

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénierat  
Département : Électrotechnique

## MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Thème :

**Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque en site isolé**

**Présenté par :**

Farhi seif eddine  
Hamoudi billel

**Dirigé par :**

Soltani fatma

**Jury de soutenance:**

- CHINE Abdelghani  
- SOLTANI Fatma  
- OURICI Amel

Présidente  
Rapporteur  
Examineur

MAA  
MCA  
MCA

Université d'Annaba  
Université d'Annaba  
Université d'Annaba

**Promotion : juin 2021**

# Résumé

## ملخص :

الطاقات المتجددة أو النظيفة هي دليل للوقود الاحفوري لأنها لا تنضب، لا تتسبب في اختلال التوازن البيئي و لا تتبعث منها غازات دفيئة أو نفايات. من بين هذه الطاقات نذكر الطاقة الشمسية

نظرا لموقعها الجغرافي الجزائر لديها مخزون شمسي في الحوض الأبيض المتوسط.  
نتائج محاكاة الحلقة الشمسية من النوع (Helios USA 9T6 400) تبين أنها تتميز بالخصائص المتنقلة التي تعتمد على الظروف المناخية (الاشعاع الشمسي، درجة الحرارة) .

في هذه الاطروحة قمنا بتصميم و تحسين قوة MPPT الخاصة بلوحة ضوئية موصلة بشحنة مقاومة بواسطة الأسلوب المضطرب و الملاحظ للتحميل في الإضاءة.

أخيرا بما ان اللوحة الكهروضوئية هي مصدر ضغط مستمر فان إعطاء شحنة ذات طبيعة بديلة يتطلب وجود عاكس MLI.

**Résumé :** Les énergies renouvelables ou propres constituent une alternatives aux énergies fossiles car elles sont inépuisable, non perturbatrice de l'environnement et n'émettent pas de gaz a effet de serre ni de déchets

Parmi cette énergie on cite l'énergie solaire  
De part sa situation géographique l'Algérie dispose du plus grand solaire gisement solaire du bassin méditerranéen

Les résultats de simulation du panneau solaire du type (Helios USA 9T6 400) montrent qu'il se caractérise par des caractéristiques fluctuantes qui dépendent des conditions climatiques (irradiation solaire, température .....

Dans ce mémoire nous avons modélisé et optimisé la puissance MPPT d'un panneau photovoltaïque connecté à une charge résistive par la méthode perturbée et observée pour un chargement dans l'éclairage

Enfin le panneau PV étant une source de tension continue l'alimentation d'une charge de nature alternative nécessite un onduleur à MLI

**Abstract :** Renewable or clean energies are an alternative to fossil fuels because they are inexhaustible, non-disruptive to the environment and do not emit greenhouse gases or waste

Among these energy we mention solar energy..

Due to its geographical location, Algeria has the largest solar deposit in the Mediterranean basin

The results of simulation of the solar ring of the type (Helios USA 9T6 400) Show that it is characterized by fluctuating characteristics which depend on the climatic conditions (solar irradiation, temperature

In this thesis we modeled and optimized the MPPT power of a photovoltaic panel connected to a resistive load by the disturbed and observed method for a loading in the illumination

Finally, since the PV panel is a source of DC voltage, the supply of a load of an alternative nature requires a PWM inverter.

# REMERCIEMENTS

*On remercie le bon dieu tout puissant et miséricordieux pour nous avoir donné la santé et la volonté de réaliser ce mémoire.*

*On adresse aussi nos reconnaissances à tous les professeurs et au corps administratifs de département d'électrotechnique pour leurs conseils et leurs connaissances généreusement transmises.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme Soltani on la remercie pour ses précieux conseils et remarques, sa disponibilité et ses encouragements.*

*Un grand remerciement plein d'amour pour nos parents qui nous ont tellement soutenues avec l'aide et les motivations ainsi que les moyens qu'ils nous ont procuré et nous ont facilité la réalisation de ce projet.*

*Nos profonds remerciements aux membres de nos deux familles (soeurs et frères) chacun en son nom pour leurs constants soutiens au cours de notre cursus universitaire et particulièrement cette année.*

*À tous nos amis avec qui nous avons passé d'agréables moments, pour leurs aides et encouragements.*

*Enfin, nos remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à toutes les personnes qui nous ont encouragés de près ou de loin pour achever cette mémoire.*

*À mes chères parents tout en m'inclinant pour leur nos remerciements est nos reconnaissances envers les sacrifices et le soutien moral qu'ils ont fourni pendant toute la durée de nos études.*

*Et enfin à tous nos amis sans exception surtout tous nos collègues de groupe CE (promo 2021).*

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

## Chapitre I : LES ENERGIES RENOUVELABLES

I-1 Introduction .....	02
I-2 Définition des énergies renouvelables .....	02
I-3 Différentes types de l'énergie Renouvelable.....	02
I-3-1 Énergie hydraulique.....	03
a) Énergie des vagues.....	03
b) Énergie marémotrice.....	03
c) Énergie hydrolienne.....	04
d) Énergie thermique des mers.....	04
e) Énergie osmotique.....	04
I-3-1-1 Conversion de l'énergie hydraulique en électricité.....	05
I-3-1-2 Principe de Fonctionnement d'une centrale hydrolienne.....	05
I-3-2 Biomasse.....	06
a) Les biocarburants.....	07
b) Bioéthanol.....	07
c) Biogaz ou Méthanisation.....	07
I-3-2-1 Conversion de la biomasse en électricité.....	08
I-3-2-2 Principe de Fonctionnement.....	09
I-3-3 Énergie géothermique.....	09
I-3-3-1 Principe de Fonctionnement de la Géothermie.....	10
I-3-4 Énergie éolienne.....	10
I-3-4-1 Conversion de l'énergie éolienne en électricité.....	11
I-3-4-2 Principe de Fonctionnement de Énergie éolienne.....	11
I-3-5 Énergie solaire.....	12
I-3-5-1 Énergie solaire thermique.....	12
I-3-5-1-1 Conversion de l'énergie thermique en énergie électrique.....	13
I-3-5-1-2 Principe de fonctionnement du solaire thermique.....	13
I-3-5-2 Énergie Solaire photovoltaïque.....	14
I-3-5-2-1 Conversion de l'énergie thermique en énergie électrique.....	14
I-3-5-2-2 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	15
Les avantage.....	15
Les inconvénients.....	15
I-4 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie.....	16
I-5 Conclusion.....	16

## Chapitre II : Énergie Solaire

II-1 Introduction.....	17
II-2 Energie solaire.....	17
II-3 Potentiel solaire en Algérie.....	17
II-3-1 Bilan des réalisations.....	18
II-4 L'énergie solaire et l'effet photovoltaïque.....	19
II-4-1 Spectre solaire.....	20
II-4-2 Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur.....	21
II-4-3 Angle d'inclinaison.....	23
II-5 La cellule photovoltaïque.....	24
II-5-1 Structure d'une cellule photovoltaïque.....	24
II-5-2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	25
II-5-3 Effet photovoltaïque.....	26
II-6 Matériaux utilisés dans les cellules PV.....	26
II-6-1 les avantages et les inconvénients.....	28
II-7 Association des cellules.....	28
II-7-1 Mise en série.....	28
II-7-2 Mise en parallèle.....	29
II-7-3 Groupement mixte.....	30
II-8 Rendement maximal d'une cellule PV.....	31
II-9 PROTECTION D'UN GPV.....	31
II-9 -1 Protection par diode anti-retour.....	32
II-8 -2 Protection par diode by-pass.....	32
II-10 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	32
Les avantage.....	32
Les inconvénients.....	33
II-11 Conclusion.....	33

## Chapitre III : MODELISATION ET SIMULATION D'UN PANNEAU PV

III-1 Introduction.....	34
III-2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	34
III-2-1 modèle mathématique.....	34
III-2-2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque.....	37
III-2-3 Résolution de l'équation $I=f(V)$ .....	39

## Sommaire

III-3 Optimisation des générateurs PV.....	40
III-3-1 Schéma synoptique du système PV adapté.....	40
III-3-2 Les différentes commandes de MPPT.....	42
III-3-3 Méthode perturbation et observation.....	42
III-4 Adaptation et optimisation des générateurs PV.....	42
III-4-2 Adaptation par le convertisseur DC-DC.....	43
III-4 Simulation.....	45
III-4-1 Sans commande MPPT.....	45
caractéristique ( $I_{pv} = f(V_{pv})$ ).....	46
caractéristique ( $p_{pv} = f(V_{pv})$ ).....	47
III-4-1-1 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable..	47
L'influence de l'éclairement.....	47
L'influence de la température.....	49
III-4-2 Avec commande MPPT.....	50
III-4-2-1 Influence d'irradiation.....	50
III-4-2-2 Influence du changement d'éclairement à l'entrée a la sortie d'un Boost du panneau PV muni de la commande MPPT.....	51
III-5 Conclusion.....	52

## Chapitre IV : ALIMENTATION D'UNE CHARGE RL PAR UN GÉNÉRATEUR PV

IV -1 Introduction.....	54
IV-2 Présentation de la structure du système photovoltaïque.....	54
IV-2-1 Notions sur les onduleurs.....	54
IV-3 Classification des onduleurs.....	55
IV-3-1 Onduleurs non-autonome.....	55
IV-3-2 Onduleur autonome.....	55
IV-3-2-1 Les Onduleurs de tension.....	55
IV-3-2-2 Les onduleurs de courants.....	55
IV-4 Types d'onduleurs autonomes de tension.....	56
IV-4-1 Les onduleurs monophasés.....	56
IV-4-2 Les onduleurs triphasés.....	56
IV-4-3 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	56
IV-4-4 Modélisation de l'onduleur triphasé.....	57
IV-5 Types de commandes.....	58
a) Commande plein onde.....	58
b) Commande décalée.....	58

# Sommaire

---

IV-5-1 Principe de la commande à MLI des onduleurs triphasés.....	59
IV-5-2 La Modulation de largeur d'impulsion.....	59
IV-5-3 Principe de la modulation de largeur d'impulsion.....	59
IV-5-4 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion.....	60
IV-6 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions.....	61
IV-6-1 La modulation linéaire multiple.....	61
IV-6-2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire.....	61
IV-6-3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée).....	62
IV-6-4 La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.....	62
IV-7 Qualité de l'énergie électrique : critères et définitions.....	63
IV-7-1 Creux de tension et coupures.....	63
IV-7-2 Surtensions temporaires ou transitoires.....	64
IV-7-3 Fluctuation lente de la tension (Flicker).....	64
IV-7-4 Déséquilibre du système triphasé de tensions.....	65
IV-7-5 Variations de la fréquence.....	66
IV-7-6 Harmoniques et inter harmoniques.....	67
IV-7-7 Caractéristique d'un signal.....	68
IV-7-7-1 Rang d'un harmonique.....	68
IV-7-7-2 Représentation spectrale.....	68
IV-7-7-3 Analyse de Fourier.....	69
IV-7-7-4 Taux de distorsion harmonique globale (%).....	70
IV-7-8 Les principales sources d'harmoniques.....	70
IV-7-9 Effet des harmoniques.....	70
IV-8 Simulation du modèle étudié.....	71
IV-8-1 Tension composée à la sortie de l'onduleur.....	71
IV-8-2 Courant à la sortie de l'onduleur.....	74
IV-8-3 Spectre d'harmonique de la tension composée.....	75
IV-8-4 Spectre d'harmonique Du courant.....	76
IV-9 Analyse de résultats de simulation et d'expérimentation.....	78
IV-10 Conclusion.....	78
Conclusion générale.....	79

## Bibliographie



### **Chapitre I : LES ENERGIES RENOUVELABLES**

<b>Figure (I-1)</b> : Schéma de différentes énergies renouvelables.	02
<b>Figure (I-2)</b> : Énergie des vagues.	03
<b>Figure (I-3)</b> : Énergie marémotrice.	03
<b>Figure (I-4)</b> : Énergie hydrolienne.	04
<b>Figure (I-5)</b> : Énergie thermique des mers.	04
<b>Figure (I-6)</b> : Production d'électricité par osmose.	05
<b>Figure (I-7)</b> : Système de conversion de l'énergie hydraulique.	05
<b>Figure (I-8)</b> : Fonctionnement d'une centrale hydraulique.	06
<b>Figure (I-9)</b> : Énergie de la biomasse.	06
<b>Figure (I-10)</b> : Énergie Les biocarburants végétale.	07
<b>Figure (I-11)</b> : la bioéthanol.	07
<b>Figure (I-12)</b> : Système de conversion de l'énergie biomasse.	08
<b>Figure (I-13)</b> : Fonctionnement d'une centrale Biomasse.	09
<b>Figure (I-14)</b> : Énergie géothermique.	09
<b>Figure (I-15)</b> : Fonctionnement d'une centrale Énergie géothermique.	10
<b>Figure (I-16)</b> : Énergie éolienne.[2]	10
<b>Figure (I-17)</b> : Système de conversion de l'énergie cinétique du vent.	11
<b>Figure (I-18)</b> : Constitution d'une éolienne.	11
<b>Figure (I-19)</b> : Énergie solaire thermique.[4]	13
<b>Figure (I-20)</b> : Système de conversion de l'énergie thermique.	13
<b>Figure (I-21)</b> : Fonctionnement d'une centrale thermique.	14
<b>Figure (I-22)</b> : Énergie Solaire photovoltaïque.[4]	14
<b>Figure (I-23)</b> : Système de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque.	14
<b>Figure (I-24)</b> : Le potentiel ENR en Algérie .	15

### **Chapitre II : Énergie Solaire**

<b>Figure (II-1)</b> : Potentiel solaire en Algérie.	17
<b>Figure (II-2)</b> : Programme d'électrification des 18 villages.	18
<b>Figure (II-3)</b> : rayonnement solaire.	19
<b>Figure (II-4)</b> : différentes inclinaisons du soleil.	20
<b>Figure (II-5)</b> : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.	20
<b>Figure (II-6)</b> : Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi –conducteur.	22
<b>Figure (II-7)</b> : angle d'inclinaison.	23
<b>Figure (II-8)</b> : Une cellule Photovoltaïque.	24
<b>Figure (II-9)</b> : Structure d'une cellule Photovoltaïque .[2]	25
<b>Figure (II-10)</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	26
<b>Figure (II-11)</b> : photos de cellules mono-cristalline (a) et poly cristalline (b).[9]	27
<b>Figure (II-12)</b> : Cellules amorphes.	27

## Liste des figures

---

<b>Figure (II-13):</b> Caractéristiques résultantes d'un groupement de $N_s$ cellule en série.	29
<b>Figure (II-14):</b> Caractéristiques résultant d'un groupement de $N_p$ cellules en parallèle.	29
<b>Figure (II-14):</b> (A.B). A)..Association mixte des modules.	30
B)..Caractéristique résultante d'un groupement mixte.	
<b>Figure (II-15):</b> schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes By-pass et diode anti retour.	32

### Chapitre III : MODELISATION ET SIMULATION D'UN PANNEAU PV

<b>Figure (III-1) :</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	34
<b>Figure (III-2) :</b> Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle.	35
<b>Figure (III-3) :</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal.	37
<b>Figure (III-4) :</b> Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur).	41
<b>Figure (III-5) :</b> Principe de la commande P&O.	42
<b>Figure (III-6) :</b> Système PV forme par un générateur PV, convertisseur dévolteur, et une charge ( $R_s$ ) l'intercepteur IGBT et contrôler par un signal de période $T$ et de rapport cyclique.	43
<b>Figure (III-7):</b> fluctuation du point de puissance maximale avec l'intensité d'éclairement et la charge $R_{ch}$ .	44
<b>Figure (III-8):</b> Schéma de bloc d'un générateur PV.	46
<b>Figure (III-9):</b> caractéristique $I=f(v)$ d'un panneau solaire.	46
<b>Figure (III-10):</b> caractéristique $P=f(v)$ d'un panneau solaire.	47
<b>Figure (III-11-A) :</b> caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes irradiations solaires à température constante égale à $25^\circ\text{C}$ .	48
<b>Figure (III-11-B) :</b> caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairagements solaires à température constante égale à $25^\circ\text{C}$ .	48
<b>Figure (III-12-A) :</b> caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal à $1000\text{ w/m}^2$ .	49
<b>Figure (III-12-B) :</b> caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal $1000\text{ w/m}^2$ .	49
<b>Figure (III-13) :</b> Schéma de bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT.	50
<b>Figure (III-14) :</b> Variation de la puissance incidente de l'éclairement en fonction du temps.	50
<b>Figure (III-15) :</b> puissance à la sortie du panneau changement d'éclairement ( $\text{W/m}^2$ ).	51
<b>Figure (III-16) :</b> Zoom puissance à la sortie du panneau éclairement $500\text{ W/m}^2$ .	51

### Chapitre IV : ALIMENTATION D'UNE CHARGE RL PAR UN GÉNÉRATEUR PV

<b>Figure (IV-1) :</b> Onduleur de tension triphasé.	56
<b>Figure (IV-2) :</b> Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.	57
<b>Figure (IV-3) :</b> Principe de la modulation.[9]	59
<b>Figure (IV-4) :</b> Schéma Synoptique de la commande en MLI (triphase).	60

## Liste des figures

---

<b>Figure (IV-5) :</b> Modulation de largeur d'impulsion multiple.	61
<b>Figure (IV-6) :</b> MLI sinusoïdale triangulaire unipolaire.	61
<b>Figure (IV-7) :</b> La modulation sinusoïdale modifiée.	62
<b>Figure (IV-8) :</b> La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.	62
<b>Figure (IV-9) :</b> Creux de tension et coupures brèves.	64
<b>Figure (IV-10) :</b> Exemple de fluctuation de tension.	65
<b>Figure (IV-11) :</b> Déséquilibre des tensions triphasées.[9]	66
<b>Figure (IV-12) :</b> Forme d'onde de la variation de la fréquence.	66
<b>Figure (IV-13) :</b> Représentation des inters et infra harmoniques.	68
<b>Figure (IV-14) :</b> Spectre d'un signal.	68
<b>Figure (IV-15) :</b> Schéma de simulation globale d'une charge RL triphasé du PV.	71
<b>Figure (IV-16) :</b> Formes d'ondes de la tension composée Pour Le coefficient de réglage $r = 0.5 \Omega$ .	72
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	
<b>Figure (IV-17) :</b> Formes d'ondes de la tension composée Pour Le coefficient de réglage $r = 0.8 \Omega$ .	73
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	
<b>Figure (IV-18) :</b> Formes d'ondes de courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage $r = 0.5 \Omega$ .	74
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	
<b>Figure (IV-19) :</b> Formes d'ondes de courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage $r = 0.8 \Omega$ .	74
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	
<b>Figure (IV-20) :</b> Spectre d'harmonique du tension à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage $r = 0.5 \Omega$ .	75
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	
<b>Figure (IV-21) :</b> Spectre d'harmonique du tension à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage $r = 0.8 \Omega$ .	75
A ) Facteur de modulation =17	75
B ) Facteur de modulation =33	76
<b>Figure (IV-22) :</b> Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage $r = 0.5 \Omega$ .	76
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	
<b>Figure (IV-23) :</b> Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage $r = 0.8 \Omega$ .	77
A ) Facteur de modulation =17	
B ) Facteur de modulation =33	

### **Chapitre I : LES ENERGIES RENOUVELABLES**

**Tableaux (I-1)** : Matières premières. 08

### **Chapitre II : Énergie Solaire**

**Tableau (II-1)** : Potentiel solaire en Algérie. 18

**Tableau (II-2)** : Valeurs de la bande interdite pour différents semi-conducteurs. 22

**Tableau (II-3)** : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques. 28

### **Chapitre III : MODELISATION ET SIMULATION D'UN PANNEAU PV**

**Tableau III.1**: Caractéristiques électriques du module. 45

## LISTE DES SYMBOLES

---

**B** : Bohr.  
**p** : phosphore.  
**P** : puissance solaire.  
**D** : Le rayonnement direct.  
**Rs** : Rayon du soleil (Km).  
**RT** : Rayon de la terre (km).  
**M** : répartition spectrale.  
**E** : L'énergie (J).  
 $\lambda$  : Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ ).  
 $\lambda_c$  : longueur d'onde de coupure.  
**v** : fréquence des photons (HZ).  
**TS** : température d'un corps noire  
**Eg** : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur (ev).  
**hv** : énergie de rayonnement.  
**Si** : silicium.  
**Ns** : nombre des cellules en série.  
**Np** : nombre des cellules en parallèle.  
**Icc** : Courant de court circuit (A).  
**Vco** : Tension à circuit ouvert en Volt (V).  
**Vop** : tension optimale.  
**Iop** : courant optimal.  
**Igcc** : courant de court-circuit du générateur résultant.  
**Vgco** : tension du circuit ouvert du générateur résultant.  
**Pmax** : puissance maximale.  
 $\eta_m$  : rendement maximal.  
**VT** : La potentielle thermodynamique à une température donnée.  
**IPV** : photo courant (A).  
**ID** : le courant d'une jonction p-n (A).  
**Isat** : le courant de saturation(A).  
**Rs** : résistance série ( $\Omega$ ).  
**Rp** : résistance parallèle (shunt)( $\Omega$ ).  
**K** : la constante de Boltzmann ( $j / ^\circ\text{k}$ ).  
**q** : la charge de l'électron (c).  
**T** : la température réelle de la cellule ( $^\circ\text{k}$ ).  
**Tn** : la température nominale de la cellule.  
**a** : le facteur d'idéalité.  
**Isat n** : le courant de saturation nominale (A).  
**Ipn** : le courant généré par la lumière à la valeur nominale.  
**VT n** : la tension thermique à la température nominale (V).  
**Pmax m** : la puissance maximale mesurée (W).  
**Pmax e** : la puissance maximale expérimentale (W).  
**Rs max** : la résistance série maximal ( $\Omega$ ).  
**Rp min** : la résistance parallèle minimale ( $\Omega$ ).  
**Xn** : la valeur de l'itération n.  
**Xn+1** : la valeur de l'itération n+1.  
**G** : l'irradiation sur la surface du dispositif ( $\text{w}/\text{m}^2$ ).  
**Gn** : l'irradiation nominale ( $\text{w}/\text{m}^2$ ).

## LISTE DES SYMBOLES

---

**K<sub>i</sub>** : coefficient de température courant.

**K<sub>v</sub>** : coefficient de température tension.

**I<sub>G</sub>** : courant du générateur PV (A).

**V<sub>AN</sub>** : la tension de branche A mesurée par rapport à la borne négative de tension continue.

**V<sub>An</sub>** : la tension de phase mesurée par rapport à un point neutre flottant n représente une charge équilibrée montée en étoile.

**V<sub>AB</sub>** : la tension composée.

**f<sub>p</sub>** : la fréquence de la porteuse.

**f<sub>r</sub>** : la fréquence de la référence.

**A<sub>r</sub>** : Amplitude de la référence.

**A<sub>p</sub>** : Amplitude de la porteuse

**m** : L'indice de modulation.

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

**α** : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

**ΔU** : profondeur d'un creux de tension.

**Δt** : durée d'un creux de tension.

**U<sub>1o</sub>** : la composante homopolaire du fondamental.

**U<sub>1d</sub>** : la composante direct du fondamental.

**ΔU<sub>0</sub>** : Le degré de déséquilibre.

**n** : Le rang harmonique.

**A<sub>0</sub>** : composante continue ou valeur moyenne du signal.

**A<sub>n</sub> et B<sub>n</sub>** : amplitude crête des composant harmonique de rang n.

**ω** : pulsation fondamentale.

**T** : la période du signal (s).

## Abréviations utilisées

---

**ER** : énergie renouvelable.  
**GES** : gaz à effet de serre.  
**NEA** : New Energie Algérie.  
**AM** : Le nombre de masse d'air  
**AM1**: Rayonnement de la masse d'air "1"  
**Ge** : germanium.  
**Si** : silicium.  
**GaAs** : arséniure de Gallium.  
**CdS** : **sulfure de cadmium.**  
**PV** : photovoltaïque.  
**GPV**: Générateur Photovoltaïque.  
**STC** : Standard Test Conditions.  
**FF** : facteur de forme (Fill Factor).  
**I -V** : La caractéristique courant- tension de la photopile.  
**MPPT**: Maximum Power Point Tracking.  
**IGBT** :InsulatedGateCommted Transistor.  
**MLI** : Modulation de la Largeur d'Impulsion  
**PWM** : Pulse With Modulation  
**PPM** : point de puissance maximal  
**P&O**: Perturbation et Observation.  
**D** : la diode de roue libre.  
**DC-DC** :**Conversion continu continu.**  
**DC-AC** :**Conversion continu alternatif.**  
**THD<sub>v</sub>** : Taux de distorsion harmonique de la tension.  
**THD** :Taux de distorsion harmonique (%).

### INTRODUCTION GENERALE

Dans les dernières années, la croissance du besoin en énergie, ainsi que la pollution provenant de l'utilisation des énergies fossiles poussent le grand public à utiliser les énergies renouvelables.

L'utilisation des sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie solaire, éolienne, biomasse et hydraulique, est très ancienne ; ce type d'énergie est utilisé depuis l'antiquité et son utilisation a continué à exister jusqu'à l'arrivée de la "Révolution Industrielle", époque à laquelle, étant donné le bas prix du pétrole, elles ont été abandonnées.

Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelable, qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire, car elle dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde.

Le problème majeur est que les modules photovoltaïques se comportent comme des générateurs non linéaires le module photovoltaïque possède un point de fonctionnement optimum appelé le point de puissance maximal dépendant de l'éclairement et de la température.

L'addition d'un dispositif d'optimisation au système PV entraîne une augmentation notable du rendement globale du module PV.

Dans ce contexte, l'objet du travail présenté dans ce mémoire est l'étude et la simulation de l'alimentation d'une charge R.L par générateur photovoltaïque muni d'une commande MPPT.





**Chapitre I :**  
***LES ENERGIES***  
***RENOUVELABLES***

### I-1 Introduction :

L'utilisation des sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie solaire, éolienne, biomasse et hydraulique, est très ancienne ; ce type d'énergie est utilisé depuis l'antiquité et son utilisation a continué à exister jusqu'à l'arrivée de la "Révolution Industrielle", époque à laquelle, étant donné le bas prix du pétrole, elles ont été abandonnées.

Cependant depuis ces dernières années au vu l'accroissement du coût des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un renouveau des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le même lieu où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec peu de vent), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, ce sont les aérogénérateurs qui prendront le relais et produiront la majorité de l'énergie électrique.

