.

II.7. Lignes électriques

On distingue quatre types de lignes : ligne de distribution à basse tension, ligne de distribution à moyenne tension, ligne de transport à haute tension et ligne de transport à très haute.

- ❖ **Lignes de distribution BTA:** Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.
- ❖ **Lignes de distribution HTA:** Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.
- ❖ **Lignes de transport HTB:** Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération.
- ❖ **Lignes de transport THT:** Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV [18].

II.8. Harmoniques électriques

Les harmoniques présents dans les réseaux électriques proviennent de la prolifération de charges non linéaires et des équipements (tels qu'ordinateurs, TV, serveurs et autres dispositifs électroniques) connectées au système de distribution. On dit qu'une charge est non linéaire lorsqu'on l'alimente par la tension sinusoïdale du réseau, le courant absorbé n'est pas sinusoïdal. Les plus courantes de ces charges sont les démarreurs ou variateurs associés aux moteurs ou machines tournantes, onduleurs, redresseurs,...etc. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension observées sous forme de distorsion harmonique en tension. En effet, la présence des harmoniques en courant signifie que l'onde du courant est déformée comme le montre la figure (II.7).

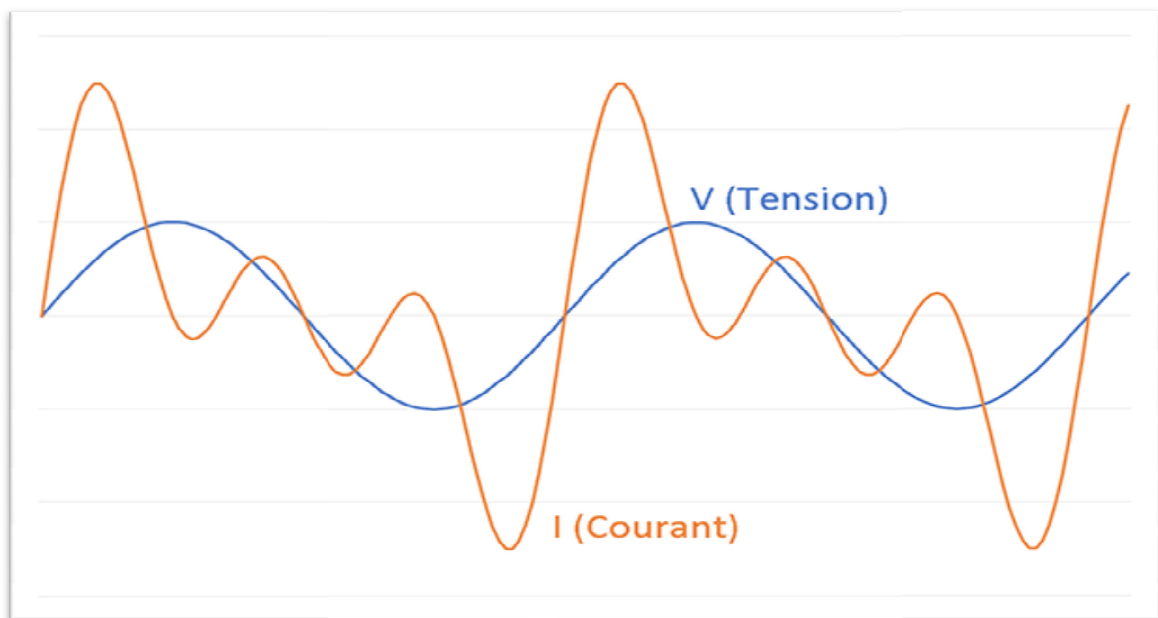


Figure II.7 : Exemple de distorsion harmonique en courant.

La forme irrégulière de l'onde de courant peut être transformée en série de Fourier, c.-à-d. en effectuant une somme de composantes sinusoïdales. La première, appelée fondamental du courant, a la même fréquence que la tension d'alimentation et les autres sont appelées les harmoniques et ont des fréquences multiples de la fréquence du fondamental comme l'illustre la figure (II.8).

L'expression mathématique de la décomposition en série de Fourier du courant déformé est donnée comme suit:

$$i(t) = I_{1M} * \cos(\omega t - \varphi_1) + \sum_{h>1} I_{hM} * \cos(h\omega t - \varphi_h) \quad (\text{II.1})$$

où I_{1M} est l'amplitude de la composante fondamentale du courant (1^{er} harmonique), φ_1 est le déphasage du fondamental par rapport à la tension (s'il est positif, la nature de la charge est inductive et s'il est négatif elle est capacitive) et I_{hM} est l'amplitude des harmoniques de rang h au-delà du fondamental.

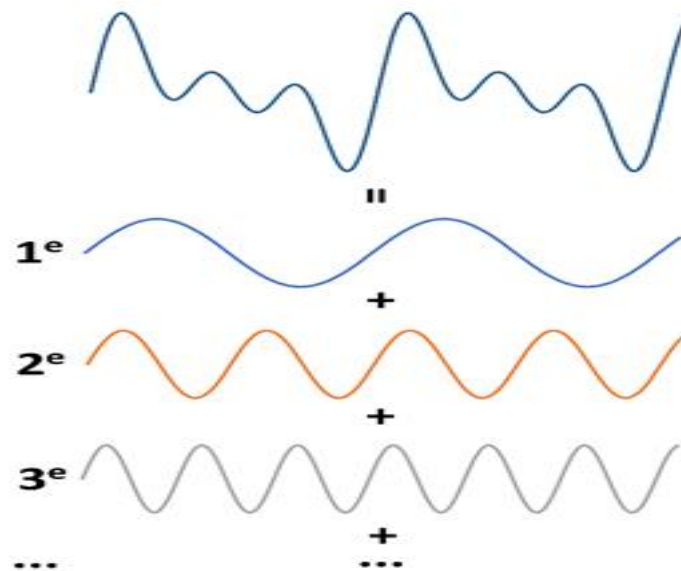


Figure II.8 : Décomposition en série de Fourier d'un courant irrégulier.

Remarque 1 : L'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

Remarque 2 : Selon les normes, on prend en considération les harmoniques jusqu'au rang 40.

Remarque 3 : La plupart des charges connectées au réseau sont toutefois symétriques, c'est-à-dire que les demi-alternances de courant sont égales et opposées. Dans ce cas, les harmoniques de rangs pairs sont nuls.

On peut également réécrire l'expression (II.1) sous la forme suivante:

$$i(t) = (I_{1M} \cos \varphi_1) * \cos(\omega t) + (I_{1M} \sin \varphi_1) * \sin(\omega t) + \sum_{h>1} I_{hM} * \cos(h\omega t - \varphi_h) \quad (\text{II.2})$$

avec $I_{1M} \cos(\varphi_1)$ est la composante active du fondamental du courant, celle qui correspond à la puissance active (et donc à l'énergie réellement convertie) et $I_{1M} \sin \varphi_1$ est la composante réactive du fondamental du courant, celle qui correspond à la puissance réactive (et donc à des échanges d'énergie entre la charge et le réseau, dont la valeur moyenne est nulle: pas de consommation d'énergie) et qui peut se compenser par un condensateur (cas d'une charge inductive) ou une inductance (cas d'une charge capacitive).

Les valeurs efficaces correspondantes sont :

$$I_{1rms} = \frac{I_{1M}}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I_{hrms} = \frac{I_{hM}}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.3})$$

La valeur efficace du courant total vaut:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + \sum_{h>1} I_{hrms}^2} \quad (\text{II.4})$$

La valeur efficace de la tension est toujours notée V , en supposant qu'elle est toujours sinusoïdale (pas trop de déformations dues aux harmoniques de courant et à l'impédance de la source), son expression est inchangée :

$$V = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.5})$$

II.8.1. Symptômes et conséquences des harmoniques

La présence d'harmoniques perturbe les autres charges, même linéaires, connectées aux bornes de la même source de tension. En effet, ces charges risquent de ne plus être alimentées dans des conditions satisfaisant aux références de tension exigées.

