

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de L'ingéniorat

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Électronique

Spécialité : Automatique et Système

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

CONTRIBUTION À LA COMMANDE ET LA RÉGULATION D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Présenté par : Merabet Abdelkarim

Encadrant : BEDOUD Khoulood

MRA

URMA/CRTI

Jury de Soutenance :

| | | | |
|---------------------|-------|-----------|-----------|
| Dr. BENMOUSSA SAMIR | M.C.A | UBMA | Président |
| Dr. BEDOUD Khoulood | M.R.A | URMA/CRTI | Encadrant |
| Dr. Ait Izem Tarek | M.C.B | UBMA | Examineur |

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à la directrice de ce mémoire, **Madame Khouloud BEDOUD**.

Je la remercie de m'avoir encadrée, orientée, aidée et conseillée.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes frères, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole
de beauté, de fierté, de sagesse et de
patience.*

*A ceux qui sont la source de mon
inspiration et de mon courage, à qui je
dois de l'amour et la reconnaissance.*

Mes chers Parents.

Mes Frères.

*Ma Famille et tous mes Proches.
Et à tous qui me connaît et compte sur
moi...*

Tous mes Amis(es)

SOMMAIRE

SOMMAIRE

| | |
|-----------------------------|---|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
|-----------------------------|---|

CHAPITRE -1- Etat de l'art sur l'énergie solaire

| | |
|--|----|
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Potentiel énergétique de l'énergie solaire..... | 3 |
| 1.3 Potentiel de l'énergie solaire en algérie | 4 |
| 1.4 Énergie solaire..... | 5 |
| 1.4.1 Énergie solaire thermique | 5 |
| 1.4.2 Énergie photovoltaïque | 5 |
| 1.5 Les rayons solaire..... | 6 |
| 1.5.1 Les rayons direct..... | 6 |
| 1.5.2 Les rayons diffus | 6 |
| 1.5.3 Les rayons réfléchi..... | 6 |
| 1.5.4 Les rayons global..... | 7 |
| 1.6 Panneau solaire..... | 7 |
| 1.6.1 Différents types des cellules solaires..... | 8 |
| ■ Cellule mono- cristalline | 8 |
| ■ Cellule poly-cristalline | 8 |
| ■ Cellule amorphe | 9 |
| 1.7 Systèmes de conversion photovoltaïques (PV)..... | 10 |
| 1.8 Centrale électrique solaire..... | 11 |
| 1.8.1 Centrale thermique | 11 |
| 1.8.2 Centrale photovoltaïque | 11 |
| 1.9 Conclusion | 12 |

CHAPIRE -2-Modélisation et Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

| | |
|---|----|
| 2.1 Introduction | 13 |
| 2.2 Modélisation mathématique d'un générateur photovoltaïque..... | 13 |
| 2.3 Zones caractéristiques PV du courant en fonction de la tension..... | 15 |
| 2.4 Rendement énergétique..... | 17 |
| 2.5 Facteur de forme..... | 17 |
| 2.6 Association des cellules photovoltaïques | 17 |
| 2.6.1 Association en série | 17 |
| 2.6.2 Association en parallèle | 18 |
| 2.6.3 Association hybride (en série et en parallèle) | 18 |
| 2.7 Etude de l'effet de l'éclairement et de la température..... | 19 |
| 2.7.1 Influence de l'Éclairement | 19 |
| 2.7.2 Influence de la température..... | 21 |
| 2.8 Conclusion | 23 |

CHAPITRE -3- Modélisation et commande des convertisseurs statiques

| | |
|---|----|
| 3.1 Introduction..... | 24 |
| 3.2 Modélisation du convertisseur Boost | 24 |
| 3.3 Modélisation et commande de l'onduleur triphasé | 26 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 3.4 Simulation et discussion | 30 |
| 3.6 Conclusion | 34 |

CHAPITRE -4- Commande MPPT

| | |
|---|----|
| 4.1 Introduction | 35 |
| 4.2 Principe de la commande MPPT | 35 |
| 4.2.1. Commande Perturbation and Observation (P&O)..... | 37 |
| 4.2.2 Commande MPPT floue | 39 |
| 4.3 Résulta de simulation..... | 42 |
| 4.4 Conclusion | 47 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 48 |
| REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES..... | 49 |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement la demande croissante d'énergie électrique dans le monde d'aujourd'hui pose un sérieux problème, car les besoins énergétiques sont principalement couverts par l'utilisation de sources d'énergie fossiles. Par conséquent, le monde concentre ses efforts et ses recherches sur le développement de nouvelles sources d'énergie inépuisables et propres. L'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque, l'énergie géothermique, l'énergie marine et l'énergie hydraulique sont les sources d'énergie renouvelables les plus utilisées. L'énergie solaire est aujourd'hui une réalité qui peut être exploitée grâce aux systèmes photovoltaïques, qui transforment le rayonnement solaire en énergie électrique. Ils sont simples à mettre en place. De plus, la majorité des composants peuvent être réutilisés ou recyclés. Ces systèmes, souvent appelés sources d'énergie silencieuses, peuvent être utilisés de la manière suivante :

- L'alimentation des systèmes de télécommunication.
- L'alimentation domestique des habitations isolées
- Les systèmes de pompage.
- Les centrales électriques hybrides et l'injection dans les réseaux de distribution d'électricité.
- Source d'énergie silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.

Le coût élevé des systèmes photovoltaïques, leur mise en œuvre, les variations imprévisibles de l'énergie solaire dû aux perturbations atmosphériques et le coût élevé de l'électricité sont autant de points négatifs.

Les besoins énergétiques de l'Algérie sont actuellement couverts principalement par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, qui est la principale source d'énergie ; les autres sources d'énergie ne sont utilisées que lorsque le gaz n'est pas disponible.

L'objectif de la recherche présentée dans ce mémoire de fin d'étude est de contribuer à la modélisation et au commande d'un système de conversion photovoltaïque afin d'assurer un apport optimal d'énergie au réseau. La commande P&O aussi la commande floue, ont été développées et analysées d'un système de conversion.

Introduction générale

Le contenu de ce mémoire s'articule sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente un état de l'art sur l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire et les différents types de cellules. Le processus de conversion photovoltaïque et certaines centrales solaires seront présentés.
- Le deuxième chapitre présente la modélisation de panneau photovoltaïque, ainsi qu'une analyse de l'effets de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques de panneau.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du convertisseur boost, ainsi que, la modélisation et la commande SVPWM de l'onduleur triphasé. A la fin, on exposera les résultats de simulation.
- Dans le quatrième chapitre, expose dans sa première partie le principe de la commande MPPT de type P&O. Puis, un autre type de commande dite intelligente MPPT-floue sera développé et discuté.

Enfin, une conclusion générale sur le travail accompli est présentée.

CHAPITRE

-1-

Etat de l'art sur l'énergie solaire

1.1 Introduction

Une grande partie de l'électricité de nos jours est produite grâce à la combustion des carburants fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) ou de carburants nucléaires. D'après les données de British Petroleum (BP), le charbon s'est accaparé 0.7% supplémentaire des parts du marché de l'énergie, alors que les statistiques du département Américain de l'énergie publiées en 2007 montrent qu'avec des émissions de 11.36 milliards de tonnes (Gt) de dioxyde de carbone (CO₂), ce charbon est devenu en 2005 la première source de pollution devant le pétrole à 11 Gt, alors que le gaz naturel émet 5.84 Gt [1].

A cause des problèmes de pollution, l'utilisation des énergie renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. Grâce à leur nature propre dite aussi énergie verte. Toute fois, parmi les systèmes de conversion d'énergie les plus utilisés nous avons: les systèmes éoliens et photovoltaïques, par ailleurs, en Algérie les systèmes photovoltaïque sont largement utilisés et cela grâce au avantages suivantes :

- Inépuisable et non polluante.
- Les matériaux sont recyclables qui composent les panneaux solaires.
- Le panneau solaire photovoltaïque contribue à l'évolution des consciences vers la préservation de la nature.
- Un délai de garantis de 25 ans et il et peuvent fonctionner jusqu'à 40 ans.

- Les systèmes de panneaux solaires photovoltaïques simples et rapides à installer.

1.2 Potentiel énergétique de l'énergie solaire

La quantité d'énergie reçue par la Terre est considérable. Chaque année, ce sont 1.070.000 pétawatts-heures (PWh, soit 10^{15} Wh) que reçoit la Terre, soit plus de 8.000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle (133 PWh en 2005) [2]. Ainsi, l'utilisation de seulement 0,01 % de cette énergie suffirait à répondre aux besoins énergétiques de la planète.

En 2008, cependant, l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique) ne représentait que 0,1 % de la consommation énergétique mondiale. L'un des défis au développement de cette énergie est sa production intermittente [3], pour celle l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie est une solution nécessaire pour assurer la continuité de service. L'énergie solaire, au sens large, englobe l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, une partie de l'énergie marine et la biomasse (bois énergie, biogaz, biocarburant) car elles sont toutes générées par le soleil par transfert de chaleur ou photosynthèse. L'utilisation de l'énergie solaire est ici plus essentielle, notamment à travers la biomasse, qui est également facilement stockable.

1.3 Potentiel de l'énergie solaire en Algérie

Vue sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud [4].

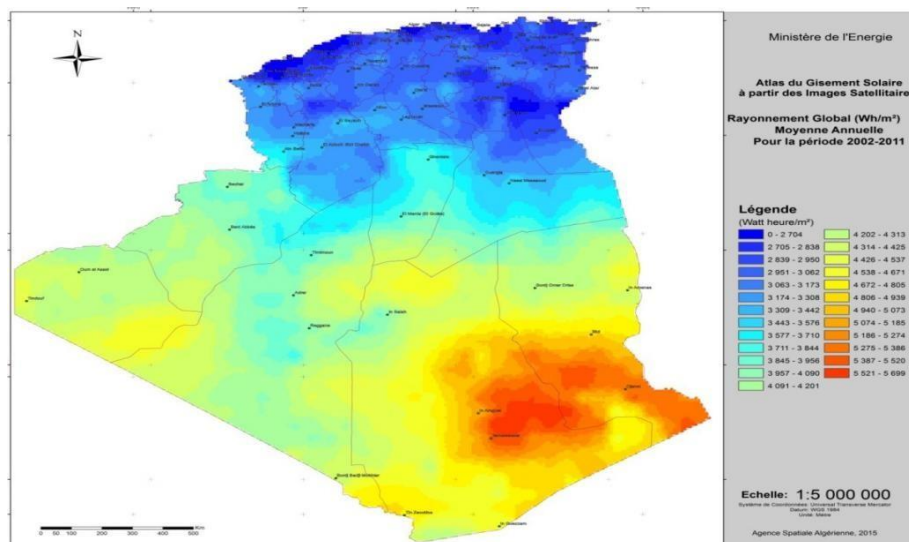


Figure 1.1 Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [4].

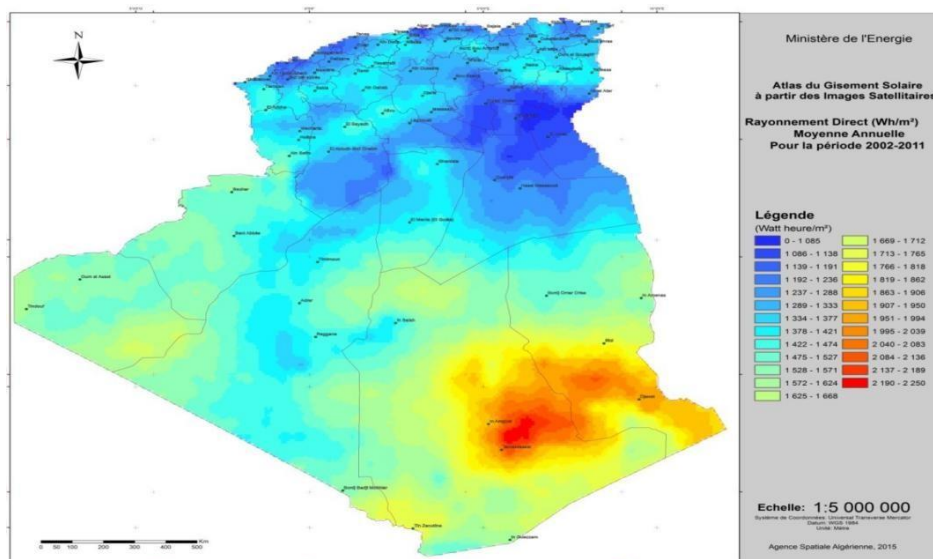


Figure 1.2 Carte de l'Irradiation Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [4].

1.4 Énergie solaire

Il existe deux sortes d'applications de l'énergie solaire :

- l'énergie solaire thermique: utilisation de la chaleur transmise par rayonnement ;
- l'énergie solaire photovoltaïque: utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.

1.4.1 Énergie solaire thermique

L'énergie thermique solaire est reconnue depuis longtemps et est utilisée pour chauffer et sécher des matériaux en les exposant au soleil.

1.4.2 Énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique générée par des panneaux solaires photovoltaïques ou des centrales électriques à partir du rayonnement solaire. L'effet photoélectrique est utilisé pour générer un courant électrique dans l'énergie photovoltaïque. Un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie pendant son fonctionnement (équivalent primaire) que ce qui a été consommé pour le créer, selon la technologie [5].

1.5 Les rayons solaire

Le Soleil émet en permanence un double rayonnement : électromagnétique et corpusculaire.

- Le rayonnement électromagnétique nous offre de la lumière et de la chaleur, mais elle émet également des rayonnements invisibles nuisibles, comme les rayons UV.
- Le rayonnement corpusculaire se compose de particules chargées (ions et électrons).

