

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat Département :

Electrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Contribution à l'étude et la simulation d'une machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque**

Présenté par :

- Bouchair AbdeRrezek
- Rouag Oussama Siradj Eddine

Encadrant : Soltani Fatma

MCA

Badji Mokhtar – Annaba

Jury de Soutenance :

Ourici Amel	MCA	Badji Mokhtar – Annaba	Président
Soltani Fatma	MCA	Badji Mokhtar – Annaba	Encadrant
Bouchikha Hocine	MCA	Badji Mokhtar – Annaba	Examinateur

# Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah pour nous avoir donné la force, la sagesse et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce projet. Sans Sa bénédiction et Sa guidance, nous n'aurions pas pu surmonter les défis que nous avons rencontrés tout au long de ce parcours.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers notre encadrante, Madame Soltani Fatma, pour son soutien inestimable, ses conseils avisés et sa patience tout au long de notre projet. Sa compétence et son dévouement ont été essentiels pour nous aider à atteindre nos objectifs et à réaliser notre potentiel.

Nous remercions également les membres du jury pour leur temps, leur expertise et leurs précieux commentaires. Leur évaluation et leurs suggestions nous ont permis d'améliorer notre travail et de grandir en tant que chercheurs.

Nos sincères remerciements vont également à nos parents, frères et sœurs pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements constants. Leur foi en nous et leur dévouement à notre éducation ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous souhaitons remercier nos amis pour leur amitié, leur compréhension et leur soutien moral. Leurs conseils et leur présence ont été précieux pour nous aider à surmonter les moments difficiles et à célébrer nos réussites.

# Dédicace

Chers parents, frères, sœurs et amis,

À nos parents, qui nous ont façonnés avec amour et patience. Votre dévouement et votre soutien nous ont permis de grandir et de nous épanouir. Nous vous remercions du fond du cœur pour votre amour inépuisable.

À nos frères et sœurs, qui ont partagé avec nous les joies et les peines de l'enfance. Vous êtes nos premiers alliés, nos premiers rivaux, mais avant tout, nos amis pour la vie. Nous chérissons chaque moment passé avec vous.

Et à nos amis, qui ont choisi de partager notre chemin. Vous avez enrichi nos vies de rires, de soutien et de souvenirs inoubliables. Vous êtes notre famille choisie, et nous sommes reconnaissants pour chaque instant que nous passons ensemble.

Nous dédions ces mots à vous tous, avec toute l'affection et la gratitude que nous ressentons. Vous faites partie intégrante de qui nous sommes, et nous sommes honorés de vous compter dans nos vies.

Avec tout notre amour,

[**Bouchair AbdeRrezek**  
**Rouag Oussama Siradj Ediine**]

## Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est considérée comme l'une des énergies les plus renouvelables. Elle opère dans le monde entier, plus précisément en Algérie, que ce soit à l'échelle publique (7 centrales photovoltaïques fournissent 53 MW de puissance) ou à l'échelle personnelle (représentée par son utilisation extensive en irrigation). Le but de ce travail est d'évaluer les performances des générateurs photovoltaïques sous différentes conditions climatiques (température et irradiation) et lorsqu'ils sont connectés à des moteurs asynchrones. Le système photovoltaïque comprend un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT P&O et un onduleur contrôlé par la technologie MLI qui alimente une machine asynchrone.

**Mots Clés :** générateur photovoltaïque, MPPT, hacheur Boost, onduleur, commande MLI, machine asynchrone.

## ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية الكهروضوئية من أكثر الطاقات المتجددة، وهي تعمل في جميع أنحاء العالم، وبشكل أكثر دقة في الجزائر، سواء على المستوى العام (توفر 7 محطات للطاقة الكهروضوئية 53 ميجاواط من الطاقة) أو على المستوى الشخصي (يتمثل في استخدامها المكثف في الري). الهدف من هذا العمل هو تقييم أداء المولدات الكهروضوئية في ظل ظروف مناخية مختلفة (درجة الحرارة والإشعاع) وعندما يتم توصيلها بمحركات غير وعاكس يتم التحكم فيه بواسطة DC-DC متزامنة. يشتمل النظام الكهروضوئي على محول MPPT P&O.

## Abstract

Photovoltaic solar energy is considered one of the most renewable energies. It operates throughout the world, more precisely in Algeria, whether on a public scale (7 photovoltaic plants provide 53 MW of power) or at the personal scale (represented by its extensive use in irrigation). The aim of this work is to evaluate the performance of photovoltaic generators under different climatic conditions (temperature and irradiation) and when they are connected to asynchronous motors. The photovoltaic system consists of a DC-DC converter controlled by MPPT P&O and an inverter controlled by PWM technology.

**Keywords:** photovoltaic generator, MPPT, Boost chopper, inverter, MLI control, asynchronous machine

## Chapitre 01 : Généralité sur les énergies renouvelables

Introduction Générale :	.....
I. Introduction :	5
II. Les énergies renouvelables .....	5
III. Les différents types de l'énergie renouvelable.....	5
1. L'énergie hydraulique :.....	5
2. L'énergie de la biomasse :.....	6
3. L'énergie géothermique : .....	7
4. L'énergie éolienne : .....	7
5. L'énergie solaire : .....	8
IV. Potentiel solaire en Algérie :	9
V. Les différentes technologies solaires : .....	9
1. Solaire à concentration thermodynamique :.....	9
2. Solaire thermique :.....	10
3. Solaire photovoltaïque : .....	11
4. Le rayonnement solaire : .....	12
VI. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque : .....	13
1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque : .....	13
2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque : .....	14
VII. Conclusion.....	14

## Chapitre 02 : 1' Énergie solaire

I. Introduction .....	17
II. L'énergie solaire : .....	17
III. La cellule photovoltaïque : .....	18
Historique : .....	18
II.1 Différents types de cellules: .....	19
II.1.1 Cellule photovoltaïque en Silicium monocristallin.....	19
II.1.2 Cellule photovoltaïque en Silicium poly cristallin .....	20
IV. Nouvelle technologie.....	21
V. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	22
VI. Association des cellules (le panneau solaire) .....	23

<u>Groupement en série :</u>	23
<u>Groupement en parallèle :</u>	24
<u>VII. Le Panneau photovoltaïque:</u>	25
<u>VIII. Rendement maximal d'une cellule PV</u>	26
<u>IX. Angle d'inclinaison du panneau solaire (photovoltaïque) :</u>	27
<u>X. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque</u>	27
<u>XI. Les avantages et Les inconvénients d'une installation PV</u>	28
<u>Avantages :</u>	28
<u>Inconvénients :</u>	29
<u>XII. Conclusion</u>	29

### Chapitre 03 : Modélisation et simulation d'un panneau PV

<u>I    Introduction :</u>	31
<u>II   Modélisation des cellules PV :</u>	31
<u>II.1   Modèle à une diode :</u>	31
<u>II.2   Les équations caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :</u>	32
<u>III   Modélisation d'un panneau photovoltaïque:</u>	33
<u>IV   Modélisation d'un générateur:</u>	35
<u>IV.1   Simulation d'un panneau PV:</u>	35
<u>IV.2   Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement constante</u>	36
<u>IV.2.1   Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable</u>	37
<u>IV.3   Influence de l'irradiation :</u>	37
<u>IV.4   Influence de la température :</u>	39
<u>IV.5   Optimisation des générateurs PV</u>	40
<u>IV.6   Présentation du système :</u>	40
<u>IV.6.1   Générateur photovoltaïque :</u>	40
<u>IV.6.2   Hacheur Boost:</u>	40
<u>IV.6.3   Onduleur:</u>	40
<u>IV.6.4   Moteur asynchrone:</u>	40
<u>IV.6.5   Convertisseur DC/DC :</u>	41
<u>IV.6.6   Convertisseur Boost (hacheur parallèle)</u>	42
<u>IV.7   Adaptation par le convertisseur DC-DC</u>	42
<u>IV.8   Modélisation de l'hacheur Boost :</u>	44
<u>IV.9   Représentation de la simulation (hacheur Boost):</u>	45

<u>V</u>	<u>Commande de maximisation de puissance :</u>	46
V.1	<u>La méthode de Perturbation et Observation (P&amp;O):</u>	46
<u>VI</u>	<u>Simulation du panneau Avec commande MPPT</u>	48
<u>VII</u>	<u>Discussions des résultats de la simulation.</u>	52
<u>VIII</u>	<u>Conclusion</u>	52

**Chapitre 04 :Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV**

<u>I</u>	<u>Introduction</u>	54
<u>II</u>	<u>Présentation de la structure du système photovoltaïque</u>	54
II.1	<u>Définition de l'onduleur :</u>	54
II.2	<u>Classification des onduleurs</u>	55
II.2.1	<u>Onduleur autonome</u>	56
II.2.2	<u>Onduleur non autonome</u>	56
II.3	<u>Modélisation de l'onduleur triphasé</u>	56
<u>III</u>	<u>Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)</u>	57
<u>IV</u>	<u>Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)</u>	58
IV.1	<u>Commande MLI sinus – triangle</u>	58
IV.2	<u>Avantages de la commande MLI</u>	60
IV.3	<u>Harmoniques et inters harmoniques</u>	60
IV.3.1	<u>Caractéristiques d'un signal</u>	61
IV.3.1.1	<u>Rang d'un harmonique</u>	61
IV.3.2	<u>Représentation spectrale</u>	61
IV.3.3	<u>Analyse de Fourier</u>	62
IV.3.4	<u>Taux de Distorsion THD</u>	63
IV.3.5	<u>Effet des harmoniques</u>	64
IV.3.6	<u>Interprétation des résultats</u>	70
IV.4	<u>Modélisation de la Machine asynchrone</u>	71
IV.5	<u>Introduction</u>	71
IV.6	<u>Avantages et inconvénients de la machine asynchrone</u>	71
IV.6.1	<u>LES HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES</u>	71
IV.6.2	<u>Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique</u>	72
IV.11.5		72
IV.7	<u>Equations électriques</u>	72
IV.8	<u>Équations magnétiques</u>	73

<u>IV.9</u>	<u>Équations mécaniques</u> .....	75
<u>IV.10</u>	<u>Modélisation biphasée de la Machine asynchrone</u> .....	75
<u>IV.11</u>	<u>Transformation de Park</u> .....	75
<u>IV.11.1</u>	<u>Les avantages de cette transformation</u> .....	76
<u>IV.11.2</u>	<u>Application de la transformation de Park au modèle de la MAS</u> .....	76
<u>IV.11.3</u>	<u>Équations électriques dans le repère de PARK</u> .....	77
<u>IV.11.4</u>	<u>Choix de référentiel</u> .....	78
<u>IV.11.5</u>	<u>Référentiel lié au stator</u> .....	78
<u>IV.11.6</u>	<u>Référentiel lié au rotor</u> .....	78
<u>IV.11.7</u>	<u>Représentation d'état du système</u> .....	78
<u>IV.13.</u>	<u>Simulation du modèle de la machine asynchrone</u> .....	80
<u>IV.11.8</u>	<u>Modèle global du système :</u> .....	81
<u>IV.11.9</u>	<u>Résultats de la simulation</u> .....	81
<u>IV.12</u>	<u>Interprétation des résultats de simulation</u> .....	84
<u>V</u>	<u>Conclusion</u> .....	85

Conclusion Générale : .....

## ➤ Liste des figures

### **Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables**

Figure I.1: Énergie hydraulique

Figure I.2: Énergie biomasse

Figure I.3: Énergie géothermie

Figure I.4: L'énergie éolienne

Figure I.5: L'énergie solaire

Figure I.6: La carte d'éclairement solaire de l'Algérie

Figure I.7: Deux exemples de modules à concentration thermodynamique

Figure I.8: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire Thermique

Figure I.9: Analyse spectrale du rayonnement solaire

### **Chapitre II : Énergie solaire**

Figure II.1: Différentes inclinaison du soleil

Figure II.2: Plaque de silicium monocristallin.

Figure II.3: Plaque de silicium poly cristallin.

Figure II.4: Plaque de silicium amorphe.

Figure II.5: cellule photovoltaïque

Figure II.6: Structure d'une cellule PV

Figure II.7: Association de cellules en séries

Figure II.8: Association de cellules en parallèle

Figure II.9: Schéma d'association mixte des modules

Figure II.10: Caractéristique résultante du regroupement mixte

Figure II.11: L'angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver

Figure II.12: installations classiques pour protégé un générateur photovoltaïque

### ***Chapitre III: Modélisation et simulation d'un panneau PV***

Figure III.1 : Modèle d'une cellule PV à une diode

Figure III.2 : Schéma bloc d'un générateur (GPV)

Figure III.3 : Résultat de la simulation caractéristique I (V) dans les conditions standards

Figure III.4 : Résultat de la simulation caractéristique P (V) dans les conditions standards

Figure III.5 : Résultats de simulation des caractéristiques courant-tension, pour différents éclairements avec une température constante  $T=25^{\circ}\text{C}$

Figure III.6: Résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension, pour différents éclairements avec une température constante  $T=25^{\circ}\text{C}$

Figure III.7: Résultats de simulation des caractéristiques courant-tension, pour différentes températures et un éclairement constante  $G=1000\text{W/m}^2$

Figure III.8: Résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension, pour différentes températures et un éclairement constante  $G=1000\text{W/m}^2$

Figure III.9: Chaîne élémentaire de conversion Photovoltaïque

Figure III.10 : Circuit électrique de le hacheur (Boost)

Figure III.11.: Fluctuation du point de puissance maximale avec l'intensité d'éclairement et la Charge  $R_{ch}$

Figure III.12 : Schéma bloc du hacheur boost

Figure III.13 : Organigramme de la méthode P&O

Figure III.14 : Schéma de bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT

Figure III.15 : Tension de sortie de panneaux PV

Figure III.16: Courant de sortie de panneaux PV

Figure III.17 : Tension de sortie de Boost

Figure III.18 : la puissance maximale donnée par panneaux PV pour un éclairement constant( $1000 \text{ W/m}^2$ )

Figure III.19 : Profile du changement d'éclairement ( $\text{W/m}^2$ )

Figure III.20 :Puissance du sortie du panneau lors du changement d'éclairement

#### **Chapitre IV: Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV**

Figure IV.1: Principe de fonctionnement de l'onduleur

Figure IV.2 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé

Figure IV.3 : Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

Figure IV.4 : Schéma de principe de la technique M.L.I triangle– sinusoïdale

Figure IV.5 : Représentation des harmoniques et inters-harmoniques et infra-harmoniques

Figure IV.6 : Spectre harmonique d'un signal

Figure IV.7 : Schéma bloc du Commande MLI sinus-triangle

Figure IV.8 : Schéma bloc d'onduleur

Figure IV.9 : Illustration de la MLI sinus-triangle

Figure IV.10 : la tension composé de sortie de l'onduleur pour  $m=19$

Figure IV.11 : Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur( $m=19$ )

Figure IV.12 : Les courants de sortie de l'onduleur ( $m=19$ )

Figure IV.13 : Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur ( $m=19$ )

Figure IV.14 : la tension composé de sortie de l'onduleur pour  $m=45$

Figure IV.15 : Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur( $m=45$ )

Figure IV.16 : Les courants de sortie de l'onduleur ( $m=45$ )

Figure IV.17 : Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur ( $m=45$ )

Figure IV.18 : Schéma d'une machine asynchrone triphasée

Figure IV.19 : Référentiel tournant des axes (d– q).

Figure IV.20 : modèle de simulation du modèle global

Figure IV.21 : le courants statoriques en fonction du temps (démarrage à vide)

Figure IV.22: le couple en fonction du temps (démarrage à vide)

Figure IV.23: la vitesse en fonction du temps (démarrage à vide)

Figure IV.24: le courants statoriques en fonction du temps (en charge)

Figure IV.25 : le couple en fonction du temps (en charge)

Figure IV.26 : la vitesse en fonction du temps (en charge)

➤ **Liste des tableaux**

**Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables**

Tableau I.1: Longueurs d'ondes et spectre lumineux

**Chapitre II : Énergie solaire**

Tableau II.1 : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques

**Chapitre III: Modélisation et simulation d'un panneau PV**

Tableau. III.1 : caractéristiques électriques du module SI 1088 T2

**Chapitre IV: Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV**

Tableau IV.1 : Les harmoniques

Tableau IV.2 : Les Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

## Abréviations :

**G** : éclairement

**I<sub>ph</sub>** : Courant photonique

**I<sub>d</sub>** : Courant diode

**I<sub>0</sub>** : Courant de saturation inverse de la diode

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit

**I<sub>cc,n</sub>** : Courant de court-circuit dans le conditions nominales de fonctionnement

**I<sub>mpp</sub>** : Courant maximum fournie par un module

**P<sub>mpp</sub>** : Puissance maximum fournie par un module

**V-pv** : Tension photovoltaïque

**I-pv** : Courant photovoltaïque

**R<sub>s</sub>** : Résistance série

**R<sub>p</sub>** : Résistance parallèle

**R<sub>ch</sub>** : Impédance de la charge

**N<sub>s</sub>** : Nombre de cellule en série

**N<sub>p</sub>** : Nombre de cellule en parallèle

**q** : Charge d'un l'électron

**I<sub>scn</sub>** : Courant de court-circuit nominal

**R<sub>sh</sub>** : Résistance shunt

**V** : Tension aux bornes de cellule

**V<sub>mpp</sub>** : Tension au MPP

**V<sub>t</sub>** : Tension thermique

**V<sub>oc</sub>** : Tension de circuit ouvert du module PV

**K<sub>v</sub>** : Le coefficient de température en circuit ouvert (V/k)

**V<sub>ocn</sub>** : La tension de circuit-ouvert nominal (V)

**a** : Facteur d'idéalité de la jonction

**K** : La constante de Boltzmann

**T** : La température de la cellule (°K)

**V<sub>pv</sub>** : Tension aux bornes du GPV

**I<sub>sh</sub>** : Courant circulant dans la résistance shunt

**G<sub>n</sub>** : Irradiation dans la condition standard

**G<sub>0</sub>** : éclairement nominal

**I<sub>L</sub>** : Courant qui traverse l'inductance

**L** : L'inductance

**C** : Capacité

**V<sub>dC</sub>** : Tension de sortie du convertisseur

**I<sub>dC</sub>** : Courant de sortie du convertisseur **D** : Diode

**S** : L'interrupteur (Hacheur)

**C** : Condensateur (F)

**F** : Fréquence (HZ)

**f** : Le coefficient de frottement

**P** : Nombre de paires de pôles

**C<sub>em</sub>** : Représente de couple moteur appliqué

**C<sub>r</sub>** : Représente de couple résistant

**J** : Le moment d'intertie de l'ensemble des parties tournantes

**T<sub>r</sub>** : Constante de temps rotorique

**T<sub>s</sub>** : Constante de temps statorique

**r** : Rendement du moteur

**m** : L'indice de modulation

**f** : L'indice de fréquence

**V<sub>m</sub>** : L'amplitude de la tension de référence

**V<sub>pm</sub>** : L'onde de modulation

**E<sub>v</sub>** : Haute de la bande de valence

**E<sub>c</sub>** : Bas de la bande de conduction

**E<sub>g</sub>** : Bande interdite

**F<sub>s</sub>** : Fréquence

**V<sub>r</sub>** : Tension de référence

**r** : Le coefficient de réglage en tension

**a<sub>0</sub>** : Composante continue à la valeur moyenne du signal

**ah-bh** : Amplitudes efficaces des composantes harmoniques de rang h

**Vs** : Valeur efficace de tension

**Ws** : Pulsation d'alimentation

**[X]** : Vecteur de sortie

**[d-q]** : La position des axes

**[P(θ)]** : La matrice de transformation de Park

**[Rs]** : Matrice des résistances statoriques

**[Rr]** : Matrice des résistances rotoriques

**[Ls]** : Matrice des inductances statoriques

**[Lr]** : Matrice des inductances rotoriques

**[Msr]** : Matrice d'inductance mutuelle du couplage entre stator-rotor.

**Is** : Inductance propre d'une phase statorique

**Ir** : Inductance propre d'une phase rotorique

**Ms** : Inductance mutuelle entre phases statoriques

**Mr** : Inductance mutuelle entre phases rotoriques

**M0** : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

**Φs** : Flux stator

**Φr** : Flux rotor

**PV**: Photovoltaïque

**MAS**: Machine Asynchrone (Moteur asynchrone)

**GPV**: Générateur photovoltaïque

**DC**: Courant Continu (Direct Current)

**AC**: Courant Alternatif (Alternating Current)

**MLI**: Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse WIDTH Modulation)

**MLIST** : Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle

**P&O**: Perturbation et Observation (Perturb & Observ)

**ENR** : Energie renouvelable

**RSE** : Responsabilité sociale des entreprises

**BP** : Compagnie britannique de recherche

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**DA** : Dinar algérien (DZD)

**MW**: Mega watt

**KWH**: Kilo watt heure

**C02**: Dioxyde de carbone

**SPV** : Système photovoltaïque

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking

**MPP**: Maximum power point

**MOSFET**: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

**CS**: Convertisseur statique

**C<sub>p</sub>**: Largeur du pas d'une perturbation simple

**THD** : Total Harmonique Distorsion

**FFT** : Transformé De Fourier rapide

**TV** : Télévision

**IGBT** : Transistor bipolaire à grille isolée

**XIXe siècle** : 19<sup>e</sup> siècle



# *Introduction générale*



## **Introduction générale**

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée et propre qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Aujourd'hui l'énergie solaire fournit un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un mineraï fossile est au mieux de 30 à 35%. Dans le temps présent, cette utilisation doit être encouragée par des mesures appropriées et une politique énergétique des états. L'Algérie, pays du soleil et de l'espace est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire.

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique, et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global. Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes et reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, réfrigération, climatisation, sources lumineuses, véhicules électriques, centrales photovoltaïques, utilisation militaire, domaine spatial.

Les performances des panneaux photovoltaïques fortement influencés par les conditions climatiques (éclairement, températures) est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connu, appelé point de puissance maximale(PPM). A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence. Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, une attention particulièrement a été portée sur la méthode des perturbations et observations.

- L'objectif de notre travail est l'étude est la simulation d'un panneau photovoltaïque Munier d'une commande MPPT puis l'alimentation d'un moteur asynchrone alimenté

par un système de production photovoltaïque à partir d'un convertisseur DC /AC.

- De ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous.

En fin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.



# *Chapitre 01 : Généralité sur les énergies renouvelables*



## **I. Introduction :**

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épouse ses stocks.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.[1]

## **II. Les énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables (ou ENR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou renouvelé plus rapidement qu'elles ne sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : (charbon, pétrole, gaz naturel...) Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine. Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ». Le faible impact environnemental de leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies RSE des entreprises en matière de développement durable.

## **III. Les différents types de l'énergie renouvelable**

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

### **1. L'énergie hydraulique :**

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique.

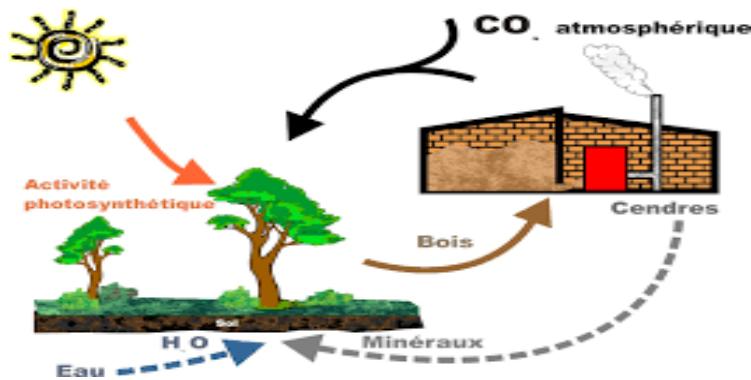
La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité.[4]



**Figure I.1: Énergie hydraulique**

## **2. L'énergie de la biomasse :**

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2010, La biomasse représentait 7,5% des énergies produites. On devrait atteindre une part de 10% d'ici 2020. La chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocotte minute. Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine reliée à un alternateur. C'est cet alternateur qui va permettre de produire l'électricité. Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse, c'est surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin.[3]



**Figure I.2: Énergie biomasse**

### 3. L'énergie géothermique :

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- **La géothermie à haute énergie**
- **La géothermie de basse énergie.**
- **La géothermie de très basse énergie**

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...)[3].



**Figure I.3: Énergie géothermie**

#### **4. L'énergie éolienne :**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.[3]



**Figure I.4: L'énergie éolienne**

#### **5. L'énergie solaire :**

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire.

Figure I.5: L'énergie solaire

On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.

- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaire est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe. Le soleil ne tourne pas comme un corps solide :

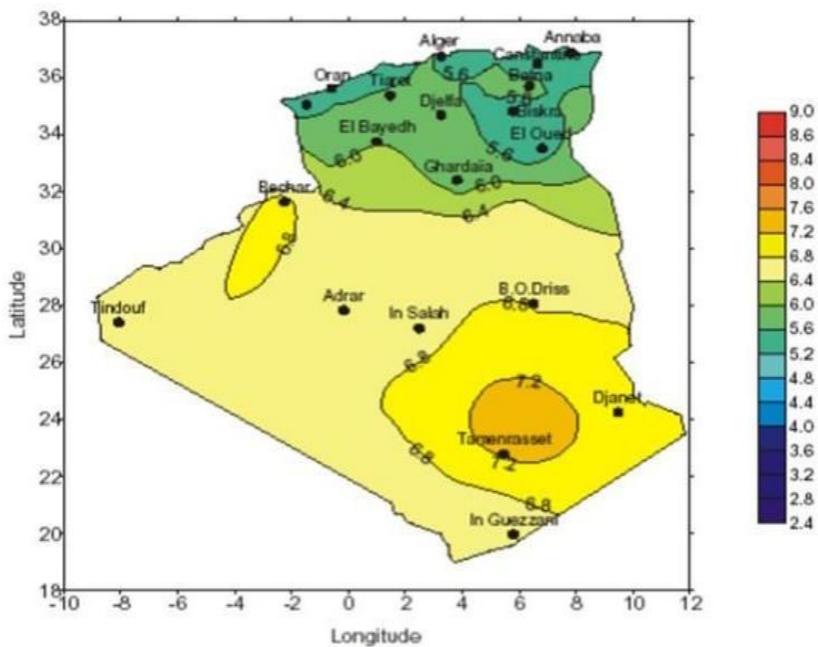
- La rotation de l'équateur s'effectue environ dans 27 jours
- Les régions polaires durant 30 jours.