Les autres conséquences possibles sont:

- ❖ Echauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des installations (machines, transformateurs,..) par effet pelliculaire (pertes en cuivre et en fer).
- ❖ Perturbations dans les réseaux de communication à cause du couplage électromagnétique entre les réseaux électrique et de télécommunication.
- ❖ Mauvais fonctionnement de systèmes comportant des composants électroniques: Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage par zéro de la tension.
- ❖ Excitation des résonances : des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques.
- ❖ Réduction du rendement des moteurs et des transformateurs en augmentant les pertes d'énergie par hystérésis et par les courants de Foucault.
- ❖ Vieillesse accélérée des appareils électriques [19].

II.8.2. Indicateurs essentiels de la distorsion harmonique

Un certain nombre d'indicateurs sont utilisés pour quantifier et évaluer la distorsion harmonique des ondes de courant et de tension, à savoir : Taux de distorsion (valeurs efficace), facteur de puissance, facteur de crête et spectre harmonique. Ces indicateurs sont indispensables pour déterminer les mesures correctives nécessaires.

II.8.2.1. Taux de distorsion (THD)

THD est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques d'un signal Y , ramenée à la composante fondamentale Y_1 [21].

$$THD = \sqrt{\sum_{h>1} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} \quad (\text{II.6})$$

Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau. Il en existe deux sortes : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges). Pour les harmoniques de courant, l'équation est donnée par :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h>1} \left(\frac{I_{hM}}{I_{1M}}\right)^2} \quad (\text{II.7})$$

Pour les harmoniques de tension, le taux de distorsion est donné par :

$$THD_u = \sqrt{\sum_{h>1} \left(\frac{U_{hM}}{U_{1M}}\right)^2} \quad (\text{II.8})$$

II.8.2.2. Facteur de puissance

Le facteur de puissance λ est le quotient de la puissance active P (kW) consommée sur la puissance apparente S (kVA) fournie.

$$\lambda = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} \quad (\text{II.9})$$

Lorsque la tension est sinusoïdale ou pratiquement sinusoïdale ($THD_u \sim 0$), on peut admettre que la puissance active est seulement en fonction du courant fondamental. Alors:

$$P \approx V \cdot I_{1\text{rms}} \cdot \cos(\varphi_1) \quad (\text{II.10})$$

En conséquence, on obtient :

$$\lambda = \frac{I_{1\text{rms}} \cdot \cos\varphi_1}{I_{\text{rms}}} = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (\text{II.11})$$

II.8.2.3. Facteur de crête

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur crête du courant I_M (ou de la tension U_M) et leurs valeurs efficaces.

- Pour un signal sinusoïdal, le facteur de crête est donc égal à $F_c = \frac{I_{max}}{I_{eff}} = \sqrt{2} = 1,414$.
- Lorsque le courant est déformé, le facteur de crête est supérieur à cette valeur. Il est généralement compris entre 1,5 et 2 et peut même atteindre 5 dans les cas extrêmes.

II.8.2.4. Spectre harmonique

Le spectre harmonique est la représentation de l'amplitude de chaque rang d'harmonique en fonction de sa fréquence comme le montre la figure (II.9).

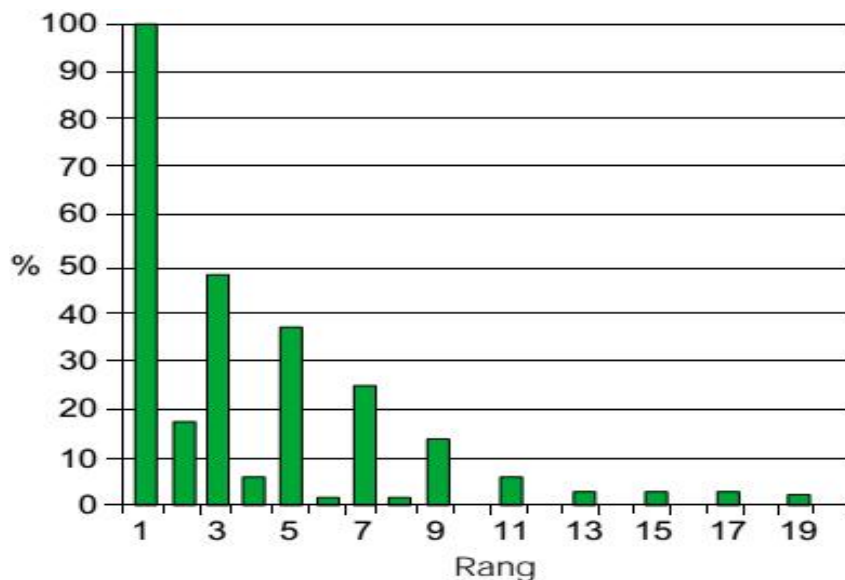


Figure II.9 : Spectre d'un courant absorbé.

II.8.3. Compensation des courants harmoniques

Différentes solutions sont adaptées pour atténuer les effets des harmoniques. Ces solutions sont classifiées en deux types : solutions classiques et solutions modernes.

II.8.3.1. Solutions classiques

Elles sont fondées sur l'utilisation des composants passifs (inductances, condensateurs, résistance) et/ou des modifications qui adaptent le schéma de l'installation. On peut citer les solutions suivantes :

- Utilisation des transformateurs d'isolement, à couplages particuliers comme triangle- étoile ou triangle zigzag
- Positionnement des charges polluantes en amont du réseau.
- Regroupement les charges polluantes.
- Séparation des sources.
- Choix du schéma de liaison à la terre adapté : le TNC est à proscrire dans le cas d'alimentation sensible et le TNS est conseillé en présence d'harmoniques.
- Utilisation des filtres passifs.

II.8.3.2. Solutions modernes

Récemment, des nouvelles solutions efficaces aux perturbations des réseaux sont proposées pour remédier les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles liés aux équipements passifs (batteries de condensateurs et filtres passifs), comme les résonances, les surcharges et la forte dépendance de l'environnement disparaîtront. Parmi toutes les solutions modernes, on trouve les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison. En outre, le développement réalisé dans le domaine de l'électronique de puissance, comme les transistors de puissance IGBT et les thyristors GTO, a permis de proposer de nouvelles solutions comme la technique de commande par modulation de largeurs d'impulsions (MLI).

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la production et le transport d'électricité dans les réseaux électriques. La production de l'électricité est assurée par les centrales électriques comme les centrales solaires. Le transport de l'électricité du centre de production aux consommateurs est réalisé par le moyen de plusieurs postes et lignes électriques. La qualité de l'énergie électrique injectée dans le réseau est dépendue de la présence des harmoniques électriques, notamment en courant, causée par les charges non linéaires. La quantité des harmoniques peut être mesurée par plusieurs facteurs comme le taux de distorsion, facteur de puissance, facteur de crête et le spectre des harmoniques. Pour atténuer l'effet de ce phénomène, plusieurs solutions sont proposées dont les plus utilisées sont les filtres passifs et actifs, et la technique de commande MLI.

Chapitre III

Commande par MG d'un système PV connecté au réseau monophasé

III.1. Introduction

La commande par mode glissant (CMG) a connu un essor considérable durant les dernières décennies. Ceci est dû principalement à sa simplicité de mise en œuvre et de sa grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures. Tous ces aspects positifs ne doivent pas néanmoins masquer certains inconvénients. L'inconvénient majeur réside dans l'apparition des oscillations hautes fréquences autour de la surface et la commande. Ces oscillations, connues sous le nom phénomène de réticence (ou broutement ou chattering), peuvent conduire à une détérioration des performances du système à contrôler et l'usure de l'actionneur.

L'objectif de ce chapitre est de commander un système PV connecté à un réseau monophasé via double étages par la technique du mode glissant. On introduit ce chapitre par présenter les concepts de base de la commande par mode glissant. Ensuite, on donne la description et la modélisation mathématique du système PV système PV connecté à un réseau monophasé via double étages. Par la suite, on présente un contrôleur par mode glissant d'ordre un pour assurer une production d'énergie maximale par les panneaux solaire et l'injection de cette énergie dans le réseau monophasé avec un facteur de puissance quasi unitaire. En fin, on met en simulation, sous l'environnement MATLAB, la stratégie de contrôle présentée.

III.2. Concepts de base de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant est un contrôle de type non linéaire, qui à été introduit initialement pour le contrôle des systèmes à structure variable. Ses principaux avantages sont la garantie de la stabilité et de la robustesse pour de larges variations des paramètres du système, de l'entrée et des perturbations sur le système. De plus, étant donné sa flexibilité en ce qui concerne la synthèse, la commande par mode glissant est relativement facile à mettre en œuvre par rapport à d'autres types de commande non linéaires. Ces propriétés font que cette loi de commande est adaptée à de nombreuses applications industrielles [23].

