



N° d'ordre:

N° de série:



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

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Sciences et de La Technologies Filière: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En : Commande Electrique

Par : Senigra Abd El Karim, Saidi Bachir et Selim Abd El Kader

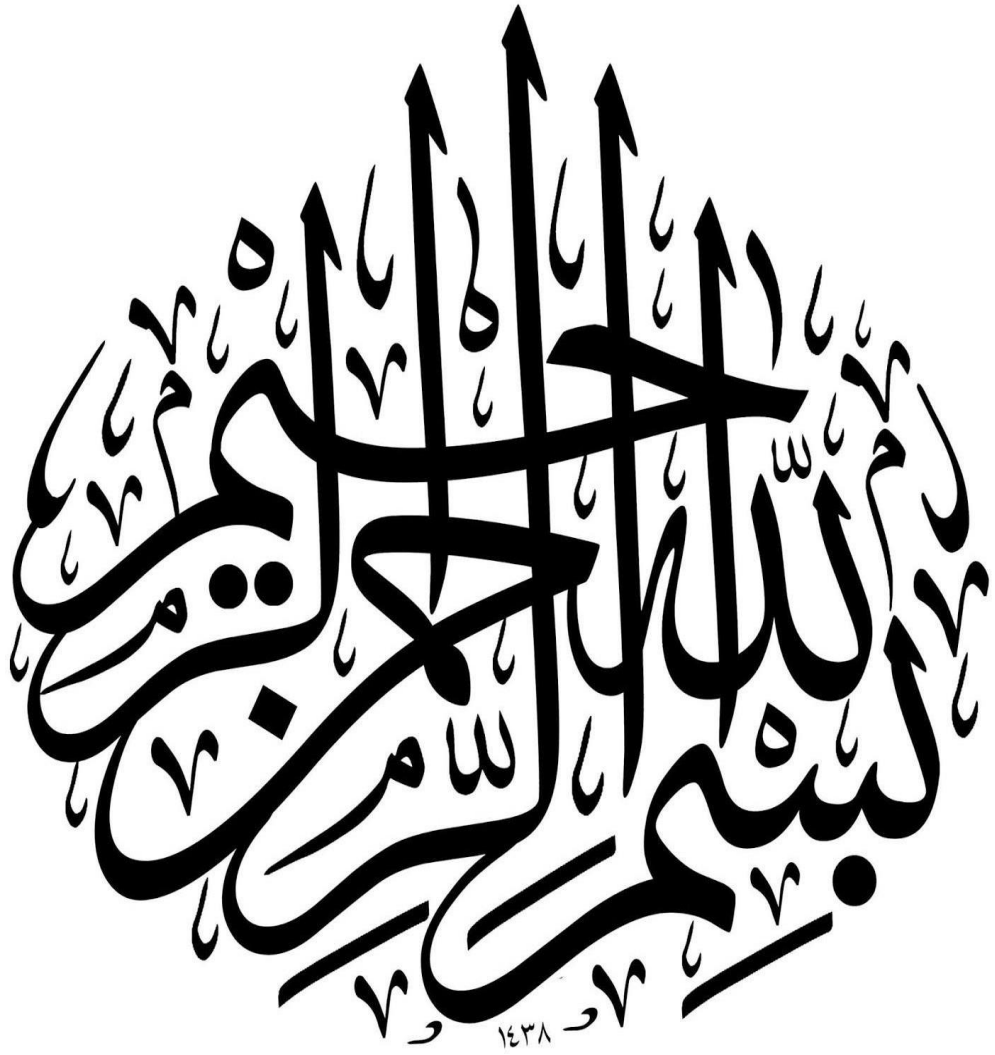
Thème

**Commande scalaire d'un Moteur Asynchrone Alimenté Par énergie
photovoltaïque**

Devant le jury composé de :

Mr.		Président
Mr.		Examineur
Mr. Serhoud Hicham		Encadreur

2022-2023



Remerciements

Louange à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, la patience et ses biens innombrables qu'il a bénis et accordés à son humble mortel pour qu'il puisse arriver à ce stade.

Je remercie mon encadreur Mr SERHOUD Hichem.

Pour avoir assuré la direction scientifique de ce travail.

Je remercie également les membres de jury qui nous a honorés en acceptant l'invitation de discuter ce modeste travail

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour leur patience durant mes études

Dédicace

Avant tout, nous honorons Allah, qui nous a donné courage, santé et volontariat, pour notre pérennité de cet humble et humble cheminement.

Nos dédions cet humble travail, en particulier à nos pères et mères, pour leurs sacrifices, leur patience, leur présence et leur soutien tout au long des années de notre vie. Vous mourez protection et pain.

A tous sans amis sans exception. Remerciements particuliers au "Dr. Serhoud Hisham" pour sa confiance et son soutien dans la réalisation de ce travail et surtout pour son fils sur cette question. Enfin, une grâce spéciale à nos collègues du département, à tous les professeurs un par un, et à tous ceux que nous connaissons.

Sommaire

Page	
Dédicace	I
Remerciements	II
Sommaire	III
liste de figure	IV
Liste de Tableau	V
Listes des symboles et abréviations	VI
Abréviation utilisée	VII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
I.1.Introduction	3
I.2.Energie solaire	3
I.3.Rayonnement solaire	3
I.4.Types de Rayonnement	4
I.4.1.Rayonnement direct	4
I.4.2.Rayonnement diffus	4
I.4.3.Rayonnement réfléchi	4
I.4.4.Rayonnement global	4
I.5.Spectre du Rayonnement solaire	4
I.6.L'effet photovoltaïques	5
I.7. La cellule PV	6
I.7.1 Définition d'une cellule solaire	6

I.7.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïques	7
I.7.3 Types des cellules PV	8
I.7.3.1. Cellules mono-cristallines	8
I.7.3.2. Cellules poly-cristallines	8
I.7.3.3. Cellules amorphes	9
I.7.4. Rendement d'une Cellules	9
I.8.Générateur photovoltaïques GPV	10
I.9 Modélisation D'un Cellule photovoltaïques	10
I.9.1.Cas d'une cellule idéale	10
I.9.2 Cas d'une cellule réelle	11
I.9.3 Regroupement des cellules	13
I.9.3.1.Regroupement en série	13
I.9.3.2 Regroupement en parallèle	14
I.9.3.3 Regroupement mixte(série et parallèle)	15
I.10.Simulation d'une cellule photovoltaïques réelle	15
I.10.1.Caractéristique d'une module photovoltaïques KC200GT utilisé	15
I.11.Influence des paramètres internes et externes sur le GPV	16
I.11.1.Influence de l'éclairement sur le GPV	16
I.11.2.Influence de la température sur le GPV	17
I.12.Facteur de forme ,FF	18
I.13.Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïques	18
I.13.1.Les avantages de l'énergie photovoltaïques	18
I.13.2.Les inconvénients de l'énergie photovoltaïques	19
I.14.Conclusion	20

Chapitre II : Poursuite du point de puissance maximale	
II.1.Introduction	22
II.2.Les convertisseurs DC-DC(hacheurs)	22
II.2.1.Définition	22
II.2.2.Hacheur survolteur	23
II.2.3.Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC (survolteur)	24
II.2.4.Avantages du convertisseur « BOOST »	26
II.3.Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC	26
II.3.1.Définition de l'MPPT	26
II.3.2.Principe du MPPT	27
II.3.3.Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max	28
II.3.3.1.Les méthodes indirectes	28
II.3.3.2.La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur	28
II.3.3.3.La méthode de court-circuit	28
II.3.3.4.Les méthodes directes	29
II.3.3.5.La méthode Perturbe & Observe (P&O)	29
II.3.3.6 Résultats de la simulation de la MPPT	31
II.4.Conclusion	33
Chapitre III : Commande scalaire du moteur asynchrone alimenté par une source photovoltaïque	
III.1.Introduction	35
III.2.Modélisation de la MAS	35
III.2.1.Description	35
III.2.2.Hypothèses simplificatrices	36

III.2.3 Equation générale de la machine	37
III.2.3.1.Equations des tensions	37
III.2.3.2.Equations des flux	37
III.2.3.3.Equations mécaniques	37
III.3.Modélisation de l'onduleur	38
III.3.1.Mise en equation	38
III.3.2.Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion	39
III.3.3.Commande MLI sinus – triangle	39
III.3.4.Avantages de la commande MLI	40
III.3.5.Principe de commande par hystérésis	41
III.4.Commande de la machine asynchrone	41
III.4.1.Commande scalaire d'une MAS	41
III.4.2.Principe de la Commande scalaire	41
III.4.3. Commande scalaire en tension	42
III.4.4. Résultats de la simulation	44
III.4.5. Interprétation des résultats	47
III.4.6. Commande scalaire en courant	48
III.4.7. Résultats de la simulation	49
III.5. Conclusion	52
Conclusion générale	
Conclusion générale	54

Liste Des Figures

<i>Chapitre I</i>	
Figure I.1 : Types de rayonnement solaire.....	4
Figure I.2 : Distribution spectrale du rayonnement solaire.....	5
Figure I.3 : Schéma illustratif de l'effet photovoltaïque.....	5
Figure I.4 : Représentation schématique d'une cellule solaire.....	6
Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.6 : Cellule solaire de type mono- cristalline.....	8
Figure I.7 : Cellule solaire de type poly-cristalline.....	8
Figure I.8 : Cellule solaire de type amorpha.....	9
Figure I.9 : Composants d'un GPV.....	10
Figure I.10 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	11
Figure I.11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	12
Figure I.12 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	14
Figure I.13 : Caractéristique courant tension de (N _p) cellule en parallèle.....	15
Figure I.14 Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.....	15
Figure I.15 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	16
Figure I.16 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	17
Figure I.17 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	17
Figure I.18 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	18

<i>Chapitre II</i>	
Figure II.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire.....	22

Figure II.2 : Convertisseur DC-DC	23
Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	23
Figure II.4: Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert	23
Figure II.5 : Simulation d'un convertisseur DC-DC (survolteur).....	24
Figure II.6 : Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC (survolteur).....	25
Figure II.7 : Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC (survolteur).....	25
Figure II.8 : rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.....	25
Figure II.9 :Schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque.....	26
Figure II.10: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	27
Figure II.11: Principe de la commande MPPT.....	27
Figure II.12 : Convergence vers le PPM par P&O.....	29
Figure II.13: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O.....	30
Figure II.14: Simulation de MPPT Avec Hacheur Boost.....	31
FigureII.15 : Variation de l'éclairement.....	31
FigureII.16 : Température d'un panneau solaire.....	31
FigureII.17 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque pour un éclairement et Température variable.....	32
FigureII.18 : Courant de sortie du générateur photovoltaïque pour un éclairement et Température variable.....	32
FigureII.19 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque pour un éclairement et Température variable.....	32
FigureII.20 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC pour un éclairement et Température variable.....	33

Chapitre III

Figure III.1 : Description du moteur asynchrone (catalogue Leroy-Somer).....	35
Figure III.2 : Représentation des enroulements de la MAS triphasé dans l'espace électrique.....	36
Figure III.3 : Onduleur avec charge.....	38
Figure III.4 : Principe de la MLIST.....	39
Figure III.5 : Description de la commande M.L.I. sinus – triangle.....	40
Figure III.6 : Principe de commande par hystérésis.....	41
Figure (III.7) : Caractéristique (V/f).....	42
Figure III.8 : Simulation de la commande scalaire en tension de la MAS avec générateur Photovoltaïque commandé par MPPT.....	44
Figure III.9 : Variation de la température	44
Figure III.10 : Variation d'éclairement.....	45
Figure III.11 : Courbe de puissance de PV	45
Figure III.12 : Courant de PV.....	45
Figure III.13 : Tension de PV.....	46
Figure III.14 : Couple électromagnétique.....	46
Figure III.15 : Vitesse de rotation rad/sec.....	46
Figure III.16 : Les courants i_a, i_b, i_c de la machine.....	47
Figure III.17 : Courbe de tension de Vdc.....	47
Figure III.18 : Caractéristique courant couple à flux constant.....	48
Figure III.19 : Simulation de la commande scalaire en courant.....	49
Figure III.20 : Variation de la température.....	49
Figure III.21 : Variation d'éclairement.....	50
Figure III.22 : Courbe de puissance de PV.....	50
Figure III.23 : Courant de PV.....	50

Figure III.24 : Tension de PV.....	51
Figure III.25 : Couple électromagnétique.....	51
Figure III.26 : Vitesse de rotation ω_m	51
Figure III.27 : Les courants i_a, i_b, i_c de la machine.....	52
Figure III.28: Courbe de tension de V_{dc}	52

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Différent types des cellules avec leur rendement.....	9
Tableau (I.2) : Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards.....	16
Tableau 3: Le paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant.....	55
Tableau 4: Paramètres de la machine asynchrone.....	55

Liste des symboles

η : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_m : La puissance produite par le générateur PV ;

ESTC : L'éclairement absorbé par la cellule ;

E : L'énergie d'un photon

λ : la densité d'énergie solaire.

h : la constante de planck.

c : la vitesse de la lumière.

I : Courant

P : puissance

L : Inductance

R : Résistance de la charge

f : fréquence

PV : Photovoltaïque

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Curent).

GPV : Générateur photovoltaïque

PPM : Le point de puissance maximale

DC-DC : Convertisseur continu/continu

R_s, L_s : résistance et inductance propre d'une phase statorique

R_r, L_r : résistance et inductance propre d'une phase rotorique

M_{ss} : coefficient demutuelle inductance entre deux phases de stator

M_{rr} : coefficient de mutuelle inductance entre deux phases de rotor

M_{sr} : maximum de l'inductance mutuelle entre d'une phasede stator et une phase du Rotor

L_s : inductance cyclique statorique

L_r : inductance cyclique rotorique

T_r : constante de temps rotorique

M : inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

P : nombre de paires de pôles

J : moment d'inertie ramené sur l'axe moteur

Résumé

Ce travail présente la performance d'un générateur photovoltaïque sous les différentes conditions climatiques (température et irradiation) et lors son raccordement avec un moteur asynchrone. Pour injecter de la puissance réelle produite par le GPV a la machine a induction en utilisant la commande scalaire.

Le système photovoltaïque comporte un convertisseur DC-DC commandé par MPPT P&O et un onduleur à deux niveaux commandés par MLI pour la commande scalaire en tension et par comparateur a hystéréses pour la commande scalaire en courant. Le régulateur de la tension

De bus continue à prouver son efficacité dans le maintien une vitesse de référence pour la commande de la machine.

Les résultats des simulations et des tests et justifient l'adéquation du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Mots de clés :

Générateur photovoltaïque, Convertisseurs DC-DC, MPPT, Onduleur, commande scalaire, Machine asynchrone

Abstract: This work presents the performance of a photovoltaic generator under different climatic conditions (temperature and irradiation) and its connection to an asynchronous motor. It aims to inject the real power produced by the PV generator into the induction machine using scalar control.

The photovoltaic system consists of a DC-DC converter controlled by MPPT (Maximum Power Point Tracking) P&O (Perturb and Observe) algorithm and a two-level inverter controlled by PWM (Pulse Width Modulation) for scalar control in voltage, and by a hysteresis comparator for scalar control in current. The continuous bus voltage regulator proves its effectiveness in maintaining a reference speed for machine control.

The simulation and test results justify the suitability of the system under different operating conditions.

Index Terms : PV array, MPPT, Boost Converter, Onduleur, V/F-controlled, Machine asynchrone.

خلاصة: يقدم هذا العمل أداء مولد الطاقة الشمسية تحت مختلف ظروف المناخ (درجة الحرارة والإشعاع) وأثناء توصيله بمحرك غير متزامن. لحقن الطاقة الفعلية التي ينتجها مولد الطاقة الشمسية في آلة التحريض باستخدام التحكم السلمي.

يتكون النظام الكهروضوئي من محول DC-DC يتم التحكم فيه بواسطة MPPT P&O ومحول ذو مستويين يتم التحكم فيه بواسطة MLI للتحكم السلمي في الجهد وبواسطة مقارنة بالتعتير للتحكم السلمي في التيار. يثبت مُنظم الجهد المستمر فعاليته في الحفاظ على سرعة مرجعية للتحكم في الآلة.

تبرر نتائج المحاكاة والاختبارات ملائمة النظام تحت ظروف التشغيل المختلفة.

الكلمات المفتاحية: مُولّد طاقة شمسية، محولات التيار المستمر-التيار المستمر، تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) ، مُحوّل، تحكُّم سلمي، آلة غير متزامنة.

Introduction Générale

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Les consommations vont continuer à augmenter soit en terme électrique ou économique.

Les énergies renouvelables (le vent, le soleil, la biomasse, les chahuts d'eau) sont autant des ressources naturelles et illimité, utilisables pour générer de l'énergie électrique.

Le rayonnement solaire est reparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans un système de pompage d'eau alimenté par des panneaux solaires, il y a deux étapes. La première étape consiste à simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT : perturbation et observation) pour assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

Dans la deuxième étape, la machine a induction est contrôlé par la commande scalaire v/f basé sur la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale. La fréquence d'onduleur est commandée pour commander la fréquence de stator de la machine et stable la tension de bus continue

Le système proposé permet à un consommateur d'obtenir une quantité d'eau quelle que soit la durée ou les conditions climatiques. Les résultats de simulation justifient l'adéquation du système dans différentes conditions de fonctionnement.

***Chapitre I : Généralité sur le système de
photovoltaïque***

I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque est causée par le mouvement direct de la lumière solaire vers l'énergie électrique par des cellules généralement basées sur le silicium cristallin, qui reste le secteur technologique et industriel le plus avancé, et en fait le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur Terre sous forme de silicium toxique.

Aux fins de la définition, le mot " photovoltaïque " vient du grec "voltaïque", qui signifie "lumière" et "tension", dérivé à l'origine du nom du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827), qui a contribué de manière significative à la découverte de l'électricité, et puis le photoélectrique littéraire signifie électricité lumineuse.

I.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO₂. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité. Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité. C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu C'est en 1839 qu'Antoine Becquerel a découvert que les matériaux semi-conducteurs étaient capables de transformer l'énergie solaire en électricité ? C'est ce que l'on nomme l'effet photovoltaïque.