Le rayonnement électromagnétique solaire est le phénomène de l'énergie qui s'échappant du soleil à la vitesse de la lumière dans un mouvement ondulatoire. Les différents types de rayonnement peuvent être classés en fonction de leur énergie, de leur longueur d'onde ou de leur fréquence (nombre d'ondes par seconde) [6].

Les différents types de rayonnement solaire :

1.5.1 Les rayons direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles émis directement par le disque solaire, non pas par l'atmosphère.

1.5.2 Les rayons diffus

Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyromètre dont l'écran masque le soleil.

1.5.3 Les rayons réfléchi

C'est la partie du rayonnement solaire réfléchi par le sol, et ce rayonnement dépend directement de la nature de la terre (nuage, sable...).

Il est défini par le coefficient d'Albédo, qui est propre à la nature du lieu.

1.5.4 Les rayons global

La combinaison des trois composantes directe, diffuse et réfléchi donne un plan recevant le rayonnement global du sol.

Un pyromètre placé horizontalement à l'endroit concerné dans les stations météorologiques mesure le rayonnement global horizontal. La figure 1.3 présente les rayons solaire.

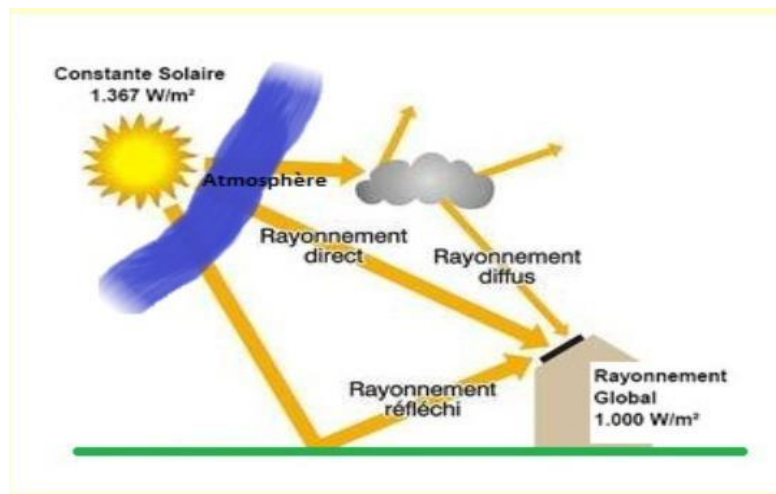


Figure 1.3 Les rayons solaire [3].

1.6 Panneau solaire

Becquerel, un physicien français, a mis au point l'effet photovoltaïque en 1839. Les panneaux solaires permettent de capter les rayons du soleil, puis de les convertir en énergie grâce à des cellules. Les cellules sont reliées les unes aux autres et créent le module solaire pour obtenir suffisamment d'énergie. La connexion des panneaux solaires crée un générateur solaire.

La figure 1.4 présente un panneau solaire.



Figure 1.4 Panneau solaire

1.6.1 Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules solaires :

- **Cellule mono- cristalline**

La cellule monocristalline qui se rapproche le plus du modèle théorique : cette cellule est constituée d'un monocristal qui a été séparé en deux couches. Les cellules monocristallines peuvent permettre des rendements élevés de 15 à 22 %.

- **Cellule poly-cristalline**

Une agglomération de cristaux constitue les cellules polycristallines. Qui sont aussi formées par le sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et donc diversifiés. Leur rendement est de 13 % sur le terrain et peut atteindre 20 % en laboratoire. La figures 1.5 démontre la différence entre les cellules mono et poly-cristallin

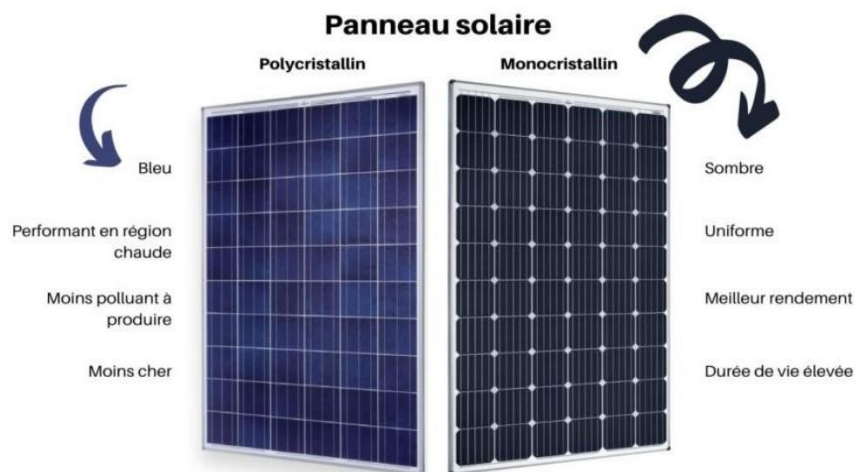


Figure 1.5 La différence entre les deux types Polycristallin et Monocrystallin

■ Cellule amorphe

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium Cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire) [8]. les différentes éléments sont présentés par la figure ci dessous

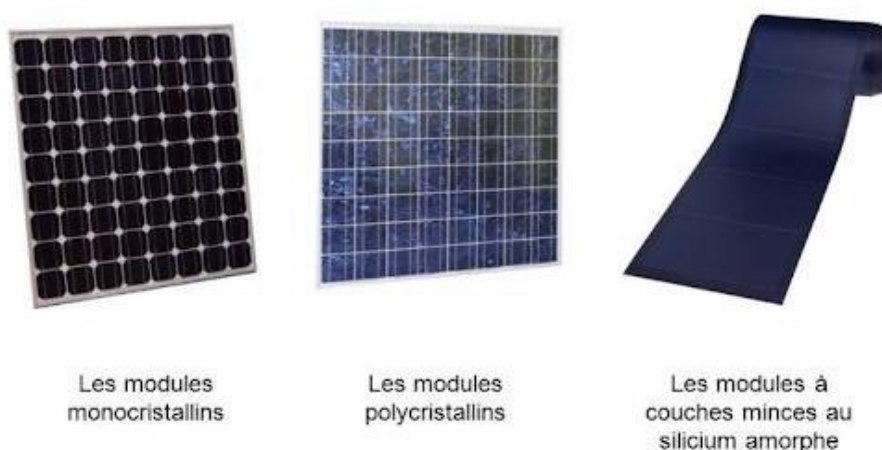


Figure 1.6 Les différentes éléments constitutif d'un panneau photovoltaïque

1.7 Systèmes de conversion photovoltaïques (PV)

Les systèmes photovoltaïques autonomes, connectés au réseau et hybrides sont les trois types de systèmes disponibles. Les systèmes photovoltaïques autonomes ont été considérés comme une solution préférable pour les sites éloignés des systèmes de production d'énergie traditionnels.

L'exécution du système P-V dans ces systèmes dépend des conditions de fonctionnement. La puissance maximale collectée par le générateur PV dépend alors fortement de trois facteurs : le rayonnement solaire, l'impédance de la charge et la température des cellules ; le rendement des cellules est considéré comme constant. Les systèmes P-V doivent cependant être conçus pour fonctionner à leur niveau de puissance maximale à tout moment, quelle que soit la température, la température du soleil ou l'irradiation solaire. Le dernier facteur significatif qui détermine la puissance de sortie P-V est l'impédance de la charge. Cependant, Il convient de noter que cette impédance n'est pas constante. Lorsqu'un générateur P-V est directement relié à une charge, le système fonctionnera à l'intersection de la ligne de la courbe et de la charge I-V, ce qui pourrait être assez éloigné du point de puissance maximale (MPP). La production de puissance maximale est basée sur l'ajustement de ligne de charge sous changement de conditions atmosphériques. En général, la charge nécessite un niveau de puissance constant.

La conversion photovoltaïque est le processus par lequel certains matériaux transforment le rayonnement solaire en électricité. Dans la conversion photovoltaïque trois phénomènes physiques sont mis en jeux :

- L'Absorption de la lumière dans le matériau;
- le Transfert d'énergie des photons aux charges électriques;
- la collecte des charges.

Pour permettre la conversion photovoltaïque, le matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques.

1.8 Centrale électrique solaire

Les centrales solaires thermiques utilisent les rayons du soleil pour produire de l'électricité. Elle concentre la chaleur du soleil à l'aide de miroirs pour produire une énergie propre et renouvelable.

1.8.1 Centrale thermique

Les centrales solaires thermiques utilisent les rayons du soleil pour produire de l'électricité. Elle concentre la chaleur du soleil à l'aide de miroirs pour produire une énergie propre et renouvelable par les méthodes suivantes :

- Chauffer un fluide dont la vapeur servira à faire tourner une turbine pour produire de l'électricité grâce à un générateur.
- Fonctionner un moteur Stirling qui sert à produire de l'électricité grâce à un générateur.

1.8.2 Centrale photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est composée d'un champ de modules solaires photovoltaïques qui sont reliés à un ou plusieurs onduleurs en série et en parallèle. La majorité des parcs solaires sont des centrales solaires en champ libre, c'est-à-dire des systèmes photovoltaïques montés au sol. Les suiveurs solaires peuvent être à inclinaison fixe, à axe unique ou à double axe [21] [22].



Figure 1.7 Centrale photovoltaïque

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, L'état de l'art sur les énergies renouvelables, notamment l'énergie photovoltaïque et le rayonnement solaire en général, ainsi que les différents types de cellules, ont été présenté. Finalement, le processus de conversion photovoltaïque et les centrales solaires sont abordés.

CHAPITRE

-2-

**Modélisation et Caractéristiques
d'un générateur photovoltaïque**

2.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque (GPV) est composé de modules qui sont couplés en série et en parallèle pour augmenter la tension et le courant à la sortie du GPV. Les cellules solaires sont connectées en série et en parallèle avant d'être encastrées dans du verre pour former un module photovoltaïque. L'objectif est de créer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque. Selon la littérature, le nombre de paramètres pris en compte diffère selon les modèles de cellules solaires. Le modèle à quatre paramètres fait l'objet de cette recherche.

2.2 Modélisation mathématique d'un générateur photovoltaïque

Le modèle mathématique doit être capable de reproduire correctement la réalité. Dans ce modèle, la cellule PV est reliée en parallèle avec une diode et une résistance. Elle est aussi connectée en série avec une résistance série qui est principalement déterminée par la résistance du semi-conducteur utilisé, la résistance de contact des grilles du collecteur et la résistivité de ces grilles. Cela s'explique par les résistances de base et de face de la jonction, ainsi que par les contacts de face avant et arrière. La résistance parallèle est abaissée par la pénétration d'impuretés métalliques dans la jonction et tient compte de phénomènes tels que le courant de fuite à travers les bords de la cellule. Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

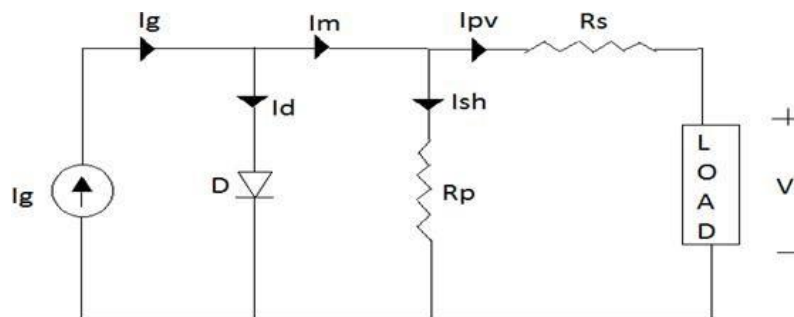


Figure 2.1 Schéma équivalent de circuit d'une cellule photovoltaïque [14].

Mathématiquement le modèle d'une cellule photovoltaïque est donnée par [14]:

Le courant généré par le réseau PV est directement proportionnel à l'ensoleillement. Dans la figure ci-dessus, le courant généré par le PV est régi par les équations suivantes :

$$I_{pv} = I_m - I_{sh} \quad (2.1)$$

Où I_{sh} est le courant à travers la résistance shunt donné par :

$$I_{sh} = \frac{(V + I_{pv}R_s)}{R_p} \quad (2.2)$$

$$I_m = I_g - I_d \quad (2.3)$$

Où I_g est le courant PV généré proportionnel à l'ensoleillement donné par :

$$I_g = (I_{g,n} + K_t \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2.4)$$

Où I_d est le courant de la diode donné par :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{(V + I_{pv}R_s)}{nV_t} \right) - 1 \right) \quad (2.5)$$

Où I_0 est le courant de saturation inverse de la diode donné par :

$$I_0 = \frac{(I_{sc,n} + K_v \Delta T)}{\exp \left(\frac{(V_{oc,n} + K_v \Delta T)}{aV_t} \right) - 1} \quad (2.6)$$

Où V_t est la tension équivalente à la température donnée par :

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (2.7)$$

L'expression finale du courant de sortie des cellules photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = I_g - I_0 \left(\exp \left(\frac{(V + I_{pv}R_s)}{v_i n} \right) - 1 \right) - \frac{(V + I_{pv}R_s)}{R_p} \quad (2.8)$$

La description et les valeurs des différents paramètres mentionnés ci-dessus sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 les valeurs des différents paramètres.

| Paramètre | Description | Valeur | Paramètre | Description | Valeur |
|-------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|---|-----------------------|
| V_{oc} | Tension de circuit ouvert | 32.9V | T | Température ambiante | 301°K |
| $I_{sc\text{th}}$ | Courant de court-circuit | 8.21A | T_n | Température nominale | 300°K |
| k | Constante de Boltzmann | 1.38×10^{-23} | q | Charge d'électron | 1.6×10^{-19} |
| N_s | Nombre de cellules en série | 54 | n | Facteur de diode idéale | 2 |
| N_p | Nombre de cellules en parallèle | 1 | I_0 | Courant de saturation de diode | |
| G | Irradiation | 800 | $I_{0\text{th}}$ | Courant de saturation nominale de diode | 9.4×10^{-8} |
| G_n | Irradiation nominal | 1000 | E_g | Énergie de la bande interdite | 1.12eV |
| K_v | Coefficient de voltage | -0.1230 | $I_{g\text{th}}$ | | 8.214 |
| K_i | Coefficient de courant | 0.0032 | $R_s \text{ \& } R_p$ | Résistance série et parallèle, respectivement | 0.221Ω, 414.5Ω |

2.3 Zones caractéristiques PV du courant en fonction de la tension

Le point de fonctionnement d'un système photovoltaïque est déterminé par la charge aux bornes du générateur. La figure 2.2 montre trois (03) zones de la caractéristique I=f(V) :

Zone I : le courant reste constant quelle que soit la tension, ce qui indique que le générateur solaire est un générateur de courant.