III.2.1. Principe de la commande par mode glissant

Le principe de la commande par mode glissant consiste à contraindre l'état du système à rejoindre une surface de glissement désirée à partir de n'importe quel point dans le plan de phase. Une fois la surface atteinte, le système glisse le long de cette surface jusqu'à le point d'équilibre comme le montre la figure (III.1).

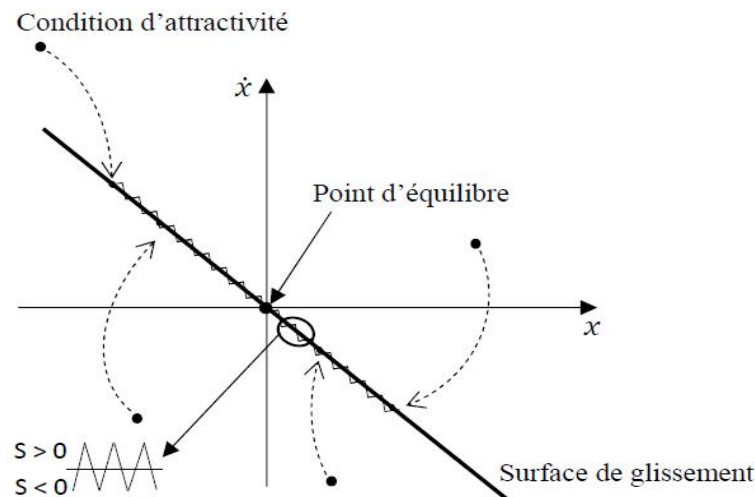


Figure III.1. Plans de phase en mode glissant.

Dans la théorie de la commande par mode glissant, la dynamique du système a deux modes séquentiels :

- **Mode de convergence (reaching mode):** Correspond à la période du temps pendant la quelle les trajectoires d'état du système se déplacent vers la surface de glissement. Durant cette phase, le système reste sensible aux variations des paramètres.
- **Mode de glissement (sliding mode):** Dans ce mode, les trajectoires d'état restent sur la surface de glissement, et le comportement du système est entièrement déterminé par le choix de la surface de glissement.

III.2.2. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant

Il est reconnu que la robustesse vis-à-vis les variations paramétrique du système les perturbations appliquées au système. De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, il permet de simplifier la complexité du système. Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

- Un phénomène de chattering où broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande, peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.
- Le système est soumis à chaque instant à une commande à fréquence élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré et ceci n'est pas souhaitable [24].

III.2.3. Synthèse de la loi de commande par mode glissant

La synthèse de la commande par mode glissant se fait en trois étapes :

- Choix de la surface de glissement qui représente la dynamique désirée.
- Etablir la condition de convergence.
- Déterminer la loi de commande qui aura pour rôle de garantir le maintien et le glissement le long des trajectoires du système sur cette surface.

III.2.3.1. Choix de la surface de glissement

Soit le système affine, mono entrée mono sortie (SISO), décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}^n = f(x, t) + g(x, t)u + d(t) \\ y = x \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

où $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in R^n$ est le vecteur d'état du système supposé mesurable. f et g sont deux fonctions non linéaires. $d(t)$ est une perturbation externe bornée, c.-à-d., $|d(t)| \leq D$. u et y sont l'entrée et la sortie du système, respectivement.

Remarque III.1 : Pour garantir la commandabilité du système, la fonction g doit être inversible, c.-à-d. $g(x, t) \neq 0, \forall t \in R, x \in R^n$.

Soit $x_d(t)$ la consigne désirée et $e(t)$ l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x - x_d(t) \quad (\text{III.2})$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit :

$$s(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (\text{III.3})$$

où λ est une constante positive. n est le degré relatif du système par rapport à la sortie $y(t)$. Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie $y(t)$ par rapport au temps, pour voir apparaître l'entrée u .

III.2.3.2. Condition d'existence du mode de glissement (attractivité)

L'étude de l'existence du mode de glissement est basée sur la deuxième méthode de Lyapunov dont une fonction définie positive est considérée comme suit :

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{III.4})$$

Afin de garantir l'attractivité de la surface $s(t, x) = 0$, il faut que la fonction \dot{V} doit être définie négative, qui peut être traduit mathématiquement par :

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (\text{III.5})$$

Cette condition signifie que les trajectoires du système convergent asymptotiquement vers la surface de glissement $s(t, x) = 0$ puis restent dans un voisinage de cette surface comme le présente la figure (III.2).

Remarque III.2 : Pour une convergence en temps fini, la condition (III.5) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité, donnée par :

$$s\dot{s} < -\eta|s| \quad (\text{III.6})$$

qui assure une convergence en temps fini $t_s \leq \frac{|s(0)|}{\eta}$ vers la surface $s(t, x) = 0$.

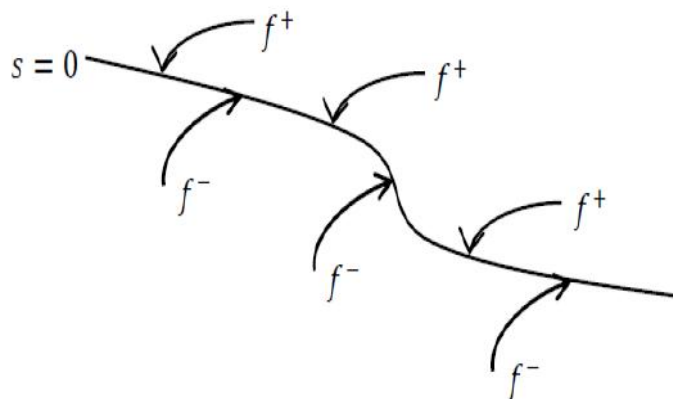


Figure III.2. Attractivité de la surface.

III.2.3.3. Synthèse de la loi de commande

La loi de commande par mode glissant est construite de façon à ce que les trajectoires du système pointent vers la surface de glissement $s = 0$ dans un premier lieu. En suite, maintenir ces

trajectoires sur cette surface en deuxième lieu. En conception, cette commande est composée de deux composantes : une discontinue u_{sw} , permet de ramener les trajectoires vers la surface de glissement et d'assurer la robustesse vis à vis des perturbations externes. La seconde, continue, dite la commande équivalente (u_{eq}), permet le maintien et le glissement le long de la surface.

La commande équivalente est déduite par les conditions d'invariance suivantes de la surface de glissement .

$$\begin{cases} s = 0 \\ \dot{s} = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Pour le système (III.1), la commande par mode glissant est conçue comme suit :

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (\text{III.8})$$

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (\text{III.9})$$

$$u_{sw} = -k \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \text{sgn}(s) \quad (\text{III.10})$$

où $k \geq D + \eta$ est une constante de conception.

III.2.4. Phénomène de broutement

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé réticence ou "chattering" en anglais. Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement (figure (III.3)). Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande.

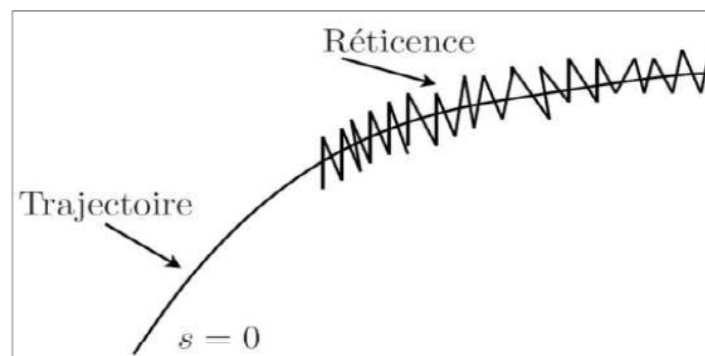


Figure III.3. Phénomène de broutement.

Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable) [25].