I.3. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80%d'hydrogène, 19%d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine D'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium ; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes disperses sous forme de rayonnement.[1]

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre,

Sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K :

- Diamètre de soleil $D_s = 1.39.10^9\text{m}$;
- Diamètre de la terre $D_t = 1.27.10^7\text{m}$;
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts} = 1.5. 10^{11}\text{m}$.

I.4. Types de rayonnement

I.4.1 Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

I.4.2 Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

I.4.3 Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo(ϵ) 0.

I.4.4 Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffus et réfléchi.

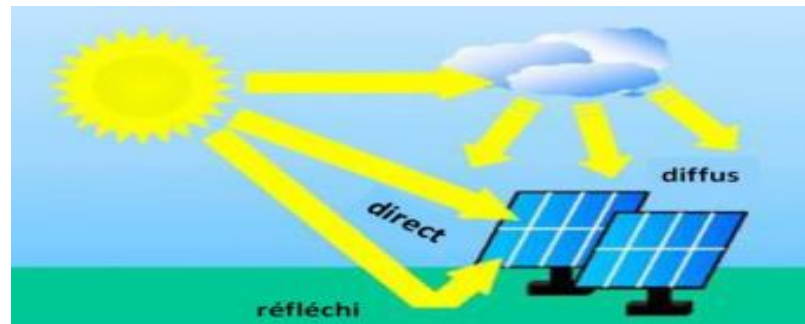


Figure.I.1 : Types de rayonnement solaire.

I.5. Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

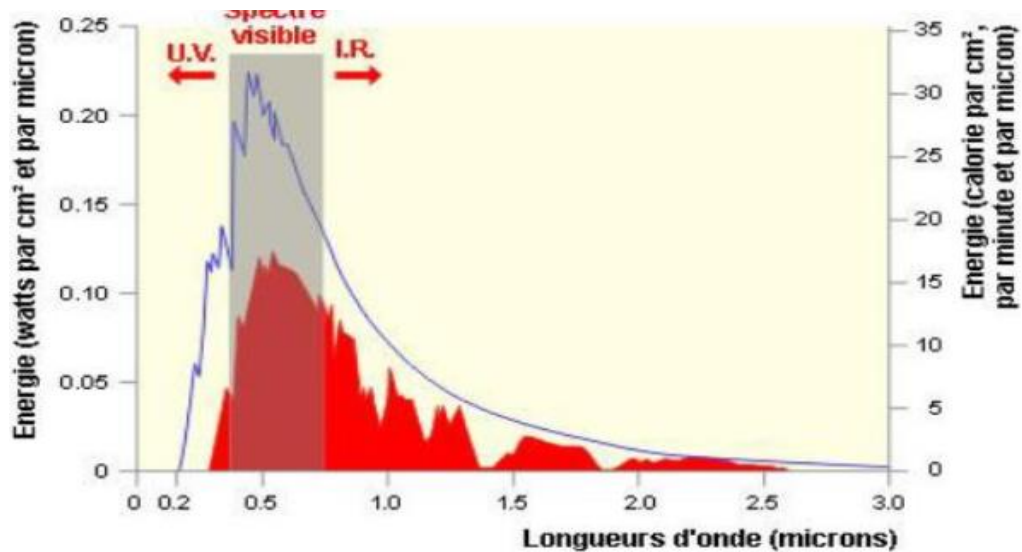


Figure.I.2 : Distribution spectrale du rayonnement solaire.

I.6. L'effet Photovoltaïque

Découvert par le physicien Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Cet effet est propre à certains matériaux appelés "**semi-conducteurs**". Le plus connu d'entre eux est le silicium utilisé pour les composants électroniques.[2]

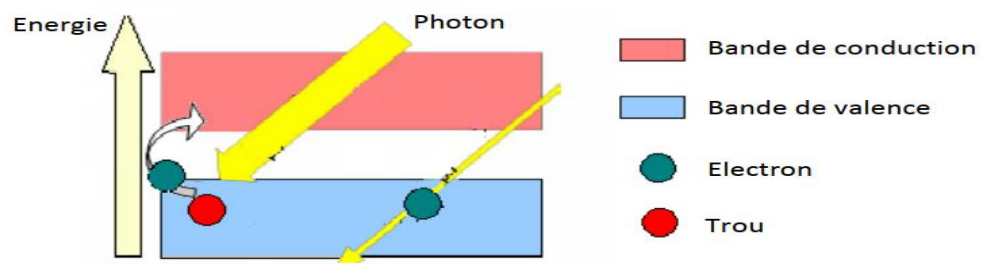


Figure I.3 : Schéma illustratif de l'effet photovoltaïque.

Lorsque les "grains de lumière" (les photons) heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière (Fig. I. 3). Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap E_g de ce semi-conducteur ($E_g = E_c - E_v$), avec E_c l'énergie de la bande de conduction et E_v l'énergie de la bande de valence), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électrons-trou. Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie très inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

1.7. La cellule PV

1.7.1. Définition d'une cellule solaire

Une cellule solaire (cellule photovoltaïque) est un composant optoélectronique qui convertit directement le rayonnement solaire en une énergie électrique et cela grâce à un processus qui s'appelle l'effet photovoltaïque qui a été découverte par le physicien français Edmond Becquerel en 1839, le composant principale qui constitue la cellule solaire est le silicium qui est un semi-conducteur très utilisé dans l'industrie électronique (diode, thyristor, transistor) car c'est un matériau qui possède des propriétés intermédiaire entre le conducteur et l'isolant, la cellule solaire est constitué par trois zone : zone dopé N, zone dope P, la zone de charge espace . [2]

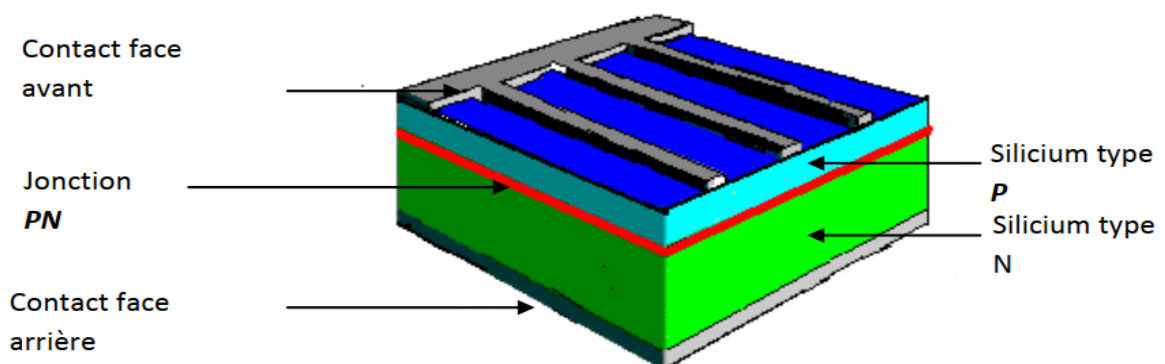


Figure I.4: Représentation schématique d'une cellule solaire.

1.7.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage.

D'une part, la couche supérieure de la cellule, qui est composée de Silicium, est appelée la zone N. Dans cette couche, il existe une plus grande quantité d'électrons libres supérieur à la couche de silicium pur : on dit que cette couche est dopée N. En effet, ces derniers est négative, à cause des électrons. Cependant, le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau du cristallin qui supporte une charge positive. D'autre part, la couche inférieure de la cellule, qui est, aussi, composée Silicium, est appelée la zone P. Dans cette couche, il existe une moins grande quantité d'électrons libres par rapport à la couche de silicium pur. Les électrons sont liés au réseau cristallin qui est donc chargé positivement.

Lorsque la lumière arrive sur le panneau solaire, elle dépose des photons. Ces derniers sont à l'origine de la rupture entre les atomes de Silicium et les électrons, ce qui modifie les charges électriques : on appelle ceci l'effet photovoltaïque.

Les atomes qui sont, eux chargé positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargé négativement vont dans la zone N. Une différence de tension électrique entre les électrons et les protons est alors créée.[1]

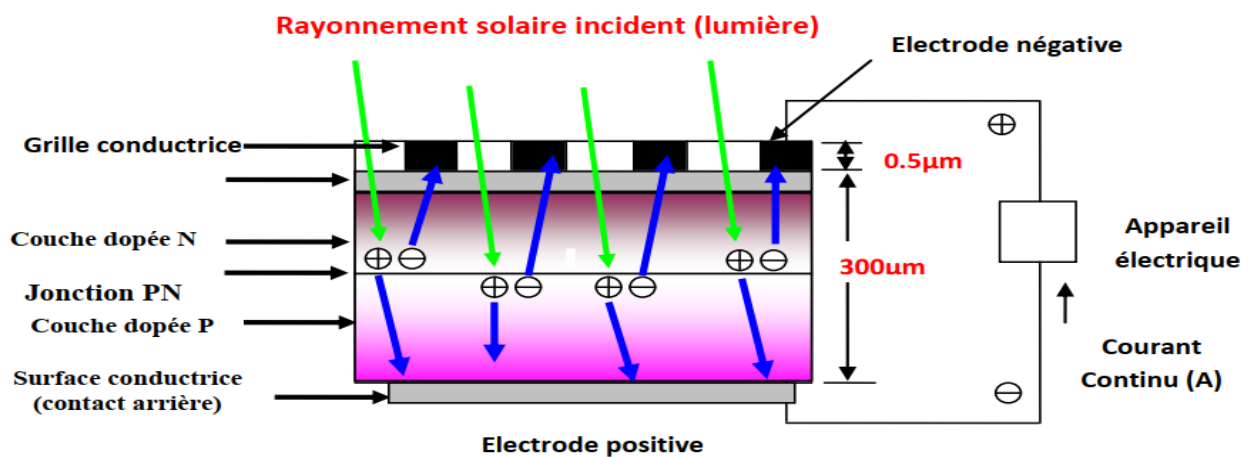


Figure I.5: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

1.7.3. Types des cellules PV

Il existe différents types de cellules photovoltaïques avec des rendements et des coûts divers. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. On peut citer Trois principaux types de cellules actuellement utilisées.[1]

1.7.3.1 Cellules monocristallines

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée (Voir Figure I.6).

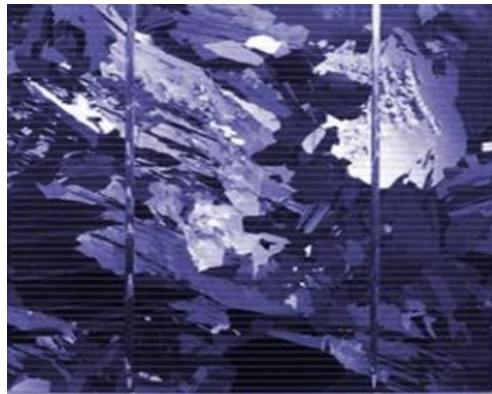


Figure I.6: Cellule solaire de type mono- cristalline.

1.7.3.2 Cellules polycristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%) (Voir Figure I.7).



Figure I.7: Cellule solaire de type poly-cristalline.

I.7.3.3 Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation telles que les calculatrices solaires ou encore les montres (Voir Figure I.8).

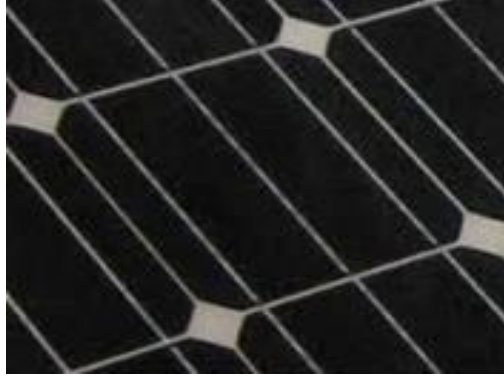


Figure I.8: Cellule solaire de type amorphes.

I.7.4 Rendement d'une cellule

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

Type de cellule	Rendement en Laboratoire	Rendement de Production
Silicium amorphe (a-si)	13%	5 – 6%
Silicium monocristallin (m-si)	24.7%	13 – 17%
Silicium poly cristallin (p- si)	19.8%	11 – 15%

Tableau (I.1) : Différent types des cellules avec leur rendement.

$$\eta_{\text{stc}} = \frac{P_m}{E_{\text{stc}} \times S_{\text{cellule}}} \quad (\text{I.1})$$

Où :

η_{stc} : Rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : Puissance produite par le générateur PV.

S_{cellule} : Surface de la cellule [m²].

E_{stc} : Éclairement absorbé par la cellule.

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

I.8. Générateur photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (**figure I.9**) Les modules PV sont habituellement branchés en série parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.[11]

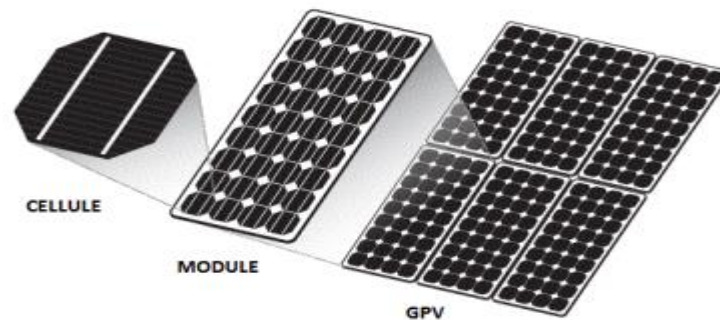


Figure. I.9: Composants d'un GPV.

I.9. Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque

I.9.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode. Ce générateur est délivré un courant I_{ph} selon la figure (**I.10**), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

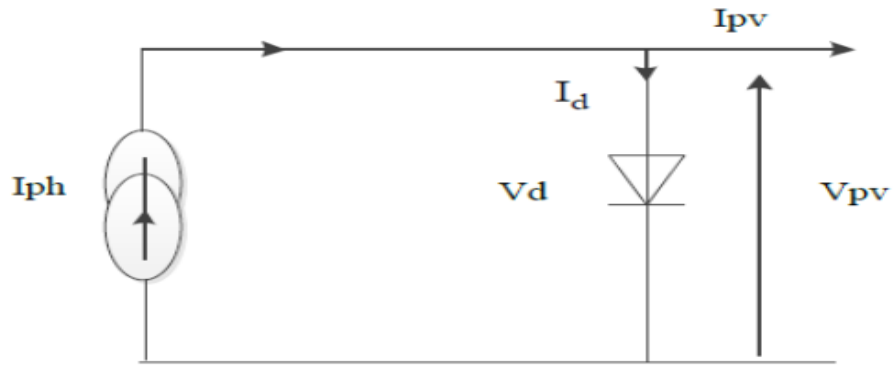


Figure. I.10: Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- Les équations retenues de ce modèle sont :

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

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad (I.3)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$E_{réf}$: L'éclairement de référence (1000 w/m^2) ;

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.4)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (I.5)$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

K : Constant de Boltzmann ($1,38. 10^{-23} \text{ J/K}$) ;

q : Charge de l'électron ($1,6. 10^{-19} \text{ C}$) ;

I.9.2. Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (I.11).

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

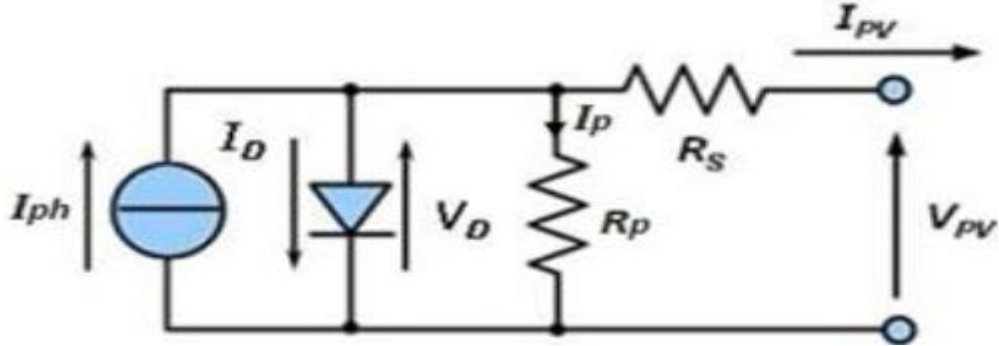


Figure.I.11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple. Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.6)$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.7)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{B_K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (I.8)$$

I_{0r} : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence $E_{réf}$;

T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$] ;

T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}K$] ;

B : facteur d'idéalité de la jonction ;

E_g : Énergie de gap [ev] ;

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (I.9)$$

$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (I.10)$$

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

V_{pv} : La tension de sortie ;

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p ;

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de la cellule.

Les résistances R_s et R_p sont calculées par une boucle de programmation

En substituant les équations (I.7 ; I.10) dans l'équation (I.6) le courant I_{pv} devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (I.11)$$

Où :

V : Tension de sortie de la cellule.

I : Courant de sortie de la cellule.

I_{ph} : Courant photo-générer ou photo-courant.

I_0 : Courant de saturation de la diode.

R_s : Résistance série(Ω).

R_p : Résistance parallèle(Ω).

I.9.3 Regroupement des cellules

I.9.3.1 Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série figure (I.12) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires [11]

De chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{CO} = N_s * V_{CO} \quad (I.12)$$

$$I_{CC} = I_{sc} \quad (I.13)$$

V_{CO} : Représente la tension en circuit ouvert de la cellule/module photovoltaïque.

N_s : Le nombre de cellules connectées en série.

V_{oc} : La tension en circuit ouvert d'une cellule individuelle.

I_{sc} : Représente le courant en court-circuit de la cellule/module photovoltaïque.

I_{cc} : Le courant en court-circuit d'une cellule individuelle.

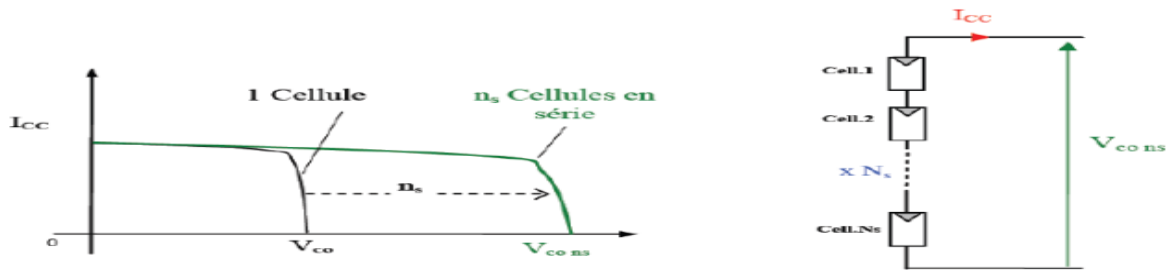


Figure 1.12 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

I.9.3.2 Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (I.13) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. [11]

Avec :

$$I_{cc} N_p = N_p * I_{cc} \quad (I.14)$$

$$V_{co} N_p = V_{co} \quad (I.15)$$

$I_{cc} N_p$: Représente la somme des courants de court-circuit de cellules en parallèle.

