

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE : **Sciences de l'Ingéniorat**
DEPARTEMENT : **Électrotechnique**

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : **Sciences et Technologies**

FILIERE : **Électrotechnique**

OPTION : **Électrotechnique industriel**

Thème

Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque

Présenté par:

**Krim Med lamine
Debbah Houssem Eddine**

Dirigé par

Mme Merabet Leila

Jury de soutenance:

- | | | | |
|--------------------|------------|-----|---------------------|
| - Soltani fatma | Président | MCA | Université d'Annaba |
| - Merabet leila | Rapporteur | MCB | Université d'Annaba |
| - Chine abdelghani | Examineur | MAA | Université d'Annaba |

Promotion : Juin 2018

Remerciement

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 Merabet 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 remerciement aux membres de nos deux familles (sœurs et frères) chacun en son nom pour leurs constants soutiens au cours de notre cursus universitaire et particulièrement cette année.

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

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

Dédicace

On dédie ce modeste travail à nos parents :

Debbah Ahcene et Djenane Zoulikha.

Krim mohamed et chat fatima

Qui ont été toujours là pour nous « vous avez tout sacrifié pour vos enfants, n'épargnant ni santé ni efforts » un grand merci pour tout.

Que le bon dieu vous garde.

Liste des symboles

E : Eclairage (W/m^2).

h: Hauteur du soleil (Deg).

I_{obs} : Courant d'obscurité (A).

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V).

K : coefficient de Boltzman ($1.38.10^{-23}$ J / K).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

R_p : Résistance parallèle shunt(Ohm).

R_s : Résistance série(Ohm).

G_{sh}: la conductance shunt.

V : La tension électrique en Volt (V).

V_j : aux bornes de la jonction pn en Volt (V).

V_s : tension de seuil en Volt (V).

I_{cc} : Courant de court circuit (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert en Volt (V).

I_m : Curant du point du fonctionnement (A).

V_m : Tension du point du fonctionnement en Volt (V).

V₀: la tension moyenne aux bornes de l'inductance en Volt (V).

V_i : La source fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance en Volt (V).

P_m : Puissance maximale (W).

S : Surface totale de la cellule (m^2).

P_o : puissance optimale (W).

G : L'éclairage de référence (1000 W/m^2).

I_{sc} : Courant de court circuit (A).

P_{pv}: la puissance disponible en sortie du GPV (W).

V_{pn} : la tension à la sortie du GPV en Volt (V).

I_{pv}: le courant de sortie du GPV (A).

N : Nombre de cellules en série.

N_p : Nombre de cellules en parallèle.

M : nombre de cellules en séries.

N : nombre de branches en parallèles.

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

T_e : la période des impulsions.

f_e : Fréquence de découpage.

m : L'indice de modulation.

f_p : Rapport de la fréquence de la modulation (porteuse).

f_m : Fréquence de la référence (modulante).

r : Le coefficient de réglage en tension.

V_m : La tension de la référence.

V_p : La tension celle de la porteuse.

Abréviations utilisées

ENR : Energies Renouvelables

Kwc : Kilo Watt crête

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

NEAL : New Energy Algeria

APRUE : Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

PV : photovoltaïque

GPV: Générateur Photovoltaïque.

AMx : Air mass

Photo : un mot grec signifiant lumière

Volta : le nom du physicien italien Alessandro Volta

Si : silicium

Ge : germanium

CdTe : Tellure de Cadmium

CIS : Cuivre Indium Sélénium

GaAs : arséniure de Gallium

FF : facteur de forme (Fill Factor)

EVA : Ethylène Acétate de Vinyle

I-V : La caractéristique courant- tension de la photopile

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current)

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MLI : Modulation de la Largeur d'Impulsion

PWM : Pulse With Modulation

PPM : point de puissance maximal

CS : convertisseur statique

P&O: Perturbation et Observation.

D : la diode de roue libre

Listes des figures

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Figure (I.1) : Une éolienne | 5 |
| Figure (I.2) : biomasse | 6 |
| Figure (I.3) : un barrage | 7 |
| Figure (I.4) : une centrale géothermique | 8 |
| Figure (I.5) : mer | 9 |
| Figure (I.6) : Types d'énergie solaire | 9 |
| Figure (I.7) : Les énergies renouvelables en Algérie | 11 |
| Figure (I.8) : Irradiation globale journalière moyenne reçue sur un plan horizontal au mois de Juillet | 13 |
| Figure (I.9) : Programme d'électrification de 20 villages du sud | 14 |
| Figure (I.10) : Programme complémentaire de soutien à la croissance | 16 |
| Figure (I.11) : Programme de développement des wilayas des hauts plateaux | 16 |

Chapitre II :

| | |
|--|----|
| Figure (II.1) : Coupe schématique du soleil. | 24 |
| Figure (II.2) : Course du soleil. | 25 |
| Figure(II.3) : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1, 5. | 26 |
| Figure (II.4) : Analyse spectrale du rayonnement solaire | 27 |
| Figure (II.5) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal. | 29 |
| Figure(II.6) : Conversion de l'énergie solaire en électricité. | 31 |
| Figure (II.7) : Structure basique d'une cellule solaire. | 33 |
| Figure (II.8) : dopage de type N | 35 |
| Figure (II.9) : dopage de type P | 35 |
| Figure (II.10) : jonction PN | 36 |
| Figure (II.11) : la zone de transition. | 36 |
| Figure(II.12) : Principe de la conversion photovoltaïque. | 37 |
| Figure(II.13) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement | 40 |
| Figure(II.14) : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction P-N | 42 |
| Figure (II.15) : Les différentes zones de Caractéristique I-V entre générateur et module Photovoltaïque | 45 |
| Figure(II.16) : Module photovoltaïque. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figure(II.17) : Câblage des cellules dans un module | 46 |
| Figure(II.18) : Panneau photovoltaïque | 47 |
| Figure(II.19) : Boite de dérivation | 48 |
| Figure (II.20) : Ruban métallique d'une cellule | 49 |
| Figure (II.21) : Encapsulation des cellules | 49 |
| Figure (II.22) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module | 50 |
| Figure (II.23) : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement | 51 |
| Figure (II.24) : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement | 51 |
| Figure (II.25) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température | 52 |
| Figure (II.26) : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température | 52 |
| Figure (II.27) : Association des cellules | 53 |
| Figure (II.28) : Connexion en série | 54 |
| Figure (II.29) : Connexion en parallèle | 55 |
| Figure (II.30) : Connexion mixte | 56 |
| Figure (II.31) : Protection par diode anti –retour. | 57 |
| Figure (II.32) : Protection par diode by-pass | 57 |
| <u>Chapitre III :</u> | |
| Figure (III.1) : les différents types de convertisseurs statiques | 60 |
| Figure (III.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC | 61 |
| Figure (III.3) : Schéma électrique d'un hacheur buck. | 62 |
| Figure (III.4) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck | 63 |
| Figure (III.5) : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé | 63 |
| Figure (III.6) : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert | 64 |
| Figure (III.7) : Schéma électrique d'un hacheur boost | 64 |
| Figure (III.8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost. | 65 |
| Figure (III.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé | 66 |
| Figure (III.10) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert. | 66 |
| Figure (III.11) : symbole d'un convertisseur continu alternatif | 68 |
| Figure (III.12) : Alimentation sans interruption | 68 |
| Figure (III.13) : Alimentation d'n moteur à courant alternatif à travers un onduleur | 68 |
| Figure (III.14) : Principe de la MLI bipolaire. | 69 |
| Figure (III. 15) : onduleur de tension triphasé | 70 |
| Figure (III.16) : Commande en demi- pont | 72 |

| | |
|--|----|
| Figure (III.17) : MLI bipolaire (m=10, r=0.85) | 73 |
| Figure (III. 18) : MLI bipolaire (m=10, r=0.85) | 74 |
| Figure (III.19) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT | 75 |
| Figure (III.20) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température. | 77 |
| Figure (III.21) : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique | 78 |
| Figure (III.22) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT | 79 |
| Figure (III.23) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge. | 80 |
| Figure (III. 24) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence. | 81 |
| Figure (III. 25) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction d'Isc | 81 |
| Figure (III.26) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O). | 83 |
| Figure (III.27) : Algorithme incrémental conductance | 84 |
| Figure (III.28) : Exemple de signaux déformés par les harmoniques | 85 |
| Figure (III.29) : Inter-harmoniques et infra-harmoniques | 86 |
| Figure (III.30) : Représentation d'un spectre | 88 |
| Figure (III.31) : Représentation des puissances en présence des harmoniques | 89 |