De nombreuses études ont été effectuées pour réduire ou éliminer ce phénomène. L'une des solutions envisagées consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, dans un voisinage de la surface, telle que la fonction saturation ou une fonction sigmoïde (par exemple $\tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right), \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{s}{\varepsilon}\right), \dots$). Le régime glissant qui en résulte n'est plus confiné dans la surface s , mais dans un proche voisinage de celui-ci. Bien que cela permette d'atténuer le phénomène de réticence, la précision par rapport à l'objectif fixé, la robustesse de la commande et le temps de réponse s'en trouvent dépréciés. La technique des modes glissants d'ordre supérieur permet de passer outre ce phénomène indésirable et aussi de pallier la condition sur le degré relatif, rencontrée par la CMG d'ordre un.

➤ Fonction Sat

Les amplitudes des ondulations peuvent être atténuées en remplaçant la fonction Signe par une fonction de saturation **Sat** caractérisée .

$$sat(s) = \begin{cases} \frac{s}{\varepsilon} & si \left| \frac{s}{\varepsilon} \right| \leq 1 \\ sgn(s) & si \left| \frac{s}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (III.11)$$

où $\varepsilon > 0$ est le largeur du seuil de la fonction de saturation choisi très petit.

➤ Fonction tangente hyperbolique

$$u(s) = \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) \quad (III.12)$$

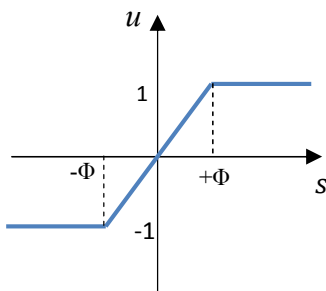


Figure III.4. Fonction Sat.

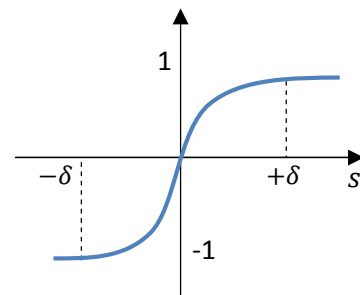


Figure III.5. Fonction tangente hyperbolique.

III.3. Description et modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

La configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau monophasé est illustrée par la figure (III.10). En effet, il est composé de:

- un panneau solaire qui génère un courant i_p ,
- un condensateur d'entrée C_i que filtre la tension de sortie du panneau v_p ,
- un convertisseur DC-DC de type boost qui sert à augmenter la tension de sortie du panneau et la recherche du PPM par le moyen de signal de commutation u_1 ,
- un condensateur de bus DC (C_{dc}),
- un onduleur monophasé en pont complet (comprenant quatre semi-conducteurs de puissance), avec une inductance de filtrage des harmoniques en courant L_g , qui convertit la tension DC au bornes du condensateur C_{dc} ($v_{C_{dc}}$) en une tension AC sinusoïdale e_g ,
- un transformateur d'isolement qui transforme la tension e_g en une tension de 220V.

L'ondeur est commandé par le signal de commutation u_2 pour que le courant de sortie i_g soit en phase avec la tension e_g et obtenir ainsi un facteur de puissance (FP) unitaire [26].

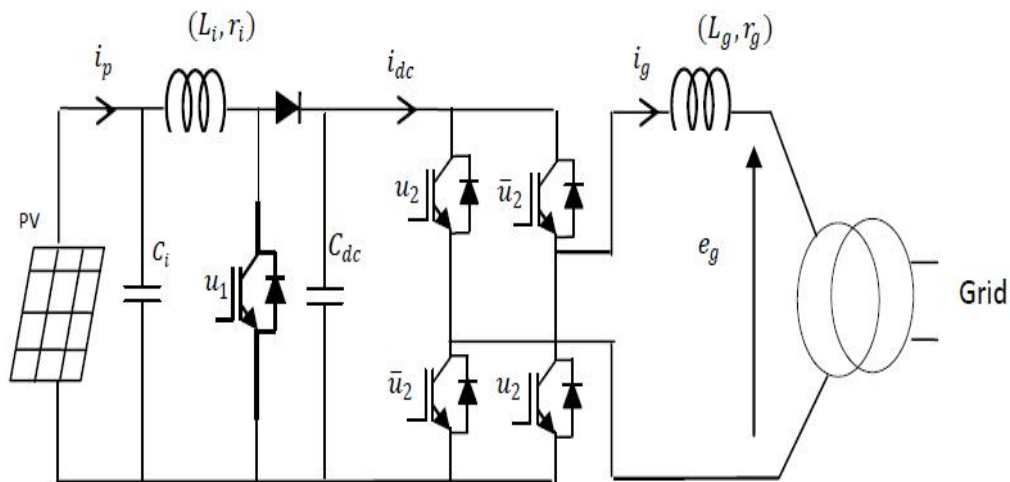


Figure III.6. Configuration d'un système pv connecté à un réseau monophasé via double étages.

Les entrées de commande u_1 et u_2 , sont des signaux PWM (modulation de largeur d'impulsion) prenant des valeurs dans l'ensemble $[0,1]$. Elles varient d'une période à l'autre et leurs variations peuvent déterminer les trajectoires des variables d'état des convertisseurs.

III.3.1. Modèle mathématique du système global

En appliquant les lois de Kirchoff, le modèle global du système pv connecté au réseau mono phasé via double étages est donné comme suit [26] :

$$C_i \dot{x}_1 = -x_2 + i_p \quad (\text{III.13})$$

$$L_i \dot{x}_2 = -(1 - u_1)x_3 - r_i x_2 + x_1 \quad (\text{III.14})$$

$$C_{dc} \dot{x}_3 = (1 - u_1)x_2 + (1 - 2u_2)x_4 \quad (\text{III.15})$$

$$L_g \dot{x}_4 = -(1 - 2u_2)x_3 - r_g x_4 - e_g \quad (\text{III.16})$$

où x_1, x_2, x_3, x_4 désignent respectivement les valeurs moyennes des variables $v_p, i_{C_i}, v_{C_{dc}}$ et i_g . r_i et r_g sont les résistances internes en série de l'inductance d'entrée L_i et du filtre de sortie L_g , respectivement.

III.4. Synthèse du contrôleur et analyse de la stabilité

L'objectif de la commande du système PV connecté au réseau monophasé décrit par les équations (III.13)-(III.16) est de :

- Forcer le panneau solaire à fournir sa puissance maximale.
- Obtenir un facteur de puissance unitaire avec une faible distorsion harmonique à la sortie.
- Assurer le réglage de la tension du bus continu.
- Assurer une stabilité globale du système en boucle fermée.

III.4.1. Commande MPPT

Dans cette section, l'objectif est de concevoir un contrôleur par mode glissant pour forcer la puissance générée, $p(w) = v_p * i_p$, à suivre précisément que possible son point optimal (p_{opt}, v_{opt}) quel que soient le rayonnement solaire et la température ambiante. Plus précisément, si la dérivée $y = \frac{dp}{dv_p}$ est mise égal à $y_{ref} = 0$, alors la puissance maximale est capturée. Alors le contrôleur doit ramener la dérivée y à zéro, en agissant sur le rapport cyclique u_1 du convertisseur boost. Au point optimal, on a:

$$\frac{dp}{dv_p} = i_p + v_p \frac{di_p}{dv_p} \quad (\text{III.17})$$

Pour réaliser ce contrôleur, on introduit l'erreur de poursuite e_1 définie par

$$e_1 = y - y_{ref} \quad (\text{III.18})$$

Sa dynamique est donnée par :

$$\dot{e}_1 = -\frac{AI_0}{C_i} \exp(Ax_1) (2 + Ax_1)(i_p - x_2), \quad A = 1/nV_T. \quad (\text{III.19})$$

La deuxième dérivée de l'erreur e_1 est donnée par:

$$\ddot{e}_1 = -\frac{AI_{sat}}{C_i} \left[\frac{A}{C_i} (3 + Ax_1)(i_p - x_2)^2 + (2 + Ax_1) \left(\frac{di_p}{dv_p} - x_2 \right) \right] \quad (\text{III.20})$$

En utilisant (III.14), \ddot{e}_1 peut être réécrite comme suit :

$$\ddot{e}_1 = \Delta_0 + \Delta_1 u_1 \quad (\text{III.21})$$

avec

$$\Delta_0 = -\frac{AI_0}{C_i} \exp(Ax_1) \left[\frac{A}{C_i} (3 + Ax_1)(i_p - x_2)^2 + (2 + Ax_1) \left(\frac{di_p}{dt} - \frac{1}{L_i} (-r_i x_2 + x_1 - x_3) \right) \right] \quad (\text{III.22})$$

et

$$\Delta_1 = \frac{AI_0}{L_i C_i} \exp(Ax_1) (2 + Ax_1) x_3 \quad (\text{III.23})$$

L'équation (III.21) montre que le degré relatif de l'erreur e_1 par rapport à l'entrée de commande u_1 est égal à deux. Alors la surface de glissement S_1 est choisie comme suit :

$$S_1 = \dot{e} + \lambda_1 e_1 \quad (\text{III.24})$$

où λ_1 est un paramètre de conception positif.