Zone II : cette zone se situe au milieu des deux zones, et c'est là qu'on obtient les meilleures performances de notre système photovoltaïque.

Zone III : la variation de courant liée à une tension quasi constante caractérise cette zone. Dans ce scénario, nous pouvons utiliser un générateur de tension pour reproduire le générateur PV.

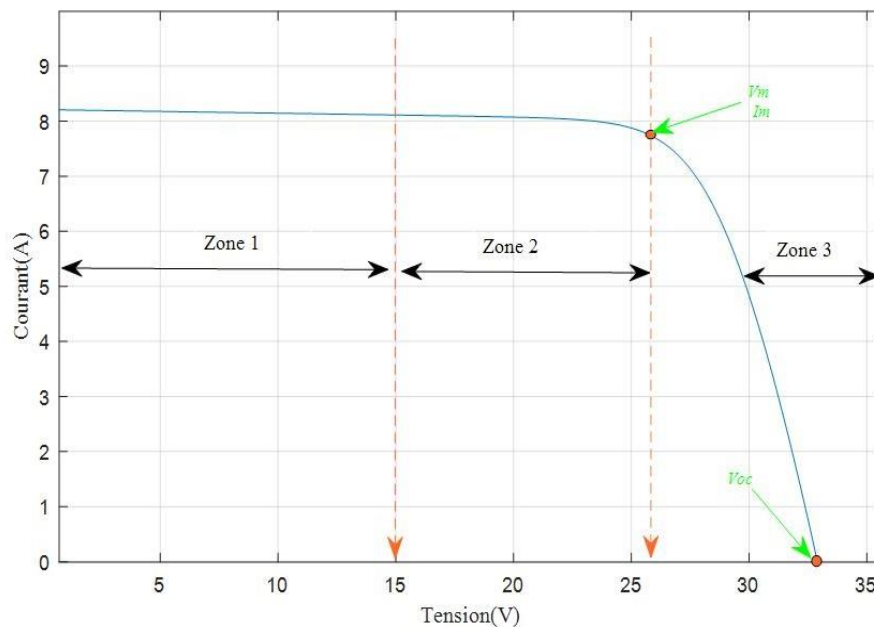


Figure 2.2 : Zones de la caractéristique I (V) à la température $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'éclairement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

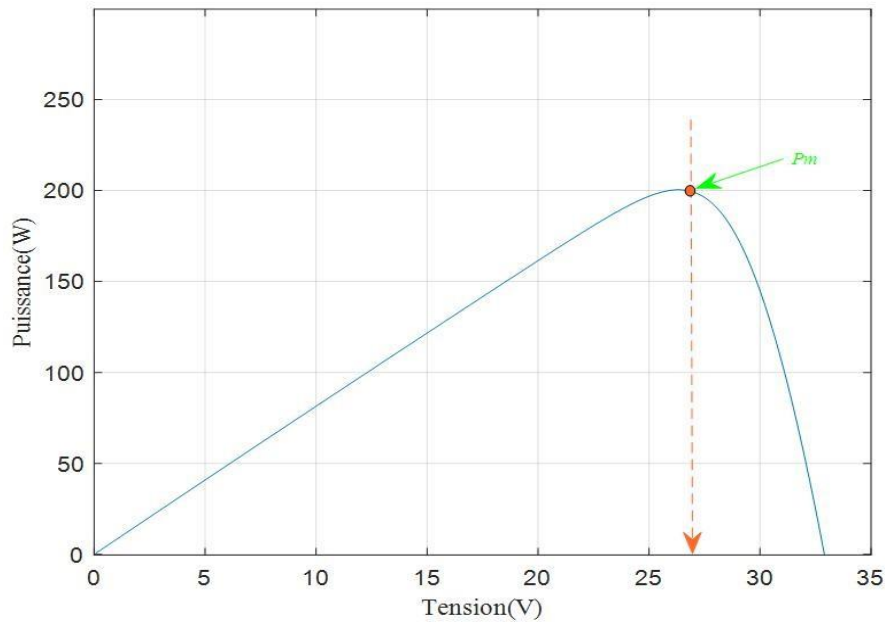


Figure 2.3 $P=f(V)$ à la température $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'éclairement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

2.4 Rendement énergétique

Le rendement énergétique d'un module est définie comme le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui atteint le module. Soit S la surface du module et E l'irradiance en W/m^2 , alors le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S.E} \quad (2.9)$$

2.5 Facteur de forme

Il s'agit du rapport entre le rendement maximal d'une cellule et le rendement maximal théorique, aussi appelé puissance optimale. Le facteur de forme mesure l'efficacité de la cellule et est déterminé par un certain nombre de facteurs de la cellule, notamment le courant et la tension de fonctionnement maximum, le facteur d'idéalité et les résistances parasites en série et en parallèles. Il peut fournir des informations sur l'âge d'une cellule.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{cc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (2.10)$$

2.6 Association des cellules photovoltaïques

2.6.1 Association en série

Les cellules d'un réseau en série sont toutes traversées par le même courant, et la caractéristique du réseau en série est déterminée en additionnant les tensions à un courant particulier. La figure (2.5) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

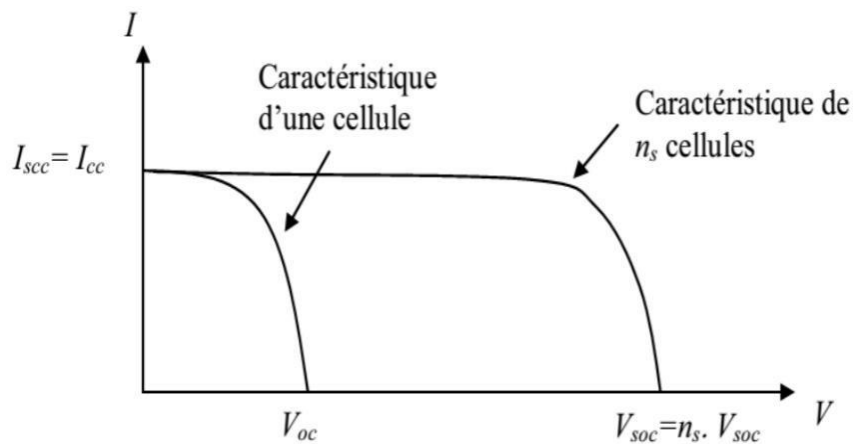


Figure 2.4 Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [23].

2.6.2 Association en parallèle

Les cellules d'un réseau parallèle sont toutes exposées à la même tension, et la caractéristique du réseau qui en résulte est calculée en additionnant les courants à chaque tension. La figure (2.6) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques

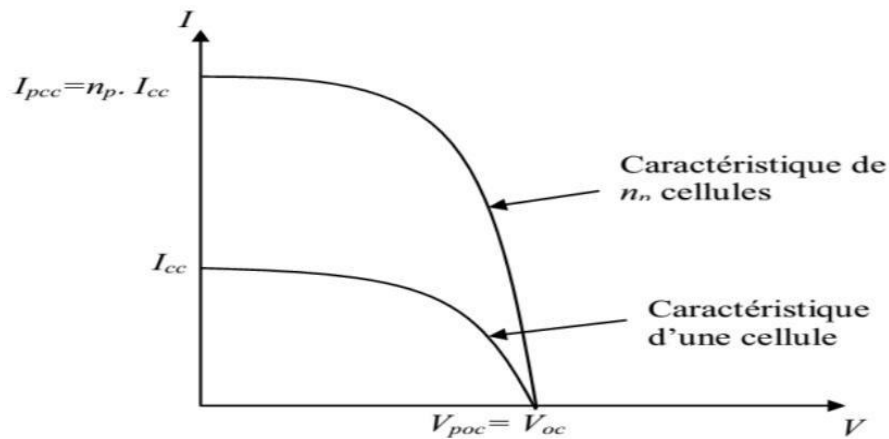


Figure 2.5 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques [23].

2.6.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I'_{cc} = n_p \cdot I_{cc} \quad (2.11)$$

$$V'_{oc} = n_s \cdot v_{oc} \quad (2.12)$$

avec :

n_p : nombre des cellules en parallèle.

n_s : nombre des cellules en série.

La figure 2.7 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques :

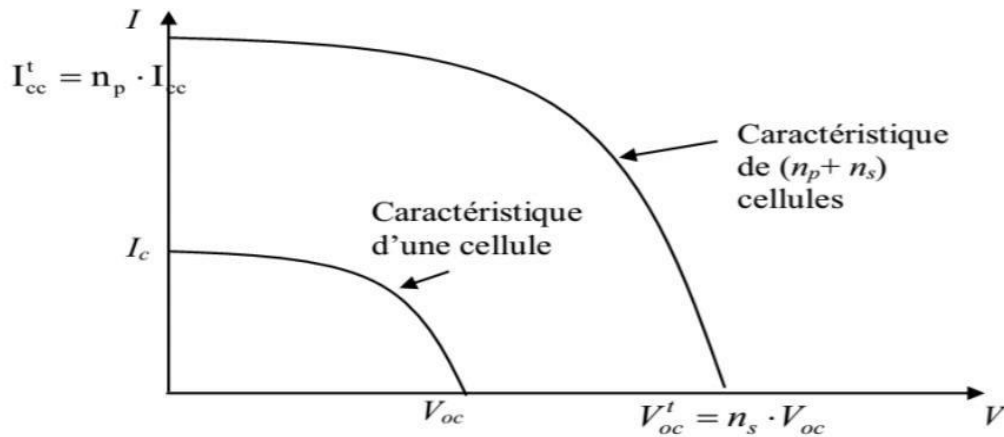


Figure 2.6 Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques [23].

2.7 Etude de l'effet de l'éclairement et de la température

2.7.1 Influence de l'Éclairement

L'éclairement, exprimé en W/m^2 , est la quantité de lumière captée par le module solaire. Selon la saison, il varie de 0 à 1000 W/m^2 pendant la journée. La valeur du courant de court-circuit est nettement influencée par l'éclairement. La méthode la plus typique pour améliorer l'éclairage des cellules consiste à utiliser des panneaux à orientation fixe et à inclinaison variable. En hiver, par exemple, un panneau qui repose sur le sol est deux fois moins efficace qu'un panneau incliné vers le soleil. La tension en circuit ouvert, en revanche, ne varie pas dans les mêmes proportions et reste constante même en cas de faible éclairage.

Les figures 2.7 et 2.8 illustrent les propriétés (I-V) et (P-V) d'un GPV à différents niveaux d'ensoleillement avec une température fixe de 25°C . Niveaux d'un GPV La tension de circuit ouvert est approximativement constante, mais le courant de court-circuit fluctue en fonction du niveau d'ensoleillement.

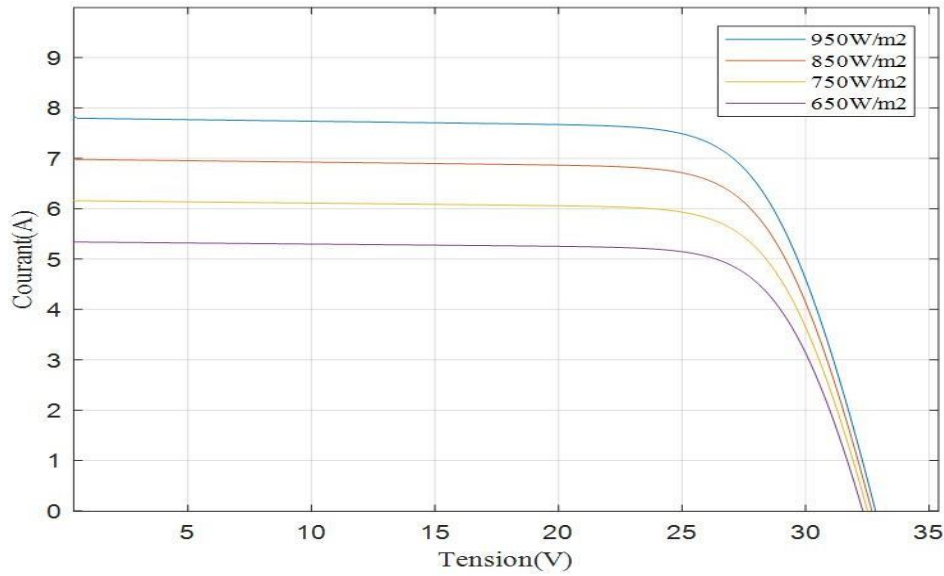


Figure 2.7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I(V).