Chapitre IV:

| | |
|---|----|
| Figure (IV.1) : Schéma de montage pour la simulation des caractéristiques du générateur photovoltaïque | 91 |
| Figure (IV. 2) : Caractéristique $I=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour ($G=1000w/m^2$ et $T=25^\circ$) | 92 |
| Figure (IV.3) : Caractéristique $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour ($G=1000w/m^2$ et $T=25^\circ$) | 93 |
| Figure(IV.4) : Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour différents éclairement à température constante ($T=25^\circ$) | 94 |
| Figure (IV. 5) : Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour différents températures é éclairement constant ($G=1000w/m^2$) | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figure (IV.6) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque sans MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$) | 96 |
| Figure (IV.7) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque sans MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$) | 96 |
| Figure (IV.8) : Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par l'algorithme P&O, lors d'un éclairement constant et température constante | 97 |
| Figure (IV. 9) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.2$ | 98 |
| Figure (IV.10) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.2$ | 98 |
| Figure (IV.11) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.001$ | 99 |
| Figure (IV.12) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.001$ | 99 |
| Figure (IV. 13) : Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par l'algorithme P&O pour un affaiblissement de l'éclairement | 100 |
| Figure (IV. 14) : Variation de l'éclairement | 101 |
| Figure (IV.15) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement | 101 |
| Figure (IV. 16) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement | 101 |
| Figure (IV.17) : onduleur de tensions triphasé | 102 |
| Figure (IV. 18) : tensions simples, composées pour $r=0,8$, $m=35$ | 103 |
| Figure (IV. 19) : spectre de la tension simple pour $r=0,8$, $m=35$ | 104 |
| Figure (IV. 20) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple $r=0,85$, $m=35$ | 105 |
| Figure (IV.21) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $r=1$, $m=35$ | 106 |
| Figure (IV. 22) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $r=0,85$ $m=9$ | 107 |
| Figure (IV. 23) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $r=0,85$, $m= 20$ | 108 |

| | |
|--|-----|
| Figure (IV. 24) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $r=0.85, m=21$ | 109 |
| Figure (IV. 25) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $f_r= 100\text{HZ}, m=35, r=0.85$ | 110 |
| Figure (IV. 26) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $f_r= 25 \text{ HZ}, m=35, r=0.85$ | 111 |

Liste des tableaux

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Tableau (I.1) : comparaison entre les différentes énergies renouvelables | 4 |
| Tableau (I.2) : différents types de géothermie | 8 |
| Tableau (I.3) : Potentiel solaire en Algérie | 13 |
| Tableau (I.4) : Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud | 15 |

Chapitre II :

| | |
|--|----|
| Tableau (II.1) : Caractéristiques principales du soleil. | 23 |
| Tableau (II.2) : Evénements notables dans l’histoire du photovoltaïques | 29 |
| Tableau (II.3) : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques | 39 |

Chapitre III :

| | |
|--|----|
| Tableau (III.1) : donne les huit combinaisons possibles des trois interrupteurs | 71 |
|--|----|

Chapitre IV :

| | |
|---|-----|
| Tableau (IV. 1) : Caractéristiques du panneau photovoltaïque. | 90 |
| Tableau (IV.2) : Comparaison des taux de distorsion harmonique pour chaque cas | 112 |

Sommaire

| | |
|-----------------------|----|
| Introduction générale | 01 |
|-----------------------|----|

Chapitre I : les énergies renouvelables

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 03 |
| I.2. Définition d'énergie renouvelable | 03 |
| I.3. Les familles de l'énergie renouvelable | 04 |
| I.3.1. L'énergie éolienne | 04 |
| I.3.2. La biomasse | 05 |
| I.3.3. L'énergie hydraulique | 06 |
| I.3.4. L'énergie géothermique | 07 |
| I.3.5. L'énergie des mers ou énergie marine | 08 |
| I.3.6. Energie solaire | 09 |
| I.3.6.1. l'énergie solaire thermique | 10 |
| I.3.6.2. l'énergie photovoltaïque | 10 |
| I.3.6.3. l'énergie thermodynamique | 11 |
| I.4. Les énergies renouvelables en Algérie | 11 |
| I.4.1. Energie photovoltaïque en Algérie | 11 |
| I.4.2. Gisement solaire en Algérie | 12 |
| I.4.3. Potentiel solaire en Algérie | 12 |
| I.4.4. Potentiel énergétique en Algérie | 14 |
| I.5. Bilan des réalisations | 15 |
| I.5.1. Réalisation au sud | 15 |
| I.5.2. Réalisation au nord | 17 |
| I.6. Projet du CDER | 17 |
| I.6.1. Programme solaire de Batna | 17 |
| I.6.2. Programme solaire d'Oum-El-Bouaghi | 18 |
| I.6.3. Programme solaire de Tiaret | 18 |
| I.6.4. Projets en cours de réalisations | 18 |
| I.7. Programme national des énergies renouvelables | 19 |
| I.8. Principales sociétés intervenant au secteur | 20 |
| I.8.1 New Energy Algeria | 20 |
| I.8.2. Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie | 20 |

| | |
|--|----|
| I.8.3.Centre de Développement des Energies Renouvelables | 21 |
| I.9.conclusion | 21 |

Chapitre II : les systèmes photovoltaïques solaires

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 22 |
| II.2.Soleil | 23 |
| II.2.1.Constante solaire | 24 |
| II.2.2.Trajectoire du soleil | 25 |
| II.2.3.Masse d'air | 25 |
| II.3.rayonnement solaire | 26 |
| II.3.1.composantes du rayonnement solaire | 27 |
| II.3.2.Rayonnement direct | 28 |
| II.3.3.Rayonnement diffus | 28 |
| II.3.4.Rayonnement réfléchi | 28 |
| II.3.5.Le rayonnement global | 28 |
| II.4.Historique | 29 |
| II.5.La conversion de la lumière en électricité | 31 |
| II.6.Cellule photovoltaïque | 32 |
| II.6.1.Les semi-conducteurs | 33 |
| II.6.2.Les matériaux semi-conducteurs | 33 |
| II.6.2.1.Semi-conducteur intrinsèque | 34 |
| II.6.2.2.Semi-conducteur extrinsèque | 34 |
| II.6.3.Dopage de type N | 34 |
| II.6.3.Dopage de type P | 35 |
| II.6.4.La jonction PN | 35 |
| II.7.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque | 37 |
| II.8.Technologies des cellules photovoltaïques | 38 |
| II.9.Caractéristique électrique | 40 |
| II.9.1.Circuit électrique équivalent | 40 |
| II.9.2.Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire | 42 |
| II.10.Les zones de caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque | 45 |
| II.11.Module photovoltaïque | 46 |
| II.11.1.Panneau photovoltaïque | 47 |

| | |
|--|----|
| II.11.2.La constitution d'un module photovoltaïque | 49 |
| II.11.3.Les principales caractéristiques d'un module | 50 |
| II.12.Influence de l'Éclairement | 51 |
| II.13.Influence de la Température | 52 |
| II.14.Association des cellules | 53 |
| II.14.1.Connexion en série | 54 |
| II.14.2.Connexion en parallèle | 54 |
| II.14.3.Connexion mixte | 55 |
| II.15.Déséquilibre dans un générateur PV | 56 |
| II.15.1.Protection par diode anti-retour | 56 |
| II.15.2.Protection par diode by-pass | 57 |
| II.16.Avantages et inconvénients d'une installation PV | 58 |
| II.17.Conclusion | 59 |