La dynamique de la surface de glissement est donnée comme suit :

$$\dot{S}_1 = \ddot{e} + \lambda_1 \dot{e}_1 \quad (\text{III.25})$$

On choisit la loi de commande comme suit :

$$u_1 = \Delta_1^{-1} (-k_1 \text{sgn}(S_1) - \lambda_1 \dot{e}_1 - \Delta_0 - K_1 S_1) \quad (\text{III.26})$$

Afin de démontrer la stabilité, on adopte la fonction candidate de Lyapunov suivante:

$$V_1 = \frac{1}{2}S_1^2 \quad (\text{III.27})$$

On dérive V_1 par rapport au temps, on obtient:

$$\dot{V}_1 = S_1\dot{S}_1 = S_1(\ddot{e} + \lambda_1\dot{e}_1) \quad (\text{III.28})$$

On utilise (III.19), (III.21) et (III.26), on a:

$$\dot{V}_1 = -k_1|S_1| - K_1S_1^2 \quad (\text{III.29})$$

De l'inégalité (III.29), on déduit que \dot{V}_1 est définie négative. Ce qui implique que l'équilibre $S_1 = 0$ est asymptotiquement stable.

III.4.2. Contrôle de facteur de puissance dans le réseau

L'objectif de mettre PF unitaire signifie que le courant de réseau i_g doit être sinusoïdal et en phase avec la tension d'alimentation alternative du réseau e_g . Cela assure l'atténuation des harmoniques du courant. Pour atteindre cet objectif, on propose un régulateur par mode glissant qui force le courant x_4 à suivre un signal de référence x_4^* donné comme suit:

$$x_4^* = \beta e_g \quad (\text{III.30})$$

$$e_g = V_m \sin(2\pi ft) \quad (\text{III.31})$$

où β est un gain sera donné par la suite.

Pour concevoir le régulateur par mode glissant, on commence par définir l'erreur de poursuite e_2 comme suit :

$$e_2 = x_4 - x_4^* \quad (\text{III.32})$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_4 - \dot{x}_4^* = \frac{-(1-2u_2)x_3 - r_g x_4 - e_g}{L_g} - \dot{x}_4^* \quad (\text{III.33})$$

L'équation (III.32) montre que le degré relatif de l'erreur e_2 par rapport à l'entrée de commande u_2 est égal à un. Donc, on définit la surface de glissement S_2 comme suit :

$$S_2 = e_2 \quad (\text{III.34})$$

où λ_2 est un paramètre de conception positif.

Par l'utilisation de la technique du mode glissant, l'objectif du contrôle devient à ramener le système vers est la surface de glissement S_2 puis rester le long sur elle. Pour accomplir ce but, la loi de commande est donnée par la formule suivante:

$$u_2 = \frac{1}{2x_3} \left[(-k_2 \text{sgn}(S_2)) + (L_g \dot{x}_4^*) + r_g x_4 + e_g + x_3 - K_2 S_2 \right] \quad (\text{III.35})$$

où K_2 est une constante de conception.

Pour analyser la stabilité du système en boucle fermée avec le contrôleur u_2 , on définit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_2 = \frac{1}{2} S_2^2 \quad (\text{III.36})$$

On dérive (III.6) par rapport au temps, et on utilise (III.33) et (III.35), on a :

$$\dot{V}_2 = S_2 \dot{S}_2 = -k_2 |S_2| - K_2 S_2^2 \quad (\text{III.37})$$

L'équation (III.37) montre que la fonction \dot{V}_2 est une fonction définie négative. Par conséquent, la stabilité asymptotique est garantie, l'erreur e_2 tend vers zéro, et le PF converge vers un.

III.4.3. Régulation de la tension du bus continu

On rappelle que le but de la régulation de la tension du bus continu est de garantir un bon fonctionnement de la commande MPPT. Cette régulation consiste à concevoir une loi de commande PI pour le gain β utilisé dans (III.30) de telle sorte que la tension x_3 soit régulée à une référence donnée $x_3^* > 0$. Cette loi de commande est donnée comme suit :

$$\beta = K_p z + \frac{1}{k_i} \int z dz \quad (\text{III.38})$$

$$z = x_3 - x_3^* \quad (\text{III.39})$$

En conclusion, le contrôleur proposé garantit un fonctionnement optimal du GPV au PPM, une énergie injectée dans le réseau avec un $FP=1$, et une stabilité globale asymptotique du système en boucle fermée. Le schéma de conception du contrôleur est illustré par la figure (III.7)

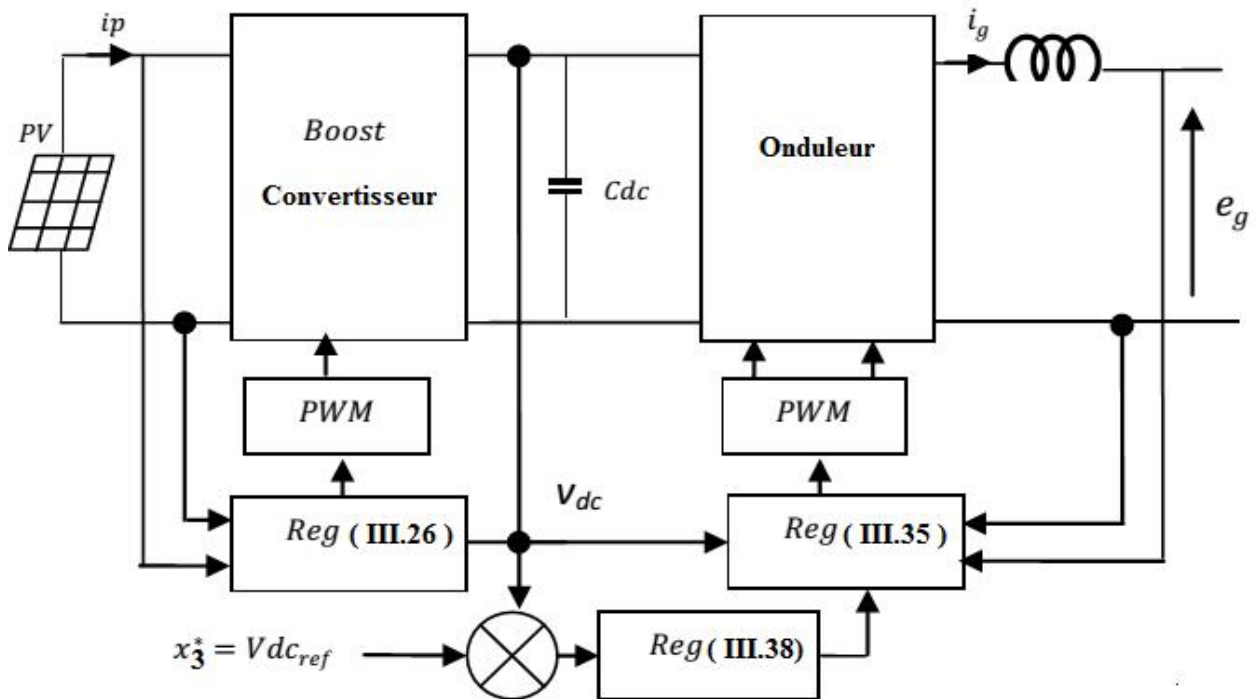


Figure III.7. Schéma du contrôleur proposé.

III.5. Simulation et résultats

Dans cette section, on va simuler, sous environnement Matlab, un système PV connecté à un réseau monophasé via double étages sous l'action du contrôleur proposé. Les caractéristiques du système contrôlé sont données par le tableau (III.1).