**Figure I.5: L'énergie solaire**

#### **IV. Potentiel solaire en Algérie :**

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. La figure I.6 montre la carte de l'irradiation solaire en Algérie .[26]



**Figure I.6: La carte d'éclairement solaire de l'Algérie**

## V. Les différentes technologies solaires :

Il existe trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque

### 1. Solaire à concentration thermodynamique :

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. Figure I.7, La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau,

la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour éventuellement cultiver des fruits ou des

légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage.



**Capteurs thermodynamique**



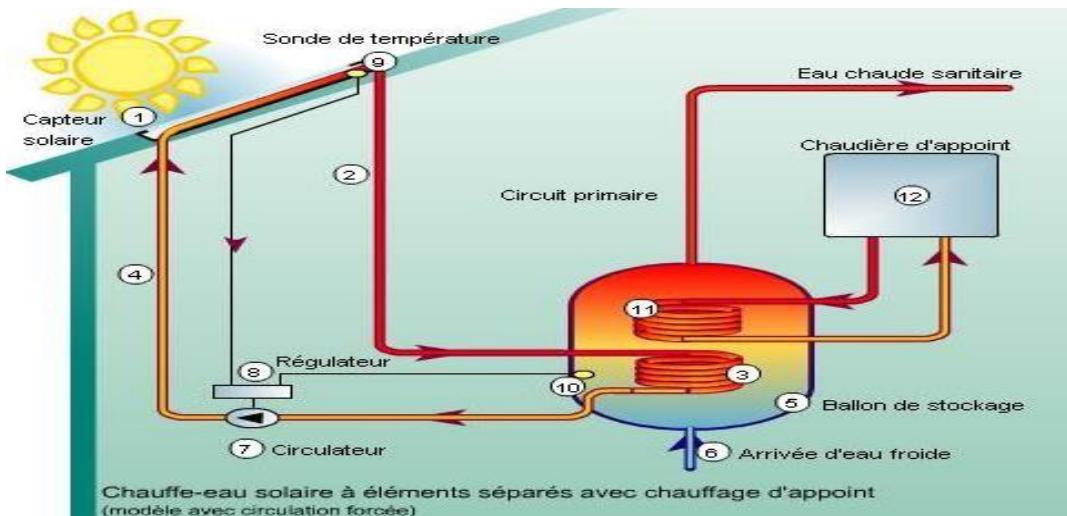
**Capteurs paraboliques**

**Figure I.7: Deux exemples de modules à concentration thermodynamique**

## **2. Solaire thermique :**

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, (fig. I.8). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud). L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire.

Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [8].



**Figure I.8: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire Thermique**

### 3. Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [8].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés" : Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du

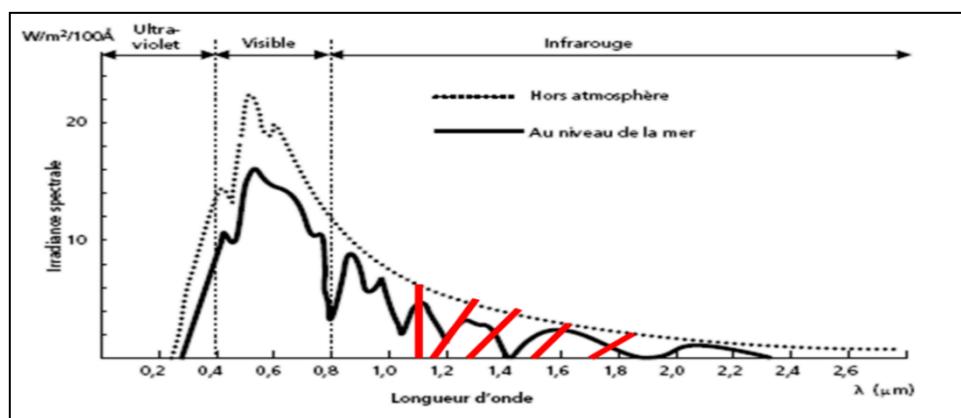
photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique. L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [8].

#### **4. Le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0,2 \text{ } \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2,5 \text{ } \mu\text{m}$ ). Figure I.9, L'énergie associée à ce rayonnement

solaire se décompose approximativement de :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \text{ } \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \text{ } \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \text{ } \mu\text{m}$ ).



**Figure I.9: Analyse spectrale du rayonnement solaire**

Le tableau I.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photos pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{\text{ph}}$ (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

**Tableau I.1: Longueurs d'ondes et spectre lumineux**

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photos et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.[26]

## **VI. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

### **1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :**

- L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages
- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).

- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

## **2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable. Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente. Pollution à la fabrication.
- Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication.

## **VII. Conclusion**

L'énergie étant l'un des moteurs du développement national, les partis verts et les scientifiques reçoivent de plus en plus d'attention dans les sociétés avancées et travaillent dur pour promouvoir le développement d'énergies «propres» et renouvelables. En conséquence, la recherche sur les énergies alternatives dites renouvelables est renforcée. Dans ce chapitre, nous avons présenté la généralité des systèmes d'énergie renouvelable, les différentes catégories et les avantages et inconvénients de leur utilisation. Après avoir prouvé qu'ils doivent répondre à l'évolution des besoins (énergie) du produit. Cependant, l'utilisation des énergies renouvelables est encore soumise à certaines restrictions en raison des coûts de mise en œuvre et de la maintenance nécessaire des énergies renouvelables, ainsi que des recherches menées pour améliorer l'efficacité pour contrôler ces sources d'énergie. En effet, l'électricité photovoltaïque représente une énergie inépuisable puisqu'elle est directement générée à partir du soleil. Nous pouvons donc apporter une différence très claire entre les énergies propres et les énergies renouvelables. Le but des énergies propres est de produire le moins de pollution possible durant la transformation de l'énergie en électricité. D'un autre côté, l'objectif de l'énergie renouvelable est de créer de l'électricité grâce aux éléments naturels.



## *Chapitre 02 : l' Énergie solaire*



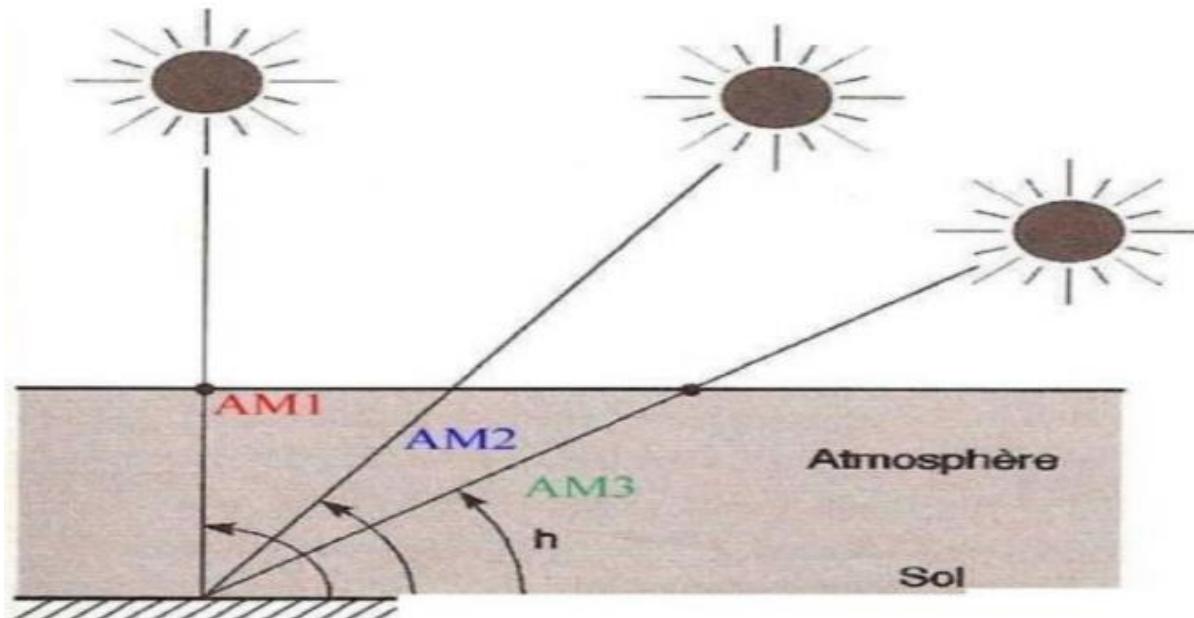
## I. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 kW/m<sup>2</sup> crêtes dans les zones tempérées et jusqu'à 14 KW/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée

## II. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et parvenant à la surface de la Terre, après filtre par l'atmosphère terrestre. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m<sup>2</sup>. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m<sup>2</sup> et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup> . Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.[ énergie solaire][8].



**Figure II.1: Différentes inclinaisons du soleil**

### III. La cellule photovoltaïque :

#### Historique :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatial naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photo-sensibilisée du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.[30]

## **II.1 Différents types de cellules:**

### **II.1.1 Cellule photovoltaïque en Silicium monocristallin**

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Figure II.2, Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y'a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.[31]



**Figure II.2: Plaque de silicium monocristallin.**

### **II.1.2 Cellule photovoltaïque en Silicium poly cristallin**

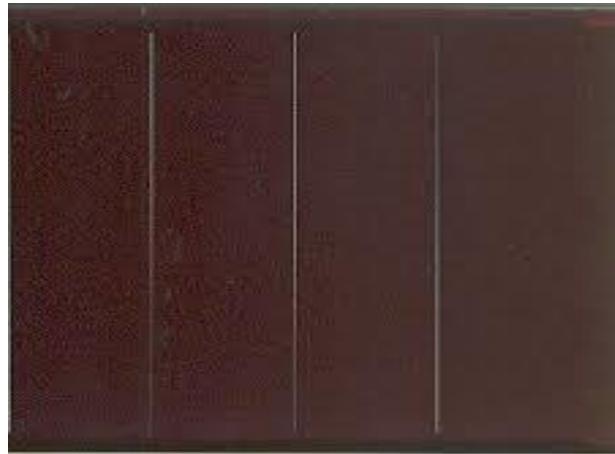
Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. Figure II.3, L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.[31]



**Figure II.3: Plaque de silicium poly cristallin.**

### **II.1.3 Cellule photovoltaïque en Silicium amorphe (a-si)**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Figure II.4, elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière.[31]



**Figure II.4: Plaque de silicium amorphe.**

#### **IV. Nouvelle technologie**

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light-Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Le tableau (II.1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utiliser d'une cellule photovoltaïque.

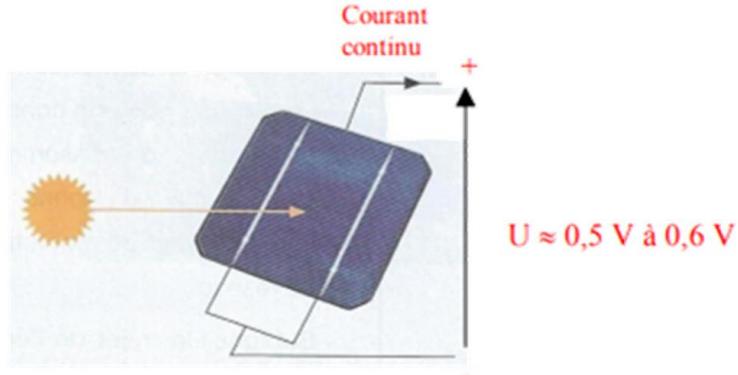
<b>TYPE</b>	<b>Silicium mono Crystalline</b>	<b>Silicium poly crystalline</b>	<b>Silicium amorphe</b>
Durée de vie ( ans )	35	35	<10

Advantages	Bon rendement en soleil Direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvenient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

**Tableau II.1 : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques**

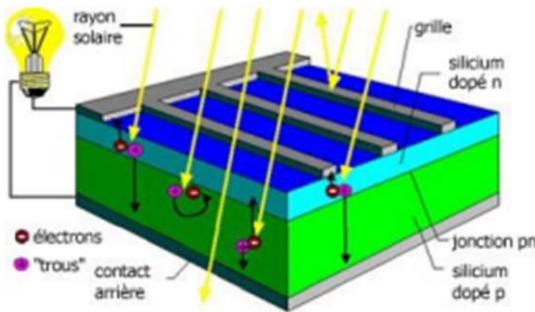
## V. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule solaire est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V (Figure II.5).

**Figure II.5 cellule photovoltaïque**

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) figure II.6 :

- une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P).
- une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N). [32]



**Figure II.6: Structure d'une cellule PV**

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

## VII. Association des cellules (le panneau solaire)

Les cellules produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W) avec une tension continue de moins de (1 V). Ces cellules sont disposées en série et en parallèle pour former un module ou un panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque. [33]

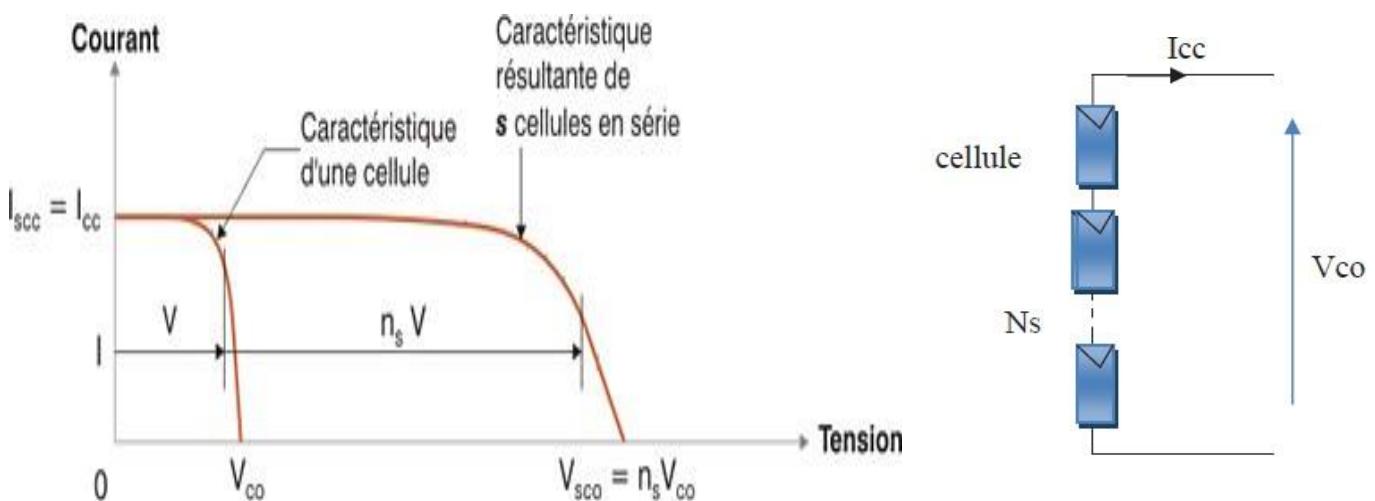
### Groupement en série :

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (II.7) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions

élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.[33][8]

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

$V_{co} = N_s * V_{co}$  : la tension de circuit ouvert



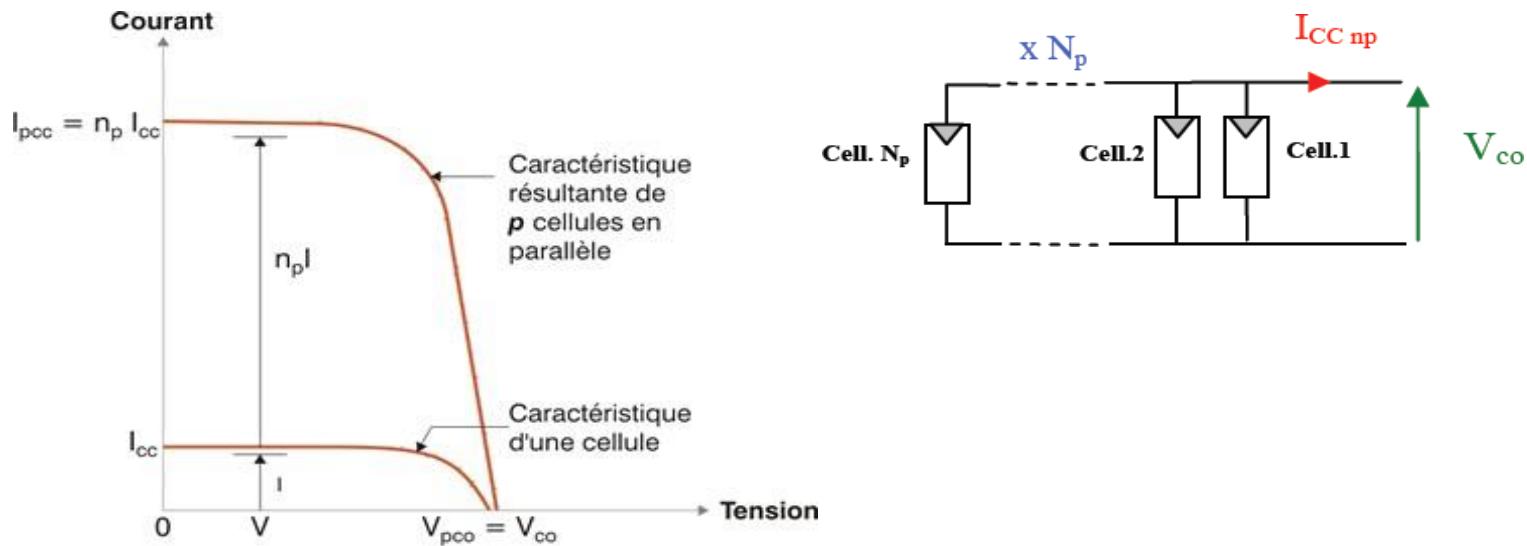
**Figure II.7: Association de cellules en séries**

#### Groupement en parallèle :

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule figure (II.8) est possible et permet d'augmenter le courant de sortie du panneau. 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.[33][8]

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

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



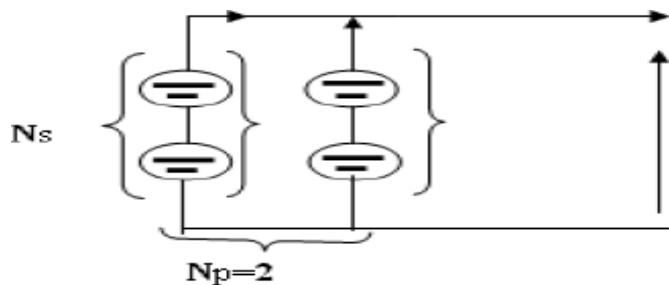
**Figure II.8: Association de cellules en parallèle**

## VII. Le Panneau photovoltaïque:

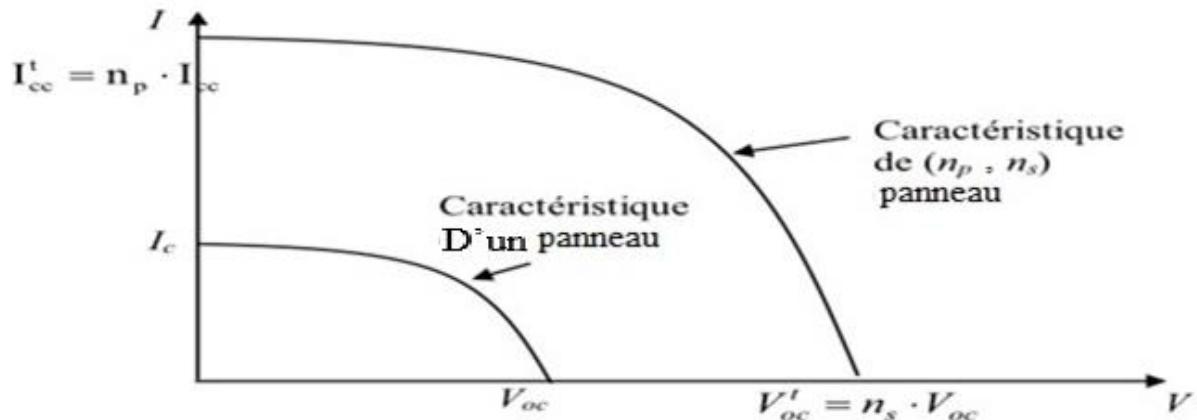
Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (II.9). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des panneaux qui le composent par deux affinités de rapport Ns parallèlement à l'axe des tensions et de rapport Np parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure (II.10), Ns et Np étant respectivement les nombres totaux des panneaux en série et en parallèle.[8]

$I_{gcc} = N_p * I_{cc}$ : courant de court-circuit du générateur résultant.

$V_{gco} = N_s * V_{co}$ : tension du circuit ouvert du générateur résultant.



**Figure II.9: Schéma d'association mixte des modules**



**Figure II.10: Caractéristique résultante du regroupement mixte**

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Regroupement en série) ou augmenter le courant (Regroupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de panneau photovoltaïque de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).[8]

### VIII. Rendement maximal d'une cellule PV

La puissance maximale d'une cellule PV est donnée par l'expression.

$$P_m = I_{op} * V_{op}$$

Cette puissance est le maximum de la caractéristique P(V) de la cellule.

$$P = G * S_{cel}$$

**G** : l'irradiation solaire

**S<sub>cel</sub>** : surface de la cellule

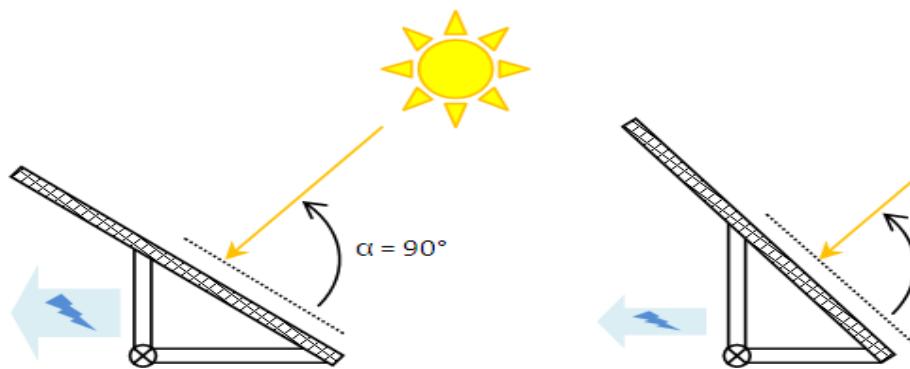
Correspond à la puissance solaire en (W) tombant sur la cellule.

Le rendement maximal est alors obtenu en écrivant :

$$\eta_m = P_m / P$$

## IX. Angle d'inclinaison du panneau solaire (photovoltaïque) :

Le rendement des centrales solaires dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels figure l'angle d'incidence des rayons du soleil. L'idéal serait que l'angle d'incidence des rayons du soleil, c'est-à-dire l'angle formé par le plan des panneaux solaires et ces rayons, soit toujours égal à  $90^\circ$ , car c'est ainsi que les panneaux reçoivent le plus de photons. Tel n'est malheureusement pas le cas. D'abord, l'angle incident varie au fil de la journée : s'il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, heure du zénith, il diminue à nouveau jusqu'au couchant. Ensuite, il atteint rarement  $90^\circ$ . À Berne, par exemple, l'angle incident maximal oscille entre  $15^\circ$  en hiver et  $60^\circ$  en été comme le montre la figure II.11.

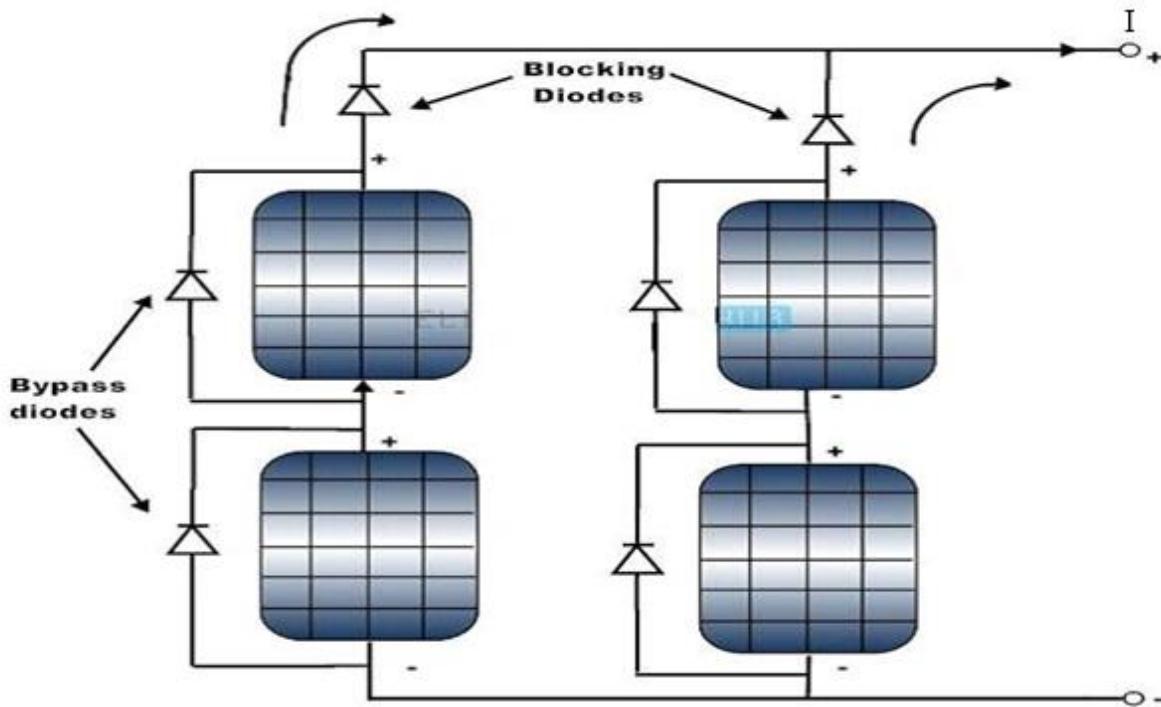


**Figure II.11: L'angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver**

## X. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage figure II.12. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles:

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.