Chapitre III : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

| | |
|---|----|
| III.1.Introduction | 60 |
| III.2.Les Hacheurs | 61 |
| III.2.1.Type des hacheurs | 61 |
| III.2.2.Hacheur Buck | 62 |
| III.2.3.Hacheur boost | 64 |
| III.3.Les onduleurs | 67 |
| III.3.1.Principe de fonctionnement d'un onduleur | 67 |
| III.3.2.Onduleur triphasé | 67 |
| III.3.3.Domaine d'utilisation des onduleurs | 68 |
| III.4.La commande à MLI | 69 |
| III.4.1.Caractérisation de la modulation | 69 |
| III.4.2.MLI bipolaire | 72 |
| III.4.3.MLI unipolaire | 73 |
| III.5.La commande MPPT | 74 |
| III.5.1.Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque | 75 |
| III.5.2.Principe du MPPT | 75 |
| III.5.3.Classification des techniques MPPT | 77 |
| III.5.4.Les premiers types de technique MPPT | 77 |
| III.5.5.Evolution du point d'opération du générateur PV | 79 |

| | |
|---|----|
| III.6.Les méthodes de poursuite de MPPT | 80 |
| III.6.1.Méthodes à contre réaction de tension | 80 |
| III.6.2.Méthodes à contre réaction de courant | 81 |
| III.6.3.Méthodes à contre réaction de puissance | 82 |
| III.6.3.1.Algorithme perturbation et observation | 82 |
| III.6.3.2.Algorithme incrémentation de la conductance | 83 |
| III.7 Etude de la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur | 84 |
| III.7.1 Harmoniques | 85 |
| III.7.2 Normes et recommandation pour la limitation des harmoniques | 85 |
| III.7.3. Inter harmoniques et infra- harmoniques | 86 |
| III.7.4. Grandeurs Caractérisant la pollution harmonique | 87 |
| III.8. Conclusion | 89 |

Chapitre IV: simulation d'un générateur photovoltaïque

| | |
|--|-----|
| IV.1. Simulation des caractéristiques du générateur photovoltaïque à température et éclairement constant | 90 |
| IV.2. Simulation de l'influence des variations climatique sur les caractéristiques du générateur | 93 |
| IV.2.1. Variation de l'éclairement | 94 |
| IV.2.2. Variation de la température | 94 |
| IV.3.Simulation d'un générateur PV associé à un hacheur survolteur | 95 |
| IV.3.1. Maximisation de la puissance du générateur pour un éclairement constant ($G=1000W/m^2$) | 97 |
| IV.3.2.Maximisation de la puissance du générateur pour un éclairement variable de $1000W/m^2$ à $400w/m^2$ | 100 |
| IV.4. Résultats de simulation de l'onduleur | 102 |
| IV.5.Conclusion | 113 |
| Conclusion générale | 114 |

introduction Général

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir effet, les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, un grande partie de la production mondiale d'énergie est assuré à partir de source fossile.

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque, Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne, beaucoup de réticentes existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- ❖ la production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système.

Introduction générale

- ❖ la lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.
- ❖ l'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale

Le but de ce travail est d'établir un modèle permettant de simuler la diminution de l'efficacité de puissance électrique produits par un panneau cause par l'altération des matériaux dans le temps

La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté généralité sur les énergies renouvelable et aussi l'impact des énergies renouvelable sur et aussi l'impact des énergies renouvelable sur l'environnement. En particulier, nous avons décrit le photovoltaïque en Algérie, le potentiel solaire, le potentiel énergétique et les projets réalisés mis en service. Puis, nous avons procédé à la présentation des projets en cours de réalisation sur le territoire national qui couvrent différents domaines
- Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté généralité sur les systèmes photovoltaïques, composantes du rayonnement solaire et La conversion de la lumière en électricité, construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement et les technologies des cellules photovoltaïques les avantages et inconvénients d'une installation PV
- Dans le troisième chapitre, on étudie quelques types convertisseurs statiques (DC-DC) et (DC-AC) et utilisés les méthodes de la commande MPPT.
- Dans le quatrième chapitre, on étudie une Modélisation et simulation par MATLAB SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé, convertisseur , boost et commande MPPT « perturbation et observation ». Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

chapitre I

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.1. Introduction :

Les énergies renouvelables connaissent depuis le milieu de l'année 1990 une vogue qui semble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu et du soleil. Les énergies renouvelables sont inépuisables et d'un usage immémorial. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale. Les sources d'énergie renouvelables sont celles qui produisent de l'électricité ou de l'énergie thermique sans épuiser nos ressources. En font partie les énergies solaire, éolienne, hydraulique et géothermique, et celles que l'on tire de la biomasse et des déchets. Tirées du vent, l'énergie éolienne permet la production d'électricité. Provenant du soleil, le solaire photovoltaïque permet la production d'électricité, de même que la solaire thermodynamique, tandis que le solaire thermique permet la production de chaleur ou de froid. Extrayant la chaleur de la terre, la géothermie conduit à l'obtention de chaleur, de froid ou d'électricité.

I.2. Définition d'énergie renouvelable :

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [1], [2].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [1], [3], [4].

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.3. Les familles de l'énergie renouvelable :

| ENERGIES | COUT | ENCOMBREMENT | RENDEMENT | INTEGRATION DANS LE PAYSAGE | RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT |
|----------------------|--|---|--|--|--|
| SOLAIRE | Moins de 1000€le m ² | Faible pour une installation à domicile | De 11% à 25% | Facile à la ville et à la campagne | Pas de production de déchets |
| EOLIENNE | Environ 100000 € pour une de 25 à 80 m ² | Conséquent pour les grandes tailles | En fonction du vent, environ 10000€pour une d'1kwatt | Pas d'installation en ville et difficile à la campagne | Pas de production de déchets et recyclage des installations |
| BIOMASSE | Plafond des dépenses éligibles de 40 000 €HT | Permettre de dimensionner la taille de l'installation | 45 à 65 % de chaleur 15 à 45 % d'électricité | Dans des centrales biomasses. Une technique utilisée par l'industrie | Fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture |
| HYDRAULIQUE | Cout d'investissement : 1400 à 2000 €/kW Cout de production : 2 à 8 €/kWh | Moins encombrante Que la transmission mécanique | Peut développer des forces importantes | Le barrage Centrale produit l'électricité Les lignes électriques | N'émet pas de gaz a effet de serre Une digestion anaérobie et dégage du méthane. |
| GEO THERMIQUE | Forages : de 10 a 15 m us \$ Construction : 60 m us \$ Fonctionnement : 30 m us \$ | Peut-être employée dans un but domestique | Le rendement est de l'ordre de 33% | Centrale géothermique | N'émet aucun gaz a effet de serre |

Tableau (I.1) : comparaison entre les différentes énergies renouvelables

I.3.1.L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

Une éolienne est composée de 4 parties :

- le mât
- l'hélice

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- la nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau)
- C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite.



Figure (I.1) : Une éolienne

I.3.2.La biomasse :

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.



Figure (I.2) : biomasse

I.3.3.L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- le barrage qui retient l'eau
- la centrale qui produit l'électricité
- les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique

C'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée et c'est une énergie renouvelable très économique à long terme.



Figure (I.3) : un barrage

I.3.4. L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique.

Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple.

Une centrale géothermique est composée de 3 parties :

- la pompe
- l'usine qui produit l'électricité
- les lignes électriques qui la transportent

C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, la chaleur de la Terre, est totalement gratuite.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables



Figure (I.4) : une centrale géothermique

| Type de géothermie | Caractéristiques du réservoir de chaleur | Utilisation |
|--------------------------|---|--|
| Géothermie de surface | Sol entre 10 et 15 °C (le sol est principalement chauffé par le soleil) | Chauffage et rafraîchissement de locaux avec pompe à chaleur |
| Très basse énergie | Nappe à moins de 100m température 30° C | Chauffage et rafraîchissement de locaux avec pompe à chaleur |
| Basse énergie | 30 °C < <i>temperature</i> < 150°C | Chauffage urbain utilisation industrielle thermalisme balnéothérapie |
| Moyenne et haute énergie | 180°C < <i>température</i> < 350°C | Production d'électricité |

Tableau (I.2) : différents types de géothermie

I.3.5. L'énergie des mers ou énergie marine :

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable



Figure (I.5) : mer

I.3.6. Energie solaire :

Énergie produite à partir de la conversion du rayonnement solaire, c'est une énergie renouvelable. C'est également une source d'énergie intermittente (pas d'énergie solaire la nuit). L'énergie solaire, peut être convertie en chaleur ou en électricité.