N_p : Le nombre de cellules connectées en parallèle.

I_{cc} : Le courant de court-circuit d'une cellule individuelle.

$V_{co} N_p$: Représente la somme des tensions en circuit ouvert de cellules en parallèle.

V_{co} : La tension en circuit ouvert d'une cellule individuelle.

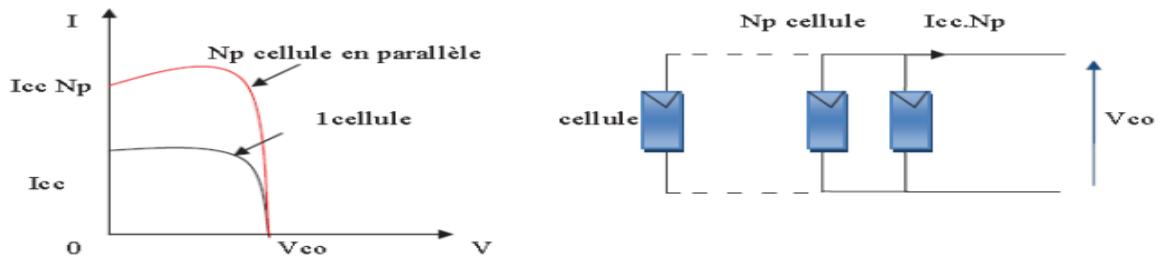


Figure I.13: Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle.

I.9.3.3 Regroupement mixte (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

I.10. Simulation d'une cellule photovoltaïque réelle

I.10.1. Caractéristique du Module photovoltaïque KC200GT utilisé

Nous avons choisi le module KC200GT composé de 54 cellules en silicium monocristallin connectées en série ayant une puissance maximale de 200.143w est considéré dans les conditions standards $G=1000\text{w/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

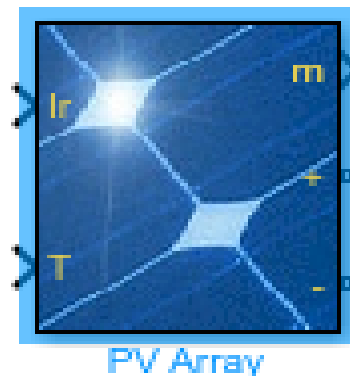


Figure I.14 Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.

I_{mp}	7.61 A
V_{mp}	26.3 V
$P_{max,e}$	200.143 W
I_{sc}	8.21 A
V_{oc}	32.9 V
K_v	0.1230 V/K
K_I	0.0032 A/K
N_s	54

Tableau(I.2) : Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards.

I.11 Influence des paramètres internes et externes sur le GPV

I.11.1 Influence de l'éclairement sur le GPV

Le générateur PV a été modélisé de façon suivante : 4 strings en parallèle ; chaque string comprend 5 modules en série.

La figure (I.15) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$. À température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

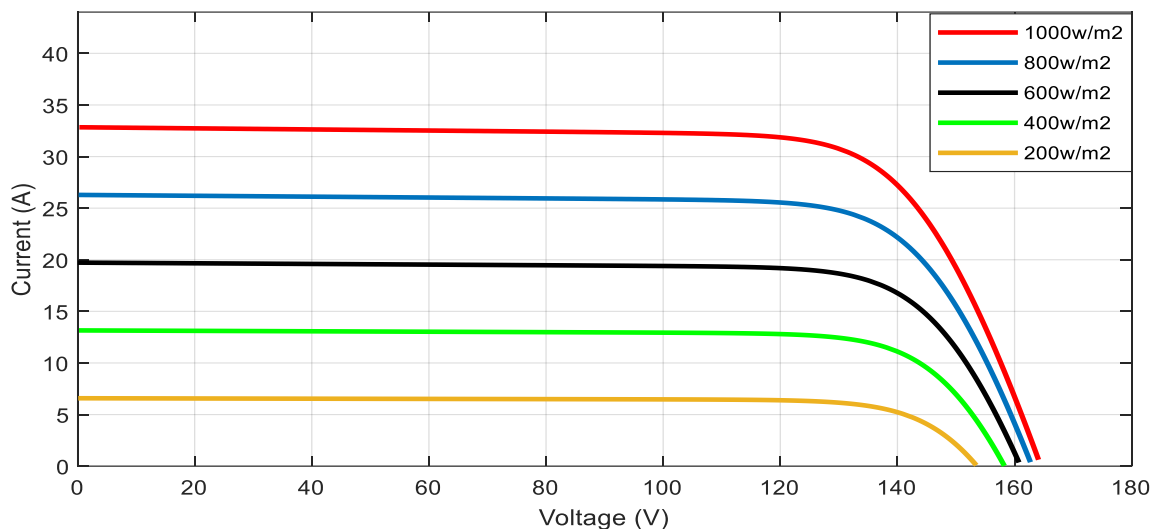


Figure I.15 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

La figure (I.16) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

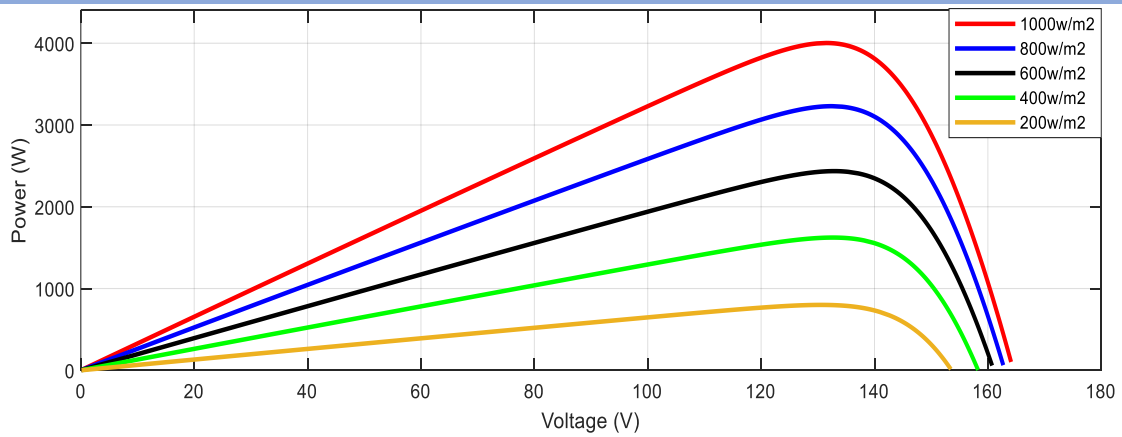


Figure I.16 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

On remarque aussi sur la figure (I.15) ,(I.16) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

I.11.2 Influence de la température sur le GPV

La figure (I.17) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

Le courant de court-circuit dépend légèrement de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit Ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par Conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

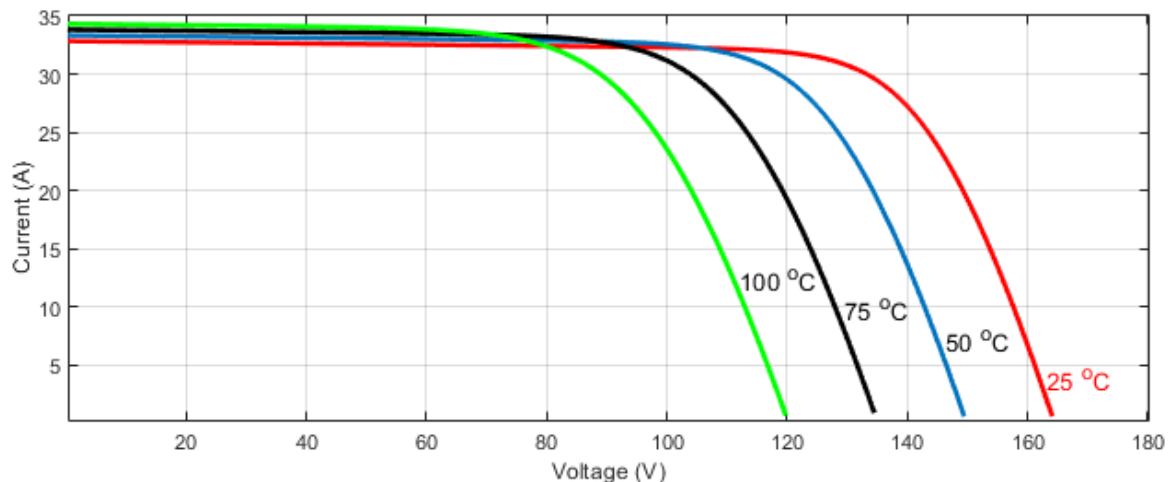


Figure I.17 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

La figure (I.18) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

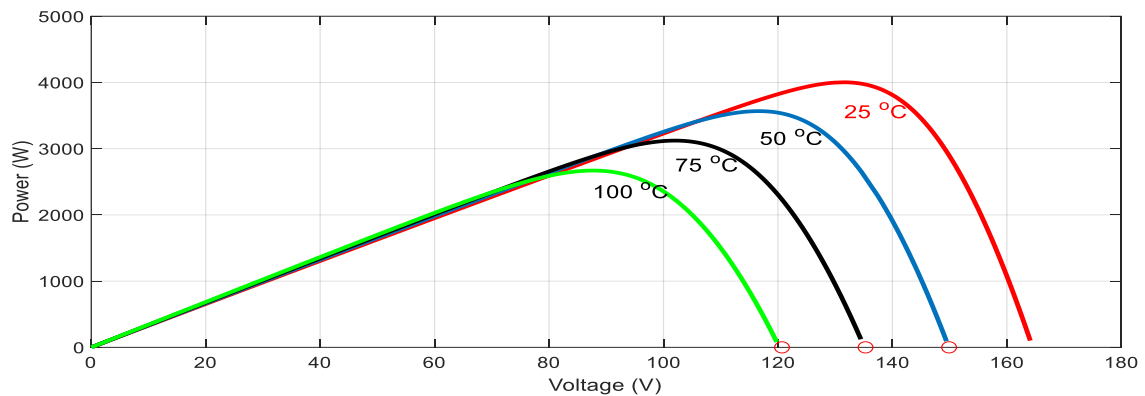


Figure I.18 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

On constate d'après la figure (I.17), (I.18) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

Le modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

I.12.Facteur de forme, FF

Le facteur de forme où le facteur de remplissage où Fill Factor FF (%) est utilisé pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule (P_{max}) et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$ (figure I.15). Il est défini par la relation suivante : [11]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.16)$$

P_{max} : La puissance maximale.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

Le FF traduit les pertes provoquées par les résistances série R_s et parallèle R_p de la cellule. Dans le cas limite $FF=1$, la puissance extraite de la cellule est maximale.

I.13. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.13.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.[1]
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

I.13.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif. [1]

I.14 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un générateur photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la composition de la cellule PV et ses différents paramètres. Ensuite nous avons tracé les différentes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque pour voir l'influence de certains paramètres sur les performances du générateur.

Dans le prochain chapitre, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

***Chapitre II : Poursuite du point de puissance
maximale***

II.1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

Le but de ce chapitre est l'étude des quelques types convertisseurs DCDC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC. On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur contre-réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

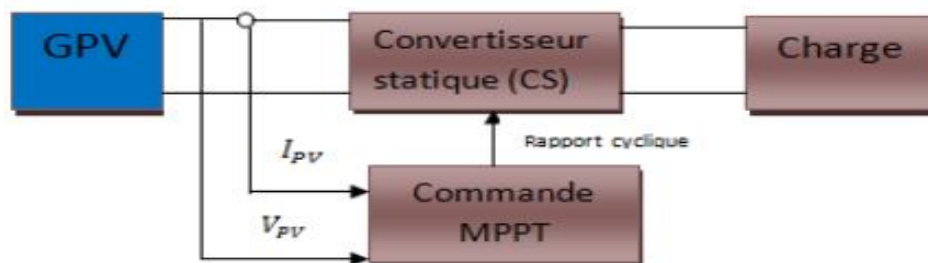


Figure II.1: chaîne de conversion d'énergie solaire.

II.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

II.2.1. Définition

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements élevés pour composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de excessifs dans les être réalisée autour des composants de stockage d'énergie puissance échangée doit commutateurs. Les commutateurs de puissance

(Inductance et condensateurs) et les convertir ou à commander. Les utilisés dépendent du niveau de la puissance à sont habituellement utilisés MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) (transistors bipolaires à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs commander. Gâchette isolée) à des puissances plus élevées.

Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.

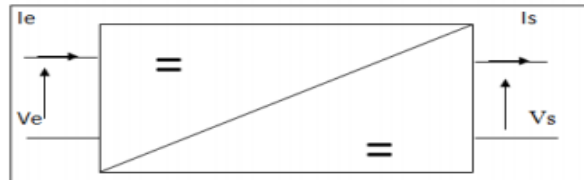


Figure II.2 : Convertisseur DC-DC.

II.2.2. Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.3). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.[4]

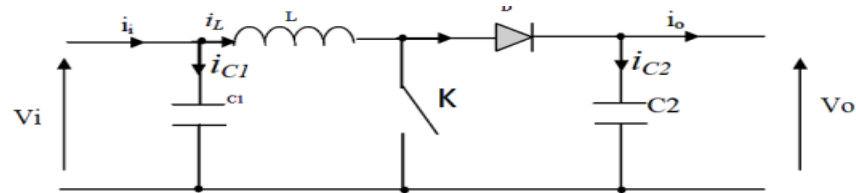


Figure II.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.4) des deux phases de fonctionnement donne :

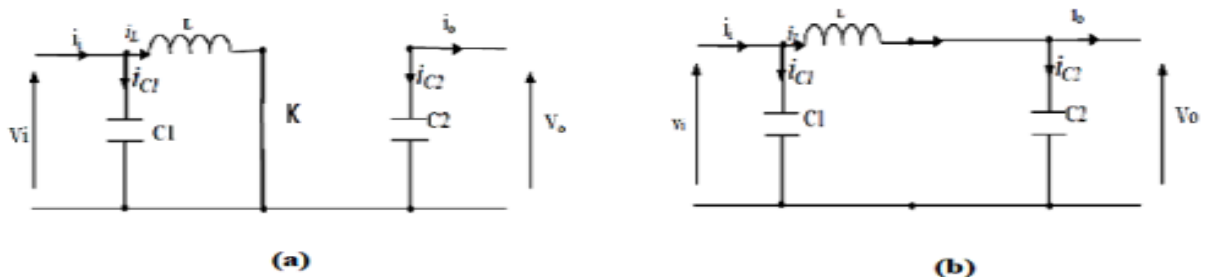


Figure II.4 : Schémas équivalents de le hacheur survolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert.

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt_{DT_s}} dt_s + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1-d)T_s \quad (II.1)$$

Pour la première période dt_s :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (II.2)$$

Pour la deuxième période $(1-d) T_s$:

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (II.3)$$

En appliquant la relation (II.1) sur les systèmes d'équation (II.2) (II.3). Comme

Pour le convertisseur dévolteur. On trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L(t) = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (II.4)$$

II.2.3. Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC (survolteur)

DC Voltage source = 100 V, L= 40e-3, R=100, C= 1200e-6, D = Variable

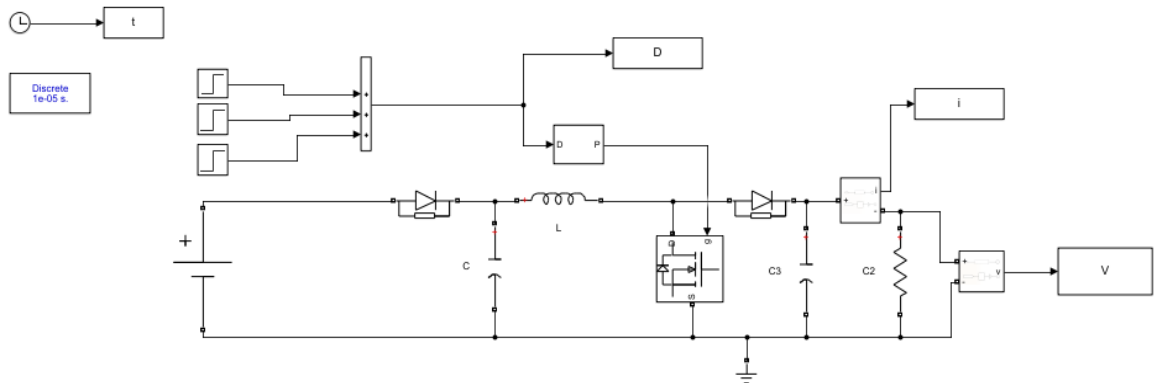


Figure II.5: Simulation d'un convertisseur DC-DC (survolteur).

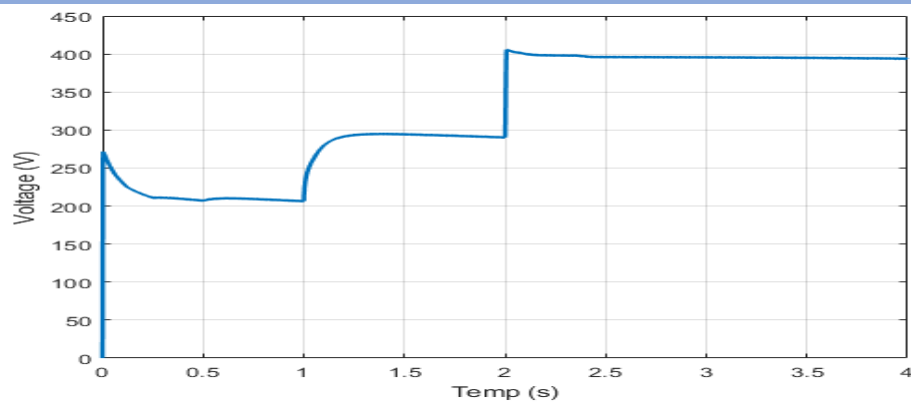


Figure II.6 : Caractéristiques $V(t)$ d'un convertisseur DC-DC (survolteur).