### I-2 Définition des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale ...). Ces énergies du futur ne couvrent cependant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité d'origine renouvelable. Les principaux intérêts des énergies renouvelables sont leur non-épuisement et leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) très limitées, comme en témoigne l'analyse du cycle de vie de leurs opérations. Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des grandes catégories de technologies de production d'électricité par : -Hydraulique (Eau : turbines).- Biomasse (bois CO2 issu de la combustion = CO2 issu de la croissance des arbres : photosynthèse).- Géothermie. -Solaire (thermique et photovoltaïque) -Eolienne (éolienne). [1]

### I-3 Différentes types de l'énergie Renouvelable :

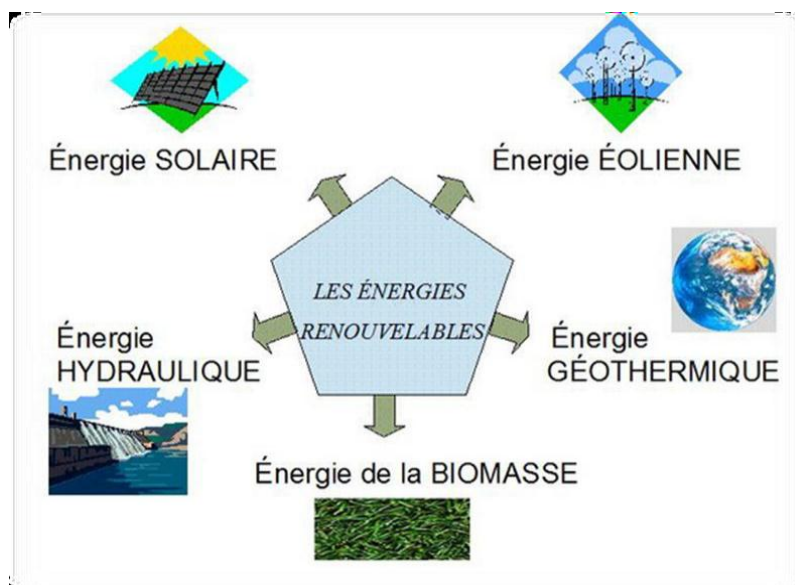


Figure (I-1) : Schéma de différentes énergies renouvelables.

### I-3-1 Énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique désigne l'énergie qui provient de la force des eaux (cours d'eau et océans). Les centrales hydroélectriques ou usines marémotrices transforment l'énergie de la gravité de l'eau en énergie électrique grâce au courant de l'eau passant dans les turbines.[4]

D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :[2]

#### a) Énergie des vagues

elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pelamis, sorte de ver en métal articulé, le Serve ou encore le PH4S toujours au stade de prototype et qui utilise 4 sources d'énergie permettant une autonomie complète en mer. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.



Figure (I-2) : Énergie des vagues.

#### b) Énergie marémotrice

Elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),

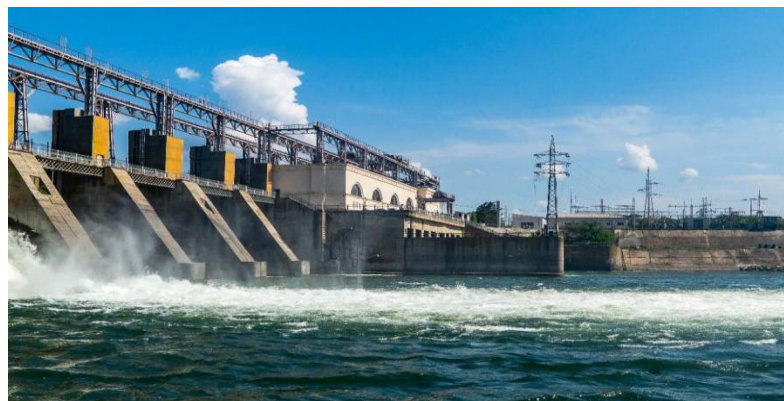
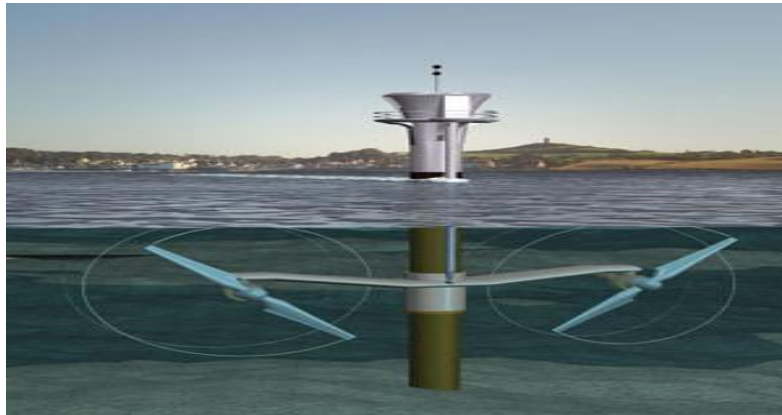


Figure (I-3) : Énergie marémotrice.

**c) Énergie hydrolienne**

Elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins,



**Figure (I-4) :** Énergie hydrolienne.

**d) Énergie thermique des mers**

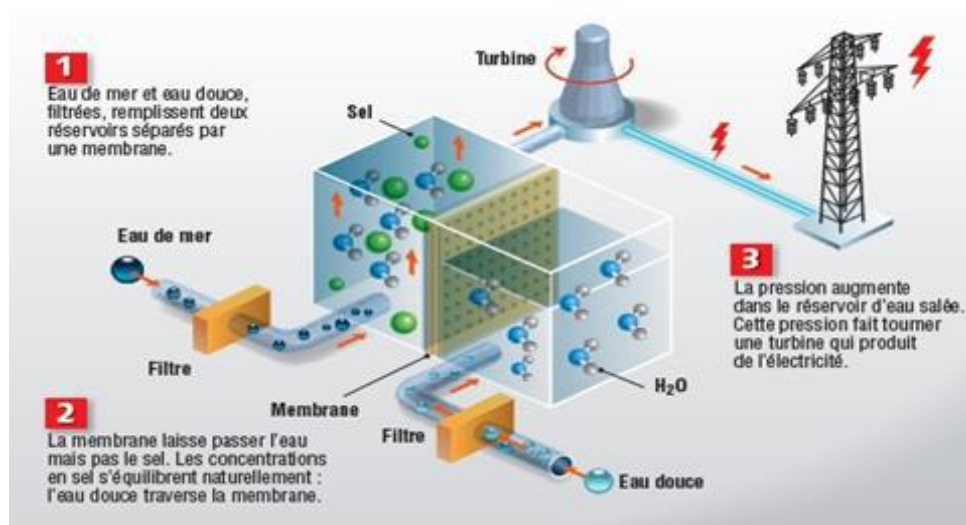
Elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,



**Figure (I-5) :** Énergie thermique des mers.

**e) Énergie osmotique**

Elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer. L'idée remonte aux années 1970, elle consiste à tirer parti du phénomène d'osmose qui se produit lors du mélange d'eau de mer et d'eau douce (grâce à leur salinité différente). La première centrale osmotique a été ouverte en 2009 à Hurum en Norvège par la société Stat kraft à l'embouchure du Fjord d'Oslo au bord de la Mer du Nord.



**Figure (I-6) :** Production d'électricité par osmose.

### I-3-1-1 Conversion de l'énergie hydraulique en électricité :

Il s'agit de transformer l'énergie potentielle de l'eau retenue dans des réservoirs en énergie mécanique au moyen d'une turbine, puis de convertir cette énergie mécanique en électricité grâce à un alternateur.[3]

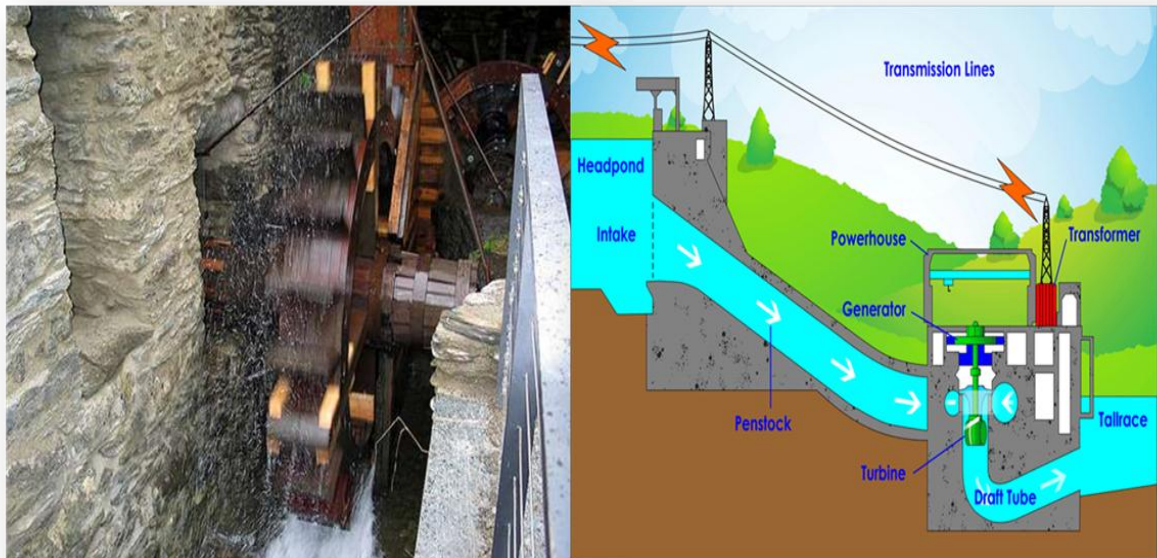


**Figure (I-7) :** Système de conversion de l'énergie hydraulique.

### I-3-1-2 Principe de Fonctionnement d'une centrale hydrolienne :

L'hydrolienne est une turbine hydraulique, qui utilise l'énergie des courants marins comme une éolienne utilise l'énergie du vent. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur.[4]





**Figure (I-8) :** Fonctionnement d'une centrale hydraulique.

### I-3-2 Biomasse :

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Comprend trois familles principales:

- ❖ Le biogaz ou La méthanisation.
- ❖ Les bois énergie ou biomasse solide.
- ❖ Les granules de bois sont le combustible au rendement le plus élevé de la gamme (Wissmann).[5]



**Figure (I-9) :** Énergie de la biomasse.

**a) Les biocarburants :**

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques.  
Les trois principales catégories sont : Huile- végétale –carburant.



**Figure (I-10) :** Énergie Les biocarburants végétale.

**b) Bioéthanol :**

Fabriquer à partir du saccarose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, mais...) par fermentation.



**Figure (I-11) :** la bioéthanol.

**c) Biogaz ou Méthanisation :**

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène: nous parlons de «digestion anaérobie» ou nous utilisons des matières premières:

- ✚ Déchets organiques des communes: les poubelles des ménages
- ✚ Déchets organiques industriels: agro-alimentaire, abattoirs.
- ✚ Déchets agricoles: lisier, fumier et les résidus de récolte.
- ✚ Sous-produits de processus industriels: glycérine.

1 tonne de	m3 de biogaz	équivalent en litre de fioul	KWh électrique
Lisier	16	11	30
Fumier	60	35	100
Paille	220	120	350
Graisse	450	350	1000

Tableaux (I-1) : Matières premières.

**Remarque :**

La matière restante est utilisée comme des amendements organiques pour l'agriculture.

**I-3-2-1 Conversion de la biomasse en électricité :**

La combustion est la technique la plus simple et la plus ancienne de conversion de la biomasse en énergie. Cette transformation du bois et des déchets agricoles, industriels et Domestiques d'origine végétale produit en effet de la chaleur (et de l'électricité). La chaleur Ainsi produite est utilisée pour la cuisson, le chauffage, la production d'eau chaude et la Production d'électricité. Les applications des technologies de la combustion vont du simple feu de bois aux chaudières et centrales à haut rendement et à cogénération.[3]

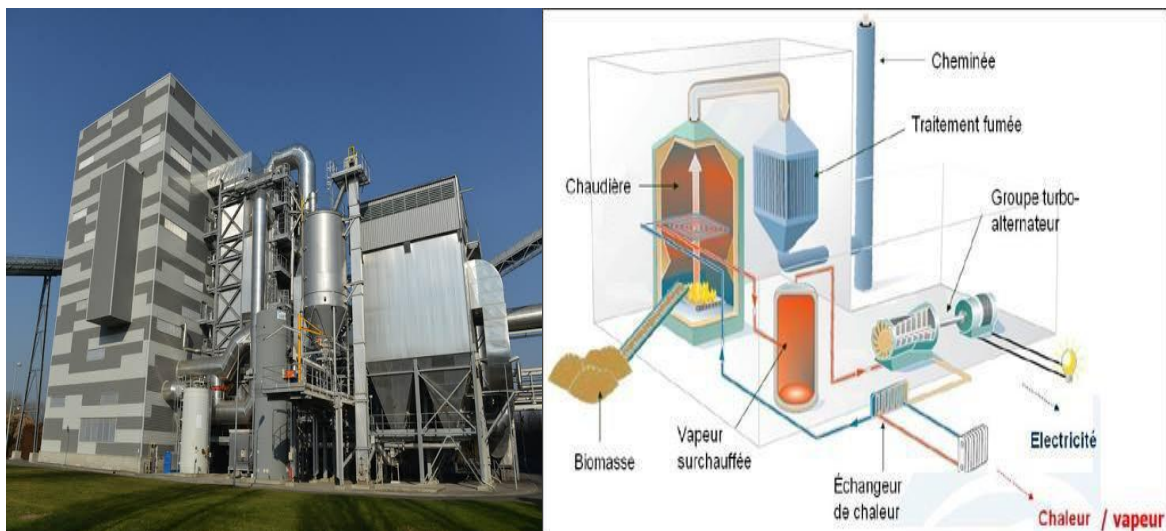


Figure (I-12) : Système de conversion de l'énergie biomasse.



### I-3-2-2 Principe de Fonctionnement :

La centrale à biomasse produit de l'électricité grâce à l'énergie thermique dégagée par la combustion de déchets végétaux, de déchets ménagers et le biogaz. Le combustible apporte une énergie chimique. Il est amené vers une chaudière, il est introduit dans la chambre de combustion où, en brûlant, il dégage de la chaleur. La chaleur est transportée à des tubes remplis d'eau qui tapissent la chaudière. L'eau chaude se dirige vers un ballon dans lequel elle se transforme en vapeur. La vapeur alimente une turbine qui fait tourner un alternateur qui produit un courant électrique.[3]



**Figure (I-13) :** Fonctionnement d'une centrale Biomasse.

### I-3-3 Énergie géothermique :

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité.[5]

Nous caractérisons 3 types d'énergie :

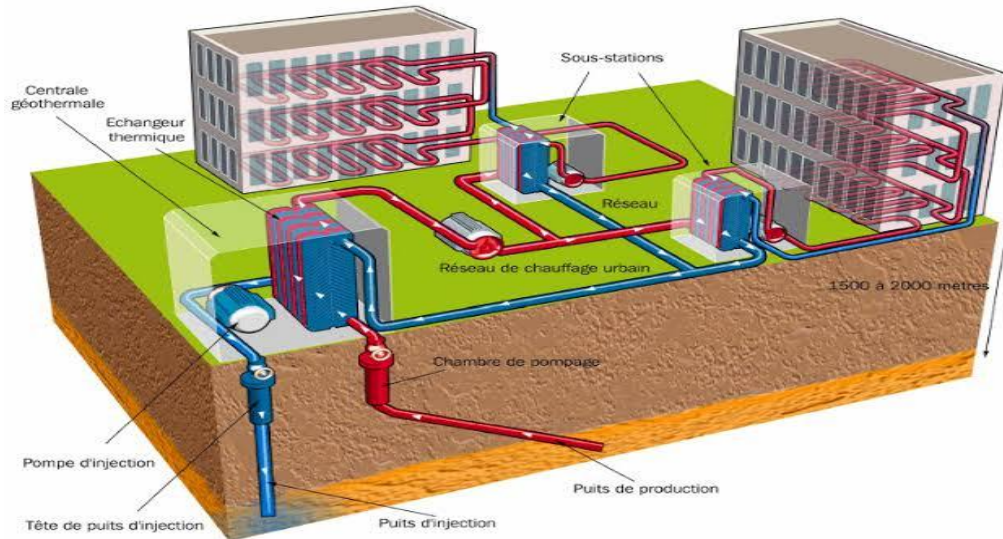
1. La géothermie à haute énergie.
2. La géothermie à basse énergie.
3. La géothermie à très basse énergie.



**Figure (I-14) :** Énergie géothermique.

### I-3-3-1 Principe de Fonctionnement de la Géothermie :

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur. [4]



**Figure (I-15) :** Fonctionnement d'une centrale Énergie géothermique.

### I-3-4 Énergie éolienne :

Cette énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un arbre qui est relié à des systèmes mécaniques qui servent à moulinner le grain ou à pomper de l'eau, soit à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [5].



(a)- Éoliennes

b- Moulins à pales en forme de voile

**Figure (I-16) :** Énergie éolienne.[2]

### I-3-4-1 Conversion de l'énergie éolienne en électricité :

Le Système de Conversion Eolien est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur qui alimente un réseau électrique.[3]



Figure (I-17) : Système de conversion de l'énergie cinétique du vent.

### I-3-4-2 Principe de Fonctionnement de l'Énergie éolienne:

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. La très large majorité des éoliennes installées dans le monde sont des machines à axe horizontal (1, 2 ou 3 pales verticales), car leur rendement est supérieur à celui des autres types d'éoliennes.[6]

- 1: automate
- 2: anémomètre, girouette
- 3 : moteur d'orientation
- 4: arbre lent
- 5: multiplicateur
- 6 : arbre rapide
- 7: génératrice
- 8: frein à disque

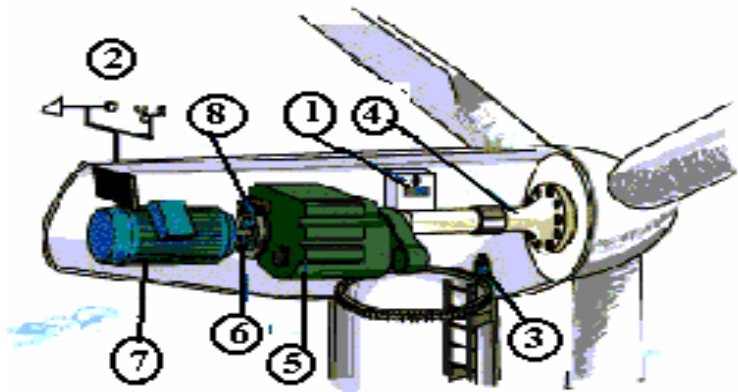


Figure (I-18) : Constitution d'une éolienne.

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'automate (1) de la Figure (I-18), renseigné par l'anémomètre et la girouette (2) fixés au sommet de la nacelle, commande au moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent. Le vent entraîne les pales qui font tourner un arbre lent (4). Le multiplicateur (5) augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide (6). Celui-ci transmet le mouvement rotatif au générateur (7) qui produit de l'énergie électrique.[6]

Les éoliennes de puissance ne fonctionnent et ne produisent pas en permanence. Elles ont besoin d'une vitesse de vent minimale pour commencer à produire de l'énergie. Inversement, elles se freinent puis s'arrêtent automatiquement lorsque la vitesse du vent est trop élevée (environ 100 Km/h). Ainsi, les aérogénérateurs ne produisent de l'électricité qu'entre deux vitesses de vent appelées 'vitesse de démarrage' et 'vitesse de coupure'. [6]

Pour freiner la rotation des éoliennes, on utilise souvent le principe de pales à pas variable ou 'pitch control' : les pales sont mobiles autour de leur axe longitudinal et s'orientent automatiquement de façon à diminuer la portance au vent. Lorsque la vitesse du vent est trop importante et que ce mécanisme ne suffit plus à freiner le mouvement rotatif, l'éolienne se place perpendiculairement au vent (on dit qu'elle se met en drapeau, comme les voiles d'un bateau). Le rotor devient ainsi immobile.

Un autre système de régulation, appelé 'stall control' est également parfois utilisé : c'est alors le profil aérodynamique de la pale qui permet à l'éolienne de réguler.

Les éoliennes disposent en outre d'un frein mécanique (8), dit frein d'urgence, Figure (I-18). Celui-ci, placé sur l'arbre rapide, permet de suppléer le freinage par les pales en cas de défaillance, ou bien de maintenir l'éolienne en position arrêtée en période de maintenance.  
.[6]

### **I-3-5 Énergie solaire**

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

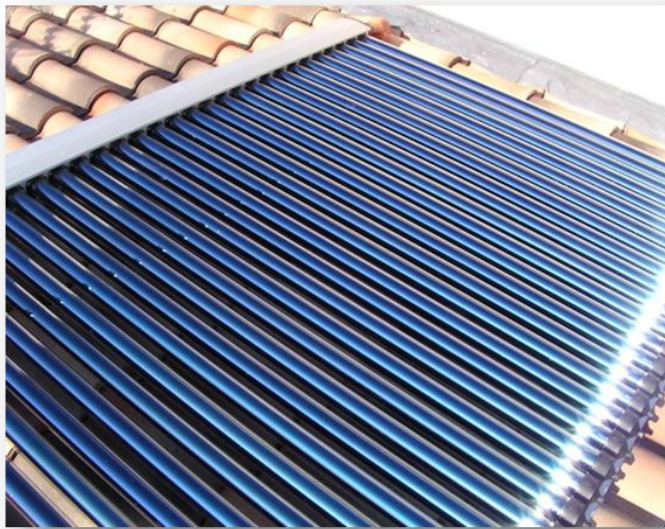
- L'énergie solaire thermique, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement,
- L'énergie photovoltaïque, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité. [2]

#### **I-3-5-1 Énergie solaire thermique :**

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

L'énergie thermique peut être convertie en d'autres types d'énergie. Les principales formes de conversion d'énergie sont la conversion en énergie mécanique et la conversion en énergie électrique.[3]





**Figure (I-19) :** Énergie solaire thermique.[4]

### **I-3-5-1-1 Conversion de l'énergie thermique en énergie électrique :**

L'énergie potentielle acquise par le gaz est due à l'énergie thermique qui lui est fournie. L'acquisition d'énergie thermique par le gaz est confirmée par le fait que le gaz augmente sa température. Si le gaz peut se dilater, il fait un travail et consomme donc une partie de l'énergie qu'il a acquise et refroidie.

L'énergie thermique peut être transformée en d'autres formes d'énergie, par exemple, en énergie électrique.

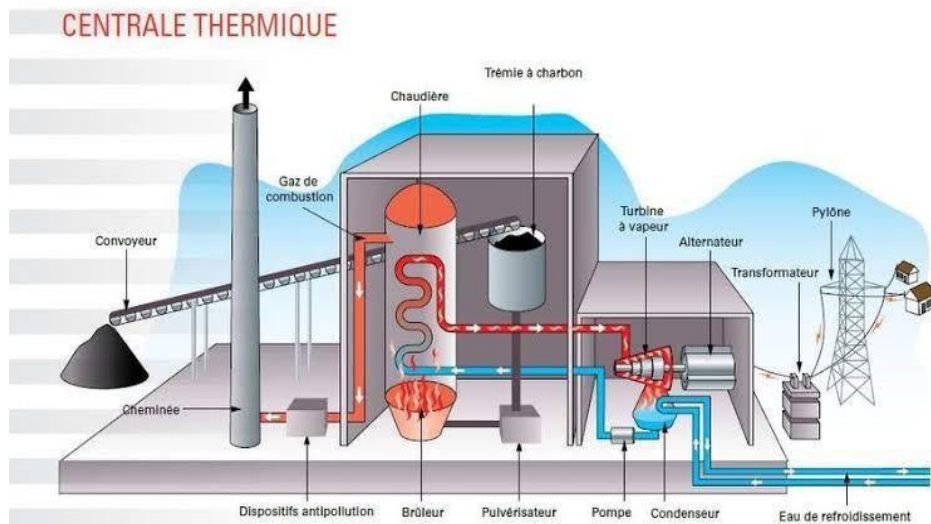


**Figure (I-20) :** Système de conversion de l'énergie thermique.

### **I-3-5-1-2 Principe de fonctionnement du solaire thermique :**

La chaleur est récupérée grâce à un fluide caloporteur, qui s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage. Celui-ci laisse pénétrer la lumière solaire et minimise les pertes par rayonnement infrarouge de l'absorbeur en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage permet en outre de limiter les échanges de chaleur avec l'atmosphère.

Le capteur solaire sera d'autant plus performant que le revêtement de l'absorbeur aura un coefficient d'absorption élevé et un coefficient d'émission faible. Les matériaux qui présentent ces caractéristiques sont dites « sélectifs ». Les performances du capteur sont encore améliorées en isolant la face arrière du module. Certains fabricants proposent des capteurs pouvant remplir la fonction de toit couvrant, pour une meilleure intégration architecturale.[3]



**Figure (I-21) :** Fonctionnement d'une centrale thermique.

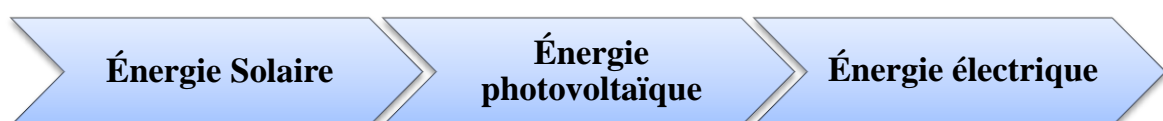
### I-3-5-2 Énergie Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque, qui alimente un réseau de distribution électrique.[4]



**Figure (I-22) :** Énergie Solaire photovoltaïque.[4]

#### I-3-5-2-1 Conversion de l'énergie thermique en énergie électrique :



**Figure (I-23) :** Système de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque.

### **I-3-5-2-2 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :[3]

#### **Les avantages :**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- Une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

#### **Les inconvénients :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

#### I-4 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. La Figure (I-22) montre le potentiel ER en Algérie [11].

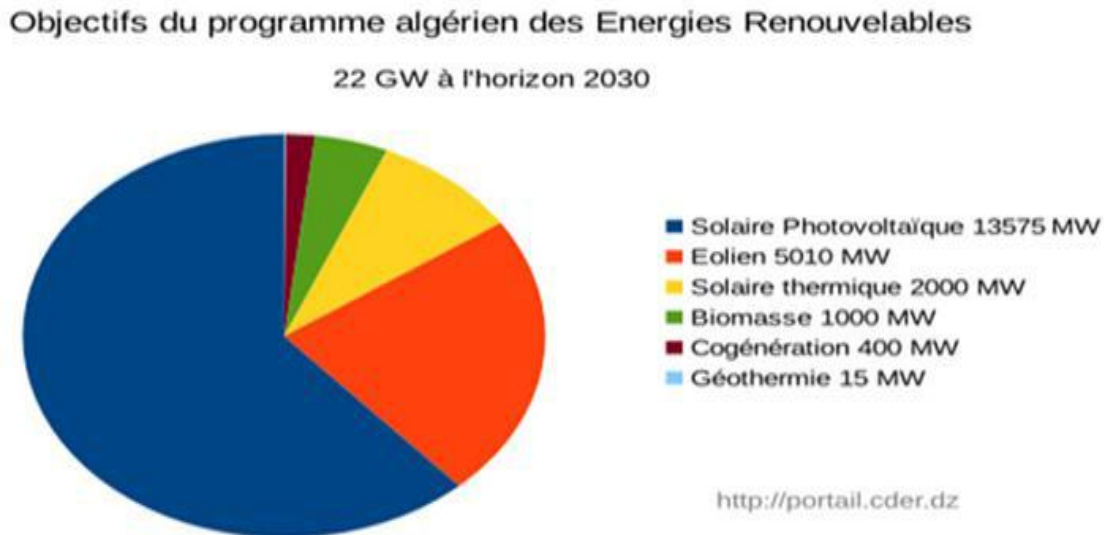


Figure (I-24) : Le potentiel ENR en Algérie .