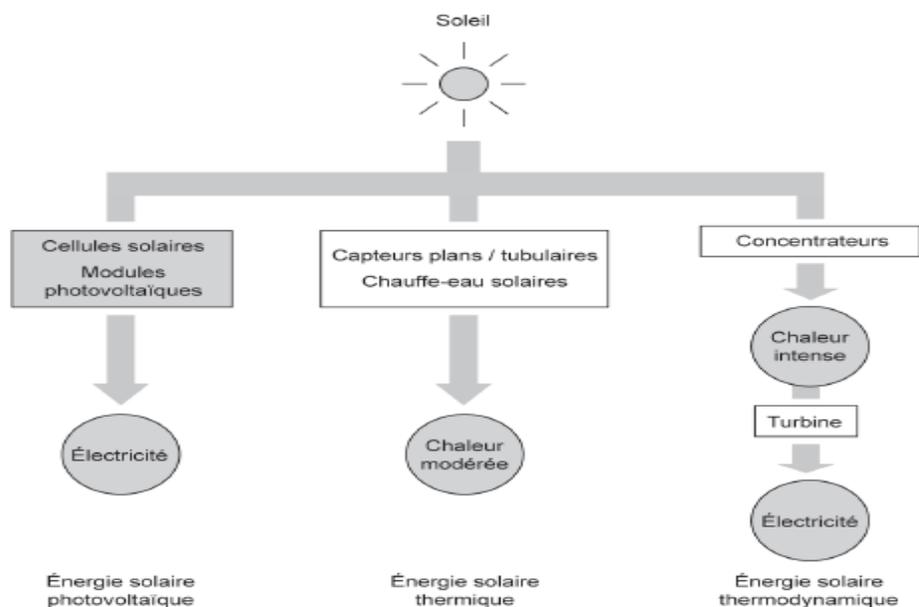


Figure (I.6) : Types d'énergie solaire.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

Il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie thermique
- L'énergie photovoltaïque
- L'énergie thermodynamique

I.3.6.1. l'énergie solaire thermique :

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

I.3.6.2. l'énergie photovoltaïque :

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter d'aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.3.6.3. l'énergie thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer une fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

I.4. Les énergies renouvelables en Algérie :

Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables

22 GW à l'horizon 2030

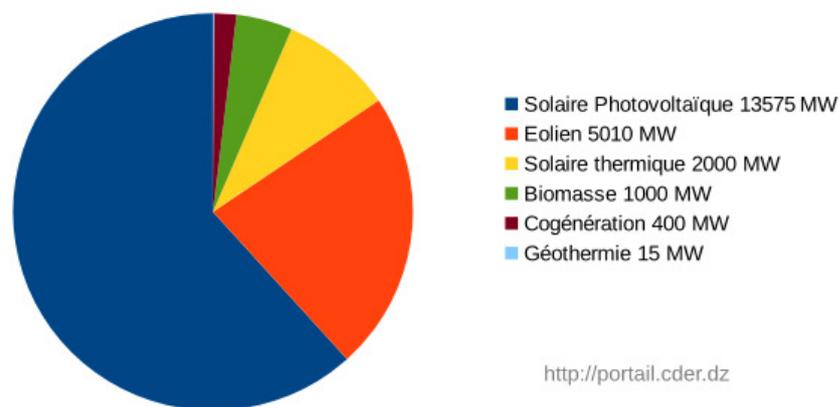


Figure (I.7) : Les énergies renouvelables en Algérie

I.4.1. Energie photovoltaïque en Algérie :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'un des axes de la politique énergétique, économique et financière en l'Algérie comme dans le monde. L'objectif de la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie est d'arriver à atteindre, à l'horizon 2017, à une part de ces énergies dans le bilan électrique national qui serait de 5% [5].

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

L'introduction des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque aura pour conséquence :

- Une plus grande exploitation du potentiel disponible,
- Une meilleure contribution à la réduction de CO₂
- Une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national,
- Un développement de l'industrie nationale,
- La création de l'emploi

I.4.2. Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire.

I.4.3. Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie est un pays de vaste superficie, elle occupe une situation géographique qui favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire, en particulier dans les régions désertiques. Ces régions Sahariennes sont caractérisées par un taux d'ensoleillement très important.

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. 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) La figure (I.8) illustre l'irradiation globale journalière moyenne reçue au moins de juillet.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national soit près de 1700 KWh/m² /an au nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays [5]. Le total d'énergie reçue est estimé à 169400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [6]. Le tableau (I.3) résume le potentiel solaire en Algérie [7], [8], [9].

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

| Régions | Région côtière | Hauts plateaux | Sahara |
|--|----------------|----------------|--------|
| Superficie (%) | 4 | 10 | 86 |
| Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an) | 2650 | 3000 | 3500 |
| Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an) | 1700 | 1900 | 2650 |

Tableau (I.3) : Potentiel solaire en Algérie [7], [8], [9].

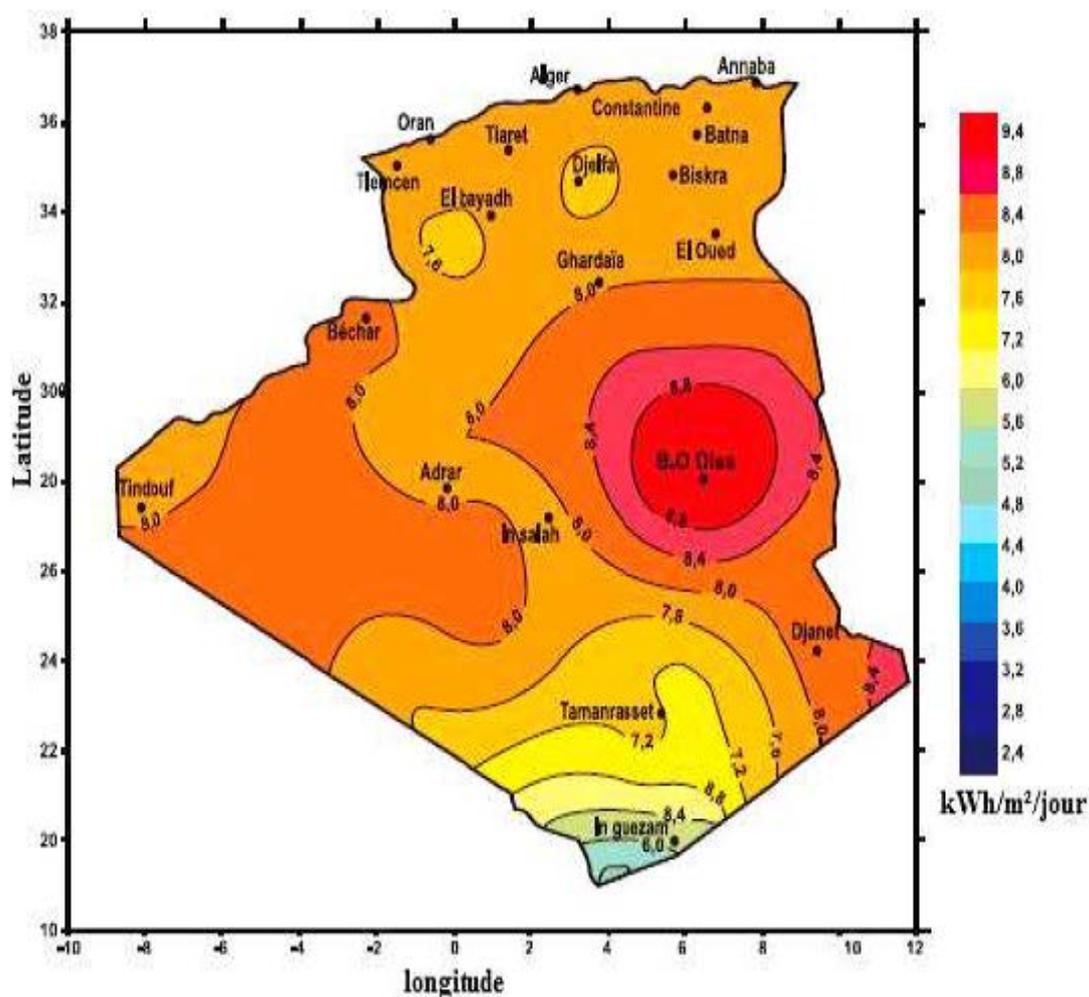


Figure (I.8) : Irradiation globale journalière moyenne reçue sur un plan horizontal au mois de juillet [8]