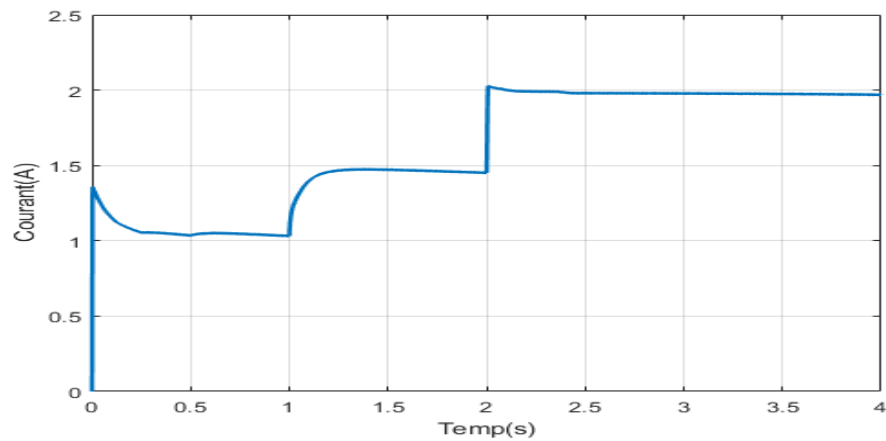


Figure II.7 : Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC (survolteur).

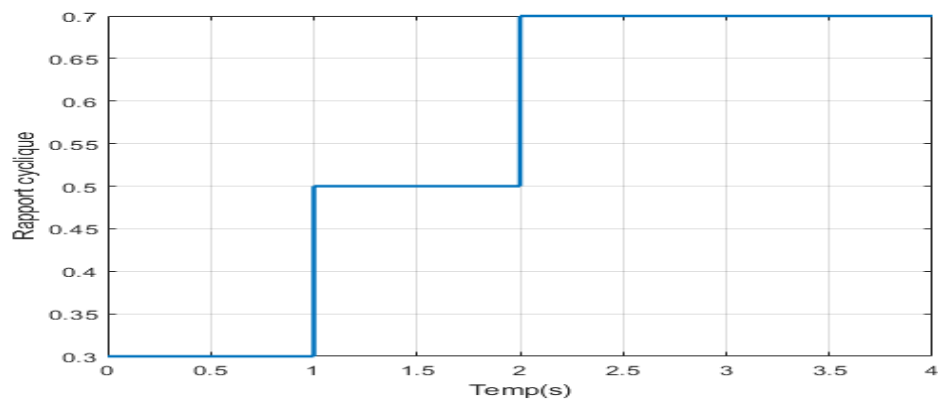


Figure II.8 : rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC

Les figures (II.6 et II.7) représentent des résultats de simulation de convertisseurs boost par une variation paramétrique de rapport cyclique comme le montre la Figure (II.8).

Où l'on remarque une légère oscillation au décollage d'environ 0,01 seconde pour revenir à sa valeur et se fixer à une certaine valeur. Il montre également la relation directe entre les

changements du rapport cyclique, car son augmentation s'accompagne d'une augmentation du niveau de courant et de tension qui sort.

Donc les résultats de le hacheur boost effectué correctement sans rôle puisque la tension de sortie d'hacheur boost est supérieur à celle l'entrée.

II.2.4. Avantages du convertisseur « BOOST »

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. La place disponible étant souvent limitée, il n'est pas toujours possible de disposer d'un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi diminuer le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Les systèmes photovoltaïques sont des exemples typiques d'utilisation des convertisseurs boost.

II.3. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

II.3.1. Définition de l'MPPT

La technique MPPT est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec le générateur photovoltaïque ou encore avec les générateurs éoliens. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.[1]

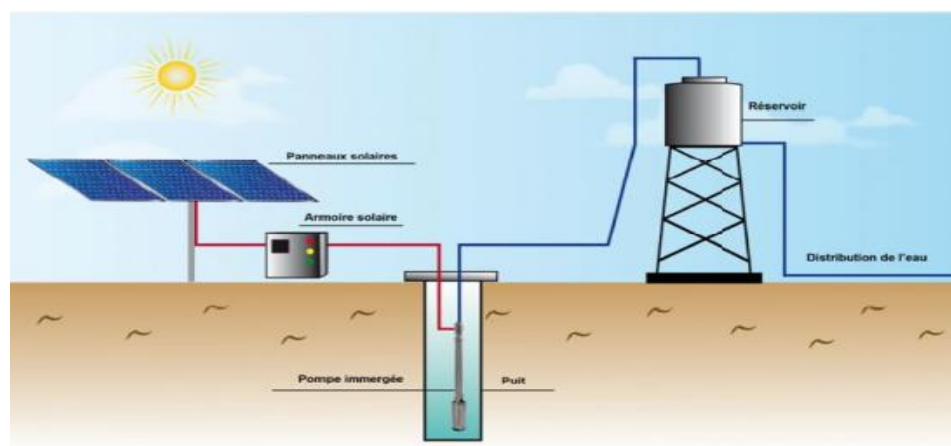


Figure II.9 : Schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque.

II.3.2. Principe du MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la **Figure II.10**. Ture.[1]

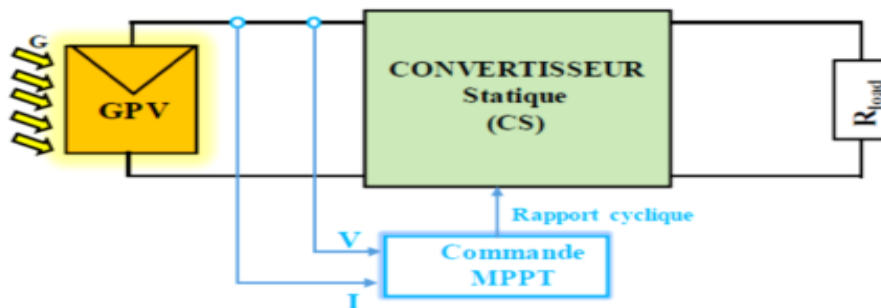


Figure II.10: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP figure (II.11)

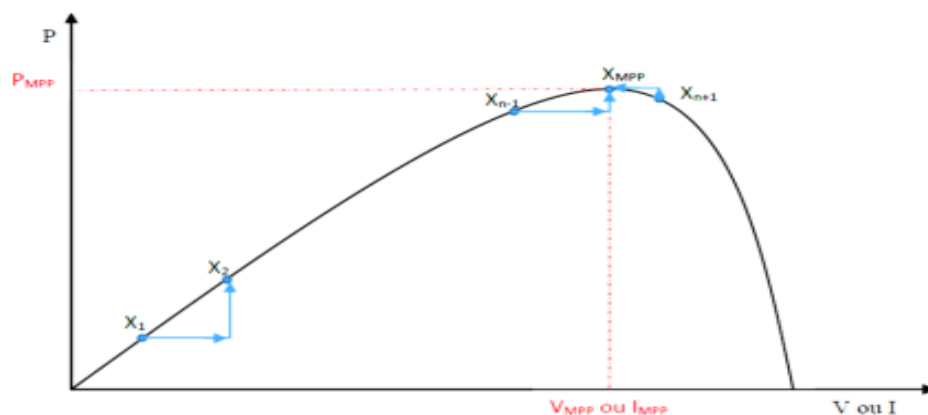


Figure II.11: Principe de la commande MPPT.

II.3.3. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes.[2]

II.3.3.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

II.3.3.2 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle K_1 dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{oc}} = Cte < 1 \quad (II.5)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesuré et stocké en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (II.5), et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de K_1 .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix.

II.3.3.3 La méthode de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existante entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale (II.6) :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{sc}} \approx Cte < 1 \quad (II.6)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une

connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance.

II.3.3.4 Les méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance.

II.3.3.5 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.12), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est, alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

La figure (II.13) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

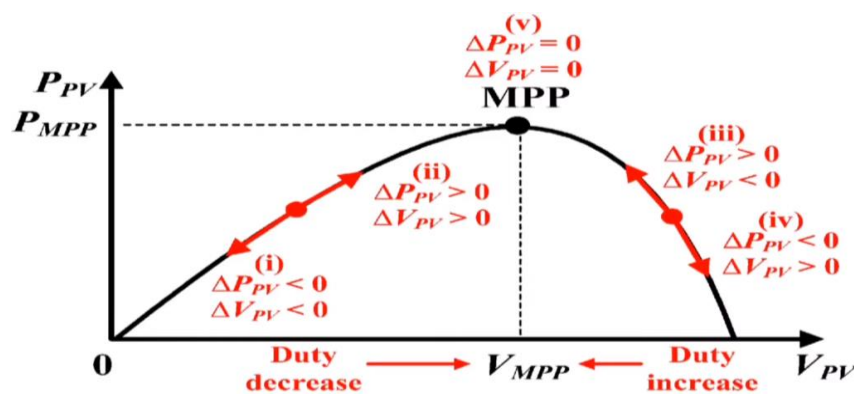


Figure II.12: Convergence vers le PPM par P&O.

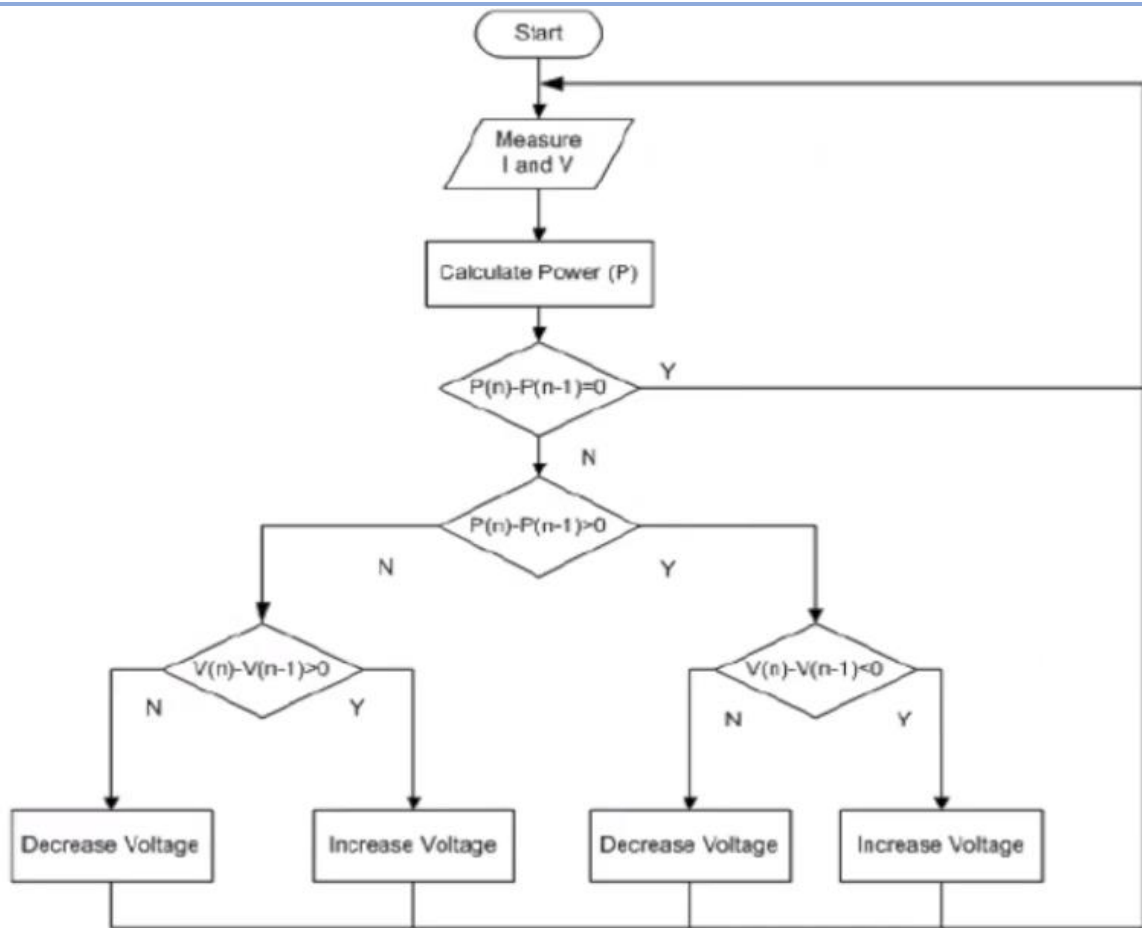


Figure II.13: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O.

Telle que :

P_{pvn} : La nouvelle puissance

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

$$\Delta V = V_{pvn} - V_{pvn-1} \quad (II.7)$$

$$\Delta P = P_{pvn} - P_{pvn-1} \quad (II.8)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, Cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette command difficile à optimiser.

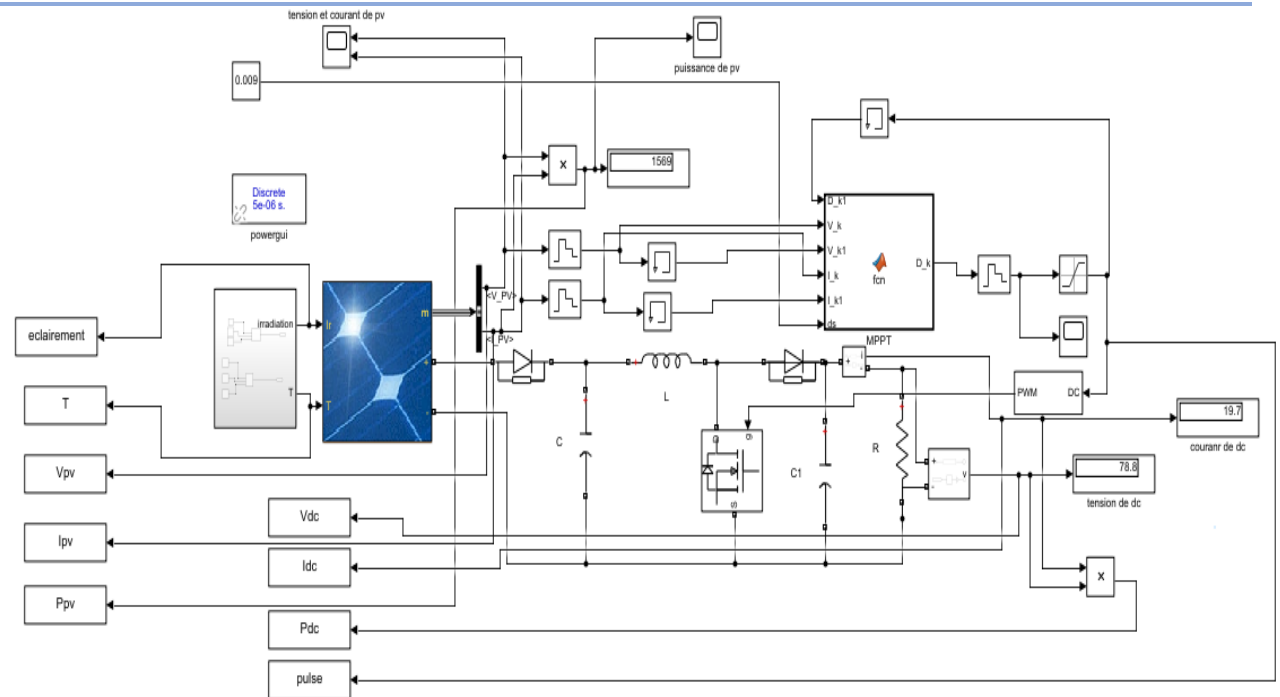


Figure II.14: Simulation de MPPT (P&O) Avec Hacheur Boost.

II.3.3.6 Résultats de la simulation de la MPPT

La résultat obtenue avec la commande P&O représenté dans les Figures suivant :

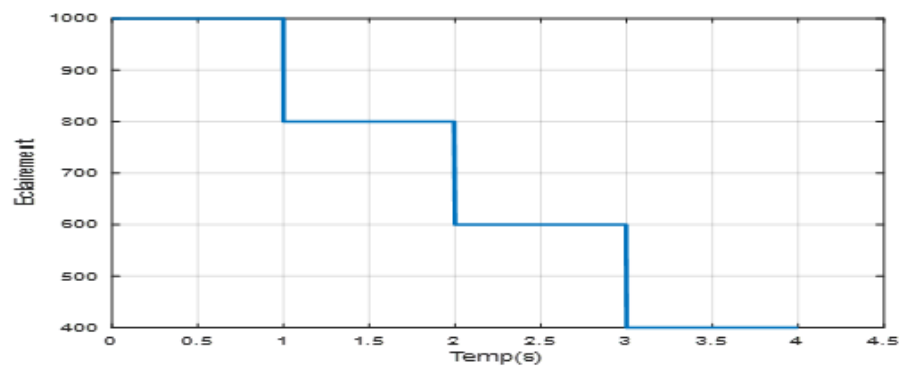


Figure II.15 : Variation de l'éclairement.