	Symbole	Valeur
Générateur PV	Modèle PV	SM55
Convertisseur Boost	C_i	470 (uF)
	L_i	3.5 (mH)
	r_i	0.65(Ω)
Condensateur du bus continu	C_{dc}	4.7 (mF)
Inductance de filtrage	L_g	2.2 (mH)
	r_g	0.47(Ω)
Réseau	Tension AC (Vm)	22 (V)
	Fréquence des lignes (f)	50 (Hz)
	Gain du transformateur	22:220

Tableau III.1. Paramètres du système.

Les caractéristiques du module SM55 sont données par le tableau I.2 du chapitre I. Les paramètres de conception du contrôleur sont montrés par le tableau (III.2).

Paramètres	Symbole	Valeur
Paramètre de conception	λ_1	10
	k_1	10^{-3}
	K_1	$3 \cdot 10^2$
	k_2	10^{-3}
	K_2	$3 \cdot 10^2$
Régulateur PI	k_p	0.02
	k_i	5
Tension de bus DC désirée	x_3^*	30 (V)

Tableau III.2. Paramètres du contrôleur.

Les résultats de simulation obtenus dans les conditions climatiques standards, c-à-d, une température de 25°C et une irradiation de 1Kw/m², sont illustrés par les figures (III.8)-(III.11).

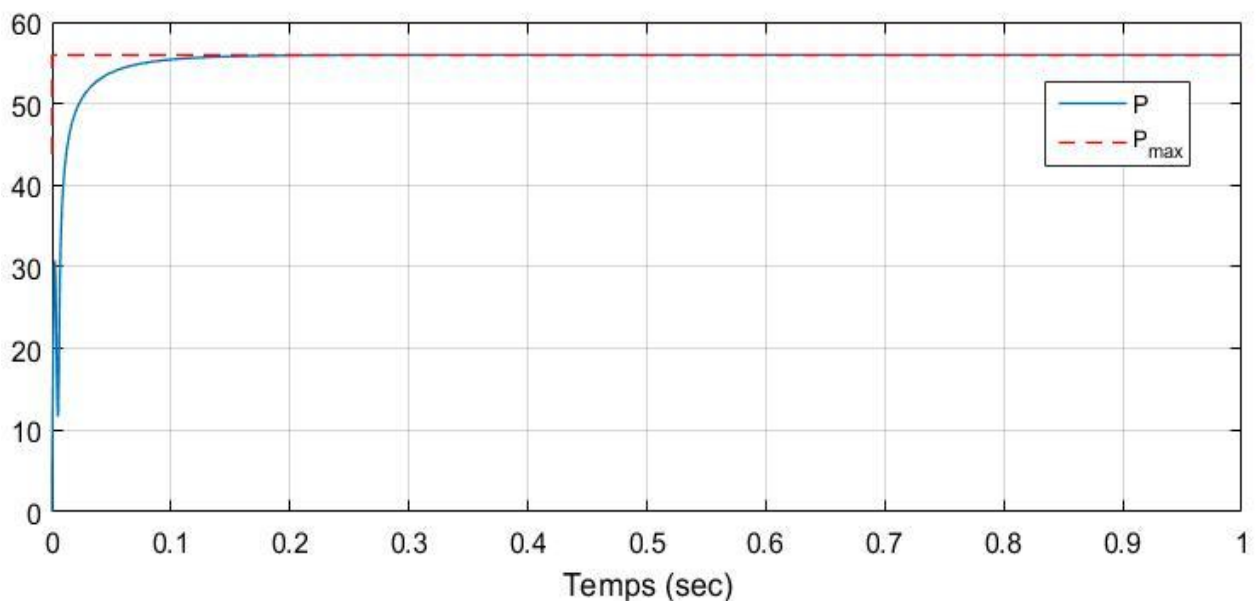


Figure III.8. Puissance générée par le GPV $P(w)$.

De la figure (III.8), on remarque que la puissance fournie par le GPV converge rapidement vers la puissance maximale. La figure (III.9) montre que la tension du bus continu atteint la tension désirée (30V), qui garantit l'extraction maximale de la puissance disponible du module SM55, mais avec des faibles oscillations.

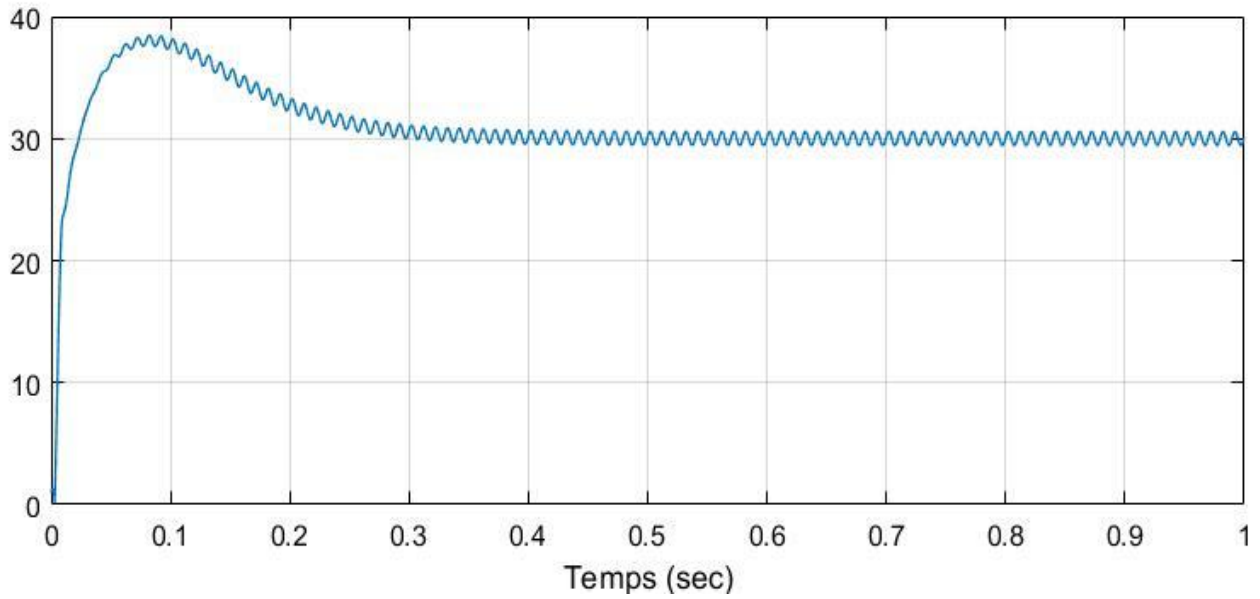


Figure III.9. Tension du bus continu V_{dc} (V).