#### I-5 Conclusion :

Pour conclure, le développement d'infrastructures et d'entreprises dans la filière du renouvelable ainsi que les politiques d'engagement de nombreux pays témoignent bien d'une confiance en l'avenir des énergies renouvelables. Elles deviennent de plus en plus utilisées ce qui montre encore fois qu'elles représentent un avenir pour l'humanité, et pour la préservation de notre planète.

Vu sa situation géographique, l'Algérie est un pays qui dispose d'un potentiel solaire de plus importa au monde, d'où le choix de notre sujet.





# **Chapitre II : Énergie Solaire**

## II-1 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-2 Energie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [7].

## II-3 Potentiel solaire en Algérie:

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région MNEA .comme le montre la Figure (II-1)

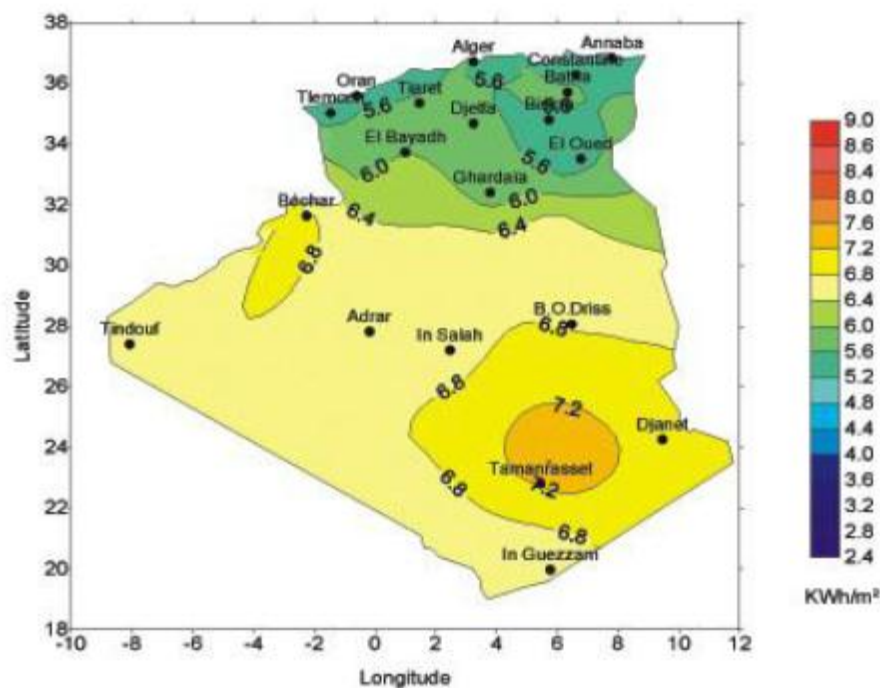


Figure (II-1) : Potentiel solaire en Algérie.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Le Tableau (II-1) suit résume le potentiel solaire en Algérie. [8]

Régions	Régions Côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau (II-1) : Potentiel solaire en Algérie .

### II-3-1 Bilan des réalisations:

Les réalisations dans les installations photovoltaïques concernent principalement les applications liées à l'électrification rurale avec près de 60%. En effet, avec un taux d'électrification nationale d'environ 98%, les ménages restants à électrifier sont très dispersés et éloignés du réseau. La solution la plus techniquement adéquate et la plus compétitive sur le plan financier est l'électrification à l'énergie photovoltaïque. Un premier programme d'électrification a été mené au cours de la période 1995-2002 et a consisté à approvisionner en électricité 18 villages du sud de l'Algérie, soit l'électrification de près de 1 000 foyers. Pour apporter à ces logements un minimum de confort, une quantité d'énergie de 02 kWh par jour et par ménage leur a été mise à disposition, ce qui correspond à la consommation de 05 bandes lumineuses, un réfrigérateur, une télévision avec récepteur numérique, une radio et un ventilateur. Les villages touchés par ce programme figurent dans (Figure (II-2)).[9]

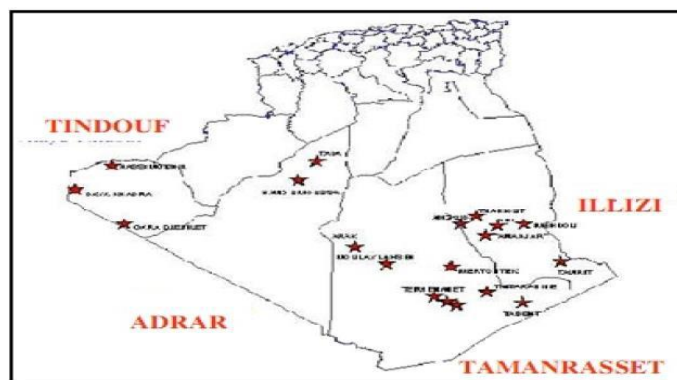


Figure (II-2) : Programme d'électrification des 18 villages.

#### II-4 L'énergie solaire et l'effet photovoltaïque :

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  $1367 \text{ W/m}^2$ .

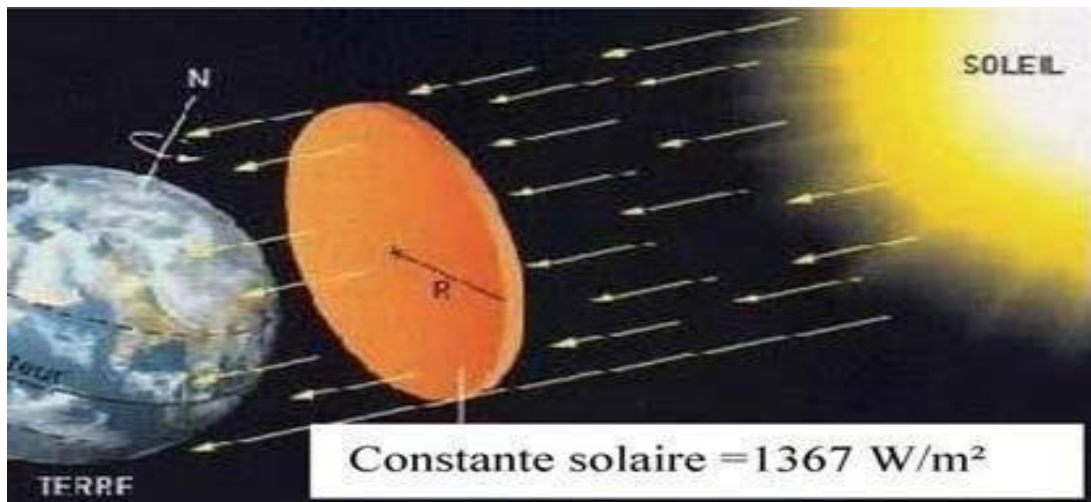
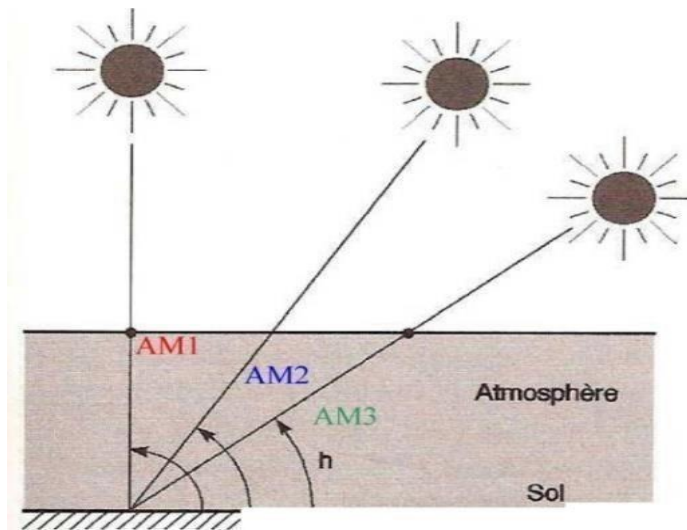


Figure (II-3) : rayonnement solaire.

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  $1000 \text{ W/m}^2$  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  $1000 \text{ W/m}^2$ .

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.



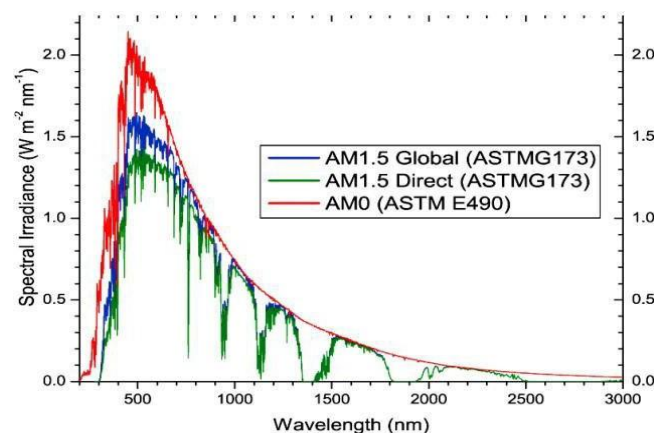
**Figure (II-4) :** différentes inclinaisons du soleil.

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  $45^\circ$  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.[7]

### II-4-1 Spectre solaire :

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de  $1000\text{W/m}^2$ .



**Figure (II-5) :** Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.

Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation: 
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Avec :  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $C$  la vitesse de lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde.

$h=6.626 \cdot 10^{-34}$  j.s).

$C=299\,792\,458$  m/s).

La répartition du rayonnement solaire extraterrestre peut être compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AMO. Sa distribution en longueur d'onde est répartie comme suit :

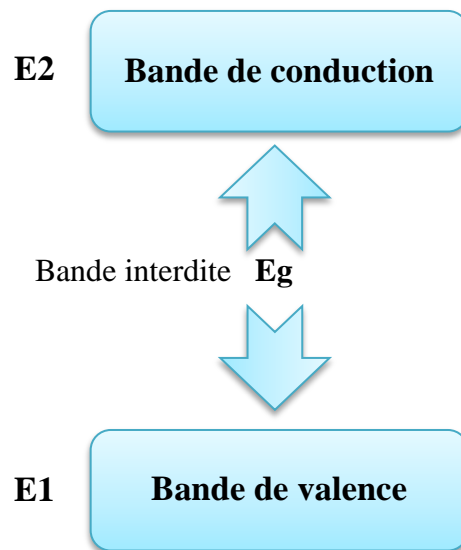
<b>Ultraviolet UV</b>	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	<b>6,4%</b>
<b>Visible</b>	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	<b>48,0%</b>
<b>Infrarouge IR</b>	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	<b>45,6%</b>

#### II-4-2 Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur:

Une cellule solaire est constituée d'un matériau qui absorbe l'énergie photonique et la transforme en énergie électrique. Dans le schéma simple d'un matériau à deux niveaux d'énergie **Figure (II-6)**, un électron avec l'énergie  $E_1$  appartient à la bande de valence et est lié à l'atome. S'il reçoit une énergie (sous forme de photon par exemple) qui lui permet d'atteindre le niveau  $E_2$ , énergie correspondant à la bande de conduction, il devient libre et peut alors participer à un courant électrique. Nécessaire pour que l'électron devienne libre, est noté  $E_g$  («g» pour gap en anglais). Nous le donnons le plus souvent en électron volt (ev). Nous avons bien sûr :

$$E_g = E_2 - E_1 \quad \text{II.1}$$

On appelle largeur de bande interdite cet écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction. La tension de sortie de la cellule est donnée par  $E_g/q$  Ou  $q$  est la charge de l'électron. **Figure (II-6)**.



**Figure (II-6):** Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi –conducteur

Si on choisit un matériau ayant une large bande interdite étroite, cela favorisera le déplacement des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction mais alors la Tension aux bornes de la cellule élémentaire sera faible. C'est le cas des métaux. Si par contre on choisit un matériau ayant une largeur de bande interdite élevée, les électrons auront du mal à se libérer de la bande de valence et aucun courant n'apparaîtra. C'est le cas des isolants électriques ( $E_g > 5\text{eV}$ ). Le cas des semi-conducteurs est un compromis qui permet d'obtenir un courant sous une tension acceptable.[10]

Le tableau II.2. Donne la valeur d' $E_g$  pour quelques matériaux semi-conducteurs.

Matériau	Symbole	$E_g$ (ev)
Germanium	Ge	0.67
Silicium	Se	1.11
Arséniure de gallium	GaAs	1.35
Sulfure de cadmium	Cds	2.40

**Tableau (II-2) :** Valeurs de la bande interdite pour différents semi-conducteurs.



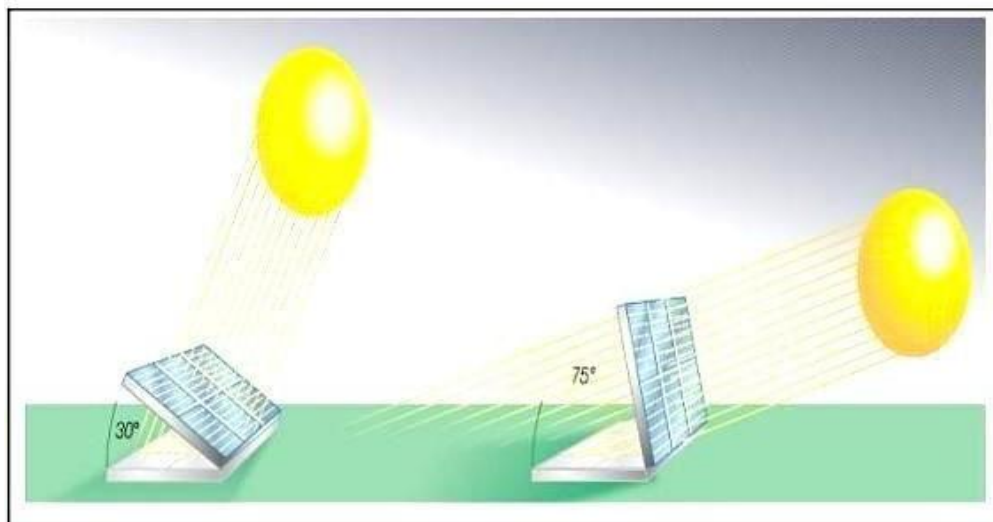
### II-4-3 Angle d'inclinaison:

Le rendement des panneaux 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  $90^\circ$ .

Des essais sont donc été effectués sur des panneaux pourvus de mécanismes d'orientation, c'est-à-dire capables d'adapter leur inclinaison en fonction de la position du soleil.



**Figure (II-7):** angle d'inclinaison.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année.

La meilleure inclinaison des panneaux solaires photovoltaïques pour un usage à longue durée est celle de la latitude de l'endroit où sont installés les capteurs. Toutefois, ce sont souvent les dispositions constructives de l'habitation qui déterminent l'inclinaison.[9]



## II-5 La cellule photovoltaïque

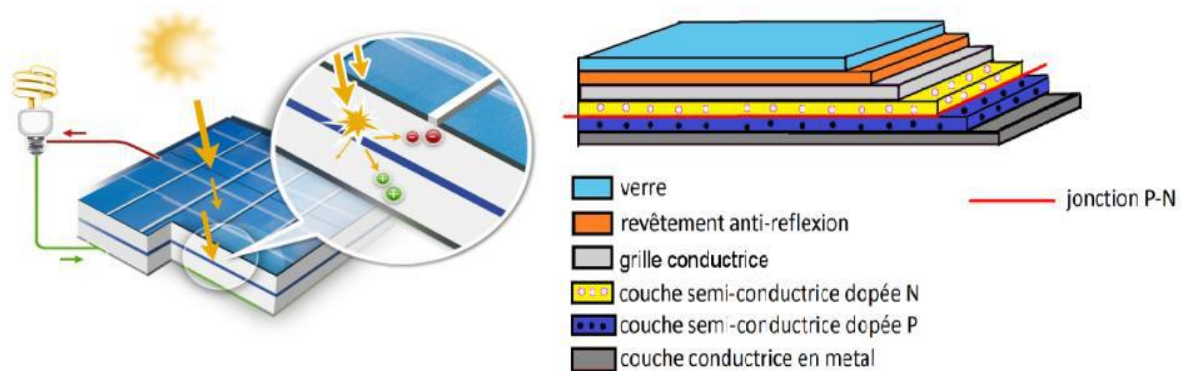
La première *cellule photovoltaïque* (ou *photopile*) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour 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. [12]



**Figure (II-8):** Une cellule Photovoltaïque.

### II-5-1 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réfléchissant, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante. [13]



**Figure (II-9):** Structure d'une cellule Photovoltaïque .[2]

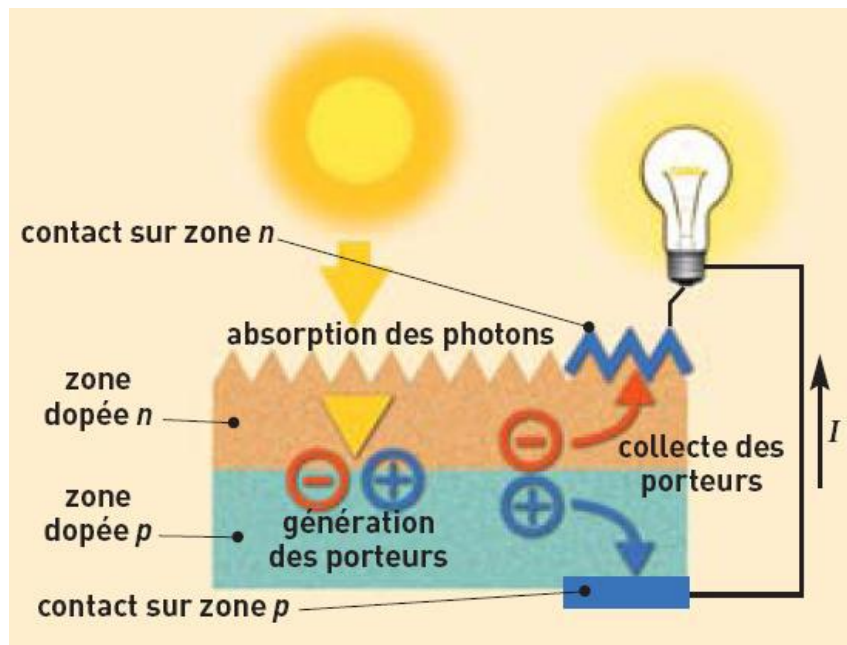
### II-5-2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

L'effet photovoltaïque (PV) utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité et de transporter dans un matériau semi-conducteur, des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et de type p.

Lorsque la première partie est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule. L'effet repose donc, à la base, sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. [12]



**Figure (II-10) :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .

### II-5-3 Effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet Photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette Cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure I.4 illustre une cellule PV typique où sa constitution est Détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11% à 12 % avec du silicium poly Cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [7]. La photopile ou Cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [14].

### II-6 Matériaux utilisés dans les cellules PV :

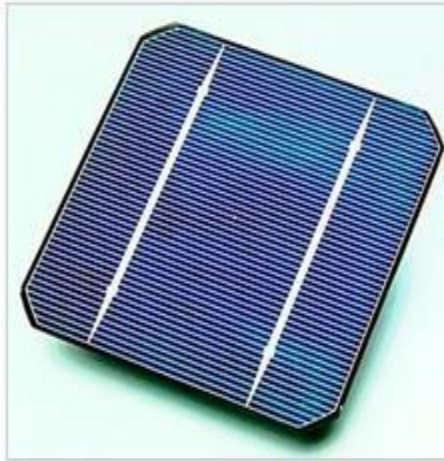
#### ➤ Silicium mono-cristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. 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.

### ➤ 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. L'efficacité de conversion PV pour une Cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.



(a)



(b)

**Figure (II-11) :** photos de cellules mono-cristalline (a) et poly cristalline (b).[9]

### ➤ Silicium amorphe

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. 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 [15].



**Figure (II-12):** Cellules amorphes.

### II-6-1 les avantages et les inconvénients

Le Tableau (II-3) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus Utiliser d'une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	35 ans
Avantages	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le mono-cristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse, prix moins élevé que les cristallins, Bon rendement en diffus
Inconvénient	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-3) : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.

## II-7 Association des cellules

### II-7-1 Mise en série :

Une association de (Ns) cellule en série Figure (II-13) permet d'augmenter la tension du Générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la Caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions Élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une Association série de (Ns) cellules [16].

$$V_{co} = N_s * V_{co} \quad \text{II.2}$$

Avec :

**V<sub>co</sub>** : La tension du circuit ouvert.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{cons}=0.6V*36=21.6V$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{op}$  proche de celle d'une tension de batterie de 12V. [16]

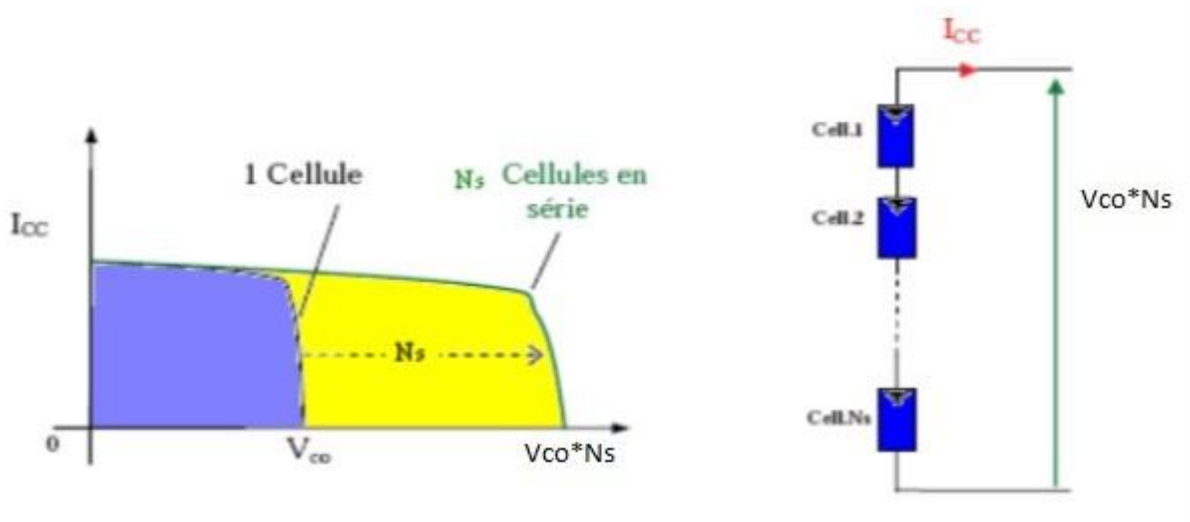


Figure (II-13): Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellule en série .

**II-7-2 Mise en parallèle :**

Une association parallèle de (Np) cellule Figure (II-14)est possible et permet D'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules Identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la Caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [17].

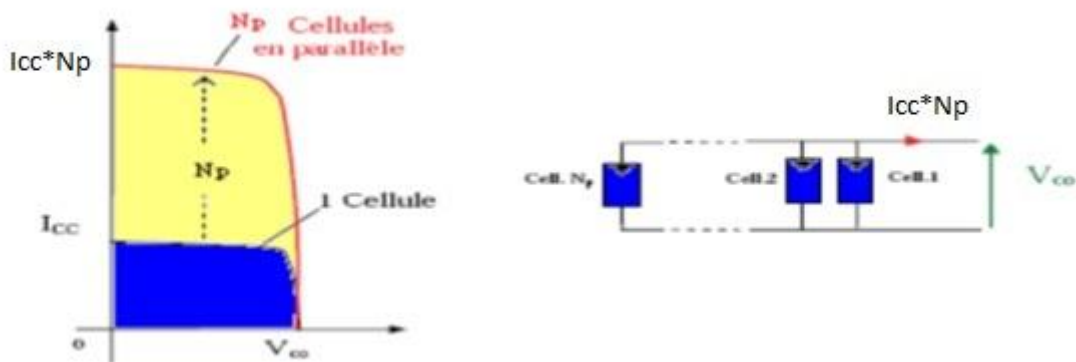


Figure (II-14): Caractéristiques résultant d'un groupement de Np cellules en parallèle.

L'équation (II.3) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de Np cellules.

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \tag{II.3}$$

Avec

**Icc:** le courant de court-circuit.



Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ( $N_s$ ,  $N_p$ ) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée  $P_{max}$ . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique  $P(V)$  du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée  $V_{op}$  et d'un courant optimal noté  $I_{op}$ .