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

Leur alimentation par les filières classiques (diesel, réseau électrique), en plus des coûts de réalisation excessifs, auraient posé le problème de l'acheminement du combustible, et dans le cas du réseau, des difficultés certaines pour les travaux et la maintenance des lignes aériennes. Le solaire photovoltaïque pourrait également constituer une alternative pour un programme ultérieur.

Le tableau (I.4) indique la puissance installée pour chaque wilaya [13].

| Wilaya | Puissance (kW) |
|--------------|----------------|
| Tamanrasset | 149 703 |
| Ilizi | 23 813 |
| Tindouf | 85 882 |
| Adrar | 25 145 |
| Total | 284 543 |

Tableau (I.4) : Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud

L'Algérie enregistre un taux faible en matière d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique national qui ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité [10], [14].

I.5. Bilan des réalisations :

I.5.1. Réalisation au sud :

Suite aux plusieurs applications qui ont été réalisées, comme les installations pour les systèmes de télécommunications, l'éclairage public et le pompage de l'eau.... D'autres programmes ont été engagés, tel que :

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

Le programme complémentaire de soutien à la croissance qui concerne l'électrification de 16 villages du sud de l'Algérie à l'énergie photovoltaïque, comme le montre la figure (I.10) [5], [8].

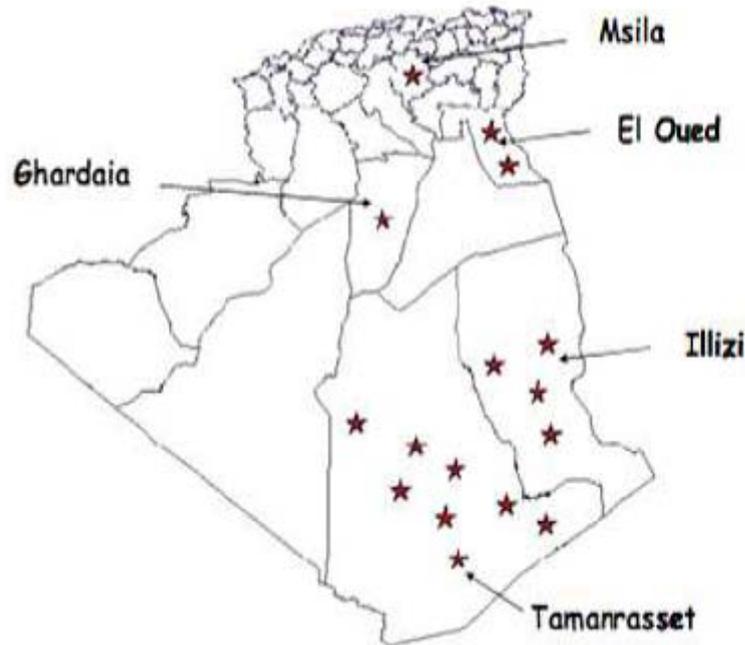


Figure (I.10) : Programme complémentaire de soutien à la croissance [5], [8].

Le programme de développement des wilayas des hauts plateaux qui permettra d'électrifier une soixante de localités au niveau de la région steppique, illustré par la figure (I.11) [5], [8].

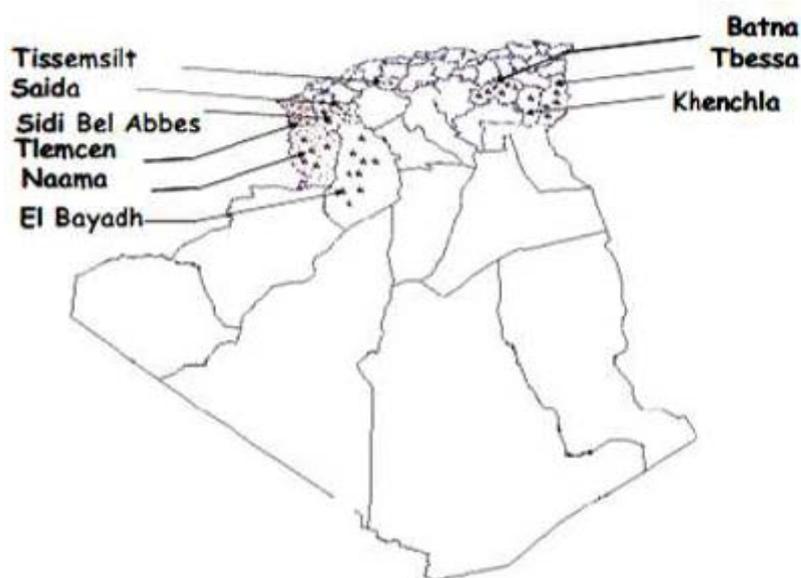


Figure (I.11) : Programme de développement des wilayas des hauts plateaux [5], [8].

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- l'alimentation de plus de 100 sites de télécommunication d'une puissance de 650 KWc.
- la fourniture de 160 pompes solaires pour une puissance de 240 KWc.

I.5.2. Réalisation au nord :

- Dans le cadre de la coopération Algéro-Espagnole, la construction d'une centrale photovoltaïque de 10 KWc connectée au réseau national électrique est programmée
- Une station de services de Naftal alimentée en énergie solaire, est prévue à Staoueli d'une puissance de 7KWc.
- Des installations pilotent au profit de la gendarmerie nationale : alimentation en énergie photovoltaïque des postes de surveillances routières.

I.6. Projet du CDER :

Dans le cadre de développement de l'énergie solaire photovoltaïque, plusieurs projets et programmes ont été ainsi initiés et développés par la Division Energie Solaire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour de nombreuses applications dans le but de répondre aux besoins énergétiques des citoyens et des usagers vivants dans les zones isolées et où l'énergie conventionnelle n'est point disponible.

En effet, les activités effectuées ont porté essentiellement sur une participation très active de la division à l'ensemble de ces projets. Il s'agit de l'élaboration des études de projets, du dimensionnement des équipements PV, du choix des architectures des installations et de l'ingénierie des systèmes PV, des visites des sites d'implantation, de l'acquisition des équipements spécialisés et de matériels, de la réalisation et de la mise en place des installations photovoltaïques, de l'entretien et de la maintenance de ces équipements [12]

I.6.1. Programme solaire de Batna :

- Etude, fourniture et installation de 08 systèmes photovoltaïques, destinées à l'électrification des logements d'enseignants au niveau des écoles inscrites dans le programme de la Wilaya. La puissance installée totale a été de 10 kWc.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- Etude de dimensionnement, fourniture des équipements et installation du mini central photovoltaïque de 5 kWc sous 96 volts avec un stockage électrochimique de 2400 Ah à Iguelfen (W. Batna).
- Etude de dimensionnement, fourniture et installation de 03 minis centraux de 2,5 kWc sous 48 volts avec un stockage d'énergie par le parc de batteries de 1200 Ah pour trois sites ponctuels

I.6.2. Programme solaire d'Oum-El-Bouaghi :

Suivi du programme relatif à l'électrification de deux (02) sites à l'aide de systèmes photovoltaïques de puissance variant de 1 à 1,5 kWc.