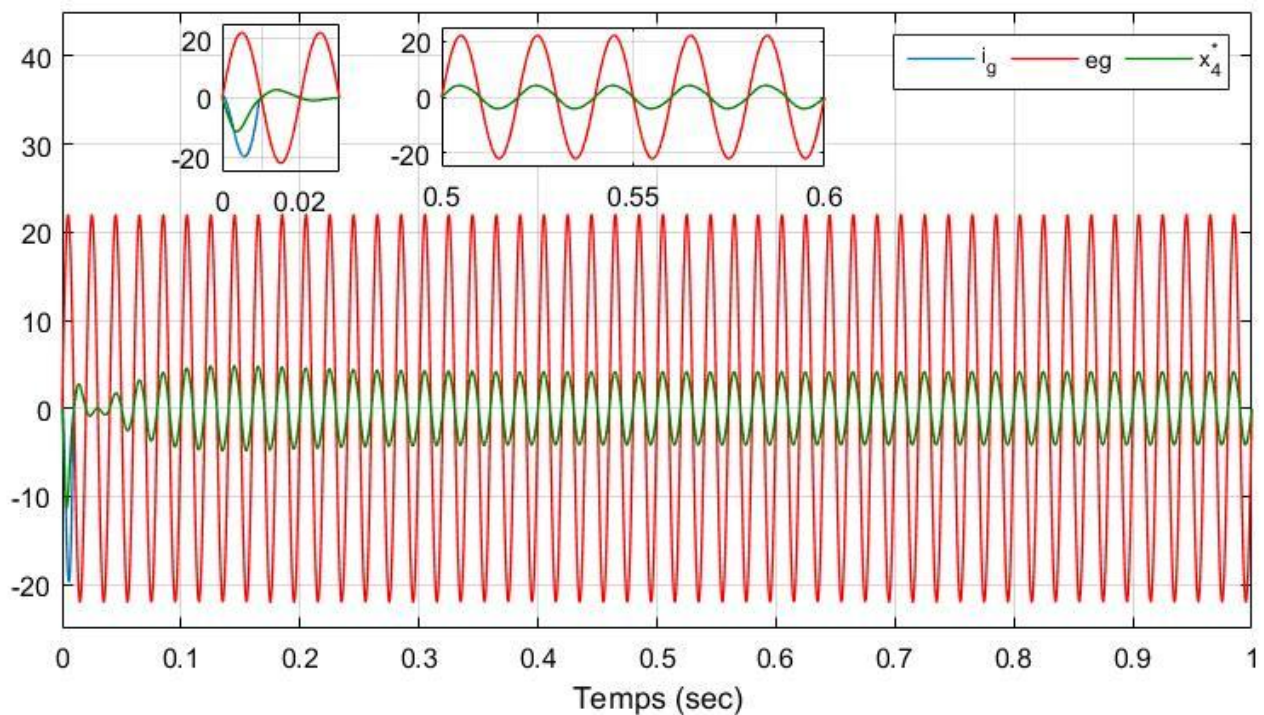


Figure III.10. Courant de réseau i_g (A).

La figure (III.10) montre que le courant de réseau i_g est quasi sinusoïdal en phase avec la tension du réseau e_g , ce qui permet d'obtenir un FP quasi unitaire. Enfin, les figures (III.11)-(III.13), illustrent, respectivement, l'évolution des signaux de commande u_1 , u_2 et β . On peut voir que les signaux oscillent autour de valeurs constantes. Ces oscillations sont inévitables à chaque fois pour corriger la puissance maximale fournie, le facteur de puissance est la tension du bus continu.

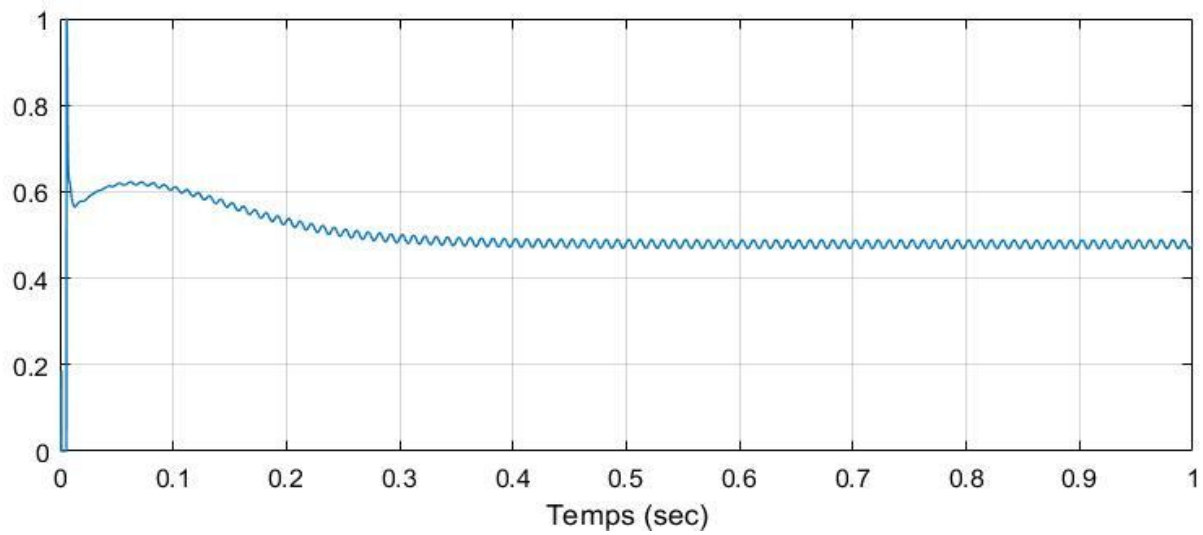


Figure III.11. Signal de control u_1

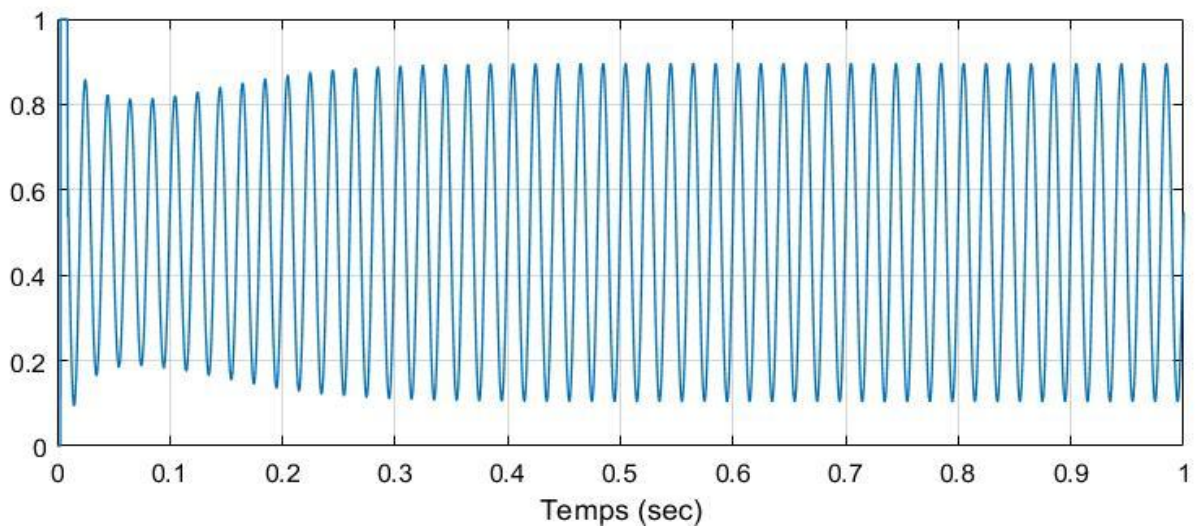


Figure III.12. Signal de control u_2 .

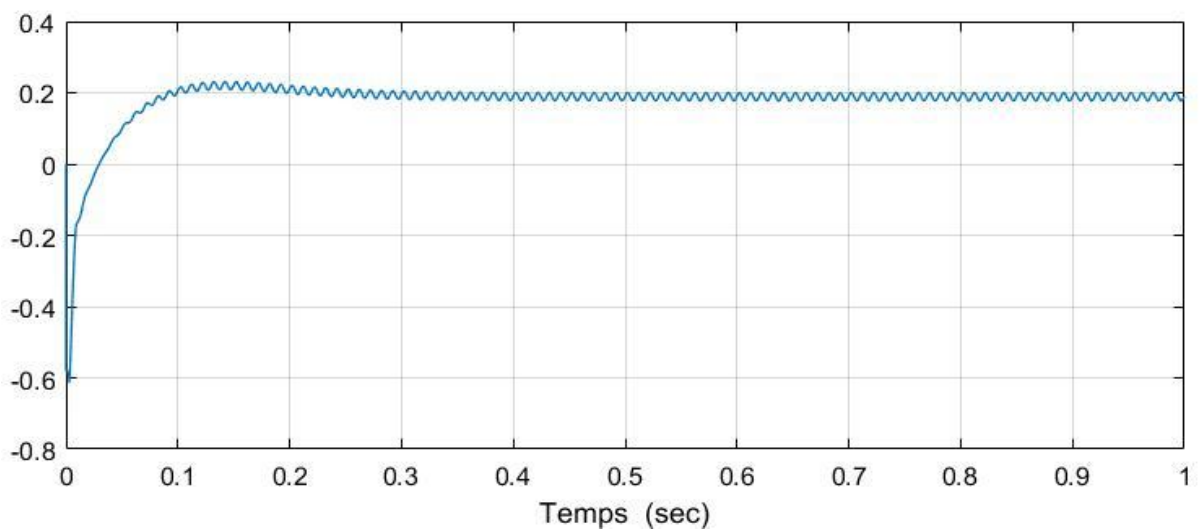


Figure III.13. Signal de control β .