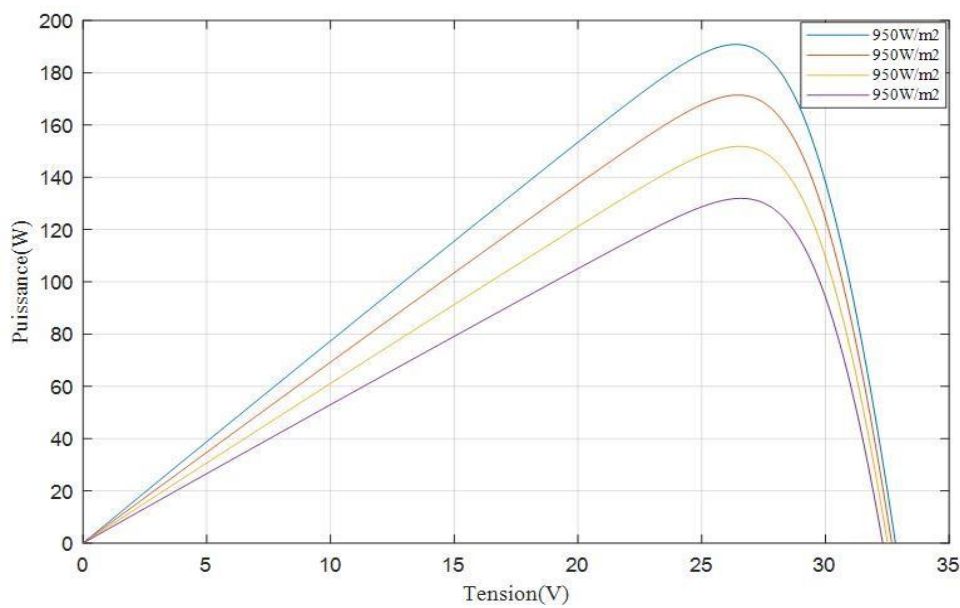


Figure 2.8 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

2.7.2 Influence de la température

Le rendement de la cellule est inversement lié à sa fluctuation, ce qui signifie qu'il diminue lorsque la température augmente. Selon l'expérience, la tension en circuit ouvert d'une cellule

solaire diminue lorsque la température de la cellule augmente. Les figures (2.9) et (2.10) présentent les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différentes températures avec un éclairement fixe de valeur $E=1000 \text{ W/m}^2$.

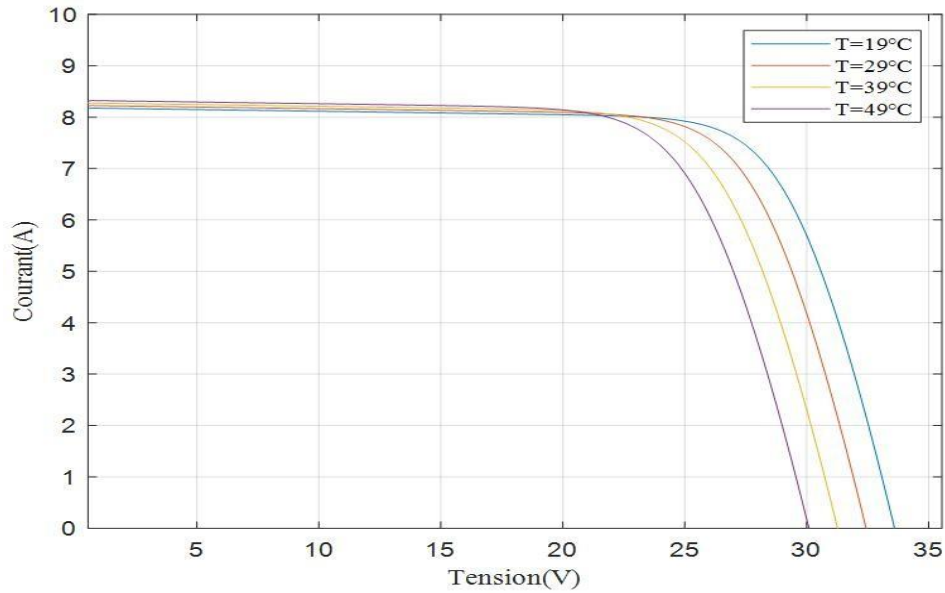


Figure 2.9 Effet de la température sur la caractéristique $I(V)$.

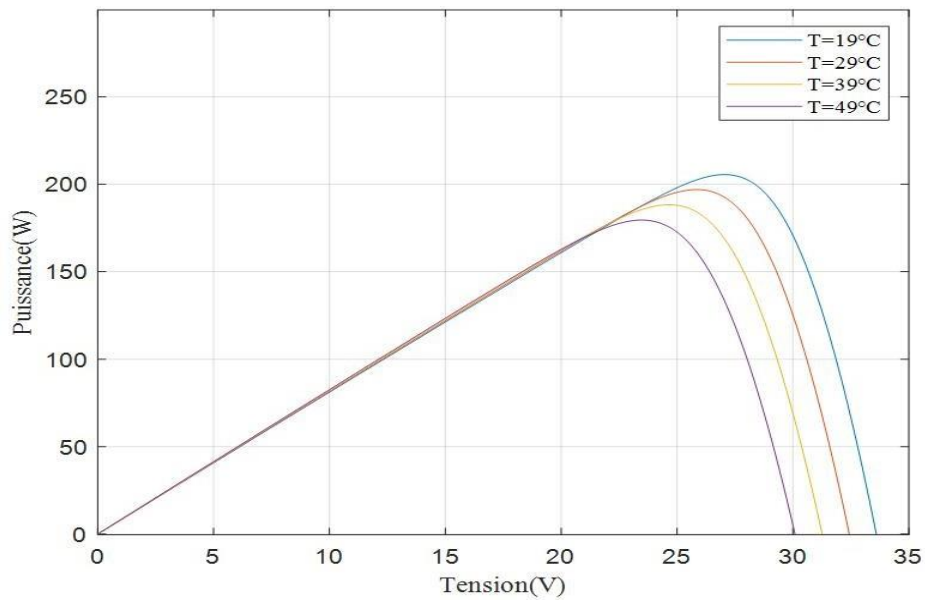


Figure 2.10 Effet de la température sur la caractéristique $P(V)$.

2.8 Conclusion

La modélisation des panneaux photovoltaïque, l'étude des zones caractéristiques d'un générateur PV et l'association des cellules photovoltaïques ont été présentées dans ce chapitre. Nous avons aussi étudié et analysé le comportements énergétique (courant et puissance en fonction de la tension) du panneau photovoltaïque en fonction de la variation de la température et de l'ensoleillement.

CHAPITRE

-3-

**Modélisation et commande des
convertisseurs statiques**

3.1 Introduction

La modélisation mathématique est une partie importante par l'analyse des systèmes ainsi que le développement des techniques de contrôle. En effet, dans ce chapitre nous nous intéressons principalement à la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion d'un système photovoltaïque (PV): convertisseur Boost et onduleur triphasé. Nous nous intéressons aussi au développement d'une technique de commande de l'onduleur appelée «Space Vector Pulse Width Modulation» (SVPWM), en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

3.2 Modélisation du convertisseur Boost

Un convertisseur élévateur (Boost), parfois appelé hacheur parallèle, est une source d'alimentation à découpage qui transforme une tension continue en une tension continue de valeur supérieure. La figure (3.1) représente le schéma de base d'un convertisseur boost.

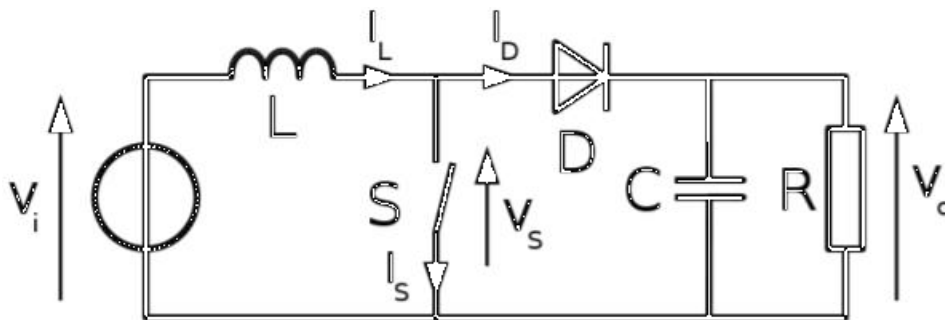


Figure 3.1 Schéma de base d'un convertisseur boost [24].

En fonction de l'état du commutateur \$S\$, le fonctionnement d'un convertisseur boost est divisé en deux phases :

→ Lorsque l'interrupteur \$S\$ est fermé (ON), le courant dans l'inducteur augmente, stockant l'énergie sous forme d'énergie magnétique. La charge est déconnectée en raison du blocage de la diode. L'expression de \$V_i\$ est donc [24]:

$$V_i = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (3.1)$$

A la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de la valeur ΔI_{Lon} exprimée par [24]:

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_i - V_0}{L} dt = \frac{(V_i - V_0)DT}{L} \quad (3.2)$$

D est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur S est en état passant. $0 < D < 1$.

→ Lorsque l'interrupteur est ouvert l'inducteur est en série avec le générateur, et sa tension s'ajoute à celle du générateur : c'est l'effet booster. L'énergie qui s'est accumulée dans l'inducteur sera transférée au condensateur.

L'expression de V_i peut être exprimé par [24]:

$$V_i - V_0 = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.3)$$

Par conséquent, pendant l'état bloqué, la variation de I_L sera égale à [24]:

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-D)T} dI_L = \int_0^{(1-D)T} \frac{V_0 - V_i}{L} dt = \frac{(V_0 - V_i)(1-D)T}{L} \quad (3.4)$$

Au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement, la quantité d'énergie stockée dans chacun de ces composants est la même. Par conséquent, le courant I_L au début et à la fin de chaque cycle de commutation est le même. Par la suite, on peut écrire l'équation suivante [24]:

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_i DT}{L} + \frac{(V_0 - V_i)(1-D)T}{L} = 0 \quad (3.5)$$

Le rapport entre V_i et V_0 sera alors :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.6)$$

3.3 Modélisation et commande de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé est composé de trois bras, chacun d'eux comportant deux (02) semi-conducteurs qui sont sélectionnés en fonction de la puissance et de la fréquence de travail. Une diode de roue libre est placée en antiparallèle à chaque semi-conducteur. Lorsque les interrupteurs sont bloqués, ces diodes maintiennent le courant circulant dans la charge. Pour éviter un court-circuit, il faut établir une période de retard entre le fonctionnement des interrupteurs haut et bas d'un même bras (phase continue). Il existe plusieurs techniques de commande de l'onduleur, mais ce qui nous intéresse dans ce chapitre et dans notre travail est la Modulation de Largeur d'Impulsion Vectorielle en anglais Pulse Width Modulation abrégée (SVPWM) [12]. L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être définis par deux grandeurs booléennes de commande :

$S_i = 1$, lorsque l'interrupteur supérieur est fermé mais que l'interrupteur inférieur est ouvert.

$S_i = 0$, lorsque l'interrupteur supérieur est ouvert mais que l'interrupteur inférieur est fermé.

Nous pouvons écrire les tensions V_{io} en fonction des signaux de commande (S_i) dans ces conditions, en tenant compte du point fictif "o" dans la (figure 3.2)

$$V_{i0} = V_{dc} (S_i - \frac{1}{2}) \quad (3.7)$$

La figure (3.2) présente le schéma d'un onduleur de tension.

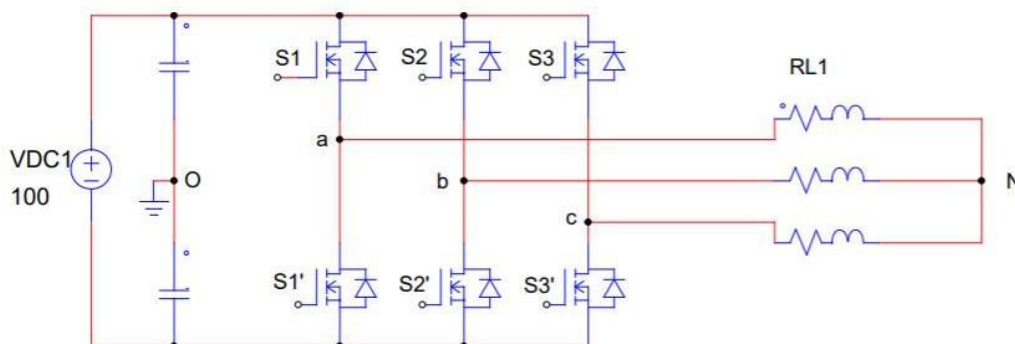


Figure 3.2 Schéma d'onduleur de tension triphasé [25].

Les trois tensions composées v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} sont définies par les relations suivantes [20]:

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{an} - v_{bn} \\ v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} \\ v_{ca} = v_{cn} - v_{an} \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec 'n' point neutre de la charge.

À l'état d'équilibre ($v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$), nous pouvons écrire [20]:

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (3.9)$$

Si le point "o" est représenté, les tensions entre les phases peuvent également s'écrire :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \\ v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \\ v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \end{cases} \quad (3.10)$$

En remplaçant (3.8) dans (3.7) on obtient, la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Alors :

$$\begin{cases} v_{a0} = v_{an} - v_{n0} \\ v_{b0} = v_{bn} - v_{n0} \\ v_{c0} = v_{cn} - v_{n0} \end{cases} \quad (3.12)$$

Le potentiel entre les points n et o peut être calculé comme suit [20]:

$$v_{n0} = \frac{1}{3}(v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}) \quad (3.13)$$

A partir de l'expression (3.11), les équations instantanées des tensions simples peuvent être définies en fonction des grandeurs de commande [20]:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Après l'application de la transformation de Concordia nous pouvons écrire [13]:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

La matrice de l'équation ci-dessus peut également être écrite comme suit [13]:

$$\begin{cases} V_\alpha = V_{AN} \\ V_\beta = (2V_{BN} + V_{AN}) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$V_S = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (3.17)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (3.18)$$

$$\omega = 2\pi f_m \quad (3.19)$$

Les huit tensions vectorielles fondamentales (V0, V1,..., V7) du tableau sont commandées par une combinaison des formes vectorielles à trois bits. Six vecteurs de tension active (V1, V2, V3, V4, V5, V6) et deux vecteurs de tension nulle en font partie (V0, V7). L'espace de modulation est divisé en six secteurs (1,2,...6). La figure (3.3) illustre les secteurs de la commande SVPWM, ou le tableau (3.1) expose les tensions de phases et vecteurs de commande

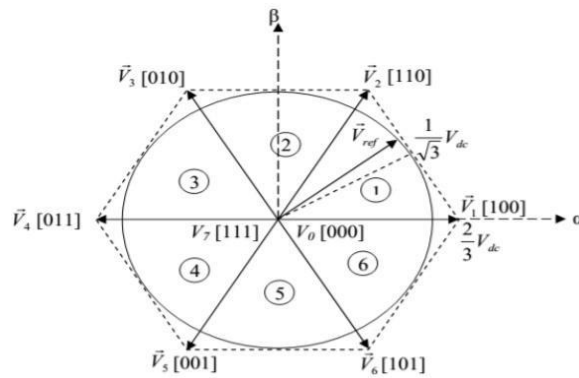


Figure 3.3 les 6 secteurs de la SVPWM [13].