**Figure II.12: installations classiques pour protégé un générateur photovoltaïque**

## XI. Les avantages et Les inconvénients d'une installation PV

### Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un certain nombre d'avantages :

- Une énergie gratuite, renouvelable, non taxée et sans rejets dans l'environnement (dans son fonctionnement).
- L'énergie photovoltaïque par panneaux est parfaitement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins.
- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout même sur des toits situés en ville (à condition qu'ils soient bien orientés et sans ombre portée)
- Les panneaux photovoltaïques ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni technicien hautement spécialisé.
- Les panneaux photovoltaïques permettent de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et de trouver une alternative aux énergies fossiles polluantes.
- La taille des installations peut être augmentée en ajoutant des panneaux photovoltaïques pour répondre aux besoins des usagers.

- Le prix d'installation de panneaux photovoltaïques a beaucoup baissé. Les tarifs deviennent raisonnables pour assurer une certaine rentabilité.

**Inconvénients :**

Cependant, le système photovoltaïque présente des inconvénients :

- Les démarches administratives sont longues pour les panneaux photovoltaïques : 2 à 6 mois pour des installations simples.
- Un panneau photovoltaïque coûtant de l'énergie pour sa fabrication.
- L'absence de soleil fait évidemment chuter la production des panneaux solaires photovoltaïques.
- L'ennemi du panneau photovoltaïque c'est le soleil.
- La durée de vie des panneaux est limitée (de 20 ans en moyenne à 35 ans au maximum dans des régions et installations optimisés).
- En cas de coupure du réseau (grève, aléas climatiques, etc.), les installations photovoltaïques de vente du courant électrique sont bloquées.
- si la production avait dépassé la demande pendant les périodes de faible demande et aurait pu provoquer une « surtension ».
- La chaleur radiative du soleil fait chuter la production des panneaux solaires photovoltaïques.

**XII. Conclusion**

L'énergie solaire se transforme donc en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, qui consiste à créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule en libérant des électrons sous l'action des photons.

En effet, le silicium contenu dans les semi-conducteurs nous permet d'utiliser la lumière En tant que source d'électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Des panneaux solaires composés d'un grand nombre de telles cellules permettent d'utiliser l'effet photovoltaïque au quotidien. Même si cette source est très abondante, nous avons déjà vu que l'énergie solaire photovoltaïque peut ne pas être utilisée comme principale source d'énergie en raison du faible rendement des cellules.

Dans tous les cas, certains domaines d'application semblent plus adaptés à la production d'énergie photovoltaïque, tels que L'espace, les lieux éloignés, les télécommunications, les "petits" équipements électroniques, nécessitant relativement peu d'énergie.



## *Chapitre 03 : Modélisation et simulation d'un panneau PV*



## I Introduction :

Un système photovoltaïque est une chaîne d'éléments constituant de la source de production représentée par le générateur photovoltaïque qui produit l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire, les convertisseurs statiques (hacheur + onduleur) afin d'adapter le système et assurer le point maximum de puissance et la charge qui consomme et exploite la puissance fournie par le panneau. Notre système est composé d'un panneau, d'un hacheur élévateur (Boost), d'un onduleur et d'un moteur asynchrone. Ce chapitre est destiné à la modélisation du système photovoltaïque SPV en donnant une illustration sur chaque élément. On va présenter le modèle mathématique d'une cellule, puis d'un panneau, le convertisseur DC-DC de l'hacheur boost puis on va modéliser l'hacheur Boost, le convertisseur DC-AC (l'onduleur). On va citer le principe de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour chercher le point où la puissance du panneau délivrée au moteur asynchrone est maximale. Ainsi le principe de la commande MLI en précisant celle de sinus triangle.

## II Modélisation des cellules PV :

La modélisation des cellules PV passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module PV.[7]

Parmi ces modèles on peut citer les suivants :

- Modèle à une diode (un exponentiel)
- Modèle à deux diodes (deux exponentiels)

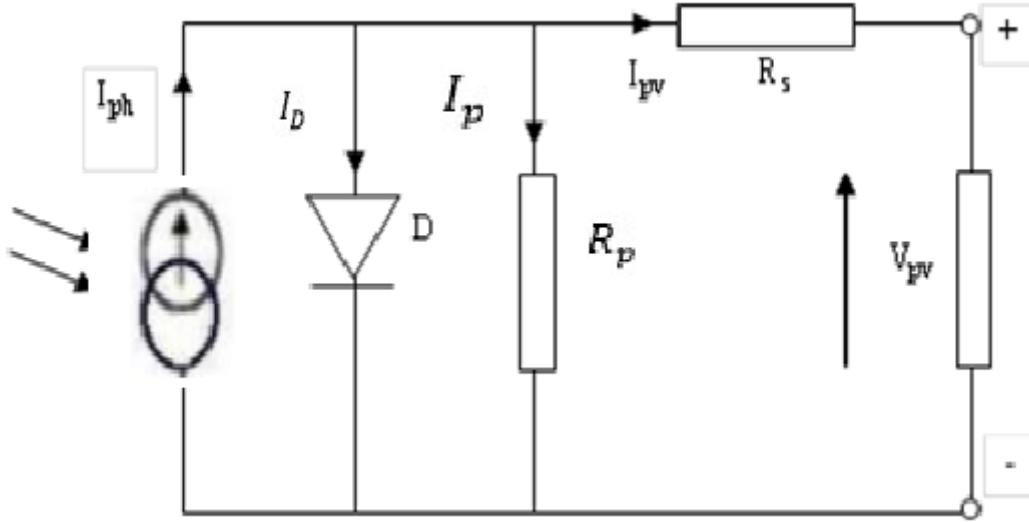
Dans notre travail, on a choisi le modèle à une seule diode.

### II.1 Modèle à une diode :

C'est le modèle le plus classique et le plus utilisé dans la littérature. Il a été développé par Eck Stein (1990). Ce modèle tient compte des phénomènes physiques. Il fait intervenir un

générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux, une diode pour les phénomènes de polarisation de la jonction et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.[7]

Le circuit électrique équivalent est présenté par la figure (III.1).



**Figure III.1 : Modèle d'une cellule PV à une diode**

Ce modèle a l'avantage d'être simple, il permet d'obtenir le comportement statique d'une cellule PV sous polarisation.

$$I_{pv\text{cell}} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (\text{III.1})$$

$I_{pv\text{cell}}$ : le courant de la cellule PV

$I_{ph}$ : le courant photonique, il est proportionnel à l'éclairement.

$I_D$ : le courant circulant dans la diode idéale D (diode en parallèle modélise la jonction).

$I_p$ : le courant circulant dans la résistance parallèle.

## II.2 Les équations caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Il existe plusieurs façons afin de présenter et calculer le courant d'une cellule PV (III.1). Pour cela, on a choisi un modèle mathématique simplifié et amélioré [7], et la caractéristique I-V peut être écrite comme suit :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot v}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \left( \frac{v + R_s I}{R_p} \right) \quad (\text{III.2})$$

Où :

$I_{pvcell}$  = a1.G. Photo courant (A).

Avec:

$$a_1 = 2.5 * 10^{-7}T + 2 * 10^4 \left[ en \frac{A}{\frac{W}{m^2}} \right]$$

$$I_D = I_{satcell} \left( \exp \left( \frac{q \cdot v}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (III.3)$$

Avec:

$I = I_{Ph} - I_D$

$V_T = \frac{KT}{q}$ : la potentiel thermodynamique à une température donnée

$I_{satcell}$ : le courant de saturation (A)

$R_s$ : résistance série ( $\Omega$ )

$R_p$ : résistance parallèle (shunt) ( $\Omega$ )

$K$ : la constante de Boltzmann ( $k=1.38*10^{-3}J/^{\circ}K$ )

$q$ : la charge de l'électron ( $q = 1.6 * 10^{-19}(C)$ )

$T$ : la température de la cellule ( $^{\circ}K$ )

$a$ : le facteur d'idéalité

### **III Modélisation d'un panneau photovoltaïque:**

Après avoir caractérisé la cellule photovoltaïque, modéliser le module comme une association de NS cellules en série et que les cellules NP cellules en parallèle De même, le courant de court-circuit du module est multiplié par NP, et la tension en circuit ouvert du module est multipliée par NS. [8] La caractéristique d'un module qui comporte NS cellules connectées en série et en NP cellules Connectées en parallèle est donnée par :

$$I = I_{pvcell} - I_{satcell} \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{a \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \left( \frac{v + R_s I}{R_p} \right) \quad (III.4)$$

Avec :

$$I_{pv} = I_{pv\text{cell}} * N_p \text{ et } I_{sat} = I_{sat\text{cell}} * N_p$$

Et  $V_T = N_s K_T / q$  : la potentielle thermodynamique d'un panneau photovoltaïque. Les équations du modèle sont présentées en détails et le modèle est validé avec les données Expérimentales. [8]

Le courant généré par le panneau photovoltaïque dépend linéairement de l'irradiation solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{pv} = \frac{(I_{pvn} + K_I \Delta_T)G}{G_n} \quad (\text{III. 5})$$

Avec:  $I_{pvn} = \frac{RP + RS}{RP} * I_{ccn}$

$I_{pvn}$ : est le courant généré par la lumière à la valeur nominale. (Généralement de 25°C et 1000W/m²)  $\Delta T = T - T_n$ : ( $T$  et  $T_n$  étant la température réelle et nominale [K]),

**G (w/ m²)** : est l'irradiation sur la surface du dispositif,

**G<sub>n</sub>**: est l'irradiation nominale [8].

L'hypothèse  $I_{cc} \approx I_{pv}$  est généralement utilisée dans les modèles photovoltaïques, car dans les Dispositifs pratiques la série la résistance est faible et la résistance parallèle est élevée

$$I_{cc} = (I_{ccn} + K_I \Delta_T)G/G_n$$

**I<sub>cc</sub>** : courant de court-circuit Le courant de saturation **I<sub>sat</sub>** de diode et de sa dépendance sur le la température peut être exprimée par : [8]

$$I_{sat} = I_{satn} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left( \frac{qEg}{ak} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (\text{III. 6})$$

$$I_{satn} = \frac{I_{con}}{\exp \left( \frac{V_{ccn}}{aVTn} \right) - 1} \quad (\text{III. 7})$$

$E_g$ : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur ( $g \approx 1,12\text{eV}$  pour le silicium à  $25^\circ\text{C}$ )

$I_{sat}$ : le courant de saturation nominale

$V_{Tn}$ : la tension thermique à la température nominale Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente peut être améliorée si l'équation (III.8) est remplacée par :

$$I_{Sat} = \frac{I_{ccn} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{ccn} + K_v \Delta T}{aV}\right) - 1} \quad (\text{III. 8})$$

L'équation (III.9) peut être introduite dans le modèle:

$$I_{PVn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn} \quad (\text{III. 9})$$

#### IV Modélisation d'un générateur:

L'équation de la caractéristique relative à un champ de modules formé par la sérialisation de Modules Ms et de modules MP en parallèle est extrapolée de celle d'un module. [8]

$$I_C = M_P I_{PV} \cdot M_P \left( \exp\left(M_S V + \frac{M_S \cdot R_S I}{a M_P V_T} - 1\right) - \left( \frac{\frac{M_S \cdot V + \frac{M_S \cdot R_S I}{M_P}}{\frac{R_P M_S}{M_P}}}{\frac{R_P M_S}{M_P}} \right) \right) \quad (\text{III. 10})$$

Cette relation n'est valable que si tous les modules, constituant le générateur PV, Sont identiques et reçoivent la même irradiation ayant la même caractéristique (I-V).

#### IV.1 Simulation d'un panneau PV:

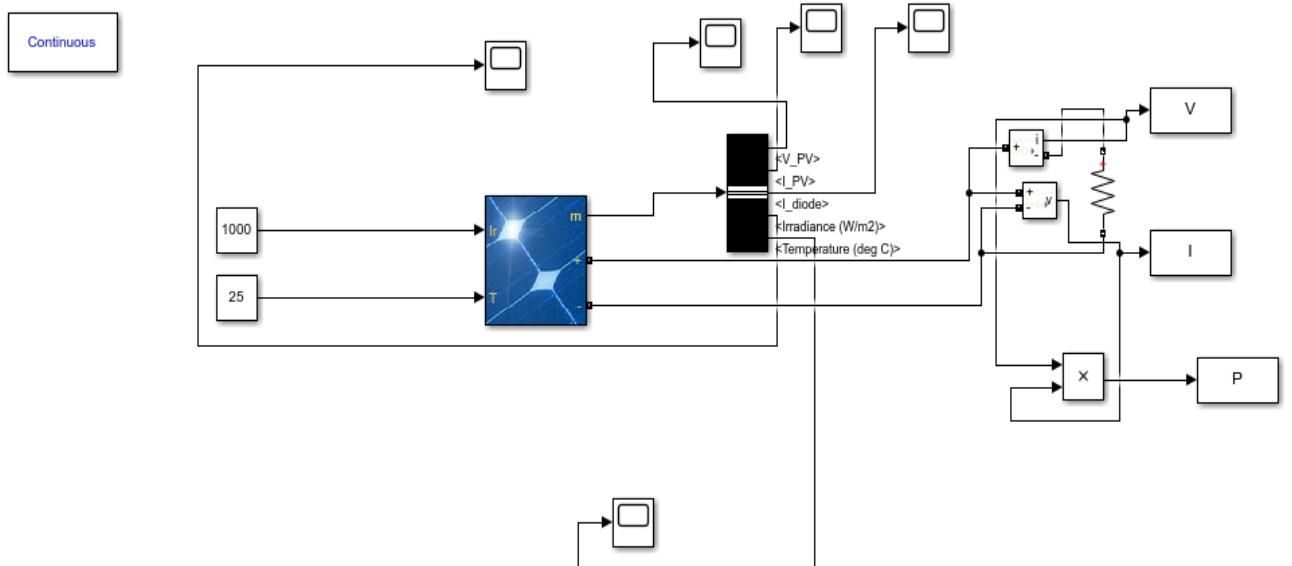
Le module photovoltaïque (**SIT, SI1632G1**), est choisi pour la simulation. Il fournit une puissance maximum nominale 1119.4 w. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par Le tableau (III.1) suivant :

Les paramètres	Symbol	Unité
Tension de circuit ouvert	VCO	370 V
Courant de court-circuit	ICC	5.10 A
Tension de puissance maximale	Vmp	264.00 V
Courant de puissance maximale	Im p	3.89 A
Puissance maximale	PP <sub>Max</sub>	1119.4 W
Nombre de cellule en série	NS	176

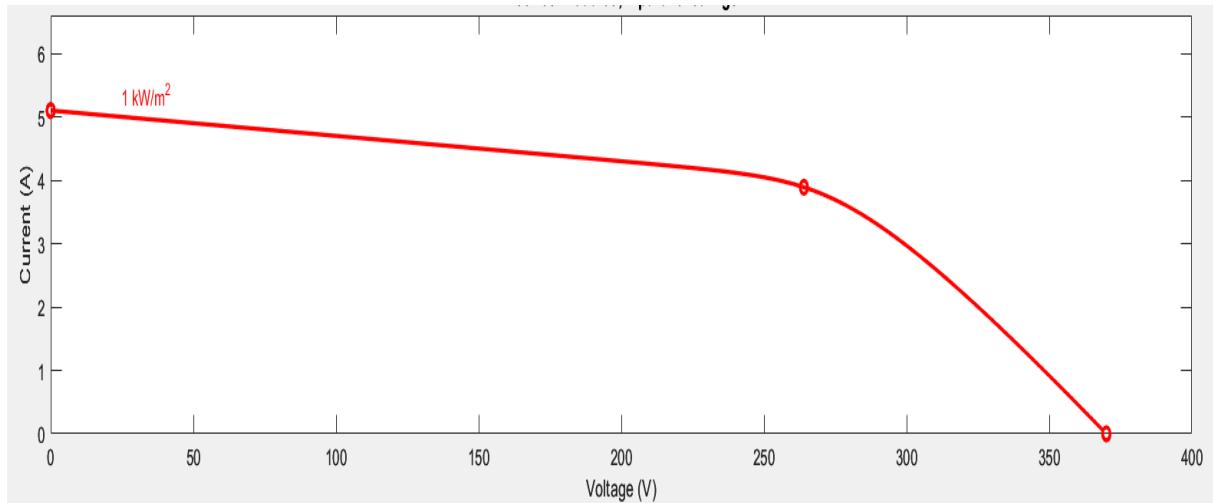
Nombre de cellule en parallèle	Np	5
Coefficient de température courant	$k_I$	$5.1mA/{}^{\circ}C$
Coefficient de température tension	$k_V$	$-1345mV/{}^{\circ}C$
Coefficient d'idéalité	A	4.25

**Tableau. III.1 : caractéristiques électriques du module SI 1088 T2****IV.2 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement constante**

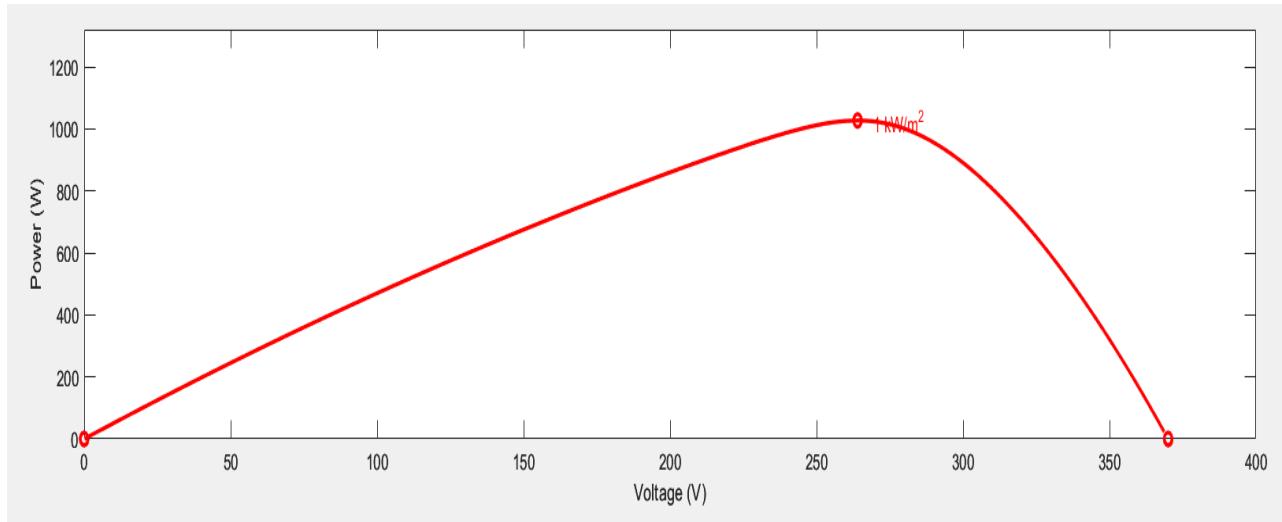
Le schéma bloc simulé l'aide du Logiciel SIMULINK sous MATLAB est donné par la figure (III.2)

**Figure III.2 : Schéma bloc d'un générateur (GPV)**

Les résultats de la simulation des caractéristiques : courant-tension et puissance-tension du module PV dans les conditions standards ( $G=1000W/m^2$ ) et ( $T=25C^{\circ}$ ) sont représentés dans les figures (III.3) (III.4)



**Figure III.3 : Résultat de la simulation caractéristique I (V) dans les conditions standards**



**Figure III.4 : Résultat de la simulation caractéristique P (V) dans les conditions standards**

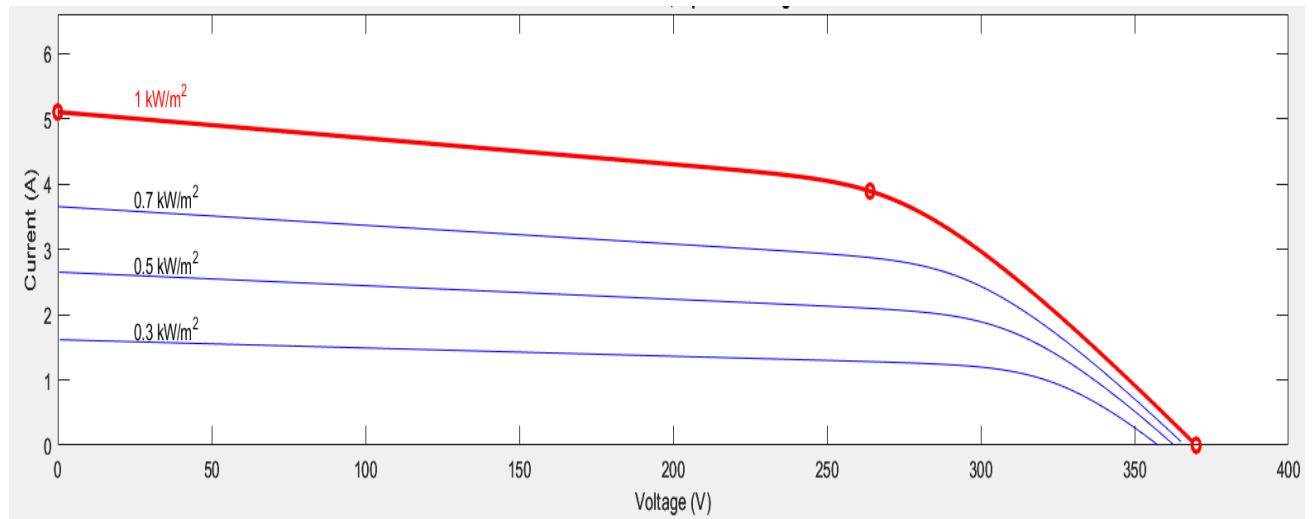
#### **IV.2.1 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable**

Les graphes suivants représentent les caractéristiques I(V) et P(V) respectivement d'un Générateur photovoltaïque pour une température constante ( $T=25^\circ\text{C}$ ) et un ensoleillement Variable

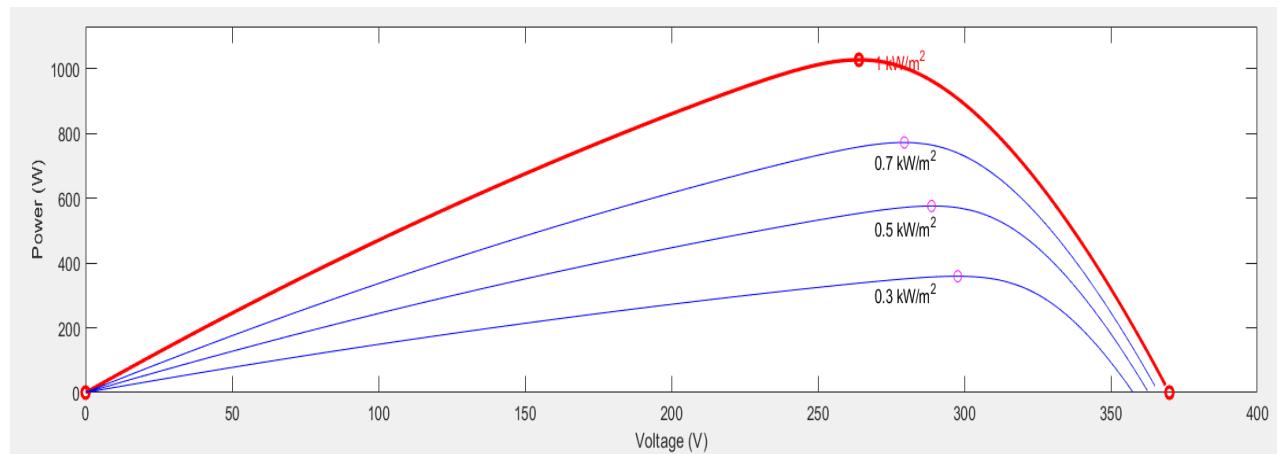
#### **IV.3 Influence de l'irradiation :**

En faisant varier l'éclairement ( $G$ ) entre 300 et 1000 avec un pas de 50, les caractéristiques

$[I_{pv} = f(V_{pv}), P_{pv} = f(V_{pv})]$  sont données par les figures (III.5) et (III.6)



**Figure III.5 : Résultats de simulation des caractéristiques courant-tension, pour différents éclairements avec une température constante  $T=25^\circ\text{C}$**

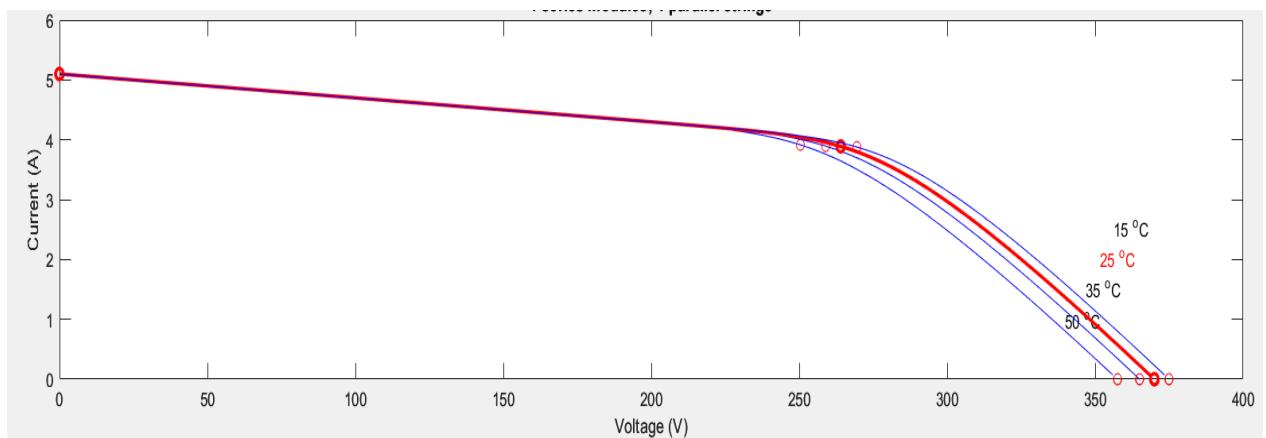


**Figure III.6: Résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension, pour différents éclairements avec une température constante  $T=25^\circ\text{C}$**

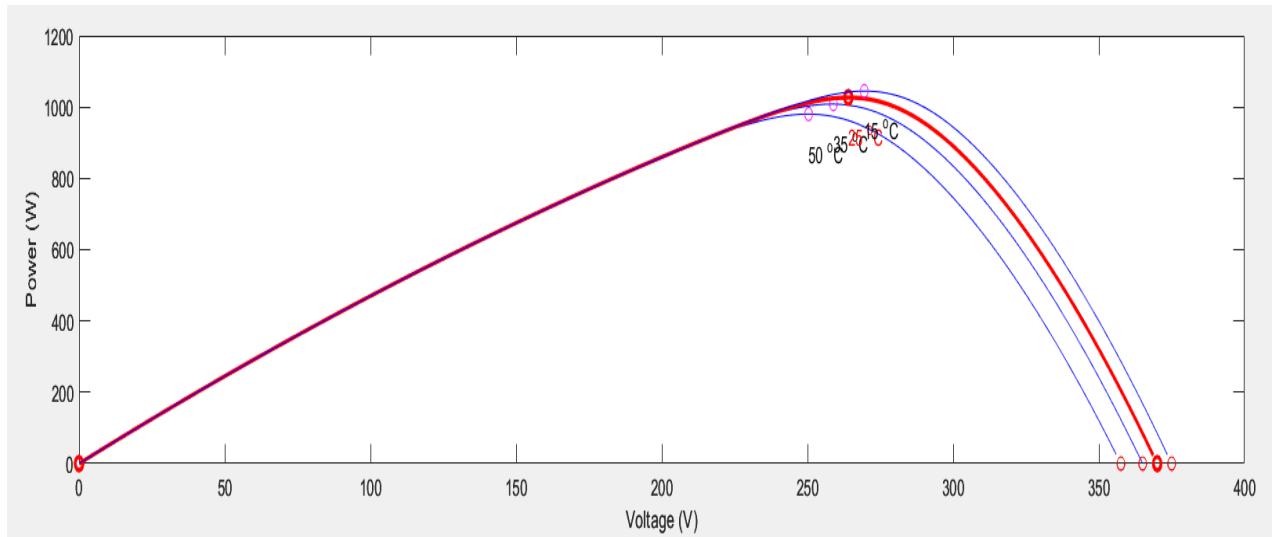
Les deux figures (III.5) et (III.6) représentent les résultats de simulation, des caractéristiques courant-tension et puissance-tension respectivement, du module PV. L'augmentation de l'irradiation engendre l'augmentation considérable du courant et de puissance, tandis que la valeur de la tension reste presque la même.