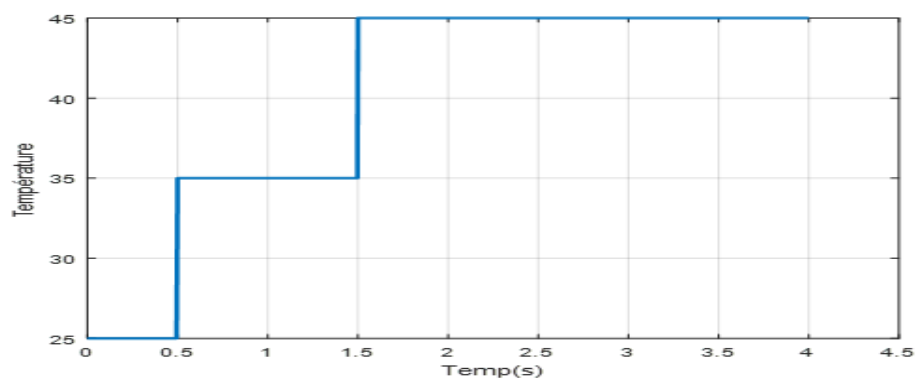
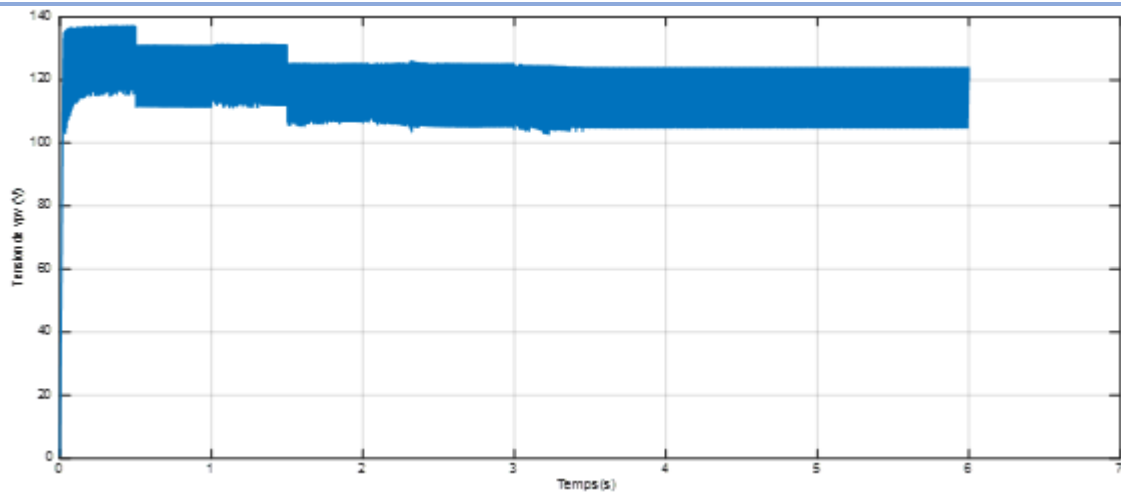
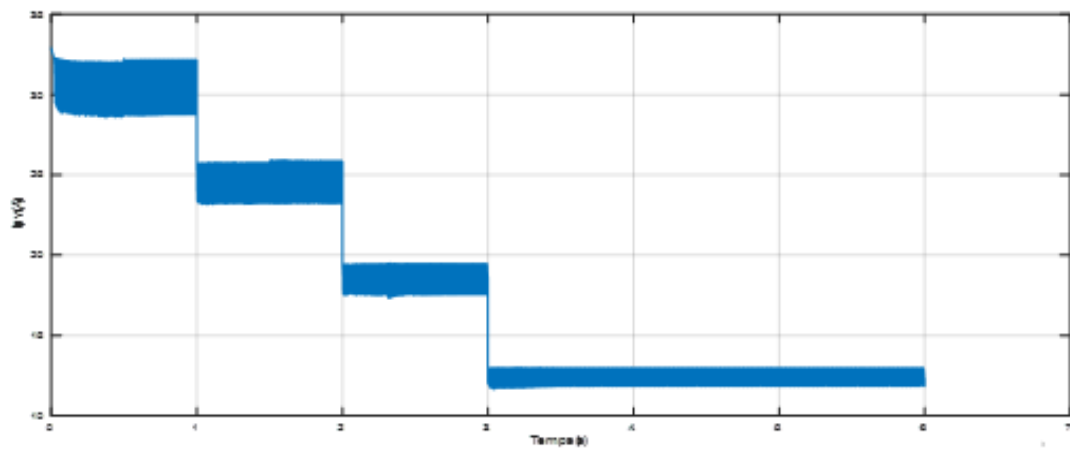


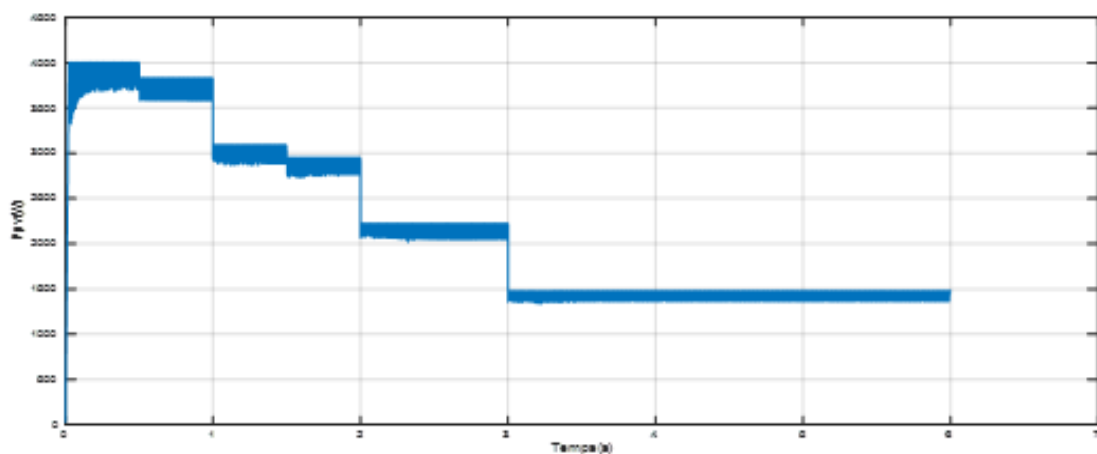
Figure II.16 : Température d'un panneau solaire.



FigureII.17 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque pour un éclairement et Température variable.



FigureII.18 : Courant de sortie du générateur photovoltaïque
Pour un éclairement et Température variable.



FigureII.19 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque pour un éclairement et Température variable.

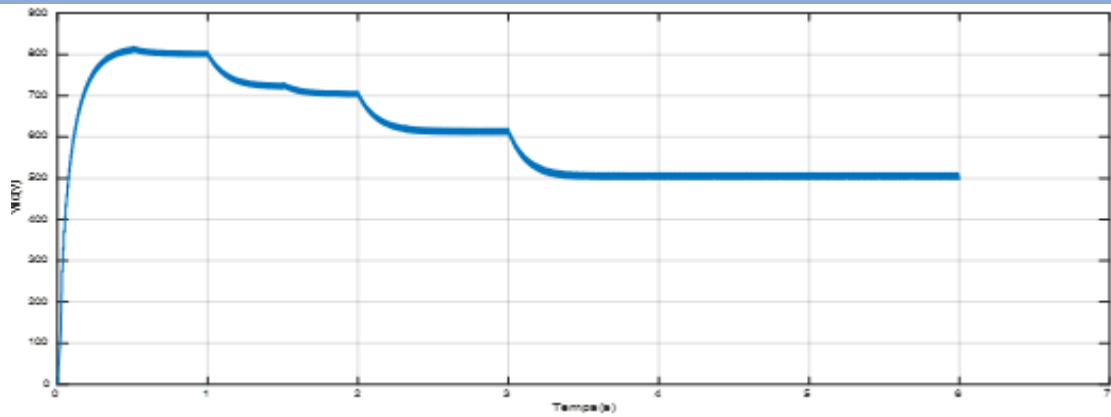


Figure II.20 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC pour un éclairement et Température variable.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur MPPT par la méthode P&O à des meilleures performances comme le montre la figure (II.19), avec petit des oscillations dans le régime permanent, avec un temps de réponse plus rapide.

II.4. Conclusion

L'inconvénient d'un générateur PV et le faible rendement de conversion, parmi les causes qui provoquent ce problème on a la mauvaise adaptation entre la source la charge.

Dans ce chapitre nous avons présenté les convertisseurs DC-DC puis nous avons expliqué plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale et nous avons détaillé relativement la méthode dite 'perturbation et observation' qui sera finalement la méthode utilisée par la suite dans la simulation de notre système.

Ces techniques force le générateur PV à produire en permanence le maximum de sa puissance, et cela grâce à l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale (MPPT).

***Chapitre III : Commande scalaire d'un moteur
asynchrone alimenté par une source
photovoltaïque***

III.1 Introduction

Entrainer des charges à vitesse variable, tout en contrôlant la vitesse ou le couple, est devenu incontournable dans les industries modernes. De la montre au concasseur, en passant par l'électroménager les systèmes de traction, de levage, les applications sont innombrables et variées de même que les solutions techniques. Toutefois, depuis une vingtaine d'années, les entraînements par moteurs électriques connaissent un essor important. Ceci est dû en grande partie aux progrès réalisés dans le domaine de la commande des machines à courant alternatif, et est grâce au développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance, et l'apparition des processus numériques à fréquence élevée et à forte puissance de calcul

Dans ce chapitre, on présentera, dans une première partie, la modélisation d'une machine asynchrone associée à un convertisseur statique (un onduleur à MLI).

La simulation de la machine asynchrone en état sein, ainsi en cas de défaillance à la fin de ce chapitre.

III.2 Modélisation de la MAS

III.2.1 Description

La machine asynchrone dont nous allons étudier sa mise en équation correspond à la structure de principe représentée par la figure (III.1) dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Elle comporte deux armatures à champ tournant cylindriques et coaxiales, séparées par un entrefer constant : l'une est fixée, l'autre est mobile, aussi les appelle-t-on respectivement, stator et rotor.

Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements (as , bs , cs) identiques à " p " paires de pôles. Un moteur asynchrone à cage se présente figure (III.1).[5]

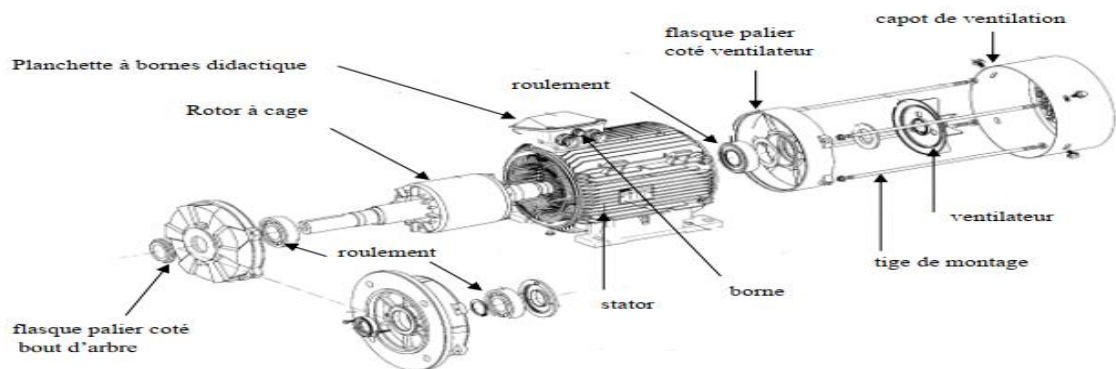


Figure III.1 : Description du moteur asynchrone (catalogue Leroy-Somer).

La structure électrique du rotor peut être réalisée :

- Soit par un système d'enroulement triphasé (rotor bobiné), raccordé en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents.
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage).

Il sera admis que la deuxième structure est électriquement équivalente à la première.

Cependant la structure électrique du rotor est représentée schématiquement par trois Enroulements ar, br et cr en court-circuit.

III.2.2 Hypothèses simplificatrices

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liée aux hypothèses simplificatrices associées.

On adopte les hypothèses suivantes :

- entrefer constant,
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante,
- pertes ferromagnétiques négligeables,
- la constance des inductances propres . . . ,

La figure (III.2) représente la distribution spatiale des enroulements statoriques et rotoriques d'une telle machine asynchrone.[5]

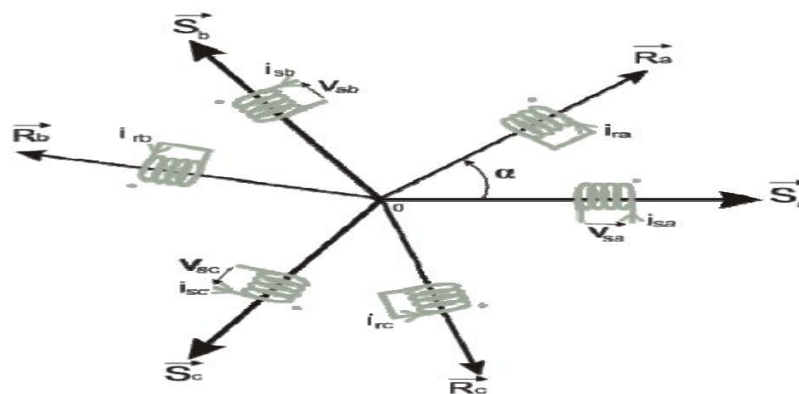


Figure III.2: Représentation des enroulements de la MAS triphasé dans l'espace électrique.

III.2.3 Equation générale de la machine

III.2.3.1 Equations des tensions

Par application de la loi de Faraday à l'un des six enroulements statoriques et rotoriques de la machine, la loi des mailles s'exprime par la relation :

$$V = R_i + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{III.1})$$

On déduit pour l'ensemble des phases, statoriques

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{III.2})$$

Et rotoriques :

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] = [0] \quad (\text{III.3})$$

Le rotor étant en court-circuit ses tensions sont nulles.

III.2.3.2 Equations des flux

La matrice des flux reels fait apparaître quatre sous-matrices d'inductances.

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Finalement :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \quad (\text{III.5})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \{ [M_{sr}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \} \quad (\text{III.6})$$

III.2.3.3 Equations mécaniques

L'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega = C_{em} - C_r \\ \omega = p \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- J : Moment d'inertie du rotor,
- Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor,
- f_r : Coefficient de frottement visqueux,
- C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur,
- C_r : Couple résistant, ou de charge,

➤ ω : Vitesse angulaire électrique du rotor.

III.3. Modélisation de l'onduleur

Le montage donné à figure (III.3) représente un onduleur de tension triphasé. Il est composé de six interrupteurs aux bornes desquels sont montées, en antiparallèle, des diodes de récupération.

Les signaux logiques de commande C_i et C'_i ($i = a, b, c$) fixent les états des interrupteurs, supposés parfaits (par le temps morts à la commutation) et à commandes complémentaires

($C_a = \overline{C'_a}$, $C_b = \overline{C'_b}$, $C_c = \overline{C'_c}$). Ils sont définis comme suit :[20]

$$C_i = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est ouvert} \end{cases}$$

Les relations qui lient la tension continue E , à l'entrée de l'onduleur, aux tensions de lignes délivrées par ce dernier sont

$$\begin{cases} V_{ab} = E (C_a - C_b) \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

$$\begin{cases} V_{bc} = E (C_b - C_c) \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

$$\begin{cases} V_{ca} = E (C_c - C_a) \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

Tandis que le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$i_0 = C_a i_a + C_b i_b + C_c i_c \quad (\text{III.12})$$

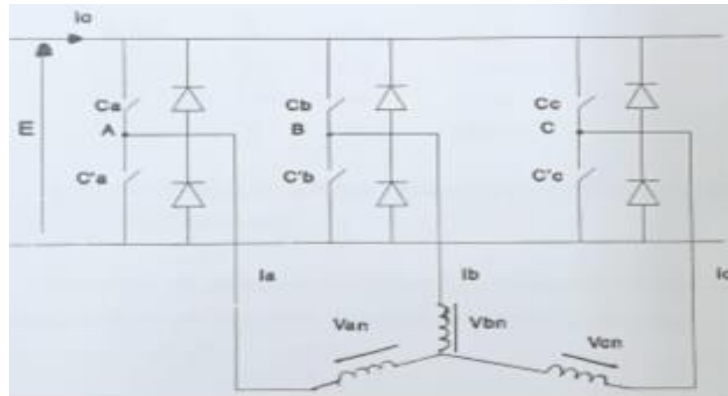


Figure III.3: Onduleur avec charge.

III.3.1. Mise en équation

Le cas de l'onduleur de tension alimentant un moteur triphasé couplé en étoile est envisagé figure (III.3) Le système étant triphasé équilibré

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

L'expression des tensions simples aux bornes du moteur (figure III.3) en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur E et des commandes C_i ($i = a, b, c$) est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \left(\frac{E}{3}\right) \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

III.3.2. Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion

La commande de l'onduleur par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) permet de produire à partir d'une source à fréquence et à tension fixes, des tensions alternatives variables en amplitude et en fréquence, avec un faible taux d'harmoniques.

La technique de commande MLI sinus – triangle va être développée dans cette section.

III.3.3. Commande MLI sinus – triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une bande modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse. Et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s .

Il s'agit d'une modulante sinusoïdale d'amplitude A_r et de fréquence f_r combinée à une porteuse triangulaire d'amplitude A_p de haute fréquence f_p , les angles de commutation de la tension d'entrée d'un pont sont situés aux intersections de la porteuse et de la modulante

Figure (III.4) .[9]

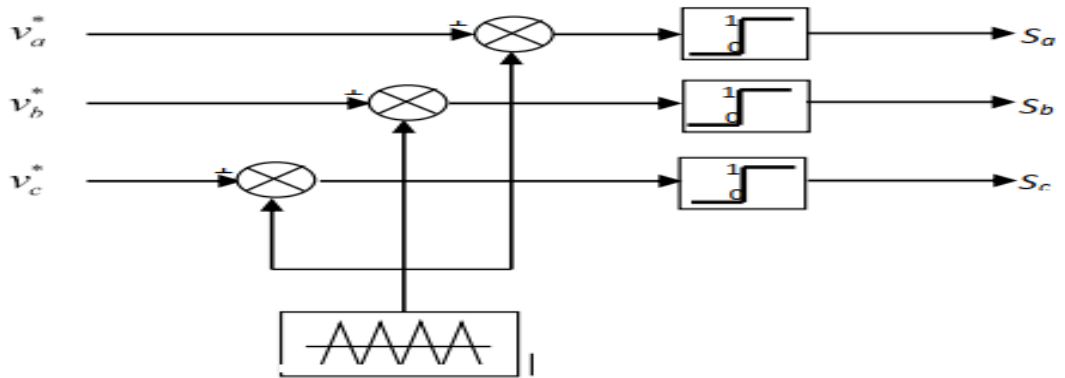


Figure III.4 : Principe de la MLIST

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.14)$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left[-4 \left(\frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (III.15)$$

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation III.15 suivantes :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{si } (V_{rabc} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (V_{rabc} - x(t)) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- 1- L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f_r), ($m = \frac{f_p}{f_r}$).
- 2- Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_r) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_p), $r = \frac{V_r}{V_p}$.