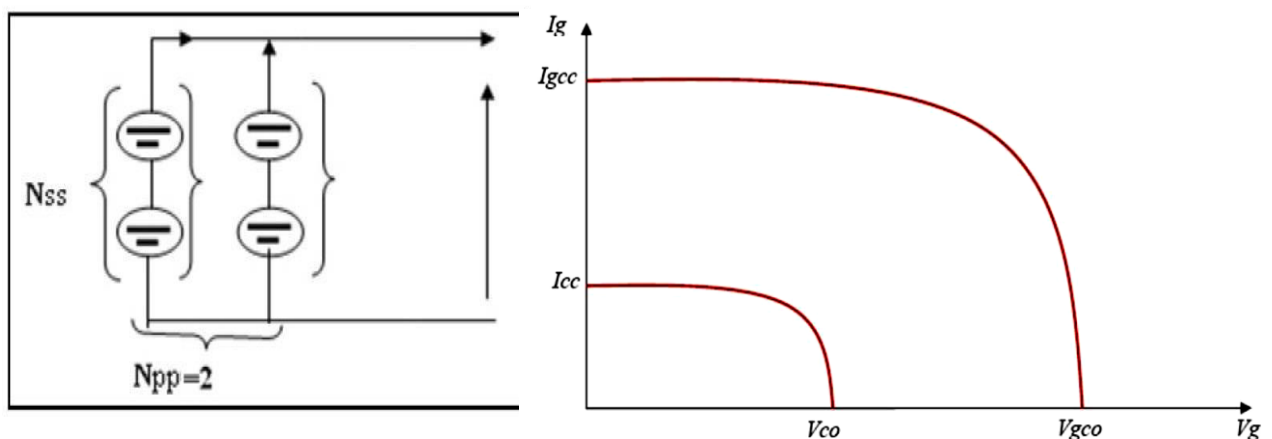
Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à  $\pm 10\%$  selon le lot de fabrication.[18]

### II-7-3 Groupement mixte

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux Modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $n_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $n_p$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure B,  $n_s$  et  $n_p$  étant respectivement les nombres totaux de panneaux en série et en parallèle la figure B.[9]

$I_{GCC} = N_p \cdot I_{cc}$ : courant de court-circuit du générateur résultant.

$V_{GCO} = N_s \cdot V_{co}$ : Tension du circuit ouvert du générateur résultant.



A)..Association mixte des modules.

B)..Caractéristique résultante d'un groupement mixte.

Figure (II-14): (A,B).

## II-8 Rendement maximal d'une cellule PV

Le rendement d'une cellule ou d'un module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie Électrique produite par cette cellule ou module et l'énergie lumineuse reçue sur la surface Correspondante :

$$n [\%] = P \text{ produite [kW]} / P \text{ incidente [kW]}$$

Le rendement réel varie donc continuellement, en fonction notamment de l'énergie solaire Incidente.

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces Caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de 1 000 W/m<sup>2</sup>, température de 25 °C, conditions Spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse Une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par Rapport à l'horizontale).

La puissance crête est définie comme la puissance électrique produite par la cellule (ou un Panneau) lorsqu'elle est soumise aux conditions STC. Cette valeur est utilisée comme Référence pour comparer les panneaux photovoltaïques entre eux.

On obtient alors le rendement par la formule suivante :

$$N_{\text{stc}} [\%] = \text{Puissance crête [W/m}^2\text{]}^* / \text{Puissance du spectre STC [W/m}^2\text{]}$$

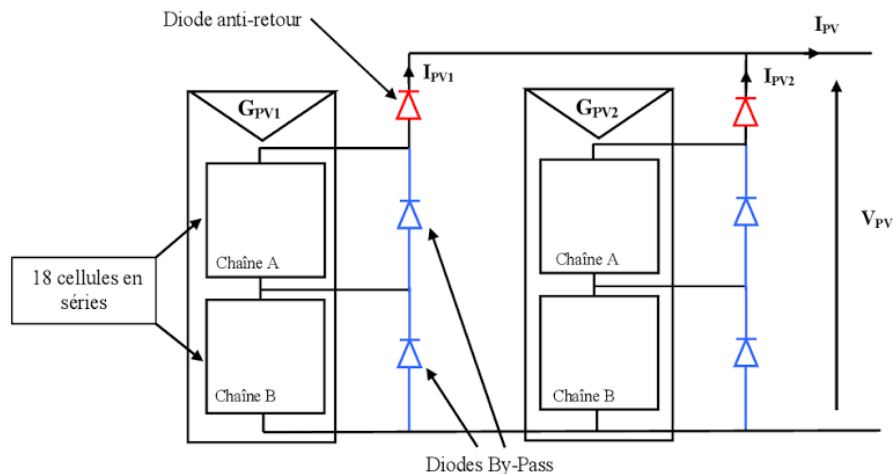
**Avec :**

$$\text{Puissance du spectre STC} = 1\,000 \text{ [W/m}^2\text{]}.$$

## II-9 PROTECTION D'UN GPV :

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 leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexions 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).



**Figure (II-15):** schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes By-pass et diode anti retour

### II-9 -1 Protection par diode anti-retour :

Comme son nom l'indique, cette diode sert à empêcher un ensemble de cellules connectées en série dans une branche d'un générateur PV de recevoir l'énergie électrique provenant d'autres branches mises en parallèle. Elle protège aussi le générateur PV contre le retour de l'énergie stockée dans les batteries lors des conditions atmosphériques défavorables ou durant la nuit.[39]

### II-9 -2 Protection par diode by-pass:

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension direct puisqu'elle devient passante.[39]

## II-10 Avantages et inconvénients d'une installation PV

### Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [19].

**Inconvénient :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

**II-11 Conclusion**

L'énergie solaire est donc transformée 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 comme source d'électricité à travers les cellules photovoltaïques. Les panneaux solaires, constitués d'un grand nombre de ces cellules, permettent d'utiliser l'effet photovoltaïque dans la vie courante. Même si cette source est très abondante, nous avons vu que l'énergie solaire photovoltaïque ne pouvait

véritablement être utilisée comme énergie principale à cause des faibles rendements des cellules.

Malgré tout, certains domaines d'applications semblent plus adaptés au photovoltaïque comme le spatial, les lieux isolés, les télécommunications, la « petite » électronique, nécessitant peu de puissance.

Le photovoltaïque pourrait devenir l'énergie du futur si, d'une part son coût de production diminue car, pour l'instant, seule une minorité de gens peuvent se procurer ces systèmes; et si d'autre part le rendement des cellules augmentait.

Le photovoltaïque serait alors une énergie propre, économique et surtout rentable. Nous pouvons alors nous demander dans quelles mesures les énergies renouvelables peuvent-elles remplacer les énergies fossiles.



**Chapitre III :**  
**MODELISATION ET**  
**SIMULATION D'UN**  
**PANNEAU PV**

### III-1 Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'une cellule photovoltaïque est constituée essentiellement d'une jonction PN.

Lorsque qu'elle est exposée au rayonnement solaire dont l'énergie est supérieure au gap, les électrons des couches de valence sont décrochés et créent une tension continue, la cellule fonctionne alors en générateur.

Dans ce chapitre, nous allons établir le modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque et le simuler, afin de tracer les caractéristique courant-tension et puissance- tension de sortie.

Dans le but d'améliorer le fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV), autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge quelque soient les comportements aléatoires de la source (GPV) et de la charge.

On utilisera une technique de recherche du point de puissance maximal dite MPPT.

### III-2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

#### III-2-1 modèle mathématique :

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{pv}$  proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule [20], ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors.

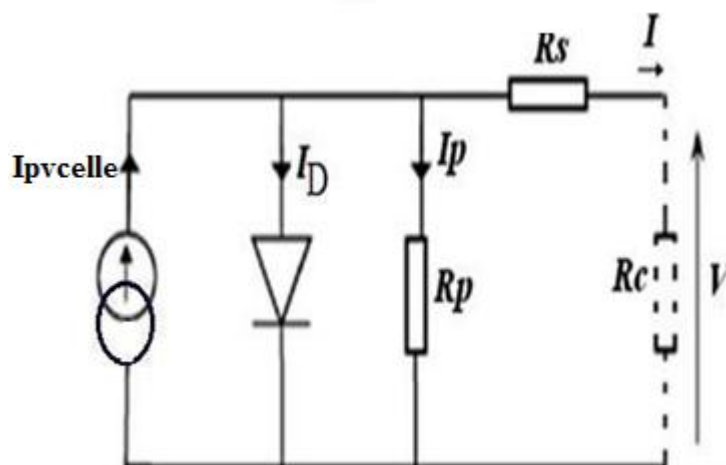


Figure (III-1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

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

Où :

$I_{pv\text{celle}} = a_1 \cdot w$ . Photo courant (A).

Avec :  $a_1 = 2.5 \cdot 10^{-7} T + 2 \cdot 10^4$  [en A/ (w/m<sup>2</sup>)]

$$I_d = I_{stacelle} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad \text{III.2}$$

Avec :

$I = I_{pv\text{celle}} - I_D$

$V_T = K T / q$  : la potentielle thermodynamique à une température donnée.

$I_D$  : le courant d'une jonction PN (A).

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

$R_s$  : résistance série ( $\Omega$ ).

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

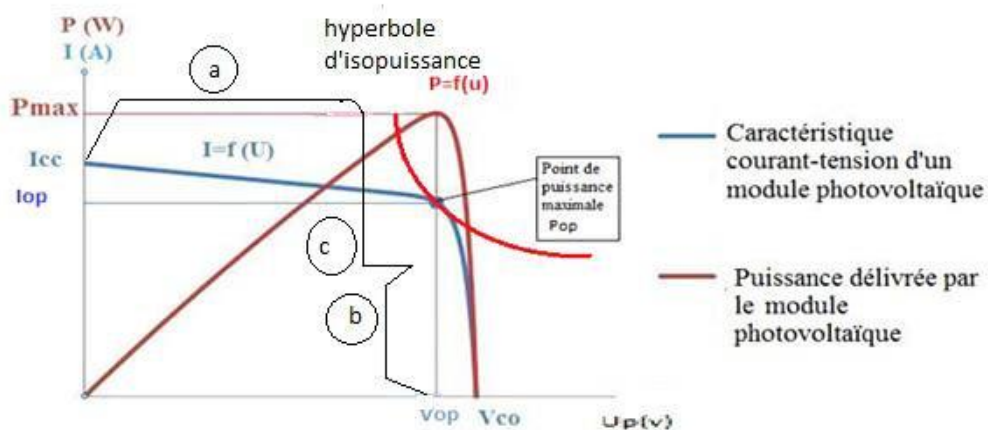
$K$  : la constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-3}$  (j / °k)).

$q$  : la charge de l'électron ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  (c)).

$T$  : la température de la cellule (°k).

$a$  : le facteur d'idéalité ( $1 \leq a \leq 2$  ,  $a = 2$  pour une diode en silicium).

Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule réelle, en particulier les caractéristiques courant-tension  $I = f(V)$  comme le montre **Figure (III-2)**.



**Figure (III-2) :** Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle.



Quatre données essentielles permettent de déterminer la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque :

- le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$ .
- la tension à vide noté  $V_{co}$ .
- le courant de puissance maximale noté  $I_{op}$ .
- la tension de puissance maximale noté  $V_{op}$ .

- Le courant de puissance maximale et la tension de puissance maximale sont définis tels que le produit  $I_{op} \cdot V_{op}$  est maximale.

- La valeur des 4 paramètres ci-dessous sont dépendants de l'éclairement et de la température de module.

**La Figure (III-2)** montre que la caractéristique  $I=f(u)$  se divise en 3 parties [21].

**1- La zone (a):** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le Générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**2- La zone (b):** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension Presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

**3- La zone (c):** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les Deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point Optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant  $I_{pv}$  [22].

Enfin les deux résistances modélisent les pertes internes :

- $R_s$  (résistance série) : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- $R_p$  (résistance parallèle) : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Idéalement, on peut négliger  $R_s$  et  $I$  devant  $V$ , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad \text{III.3}$$

Comme la résistance parallèle est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans  $R_p$ , On obtient :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad \text{III.4}$$

Le schéma équivalent de la figure correspondant est celui de la cellule idéale :

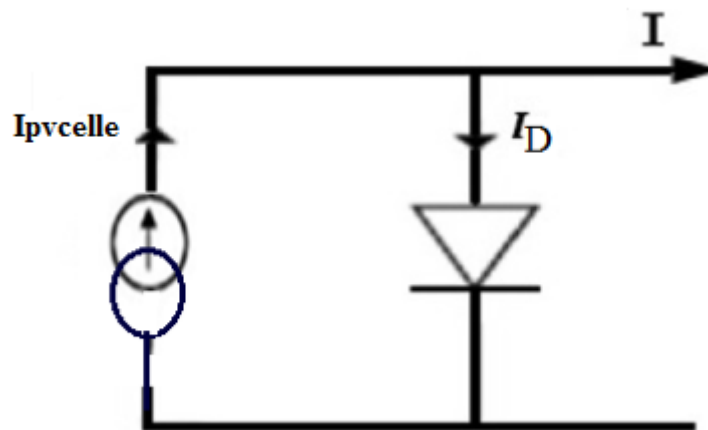


Figure (III-3) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal.

### III-2-2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

Une fois que l'on a caractérisée la cellule photovoltaïque, on modélise le module comme une association de NS cellules en série, NP cellule en parallèles en supposant qu'elles sont identiques .le courant de court-circuit du module se multiplie par NP, tandis que la tension à circuit ouvert du module se multiplie par NS.

La caractéristique d'un module qui comporte NS cellules connectées en série et en NP cellules connectées en parallèle est donnée par :

$$I = I_{pvcelle} - I_{satcelle} \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{a \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad \text{III.5}$$

Avec :  $I_{pv} = I_{pvcelle} * NP$  et  $I_{sat} = I_{satcelle} * NP$

Et  $V_T = NskT / q$  : la potentielle thermodynamique d'un panneau photovoltaïque.

Les équations du modèle sont présentées en détails et le modèle est validé avec les données expérimentales.

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

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_I \Delta T) G / G_n \quad \text{III.6}$$

$$\text{Avec : } I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn}$$

**I<sub>pv n</sub>** : est le courant généré par la lumière à la valeur nominale. (Généralement de 25°C et 1000<sub>w</sub> /m<sup>2</sup>),

**ΔT = T - T<sub>n</sub>** : (T et T<sub>n</sub> étant la température réelle et nominale [K]),

**G [w/m<sup>2</sup>]** : est l'irradiation sur la surface du dispositif,

**G<sub>n</sub>** : est l'irradiation nominale. [23][24][25]

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

$$I_{cc} = (I_{ccn} + kI\Delta T) G/G_n$$

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

Le courant de saturation  $I_{sat}$  de diode et de sa dépendance sur la température peut être exprimée par : [20][24][25]

$$I_{sat} = I_{satn} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left(\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad \text{III.7}$$

Avec :

$$I_{satn} = \frac{I_{ccn}}{\exp\left(\frac{V_{ccn}}{aVT_n}\right) - 1} \quad \text{III.8}$$

**E<sub>g</sub>** : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur ( $E_g \approx 1,12$  eV pour le silicium à 25°C)

**I<sub>sat,n</sub>** : le courant de saturation nominale.

**V<sub>T,n</sub>** : la tension thermique à la température nominale. [24][26]

Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente peut être amélioré si l'équation (III.7) est remplacé par :

$$I_{sat} = \frac{I_{ccn} + K_i\Delta T}{\exp\left(\frac{V_{ccn} + K_v\Delta T}{aVT}\right) - 1} \quad \text{III.9}$$

L'équation (III.10) peut être introduite dans le modèle :

$$I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn} \quad \text{III.10}$$

La relation entre **R<sub>s</sub>** et **R<sub>p</sub>**, les seules inconnues de l'équation (III.10), peut être trouvée en faisant :

**P<sub>max, m</sub> = P<sub>max, e</sub>** et la résolution de l'équation résultante pour **R<sub>s</sub>**, comme (III.16) et (III.27) montrent :

$$P_{max, m} = P_{max, e} = V_{mp} \cdot I_{mp}$$

Où : **P<sub>maxm</sub>** : la puissance maximale mesurée.

**P<sub>maxe</sub>** : la puissance maximale expérimentale.

$$P_{\max m} = V_{mp} \left( I_{pv} - I_{sat} \left( \frac{q}{KT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a \cdot N_s} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right) = P_{\max} \quad \text{III.11}$$

$$R_p = \frac{V_{mp}(V_{mp} + I_{mp})}{V_{mp} I_{mp} - V_{mp} I_{mp} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a \cdot N_s} \frac{q}{KT}\right) + V_{mp} I_{sat} - P_{\max}} \quad \text{III.12}$$

Les valeurs initiales de  $R_p$  et  $R_s$  peut être proposée par :

$$R_{pmin} = \frac{V_{mp}}{I_{ccn} - I_{mp}} - \frac{(V_{ccn} - V_{mp})}{I_{mp}} \quad \text{III.13}$$

Avec:

$$R_{smax} = \frac{(V_{ccn} - V_{mp})}{I_{mp}}$$

La résistance série ( $R_s$ ) du module PV a un grand impact sur la pente de la courbe I-V, par Conséquence la valeur de  $R_s$  est calculée en évaluant la pente  $dI / dV$  de la courbe I-V au point  $V_{cc}$  [27].

D'après l'équation (III.8), la valeur de  $R_s$  est évaluée de la façon suivante :

$$dI = 0 - I_{sat} * q \left( \frac{dV + R_s * dI}{aKT} \right) * \exp\left(q \left( \frac{V + IR_s}{aKt} \right)\right) \quad \text{III.14}$$

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{aKT/q}{I_{sat} * \exp\left(q \left( \frac{V + IR_s}{aKt} \right)\right)} \quad \text{III.15}$$

Alors, d'après l'équation (III.15), la valeur de  $R_s$  est estimée en fonction de  $V_{CC} = V$ .

$$R_s = \frac{dV}{dI} |_{V_{CC}} - \frac{aKt/q}{I_{sat} * \exp\left(\frac{qV_{CC}}{aKt}\right)} \quad \text{III.16}$$

### III-2-3 Résolution de l'équation $I=f(V)$ :

Finalement après la détermination des différents paramètres du circuit équivalent, il est possible de résoudre l'équation de la caractéristique  $I(V)$ , donc on peut résoudre numériquement pour un éclairage donné et une température de module, l'ensemble des paramètres inconnus qui sont ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$ ), puis les autres variables inconnues dans l'équation  $I(V)$  originale sont  $I$  et  $V$  du module.[28]

Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des itérations simples, la méthode du Newton est choisie pour la convergence rapide de la réponse. [27]

La méthode de Newton est décrite par la formule suivante

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Ou :  $f(X_n)$  est le dérivé de la fonction(x).

$X_n$  : la valeur de l'itération n.

$X_{n+1}$  : la valeur de l'itération n+1.

Par conséquent, l'équation (III.4) devient :

$$f(I) = I_{pv} - I - I_{sat} \left( \exp \left( q \left( \frac{V + IR_s}{aKT} \right) \right) \right) \quad \text{III.17}$$

La substitution de cette équation dans la formule de Newton, donne l'équation (III.18) et le courant de sortie I est calculé itérativement :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{pv} - I_n - I_{sat} \left( \exp \left( q \left( \frac{V + I_n R_s}{aKT} \right) \right) - 1 \right)}{-1 - I_{sat} \left( \frac{qR_s}{aKT} \right) \exp \left( q \left( \frac{V + I_n R_s}{aKT} \right) \right)} \quad \text{III.18}$$

### III-3 Optimisation des générateurs PV:

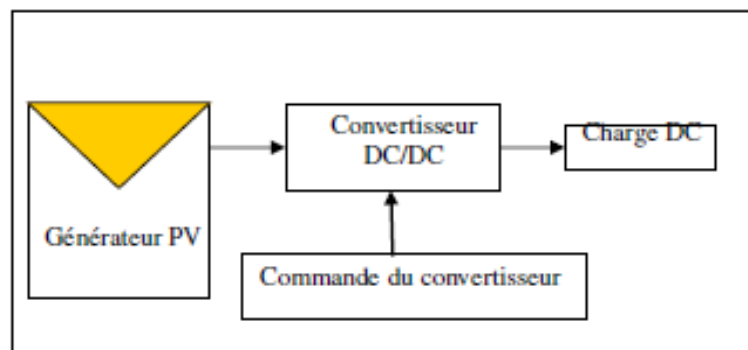
Le raccordement d'un générateur PV à une charge quelconque nécessite l'adaptation de ce générateur PV pour qu'il fonctionne, à une température et un éclairage donnés, à sa puissance maximale et par conséquent à un rendement élevé. Ceci est réalisé en intercalant entre le générateur PV et la charge un convertisseur DC-DC (Hacheur). [27]

#### III-3-1 Schéma synoptique du système PV adapté :

Sur La **Figure (III-4)** est représenté le schéma synoptique de l'adaptation DC-DC du générateur PV [29],[30] et à une charge résistive. L'ensemble est constitué :

- D'un générateur PV. Dans notre cas c'est le panneau de type **Helios USA 9T6 400**.

- D'un quadripôle constitué d'un convertisseur d'énergie de type survolteur ou survolteur pour des applications inférieures à 205,6 V,[30][31][32] Ce convertisseur d'énergie se compose des condensateurs, des inductances, et des interrupteurs. Tous ces dispositifs idéalement ne consomment aucune puissance, qui est la raison des hauts rendements de ces convertisseurs. L'interrupteur est réalisé par un dispositif à semi-conducteur en commutation. On utilise habituellement un transistor IGBT de faible temps de commutation pour minimiser les pertes de puissance IGBT. [33]
- D'une commande du convertisseur générant un signal carré, de fréquence bien déterminée et de rapport cyclique à variable, permettant la commande de l'interrupteur du convertisseur. Ce signal de commande est issu d'un circuit qui est, en général, une commande de type "MPPT" (Maximum Power Point Tracking)[34][32][35], dont le rôle essentiel est de poursuivre le point de puissance maximale (PPM) du générateur PV quelles que soient les conditions météorologiques et les variations de la charge.



**Figure (III-4) :** Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur).

### III-3-2 Les différentes commandes de MPPT :

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la Recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont Communément appelées respectivement **Hill Climbing**, **perturb & Observ (P&O)** et **l'incrément de conductance (IncCond)** .[3] dans notre cas on a utilisé la méthode **P&O**

### III-3-3 Méthode perturbation et observation :

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre La **Figure (III-5)**, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM ; si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système à dépasser le PPM .

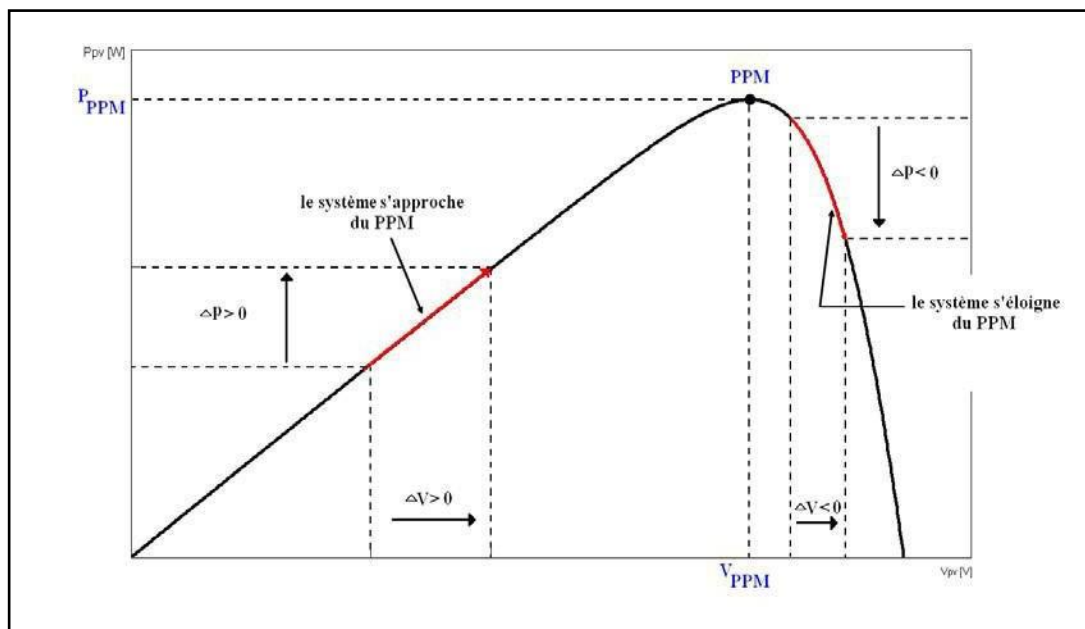


Figure (III-5) : Principe de la commande P&O.

### III-4 Adaptation et optimisation des générateurs PV:

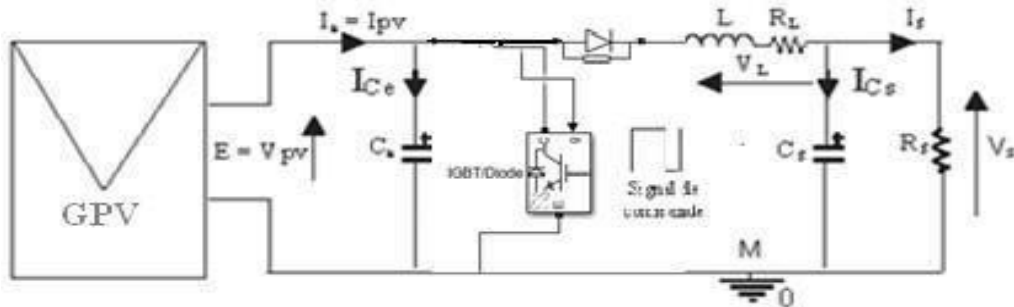
Le raccordement d'un générateur PV à une charge quelconque nécessite l'adaptation de ce générateur PV pour qu'il fonctionne, à une température et un éclairage donnés, à sa puissance maximale [30] et par conséquent à un rendement élevé. Ceci est réalisé en Intercalant entre le générateur PV et la charge 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.

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



### III-4-1 Adaptation par le convertisseur DC-DC :

Sur La **Figure (III-6)** nous avons représenté un système PV dont l'adaptation entre le générateur et la charge résistive  $R_s$  est réalisée par convertisseur DC-DC survolteur(BOOST).