I.6.3. Programme solaire de Tiaret :

La Wilaya de Tiaret a sollicité le CDER pour la fourniture, et l'installation de systèmes photovoltaïques pour des besoins de l'électrification rurale. Des visites de sites ont été alors effectuées pour l'implantation future de ces équipements solaires (kits d'éclairage). Les équipements ont été fournis et installés

I.6.4. Projets en cours de réalisations :

- Le groupe Sonelgaz en tant que principal acteur dans le domaine de la production de l'électricité s'est engagé pour un programme ambitieux dans le sens de développer l'industrie photovoltaïque, par la construction d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques à Rouïba. La technologie retenue est celle du silicium multi cristallin avec une capacité de production de l'ordre de 120 MWc/an.

En effet, le groupe Sonelgaz a chargé sa société d'ingénierie de réaliser un projet de construction d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques dans le périmètre de la zone industrielle de Rouïba, par le biais d'un mandat avec le maître de l'ouvrage (Société Rouïba Eclairage). L'usine de fabrication de modules photovoltaïques sera installée à l'intérieur du terrain de cette société, sur une superficie de quatre hectares.

Elle est opérationnelle à partir de septembre 2012 [5], [8], [9] et aura pour conséquences :

- La disponibilité du module photovoltaïque sur le marché national à moindre coût,
- La mise à disposition de ce produit au niveau du marché régional,

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- L'acquisition d'une nouvelle technologie et le développement de l'expertise,
- La réduction de la dépendance vis-à-vis des pays producteurs de modules,
- La création de l'emploi.

Le projet initié par la New Energy Algeria (NEAL) en partenariat avec la société espagnole ABENER, porte sur la construction d'une centrale hybride Solaire/ Gaz de Hassi R'mel, d'une puissance de 150 MWc dont 25 MWc exprime la partie solaire (environ 5 %). La technologie retenue est celle du cylindro-parabolique.

- L'APRUE (Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie) à lancé en 2009 une importante campagne de promotion des ampoules à basses consommation auprès de la clientèle résidentielle dans quatre wilayas du pays.

I.7. Programme national des énergies renouvelables :

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social.

L'Algérie projette de lancer un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation.

A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable.

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases [15]:

- D'ici 2013, il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW ;
- D'ici 2015, une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;
- D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2000 MW ;
- D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10000 MW.

Le développement du solaire photovoltaïque en Algérie entre 2011 et 2030 est subdivisé comme suit :

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- Sur la période 2011-2013, il est prévu d'atteindre un taux d'intégration de l'industrie algérienne de 60%. Cet objectif devrait être atteint grâce à la réalisation d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques.
- Sur la période 2014-2020, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration des capacités Algériennes de 80%. Pour ce faire, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium.
- Sur la période 2021-2030, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration supérieur à 80%. C'est pourquoi, la capacité de production des modules PV devrait être étendue pour atteindre les 200 MWc/an.

I.8. Principales sociétés intervenant au secteur :

I.8.1 New Energy Algeria :

New Energy Algeria (NEAL) a été créée en 2002 par la société nationale d'hydrocarbures, Sonatrach (45 % du capital) en partenariat avec la société nationale d'électricité, Sonelgaz (45 % du capital) et une société privée algérienne SIM. Elle a pour objet la promotion et le développement des énergies nouvelles et renouvelables [16].

Elle ambitionne de développer l'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables des énergies propres ainsi que le burpo (GPL) et sa commercialisation. Elle ambitionne aussi de commercialiser l'électricité sur le marché local à l'export, de produire de l'électricité à partir du solaire et de l'éolien, de promouvoir une industrie locale de fabrication de chauffe-eau solaires et de promouvoir l'énergie issue des piles photovoltaïques.

I.8.2. Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie :

L'Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) est l'instrument institutionnel dont s'est doté le gouvernement algérien pour animer la mise en œuvre de la politique de maîtrise de l'énergie [17].

L'agence a pour rôle principal la coordination et le suivi de la politique de maîtrise de l'énergie et de promotion des énergies renouvelables et la mise en œuvre des programmes concertés dans ce cadre avec l'ensemble des secteurs (industrie, bâtiments, agriculture...).

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.8.3.Centre de Développement des Energies Renouvelables :

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) est issu de la restructuration du Haut-commissariat à la recherche. Il est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherches et de développement scientifiques et technologiques de l'Algérie en matière d'énergies renouvelables.

Le centre collecte et analyse les données issues des différents gisements du pays, crée et applique les procédés et matériels destinés à l'exploitation et l'utilisation des ENR, élabore les normes de qualification des sites et des équipements entrant dans leur exploitation.

I.9.conclusion :

On a vu dans ce chapitre que l'énergie renouvelable et de plus en plus très répondeur dans la production mondiale de l'électricité .et aussi l'impact des énergies renouvelable sur l'environnement. En particulier, nous avons décrit le photovoltaïque en Algérie, le potentiel solaire, le potentiel énergétique et les projets réalisés mis en service.

Puis, nous avons procédé à la présentation des projets en cours de réalisation sur le territoire national qui couvrent différents domaines.

Enfin, les entreprises opérant dans le domaine photovoltaïque en Algérie ont été présentées.

chapitre II

II.1. Introduction :

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen de cellules photovoltaïques (PV).

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conversion photovoltaïque; dans un premier temps nous présenterons brièvement les notions préliminaires du rayonnement solaire, des semi-conducteurs et la jonction PN, ainsi que les technologies existantes de la cellule photovoltaïque. Dans un deuxième temps nous décrivons la structure, le principe de fonctionnement de la cellule solaire et les différents paramètres caractérisant la cellule photovoltaïque.

Nous étudierons ensuite, l'influence des paramètres météorologiques (température et éclairage) sur le comportement d'une cellule PV.

Nous terminons ce chapitre par la présentation des moyens de protection du module photovoltaïque contre le déséquilibre qui peut arriver. et enfin Avantages et inconvénients d'une installation PV.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

II.2.Soleil :

Sur le plan cosmogonique, le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau (II.1) montre quelques caractéristiques principales du soleil [18]:

| Caractéristique | Valeur |
|---------------------------|---------------------------|
| Masse | $1,989 \times 10^{30}$ kg |
| Diamètre | $1,392 \times 10^9$ m |
| Masse volumique moyenne | 1410 Kg m^{-3} |
| Puissance rayonnée | $3,83 \times 10^{26}$ W |
| Température superficielle | 5770 K |

Tableau (II.1) : Caractéristiques principales du soleil.

La structure du soleil est schématisée sur la figure (II.1). On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [18] :

❖ Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée (**15×10^6 K**) ainsi que sa pression (**2×10^{11} bars**) et sa densité (**$\sim 105 \text{ Kg.m}^{-3}$**), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre. L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

❖ La photosphère : est une couche d'environ **300 Km** d'épaisseur avec une température de **5770 K**. Elle donne l'image visible du soleil.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

❖ La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ **8 000 Km** et une température de **20 000 K** environ [18].

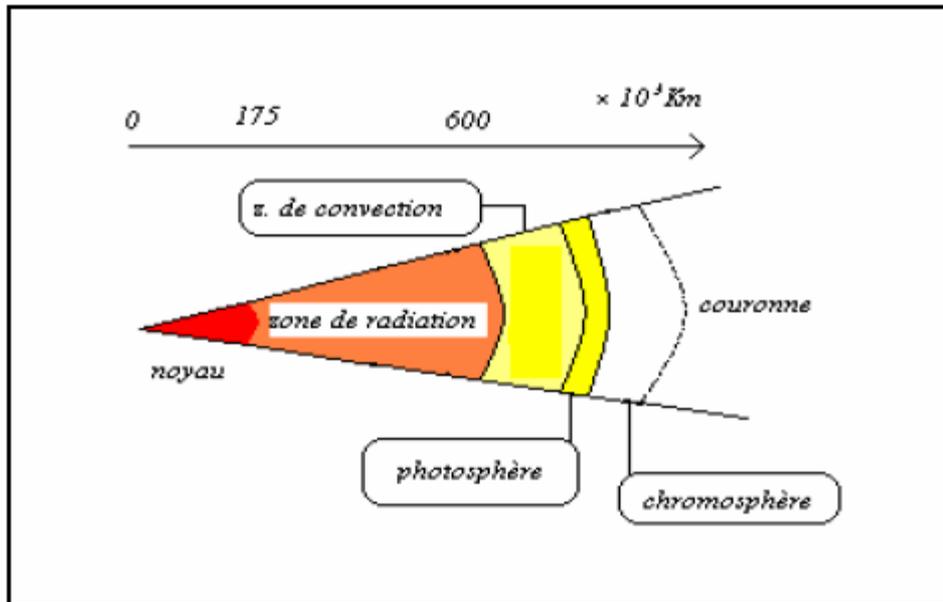


Figure (II.1) : Coupe schématique du soleil.