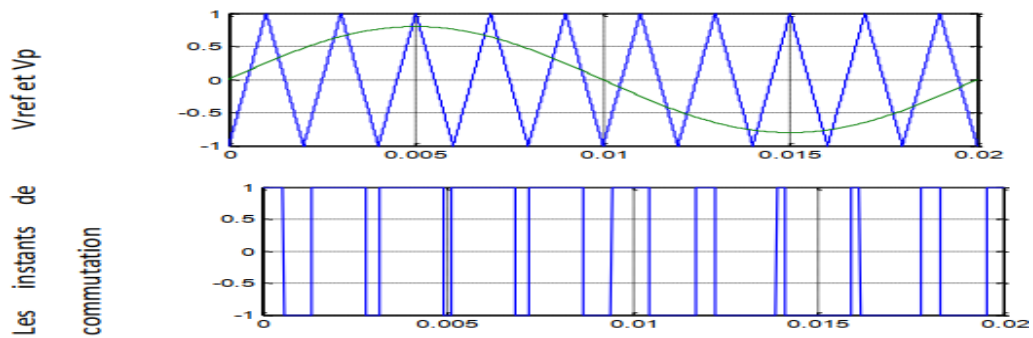


Figure III.5: Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

III.3.4. Avantages de la commande MLI

Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette –MLI sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées

D'autre part les conséquences de ces deux avantages est :

- Minimisation de la distorsion du courant
- Faible coût du filtre de sortie

III.3.5. Principe de commande par hystérésis

Cette méthode fait appel à des régulateurs à hystérésis qui un système de contrôle des courants (flux), les sorties des correcteurs sont directement les ordres de commutations de l'onduleur. Le schéma de principe de cette technique est représenté sur la figure suivante :[7]

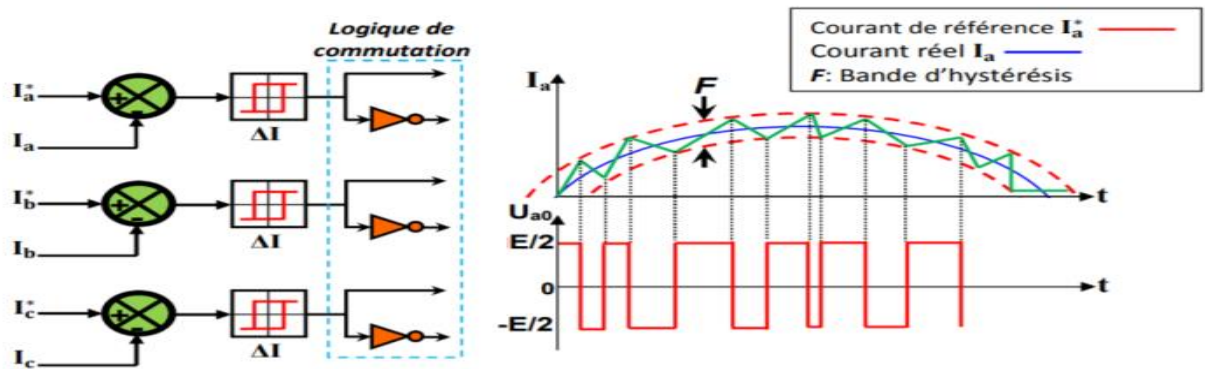


Figure III.6 : Principe de commande par hystérésis.

III.4. Commande de la machine asynchrone

III.4.1. Commande scalaire d'une MAS

La commande scalaire, la plus ancienne et la plus rustique, correspond à des Applications n'exigeant que des performances statiques et dynamiques moyennes. De Nombreux variateurs équipés de ce mode de contrôle sont utilisés, en particulier pour des Applications industrielles de pompage, climatisation, ventilation. Les puissances installées Correspondantes sont importantes.

III.4.2. Principe de la commande scalaire

Le contrôle scalaire de la machine asynchrone consiste à imposer aux bornes de son induit, le module de la tension ou du courant ainsi que la pulsation. Ce mode de contrôle s'avère le plus simple quant à sa réalisation, mais également le moins performant, surtout pour les basses vitesses de fonctionnement. Cependant, au niveau des puissances installées, la plupart des variateurs ne justifient pas un contrôle très performant. Pour des variateurs dans la plage de vitesse ne dépasse pas un rapport de 3 ou 4 entre les vitesses extrêmes (ventilation, climatisation, centrifugeuse...) et pour lesquels il n'y a pas de fonctionnement à vitesse très faible et à fort couple de charge, le contrôle scalaire donne des performances satisfaisantes. Il est donc important de donner certain nombre d'informations sur les variateurs asynchrones avec contrôle scalaire.

Son principe donc est de maintenir V/f Constant ce qui signifie garder le flux constant. Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement.[21]

III.4.3. Commande scalaire en tension

Etudions le comportement de la machine asynchrone en régime permanent le module de la tension statorique est alors :

$$V_s = \phi_s \frac{R_s}{L_s} \sqrt{\frac{\left(1 - \sigma \frac{L_s L_r}{R_s R_r} \omega_s \omega_r\right)^2 + \left(\frac{L_r}{R_r} \omega_r + \frac{L_s}{R_s} \omega_s\right)^2}{1 + \left(\frac{\sigma \omega_r L_r}{R_r}\right)^2}} \quad (\text{III.17})$$

$$\omega_s = \frac{R_s}{L_s} \quad (\text{III.18})$$

Cette relation reste valable entre les valeurs efficaces des tensions et flux statoriques. Elle constitue le principe des lois de commande à flux constant des machines alimentées en tension. On choisit de maintenir, si possible, le flux à sa valeur nominale deux modes de commande sont possibles :

- 1- Une commande par contrôle de la fréquence statorique ω_s et du courant ou de la tension statorique.
- 2- Une commande avec autopilotage et contrôle de la pulsation des courants rotoriques ω_r .

La loi de commande (III.17) permet de maintenir le flux constant, mais elle est trop

Complexe, pour être exploitée sans moyen de calcul puissant. Elle doit être simplifiée. [18] [19]

-Si la pulsation rotorique est très faible ($\omega_r = 0$), alors :

$$V_s = \phi_s \omega_s \sqrt{1 + \left(\frac{R_s}{\omega_s L_s}\right)^2} \quad (\text{III.19})$$

Si, de plus, R_s est négligeable, alors :

$$V_s = \phi_s \omega_s \quad (\text{III.20})$$

Ce qui caractérise une loi de commande en $\frac{V_s}{f_s}$ constante. Si la fréquence statorique f_s

Diminue, alors les réactances de flux de fuite décroissant, par contre la chute de tension

Ohmique ne peut pas être négligée. On compense alors en ajoutant un terme de tension V_0

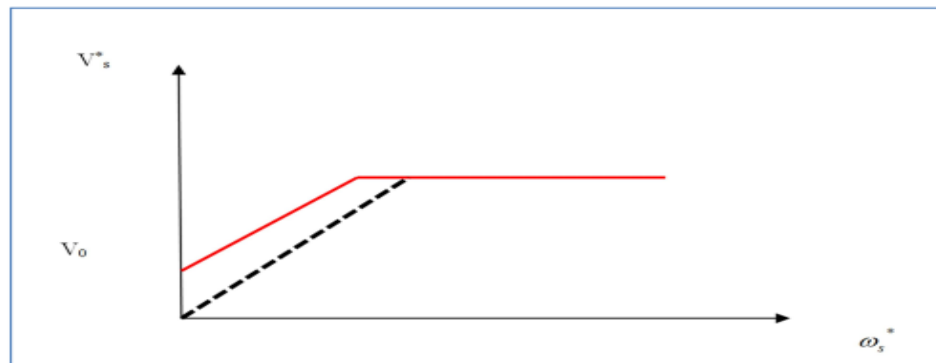


Figure III.7: caractéristique (V/f)

On ajoute souvent un terme correctif pour prendre en compte la pulsation rotorique :

$$V_s = \Phi_s (\omega_s + K\omega_r) \quad (\text{III.21})$$

$$\text{Avec : } K = \frac{R_s L_r}{R_r L_s} \quad (\text{III.22})$$

Pour améliorer le comportement en basse fréquence on peut utiliser la loi suivante :

$$V_s = \Phi_s \left(\omega_s \sqrt{1 + \left(\frac{R_s}{\omega_s L_s} \right)^2} + K\omega_r \right) \quad (\text{III.23})$$

Les lois précédentes assurent un maintien du module du flux en régime permanent en

Régime transitoire elles provoquent des oscillations de flux donc du couple.

Le réguler la vitesse de la machine en reconstituant la pulsation statorique à partir de la vitesse et de la pulsation rotorique.

Cette dernière, qui est l'image du couple de la machine est issue du régulateur de vitesse.

Souvenez-vous que :

$$C_e \approx 3p \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{1}{R_r} g \omega_s = a_g \omega_s = a \omega_r \quad (\text{III.24})$$

Le couple est proportionnel à la pulsation rotorique à flux constant.

Si la machine est chargée, la vitesse a tendance à baisser, le régulateur va fournir plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre. La pulsation statorique est donc modifiée pour garder cet équilibre. La tension est calculée de manière à garantir le mode de contrôle en V/f de la machine.

Le modèle SIMULINK représente le groupement du générateur photovoltaïque, la commande MPPT, le hacheur survolteur, l'onduleur MLI, et le moteur à induction avec la commande scalaire en tension.

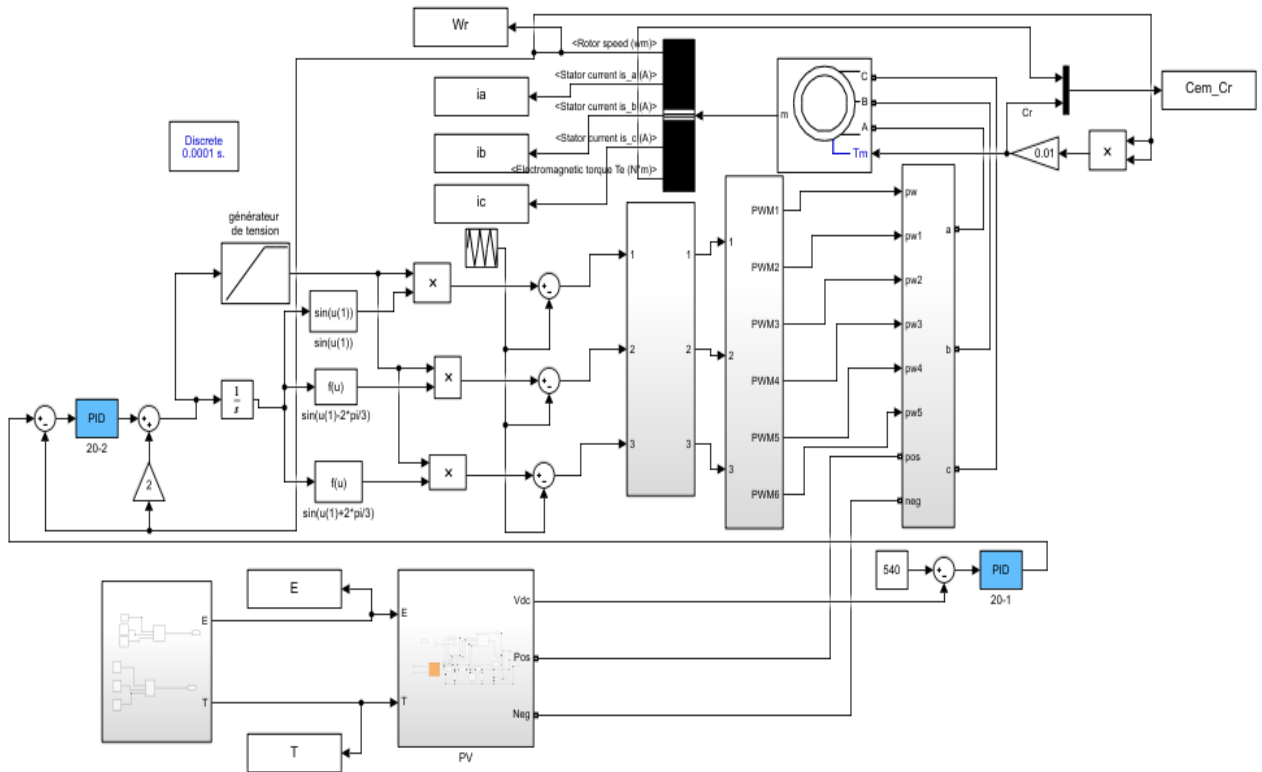


Figure III.8: Simulation de la commande scalaire en tension de la MAS avec générateur Photovoltaïque commandé par MPPT.

III.4.4. Résultats de la simulation

La figure suivante illustre la simulation du système photovoltaïque global avec les Différentes variations de l'éclairement et de la température et l'effet du fonctionnement du Système PV avec MPPT. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe et le module simulé est de marque Kyocera KG200GT.

Le moteur asynchrone fonctionne avec un couple de charge égal au couple de la pompe.

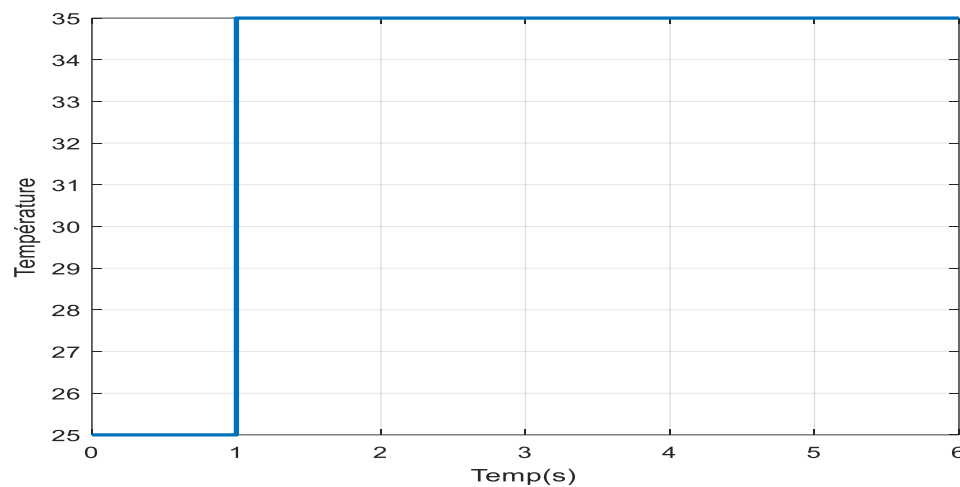
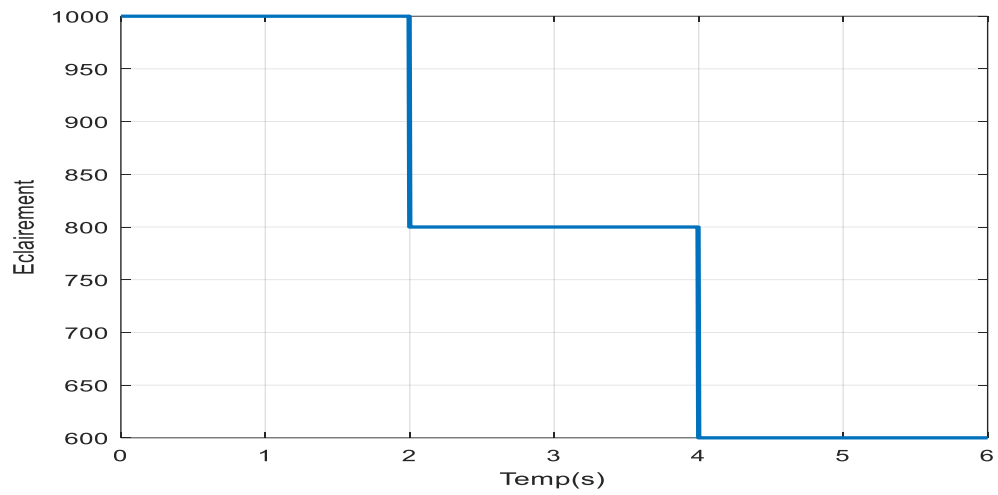
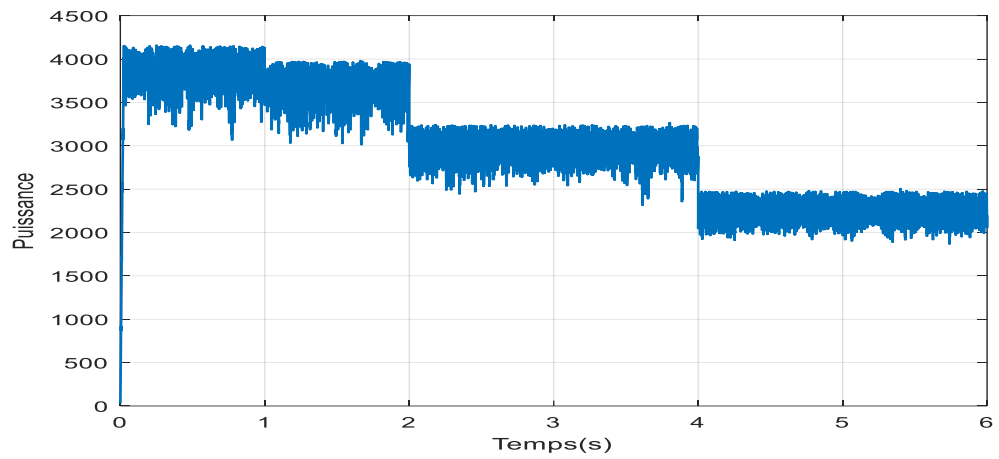
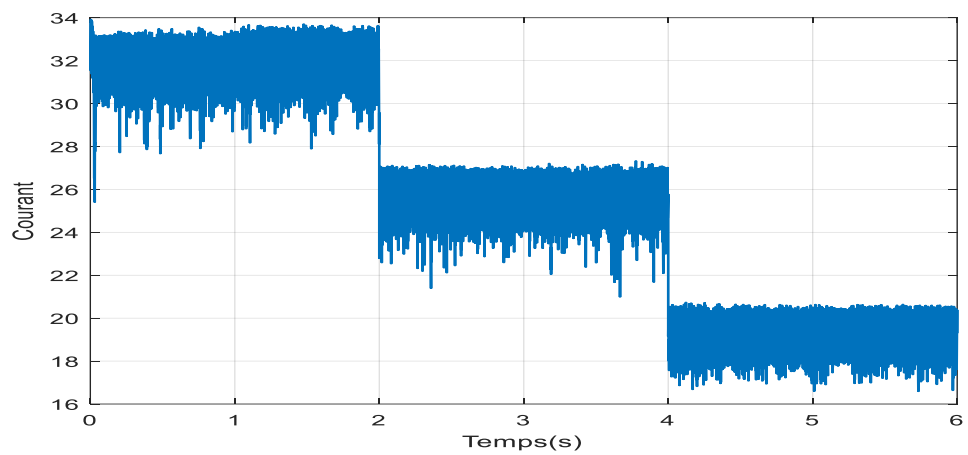
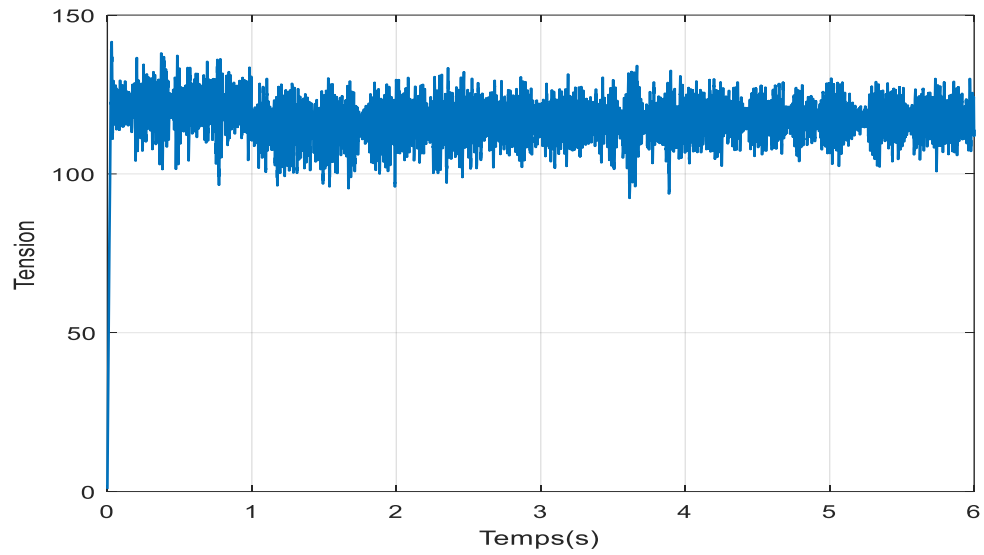
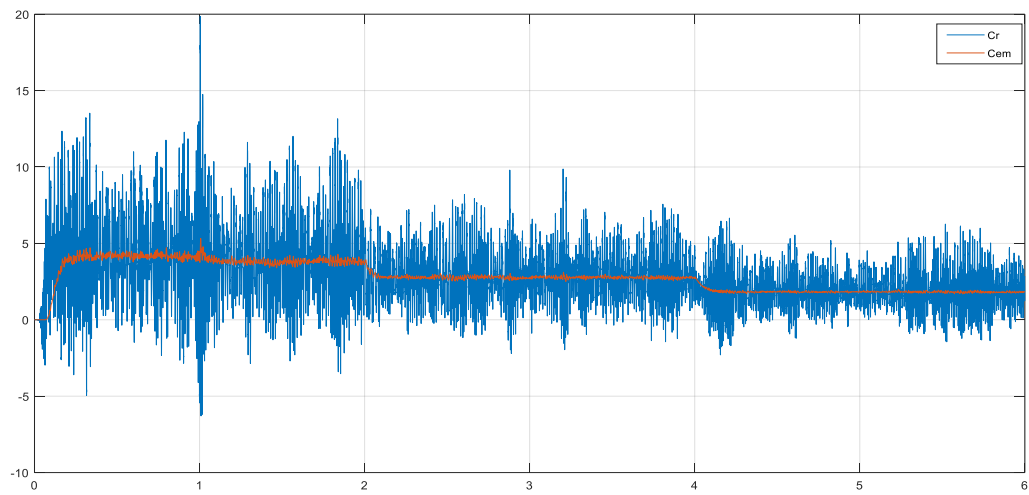
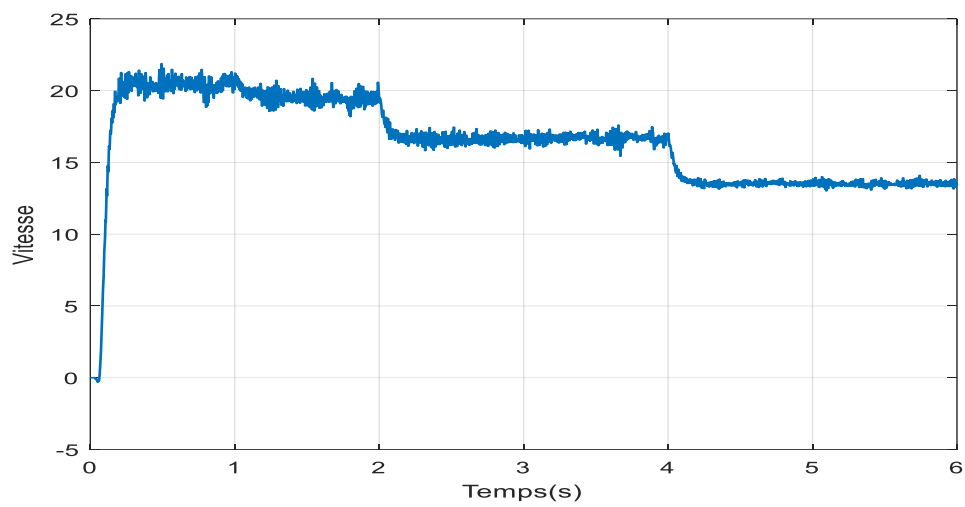