**Figure (III-6) :** Système PV forme par un générateur PV, convertisseur survolteur, et une charge ( $R_s$ ) l'intercepteur IGBT et contrôler par un signal de période  $T$  et de rapport cyclique.

$$V_s = \frac{V_{pv}}{1-\alpha} \quad \text{III.19}$$

$$I_s = (1-\alpha)I_{pv} \quad \text{III.20}$$

A partir des équations [30][31], nous pouvons déduire la résistance à la sortie du panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $\alpha$  et  $R_s$  :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = (1-\alpha)^2 R_s \quad \text{III.21}$$

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

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \quad \text{III.22}$$

Puisque le rapport  $\alpha$  est inférieur 1 ( $\alpha < 1$ ), le convertisseur ne joue le rôle d'un survolteur que si la charge  $R_s$  remplit la condition suivante.

$$R_s > R_{pv} \quad \text{III.23}$$

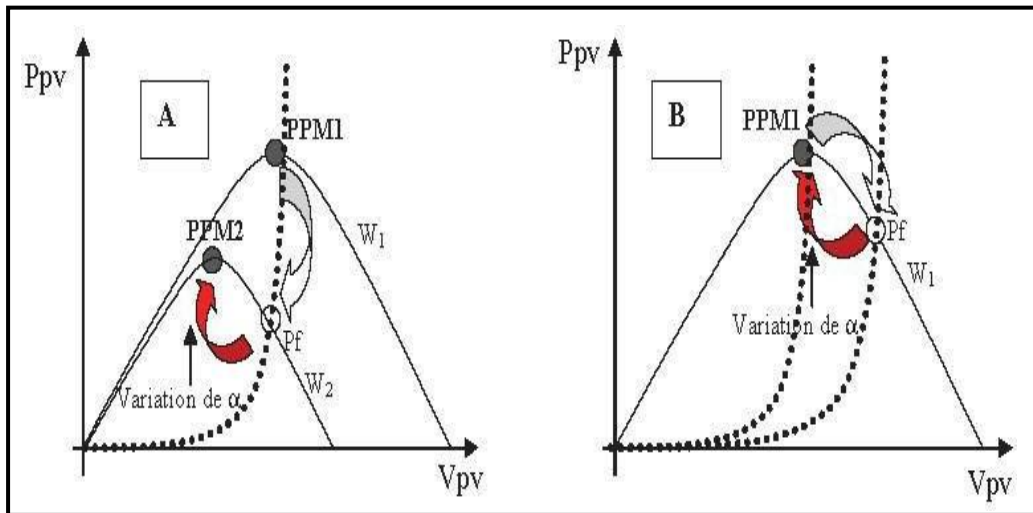
Dans les conditions optimale et pour une charge  $R_s$  donnée, la résistance interne du panneau ( $R_{pv} = R_{opt}$ ) et le rapport cyclique ( $\alpha = \alpha_{opt}$ ) obéissent donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1-\alpha_{opt})^2 R_s \quad \text{III.24}$$

La relation (III.24) montre que, pour une puissance incidente  $W$  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 sure La **Figure (III-7)** pour une puissance incidente  $W_1$  ,la puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique  $\alpha_{1opt}$  (point PPM<sub>1</sub>).si la puissance incidente change ( $W_2$ ), alors ce point de puissance maximale est le point PPM<sub>2</sub> et le point de fonctionnement du générateur PV est le point Pf **Figure (III-7)** A pour converger vers le nouveau point PPM<sub>2</sub>, il faut ajuster le rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur  $\alpha_{2opt}$  .il en sera de même que lorsque la charge  $R_s$  change.

**Figure (III-7)** B le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM<sub>1</sub>) ; pour converger vers ce PPM<sub>1</sub> 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.



**Figure (III-7):** fluctuation du point de puissance maximale avec l'intensité d'éclairement et la charge  $R_{ch}$

A : variation de l'éclairement et B ; variation de la charge

$W_1, W_2$  : puissance de l'éclairement, Pf : point de fonctionnement de générateur PV

(—) puissance à la sortie du générateur PV

(- - -) 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 PV ( $R_{opt}$ ) est indispensable afin de choisir la valeur de la charge adéquate.

### III-4 Simulation :

#### III-4-1 Sans commande MPPT :

La stratégie de modeler un module PV n'est aucun différent de modeler une cellule PV.

Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension qui va changer (la tension du circuit ouvert) est différente et doit être par le nombre de cellules.

A l'aide du logiciel **MATLAB** on simule un panneau photovoltaïque des différents effets sur la caractéristique  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  telle que, l'influence d'irradiation, température.

Pour effectuer nos simulations on a utilisé le panneau **Helios USA 9T6 400** dont les caractéristiques sont regroupées.

Les paramètres	Symbole	Unité
Nominal open-circuit voltage [V]	$V_{0cn}$	59.8 V
Nominal short-circuit current [A]	$I_{scn}$	8.82 A
voltage maximum power point [V]	$V_{mp}$	48.43 V
current maximum power point [A]	$I_{mp}$	8.26 A
Puissance maximale	$P_{max}$	400 W
Number of series cells	$N_s$	96
Nombre of cells parallèle	$N_p$	1
Current/temperature coefficient [A/K]	$K_i$	0.088005
Voltage/temperature coefficient [V/K]	$K_v$	-0.364
Facteur d'idéalité	$A$	1.0137

Tableau III.1: Caractéristiques électriques du module.

Le schéma du système de simulation est donné par Figure (III-8).

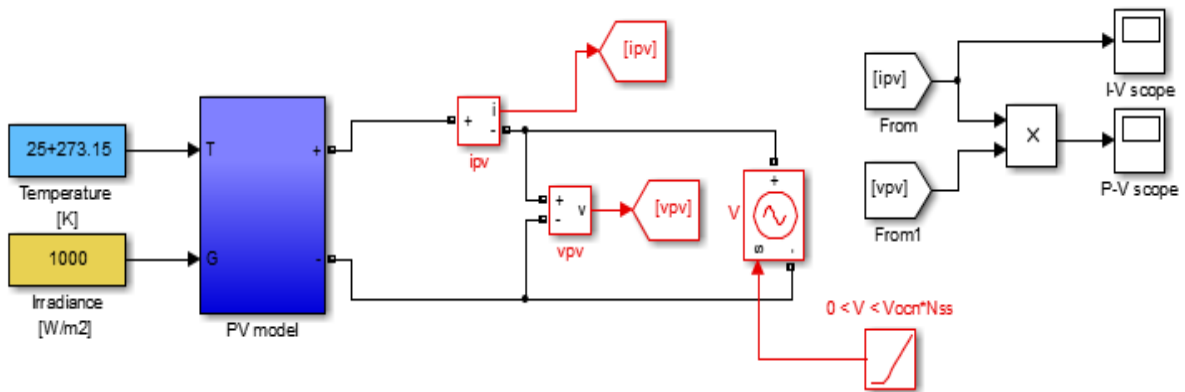


Figure (III-8): Schéma de bloc d'un générateur PV

**caractéristique (  $I_{pv} = f(V_{pv})$  ) :**

A température et éclairage constants, et particulièrement aux conditions standards de test ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), la caractéristique ( $I_{pv} = f(V_{pv})$ ) est donnée par la Figure (III-9).

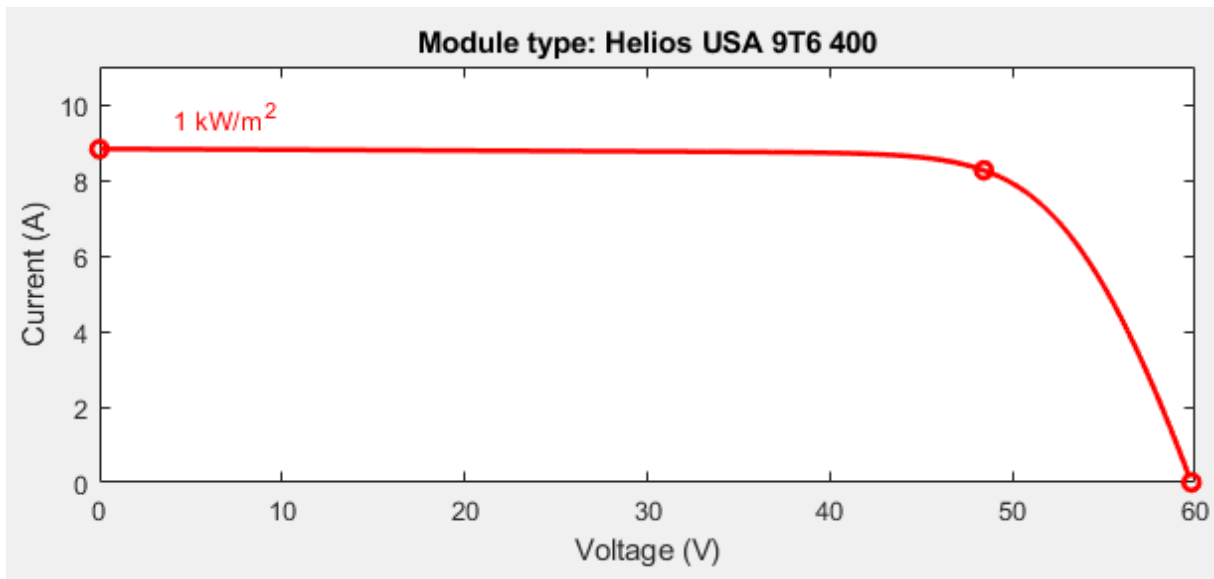
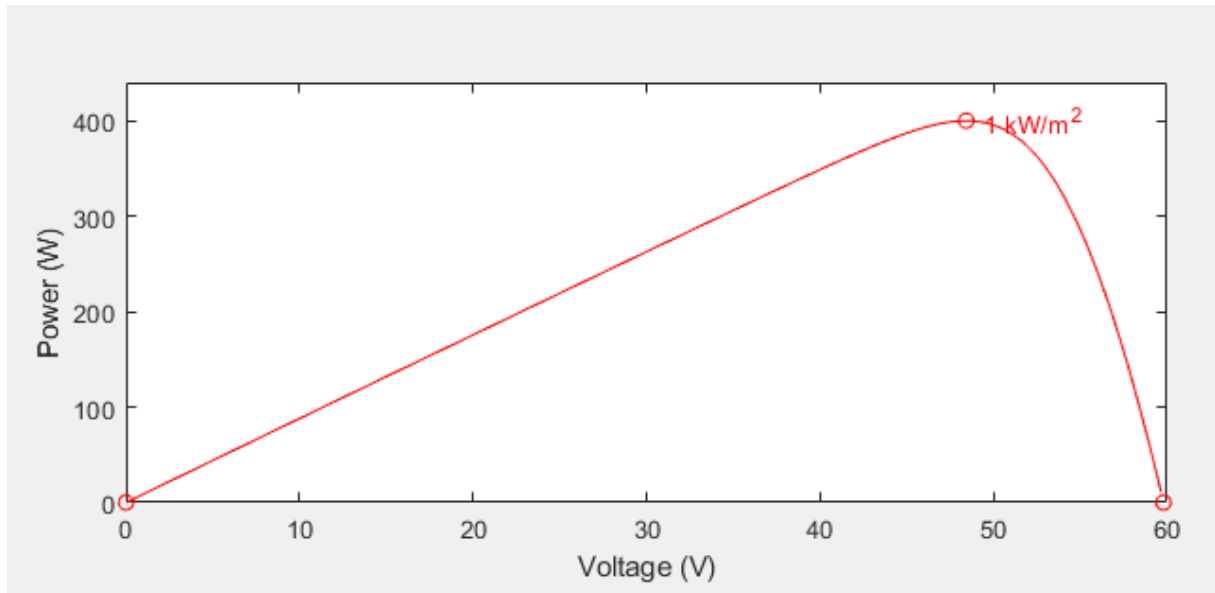


Figure (III-9): caractéristique  $I=f(v)$  d'un panneau solaire.

**✚ caractéristique (  $P_{pv} = f(V_{pv})$  ) :**

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards de test ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), la caractéristique (  $P_{pv} = f(V_{pv})$ ) est donnée par la Figure (III-10).



**Figure (III-10):** caractéristique  $P=f(v)$  d'un panneau solaire.

**III-4-1-1 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable :**

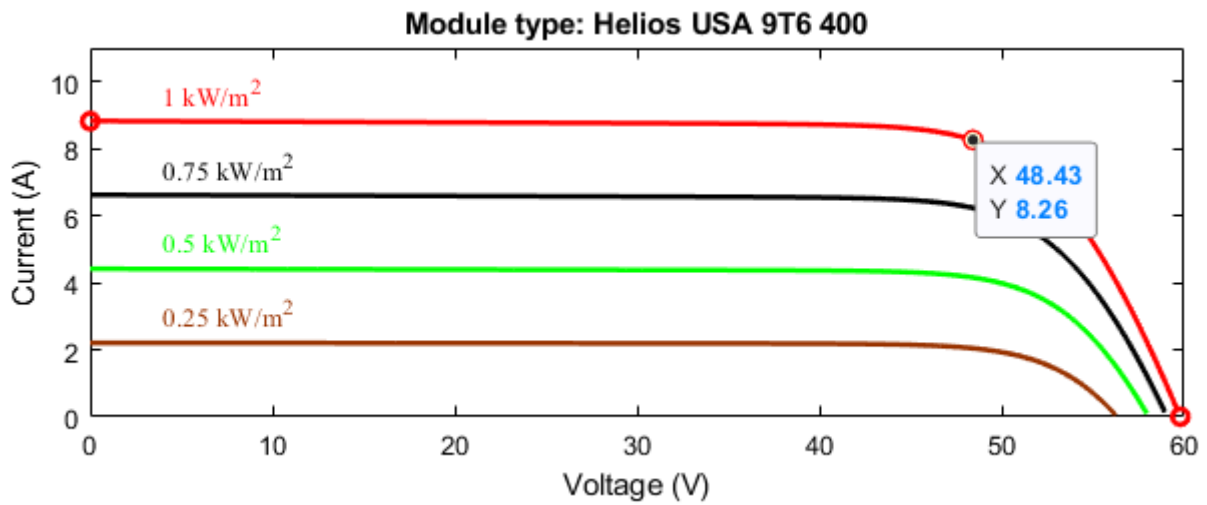
Afin de constater l'influence des conditions externes, de l'éclairement et la température ( $G,T$ ) sur les caractéristiques ( $I_{pv}-V_{pv}$ ,  $P_{pv}-V_{pv}$ ) nous avons adopté la méthode suivants :

-Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ( $T=25^\circ\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

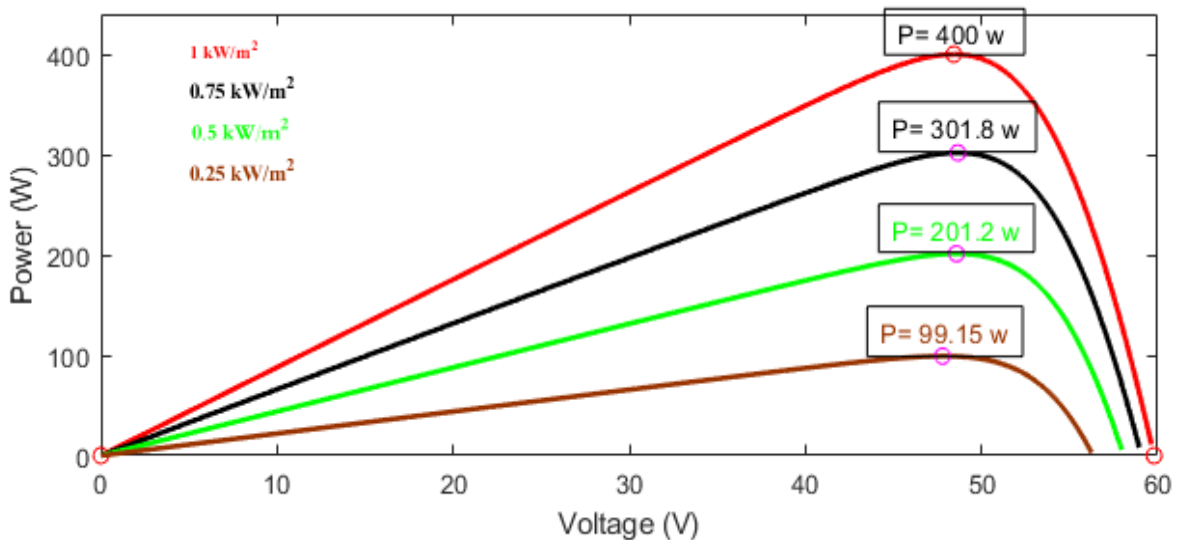
-Pour un éclairement constante ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ), nous ferons varier température afin de voir l'influence de celle-ci par rapport aux caractéristiques génératrices photovoltaïques.

**✚ L'influence de l'éclairement**

En faisant varier l'éclairement ( $G$ ) entre 250 et 1000 avec un pas de 250 , les caractéristiques [ $I_{pv}=f(V_{pv}),P_{pv}=f(V_{pv})$ ] sont données par les Figure (III-11).A,B



**Figure (III-11-A) :** caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes irradiances solaires à température constante égale à  $25^\circ\text{C}$ .



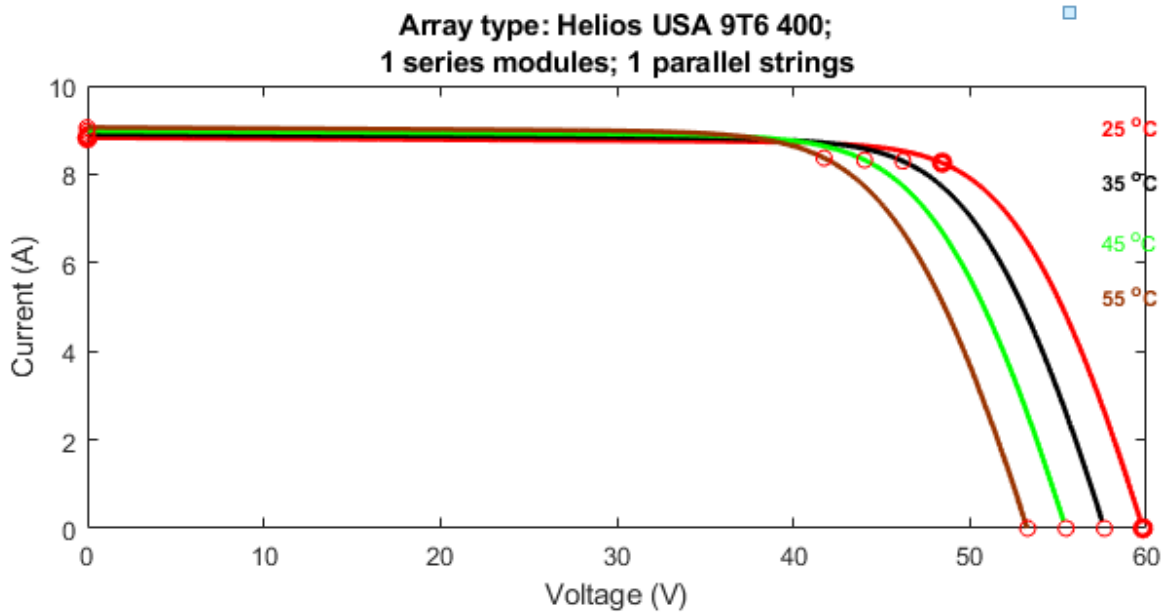
**Figure (III-11-B) :** caractéristique  $P=f(V)$  d'un panneau solaire pour différents éclairagements solaires à température constante égale à  $25^\circ\text{C}$ .

Pour la Figure (III-11-A) on remarque que pour l'éclairement  $G=1000 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=8.82 \text{ A}$  et pour  $G=750 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=6.65 \text{ A}$  on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

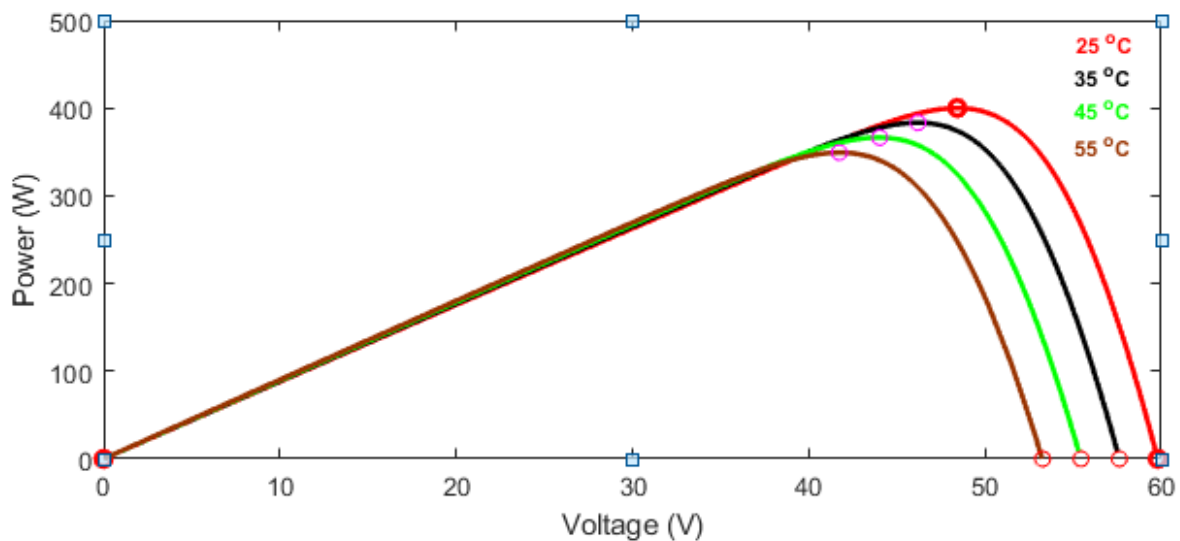


**L'influence de la température**

On faisant varier la température ambiante (T) entre (25°C et 55°C) avec un pas de 10°C, L'influence de celle-ci sur les caractéristique [ $I_{pv}=f(V_{pv}), P_{pv}=f(V_{pv})$ ] sont données par les Figure (III-12).A,B



**Figure (III-12-A) :** caractéristique  $I=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal à 1000 w/m2.



**Figure (III-12-B) :** caractéristique  $P=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal 1000 w/m2.

Pour la Figure (III-12-A) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente Figure (III-12-B) .

### III-4-2 Avec commande MPPT :

Le schéma du système de simulation est donné par Figure (III-13).

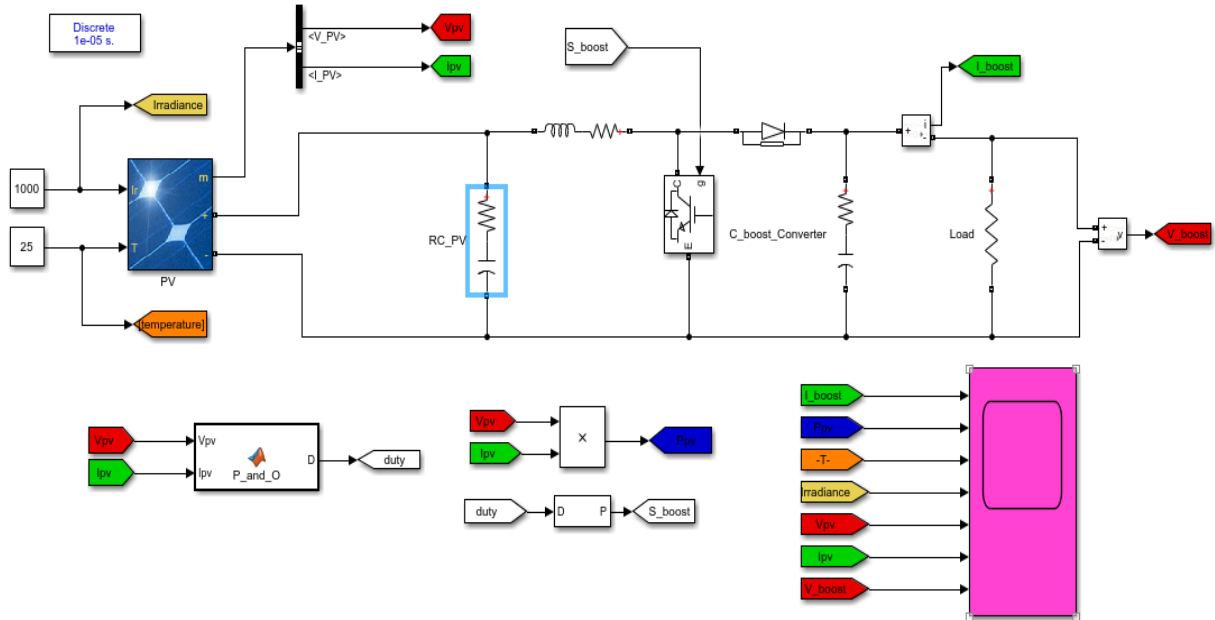


Figure (III-13) : Schéma de bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT.

#### III-4-2-1 Influence d'irradiation :

Lorsque l'irradiation change, on a simulé les grandeurs électriques du système PV pour  $W=1000\text{w/m}^2$ ,  $W= 500\text{w/m}^2$ ,  $W = 250\text{w/m}^2$ , comme le montre dans la Figure (III-14).