❖ La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [3] de **70 %** d'hydrogène et d'environ **28 %** d'hélium et le **2 %** restant étant mélange de plus de **100** éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [18] **$150 \times 10^6 \text{ Km}$** ; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient **8** minutes après avoir été émise.

II.2.1. Constante solaire :

Le constant solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère, sa valeur est communément prise égale à $1\,367 \text{ W/m}^2$.

II.2.2. Trajectoire du soleil :

La position du soleil à un instant donné peut être décrite par deux angles qui sont :

- Hauteur du soleil h : si l'on fait face au soleil, on le voit à une certaine hauteur qu'on appelle hauteur apparente ; c'est l'angle h entre le plan horizontal et la direction du soleil. Elle détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère,
- L'azimut α : c'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan horizontal et la direction du sud.

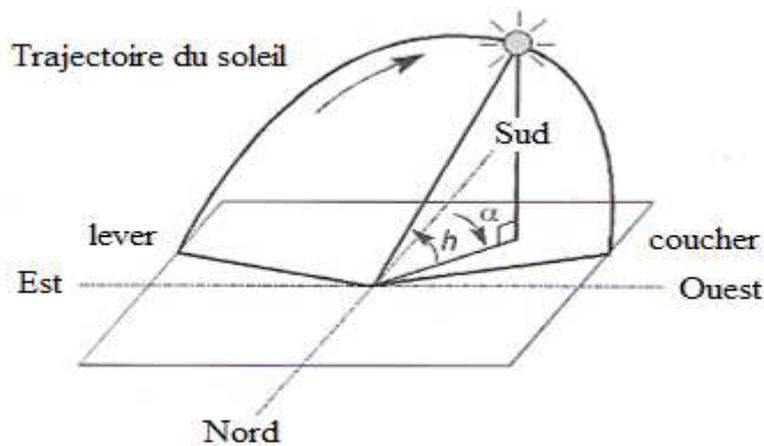


Figure (II.2) : Course du soleil. [19]

II.2.3. Masse d'air :

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident on introduit un coefficient appelé nombre de masse d'air AM (Air Mass en Anglais). Par définition, c'est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu [19]. Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil h .

À l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure (II.3), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II.1})$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

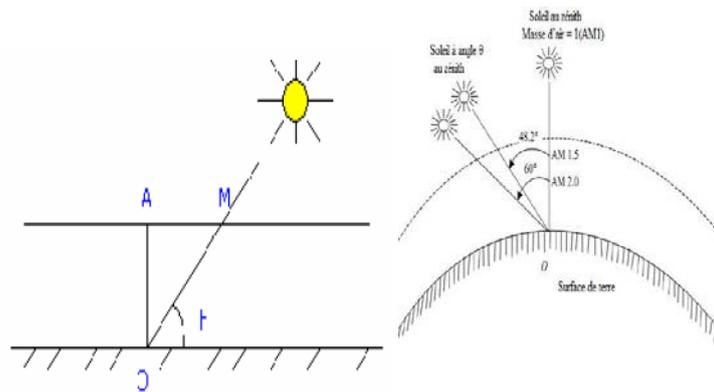
$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II.2})$$

La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension AMx , x étant [1]:

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II.3})$$

Citons, à titre d'exemple :

- ❖ AM1 : position du Soleil au zénith; $h=90^\circ$, (au niveau de la mer).
- ❖ AM2 : le Soleil à 30° .
- ❖ AM1,5 : le Soleil à 41.8° .



Figure(II.3) : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1,5.

Quand le soleil fait un angle de $48,2^\circ$ par rapport au zénith, le rayonnement incident est dit AM1,5. Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère [19].

II.3.rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (II.4) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

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

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200 \text{ W}/\text{m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

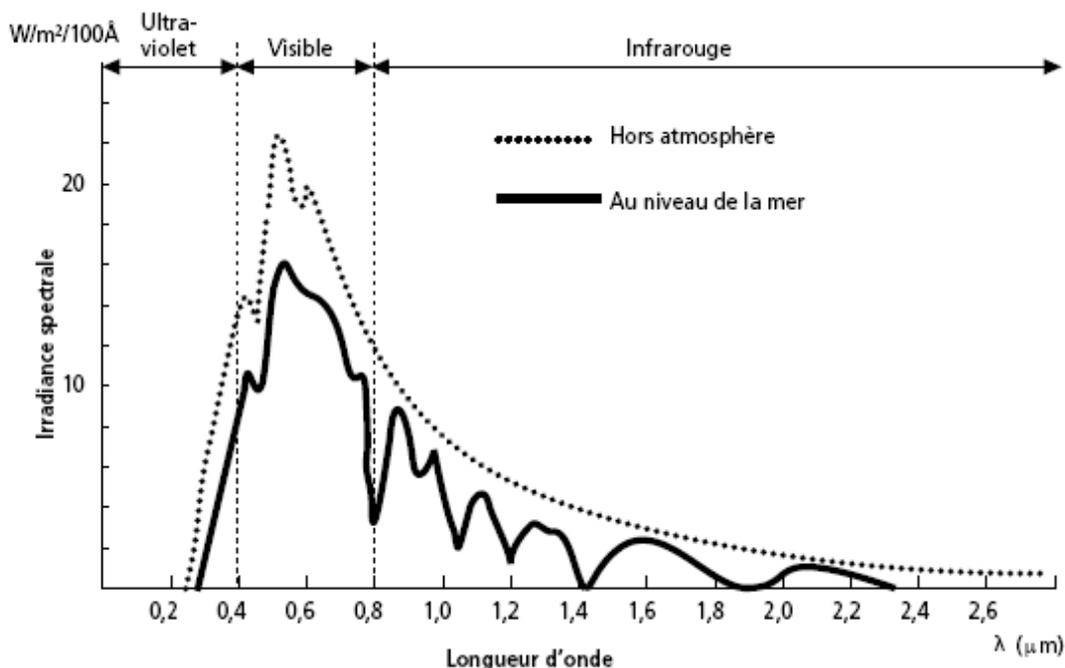


Figure (II.4) : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

II.3.1.composantes du rayonnement solaire :

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses déperditions du fait de son absorption par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Donc, on distingue trois composantes :

II.3.2. Rayonnement direct :

Le rayonnement direct c'est le rayonnement reçu directement de soleil sans diffusion par l'atmosphère.

II.3.3. Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus c'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, le rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, ...) et à sa réflexion par les nuages.

II.3.4. Rayonnement réfléchi :

Le rayonnement réfléchi c'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant sur sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol (environnement du site), et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neiges, eau, etc.). Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur des plans inclinés. Donc, le rayonnement global est la contribution de diverses composantes du rayonnement solaire.