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une stratégie de contrôle d'un système PV connecté à un réseau monophasé via double étages d'adaptation. Le premier étage d'adaptation est un convertisseur DC/DC de type boost. Cependant le deuxième est un convertisseur DC/AC suivi d'un filtre passif de type L et un transformateur d'isolement. Le contrôleur proposé dans cette stratégie est composé de trois lois de commande. La première loi de commande par mode glissant agit sur le rapport cyclique du convertisseur boost afin de forcer le GPV à fonctionner autour de son PPM. La deuxième est une loi de commande par mode glissant fait varier le rapport cyclique de l'onduleur de telle sorte que l'énergie injectée dans le réseau a un facteur de puissance unitaire. La dernière composante est s'agit d'une loi de commande PI employée pour régler la tension du bus continu à une tension désirée. Les résultats de simulation montrent de bonne performance de l'approche présentée.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à commander un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé via double étages par l'approche du mode glissant.

Pour atteindre cet objectif, on a commencé par présenter des généralités sur les panneaux photovoltaïques. Le principe de fonctionnement de ces panneaux consiste à convertir l'énergie solaire absorbée par les cellules PV en une énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. L'énergie électrique délivrée est dépendue de nombre de cellules associés en série/parallèle. Pour que cette énergie soit maximale pour n'importe quelle condition climatique, l'introduction des convertisseurs statiques et l'utilisation des algorithmes MPPT s'avèrent nécessaire.

En second lieu, on a présenté les échanges électriques effectués dans les réseaux électriques. L'échange électrique commence par la production de l'électricité par les centrales électriques. Ensuite l'électricité est transportée vers les consommateurs par le moyen de plusieurs postes et lignes électriques. La qualité de l'énergie électrique injectée dans le réseau est dépendue de la présence des harmoniques électriques, notamment en courant, causée par les charges non linéaires. La quantité des harmoniques peut être mesurée par plusieurs facteurs comme le taux de distorsion, facteur de puissance, facteur de crête et le spectre des harmoniques. Pour atténuer l'effet de ce phénomène, plusieurs solutions sont proposées dont les plus utilisées sont les filtres passifs et actifs, et la technique de commande MLI.

En troisième chapitre, on a présenté un contrôleur pour commander un système PV connecté à un réseau monophasé à travers un convertisseur boost suivi d'un convertisseur DC/AC. Le contrôleur proposé est composé de trois lois de commande. La première loi de commande par mode glissant agit sur le rapport cyclique du convertisseur boost afin de forcer le GPV à fonctionner autour de son PPM. La deuxième est une loi de commande par mode glissant fait varier le rapport cyclique de l'onduleur de telle sorte que l'énergie injectée dans le réseau a un facteur de puissance unitaire. La dernière composante est s'agit d'une loi de commande PI employée pour régler la tension du bus continu à une tension désirée. Les résultats de simulation montrent de bonne performance du contrôleur présenté.

Comme perspectives envisagées, plusieurs voies sont possibles pour l'extension du présent travail :

- Commande par mode glissant d'un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé via double étages à base d'un filtre LCL.

- Commande par mode glissant d'un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé via un seul étage.
- Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïque raccordés aux réseaux triphasé.

Bibliographie

-
- [1] ZNAKHI Asma. Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT , mémoire master académique, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen 2016.
- [2] A. Labour et M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, Dunod, Paris 2006.
- [3] CHEBANA Abdelkrim. Control d'un système photovoltaïque connecté au réseau, mémoire master, Université Mohamed Khider Biskra 2014.
- [4] AOUN Nouar. Evaluation et validation de la performance des modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque, thèse de doctorat, université des frères Mentouri Constantine 2016.
- [5] CHOUIKHI Wassila Faiza. Réalisation d'une commande buck-boost pour PV, mémoire master académique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen 2018.
- [6] HAKOUMI Ahmed et BENAMAR Abdeldjalil. Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue, mémoire master, Université Ahmed Draia Adrar 2019.
- [7] BENSACI Wafa , «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [8] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV, université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [9] Ali Chermitti, Omar Boukli-Hacene, Samir Mouhadjer, —Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink”, International Journal of Computer Applications(0975 – 8887), Volume 53– No.14, September 2012.
- [10] M.R. Sourov, U.T. Ahmed and M.G. Rabbani, ‘A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter’, IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [11] Cédric CABAL — Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, thèse de doctorat, université de Toulouse, LAAS, décembre 2008.
- [12] B. Ankaiah and J. Nageswararao, ‘Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current MPPT Method’, International Journal of Engineering Sciences Invention, Vol. 2, N°2, pp. 45 - 50, 2013.
- [13] [http :// www.ac-noumea.nc/jules-garnier/phyapp/solaire/.../cours_photo](http://www.ac-noumea.nc/jules-garnier/phyapp/solaire/.../cours_photo).
- [14] Gamni Abdelkader «*étude et simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau (étude de cas de réseau d'Adrar)* » mémoire de master Uni-Adrar -2012.

- [15] <http://www.cadjds.org> Journal des Sciences 2009.
- [16] Dr. Aouzellag Lahaçani Narimen « réseaux électriques » polycopie de cour 3^{ème} année licence, université de Bejaia.
- [17] http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_électrique.
- [18] http://www.ac-noumea.nc/jules-garnier/phyapp/solaire/.../cours_photo.
- [19] Sidi Salah Mokhtar « Etude comparative entre les moyens de compensation de l'énergie réactive » mémoire de master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2017.
- [21] https://fr.electricalinstallation.org/frwiki/Les_solutions_pour_att%C3%A9nuer_les_harmoniques.
- [22] L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero, V. Salas. Over view of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems.
- [23] M. BERROUBI Abdennoure. Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck et Boost intégrés dans un système photovoltaïque, mémoire master, université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA 2016
- [24] SAHRAOUI Mebarek. Commandes non linéaires de la machine asynchrone, mémoire master, université de M'SILA 2013.
- [25] Deghboudj Imen. Commande DES SYSTEMES des système non linéaire par mode glissant d'ordre supérieur, diplôme magistère, université CONSTANTINE 1 2013.
- [26] Ouadia El Maguiri, Abdelmajid Farchi, El Mustapha Louragli. Sliding Mode Control Approach for Maximum Power Tracking in Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems, University Hassan First, Settat, Morocco.

Résumé

La conversion de l'énergie solaire en une énergie photovoltaïque est réalisée par des panneaux PV dont l'élément unitaire est la cellule PV. L'association de plusieurs cellules en série, parallèle ou série/parallèle permet de fabriquer un module PV et d'augmenter la puissance maximale générée, pour obtenir cette puissance en utilise des convertisseurs statiques et des algorithmes MPPT. La production de l'électricité est assurée par les centrales électriques et le transport de l'électricité du centre de production aux consommateurs est réalisé par le moyen de plusieurs postes et lignes électriques. La qualité de l'énergie électrique injectée dans le réseau est dépendue de la présence des harmoniques électriques. Le 1^{er} étage d'adaptation d'un système PV connecté à un réseau monophasé via double étages d'adaptation c'est un convertisseur DC/DC de type boost et le 2^{ème} est un convertisseur DC/AC suivi d'un filtre passif de type L et un transformateur d'isolement, le contrôleur proposé est composé de trois lois de commande une loi de commande par mode glissant agit sur le rapport cyclique du convertisseur boost, une loi de commande par mode glissant fait varier le rapport cyclique de l'onduleur et une loi de commande PI employée pour régler la tension du bus continu à une tension désirée.

Abstract

The conversion of solar energy into photovoltaic energy is carried out by PV panels, the unitary element of which is the PV cell. The combination of several cells in series, parallel or series/parallel makes it possible to manufacture a PV module and to increase the maximum power generated. This power is obtained by using static converters and MPPT algorithms. Electricity is produced by power plants and the transport of electricity from the production centre to the consumers is carried out by means of several substations and power lines. The quality of the electrical energy injected into the network is dependent on the presence of electrical harmonics. The 1st adaptation stage of a PV system connected to a single-phase grid via double adaptation stages is a DC/DC converter of the boost type and the 2nd is a DC/AC converter followed by a passive filter of type L and an isolation transformer. The proposed controller is composed of three control laws a sliding mode control law acts on the duty cycle of the boost converter, a sliding mode control law varies the duty cycle of the inverter and a PI control law used to adjust the DC bus voltage to a desired voltage.