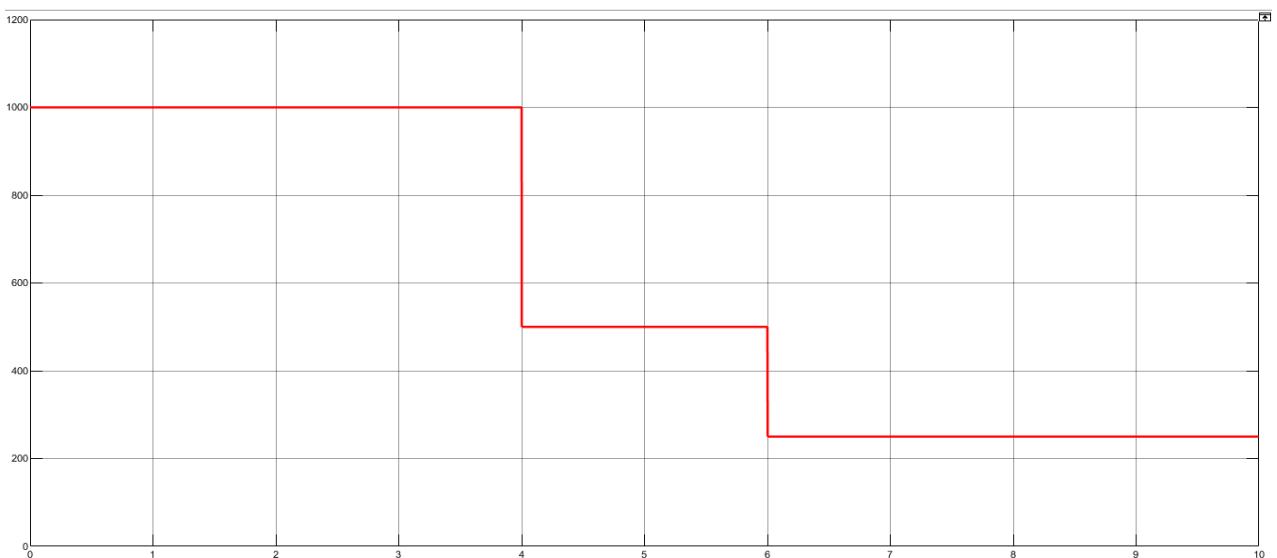
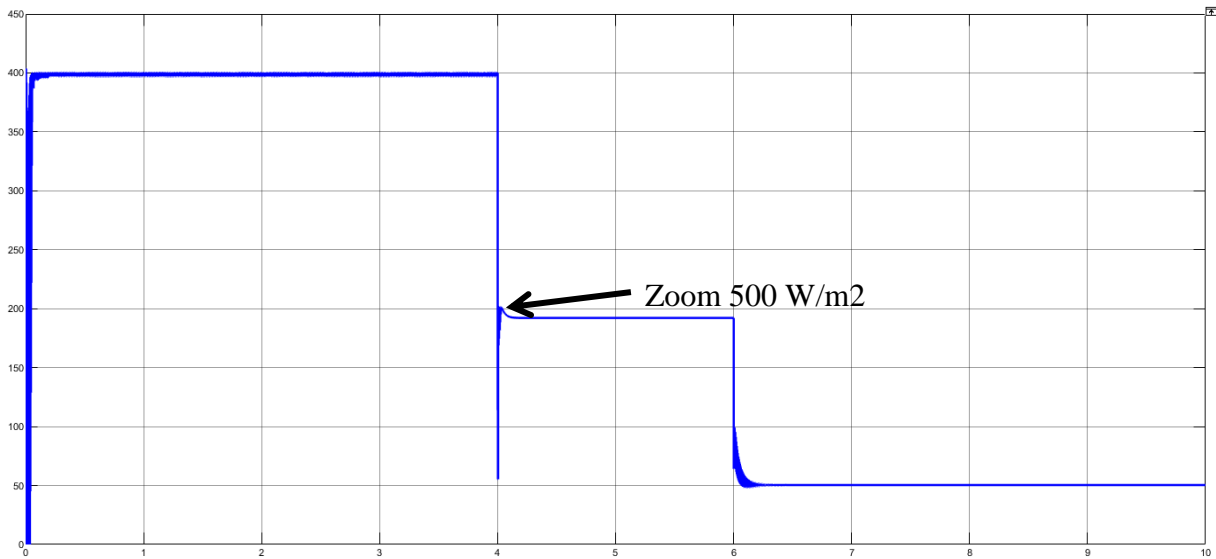
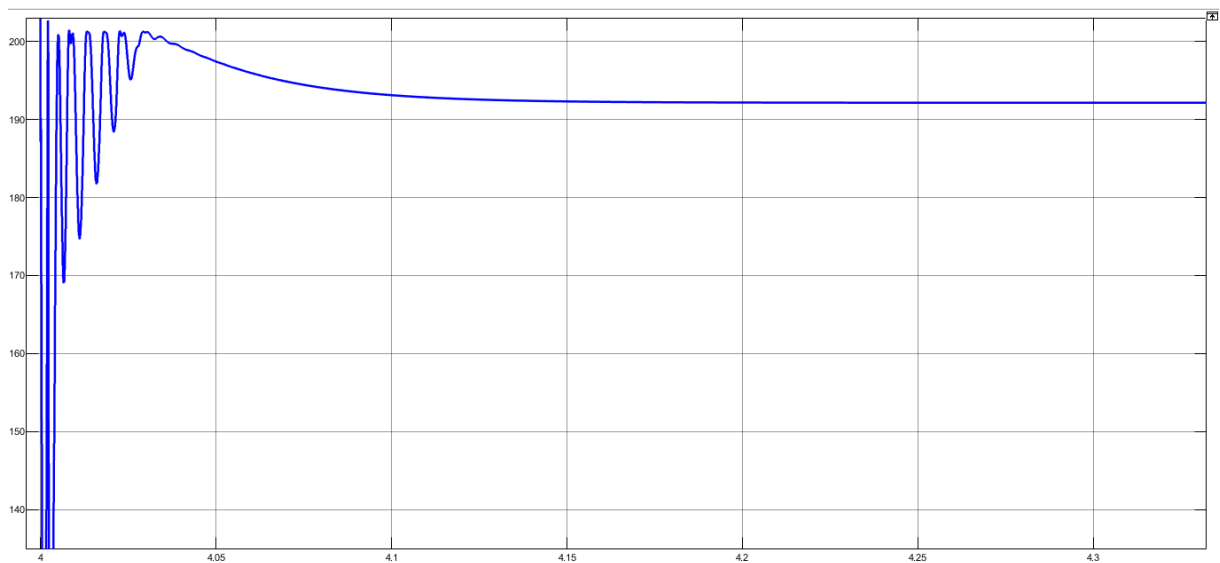


Figure (III-14) : Variation de la puissance incidente de l'éclairage en fonction du temps.

**III-4-2-2 Influence du changement d'éclairement à l'entrée a la sortie d'un Boost du panneau PV muni de la commande MPPT :**



**Figure (III-15) :** puissance à la sortie du panneau changement d'éclairement ( $W/m^2$ ).



**Figure (III-16) :** Zoom puissance à la sortie du panneau éclairement  $500 W/m^2$ .

Les résultats de simulation montre que la commande MPPT assure la poursuite de point de puissance maximal lors de la variations des conditions météorologique (l'éclairement température et de la charge),

### III-5 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 croit, 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.

Pour remédier à ce problème la caractéristique  $P=f(V)$  comporte un point de puissance maximal (PPM).le raccordement direct du générateur PV ne permet de transmettre une puissance maximal que dans des conditions restreint c'est l'inconvénient majeur des Générateurs PV.

Les résultats de simulation montrent que la commande MPPT assure la poursuite du point de puissance maximale lors de la variation des conditions météorologiques (l'éclairement, température) et de la charge.



**Chapitre IV :**  
**ALIMENTATION D'UNE**  
**CHARGE RL PAR UN**  
**GÉNÉRATEUR PV**

### IV-1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'alimentation d'une charge de nature alternative à partir d'un panneau photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque étant une source continue, l'utilisation d'un convertisseur continu alternatif est nécessaire, cependant lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la charge.

On doit donc améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par la commande de l'onduleur.

### IV-2 Présentation de la structure du système photovoltaïque:

Le modèle global du système photovoltaïque représenté par la figure III.1 est constitué de :

- **Générateur PV** : Formé de panneaux PV étudiés au chapitre II.
- **Convertisseurs continu-alternatif** :

Ils sont relativement peu nombreux ; ils se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phase de la source alternatif.

- Si l'étage continu vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continus alternatifs associés sont des onduleurs de courant.
- Si l'étage continu vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continus alternatifs associés sont des onduleurs de tension.

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases, mais dans les applications de grande puissance, le nombre de phase peut être plus élevé (12, 24) par transformation de ce nombre. [23]

- **La charge** : Nous avons choisi sur la cote alternative (AC) une charge équilibrée (RL).

#### IV-2-1 Notions sur les onduleurs:

Dans le monde industriel, les entraînements électriques exigent de plus en plus des vitesses variables, à cet effet, le progrès de l'électronique de puissance a permis de développer plusieurs moyens qui assurent des entraînements alternatifs à vitesse variable. Parmi ces moyens, citons les onduleurs autonomes commandés en modulations de largeurs d'impulsion (MLI).

### IV-3 Classification des onduleurs:

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome. Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance » . [23]

#### IV-3-1 Onduleurs non-autonome:

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

#### IV-3-2 Onduleur autonome:

Un onduleur autonome est un convertisseur statique Assurant la conversion continu alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Un onduleur autonome dépende essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre les quels il est monté cela conduit à distinguer:

- Les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.

##### IV-3-2-1 Les Onduleurs de tension:

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension «  $u$  » n'est pas affecté par les variations du courant «  $i$  » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie «  $i'$  » et donc le courant à l'entrée «  $i$  » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

##### IV-3-2-2 Les onduleurs de courants :

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est –à – dire par une source d'inductance interne si grande que le courant «  $i$  » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension «  $u$  » à ses bornes. [36]



## IV-4 Types d'onduleurs autonomes de tension :

### IV-4-1 Les onduleurs monophasés :

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

- l'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur pushpull. L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi-point. Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont. [37]

### IV-4-2 Les onduleurs triphasés:

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs Figure (IV -1). Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode .la source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif, les interrupteurs  $K_1, K'1$  et  $K_2, K'2, K_3$  et  $K'3$  doivent être complémentaires deux à deux. [36]

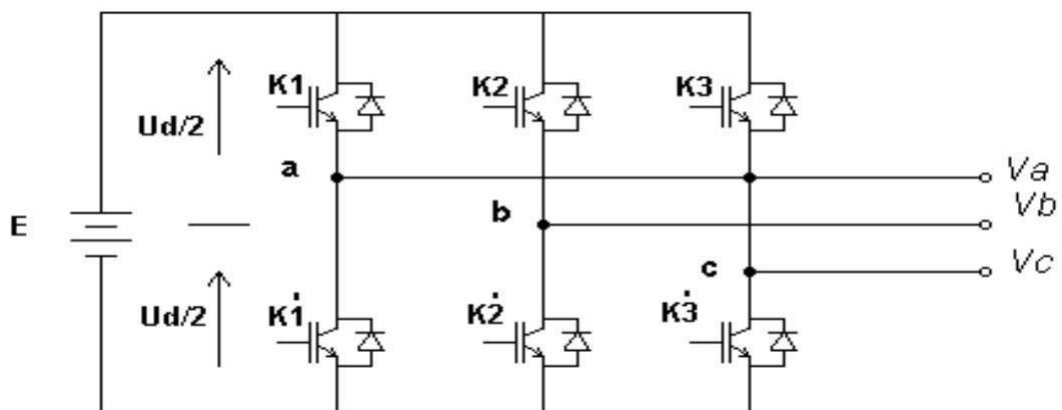


Figure (IV-1) : Onduleur de tension triphasé.

### IV-4-3 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé :

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la figure (IV.1). Pour assurer la continuité des courants de sortie alternative les interrupteurs  $K_1$  et  $K'1, K_2,$  et  $K'2, K_3$  et  $K'3$  doivent être complémentaires deux à deux, et pour que les tensions de sortie  $V_{aa}$ , soient identiques à un tiers de la période  $T$  de leur fondamental prés, il faut commander chaque demi pont avec un retard de  $T/3$  sur le précédent.

En commande pleine onde on ferme donc :

- $K_1$  pour  $wt=0$  ;  $K'1$  pour  $wt = \pi$
- $K_2$  pour  $wt=2 \pi/3$  ;  $K'2$  pour  $wt = \pi+2 \pi/3$
- $K_3$  pour  $wt=4 \pi/3$  ;  $K'3$  pour  $wt= \pi+4 \pi/3$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre «N» et le point milieu «0» de la source. Donc supprimer celui-ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit Figure (IV -2).

#### IV-4-4 Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la Figure (IV -2). On doit distinguer d'une part les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{pv}$ , d'autre part, il y a les tensions de phases  $V_{An}$ ,  $V_{Bn}$  et  $V_{Cn}$  mesurées par rapport à un point neutre flottant représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  et  $V_{CA}$ . [27]

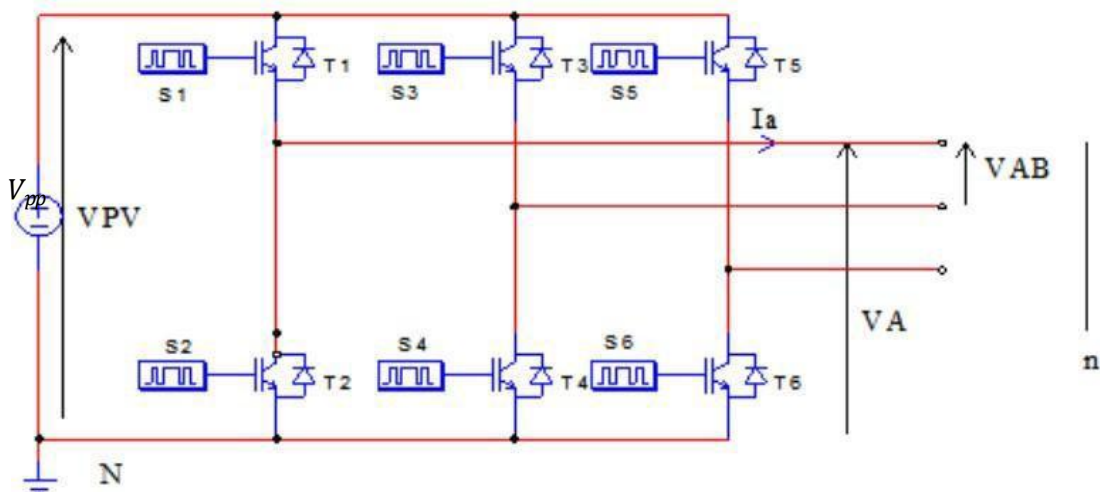


Figure (IV-2) : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.

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 mesurée par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit [38] :

Où S1, S2 et S3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Et ;  $V_{dc}$  est la borne négative de la tension continue.

$$\begin{aligned}
 V_{AN} &= S1.V_{pv} \\
 V_{AN} &= S2.V_{pv} \\
 V_{AN} &= S3.V_{pv}
 \end{aligned}
 \tag{IV.1}$$

➤ Les tensions composées sont :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S1 - S2) V_{pv} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S2 - S3) V_{pv} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S3 - S1) V_{pv} \end{aligned} \quad (IV.2)$$

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

➤ Les tensions simples sont :

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

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{pv}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

#### IV-5 Types de commandes:

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique (adjacente), Décalée (disjointe), MLI). les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie. et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

##### a) Commande plein onde :

Deux transistors d'un même bras sont commandés à 180° de décalage. Les transistors de deux bras voisins sont commandés à 120° de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont E, 0 ou -E volts, la durée d'un niveau non nul étant de 120° par alternance. [36]

##### b) Commande décalée :

Dans le schéma de la Figure (IV -2), des signaux de commande complémentaires sont envoyés aux transistors T1 et T2. On envoie aussi aux transistors T3 et T4 des signaux de commande complémentaires, mais décalés d'un angle  $\theta_r$  par rapport aux précédents. La tension générée par les stratégies (a, b) a une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier à montrer que cette forme d'onde est riche en harmoniques. [37]

### IV-5-1 Principe de la commande à MLI des onduleurs triphasés :

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de large convenable. Le schéma de l'onduleur reste le même Figure (IV -2) c'est la commande des interrupteurs qui est modifiée. Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont donnés par les intersections de signal de référence avec la porteuse.

### IV-5-2 La Modulation de largeur d'impulsion:

Nous avons dit auparavant que les ondes délivrées par les onduleurs à commande pleine onde ou à commande décalée sont riches en harmoniques. Pour atténuer ces harmoniques on peut placer en sortie de l'onduleur un filtre. Le filtrage de la tension ou de courant de sortie d'un onduleur ne délivrant qu'un créneau de tension ou de courant par alternance est difficile et onéreux, car le premier harmonique à éliminer (L'harmonique 3 ou 5) à une fréquence très voisine de celle du fondamental. La modulation de largeur d'impulsion s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande de l'onduleur tout en ayant une bonne neutralisation de l'onde de sortie.

### IV-5-3 Principe de la modulation de largeur d'impulsion :

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs(MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$  très élevée. Figure (IV -3).

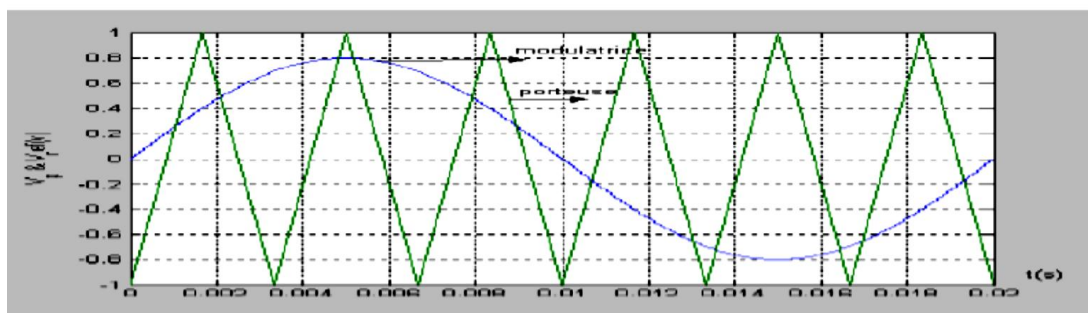


Figure (IV-3) : Principe de la modulation.[9]

#### IV-5-4 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion:

Les paramètres essentiels de la MLI sont:

- La fréquence de la porteuse :  $f_p$
- L'indice de modulation :  $m = \frac{f_p}{f_r}$  ou  $f_r$  la fréquence de la référence.
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  :  $r = \frac{A_r}{A_p}$

Avec:

$A_r$ : Amplitude de la référence.

$A_p$ : Amplitude de la porteuse.

La modulation montre que plus «  $m$  » est grand et plus la neutralisation disharmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de  $r$  la plus élevée possible.

La modulation est dite synchrone si «  $m$  » est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie «  $U$  » qui se reproduit identiquement à elle-même tous les  $T = \frac{1}{f}$ .

Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation  $f_p$  donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.

Pour le choix de «  $m$  », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissant lorsque la fréquence de modulation augmente.

On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut Toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras.

Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire- sinusoïdale Triphasé est donné par la Figure (IV-4).

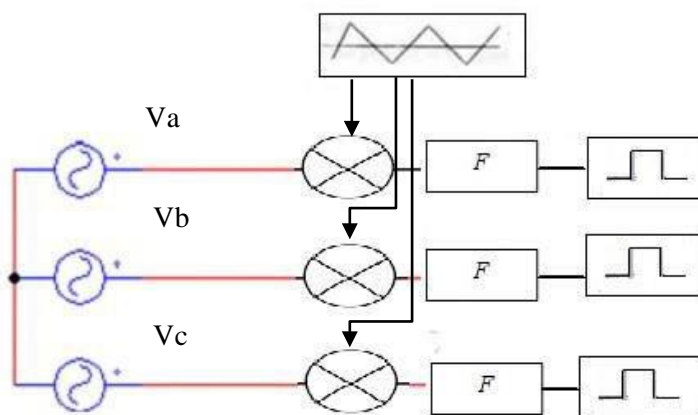


Figure (IV-4) : Schéma Synoptique de la commande en MLI (triphasé).

### IV-6 Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions:

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, parmi lesquelles on peut citer :

#### IV-6-1 La modulation linéaire multiple:

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire.

L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales Figure (IV-5). Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période. [37]

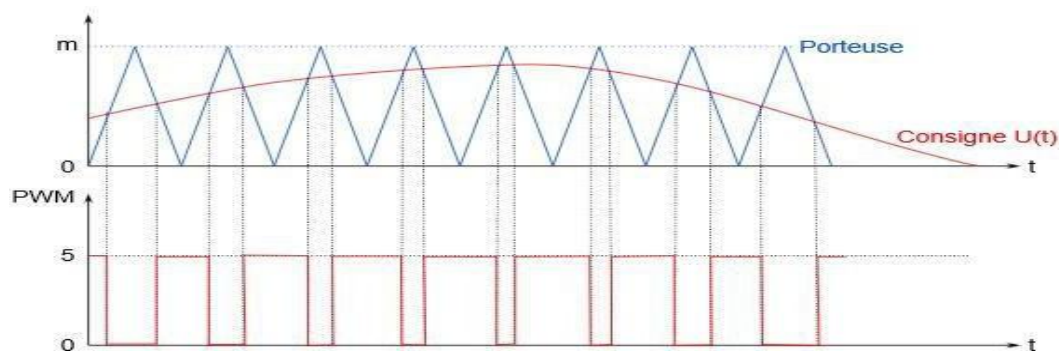


Figure (IV-5) : Modulation de largeur d'impulsion multiple.

#### IV-6-2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire:

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable Figure (IV-5) A.

Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

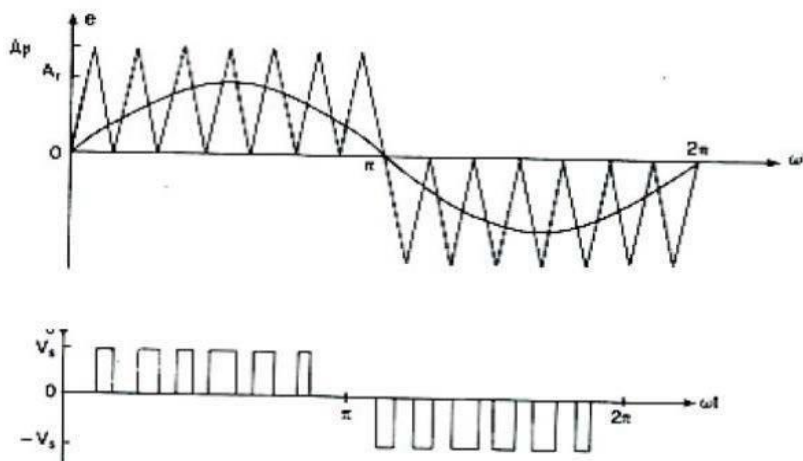


Figure (IV-6) : MLI sinusoïdale triangulaire unipolaire.



**IV-6-3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée):**

Le signal référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la Porteuse n'est pas appliqué au milieu des alternances de la sinusoïde Figure (IV-5) B.

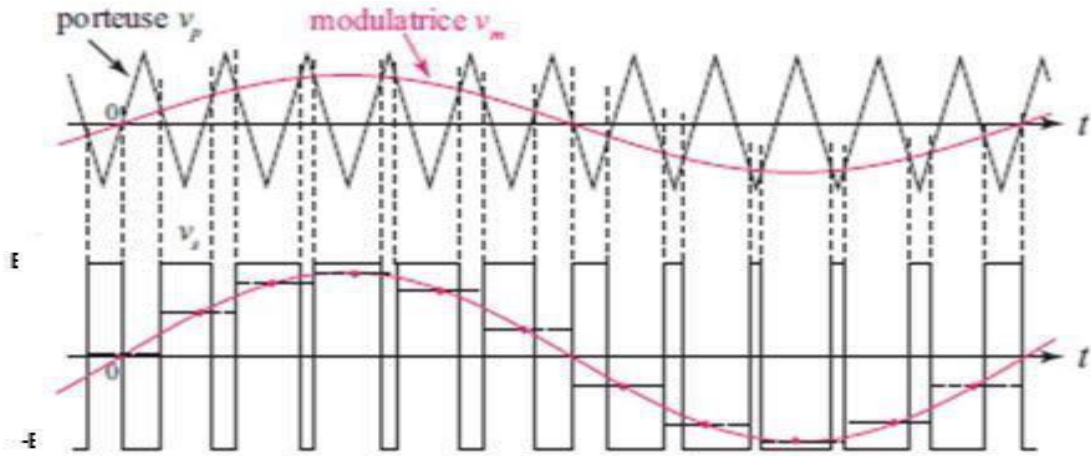


Figure (IV-7) :La modulation sinusoïdale modifiée.

**IV-6-4 La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle :**

Le principe de cette technique est le même que celui de la modulation sinusoïdale, Sauf que la porteuse triangulaire est bidirectionnelle (bipolaire). Figure (IV-7).

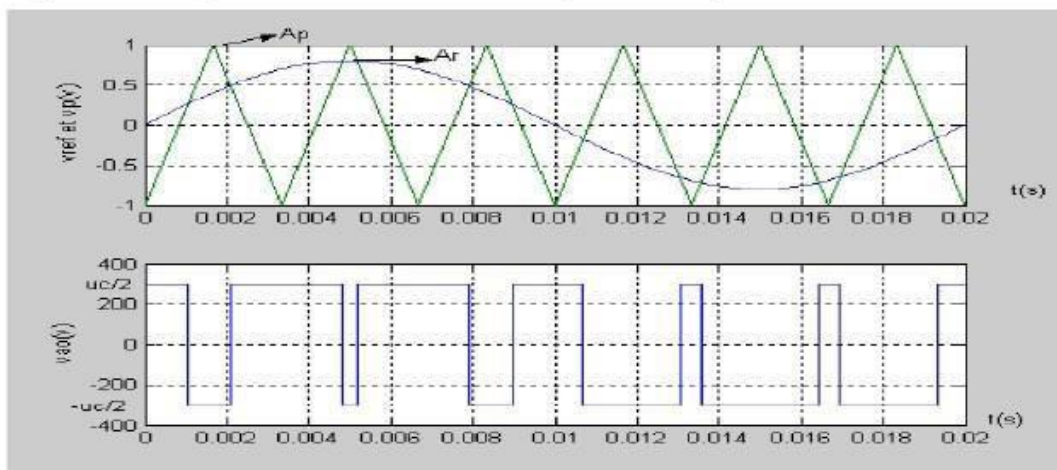


Figure (IV-8) :La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.



### IV-7 Qualité de l'énergie électrique : critères et définitions

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation Des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques.

On parle de Compatibilité Electromagnétique (C. E. M.) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.

La CEM classe ces perturbations selon deux groupes :

- basses fréquences (< 9 kHz) ;
- hautes fréquences (> 9 kHz).

D'autre part, ces phénomènes sont caractérisés selon leur mode de transmission: on

Parlera de perturbations conduites et de perturbations rayonnées

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la Basse fréquence dont la transmission est conduite . [27]

Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, surtensions Temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la Fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs. [27]

Ils peuvent être regroupés en quatre catégories selon qu'ils affectent :

- l'amplitude,
- la forme d'onde,
- la fréquence,
- la symétrie du système triphasé.

#### IV-7-1 Creux de tension et coupures :

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension.

Il est caractérisé par :

- sa profondeur ( $\Delta U$ )
- sa durée ( $\Delta t$ ).

La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de  $\frac{1}{2}$  période à 50 Hz soit 10 ms Jusqu'à une minute.

La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les  $\frac{1}{2}$  périodes (avec recouvrement d'une  $\frac{1}{2}$  période).

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est Supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 Minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3minutes.

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le Réseau de distribution.

Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des Réseaux de distribution (réenclencheurs, isolations de défaut).

On observe un plus grand nombre de creux de tension et de coupures sur les réseaux Aériens que sur les réseaux souterrains du fait des intempéries (excepté, bien entendu, S'ils sont raccordés sur le même départ).