Figure III.9: Variation de la température.

**Figure III.10 :** Variation d'éclairement.**Figure III.11 :** Courbe de puissance de PV.**Figure III.12 :** Courant de PV.

**Figure III.13 : Tension de PV.****Figure III.14 : Couple électromagnétique.****Figure III.15 : Vitesse de rotation rad/sec.**

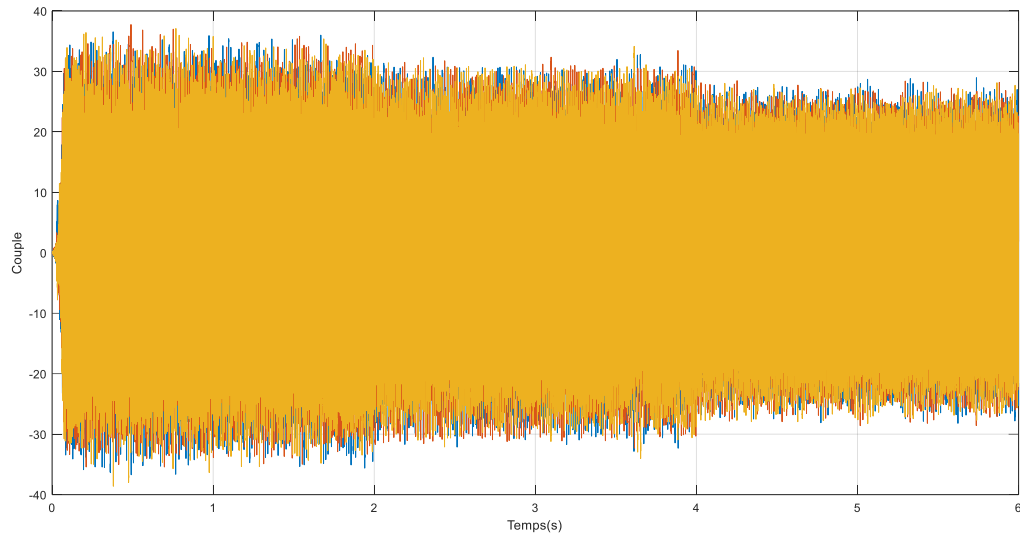


Figure III.16 : Les courants i_a, i_b, i_c de la machine.

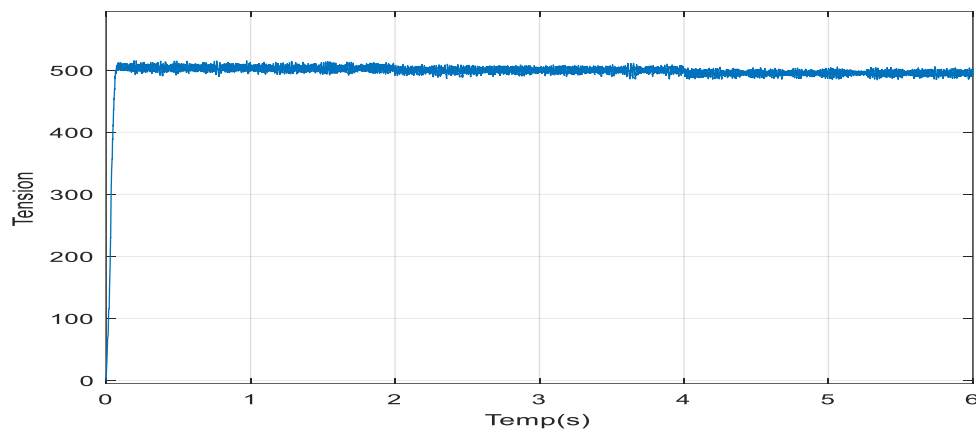


Figure III.17 : Courbe de tension de V_{dc} .

III.4.5. Interprétation des résultats

La (figure III.15) illustre l'allure de la vitesse de la MAS. On remarque que le fonctionnement du moteur est stable. La vitesse de la machine est ne pas de la grande oscillation.

L'augmentation de la température infule négativement sur le rendement du GPV est vitesse de la machine

La (figure III.11-12-13) On remarque la robustesse et la fiabilité du la commande MPPT par la méthode P&O.

(Figure III.17) illustre le hacheur Boost avec onduleur donne une tension continue stable avec les différentes variations de l'éclairement et de la température.

L'onduleur joue aussi le rôle d'adaptateur source-charge lors il a commandé par la technique MLI. Cette nature est due à ce que le moteur et la pompe présentent la même puissance fournie et absorbée respectivement à travers du réglage du tension de bus continu.

(La figure III.14) donne la courbe de variation du couple de charge et le couple du moteur. Le couple électromagnétique fluctue autour d'une valeur moyenne de couple charge.

III.4.6. Commande scalaire en courant

La composante directe du vecteur courant est fixée sur l'axe d ; ce qui entraîne : $I_d = I_s$ et $I_{qs} = 0$

Les équations du modèle de la machine peuvent se mettre alors sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & -M\omega_s \\ \omega_s L_s & M\omega_s & 0 \\ 0 & R_r & -\omega_g L_r \\ \omega_g M & \omega_g L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

On impose soit le flux statorique Φ_s , soit le flux rotorique Φ_r . On obtient les relations suivantes liant le courant statorique, les flux et le couple :

$$\Phi_s = I_s L_s \sqrt{\frac{1 + (\sigma \tau_r \omega_g)^2}{1 + (\tau_r \omega_g)^2}} \quad (III.26)$$

$$\Phi_r = \frac{M}{\sqrt{1 + (\tau_r \omega_g)^2}} I_s \quad (III.27)$$

$$C_{em} = p \frac{M \Phi_r^2 \omega_g}{R_r} \quad (III.28)$$

Les caractéristiques $I_s(\omega_g)$ à Φ_s constant sont indiquées sur la figure (III.18). Pour Φ_s ou Φ_r maintenu constant, le couple électromagnétique C_{em} et le courant statorique I_s ne dépend que de ω_g . [22]

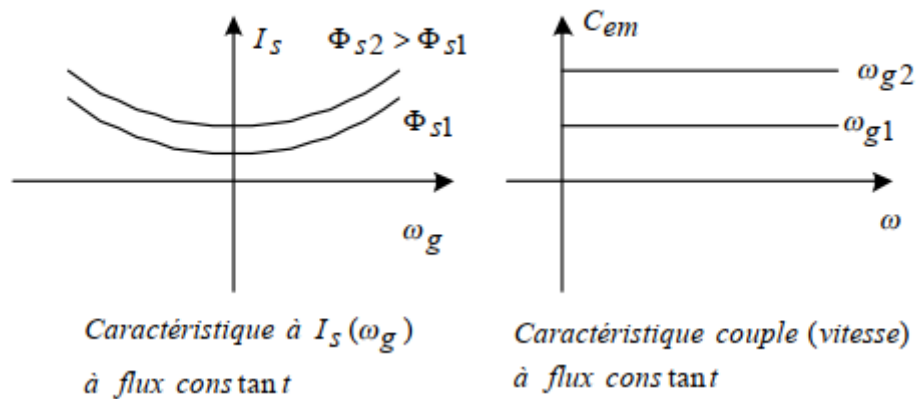


Figure III.18: Caractéristique courant couple à flux constant.

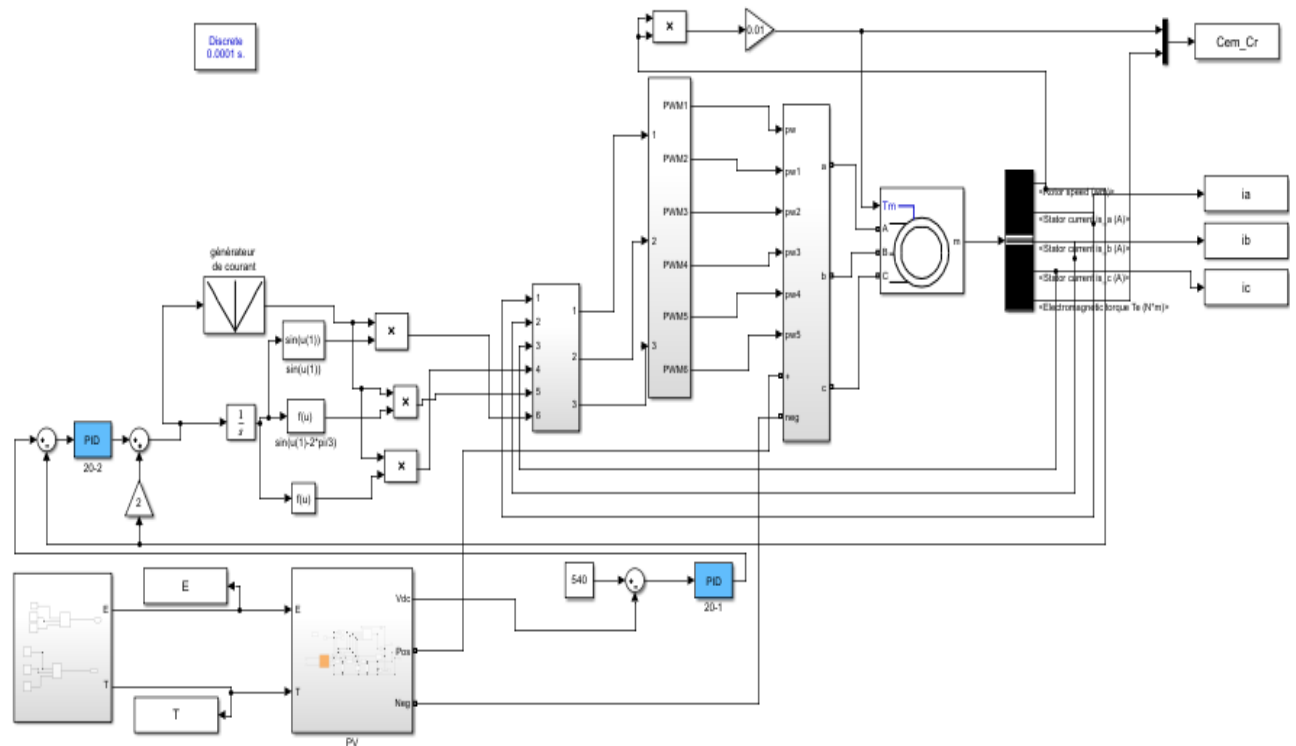


Figure III.19: Simulation de la commande scalaire en courant.

III.4.7. Résultats de la simulation

Les résultats suivants ont été obtenus avec même bloque avec remplacement le type de commande scalaire en tension par la commande scalaire en courant.