#### IV.4 Influence de la température :

En faisant varier la température ambiante ( $T$ ) entre ( $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$ , et  $50^{\circ}\text{C}$ ) avec un pas de  $10^{\circ}\text{C}$ , L'influence de celle-ci sur la caractéristique( $I_{pv} - V_{pv}$ ) est donnée par la figure (III.18) avec un Éclairement ( $G=1000\text{W/m}^2$ ). On constate d'après la figure (III.7) que l'effet de l'augmentation de la température fait Diminuer la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque, contrairement au courant De court-circuit qui reste constante. Les figures (III.7) et (III.8) représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différentes températures et un éclairement constant.



**Figure III.7: Résultats de simulation des caractéristiques courant-tension, pour différentes températures et un éclairement constant  $G=1000\text{W/m}^2$**



**Figure III.8: Résultats de simulation des caractéristiques puissance-tension, pour différentes températures et un éclairement constant  $G=1000\text{W/m}^2$**

D'après la figure (III.8), l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique ( $P_{pv} - V_{pv}$ ) fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert de générateur Photovoltaïque. Les deux figures (III.7) et (III.8) représentent les résultats de simulation, des caractéristiques courant-tension et puissance-tension respectivement, du module PV. L'augmentation de la Température engendre une augmentation légère du courant, tandis que la tension et la puissance marquent une petite diminution avec cette augmentation de température.

#### **IV.5 Optimisation des générateurs PV**

Le raccordement d'un générateur PV à une charge quelconque nécessite l'adaptation de ce générateur PV pour qu'il fonctionne, à une température et un éclairement donné, à sa puissance maximale et par conséquent à un rendement élevé. Ceci est réalisé en intercalant entre le générateur PV et la charge un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC « hacheur » pour des applications en régime continu. L'adaptation a lieu en variant le rapport cyclique de la commande de l'interrupteur du convertisseur. [34]

Dans la suite, nous analysons la structure et le fonctionnement électrique de ce convertisseur d'énergie.

#### **IV.6 Présentation du système :**

Notre système représentatif est constitué de :

##### **IV.6.1 Générateur photovoltaïque :**

Se base sur un module SIT, SI1632G1.

##### **IV.6.2 Hacheur Boost:**

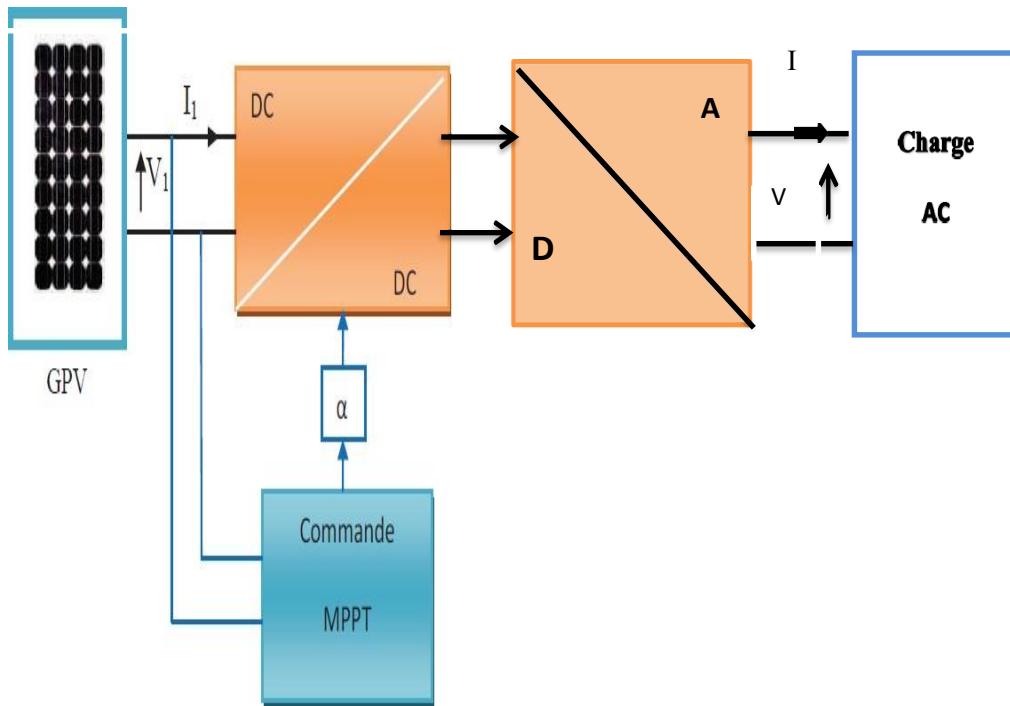
L'hacheur Boost est élévateur de la tension de sortie du générateur PV, muni d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettant la poursuite du point à puissance maximale, basée sur la méthode de Perturbe & observe (P&O).[7]

##### **IV.6.3 Onduleur:**

Un onduleur avec IGBT est un dispositif électronique qui convertit efficacement une tension continue en une tension alternative en utilisant des transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) figure III.9. Ces composants semi-conducteurs offrent une commutation rapide, une capacité de manipulation de courants et tensions élevés, ainsi qu'une meilleure isolation électrique grâce à la présence de la porte isolée.

#### IV.6.4 Moteur asynchrone:

La charge est représentée par le moteur asynchrone à cage d'écureuil.



**Figure III.9: Chaîne élémentaire de conversion Photovoltaïque**

#### IV.6.5 Convertisseur DC/DC :

L'hacheur est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

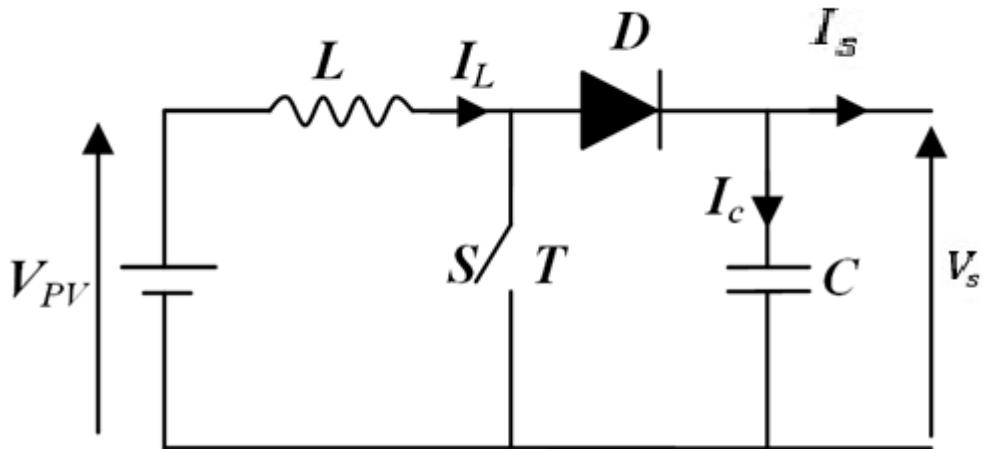
Il existe trois types d'hacheurs :

- **Hacheur dévolteur (Buck ou série)** : la tension moyenne délivrée en sortie est inférieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur survolteur (Boost ou parallèle)** : la tension moyenne délivrée en sortie est supérieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost ou série-parallèle)** : ce sont des hacheurs capables de fonctionner de deux manières (Buck -Boost) ou la tension moyenne de sortie est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée.

Dans notre étude, le convertisseur Boost est utilisé comme adaptateur de la charge, permettant la poursuite du point de puissance maximale.[7]

#### IV.6.6 Convertisseur Boost (hacheur parallèle) :

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée figure III.10. C'est pour cela qu'il est dit élévateur de tension.[7].



**Figure III.10 : Circuit électrique de l'hacheur (Boost)**

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement est comme suit : Au premier temps ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. L'interrupteur (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge à travers la diode (D).[7]

#### IV.7 Adaptation par le convertisseur DC-DC

Les grandeurs électriques de sorties ( $V_s$  et  $I_s$ ) dans le convertisseur survoltage sont liées à celle d'entrées ( $E$  et  $I_{pv}$ ) en fonction du rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur figure (III.11) par les relations : [34]

$$V_s = \frac{V_{pv}}{1 - \alpha} \quad (\text{III.11})$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_{pv} \quad (\text{III.12})$$

A partir des équations (III.17) et (III.18), nous pouvons déduire la résistance à la sortie du Panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $\alpha$  et  $R_s$  :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = (1 - \alpha)^2 R_s \quad (\text{III.13})$$

Aussi, le rapport cyclique  $\alpha$  s'écrit en fonction des résistances  $R_{pv}$  et  $R_s$  :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \quad (\text{III.14})$$

Puisque le rapport  $\alpha$  est inférieur 1 ( $\alpha < 1$ ) le convertisseur ne joue le rôle d'un surveilleur. Que si la charge remplit la condition suivante :

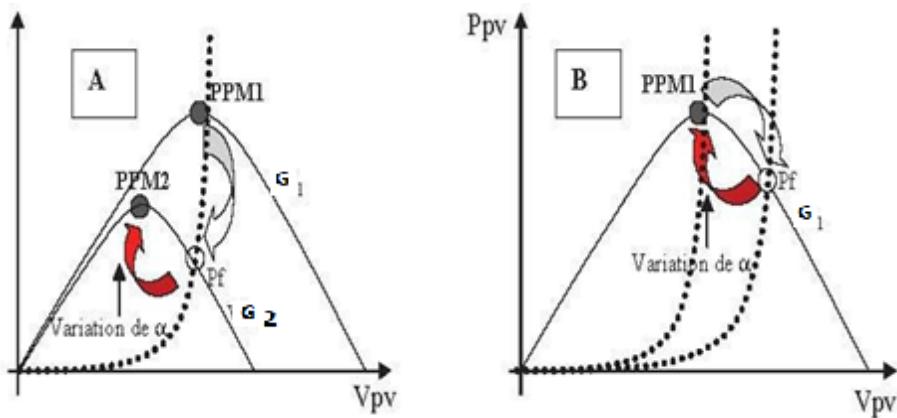
$$R_s < R_{pv} \quad (\text{III.15})$$

Dans les conditions optimales et pour une charge  $R_s$ , la résistance interne du panneau ( $R_{pv}=R_{opt}$ ) et le rapport cyclique ( $\alpha=\alpha_{opt}$ ) obéissent donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1 - \alpha_{opt})^2 R_s \quad (\text{III.16})$$

La relation (III.16) montre que, pour une puissance incidente  $G$  la puissance optimale Transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini ( $\alpha_{opt}$ ) (point PPM). comme le montre sur la figure (III.11) pour une puissance incidente  $G_1$ , La puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique ( $\alpha_{1opt}$ ) (point PPM1) si la puissance incidente change ( $G_2$ ) alors ce point de puissance maximale Est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point Pf pour converger vers le nouveau point PPM2 il faut ajuster le rapport cyclique ( $\alpha$ ) à la valeur ( $\alpha_{2opt}$ ) il en sera de même que lorsque la charge  $R_s$  change. [34]

le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM1) ; pour Converger vers ce PPM1 il faut agir sur le rapport cyclique ( $\alpha$ ) Donc dans un système photovoltaïque indépendant et autonome, cette régulation doit être réalisée automatiquement afin de poursuivre le point de fonctionnement optimal. En plus, nous avons vérifié que lorsque la charge ou l'éclairement varie de 25% la puissance Électrique fournie à la charge diminue de 50% par rapport à la puissance maximale que Peut fournir le générateur PV. [34]



**Figure III.11 : Fluctuation du point de puissance maximale avec l'intensité d'éclairement et la Charge  $R_{ch}$**

**A** : variation de l'éclairement

**B** : variation de la charge 2

**G1, G2** : puissance de l'éclairement

**Pf** : point de fonctionnement de générateur PV

( $p_{pv}$ ) puissance à la sortie du générateur PV

( $p_{ch}$ ) puissance fixée par la charge  $R_{pv}$  du générateur PV ( $P_{pv}=V_{pv}^2/R_{pv}$ )

Donc, pour une installation photovoltaïque, la connaissance des conditions optimales Tension ( $V_{opt}$ ), courant ( $I_{opt}$ ), la puissance optimale ( $P_{max}$ ) et la résistance équivalente à la Sortie du générateur  $R_v$  ( $R_{opt}$ ) est indispensable afin de choisir la valeur de la charge Adéquate. [34]

#### IV.8 Modélisation de l'hacheur Boost :

La modélisation de ce convertisseur se base sur l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposerons de durées fixées par la commande S. (Figure II.3) Comme résultats on a deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.[7]

➤ Lorsque (T) est fermé:

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{III.17})$$

$$0 = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.18})$$

➤ Lorsque (T) est ouvert :

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (\text{III.19})$$

$$I_L = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.20})$$

En posant :

- (S=1) pour T est fermé.

- (S =0) pour T ouvert.

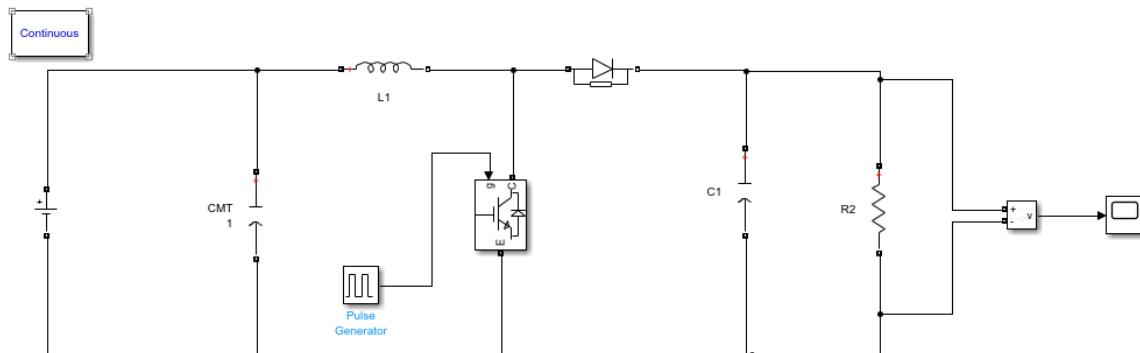
Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - S) \quad (\text{III.21})$$

$$(1 - S)I_L = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.22})$$

#### IV.9 Représentation de la simulation (hacheur Boost):

Voici la figure III.12:



**Figure III.12 : Schéma bloc de l'hacheur Boost**

## V Commande de maximisation de puissance :

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) permet au générateur photovoltaïque de débiter sa puissance maximale. Le traqueur est conçu généralement avec un convertisseur selon une technique de commande appropriée (hacheur élévateur Boost). Elles sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes. Ces dernières représentées généralement par la méthode de Perturbation & Observation et la méthode de l'incrémentation de la conductance.[7]

Dans notre travail, on a opté à la méthode de Perturbation et Observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

### V.1 La méthode de Perturbation et Observation (P&O):

L'algorithme de poursuite du PPM est le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du panneau est supérieure à la valeur précédente  $P(k-1)$ , alors on garde la même direction de perturbation

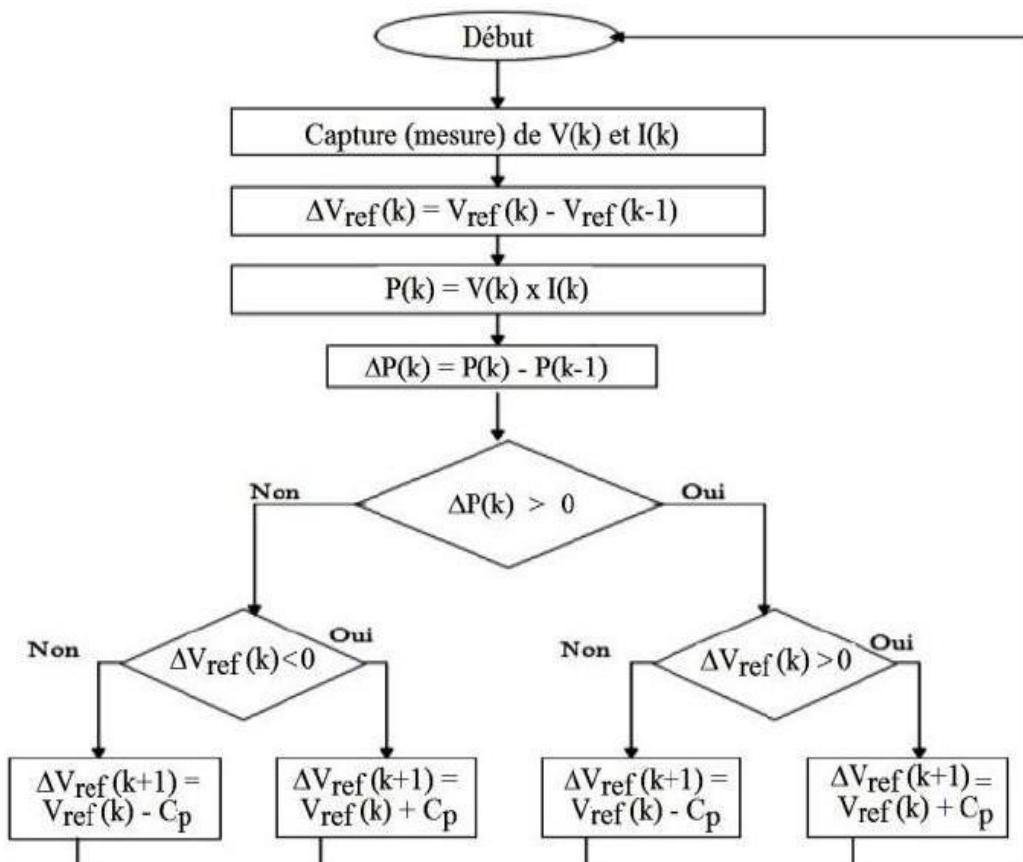


Figure III.13 : Organigramme de la méthode P&O

Précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

Avec :

**Cp** : la largeur du pas d'une perturbation simple 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 ralenti la recherche du PPM, figureIII.13 il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. [11]

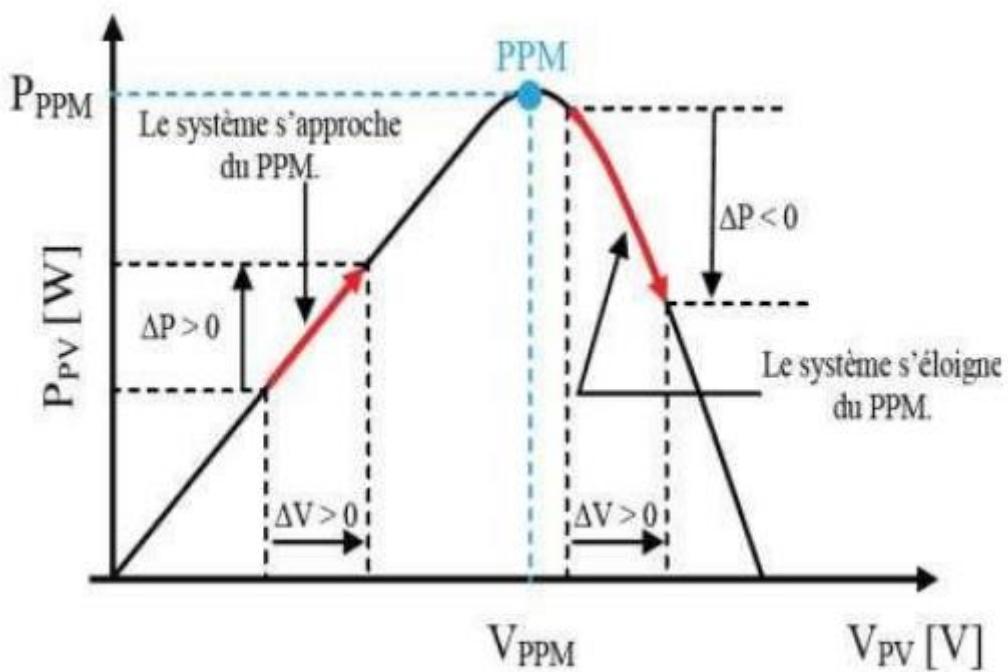
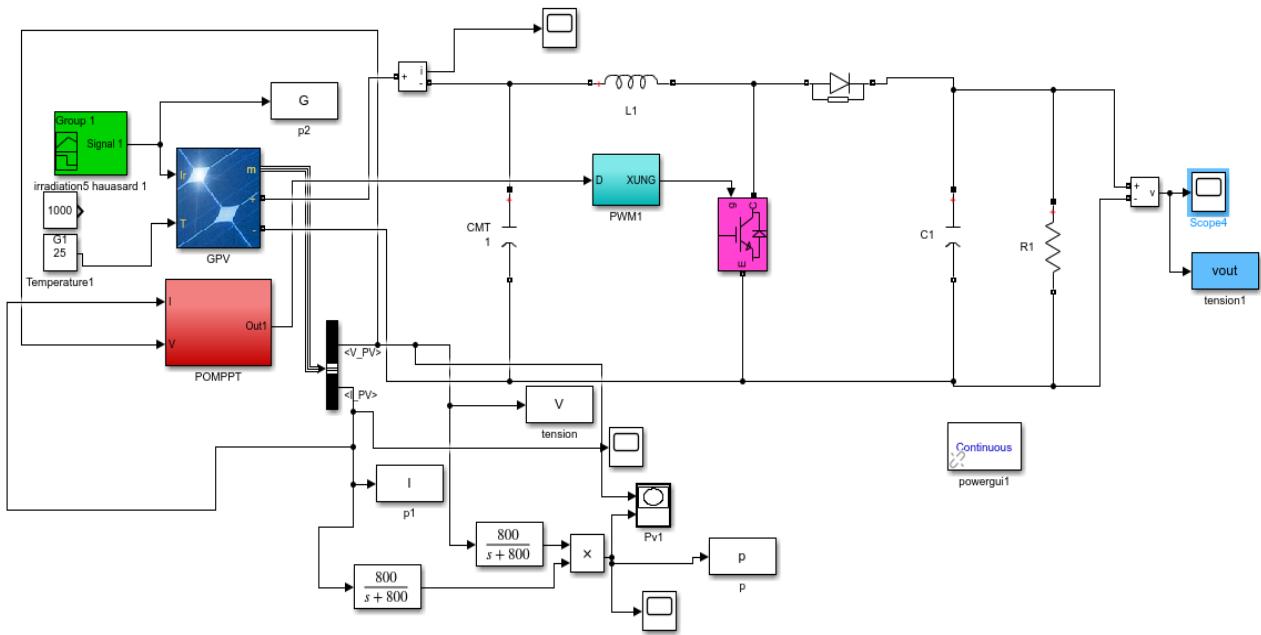