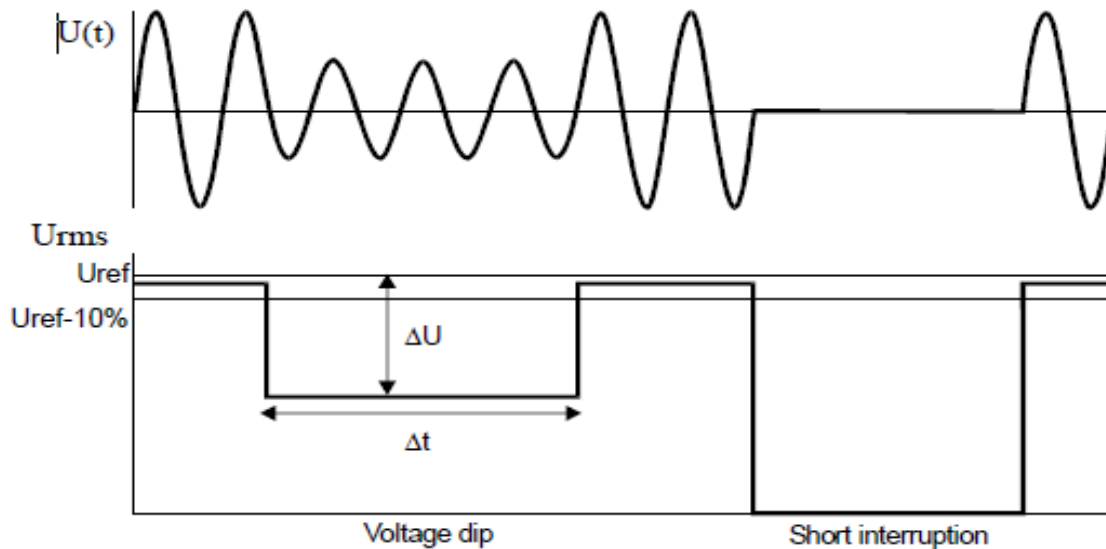


Figure (IV-9) : Creux de tension et coupures brèves.

### IV-7-2 Surtensions temporaires ou transitoires :

La norme EN50160 fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation :

- réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser  $1,7 U_n$  ;
- réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser  $2 U_n$ .

Les surtensions sont de trois natures :

Surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz) ; surtensions de manoeuvre ;

Surtensions atmosphériques. Elles apparaissent selon deux modes :

Mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre)

Mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase – phase ou phase – neutre).

### IV-7-3 Fluctuation lente de la tension (Flicker) :

La fluctuation lente de la tension est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 %. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la Fréquence est comprise entre 0,5 et 25 Hz.

Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents,..).

Les conséquences de la fluctuation lente de la tension s'observent essentiellement sur des lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux (Flicker). Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1 % de la tension.

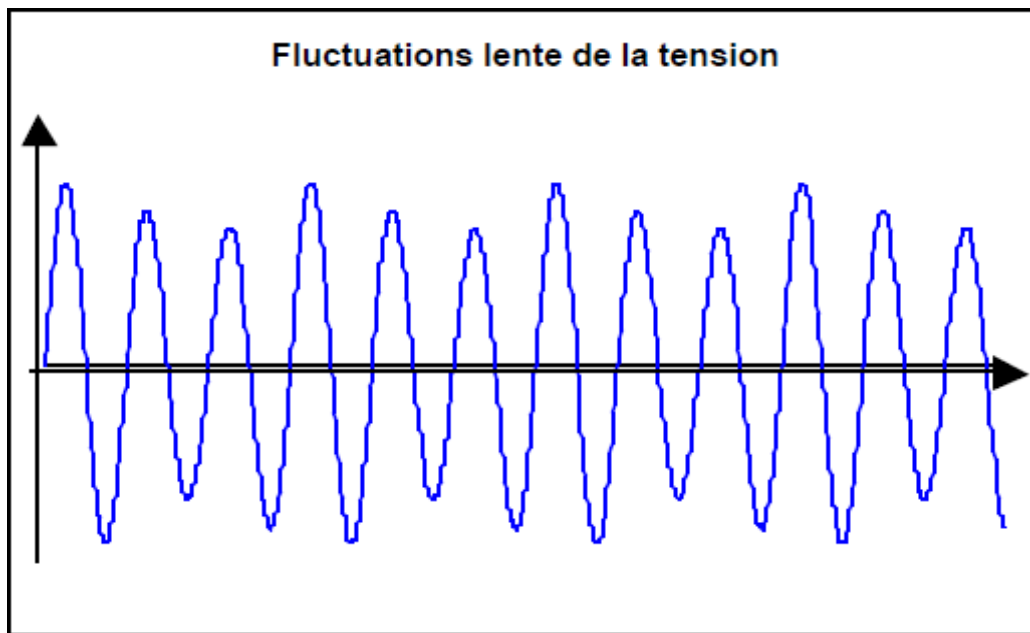


Figure (IV-10) : Exemple de fluctuation de tension.

#### IV-7-4 Déséquilibre du système triphasé de tensions :

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en Amplitude et/ ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de  $120^\circ$ . Le Degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue Par le rapport de la composante inverse ( $U_{1i}$ ) (ou homopolaire ( $U_{1o}$ )) du fondamental à celui de la composante directe ( $U_{1d}$ ) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \text{ et } \Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{IV.6})$$

La formule approchée suivante peut aussi être utilisée :

$$\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{\text{moy}}}{V_{\text{moy}}}, \quad (\text{IV.7})$$

Avec  $V_i$  = tension de la phase  $i$  et

$$V_{\text{moy}} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (\text{IV.8})$$

La tension inverse (ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses (ou homopolaire) produits par les charges déséquilibrées qui conduisent à des courants non identiques sur les trois phases (charges BT connectées entre phase et neutre, charges monophasées ou biphasées MT telles que machines à souder et fours à induction).

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections. [36]

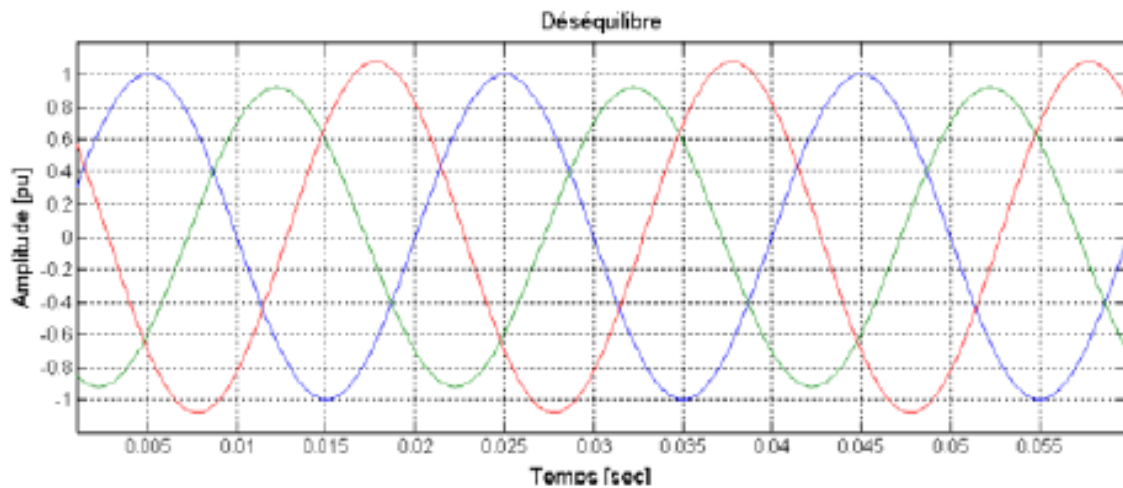


Figure (IV-11) : Déséquilibre des tensions triphasées.[9]

### IV-7-5 Variations de la fréquence :

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1 %) au sein du réseau synchrone en régime normal de fonctionnement et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques.

La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu.

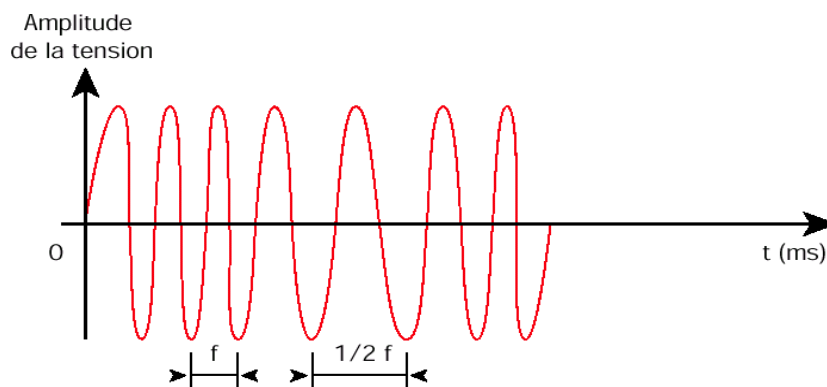


Figure (IV-12) : Forme d'onde de la variation de la fréquence.

### IV-7-6 Harmoniques et inter harmoniques :

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension . [27]

Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être Décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du Fondamental (50 Hz pour le réseau de distribution).

Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une Composante à la fréquence de 250 Hz, soit 5 x 50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental.

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion Harmonique en tension ou en courant :

$$THDu = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (IV.9)$$

C'est le rapport, exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques  $U_n$  et l'amplitude du fondamental  $U_1$ .

La borne supérieure est fixée par la norme EN50160 au 40e rang, c'est-à-dire à 3 kHz pour la fréquence industrielle.

Les inters harmoniques sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle.

Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arcs sont les principaux générateurs d'inter harmoniques.

On distingue les effets instantanés et les effets à terme.

Les effets instantanés font suite à un phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateurs, disjoncteur). D'autres troubles fonctionnels sont liés à la déformation de l'onde de tension tels que : couples pulsatoires sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesure (selon leur bande passante), perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.

Les effets à termes se traduisent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

La norme EN50160 fixe les niveaux de tensions harmoniques jusqu'au 25ème rang et

indique que le taux global de distorsion harmonique ne doit pas dépasser 8 % .

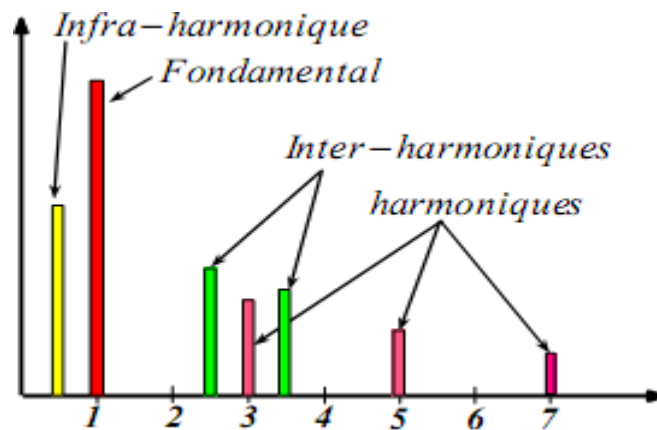


Figure (IV-13) : Représentation des inters et infra harmoniques.

### IV-7-7 Caractéristique d'un signal :

#### IV-7-7-1 Rang d'un harmonique :

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamentale, généralement la fréquence industrielle 50Hz ou 60Hz. Par principe, le fondamentale  $f_1$  a le rang 1. [37]

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (IV.10)$$

#### IV-7-7-2 Représentation spectrale :

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de rang.

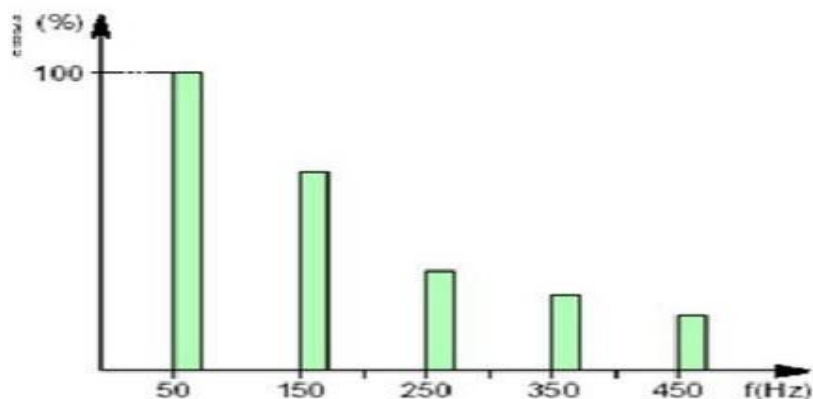


Figure (IV-14) : Spectre d'un signal.

**IV-7-7-3 Analyse de Fourier :**

Sur le plan mathématique, on peut décomposer tout signal périodique en une série de Sinusoïde dont la fréquence est un multiple de fréquence fondamentale du signal. Cette Série est nomme série de Fourier, d'après le mathématicien français Joseph Fourier du Début du XIXe siècle.

Si  $G(t)$  est un signal à décomposé en série de Fourier, la série s'écrit comme suit :

$$G(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos.(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin.(n\omega t) \quad (\text{IV.11})$$

**Avec :**

**A<sub>0</sub>** : composante continue ou valeur moyenne du signal, généralement nul en distribution électrique en régime permanent.

**An et B<sub>n</sub>** : amplitude crête des composant harmonique de rang n.

**ω** : pulsation fondamentale.

En électrotechnique, en utilise habituellement les valeurs efficaces plutôt que les Valeurs crête.

Par conséquent, l'équation précédente devient

$$G(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{2}} \cdot \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\sqrt{2}} \cdot \cos(n\omega t) \quad (\text{IV.12})$$

On obtient les coefficients **A<sub>n</sub>** et **B<sub>n</sub>** par résolution analytique ou numérique desintégrales suivantes :

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T G(t).dt$$

$$A_n = \frac{2}{T\sqrt{2}} \int_0^T G(t). \cos(n\omega t).dt \quad (\text{IV.13})$$

$$B_n = \frac{2}{T\sqrt{2}} \int_0^T G(t). \sin(n\omega t).dt$$

Où  $T$  correspondent à la période du signal qui est égale à  $2\pi/\omega$  ou à  $1/f$ .



### IV-7-7-4 Taux de distorsion harmonique globale (%) :

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques, c'est le Rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamentale.

$$\text{TDH (\%)} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (G_n)^2}}{G_1} \quad (\text{IV.14})$$

### IV-7-8 Les principales sources d'harmoniques:

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

#### Les charges industrielles :

- Équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage.
- Charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à Décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires). [36]

#### Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage :

Téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes .

### IV-7-9 Effet des harmoniques :

Effets immédiats

- Dégradation du facteur de puissance
- Réduction de la puissance des moteurs
- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs
- Disjonctions intempestives
- Augmentation du bruit dans les moteurs
- Surdimensionnement de certains composants : conducteur du neutre, d'alimentation, batteries de condensateurs .

Effets à moyen et long terme

- Réduction de la durée de vie des moteurs
- Réduction de la durée de vie des transformateurs
- Vieillesse accélérée des isolants et des diélectriques .

Des solutions de dépollution harmoniques existent :

- Le filtrage passif qui consiste à installer un circuit L, C séries accordées sur la fréquence de la composante à éliminer ;
- le filtrage actif génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées ;
- le filtrage hybride combine les solutions passive et active ;
- l'utilisation d'appareils à absorption sinusoïdale (appareils dits « propres »).

Les nouveaux équipements de petite puissance sont soumis à des normes limitant les perturbations harmoniques.

### IV-8 Simulation du modèle étudié :

Le schéma des simulations est donné par la figure IV.16 à la sortie du générateur PV, un onduleur de tension triphasé commandé par la technique MLI(PWM).

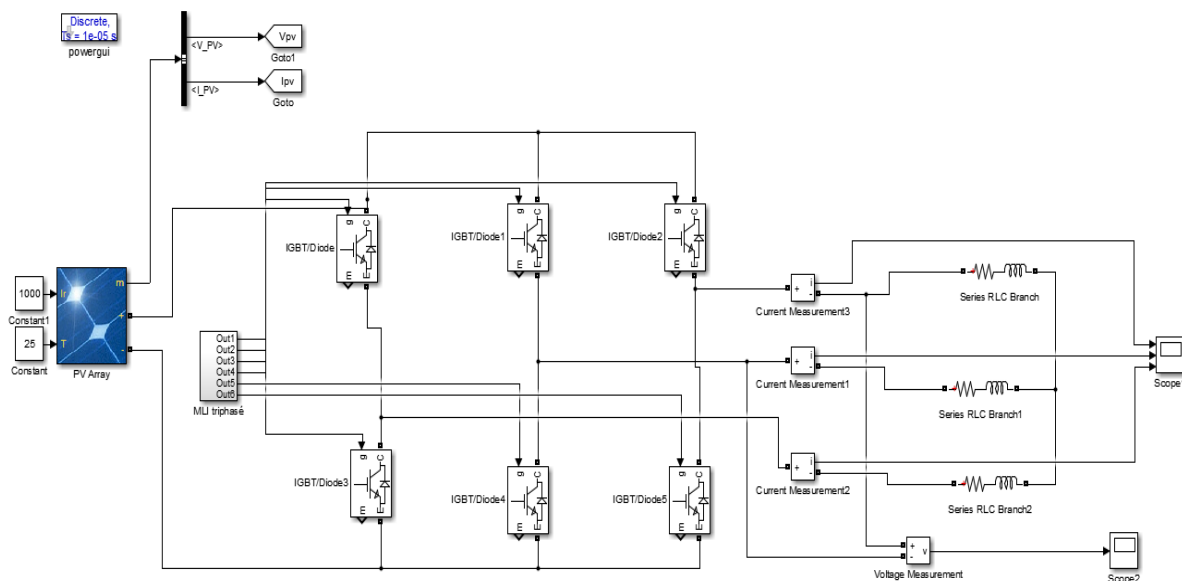
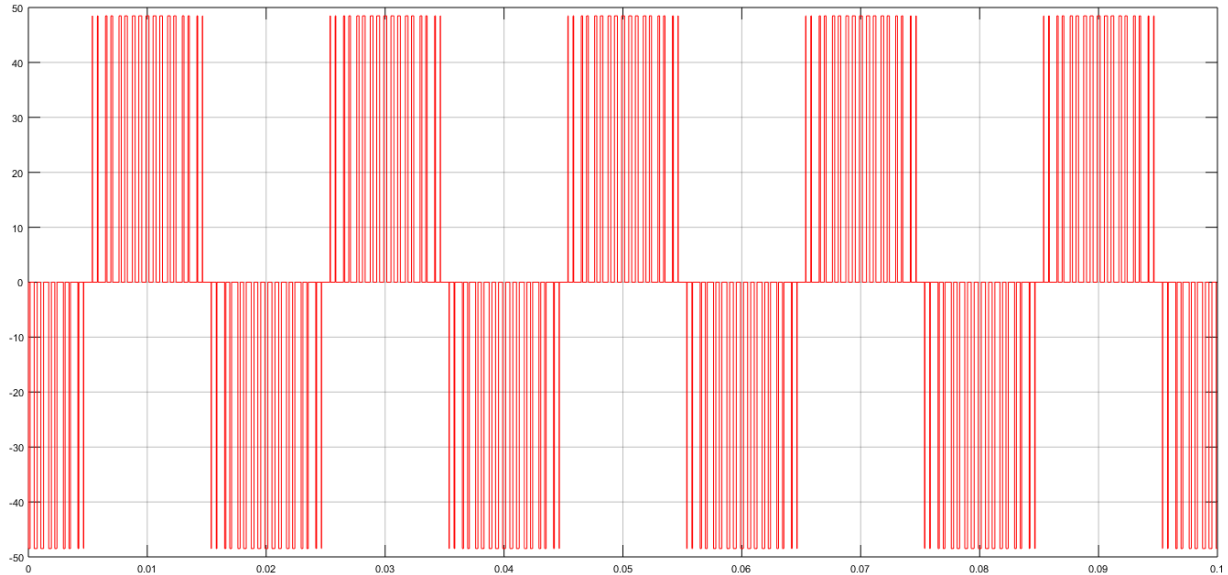


Figure (IV-15) : Schéma de simulation globale d'une charge RL triphasé du PV.

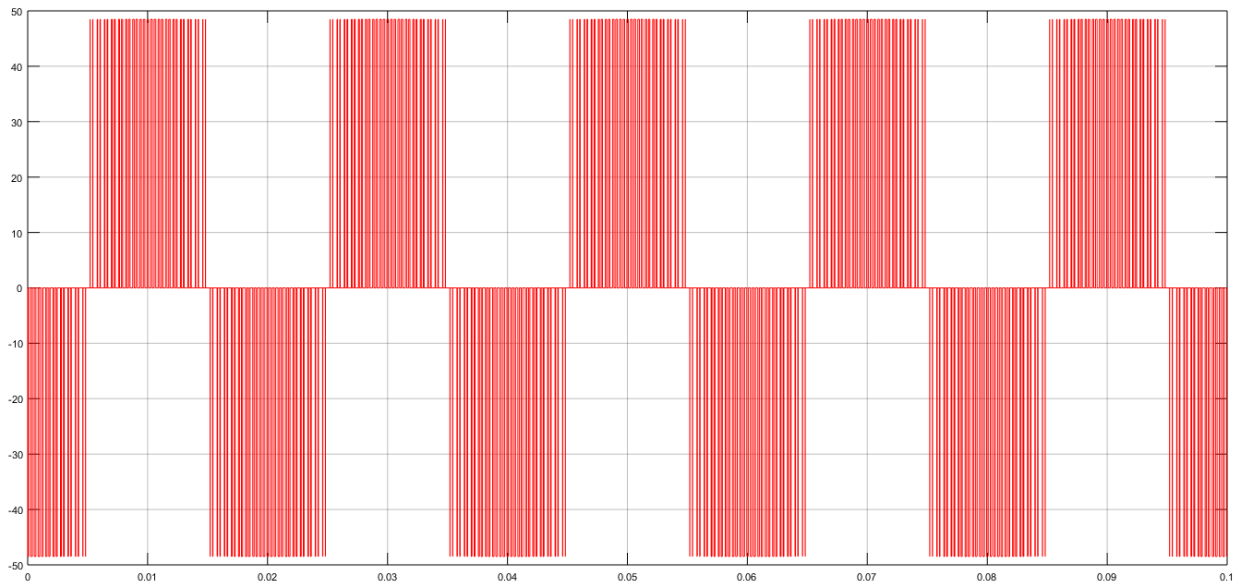
IV-8-1 Tension composée à la sortie de l'onduleur:

A )



Facteur de modulation =17

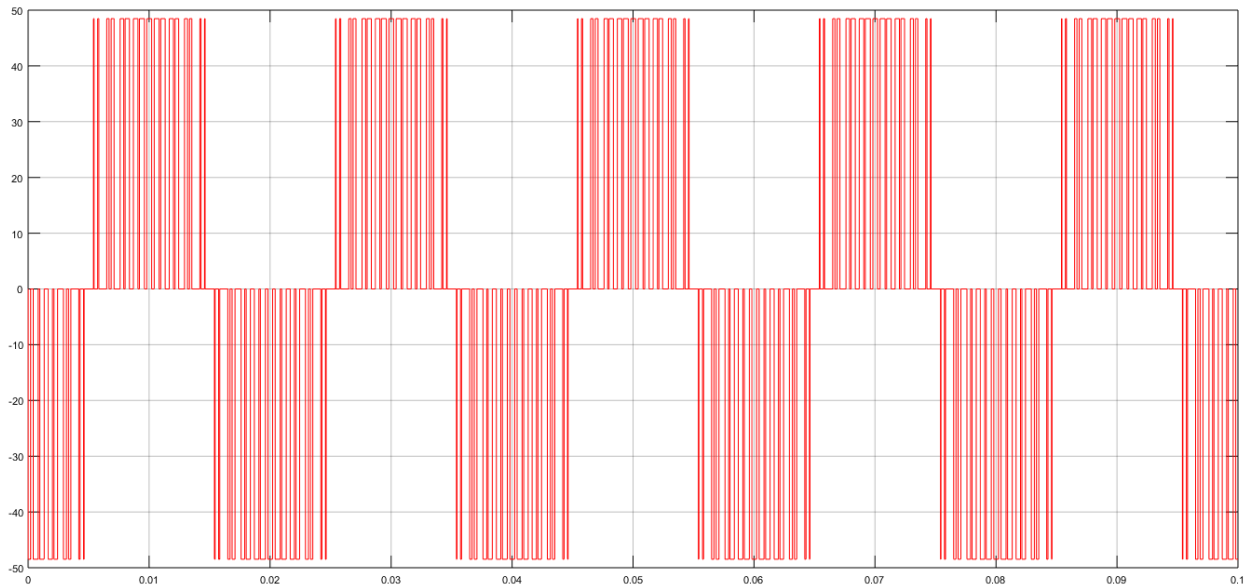
B )



Facteur de modulation =33

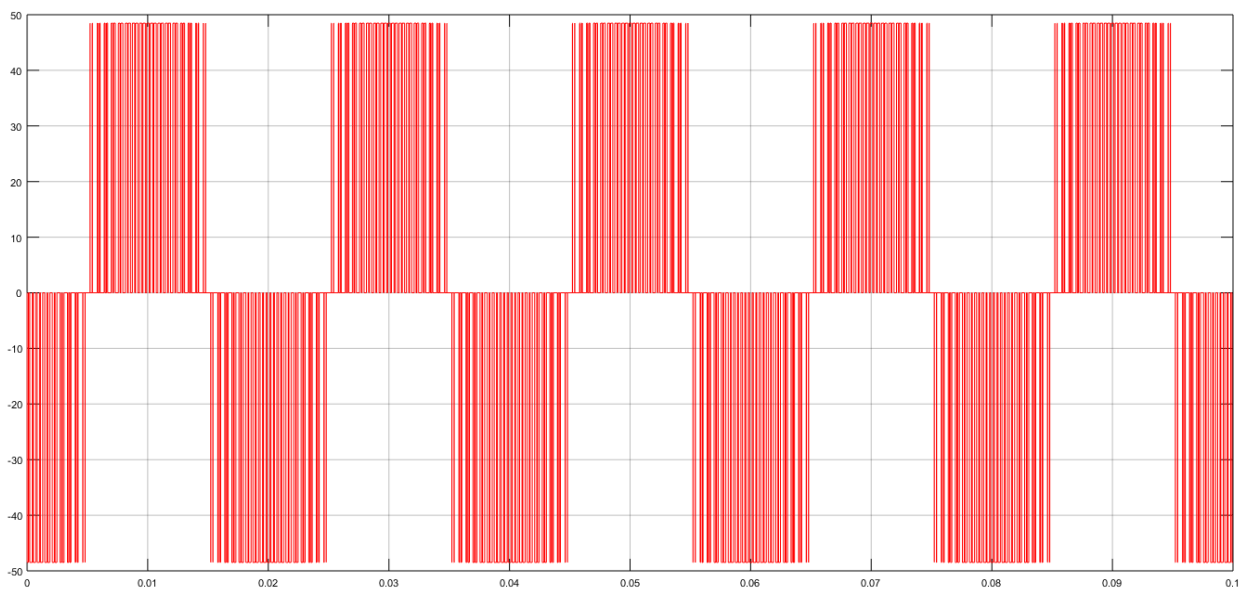
Figure (IV-16) : Formes d'ondes de la tension composée Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.5 \Omega$ .