Tableau 3.1: Tension de phase et vecteurs de commande [13].

| Vecteur de tension | Vecteur de commande | Les tensions simples | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-------------|-------------|
| | | V_{AN} | V_{BN} | V_{CN} |
| V_0 | [0 0 0] | 0 | 0 | 0 |
| V_1 | [1 0 0] | $2V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ |
| V_2 | [1 1 0] | $V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ | $2V_{dc}/3$ |
| V_3 | [0 1 0] | $V_{dc}/3$ | $2V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ |
| V_4 | [0 1 1] | $2V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ |
| V_5 | [0 0 1] | $V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ | $2V_{dc}/3$ |
| V_6 | [1 0 1] | $V_{dc}/3$ | $2V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ |
| V_7 | [1 1 1] | 0 | 0 | 0 |

La figure 3.4 présente le principe de calcul du vecteur espace-temps.

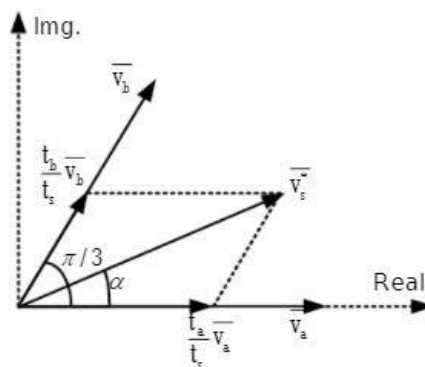


Figure 3.4 Principe de calcul du vecteur espace-temps [26].

La sélection du secteur dans les plans α, β correspond à l'organigramme ci-dessous :

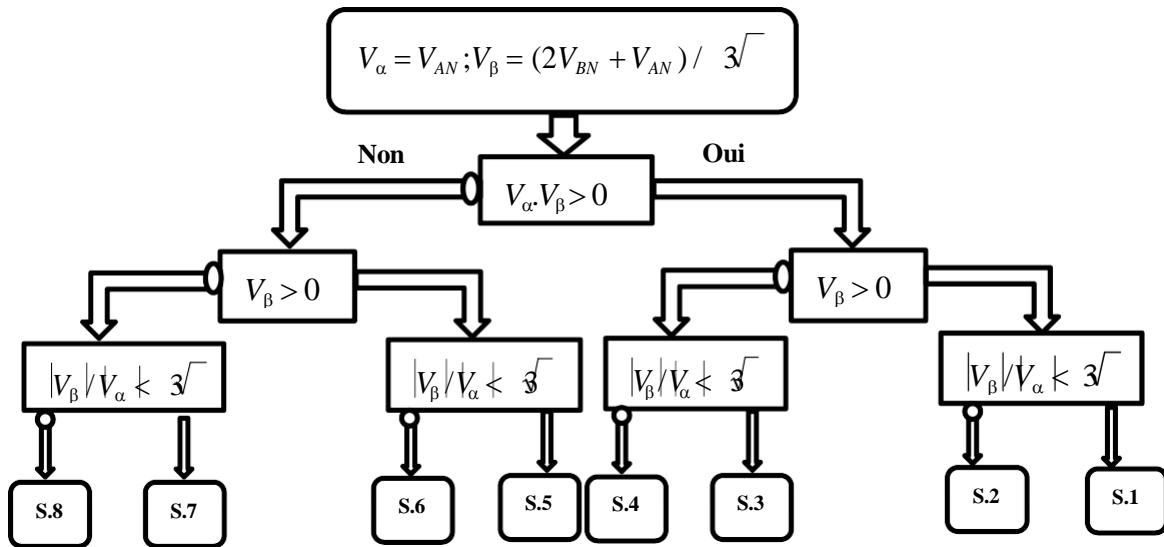
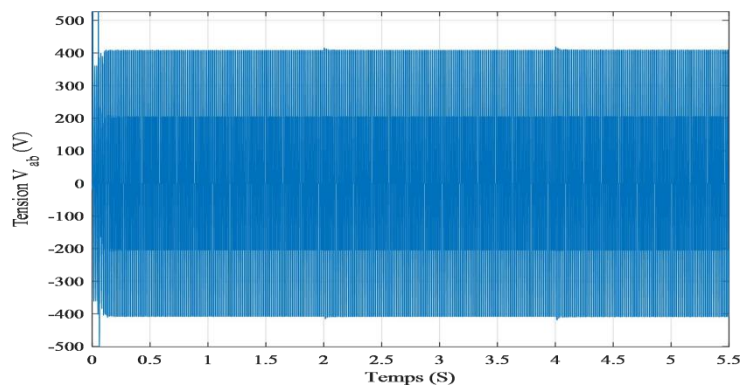


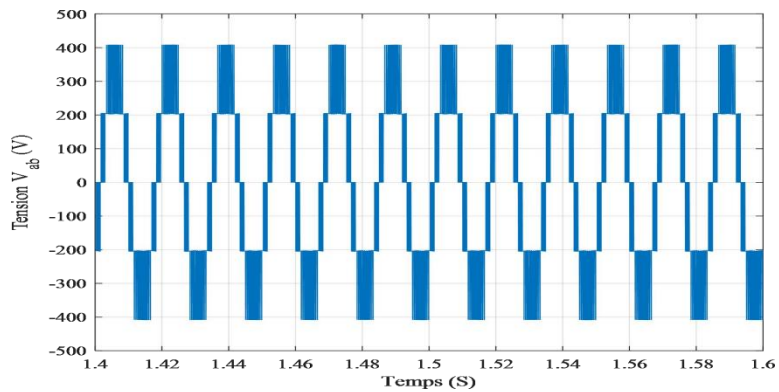
Figure 3.5 Algorithme de décision dans le repère α, β [13].

3.4 Simulation et discussion

- ✧ Un VSI triphasé génère huit états de commutation, six états actifs et deux états nuls, comme indiqué dans la section précédente. Ces vecteurs forment un hexagone composé de six secteurs, chacun couvrant 60 degrés. La commande SVPWM est utilisée pour générer le vecteur de référence, qui représente la tension sinusoïdale triphasée, en commutant entre les deux vecteurs actifs les plus proches et le vecteur zéro.
- ✧ Les figures 3.6 3.7 3.8 présentes, respectivement les tensions V_{ab} , V_{bc} , V_{ac} et la figure (3.9) présentent les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ac} avec un déphasage de $\begin{pmatrix} \pi \\ - \\ 3 \end{pmatrix}$.
- ✧ Afin de montrer l'utilité de l'utilisation d'un onduleur de tension dans un système PV, nous avons appliqué une tension d'entrée de l'onduleur égale à 400V ($V_{dc}=400V$). en effet, de la figure (3.9) nous pouvons confirmer que la tension du bus continue a été transformé en une tension alternative sinusoïdale par ailleurs, nous pouvons valider la performance de la commande du bus continu ou la tension V_{dc} suit parfaitement sa valeur de référence, et ce, quel que soit les variation de température et d'irradiation.

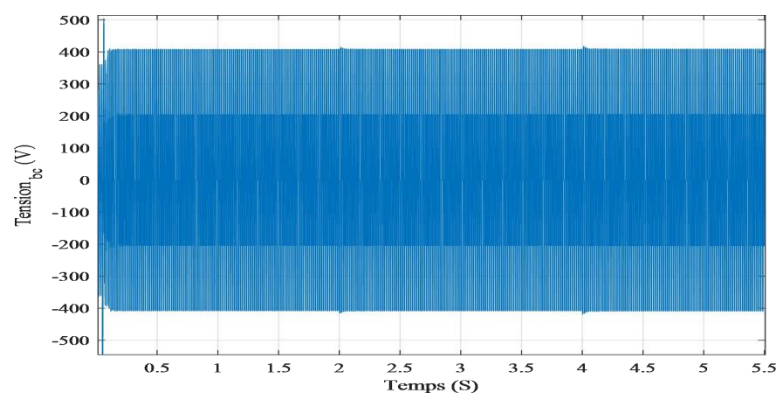


a).

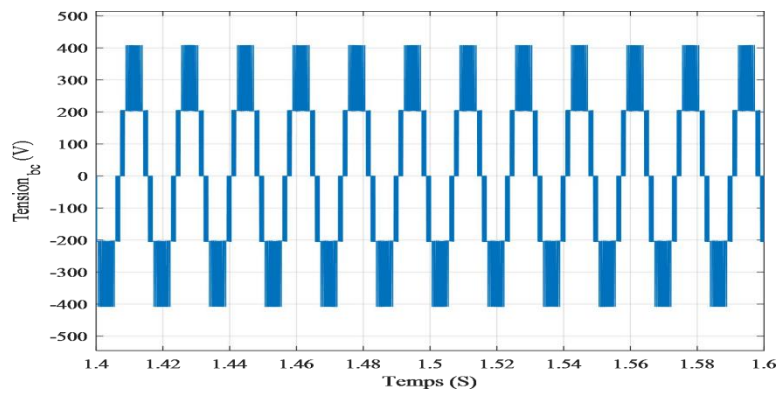


b).

Figure 3.6 a) Tension V_{ab} b) zoom de la tension V_{ab} .

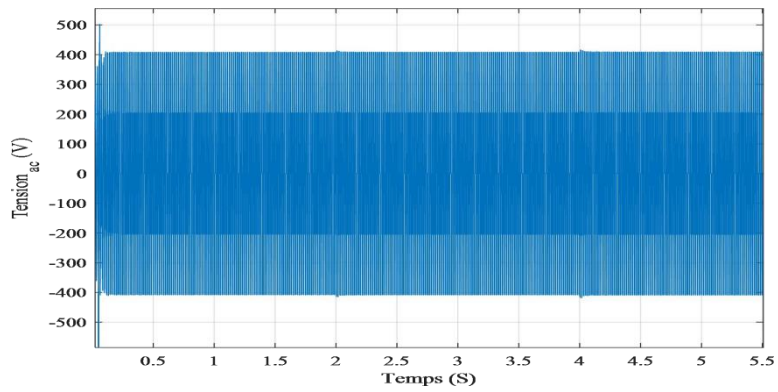


a).

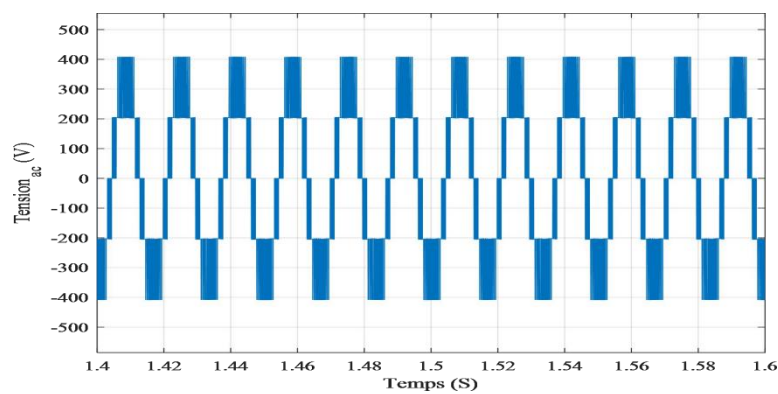


b).

Figure 3.7 a) Tension V_{bc} b) zoom de la Tension V_{bc} .

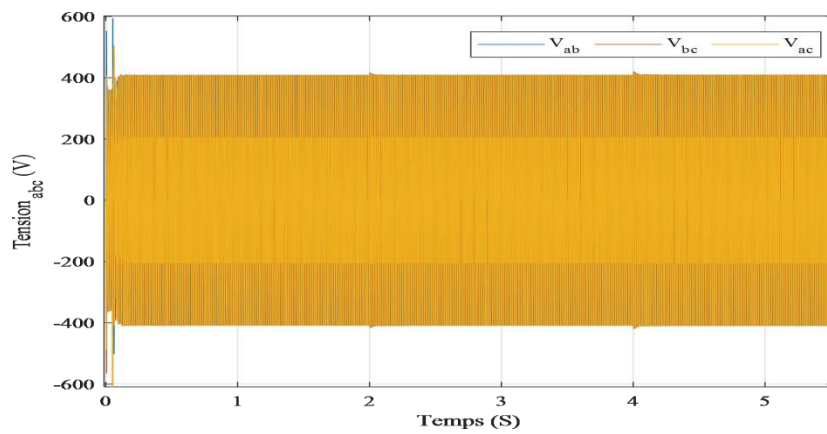


a).

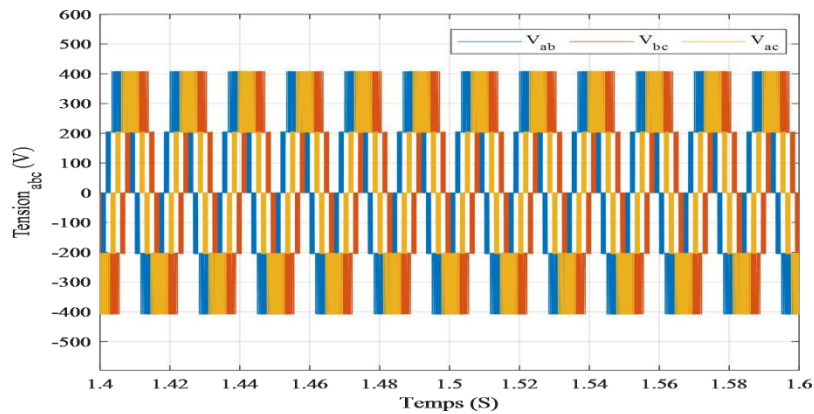


b).