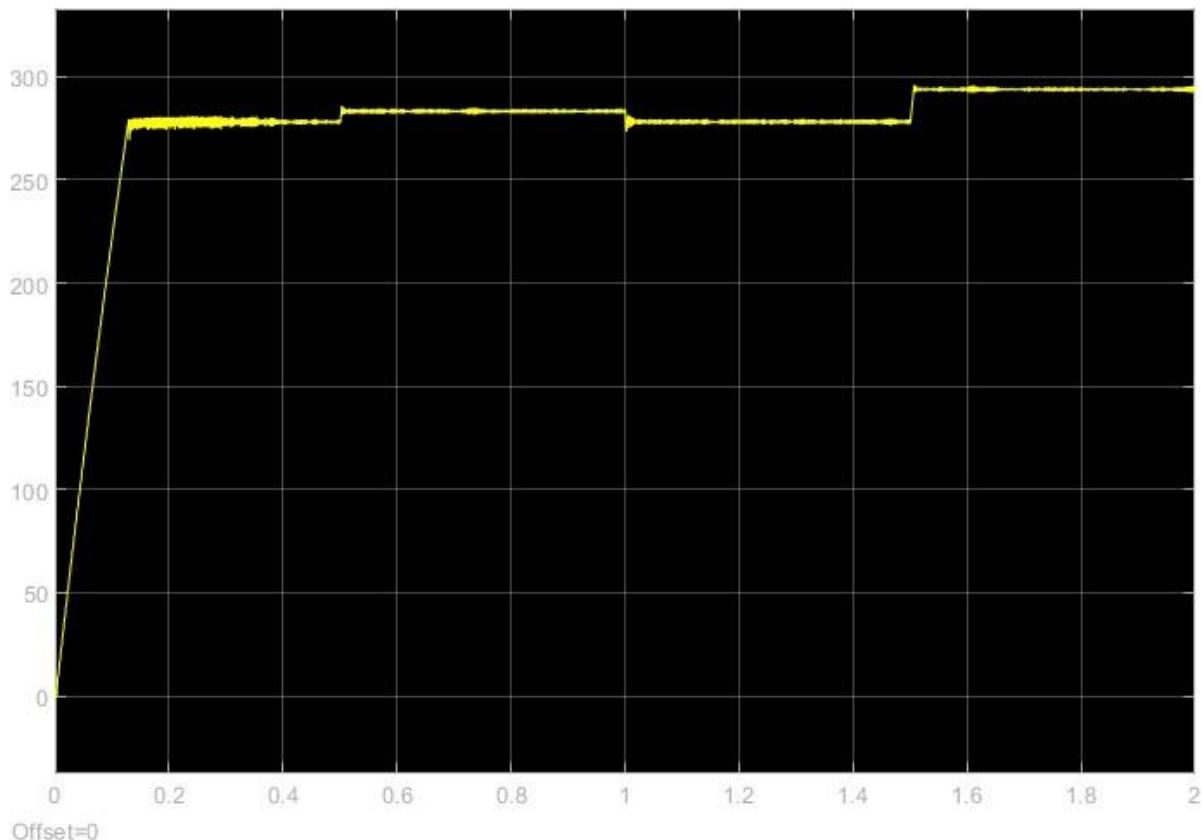
Figure III.14 : Principe de la commande P&O

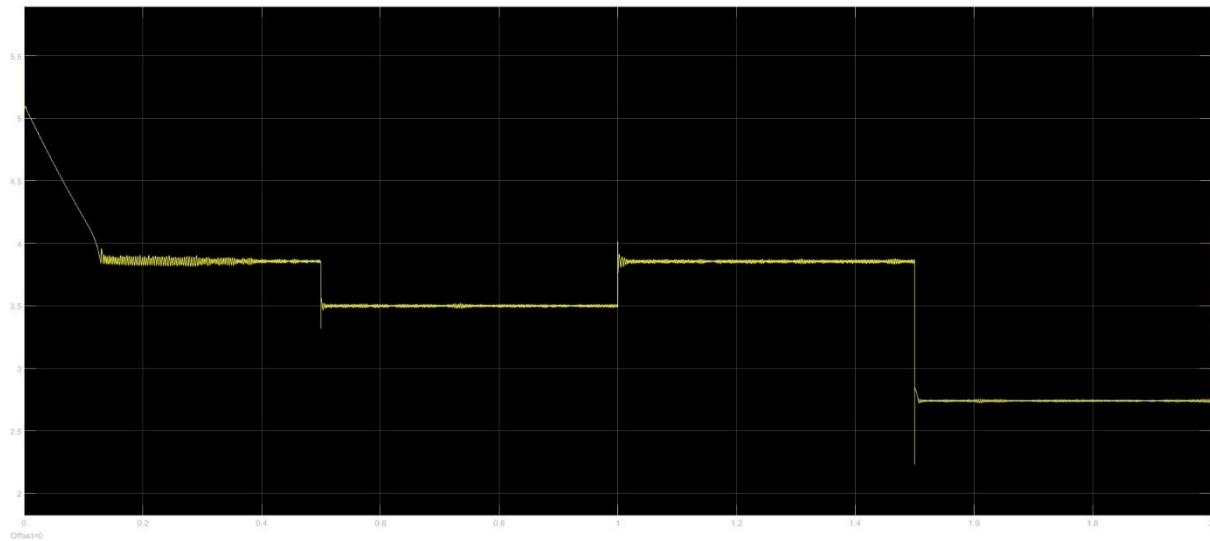
## VI Simulation du panneau Avec commande MPPT



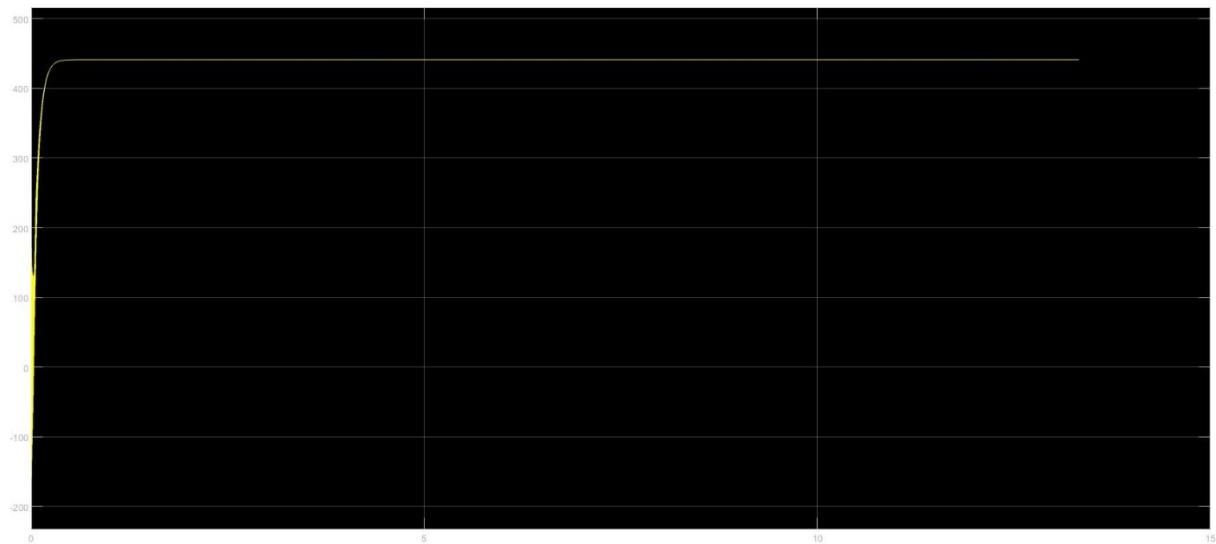
**Figure III.15 : Schéma de bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT**

Après la simulation, la tension et le courant de sortie donnée par panneaux PV par les figures (III.16) (III.17)

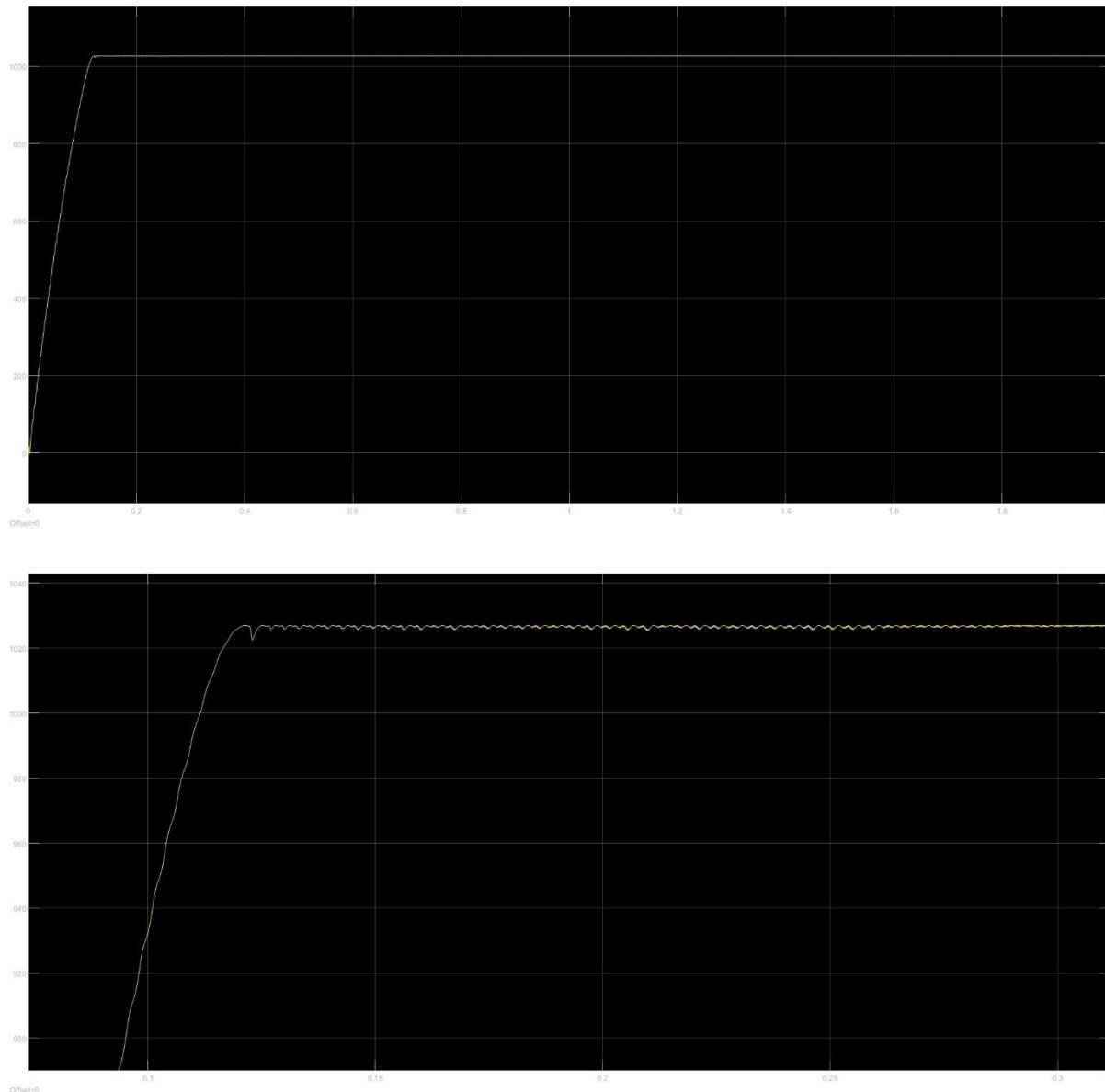


**Figure III.16 : Tension de sortie de panneaux PV****Figure III.17: Courant de sortie de panneaux PV**

Après la simulation, la tension et de sortie donnée par l'hacheur Boost est illustrée par la figure (III.18)

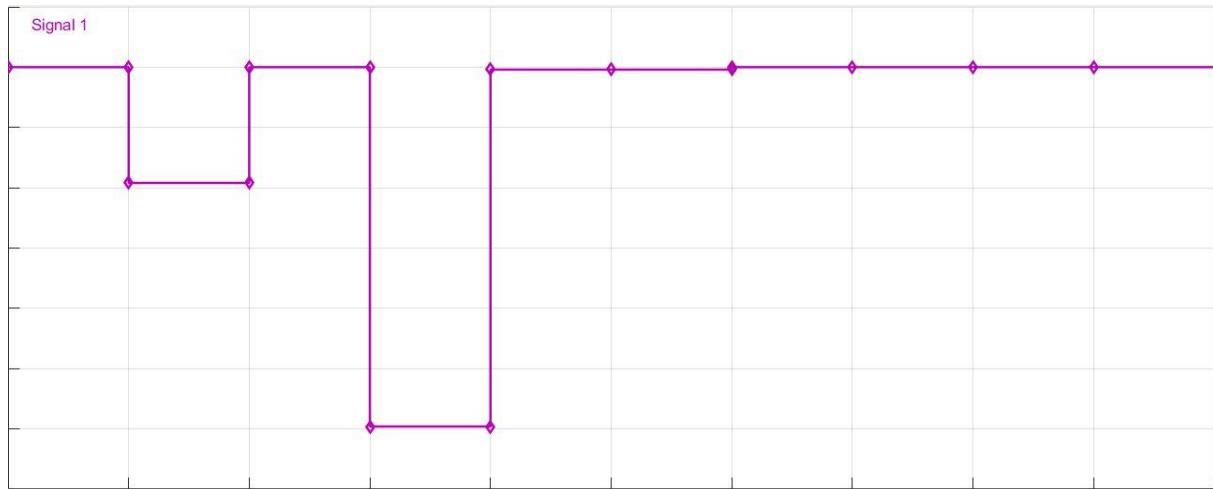
**Figure III.18 : Tension de sortie de Boost**

Après la simulation, la puissance maximal donnée par panneaux PV par la figure (III.19)

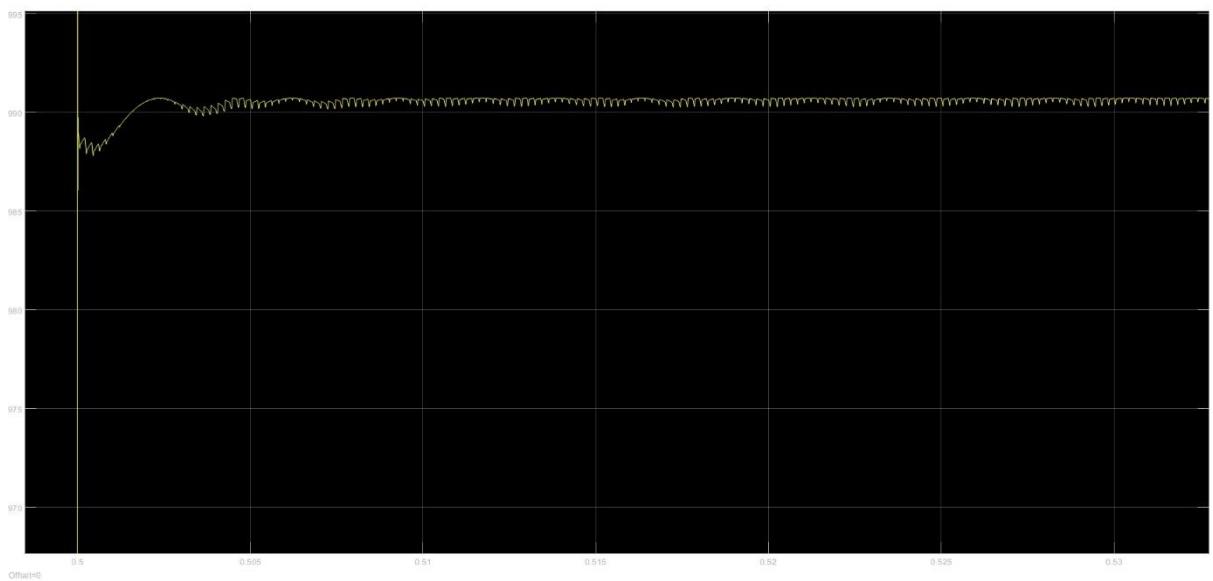


**Figure III.19 : la puissance maximale donnée par panneaux PV pour un éclairement constant ( $1000 \text{ W/m}^2$ )**

Rôle de la commande MPPT sur la puissance extraite du panneau PV lors du changement d'éclairement



**Figure III.20 : Profile du changement d'éclairement ( $\text{W/m}^2$ )**



**Figure III.21 : Puissance de la sortie du panneau lors du changement d'éclairement et (zoom)**

## **VII Discussions des résultats de la simulation**

Les figures (III.17), (III.18), (III.19), (III.20), (III.21) représentent la tension, le courant et la puissance de sortie respectivement. Ces résultats montrent que l'hacheur Boost et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles. La tension fournie par l'hacheur Boost à sa sortie est supérieure à la tension fournie par le générateur Le contrôle photovoltaïque et MPPT permet au générateur photovoltaïque de s'adapter à la charge.

## **VIII Conclusion**

Les résultats de simulation montrent que les performances d'un panneau PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante et que la caractéristique  $P=f(V)$  comporte un point de puissance maximal (PPM).

L'évolution de la caractéristique  $I = f(V)$  en fonction de la température montre que le courant augmente lorsque la température s'élève.

La caractéristique  $P=f(V)$  comporte un point de puissance maximal (PPM) et le raccordement direct du générateur PV ne permet de transmettre une puissance maximale que dans des conditions restreintes c'est l'inconvénient majeur des Générateurs PV.

La commande MPPT assure la poursuite du point de puissance maximal lors de la variation des conditions météorologiques (l'éclairement, température).



## *Chapitre 04 : Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur*

**DV**



## I Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. Le générateur photovoltaïque et une source continue il faut utiliser un convertisseur DC-AC.

## II Présentation de la structure du système photovoltaïque

- Machine asynchrone

Dont les données sont les suivantes :

230/400 (V)

F=50 HZ

N= 1430 tr/min

Pn=1000 W

- Générateur (PV)

Panneau type (SIT, SI1632G1), formée de 176 cellules.

- Convertisseur DC-AC (Onduleur)

Leur nombre est relativement petit. La principale différence entre eux est le nombre de phases de l'étage DC et de l'alimentation AC. Si l'étage DC est considéré comme une source de courant, le convertisseur DC-AC L'onduleur de courant est lié. -Si vous considérez l'étage DC comme une source de tension, veuillez utiliser un convertisseur DC-AC L'onduleur de tension est lié.

[8]

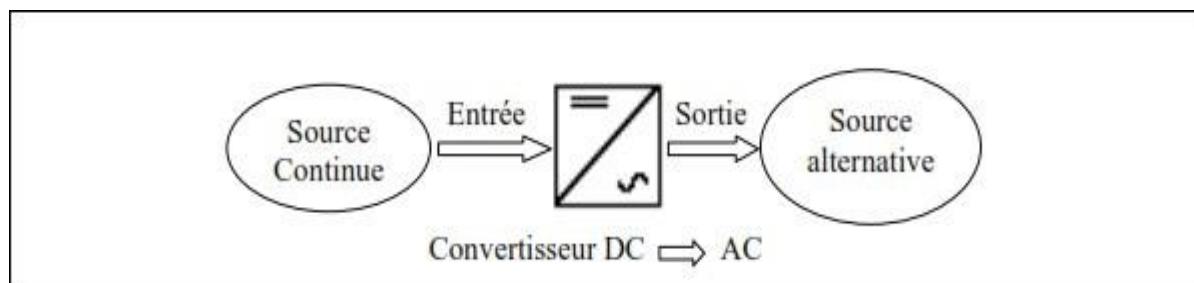
### II.1 Définition de l'onduleur :

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés des onduleurs. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie Alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant. D'autre part, si la tension d'entrée est fixe et qu'elle est non contrôlable, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur.

Le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de Sortie et la tension continue d'entrée.

Pour des applications de faibles et moyennes puissances, les tensions de forme d'onde carrée où quasi carrée pourront être acceptables ; alors que pour les applications de fortes puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion des harmoniques sont exigées. Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse de commutation, l'harmonique contenue dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement par des techniques de commande. [13]

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple : variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu obtenu à partir d'un redressement monophasé ou triphasé comme le montre La figure (IV.1)



**Figure IV.1: Principe de fonctionnement de l ' onduleur**

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue.

## **II.2 Classification des onduleurs**

Il existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. [13]

Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

### **II.2.1 Onduleur autonome**

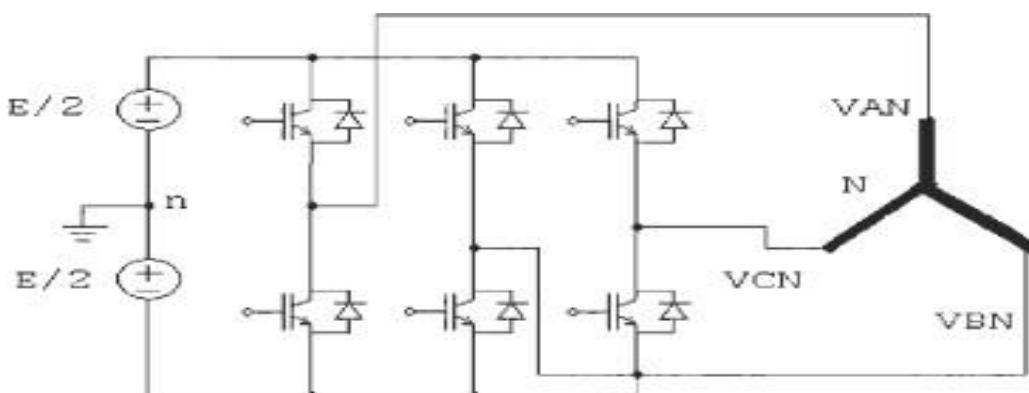
C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible. [13]

### **II.2.2 Onduleur non autonome**

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables. [13]

## **II.3 Modélisation de l'onduleur triphasé**

L'onduleur triphasé dit deux niveaux illustrés par son circuit de puissance de la figure (IV.2) on doit distinguer d'une part les tensions de branche VAN, VBN, VCN mesurées par rapport à la borne négative de tension continue VPV, d'autre part, il y a les tensions de phases VAN, VBN et VCN mesurées par rapport à un point neutre flottant n représentent une charge équilibrée montée en étoile. A partir des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées VAN, VBN et VCN. [15]



**Figure IV.2 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé**

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure (IV.2), il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit : [13]

$$V_{An} = S_1 V_{pv}$$

$$V_{Bn} = S_2 V_{pv} \quad (\text{IV-1})$$

$$V_{Cn} = S_3 V_{pv}$$

Où S1, S2 et S3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Les tensions composées sont : [13]

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AB} - V_{BN} = (S_1 - S_2)V_{pv} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{rAV} = (S_2 - S_3)V_{pv} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1)V_{pv} \end{aligned} \quad (\text{IV-2})$$

On peut écrire l'équation sous la forme matricielle :

$$\begin{vmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{vmatrix} = V_{pv}^* \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{vmatrix} \quad (\text{IV-3})$$

Les tensions simples sont :

$$\begin{aligned} V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{CN} + V_{CN}) \\ V_{BN} &= \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN}) \\ V_{CN} &= \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN}) \end{aligned} \quad (\text{IV-4})$$

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{V_{pv}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV-5})$$

### **III Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)**

La modulation de largeurs d'impulsion consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenable.

Les onduleurs de tension servant principalement à alimenter, à fréquence fixe ou variable, des charges alternatives, le critère qui sera considéré dans ce chapitre est l'obtention pour chaque tension de sortie d'une forme d'onde approximant au mieux la sinusoïde.

## **IV Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)**

Grâce à MLI (Modulation de Largeur D'impulsions) pour contrôler l'onduleur, il est possible de générer une tension alternative avec une amplitude et une fréquence variables et des niveaux d'harmoniques faibles à partir d'une alimentation avec une fréquence et une tension fixe.

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

### **IV.1 Commande MLI sinus – triangle**

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde 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 sinusoïdale déphasées de  $(2\pi/3)$  à la même fréquence  $f_s$ .  
[16] [17] Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} v_{ref-as} = v_m \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) \\ v_{ref-bs} = v_m \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref-CS} = v_m \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{IV-6})$$

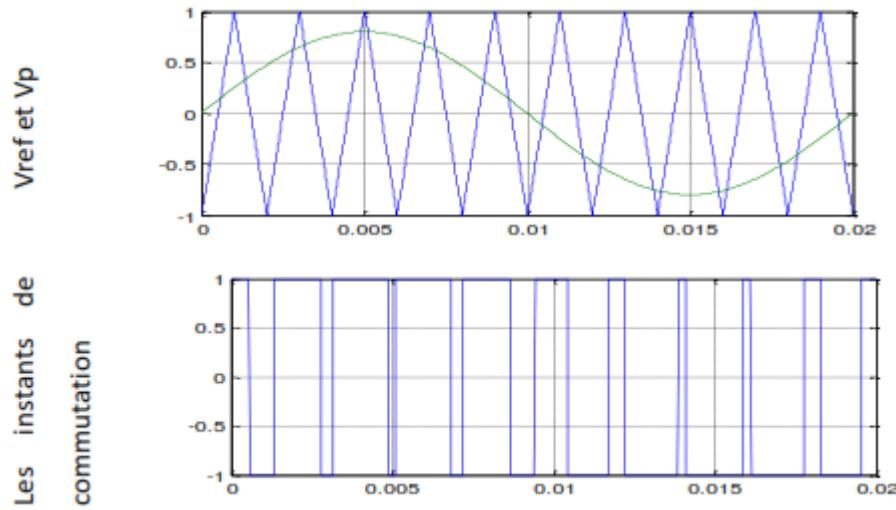
L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[ 4 \left( \frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} \left[ -4 \left( \frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants : [17]

- L'indice de modulation ( $m$ ) égal au rapport de la fréquence de modulation ( $F_p$ ) sur la fréquence de référence ( $F_r$ ), ( $m = F_p / F_r$ )

- Le coefficient de réglage en tension ( $r$ ) égal au rapport de l'amplitude de la tension de Référence ( $V_r$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ ), ( $r = V_r/V_{pm}$ ) figure IV.3



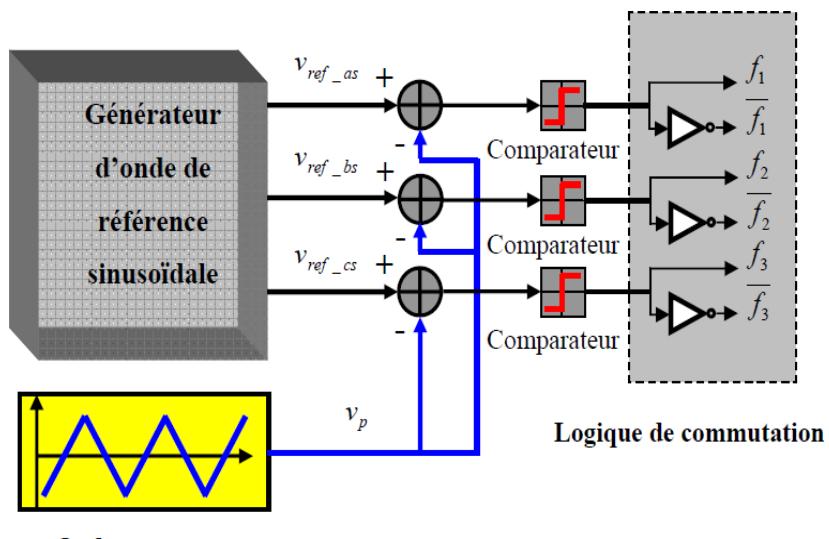
**Figure IV.3 : Description de la commande M.L.I. sinus – triangle**

Le mode de fonctionnement de cette technique est : [17]

- Si  $V_{ref}(t) > V_p(t)$  le transistor supérieur du bras de pont conduit.
- Si  $V_{ref}(t) < V_p(t)$  le transistor inférieur du bras de pont conduit.

Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par le Séquences de fonctionnement.

Dans la figure (IV.4) est montré le principe de la commande M.L.I avec modulation sinus-triangle.



**Figure IV.4 : Schéma de principe de la technique M.L.I triangle– sinusoïdale**

## **IV.2 Avantages de la commande MLI**

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants : [13]

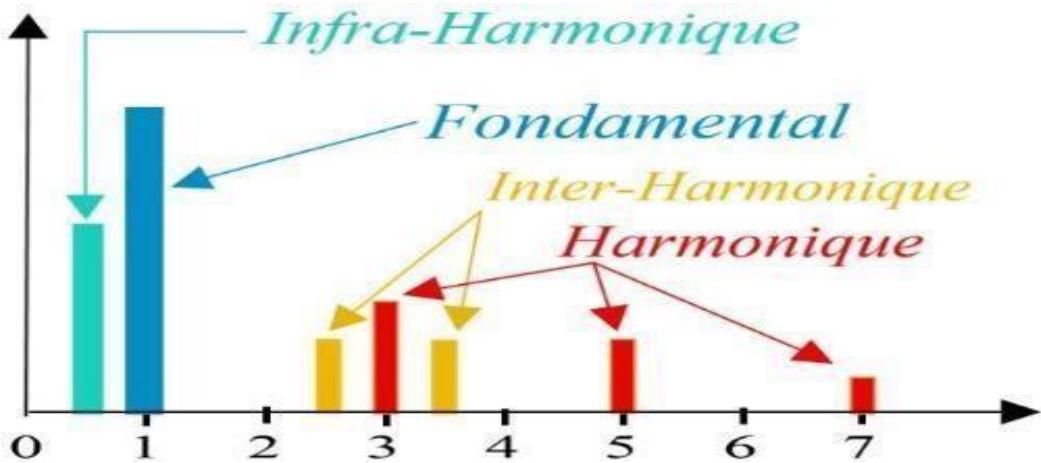
- Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux onduleurs à onde carrée ou en un seul créneau.
- Elle permet de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- De faire varier la valeur du fondamental de tension de sortie.
- La MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones à partir d'une même source continue

## **IV.3 Harmoniques et inters harmoniques**

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau. En général, nous différencions 2 types D'harmoniques : [19]

- Les harmoniques de courant dus à la présence de charges non linéaires telles que les appareils d'éclairage fluorescents, les fours à arc, les redresseurs, les variateurs électroniques de vitesse, qui peuvent être identifiés à une source de courant harmonique.
- Les harmoniques de tension issus du réseau lui-même dus, en général, à des petites imperfections de construction des bobinages des différents matériels du réseau eux-mêmes, tels que les machines tournantes et les transformateurs qui, pratiquement, ne délivrent pas une tension purement sinusoïdale. Ces harmoniques peuvent être identifiés à une source de tension harmonique.

Les inters harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple à la fréquence fondamentale. Certains sont émis par les charges non linéaires figure IV.5. D'autres sont injectés, intentionnellement, par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.



**Figure IV.5 : Représentation des harmoniques et inters-harmoniques et infra-harmoniques**

#### IV.3.1 Caractéristiques d'un signal

##### IV.3.1.1 Rang d'un harmonique

Les harmoniques sont classés selon leur rang, tableau IV.1 leur fréquence et leur sens.

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fréquence	50	100	150	200	250	300	350	400	450
sens	+	-	0	+	-	0	+	-	0

**Tableau IV.1 : Les harmoniques**

L'ordre harmonique est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à la fréquence fondamentale. Habituellement, la fréquence d'alimentation est de 50 Hz ou 60 Hz. En principe. Classement de

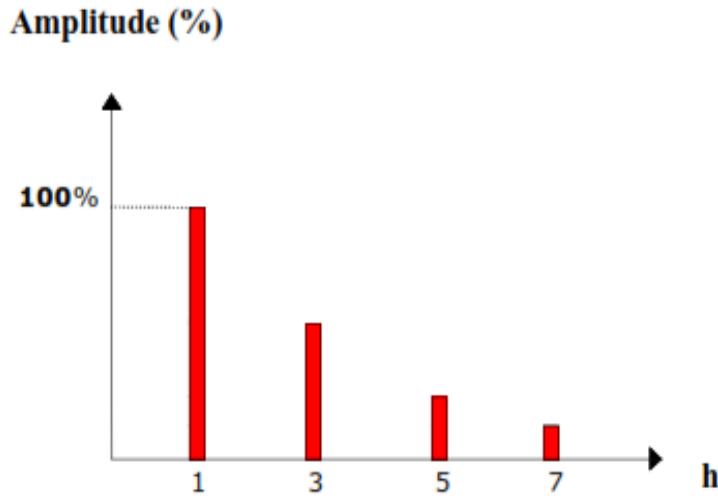
$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

base  $f_1$  a le rang 1

En raison de la symétrie du signal, les harmoniques d'ordre pair (généralement négligeables) s'annulent. En revanche, les harmoniques les plus courantes et donc les plus gênantes sont les harmoniques. Niveau impair

#### IV.3.2 Représentation spectrale

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, figure IV.6 c'est-à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence harmonique et en ordonnée l'amplitude. [20]



**Figure IV.6 : Spectre harmonique d'un signal**

### IV.3.3 Analyse de Fourier

Mathématiquement. Tout signal périodique peut être décomposé en une série d'ondes sinusoïdales. Sa fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale du signal. Cette série s'appelle la série de Fourier. Selon le mathématicien français Joseph Fourier, il provenait du début du XIXe siècle.

Joseph Fourier a prouvé que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être exprimée par la somme des termes sinusoïdaux, le premier terme est appelé le fondamental à la fréquence de répétition de la fonction, et les autres termes sont appelés harmoniques aux multiples de la fréquence fondamentale.

Un signal périodique  $S(t)$  représente un courant ou une tension de période  $T$ ,  $f=1/T$  et de pulsation  $w=2\pi f$ . Ce signal se décompose de la façon suivante : [20]

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(w_h t) + b_h \sin(w_h t)] \quad (\text{IV-8})$$

Avec:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad (\text{IV-9})$$

## Chapitre IV Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV

Et pour  $h \geq 1$

$$\begin{cases} a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(w_h t) dt \\ b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(w_h t) dt \end{cases} \quad (\text{IV-10})$$

Ou également :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(w_h t + \theta_h) \quad (\text{IV-11})$$

Avec

$$\theta_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (\text{IV-12})$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (\text{IV-13})$$

$a_0$ : Composante continue ou valeur moyenne du signal.

$a_h$  Et  $b_h$ : Amplitudes efficaces des composantes harmoniques de rang  $h$ .

$w_h$ : Pulsation harmonique de rang  $h$ .

### IV.3.4 Taux de Distorsion THD

THD (Distorsion Harmonique Totale) permet la quantification au point de mesure Étant donné.

Le THD mesure la distorsion harmonique totale par rapport au fondamental

$$\text{THD}_f = \frac{\sqrt{\mathbf{h}^2_2 + \mathbf{h}^2_3 + \dots + \mathbf{h}^2_n}}{\mathbf{h}_1} \times 100\%$$

La distorsion harmonique totale peut dépasser 100%, cela signifie que sur cette installation, à ce point de mesure, la contribution harmonique sera supérieure à la fondamentale. En l'absence d'harmonique, le THD est nul. En pratique, un THD inférieur à 10-15% constitue Une bonne référence.

#### **IV.3.5 Effet des harmoniques**

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale. La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charge) raccordés sur ce même réseau. On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques : [21]

- Les effets instantanés

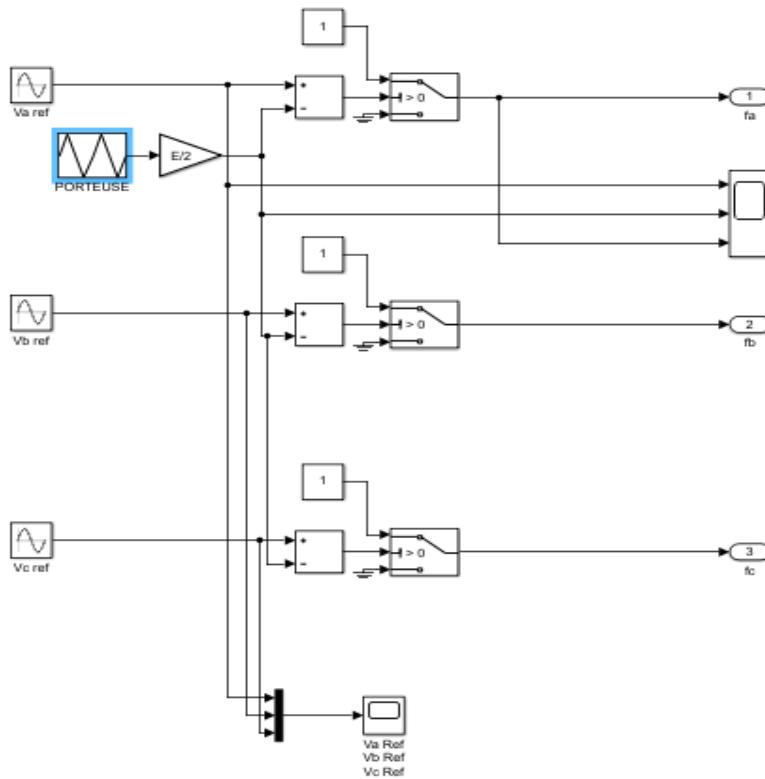
Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement, telle que les commutations des thyristors et les pertes de précision des appareils de mesure.

- Les effets à terme

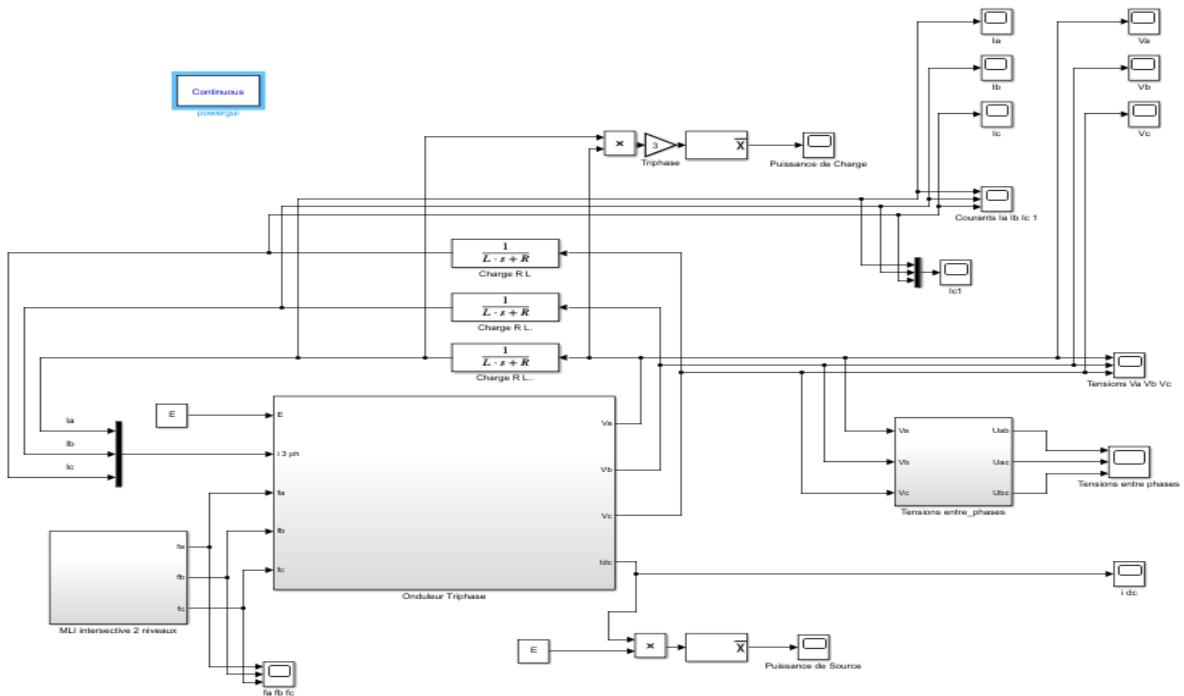
Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématué des appareils :

- Un échauffement dans les composants tels que les condensateurs, transformateurs, et les machines tournantes.
- Fatigue mécanique (couples dans les machines asynchrones, etc.). [21]

#### **IV.10. Représentation de la simulation Commande MLI sinus-triangle de l'onduleur**

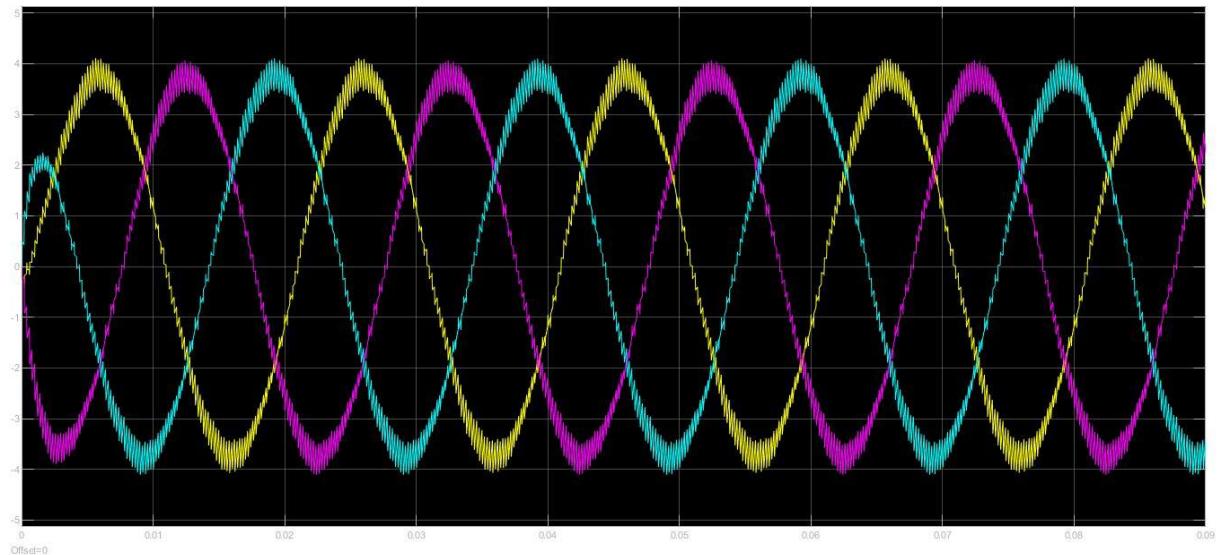


**Figure IV.7 : Schéma bloc du Commande MLI sinus-triangle**



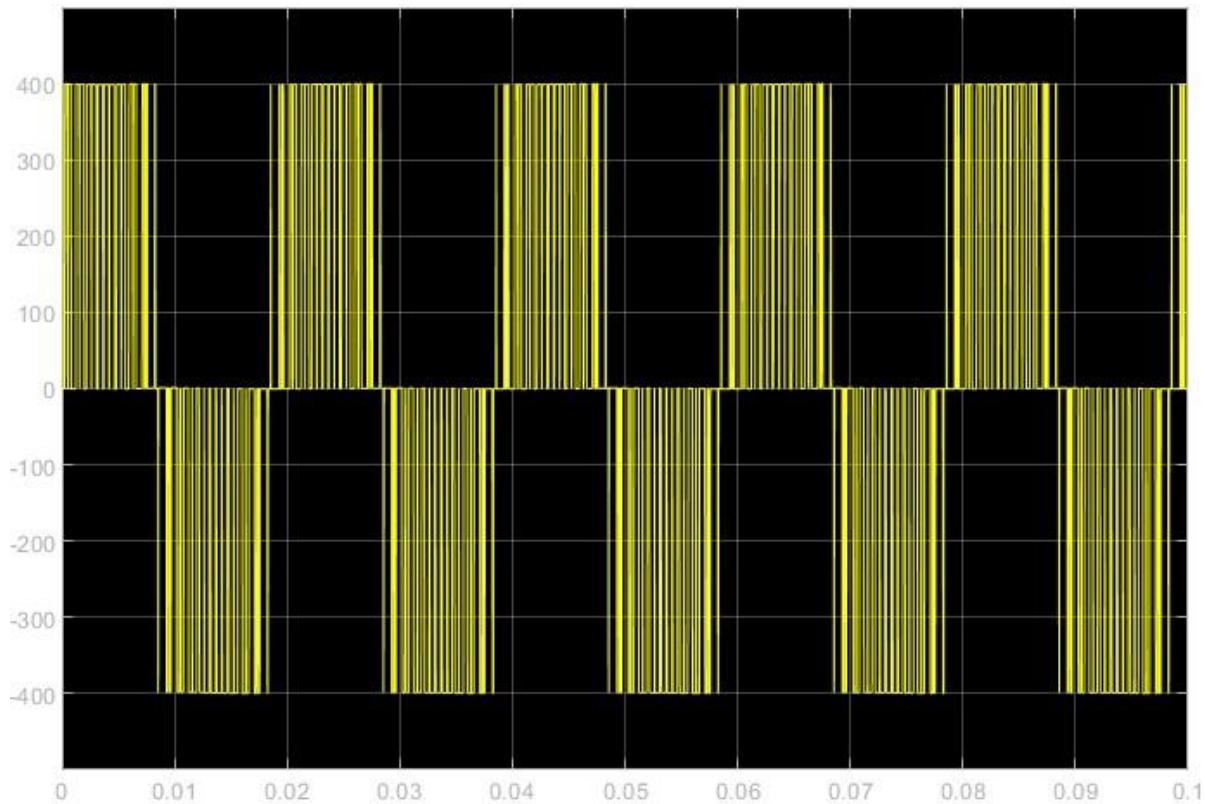
**Figure IV.8 : Schéma bloc d'onduleur MLI**

Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, on a utilisé la commande MLI sinus-triangle. Elle est présentée comme suite sou SIMULINK.



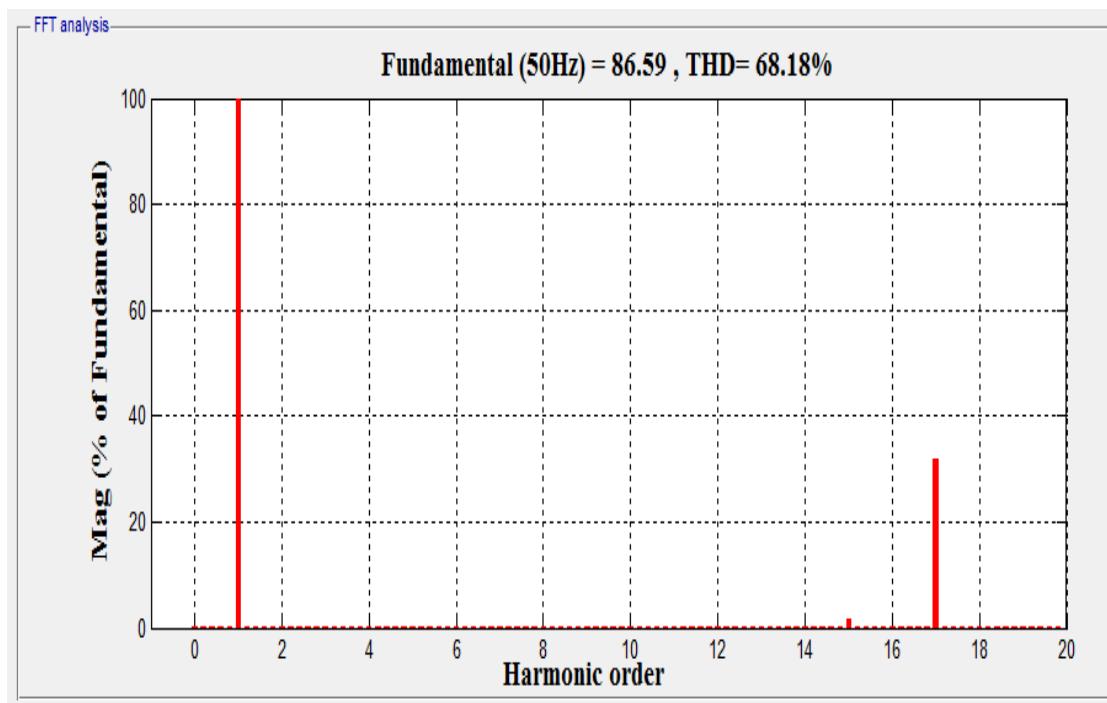
**Figure IV.9 : Illustration de la MLI sinus-triangle**

Après la simulation, on a obtenu les signaux des trois phases suivantes :