A )



Facteur de modulation =17

B )

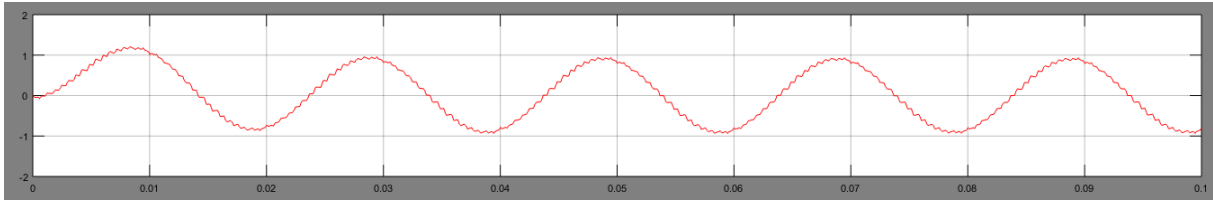


Facteur de modulation =33

**Figure (IV-17) :** Formes d'ondes de la tension composée Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.8 \Omega$ .

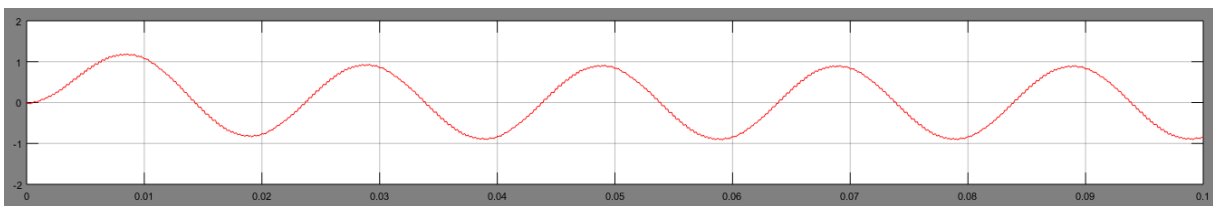
**IV-8-2 Courant à la sortie de l'onduleur :**

A )



Facteur de modulation =17

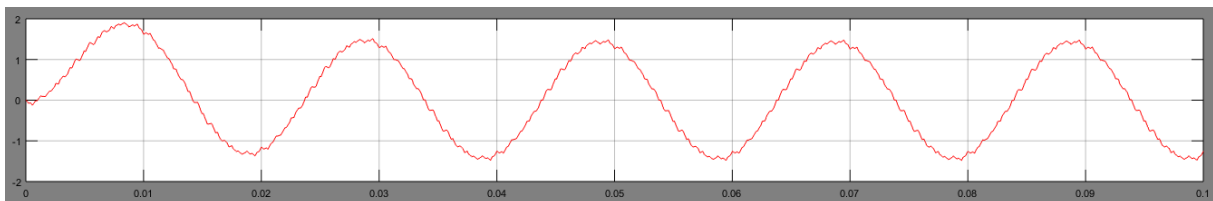
B )



Facteur de modulation =33

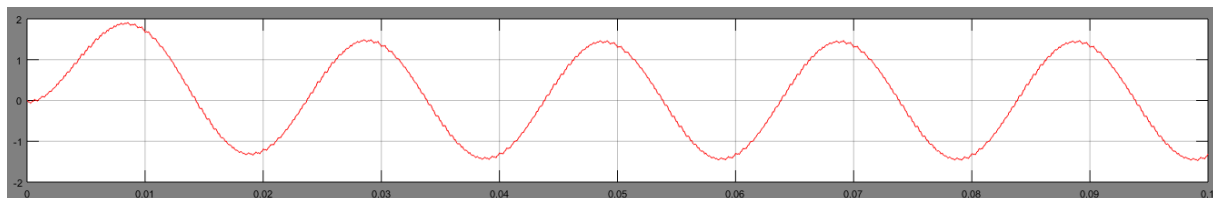
**Figure (IV-18) :** Formes d'ondes de courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.5 \Omega$ .

A )



Facteur de modulation =17

B )

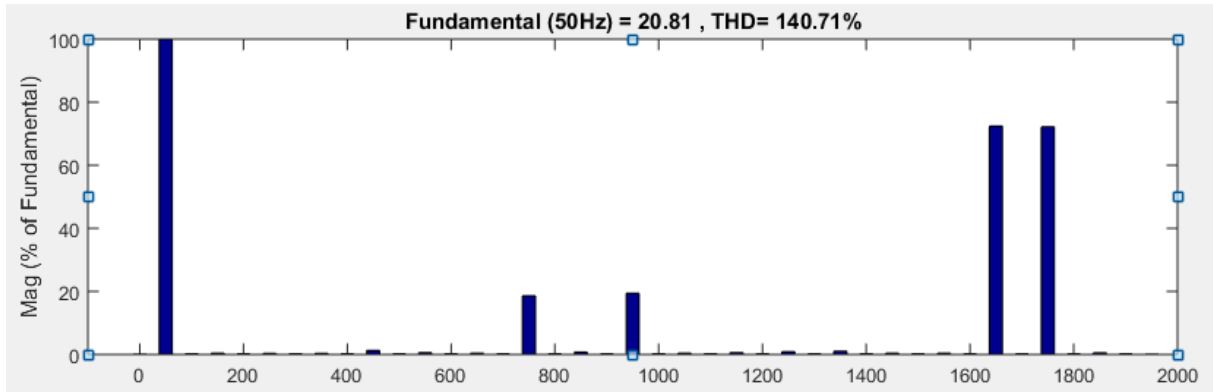


Facteur de modulation =33

**Figure (IV-19) :** Formes d'ondes de courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.8 \Omega$ .

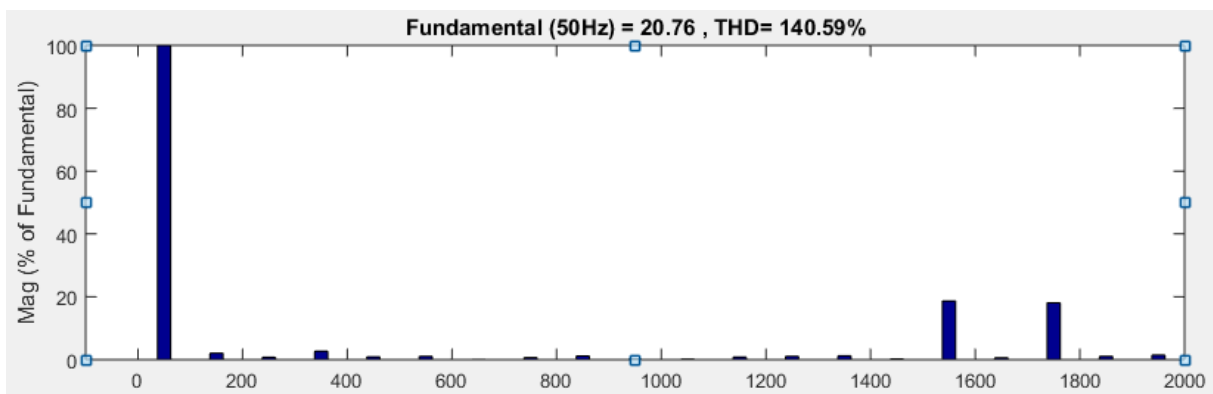
IV-8-3 Spectre d'harmonique de la tension composée:

A )



Facteur de modulation =17

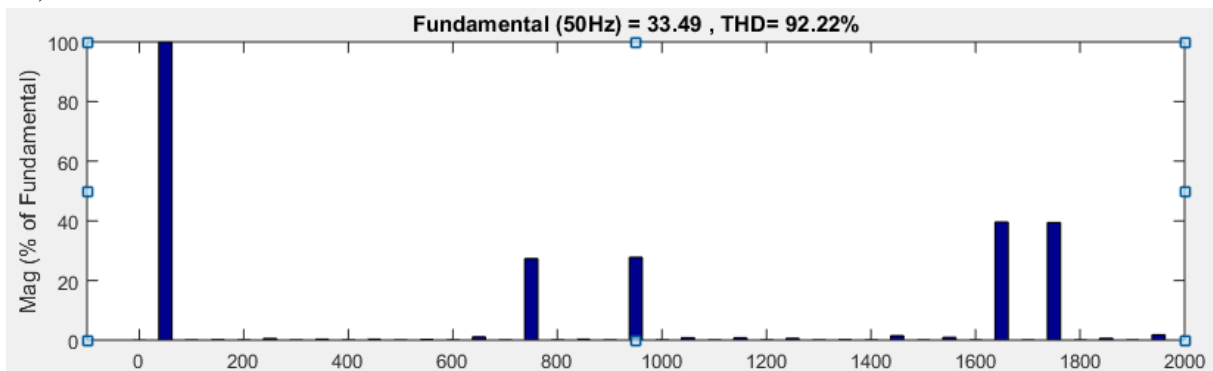
B )



Facteur de modulation =33

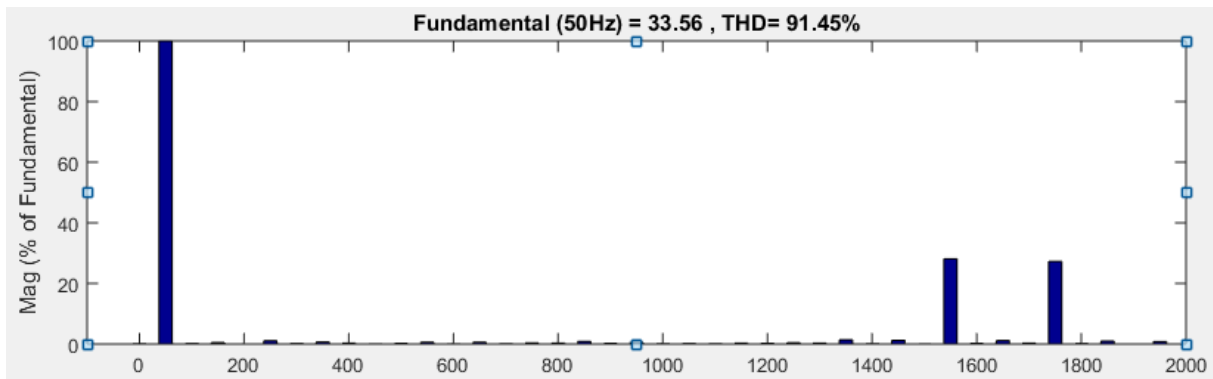
Figure (IV-20) : Spectre d'harmonique du tension à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.5 \Omega$ .

A )



Facteur de modulation =17

B )

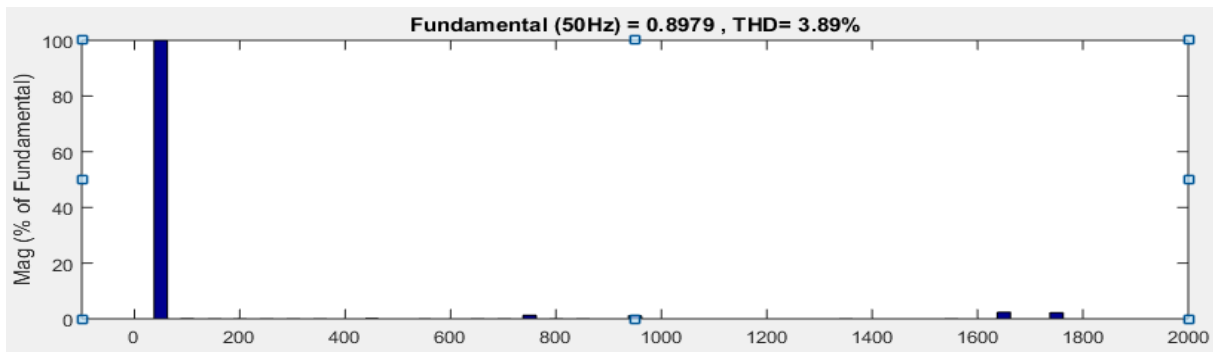


Facteur de modulation =33

Figure (IV-21) : Spectre d'harmonique du tension à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.8 \Omega$ .

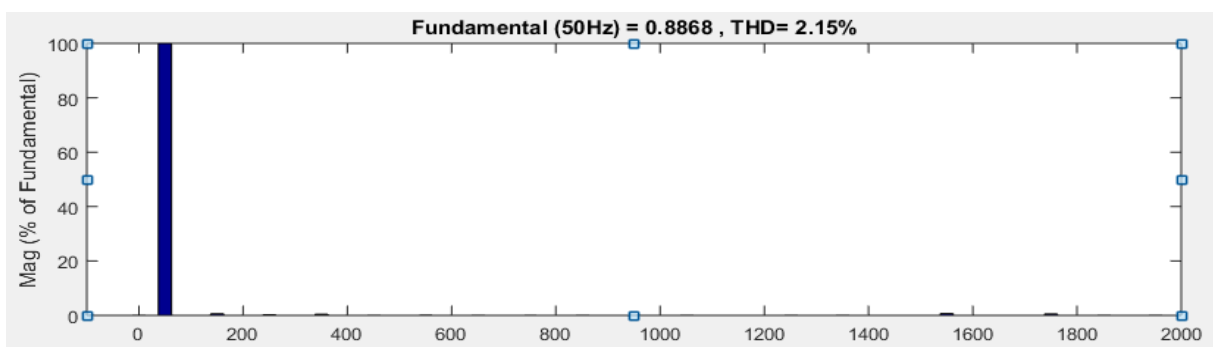
#### IV-8-4 Spectre d'harmonique Du courant:

A )



Facteur de modulation =17

B )

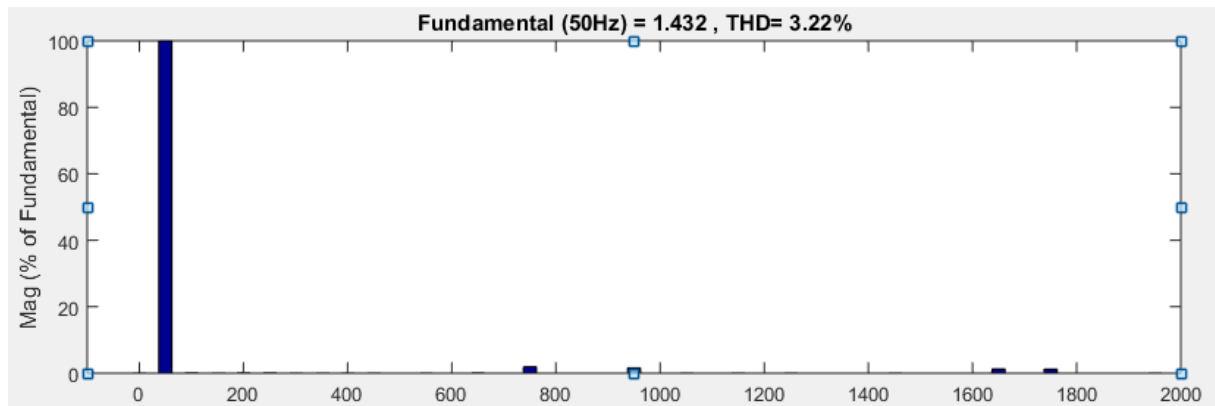


Facteur de modulation =33

Figure (IV-22) : Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.5 \Omega$ .

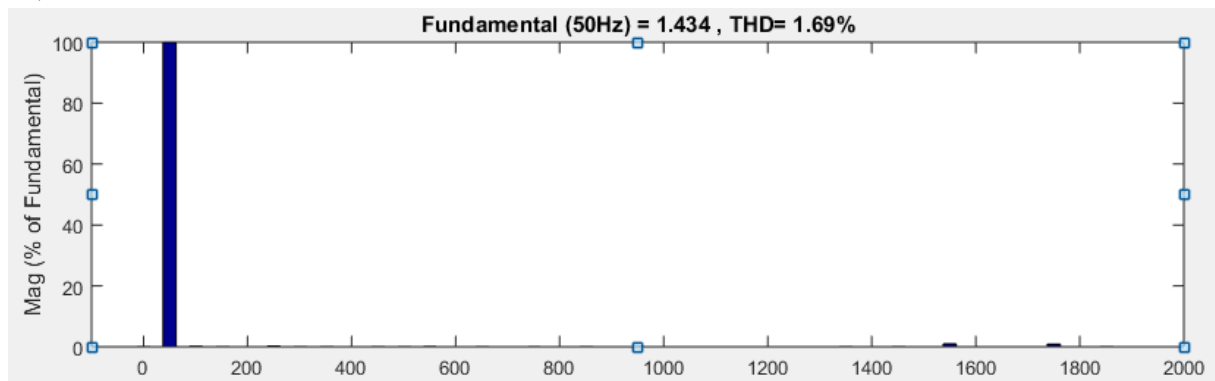


A )



Facteur de modulation =17

B )



Facteur de modulation =33

**Figure (IV-23) :** Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur Pour Le coefficient de réglage  $r = 0.8 \Omega$ .

### IV-9 Analyse de résultats de simulation et d'expérimentation:

Après l'analyse théorique nous abordons maintenant la simulation en utilisant un Logiciel Matlab.

La simulation est faite pour deux cas :

- on remarque que le rapport de modulation  $r=0.8$  offre un meilleur taux de distorsion harmonique.
- L'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de repousser les harmoniques de la tension de phase vers les fréquences très élevées.
- Pour un indice de modulation « m » impair, on trouve seulement les harmoniques impairs et qui se regroupent autour des familles  $mf$  ,  $3mf$  .....etc.
- La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamental ne dépend pas de la Variation de l'indice de modulation « m ».

### IV-10 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons étudié l'alimentation d'une charge RL par un générateur PV.

L'utilisation du convertisseur continu-alternatif enrichie les formes d'ondes des tensions D'harmoniques, ce qu'affecte le bon fonctionnement de la charge.

Les résultats de simulation on montré que la commande à MLI repousse les harmoniques de la tension vers des fréquences de rangs élevés.

Le courant et la tension ont été dépollués à un niveau peu satisfaisant pour  $m=17$ , Ceci est conforté par le spectre harmonique de tension pour les deux cas r.

$r=0.5$  ;

THDV= 140.71 % et de courant THDI= 3.89 %.

$r=0.8$  ;

THDV= 92.22 % et de courant THDI= 3.22 %.

D'autre part , pour  $m=33$  le courant et la tension ont été dépollués à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique de tension pour les deux cas r .

$r=0.5$  ;

THDV= 140.59 % et un taux de courant THDI = 2.15 %.

$r=0.8$  ;

THDV= 91.45 % et un taux de courant THDI = 1.69 %.



# **Conclusion générale**

### Conclusion générale:

Dans le premier chapitre nous avons étudié les différents types d'énergies renouvelables. Nous avons vu qu'elles constituent une alternative aux énergies fossiles, car elles sont moins perturbatrices de l'environnement, inépuisables et n'émettent pas de gaz à effet de serre.

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

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

Le premier problème majeur surgissant est le faible rendement de conversion de ce matériau.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation et simulation d'un panneau PV afin d'analyser son fonctionnement et l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques de sortie.

Et que le problème majeur est que les modules photovoltaïques se comportent comme des générateurs non linéaires. Le module photovoltaïque possède un point de fonctionnement optimum appelé le point de puissance maximal (PPM).

Nous avons analysé et simulé le fonctionnement d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de faire fonctionner un panneau PV dans les conditions optimales et extraire la puissance maximale lors des variations météorologiques ou de la charge.

Le quatrième chapitre, est consacré à l'étude de l'alimentation d'une charge R, L par un générateur PV (Helios USA 9T6 400) à travers un onduleur à commande MLI.

Les résultats de la simulation ont montré que le contrôle PWM pousse les harmoniques de la tension vers des fréquences de rangs élevés.

Enfin, notre travail peut être complété par les perspectives suivantes :

- Rajouter un dispositif de stockage ( Batteries ).
- Raccorder le système de production l'énergie PV au réseau de distribution électrique conventionnel.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BENHAMOUCHE Wassim et CHIHEB Mahdi Mémoire master « Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque en site isolé » Département Electrotechnique UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA Année Universitaire : 2019/2020 .
- [2] Bendali Braham Mounir et Khelif Mahdi « Etude et simulation d'une chaine de production photovoltaïque » MEMOIRE DE MASTER UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2018.
- [3] Berrahmoune mohamed Mémoire master « Influence des condition climatiques sur les performances d'un panneau photovoltaïque » Département Electrotechnique UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA Année Universitaire : 2016
- [4] Farhi seif eddine et Guerche boutheina Mémoire Licence « Etude et simulation d'un système photovoltaïque » Département d'Electrotechnique UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA Année Universitaire : 2018/2019 .
- [5] SADI MOHAMMED EL AMINE HAMLAT ZOHRA Mémoire master « L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV » Département D'électrotechnique Université Dr.Tahar Moulay de Saïda 2013-2014.
- [6] Mme Zeraïa Hassiba née Benyahia Mémoire magister « optimisation des générateur électrique des énergie renouvelable alimentant les systèmes télécommunications radioélectrique » Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie Université M'hamed Bougara de Boumerdès.
- [7] : B. Flèche – D. Delagnes "Energie solaire photovoltaïque .doc "juin 07.
- [8] : BOUZERIA HAMZA , ZOUITEN ISSAM "étude des hacheurs et leurs applications dans l'optimisation des generateurs photovoltaïque" Mémoire de mastre d'electrotechnique, Université badji mokhtare annaba,2011.
- [9] : METAI ABDELKADER et CHAAB AYMENE Mémoire master « Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé » Département Electrotechnique UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA Année Universitaire :2018.
- [10] : H.S Raus chenbach.Solar cell array desing hand book . Van Nostrand, 1980
- [11] D. Ahmed, «Modélisation et commande d'une chaine traction d'une véhicule électrique», Mémoire de Magister, Université de Moulay Tahar de Saïda, le 29/10/2005.
- [12] MOHAMED ARROUF, Thèse de Doctorat « Optimisation De L'ensemble Onduleur, Moteur Et Pompe Branche Sur Un Générateur Photovoltaïque » Université Mentouri De Constantine 2007.
- [13] SAADI SOUAD, Thèse de magistère en physique « Effet Des Paramètres Opérationnels Sur Les Performances D'un Capteur Solaire Plan » Université Mentouri De Constantine 2010.
- [14]. M.belhad ' Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome', mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [15]. S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [16]. S. PETIBON ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.

## Bibliographie

---

- [17] L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [18] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [19] K. Kheloufi, Modélisation mathématique et circuit électronique équivalent de cellules solaire à colorant organique, Master, Univ, UMMTO,2018.
- [20] : D.Turcotte ,M.Ross and F.Sheriff.^Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools ^^ PV horizon , Canada ,2001 .ARTICLE PDF.
- [21] : Programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité 2008-2017, commission de la regulation de l'électricité et de gaz
- [22] : [http://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energies Renouvelable Filière solaire /Solar.htm](http://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energies%20Renouvelable%20Filière%20solaire/Solar.htm)
- [23] : D.sera ,R teodrescu,and P . Rodriguez. PV anel model bases on datasheet values .In proc .IEEE inter\_national Symposium on industrial Electronics, ISIE ,P2392\_2396,2007
- [24] : W . De soto,S.A .Klein ,and W .ABeckman .Improuvement and validation of a model for voltaic array performance . solar energy ,80(1):78\_88,January 2006.
- [25] : A.Driess,S.Harrison,and P .Jain . Evaluating the effectiveness of maximum power point tracking methods in photovoltaic power Electronics Specialists Conference ,PESC,p.145\_151 ,2007
- [26] : Geoff walker . Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. Journal of electrical & Electronics Engineering Australia ,21(1),2001.rnia
- [27]: Akihiro Oi , 'Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System', A Thesis Presented to the faculty of California Polytechnic State University,San Luis Obispo,2005.
- [28]: P.Leconte,M.Rapin,E.Szèchenyi,<<Eoliennes>>,techniques de l'ingénieur,de Génie mécanique,pp.BM 4 640 21.
- [29] : Guide des Energies Renouvelables, Edition 2007, Ministère de l'Energie et des Mines.
- [30] : A. Aziz, K. Kassmi, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A. Martinez "Conception d'un système photovoltaïque adapté par des convertisseurs d'énergie DC-DC de type dévolteur ou survolteur fonctionnant à haute fréquence (0.1 MHZ)" Rapport LAAS N°05346, 29p. Toulouse- France, Juillet 2005,
- [31] : S. Kar, W.E. Dahlke, "Solid State Electronics'" Vol. 15, p..221, 1972,
- [32] : E. Matagne, document de travail relatif à l'énergie solaire photovoltaïque, université catholique de Louvain, faculté des sciences appliquée, état en octobre 2000,
- [33] : A. Aziz, K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A.
- [34] : M. F. Sharif, "Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique", Thèse de l'université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, N° 02569, Toulouse-France, 2002,

## Bibliographie

---

- [35] : Hannes Knopf, Analysis, "Simulation and evaluation of maximum Power point Tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle" thesis, Portland State university 1999.
- [36] : A.Ould Mohamed Yahya et I.Youm, "étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque ", énergies renouvelables, vol.11 N°3 (2008) 473 – 483
- [37] : E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a micro controller based photovoltaic maximum power point tracking control system," IEEE Trans.Power Electron., vol. 16, no. 1, pp. 46–54, Jan. 2001.
- [38] : "Cours d'Electronique Industrielle - Traitement Electronique de l'Energie Electrique, hacheurs et onduleurs autonomes", *E.N.S.E.E.I.H, Toulouse*, groupe d'enseignants de la filière électronique avec la collaboration de chercheurs de L.E.E.I, Edition 1983,
- [39] Krim Med lamine et Debbah Housseem Eddine « Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque » Département Eléctrotechnique UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA Année Universitaire :2018.