Figure 3.8 a) Tension V_{ac} b) zoom de la tension V_{ac} .



a).



b)

Figure 3.9 a) Tension V_{abc} b) zoom de la tension V_{abc} .

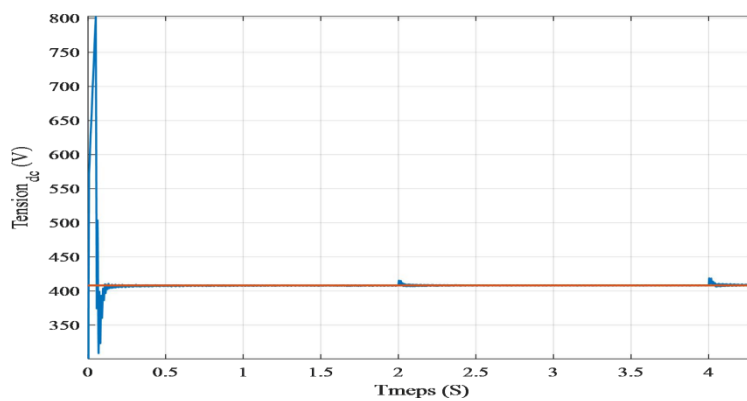


Figure 3.10 a) Tension V_{dc} b) zoom de la tension V_{dc} .

3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le hacheur Boost, son modèle mathématique et l'onduleur triphasé. Nous avons aussi exposé la commande de l'onduleur de type SVPWM. Par ailleurs, les résultats de simulation montrent un meilleur suivi de la tension continue.

CHAPITRE

-4-

Commande MPPT

4.1 Introduction

Le présent chapitre concerne le développement de technique de commande pour l'extension de la puissance maximale produite pour le système de conversion photovoltaïque (PV). En effet, nous commencerons d'abord par la définition du principe de la commande classique P&O, par la suite, l'analyse des grandeurs électrique (tension, courant et puissance) du système PV en fonction des variations météorologiques (température et irradiation) sera exposé. Par ailleurs, afin d'éviter les inconvénients de la commande P&O nous avons utilisé une autre technique basée sur l'intelligence artificielle (IA) appelée MPPT floue.

4.2 Principe de la commande MPPT

La figure 4.1 illustre la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque la plus usitée. Il contient un étage d'adaptation, un convertisseur statique (CS) et un étage de commande MPPT en plus du GPV et de la charge. L'étage d'adaptation génère le rapport cyclique de la composante contrôlable du CS pour extraire la puissance maximale du GPV vers la charge [14].

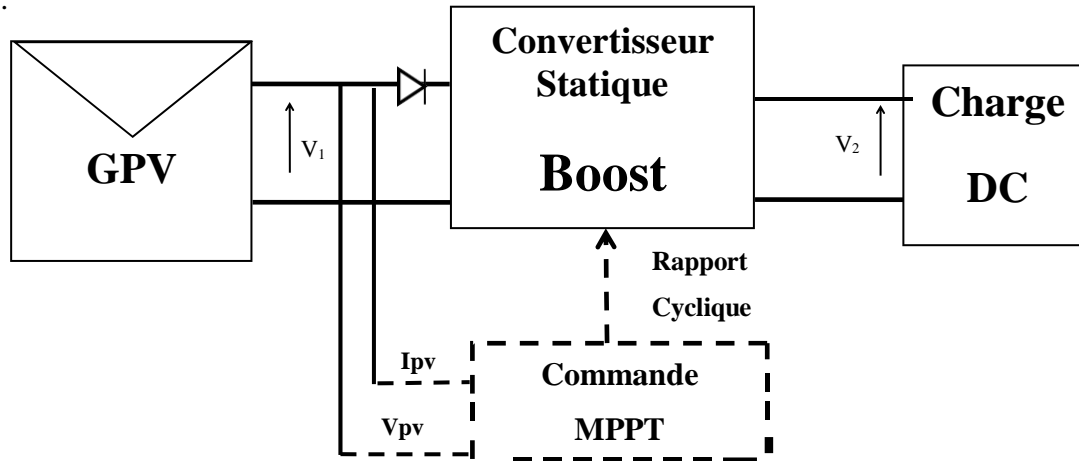


Figure 4.1 : La chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque

Trois cas de perturbation sont représentés sur la figure 4.2 (variations de l'éclairement et de la température). Le point de fonctionnement passe du point de puissance maximale PPM1 à un nouveau point de fonctionnement P1 plus ou moins éloigné de l'optimum, selon le type de perturbation. Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le

nouveau point de puissance maximale PPM2 pour une variation de l'irradiance solaire (cas a). Dans le cas d'une variation de charge (cas b), on observe un changement du point de fonctionnement, le point de fonctionnement revenant finalement à sa position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin, dans une moindre mesure, un dernier cas de variation du point de fonctionnement peut se produire à la suite de changements de la température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien que l'action au niveau de l'ordre soit également nécessaire, elle n'a pas les mêmes contraintes de temps que les deux cas précédents. En conclusion, le PPM est contrôlé à l'aide d'un contrôle spécifique appelé MPPT, qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour trouver et atteindre le PPM du GPV[11].

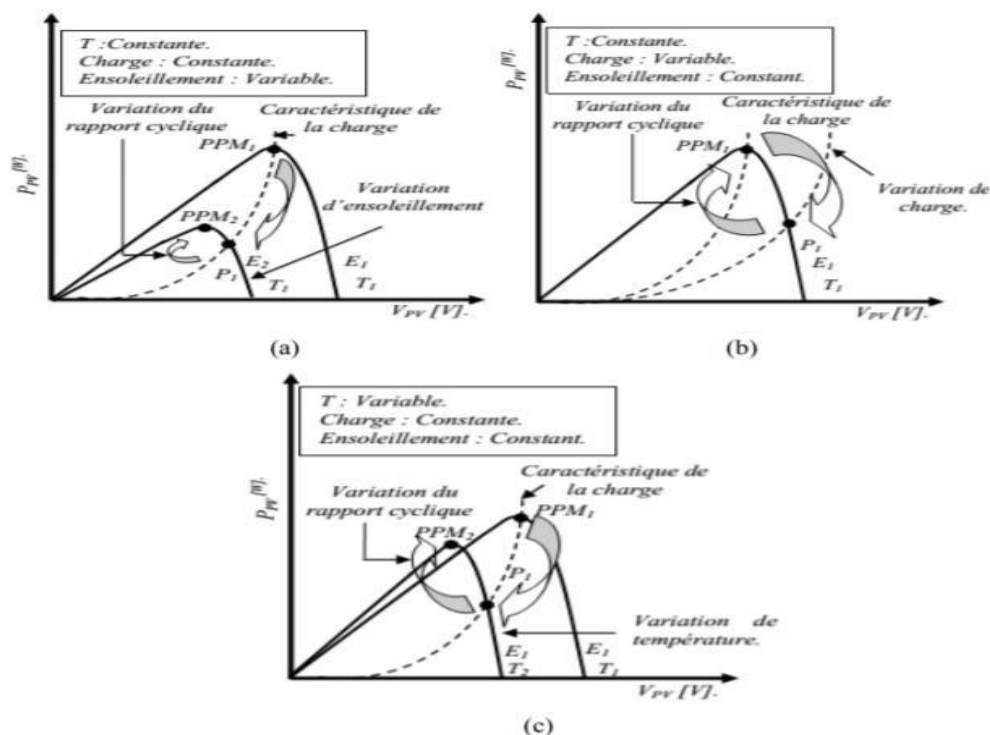


Figure 4.2 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale: a) Suite à une variation d'irradiance, b) Suite à une variation de charge, c) Suite à une variation de température [11].

4.2.1. Commande Perturbation and Observation (P&O)

Le principe de la commande (P&O) consiste à modifier l'un des paramètres d'entrée du convertisseur statique (généralement la tension V_{pv}), puis à mesurer l'effet sur la puissance de sortie du système. Même si l'éclairement et la température changent, la puissance maximale peut être extraite. Cette méthode fonctionne sur le principe de la mesure de V_{pv} et I_{pv} et du calcul de $P(k)$ à partir d'un faible rapport cyclique. La valeur obtenue est comparée à la valeur $P(k-1)$ calculée dans le cycle précédent, et V_{pv} est ajusté soit dans la même direction que dans le cycle précédent, soit dans la direction opposée, en fonction du résultat de la comparaison. Par conséquent, la puissance augmente, puis diminue, et dès qu'une diminution de la puissance est détectée, le sens de commande est à nouveau inversé, et vice-versa. [15,16]. La figure 4.3 présente le principe de fonctionnement de la commande P&O.

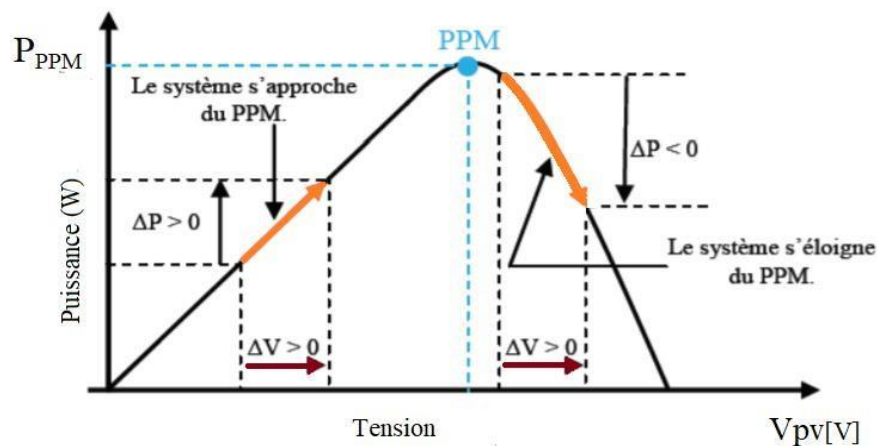


Figure 4.3 schéma de convergence vers le PPM par P&O [11].

L'algorithme classique associé à une commande MPPT P&O est illustré dans la figure (4.4), où l'évolution de la puissance est examinée après chaque perturbation de tension. Pour déterminer la puissance PV à chaque instant, deux capteurs (courant et tension GPV) sont nécessaires pour ce type de contrôle.

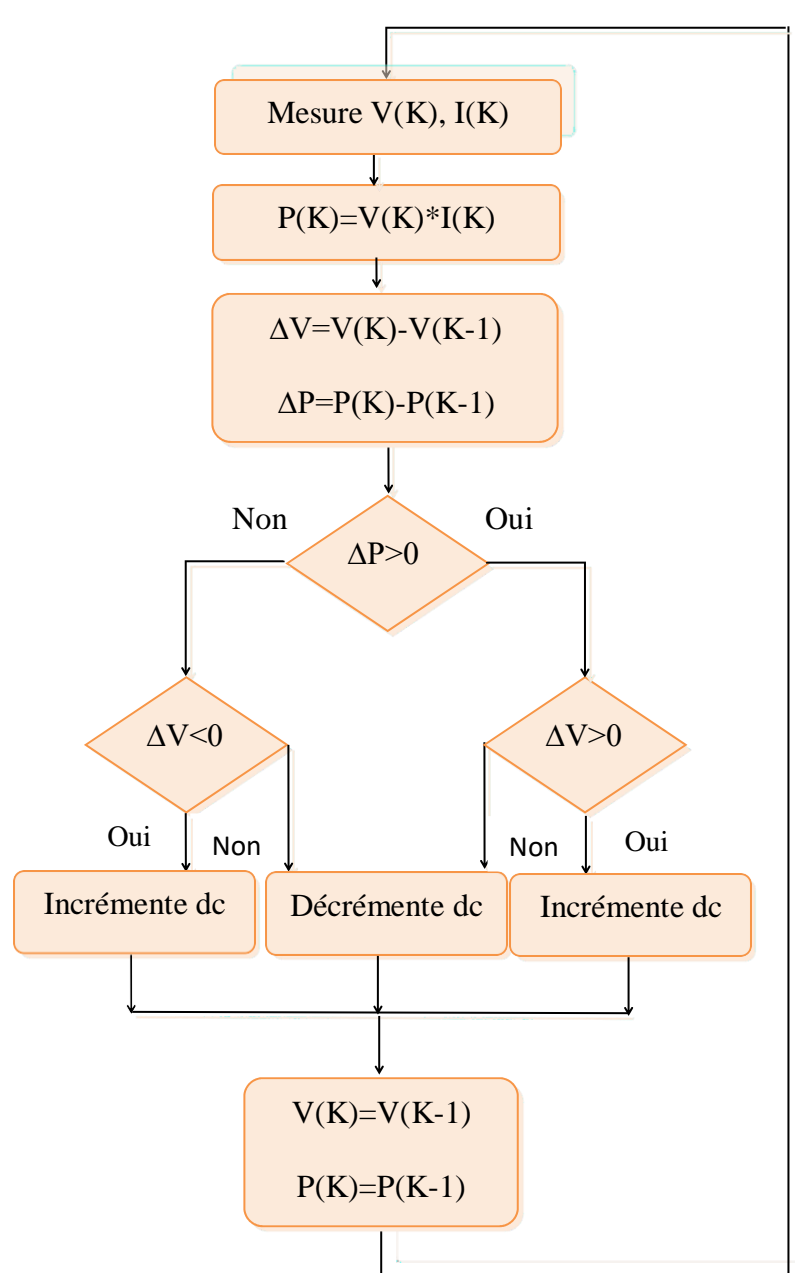


Figure 4.4 Algorithme de la méthode P&O.