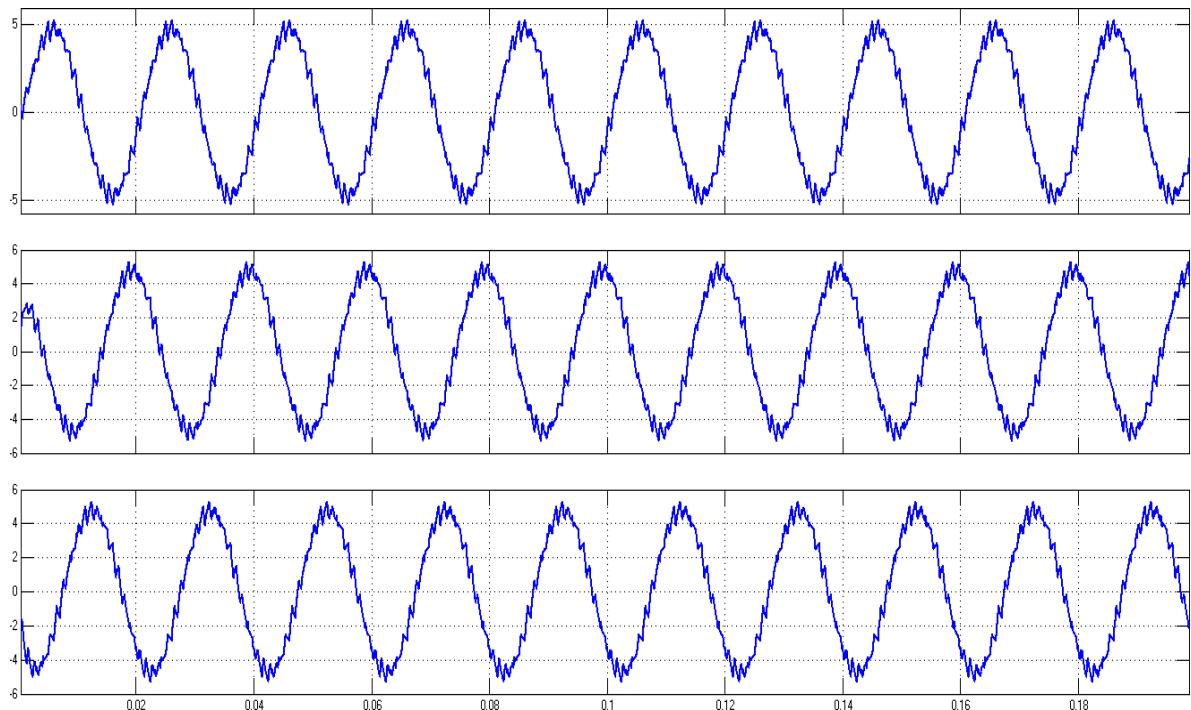


**Figure IV.10 : la tension composée de sortie de l'onduleur pour  $m=19$**

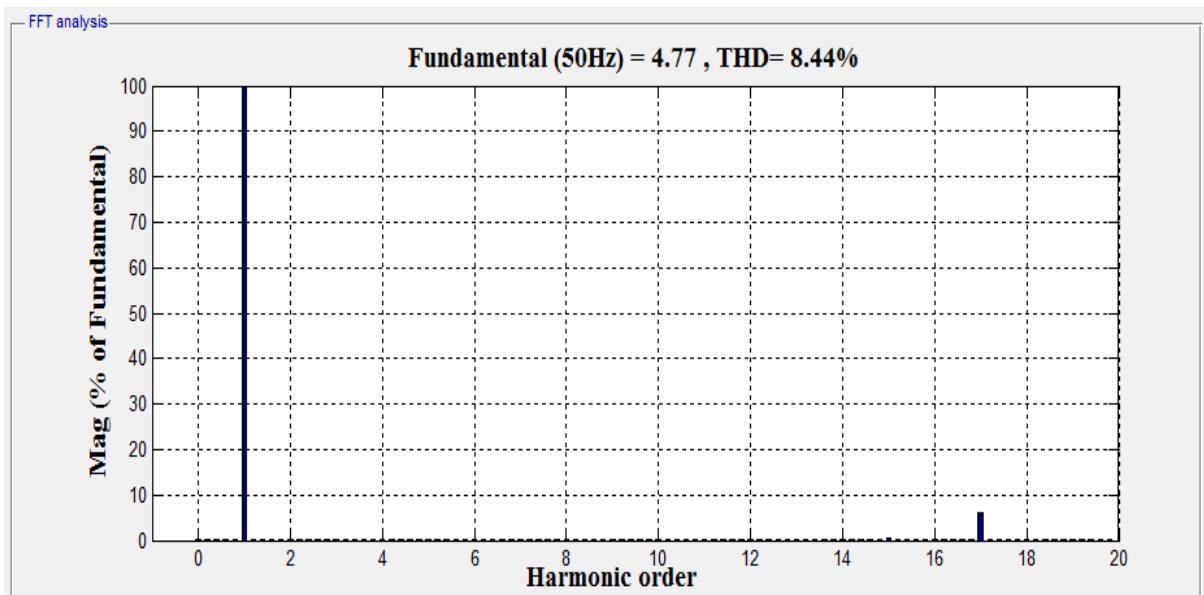
**A) Pour  $m=19$**



**Figure IV.11 : Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur (m=19)**

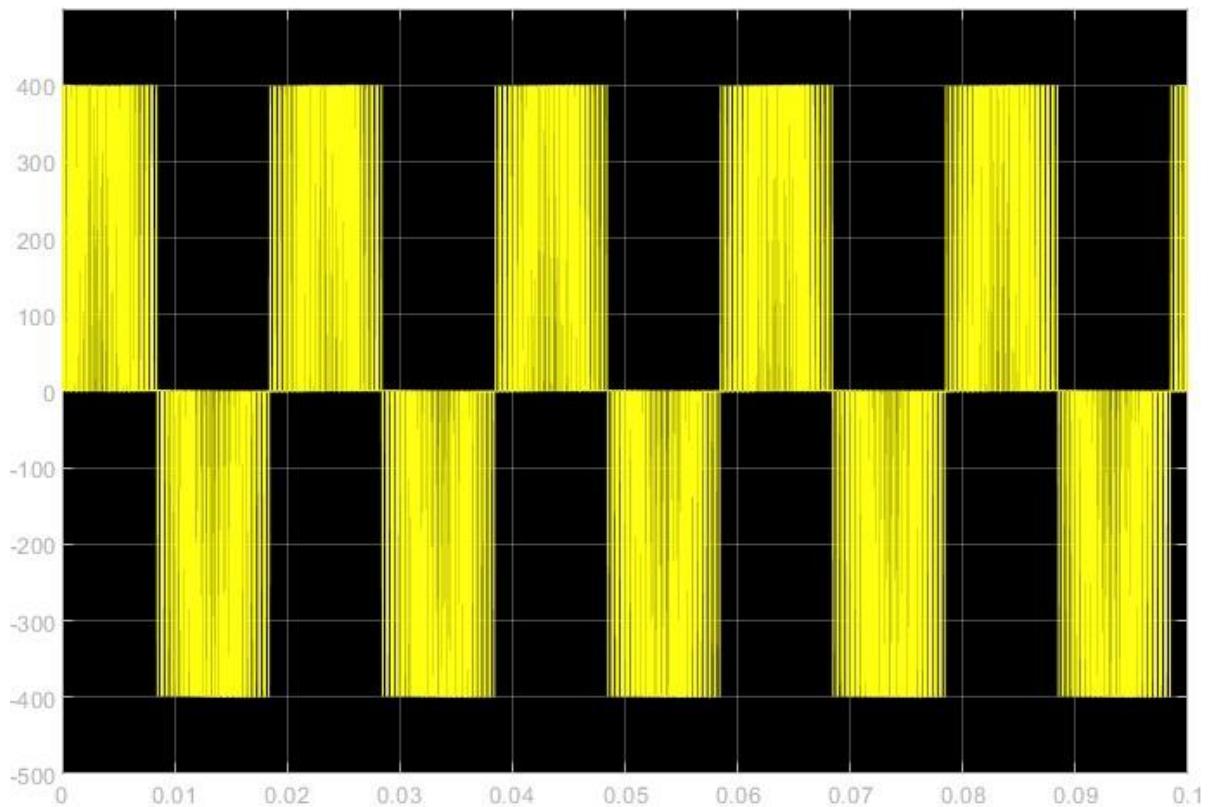


**Figure IV.12 : Les courants de sortie de l'onduleur (m=19)**

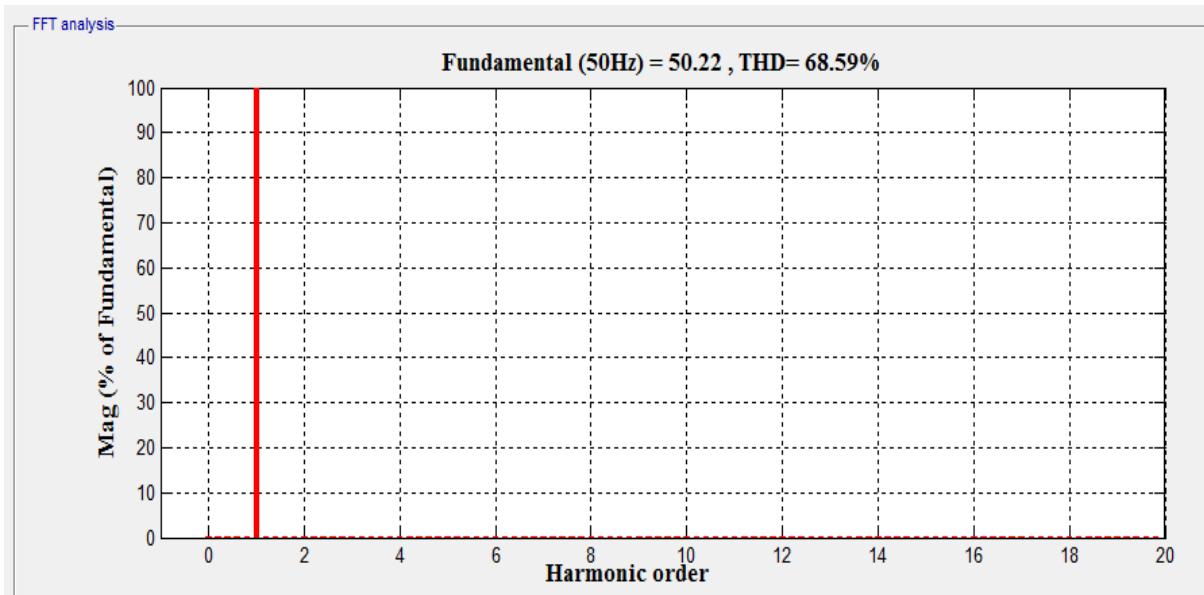


**Figure IV.13 : Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur (m=19)**

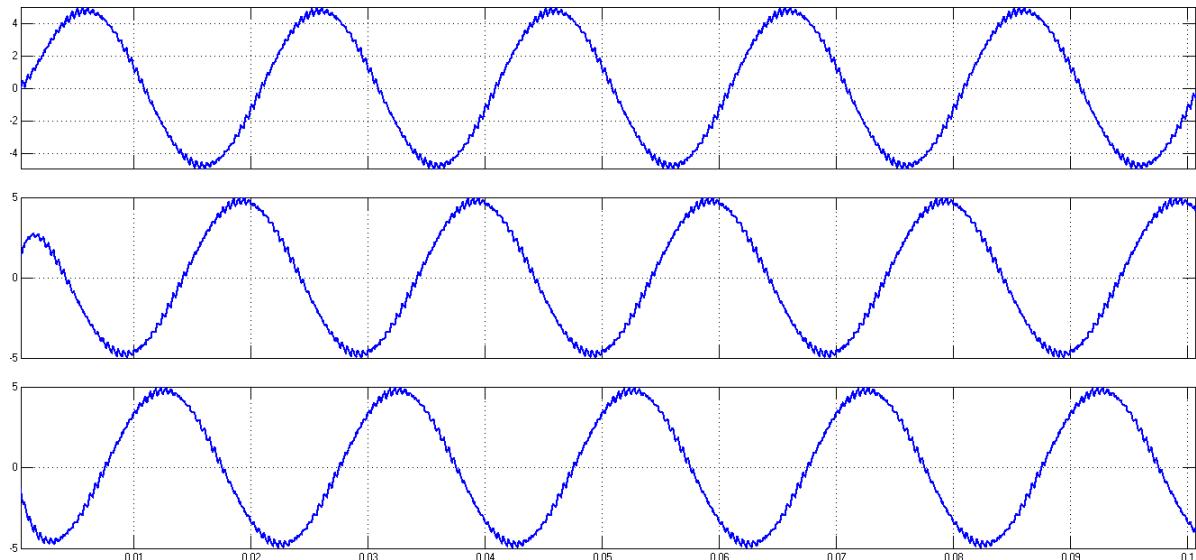
B) Pour m=45



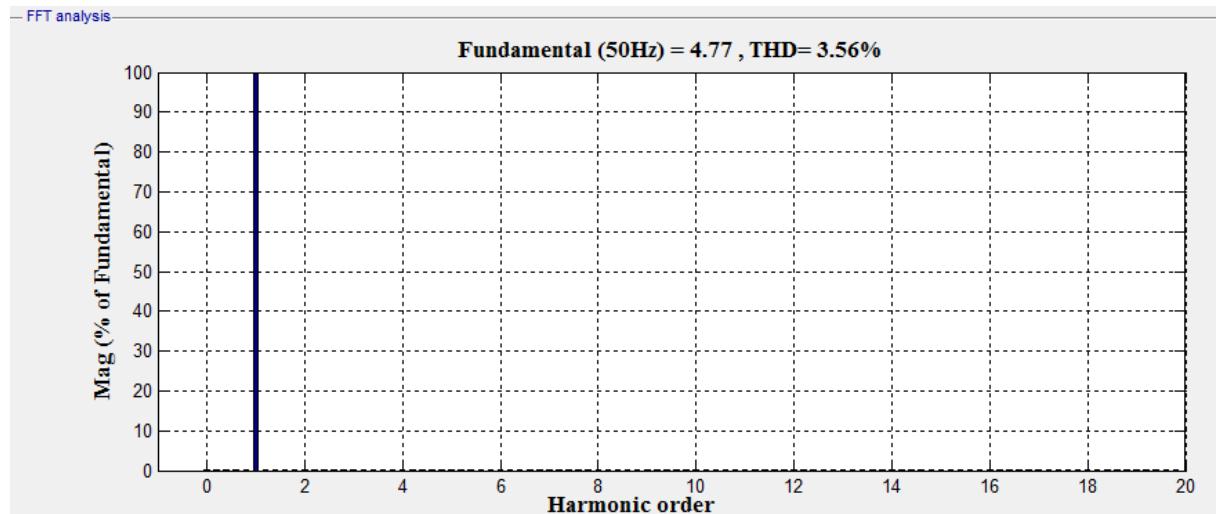
**Figure IV.14 : la tension composée de sortie de l'onduleur pour m=45**



**Figure IV.15 : Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur (m=45)**



**Figure IV.16 : Les courants de sortie de l'onduleur (m=45)**



**Figure IV.17 : Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur (m=45)**

#### **IV.3.6 Interprétation des résultats**

D'après les résultats de Simulation on remarque :

- 1) Bien que la modulation de largeur d'impulsion sinus triangle on a obtenu à la sortie de l'onduleur la tension de ligne obtenue à la sortie de l'onduleur n'est pas une onde sinusoïdale pure.
- 2) L'augmentation de l'indice de modulation "m" permet d'augmenter les harmoniques. Tension de phase à très haute fréquence.
- 3) Lorsque  $m = 19$ , la forme de la tension et du courant est améliorée, avec une légère courbe de bruit ; par contre, lorsque quand on met  $m = 45$ , l'apparence de la tension et du courant a été enregistrée considérablement améliorée, et le bruit y sont moins de courbes.
- 4) Lorsque  $m = 19$ , la tension ont été nettoyés à des niveaux satisfaisants Déterminé par le spectre harmonique de la tension THD V avec un rapport de 86.19%
- 5) Lorsque  $m = 45$ , le courant et la tension ont été nettoyés à des niveaux satisfaisants Déterminé par le spectre harmonique de la tension THD V avec un rapport de 86.59%

#### **IV.4 Modélisation de la Machine asynchrone**

#### **IV.5 Introduction**

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation, celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. On peut modéliser la machine asynchrone selon différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés. On développe dans ce chapitre les modèles suivants :

- Les modèles en abc, découlant des équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- Les modèles issus de la transformation de Park utilisés couramment pour l'étude des régimes transitoires.

#### **IV.6 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Sa robustesse mécanique.</li><li>➤ Son faible coût.</li><li>➤ L'absence d'entretien constant.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ L'inconvénient majeur du moteur asynchrone est relié à l'absorption du réactif qu'il faut parfois compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme</li><li>➤ Le courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal)</li><li>➤ Difficile de contrôler la vitesse</li></ul>

**Tableau IV.2 : Les Avantages et inconvénients de la machine asynchrone [24]**

##### **IV.6.1 LES HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES**

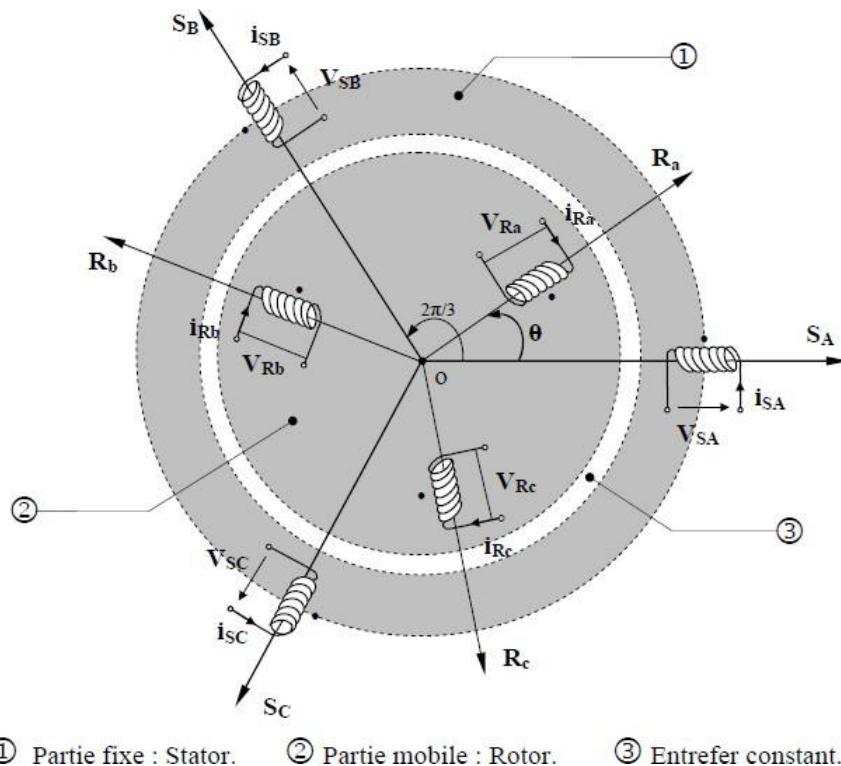
Les méthodes de modélisation utilisent un certain nombre d'hypothèses simplifications. Celles que nous allons prendre en considération pour notre étude sont les suivantes : [23]

- La saturation du circuit magnétique et les courants de Foucault sont négligeables.
- L'entrefer est constant.
- Les pertes magnétiques sont négligeables.

- La résistance de l'enroulement est considérée comme constante (ne change pas avec la température)
- La densité de courant dans la section transversale du conducteur est uniforme

#### IV.6.2 Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique

Afin de déduire le modèle de la MAS triphasée on commence à illustrer son schéma par la Figure (IV.18) Les cadre statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé. Les trois enroulements du stator :  $S_A$ ,  $S_B$  et  $S_C$  et pour les trois enroulements rotoriques :  $R_a$ ,  $R_b$  et  $R_c$  et  $\theta$  : Angle entre l'axe de la phase statorique ( $S_a$ ) et la phase rotorique ( $R_a$ ).



**Figure IV.18 : Schéma d'une machine asynchrone triphasée**

#### IV.11.5. Mise en équations de la machine asynchrone

Le comportement des machines asynchrones peut être transformé par trois équations :

#### IV.7 Equations électriques

Les équations électriques du modèle de la MAS triphasée s'écrivent respectivement :

Pour le stator :

$$[V_{SABC}] = [R_s] \cdot [i_{SABC}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{SABC}] \quad (\text{IV-14})$$

## Chapitre IV Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV

Pour le rotor :

Où :

$$[V_{r\ abc}] = [R_r] \cdot [i_{r\ abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{r\ abc}] \quad (\text{IV-15})$$

$[R_s]$  : Matrice des résistances statoriques ;

$[R_r]$  : Matrice des résistances rotoriques ;

$[V_{s\ ABC}] = [V_{sA} \ V_{sB} \ V_{sC}]^T$  : Vecteur des tensions statoriques :

$[V_{r\ abc}] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$  : Vecteur des tensions rotoriques :

$[i_{s\ ABC}] = [i_{sA} \ i_{sB} \ i_{sC}]^T$  : Vecteur des courants statoriques :

$[i_{r\ abc}] = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$  : Vecteur des courants rotoriques :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV-16})$$

Ainsi que pour les vecteurs des flux :

$[\Phi_{s\ ABC}] = [\Phi_{sA} \ \Phi_{sB} \ \Phi_{sC}]^T$  : Vecteur des flux statoriques.

$[\Phi_{r\ abc}] = [\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$  : Vecteur des flux rotoriques.

### IV.8 Équations magnétiques

Les relations entre les flux et les courants du stator et du rotor s'écrivent comme suit :

Pour le stator :

$$[\Phi_{s\ ABC}] = [L_s] \cdot [i_{s\ ABC}] + [M_{sr}] \cdot [i_{r\ abc}] \quad (\text{IV-17})$$

Pour le rotor :

$$[\Phi_{r\ abc}] = [L_r] \cdot [i_{r\ abc}] + [M_{rs}] \cdot [i_{s\ ABC}] \quad (\text{IV-18})$$

Où :

$[L_s]$  : Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$  : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$  : Matrice d'inductance mutuelle du couplage entre stator-rotor.

Alors :

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{IV-19})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & 0 \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV-20})$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{IV-21})$$

Où :

$I_s$  : Inductance propre d'une phase statorique :

$I_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique :

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques :

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques :

$M_0$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

#### **IV.9 Équations mécaniques**

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

$$Ce = [P]. [i_s \text{ } ABC]^T + [M_{sr}]. [i_r \text{ } abc] \quad (\text{IV-22})$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - k_f \Omega \quad (\text{IV-23})$$

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{IV-24})$$

Où :

$C_e (C_{em})$  : représente le couple moteur appliqué.

$C_r$  : représente le couple résistant.

$J$  : le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

$f$  : le coefficient de frottement.

#### **IV.10 Modélisation biphasée de la Machine asynchrone**

#### **IV.11 Transformation de Park**

Cette conversion est appelée souvent transformation des axes. Elle fait correspondre aux trois enroulements de la machine originale des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation consiste à imaginer de remplacer le repère rotorique tournant par un autre repère fictif équivalent fixe à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée ; Cette transformation a pour objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation.

## Chapitre IV Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé [abc] vers Un système biphasé (d, q) avec une composante homopolaire comme indiqué dans l'équation Suivante : [35]

$$[X_{dqo}] = [P][X_{abc}]$$

Le passage inverse est donné par :

$$[X_{abc}] = [P]^{-1}[X_{dqo}]$$

Tel que : [35]

[X] : peut-être le vecteur tension, courant ou flux.

[P] : est la matrice de transformation directe de Park.

$[P]^{-1}$  : est la matrice de transformation inverse de Park.

### **IV.11.1 Les avantages de cette transformation**

- Simplifier la machine en ayant moins de phases
- Dans une armature diphasée, les axes des bobines sont perpendiculaires donc les
- Inductances mutuelles sont nulles entre les bobinages d, q et o .
- Le choix de l'angle  $\varphi$  donne un degré libertel permettant de simplifier les équations. [35]

### **IV.11.2 Application de la transformation de Park au modèle de la MAS**

Il s'agit de transformer les enroulements de la MAS triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes (d-q) lié au champ tournant, voir la figure (IV.19) suivante :

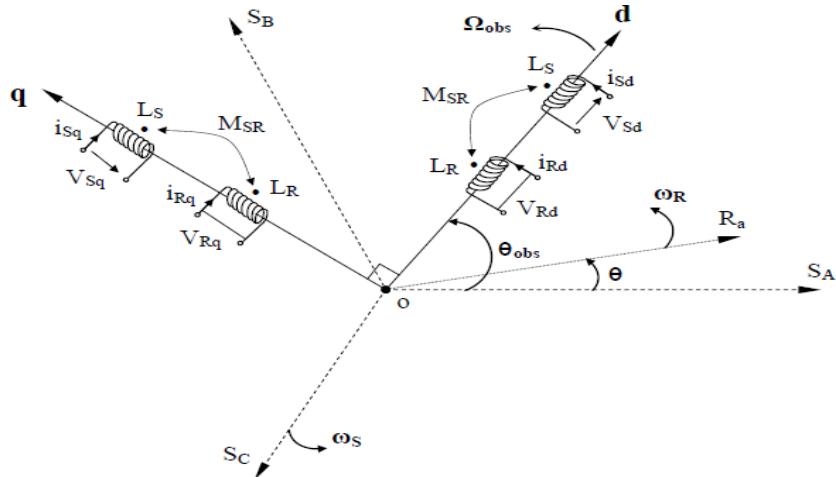


Figure IV.19 : Référentiel tournant des axes (d– q).

Les matrices de transformation de Park modifiées direct et inverse sont exprimées par les relations suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-25})$$

Avec :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-26})$$

### IV.11.3 Équations électriques dans le repère de PARK

Les équations statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \cdot \Phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \cdot \Phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-27})$$

On applique la transformation de Park aux équations de flux et de courants (IV-19). On trouve les relations électromagnétiques de la machine :

$$\begin{cases} \emptyset_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \emptyset_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \emptyset_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \emptyset_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV-28})$$

#### **IV.11.4 Choix de référentiel**

Ce qui rend la transformation de Park attrayante, est que l'orientation du repère (d-q) peut être Quelconque. Il existe trois choix importants, le repère (d-q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant selon l'objectif de l'application. Pour simplifier les équations de la machine, il faut faire un choix de référentiel, les trois types possibles sont :

#### **IV.11.5 Référentiel lié au stator**

Dans ce type de référentiel, les axes (d-q) par rapport aux axes statorique et rotorique sont définies par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = w_r$$

Ce type de référentiel est choisi lors des variations importantes de la vitesse du rotor.

#### **IV.11.6 Référentiel lié au rotor**

Dans ce cas, la position des axes (d-q) par rapport aux axes statorique et rotorique est donnée par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = w_r \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

Ce type de référentiel est utilisé lorsque la vitesse de rotation de la machine est constante et lors de l'étude des régimes transitoires.

#### **IV.11.7 Représentation d'état du système**

Nous avons ici un système à plusieurs variables, qui peut être représenté par une équation d'état. Il peut y avoir plusieurs options pour le vecteur d'état. Parmi eux, nous considérerons le flux

## Chapitre IV Alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV

magnétique statorique et le flux magnétique rotorique. Le vecteur de sortie [X], peut avoir des formes des différentes expressions :

$$[X] = [i_{ds} i_{qs} \Phi_{dr} \Phi_{qr} w]^T$$

Avec :

$$[X] = [\Phi_{ds} \Phi_{qs} \Phi_{dr} \Phi_{qr} w]^T; [X] = [\Phi_{ds} \Phi_{qs} i_{dr} i_{qr} w]^T; [X] = [i_{ds} i_{qs} i_{dr} i_{qr} w]^T$$

Ainsi, notre choix est porté sur le dernier vecteur.

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante :

$$\dot{[X]} = [A][X] + [B][U]$$

Avec :

$$[X] = [i_{ds} i_{qs} i_{dr} i_{qr} w]^T \quad (IV-29)$$

$$[U] = [V_{ds} \ V_{qs} \ C_r]$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ W_W \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ C_r \end{bmatrix} \quad (IV-30)$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & \left(\frac{1-\sigma}{\sigma}\omega_r + \omega_s\right) & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_r & 0 \\ -\left(\frac{1-\sigma}{\sigma}\omega_r + \omega_s\right) & -\frac{1}{\sigma T_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & 0 \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & -\frac{1}{\sigma T_r} & \left(\omega_s - \frac{\omega_r}{\sigma}\right) & 0 \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_r T_s} & \left(-\omega_s + \frac{\omega_r}{\sigma}\right) & -\frac{1}{\sigma T_r} & 0 \\ \frac{-p^2 M}{J} i_{qr} & \frac{-p^2 M}{J} i_{dr} & 0 & 0 & \frac{k_f}{J} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-31})$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma T_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma T_s} & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r T_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r T_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-p}{J} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-32})$$

### Simulation du modèle de la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones sont généralement alimentés directement à partir du réseau industriel via un système de tension triphasé équilibré.

Dans certaines applications où la vitesse doit être modifiée, le moteur sera alimenté par un système de tension triphasé ou un système de courant triphasé (injecté dans les enroulements du stator) via un convertisseur de puissance électrique situé dans le moteur et le réseau industriel.

La simulation sera faite dans les deux référentielles (d, q) et (a, b). Pour un essai en charge nominale après un démarrage à vide.