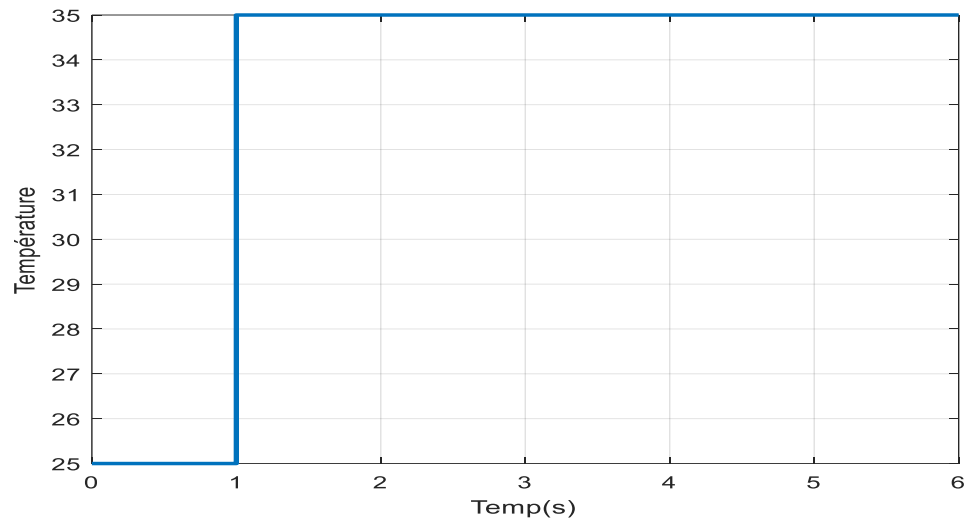
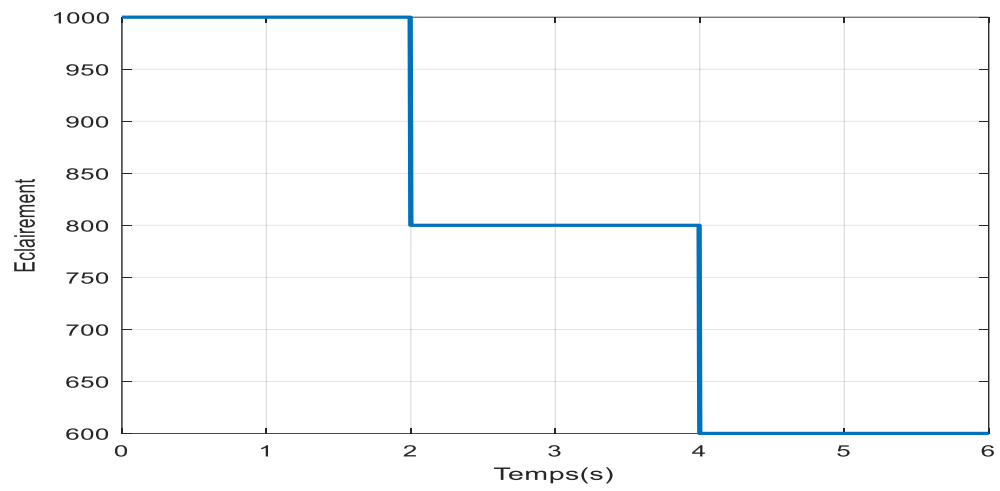
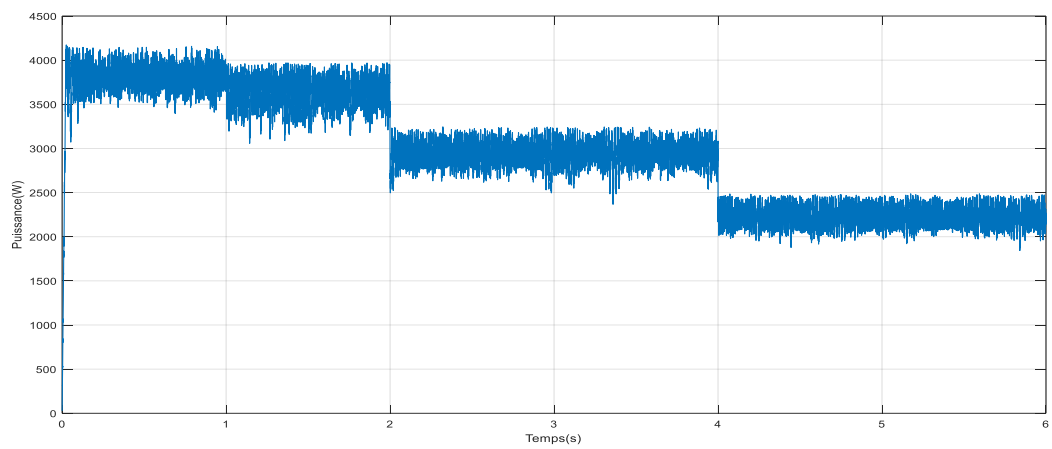
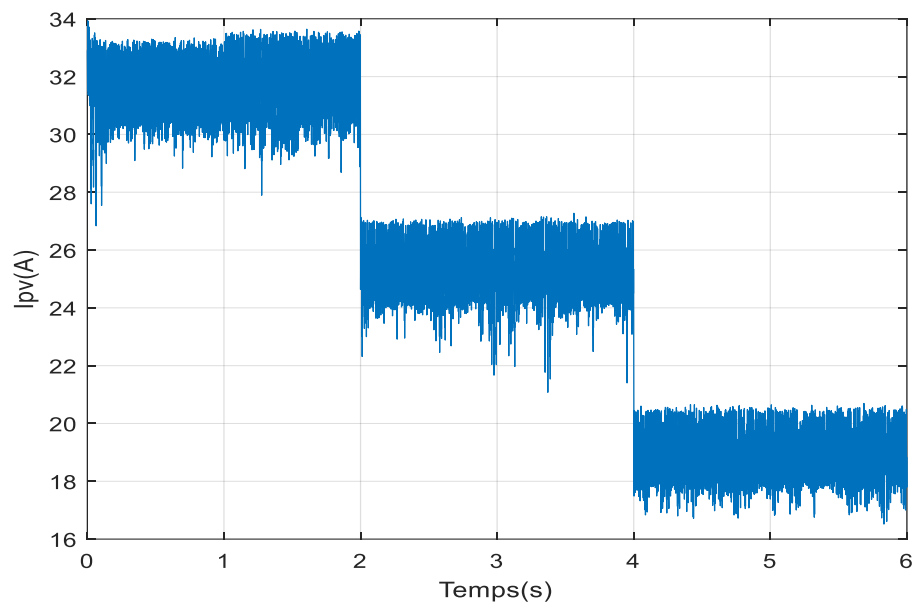
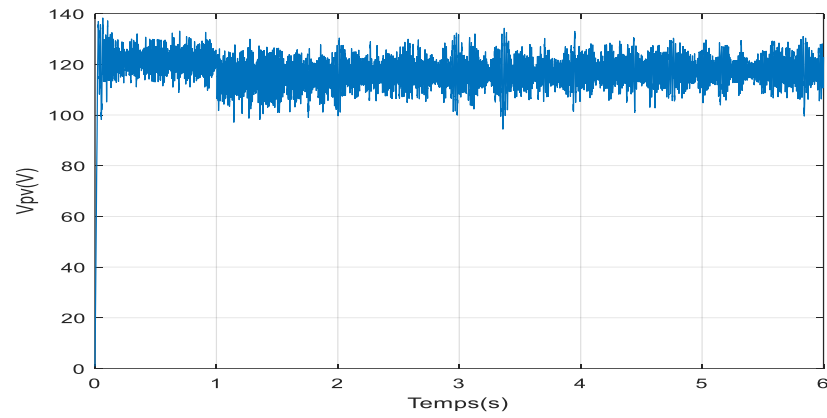
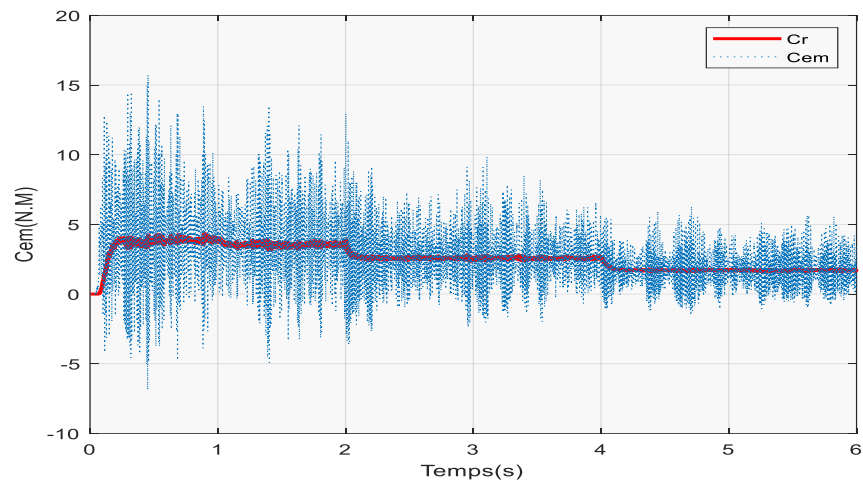
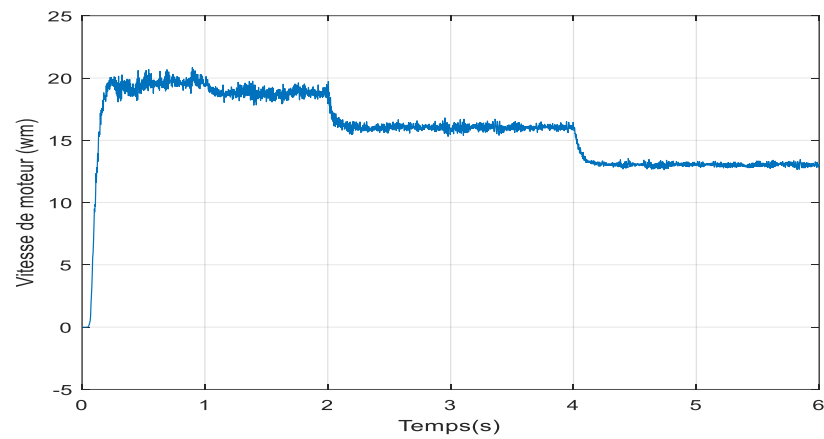


Figure III.20: Variation de la température.

**Figure III.21 : Variation d'éclairement.****Figure III.22 : Courbe de puissance de PV.****Figure III.23 : Courant de PV.**

**Figure III.24 : Tension de PV.****Figure III.25 : Couple électromagnétique.****Figure III.26: Vitesse de rotation ω_m .**

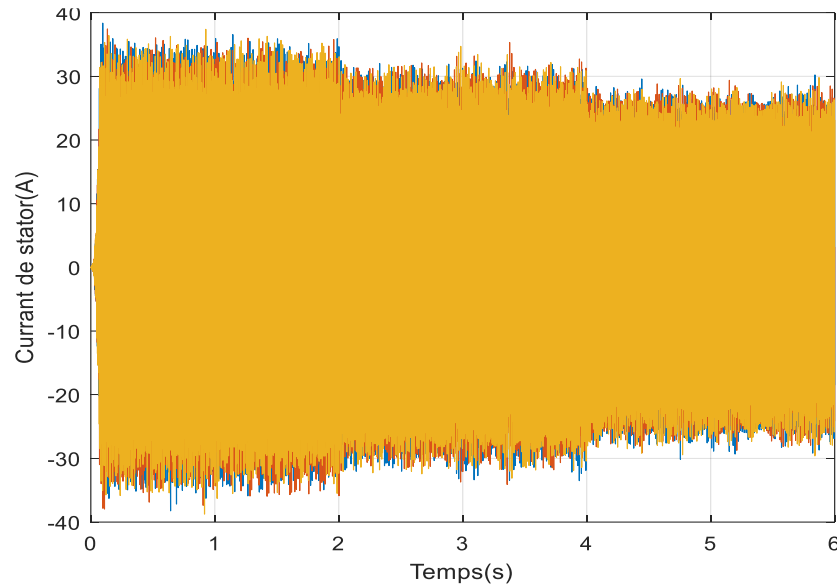


Figure III.27 : Les courants i_a, i_b, i_c de la machine.

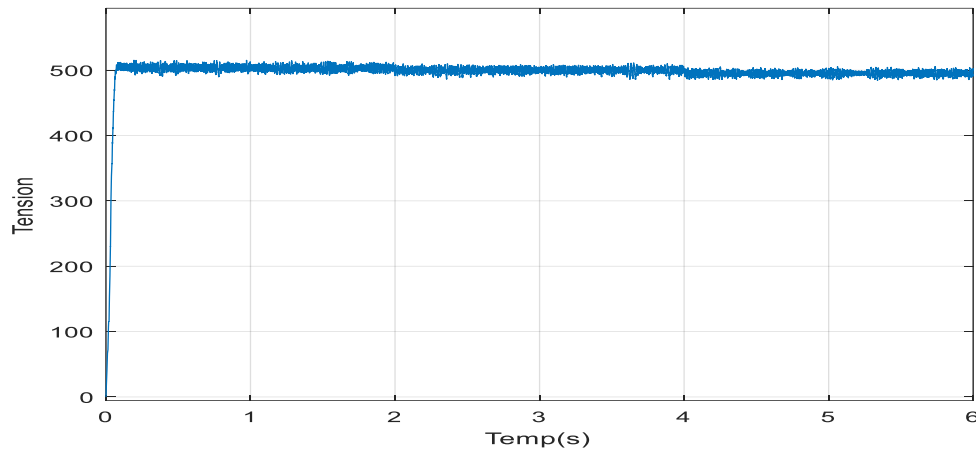


Figure III.28 : Courbe de tension de V_{dc} .

On remarque que la résultat est le même.

La vitesse est stable après chaque variation de la température et d'éclairement. Avec un faible pic des courants et des couples.

Nous pouvons déduire que lorsque la température augmente la vitesse diminue et lorsque l'éclairement diminue la vitesse diminue.

La puissance fournie par PV influe directement sur la vitesse de moteur pour équilibrer la puissance fournie et absorbée à travers du réglage de la tension de bus continu.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, une opération optimale d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil est présentée. Le problème d'optimisation consiste en l'amélioration du rendement de la machine par l'ajustement de la fréquence fournie par l'onduleur de tension alimentant le moteur.

Les résultats obtenus montrent qu'avec la technique proposée, on améliore la puissance du moteur avec même puissance maximal fournie par PV.

Conclusion générale :

Ce travail, qui est destiné à modéliser et à simuler un système photovoltaïque comporte un générateur photovoltaïque, associé à un hacheur DC-DC contrôlé par la commande MPPT P&O et un onduleur commandé par MLI Sinus- Triangle afin d'entraîner un moteur asynchrone.

Pour cela, le début de notre étude décrit l'effet photovoltaïque et les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un modèle mathématique. Cela, nous permet de modéliser un panneau solaire et prendre une idée sur le comportement d'un champ photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque. Ce dernier, est destiné pour alimenter un moteur asynchrone. On a présenté aussi les applications possibles du système photovoltaïque. L'objectif de la simulation est de voir l'influence de la température et de l'ensoleillement sur le fonctionnement du GPV et implicitement sur sa caractéristique courant-tension.

La conclusion qu'on a aboutie est que la performance du panneau solaire est dépendante de la température et de l'irradiation. On a remarqué que le courant augmente quand la température ou l'irradiation augmentent, tandis que cela engendre une considérable diminution au niveau de la tension et implicitement sur le rendement énergétique du panneau et du GPV. Par contre, l'augmentation de l'irradiation engendre une augmentation au niveau du courant et de la puissance, mais elle n'influe pas beaucoup sur la tension.

Afin d'extraire, en permanence, le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la générer au moteur asynchrone, un hacheur Boost a été associé et doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale (MPPT). Dans notre étude, on a intéressé seulement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation P&O, puisqu'elle est simple et donne un bon rendement. Un onduleur à deux niveaux a été utilisé afin de convertir la tension continue en tension alternative. Il joue aussi le rôle d'adaptateur source-charge lors il a commandé de la machine par la technique MLI

On conclut que, Le système est optimisé avec la technique MPPT et Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du système optimisé pour un générateur photovoltaïque apporte un gain énergétique. Il est clair maintenant qu'un système PV optimisé favorise considérablement à pompage d'eau qu'elle soit les conditions climatiques.

C	Nom	Valeur
Li	Inductance du convertisseur	4 mH
Ci	Capacité d'entrée	4700 uF
C _o	Capacité de sortie	470 UF
R	Resistance de charge	200Ω
N _s	Le nombre de cellules connectées en série	5
N _p	Le nombre de cellules connectées en parallèle	4

Tableau 3: Les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant.

Puissance nominale	4KW
Tension nominale	400V
Rendement nominal	0.78
Facteur de puissance nominal	0.8
Fréquence nominale	50 Hz
Courant nominal	6.31A
Résistance statorique	4.85 Ω
Résistance rotorique	3.805 Ω
Inductance cyclique statorique	0.274H
Inductance cyclique rotorique	0.274H
Inductance mutuelle	0.258H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	0.031 Kg/m ²
Coefficient de frottement	0.008N.m.s/rad

Tableau 4: Paramètres de la machine asynchrone.

Bibliographie

- [1] Rachida Ghernoug , Maroua Sadallah , Nour El Houda Dhou, «Commande MPPT par logique Floue pour les systèmes photovoltaïque», Master Academic, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2021
- [2] Kamel Mokhtari ,Youcef Larabi, «Etude et simulation d'un système photovoltaïque.», Master Academic, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU ,2018
- [3] Mokrani Farid ; Zidane Sofiane, « Commande de la machine asynchrone dans un système de pompage.», Master Academic, Université A.MIRA-BEJAIA 2020
- [4] MESTOURI AMMAR CHERIF CHAMS EDDINE, « Commande D'une Machine Asynchrone Par Un Onduleur : Onduleur Sa Source D'Energie Est Obtenue Par Photovoltaïque.», Master Academic, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2017
- [5] DJERIOU SALIM, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone.», Master Academic, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 2011
- [6] Kefsi Djamila , Ouikene Fetta, «Commande d'un Système de Pompage Photovoltaïque.», Master Academic, Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU 2010
- [7] Nechma Mohamed Lamine, «Modélisation, Commande et Simulation d'un Moteur Asynchrone à cage.», Master Academic, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2019
- [8] L. BAGHLI, «Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone», Master Academic, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen 2020
- [9] GHAITAOUI Elmoulat ,KHELIFI Houda, «Alimentation d'un Moteur Asynchrone à partir d'un Générateur Photovoltaïque», Master Academic, Université Ahmed Draia ADRAR 2018
- [10] HADEF Hamza, «Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec Batteries.», Master Academic, Université Dr. Tahar Moulay SAIDA 2021
- [11] KIATI Yacine, BOUTA Souhieb ,KORICHI Mohammed Laid, «Contribution au diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques.», Master Academic, L'Université d'Echahid Mohamed Lakhdar Ammara d'El Oued,2022
- [12] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009
- [13]Aamarouayache Mohamed, « Contribution À L'optimisation D'une Chaîne De Conversion D'énergie Photovoltaïque », Doctorat En Sciences En Electrotechnique Option ,2014.
- [14].<https://elearn.univ-ouargla.dz/2013>
2014/courses/ELECTRONIQUEDEPUISSA/document/cour8techniquesdecommandedel_ond
uleur.pdf?cidReq=ELECTRONIQUEDEPUISSA.a
- [15] SOFIANE ABADA ,étude et optimisation d'un générateur pv pour la recharge dune batterie avec un convertisseur", Mémoire master es sciences, université LAVAL ,2011 .

- [16]- J.ROYER T DJIAKO et SCHILER B saday le pompage pv^{cc} universite d'Ottawa",1998
- [17] O. Guenounou et H. Lehouche, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Université A. MIRA-BEJAIA,2019.
- [18] MANIR HADEF. Commande Electrique. Notes De Coures. Université De Jijel,2015.
- [19] Abedallah Henka ,Mostefa Ghenbazi,Kamel Benali, «Commande scalaire d'une Machine Asynchrone Triphasée.», Master Academic, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2020
- [20] laichour Naima , chikhi imad eddine, «modelisation et command de la vitesse d'un moteur asynchrone triphase pilote par un onduleur MLI», Master Academic, Université saad dahlab blida 2021
- [21] chapitre II La Commande Scalaire « COMMANDE SCALAIRE DE LA MACHINE ASYNCHRONE .»Université de Batna 2008-2009
- [22] Commande des Machines mastère ESI R. Dhifaoui, O. Hasnaoui, F Bacha