Avec :

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1} \quad (4.1)$$

$$\Delta P = P_{PVn} - P_{PVn-1} \quad (4.2)$$

Ou:

P_{pvn} : la nouvelle puissance

P_{pvn-1} : l'ancienne puissance dans le temps (t-1).

Cette technique de commande présente les avantages:

Structure de contrôle simple.

Réduction du nombre de paramètres

Et les inconvénients:

Le dépassement du point optimal maximal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

4.2.2 Commande MPPT floue

Grâce aux progrès des microcontrôleurs, la commande par logique floue (Fuzzy Logic Control dans la littérature anglo-saxonne) devient de plus en plus populaire [17]. Ces techniques ont l'avantage de pouvoir travailler avec des valeurs d'entrée de faible précision et de ne pas nécessiter un modèle mathématique très précis. Ils ont aussi la capacité de traiter les non-linéarités. Les deux variables d'entrées l'erreur ER et le changement d'erreur ΔER , ainsi qu'une variable de sortie $\Delta \alpha$ (variation du rapport cyclique), sont la base de la commande floue. Une table de vérité et l'évolution des paramètres d'entrée sont utilisées pour déterminer la valeur de la variable de sortie, qui commande le convertisseur statique pour trouver le PPM.

Le système d'inférence flou s'articule principalement sur: La Fuzzification, table des règles et défuzzification. Les variables d'entrée numériques sont converties en variables linguistiques pendant la fuzzification qui peuvent prendre l'une des cinq valeurs suivantes [18,19]:

- NB: Negative Big,
- NS: Negative Small,
- ZE: Zero,
- PS: Positive Small,
- PB : Positive Big

La figure 4.5 montre la structure de base de la commande par logique floue.

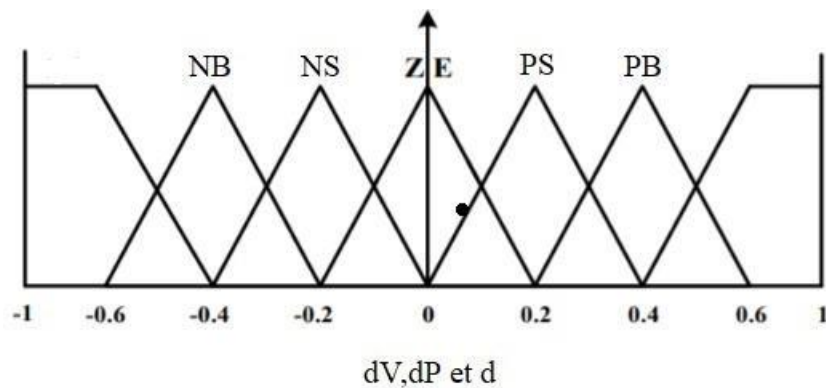


Figure 4.5 Structure de base de la commande floue [20].

les figures 4.6 (a) et 4.6 (b) présentes les fonctions d'appartenances d'entrées du système d'inférence. Toutefois la figure 4.6 (c) présente les fonctions d'appartenance de la sortie du système d'inférence flou.

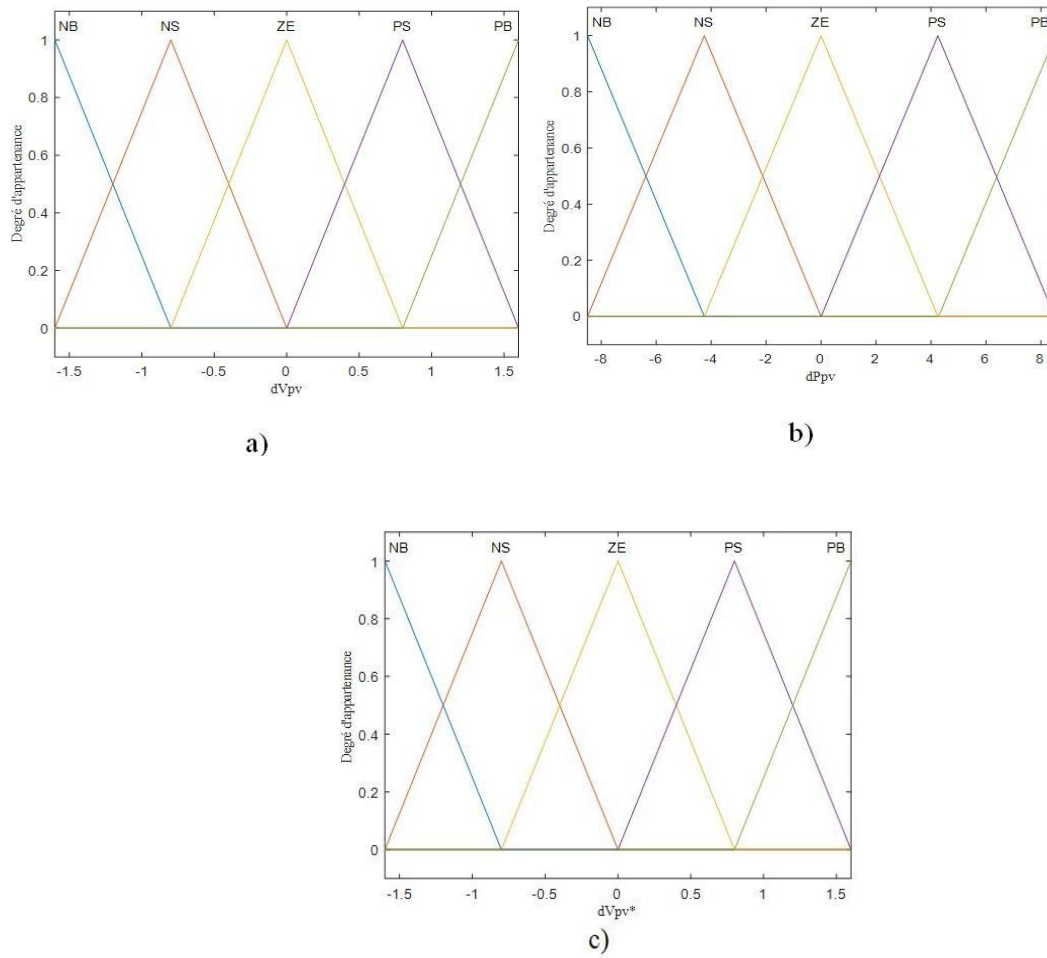


Figure 4.6 Fonctions d'appartenances d'entrée a) dV_{pv} , b) dP_{pv} , Fonction d'appartenance de sortie c) dV_{pv}^* .

Tableau 4.1 Table de vérité de la commande floue.

| ΔV | ΔP | NB | NS | Z | PS | PB |
|------------|------------|----|----|----|----|----|
| NB | | PB | PS | NB | NS | NS |
| NS | | PS | PS | NB | NS | NS |
| Z | | NS | NS | NS | PB | PB |
| PS | | NS | PB | PS | NB | PB |
| PB | | NB | NB | PB | PS | PB |

Ceci, donne par simulation l'allure de la surface floue, représentée par la figure (4.14)

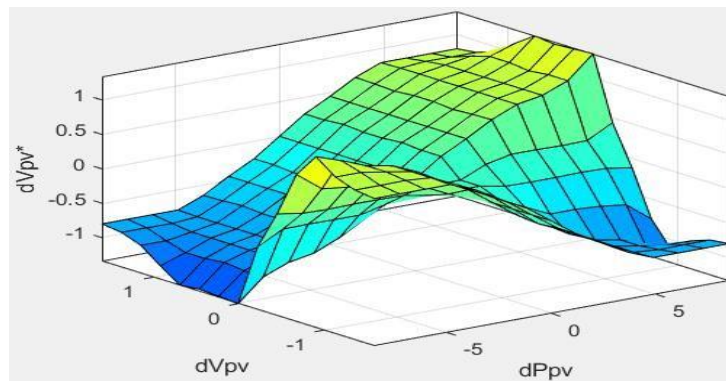


Figure 4.7 Surface floue

4.3 Résultats de simulation

Sous l'environnement Matlab, les deux algorithmes de contrôle MPPT: Perturbe & Observe et MPPT floue, sont analysés sous des conditions variables (irradiation et température). Le module PV Kyocera Solar KC200GT a été utilisé dans la simulation, et ses caractéristiques sont listées dans le tableau 4.1:

Tableau 4.2 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Kyocera Solar KC200GT

| | |
|---|-----------------------------------|
| Puissance (P_{max}) | 200.143 |
| Tension à P_{max} (V_{pmax}) | 26.3V |
| Courant à P_{max} (I_{pmax}) | 7.61A |
| Tension à circuit ouvert (V_{co}) | 32.9 |
| Courant de court-circuit de référence (I_{ccr}) | 8.21 |
| Coefficient de la température de V_{co} | $-1.23 \cdot 10^{-1} V/^{\circ}C$ |
| Coefficient de la température de I_{cc} | $3.18 \cdot 10^{-3} A/^{\circ}C$ |
| Coefficient de la température de la puissance | $-0.355002 V/^{\circ}C$ |

Nous avons simulé dans cette partie les courant, tension et la puissance de sortie avec une irradiation solaire allant de $700 W/m^2$ à $1000 W/m^2$ et des valeurs de température allant de $25^{\circ}C$ à $60^{\circ}C$. Considérant que la température et l'irradiation varient comme le montre les

figures 4.8 et 4.9 respectivement, nous notons que durant la période $2 \leq t < 3.5s$ la chaîne de conversion PV est mise sous les conditions standards ($E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$). Les figures 4.10, 4.11 et 4.12 présentent respectivement, l'évolution du courant, tension et puissance de générateur PV utilisant la commande P&O. On remarque que la puissance ainsi que les autres grandeurs varient en fonction de la variation de l'irradiation comparé à la variation de la température. La figure 4.13 représente la puissance active injectée au réseau électrique. Il est à noter que cette dernière est deux fois plus que celle délivrée par le GPV. Cela explique le rôle du convertisseur boost. Par ailleurs, la puissance réactive est maintenue égale à zéro quelque soit les variations atmosphériques, ce qui permet de garder un facteur de puissance unitaire.

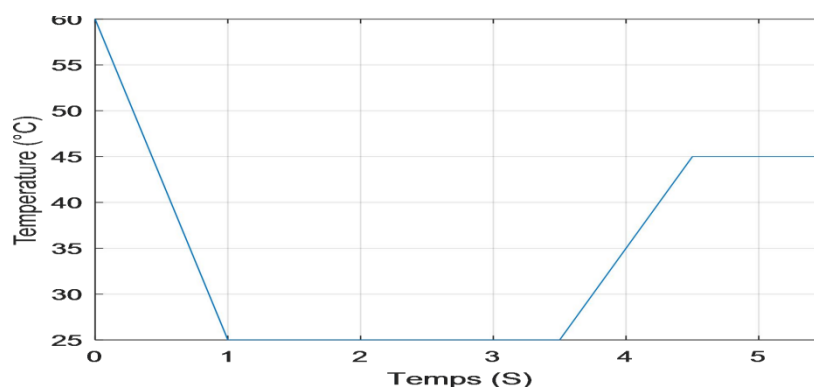


Figure 4.8 Profile de la température.

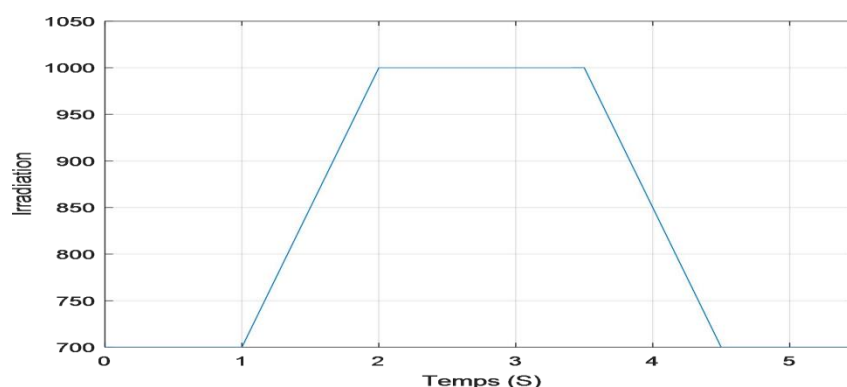


Figure 4.9 Profile d'irradiation.

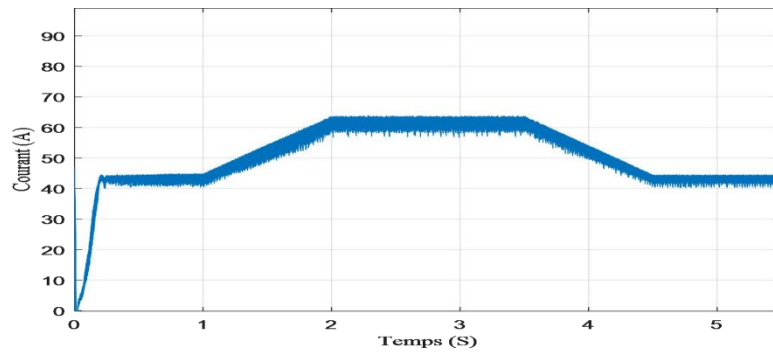


Figure 4.10 Courant de sortie.

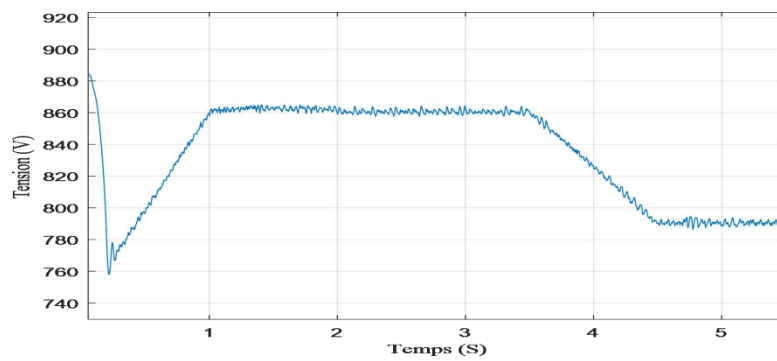


Figure 4.11 Tension de sortie.