Les tensions d'alimentation ont supposé parfaitement sinusoïdales d'amplitudes égales et

Constantes, elles peuvent présentées comme suite :

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t) \\ V_{sb} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{2}) \\ V_{sc} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{2}) \end{cases} \quad (\text{IV-33})$$

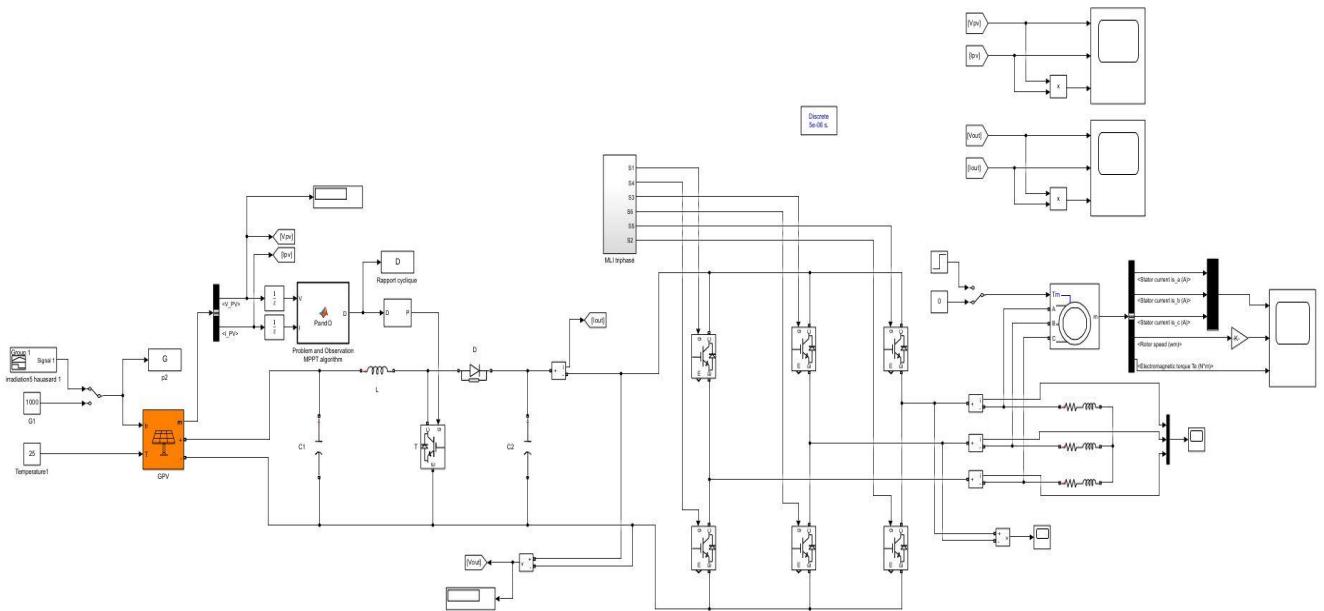
Avec :

$V_s$ : valeur efficace de tension

$W_s$  : Pulsation d'alimentation

#### IV.11.8 Modèle global du système :

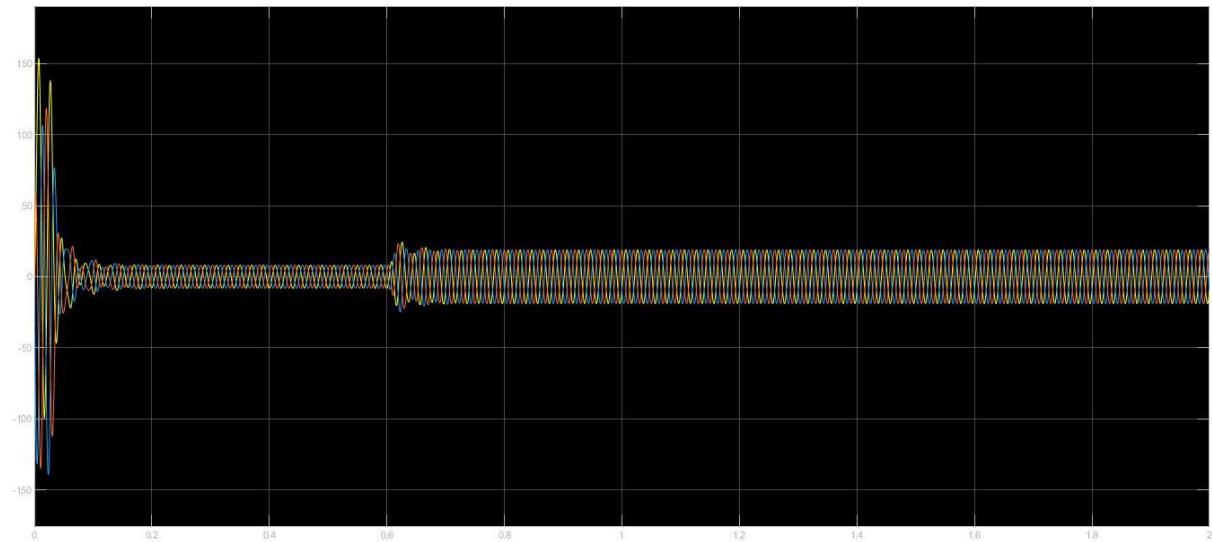
La Figure (IV.20) présente le schéma global du système photovoltaïque. Le modèle SIMULINK représente le groupement du générateur photovoltaïque, commande MPPT (perturbation and observation), l'hacheur boost, MLI onduleur, le moteur asynchrone.



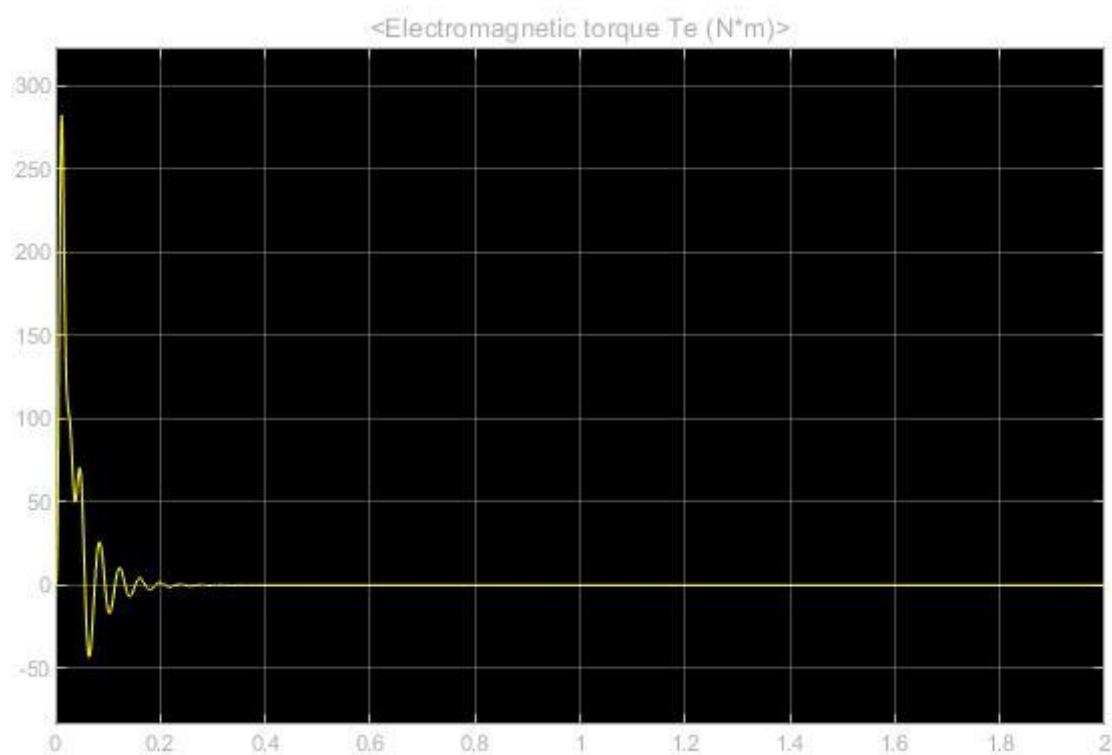
**Figure IV.20 : modèle de simulation du modèle global**

#### IV.11.9 Résultats de la simulation

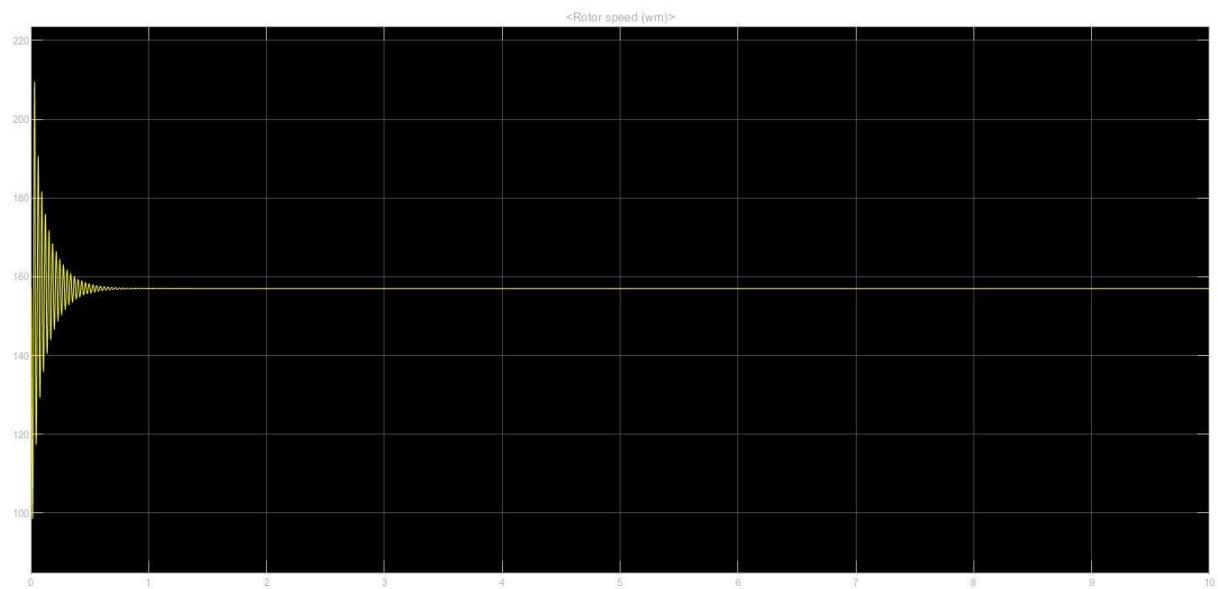
##### ❖ Démarrage à vide



**Figure IV.21 : le courant statorique en fonction du temps (démarrage à vide)**

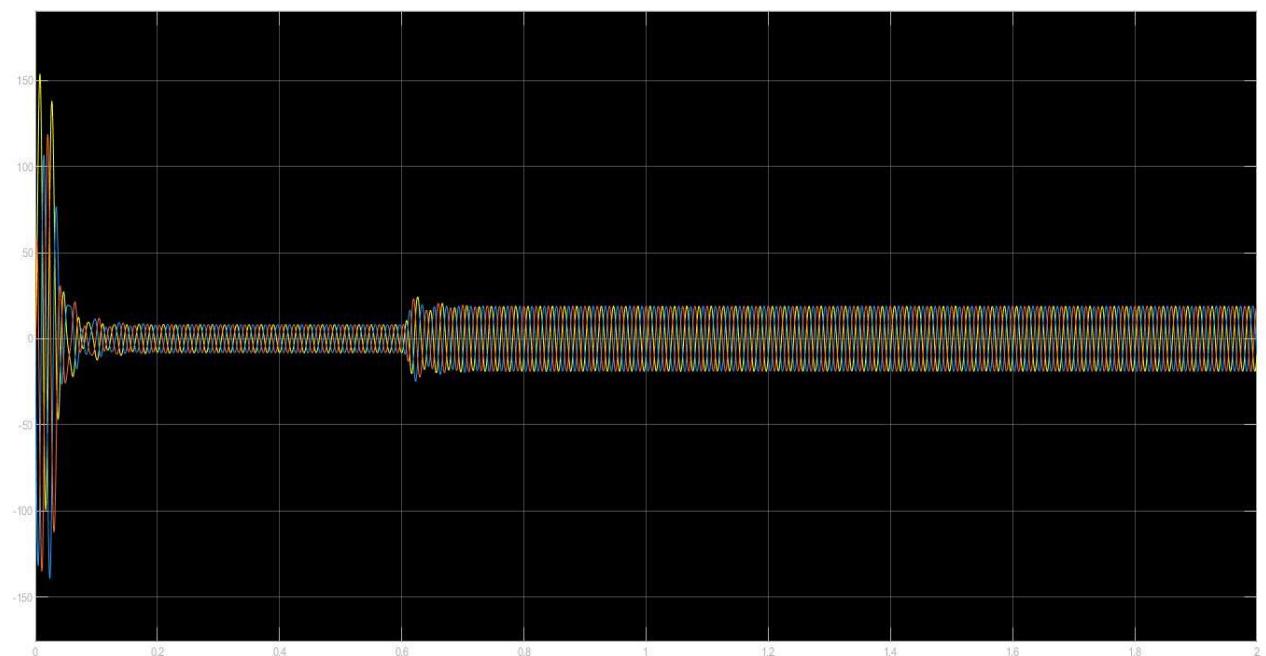


**Figure IV.22: le couple en fonction du temps (démarrage à vide)**

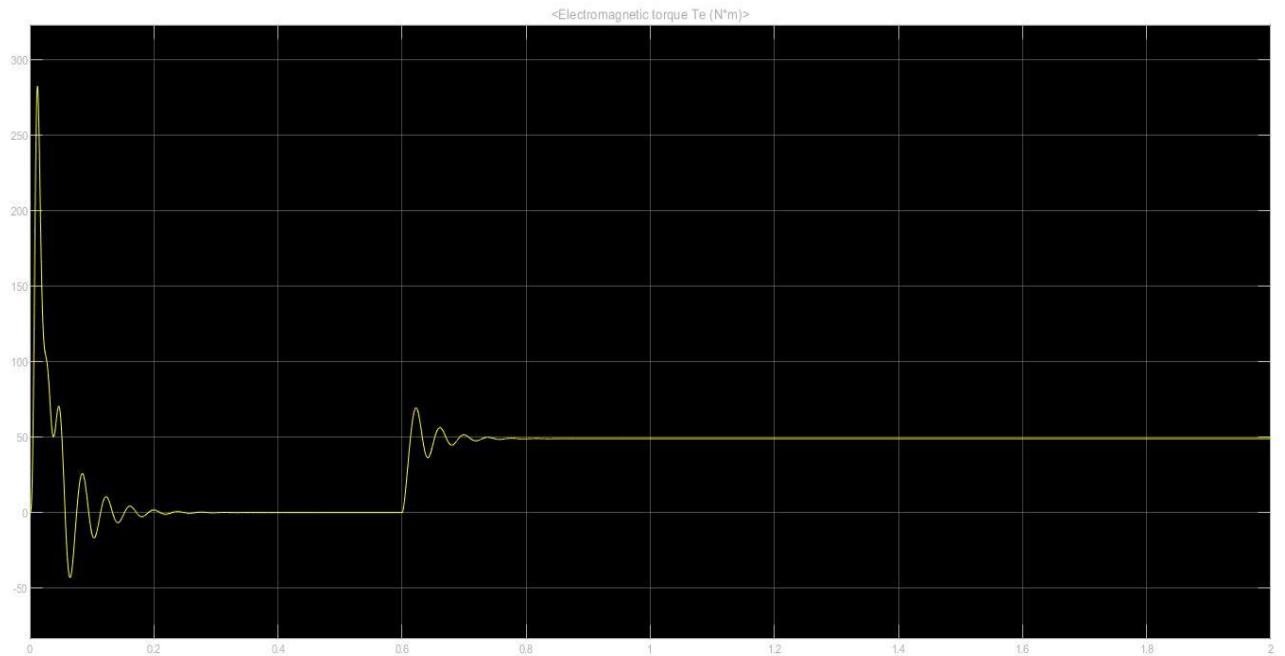


**Figure IV.23:** la vitesse en fonction du temps (démarrage à vide)

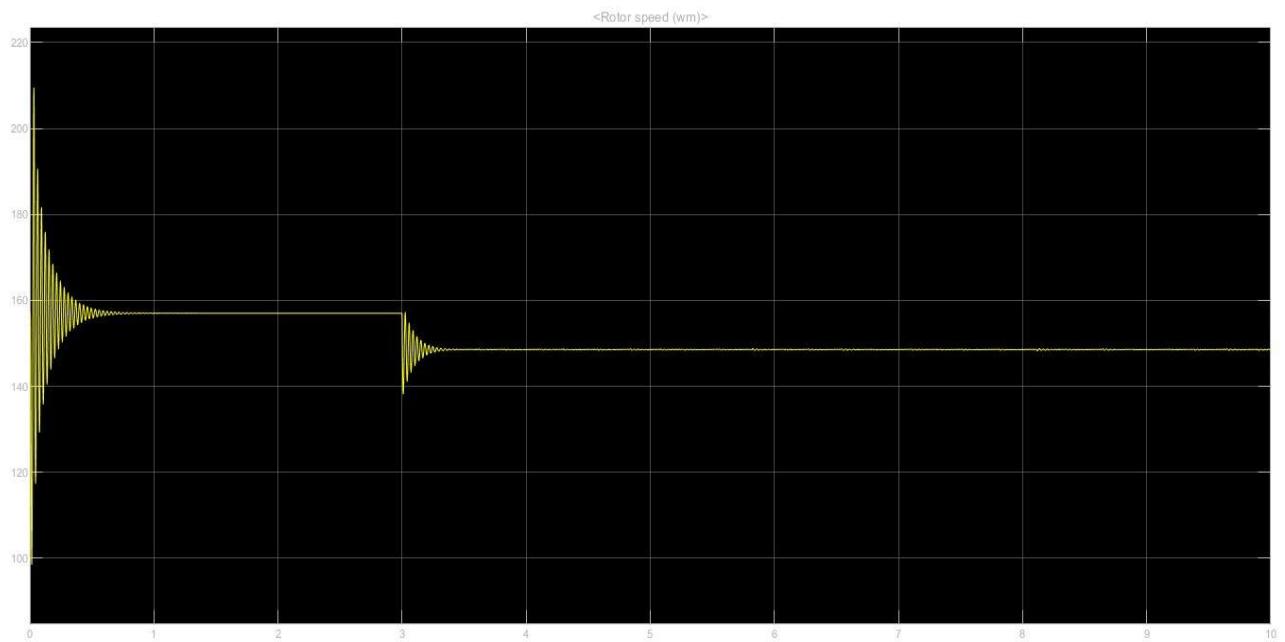
❖ En charge :(Cr=50 N.m)



**Figure IV.24:** le courant statorique en fonction du temps (en charge)



**Figure IV.25 : le couple en fonction du temps (en charge)**



**Figure IV.26 : la vitesse en fonction du temps (en charge)**

#### **IV.12 Interprétation des résultats de simulation**

Notons que les paramètres de la machine. En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone, 230/400V, 50HZ et sans l'application de perturbation ( $C_r = 0$ ).

❖ **Démarrage à vide**

Au début, le courant du stator présente des oscillations, mais qui disparaissent rapidement après plusieurs alternances.

Pendant Le régime transitoire, Le couple est fortement pulsatoire, puis il se stabilise à zéro.

❖ **En charge**

Dans la deuxième étape une perturbation du couple ( $C_r=50 \text{ N.m}$ ) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instant ( $t=6\text{s}$ ) et les résultats de simulation dans les figures (IV.24), (IV.25), (IV.26).

Lorsqu'une charge est appliquée, le couple électromagnétique revient à sa valeur de référence et la contrainte est compensée par une réponse rapide instantanée. Avant de se stabiliser à la valeur du couple de résistant, la vitesse du rotor diminuera, ce qui provoquera un glissement très important. Le courant du stator varie en fonction de la charge appliquée à l'arbre du moteur.

## V Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV. L'utilisation du convertisseur DC-AC enrichit les formes d'onde des tensions harmoniques, ce qui affecte le bon fonctionnement de la charge. Les remarques qu'on a abouties après les résultats de simulation obtenus sont :

- ❖ La commande MLI repousse les harmoniques de la tension vers des fréquences de rangs élevés.
- ❖ Quand on augmente l'indice de modulation la forme de courant de sortie à un niveau assez satisfaisant ceci est confortée par le spectre harmonique de tension THD V d'un taux 3,56 % qui est inférieure à 8,44 %.
- ❖ La combinaison de machine asynchrone onduleur de tension MLI détermine l'efficacité du convertisseur sélectionné et la commande adoptée.

En conclusion, Nous pouvons dire que grâce au contrôle MLI, les caractéristiques de sortie de la machine que nous pouvons obtenir sont équivalentes aux caractéristiques de sortie sous pleine tension.



# *Conclusion*



## **Conclusion générale**

Le premier chapitre nous avons cité les différents types d'énergie renouvelable avons vu qu'elles constituent une alternative, aux énergies fossiles, car elles sont moins perturbatrices de l'environnement, inépuisable et n'émettent pas de gaz à effet de serre.

Le deuxième chapitre c'est articulé sur le principe de la production de l'énergie solaire notamment l'étude de la cellule PV et ensuite le panneau solaire.

Dans le chapitre 3 a été consacré à la modélisation d'un panneau PV afin d'analyser son fonctionnement et l'influence des conductions climatiques sur les caractéristiques de sortie. L'utilisation d'une commande MPPT assure la poursuite du point de puissance maximal lors de la variation des conditions météorologiques.

Le quatrième chapitre a été dédié à l'étude et la simulation de l'alimentation d'un moteur asynchrone par un générateur PV Le convertisseur DC-AC enrichit les formes d'ondes en harmoniques , la commande MLI de l'onduleur a été utilisée les résultats de simulation montre que pour un indice de modulation  $m=45$  les caractéristiques de sortie de la machine asynchrone obtenues sont équivalentes aux caractéristiques de sortie son plein tension.



## *Bibliographie*



## **Bibliographie :**

- [1] HABI HAFIDHA, Bibi Yamina, «Simulation et optimisation des performances d'un système hybride intégrant des énergies renouvelables pour la génération d'électricité», Mémoire Master, Université de BOUIRA 2016.
- [2] AUTHIER FELIX, «éco-politique et stratégie d'entreprise», Mémoire Master, Université de Reims 2011/2012.
- [3] <http://www.ekwateur.fr>.
- [4] <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [5] N.Saadaoui, "Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque", mémoire de Magister, département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbes-Sétif 2010.
- [6] Laboratoire de recherche des énergies renouvelables <http://www.cder.dz>.
- [7] GHAITAOUI el MOULAT, KHELIFI HOUDA, «Alimentation d'un moteur asynchrone à partir d'un générateur photovoltaïque», Mémoire Master, Université Ahmed DRAIA Adrar 2019.
- [8] BENHAMOUCHE WASSIM, CHIHEB mahdi, «étude et simulation d'un générateur photovoltaïque en site isolé», Université BADJI Mokhtar Annaba 2019/2020.
- [9] BEDRANE Farid, «étude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïque », Université Abderrahmane mira de Bejaia 2013.
- [10] ZAHAR SORIA, MAKHLOUFI CHEYMAA, «étude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », Mémoire Master, Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2016/2017.
- [11] TOUIL NACER EDDINE, GHENBAZI SLIMENE, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire Master, Université ECHAHID Hama LAKHDER d'el-oued 2015.
- [12] GUEZZOUM MOHAMED, GAMATE Ayoub, «énergie solaire», Mémoire Master, Université Hassan II de Casablanca 2018/2019.
- [13] Kamel MERABET, «Commande MLI d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasé», Mémoire magister, Université DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES (Décembre 2011).

[14] <http://www.photovoltaque.info>.

[15] HARAOUNIA Mohamed, «étude simulation d'un générateur de panneaux photovoltaïque », Mémoire master, Université BADJI Mokhtar Annaba 2019.

[16] A.HADDOUM, «Modélisation et commande d'un onduleur MLI», Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'HIDI Oum El-BOUAGHI 2008/2009.

[17] MESSOUCI OURDIA, «Commande sans capteur d'une machine asynchrone a cage : application sur la plateforme temps réel NI compact RIO cRIO 9022», Mémoire de Magister, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES 2014/2015.

[18] <http://www.academia.edu>.

[19] CHELLI ZOUBIR, «Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique», THESE Doctorat, Université BADJI Mokhtar Annaba 2015.

[20] S.RABAHALLAH, «étude et calcule des pertes de puissance dues aux harmoniques dans un réseau électrique industriel», Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de TIZI - OUZOU 2008.

[21] HAMICHE Larbi, «identification des courants harmoniques par les réseaux neuronaux», THESE Doctorat en sciences, Université BADJI Mokhtar Annaba 2018.

[22] NABTI Khalil, «Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue», Mémoire Magister, Université MENTOURI de Constantine 2006.

[23] Alia Salim, GUEDDA SMAIL, «Commande Vectorielle d'une machine à induction», Mémoire Master, Université ECHAHD HAMMA LAKHDER D'El-Oued 2018.

[24] GHERBI ALLEL, ABBAD Abdellah, «Commande d'un moteur asynchrone par la logique floue adaptative», Mémoire Master, Université de BOUIRA 2017/2018.

[25] BERREZZEK Farid, «étude des différents techniques de commande des onduleur a MLI associés à une machine asynchrone», Mémoire de Magister, Université BADJI Mokhtar Annaba 2006.

[26] HALOUANE ASSIA, «Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque», Mémoire Master, Université M'Hamed BOUGARA BOUMERDES 2016/2017.

[27] Ibrahim TAHRAOUI, Amine HALIL, «Dimensionnement et étude d'une installations photovoltaïque pour une habitation domestique», Mémoire Master, Université Abou BEKR BELKAID de Tlemcen 2016/2017.

[28] BENYETTOU FETHI, «étude et modélisation d'une cellule photovoltaïque au silicium ploycristallin a l'aide de Pspice», Mémoire de Magister, Université Abdel Hamid Ibn BADIS de MOSTAGNEM 2013.

[29] KETFI Mohammed el Amin, «étude et adaptation des cellules biologiques photosensibles a des microsystèmes optoélectroniques », Mémoire de Magister, Université de L'USTO 2010-2011.

[30] MANCER Mansoura, «Simulation numérique des caractéristique électriques d'une cellule solaire à double jonction en (ALGaAS/GaAS) », Mémoire de Magister, Université Mohamed KHIDER-Biskra 2012.

[31] <https://total.direct-energie.com>

[32] Arras Aida, «Caractéristique des cellules photovoltaïque à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si », Mémoire Master, Université Abou-BEKR BELKAID-Tlemcen 2018. [33] MEGHELLET HANINE, Hocine Lynda, «Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque», Mémoire Master, Université Colonel AKLI Mohand-OULHADJ BOUIRA 2017/2018 .

[34] BOUZERIA HAMZA,Zouiten Issam, «étude des hacheurs et leurs applications dans l'optimisation des générateurs photovoltaïque», Mémoire Master, Université BADJI Mokhtar Annaba 2011

[35] AOUFI Ahmed, «Utilisation d'observateurs a modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectorielle d'une machine asynchrone a cage», Mémoire de Magister, Université Mohamed KHIDER-Biskra 2011