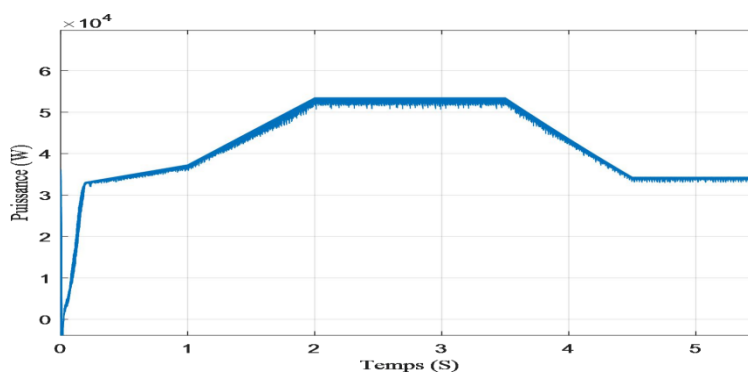


Figure 4.12 Puissance de sortie.

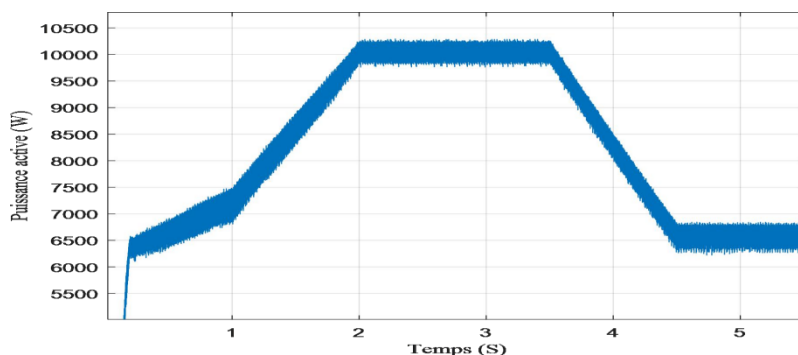


Figure 4.13 Puissance active injectée au réseau.

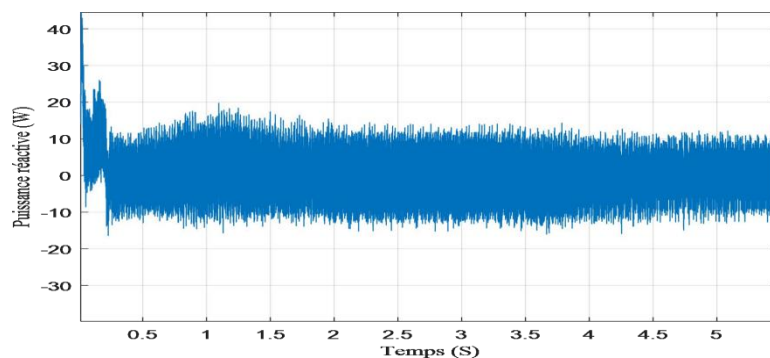


Figure 4.14 Puissance réactive injectée au réseau.

Le tableau 4.3 présente les status de simulation.

Tableau 4.3 Données de simulation.

| Statut | Temps (S) | Irradiation (W/m ²) | Température (°C) |
|--------|---------------|---------------------------------|------------------|
| | t | E | T |
| 1 | 0 ≤ t < 1 | 700 | 25 ≤ T < 60 |
| 2 | 1 ≤ t < 2 | 700 ≤ E < 1000 | 25 |
| 3 | 2 ≤ t < 3.5 | 1000 | 25 |
| 4 | 3.5 ≤ t < 4.5 | 700 ≤ E < 1000 | 25 ≤ t < 45 |
| 5 | 4.5 ≤ t < 5.5 | 700 | 45 |

Afin d'avoir un courant, tension et puissance avec moins d'oscillation, nous avons développé une commande MPPT basée sur la logique floue. D'après la simulation et le tableau, Le modèle montre que la puissance de sortie du système PV augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire et la baisse de la température des cellules. Nous avons remarqué aussi dans le premier statut que la température augmente de 25°C à 60°C et l'irradiation prend une valeur constante de 700W/m² dans cette intervalle, on voit que la tension augmente après une diminution dans un intervalle de 0.3s tandis que le courant stable après une augmentation de même intervalle aussi. Par contre dans la 2^{ème} partie, la température constante et l'irradiation augmente de 700W/m² à 1000 W/m², avec une tension stable et l'augmentation du courant. Dans le statut numéro 3, le tout est dans un état stable. L'avant dernier statut (4^{ème} statut), la température augmente jusqu'à 45°C et l'irradiation diminue à 700W/m² encore une fois, avec la diminution de tension et courant. La dernière partie, Le 5^{ème} statut est comme le 3^{ème}, le tout est stable avec une température de 45°C et 700W/m² d'irradiation.

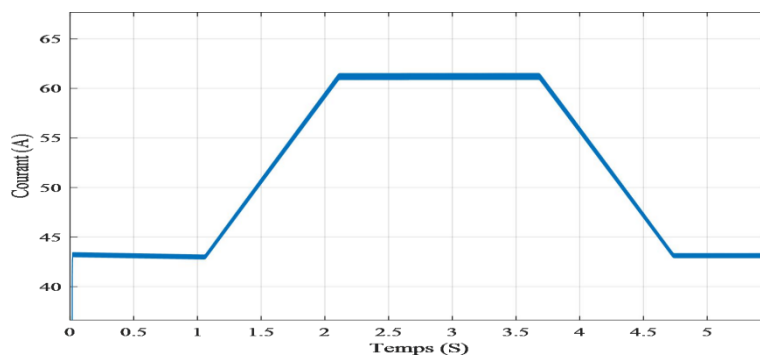


Figure 4.15 Courant de sortie avec la commande floue.

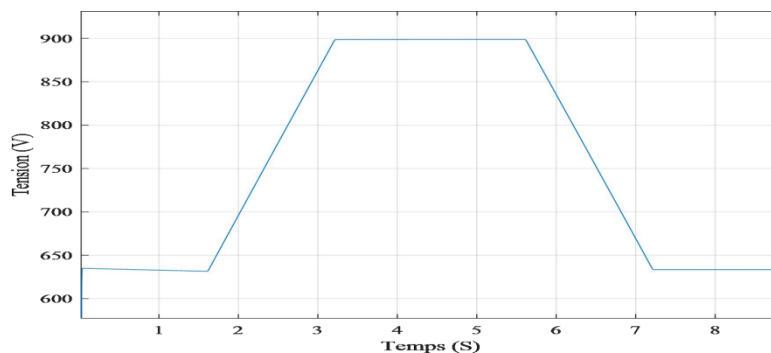
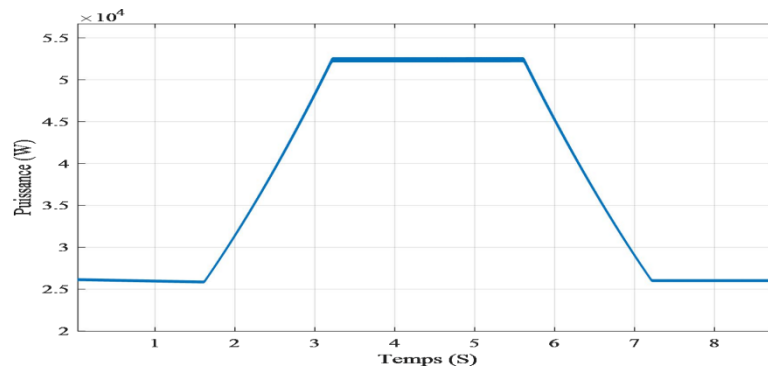


Figure 4.16 Tension de sortie avec la commande floue.**Figure 4.17** Puissance de sortie avec la commande floue.

La simulation de la commande floue, montre que le système est plus stable, et nous remarquons aussi que nous avons les mêmes résultats avec moins d'oscillation par rapport les courbes de la commande P&O.

4.4 Conclusion

L'étude et l'application de la commande de suivi de la puissance maximale ont fait l'objet du dernier chapitre. L'algorithme P&O ainsi que la logique floue ont été discutés et programmés sous Matlab. En conclusion, une étude des grandeurs électriques a été menée sous l'influence de la variation de l'irradiation et de la température. Nous pouvons dire que les résultats obtenus avec l'MPPT floue présentent moins d'oscillations, ce qui donne une meilleure qualité d'énergie.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'énergie éolienne, photovoltaïque, géothermique, marine et hydraulique sont des sources d'énergie inépuisables et propres. L'énergie solaire est facile à mettre en place et à entretenir, et la majorité de ses composants peuvent être réutilisés ou recyclés.

Étant donné que les sources d'énergie fossile sont de moins en moins disponibles, l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique est une solution incontournable.

Dans ce mémoire de fin d'étude nous avons étudié la modélisation et de commande d'un générateur photovoltaïque. Par ailleurs, l'impact de l'éclairage et de la température sur les caractéristiques du panneau a été analysé. Cependant, la modélisation d'un circuit d'adaptation (hacheur), avec lequel nous appliquant la commande MPPT: P&O et floue pour extraire une puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques a été développée, et analysée. Il convient de noter que les perturbations causée par les variations de l'irradiation et la température, en utilisant le contrôleur flou, présente moins d'ondulation comparé à la commande P&O.

Finalement, la réalisation de ce projet nous a permis de maîtriser l'utilisation de logiciel Matlab comme outil de programmation. Ainsi que, la compréhension du principe de fonctionnement d'un système PV et les différentes types de commandes: SVPWM, MPPT-floue et P&O.

REFERENCES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1] Garah Yakoub « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique » Master Réseaux Électriques Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi- 11/06/2015
- [2] futura-sciences.com/energie-renouvelable
- [3] nomana.free.fr/public/solaire.
- [4] Ministère de l'énergie et des mines/Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie
- [5] Marco Raugei, « The Energy Return on Energy Investment (EROI) of Photovoltaics: Methodology and Comparisons with Fossil Fuel Life Cycles » [archive], Brookhaven National Laboratory, 2012 (consulté le 13 octobre 2015), p.25.
- [6] aeronomie.be/fr/encyclopedie/rayonnement-solaire-electromagnetique
- [7] aeronomie.be/fr/encyclopedie/rayonnement-solaire-electromagnetique
- [8] Djeriou Salim «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. » Magister en électrotechnique, université Ferhat Abbas de Sétif, 03/07/2011
- [9] M.A. Khalfa, 'Commande Vectorielle d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil', CIFA'2008, pp 434 – 441, Bucarest, Roumanie, 3 au 5 Septembre 2008
- [10] Djeriou Salim «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. » Magister en électrotechnique, université Ferhat Abbas de Sétif, 03/07/2011
- [11] Said Chikha «Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques. » Mémoire de magister, université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 14/12/2011.

- [12] L. Cristian, M. Anderzej, "Combining the principles of sliding mode, direct torque control, and space –vector modulation in a high-performance sensorless ac drive". IEEE Transactions on industry application, Vol. 40, pp. 170-177. jan/fev 2004.
- [13] Moussa BOUSEHABA « Réalisation d'une commande MLI a choix multipl» Master electrotechnique université Abou bekr blekaid de Telemcen 28 Juin 2017.
- [14] Garah Yakoub « Etude d'une chaine de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique » Master Réseaux Électriques Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi- 11/06/2015
- [15] M .F. Shraif. "Optimisation et mesure de chaines de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique". Thèse Doctorat, Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, 2002
- [16] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, Casa J. de la et J. Aguilera. "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses", Solar Energy, Vol. 84, pp. 1301-1309. 2010.
- [17] Yun Tiam Tan, "Impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation", PhD Thesis submitted to The University of Manchester Institute of Science and Technology, 2004
- [18] J-P. Braun, B. Faraggi. A. Labouret, "Les cellules solaires". Edition technique et scientifique française-paris-1996.
- [19] F. Michel, "Application de la Logique Floue dans la Commande des Machines Synchrones à Aimants Permanents", Thèse Présentée en vue de l'Obtention de la Maîtrise en Sciences Appliquées, Faculté d'Ingénierie, Université de Moncton, Canada, 2007.

- [20] Bouzeria Hamza «Modelisation et commande d'une chaine de conversion PV»
Doctorat 3 ème cycle LMD en Électrotechnique Université Hadj Lakhdar Batna e 30
Avril 2016
- [21] «Free-field solar power plants a solution that allows power to be generated faster
and more cost-effectively than offshore wind» [archive], OpenPR (consulté le 5 mars
2013)
- [22] « Optimum Tilt of Solar Panels » MACS Lab (consulté le 19 octobre 2014)
- [23] Boukhers Djamil «optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque
application au pompage» Magister en électrotechnique université Mentouri de
Constantine 28/ 11/ 2007
- [24] Salim ABOUDA «Contribution a la commande des systemes PV : Applplication
aux systemes de pompage » DEA–Electrotechnique L'Ecole Nationale d'Ingénieurs
de Sfax 14 avril 2015
- [25] OKBA Salah et BEDDIAR Walid «Etude et réalisation d'un onduleur de tension
triphase à MLI» diplôme de Master Electromecanique universite Mohamed Boudiaf-
Msila.
- [26] Atif Iqbal, Adoum Lamine, Imtiaz Ashraf, Mohibullah «Matlab/Simulink Model
of space vector PWM for three-phase voltage source inverter» Aligarh Muslim
University, India Liverpool John Moores University, UK 2006