II.3.5. Le rayonnement global :

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

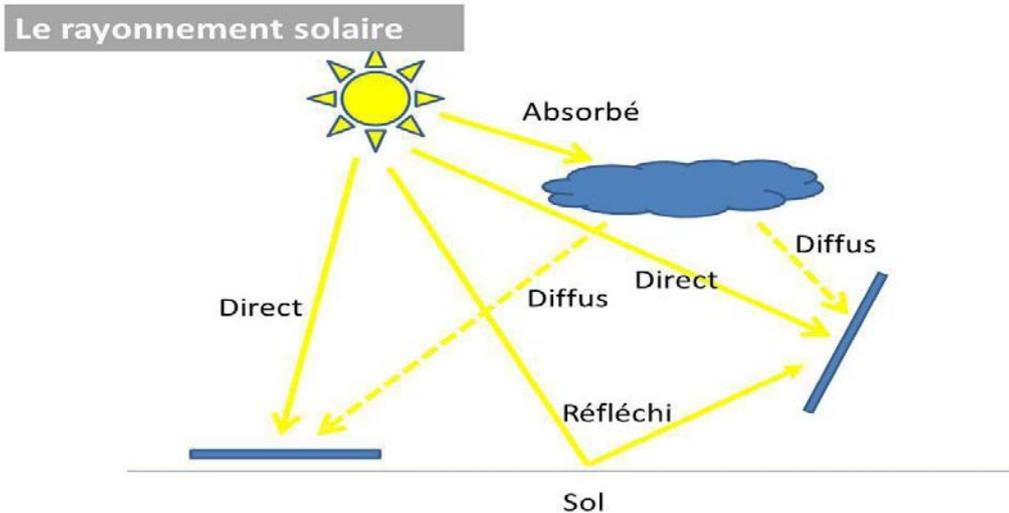
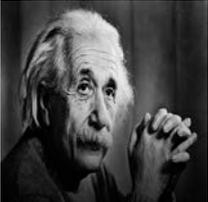


Figure (II.5) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

II.4.Historique :

| | |
|---|--|
|  | L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Antoine Becquerel (1788-1878) en 1839 constate les effets électriques que produisent les rayons Solaire est dans une pile. |
|  | la première cellule solaire au sélénium fut construite en 1883 par l'américain CHARLES FRITTS enduit le matériau semi-conducteur de sélénium avec une couche extrêmement mince d'or. |
|  | -En 1887 L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz. |
|  | -En 1913 William Coblentz dépose le 1er brevet pour la cellule photovoltaïque qui convertie l'énergie solaire en énergie électrique. |

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

| | |
|---|---|
|  | <p>Albert Einstein, (1879-1955) en 1904 découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la Fréquence de l'onde électromagnétique. Et reçu le prix Nobel en 1921.</p> |
|  | <p>-les laboratoires BELL (CHARPIN, PEARSON et PRICE) présentent première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4% le 25 avril 1954.</p> |
|  | <p>-1^{er} installation photovoltaïque dans un satellite artificiel américain Vanguard 1 en 1958 (rendement 9% et 0.1w)</p> |
|  | <p>-1^{er} maison photovoltaïque, Solar One construite à l'université de DELAWARE à l'USA en 1973</p> |
|  | <p>-1^{er} installation photovoltaïque reliée au réseau électrique en Europe (TISO en Suisse) en 1982</p> |

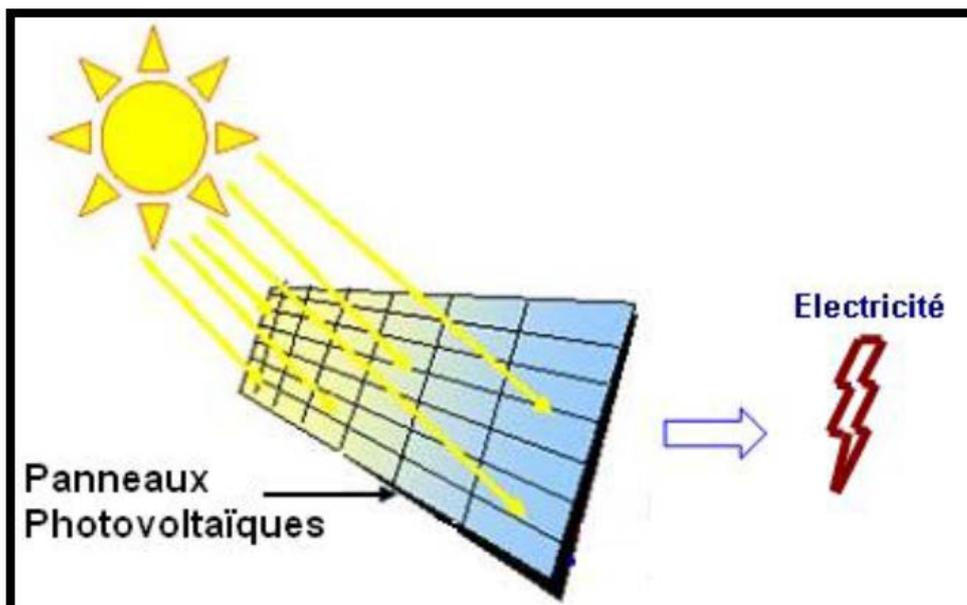
Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

| | |
|---|--|
|  | <p>-1^{er} voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie en 1983</p> |
|  | <p>Les 1ers programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau sont lancés au Japon et en Allemagne en 1995.</p> |

Tableau (II.2) : Evénements notables dans l’histoire du photovoltaïques.

II.5.La conversion de la lumière en électricité:

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L’effet photovoltaïque est la conversion directe de l’énergie solaire en électricité.



Figure(II.6) : Conversion de l’énergie solaire en électricité.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

II.6.Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

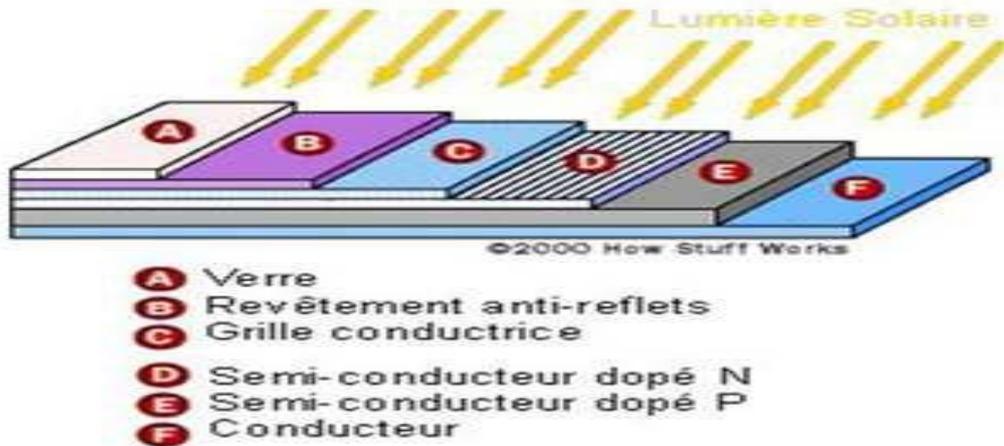


Figure (II.7) : Structure basique d'une cellule solaire.

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 et du vieillissement de la cellule [20].

II.6.1. Les semi-conducteurs :

Les semi conducteurs sont des éléments naturels. Sensible à la lumière visible et invisible (rayon ultraviolet, infrarouge...). Ils conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais que la température est plus élevée (exemple types : silicium Si le germanium Ge) la bonne conductivité électrique des métaux est due à la présence de électrons libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique.

II.6.2. Les matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle de l'isolant les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

II.6.2.1.Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté. Susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. Il en résulte que les électrons et les trous n'existent nécessairement que par paires.

II.6.2.2.Semi-conducteur extrinsèque :

La diffusion des impuretés dans un cristal semi-conducteur, crée des porteurs libres, qui participent à la conduction et cette opération est appelée dopage. Les atomes d'impuretés sont généralement trivalents ou pentavalents.

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur dopé. Si ce semi-conducteur est dopé par des atomes de la colonne V (phosphore), dont l'atome de phosphore remplace l'atome de silicium dans le réseau cristallin, et établit quatre liaisons de valence avec le silicium, et son cinquième électron sera libéré à faible augmentation de température, on dit que le phosphore est un atome donneur ; et le semi-conducteur est de type P.

Dans le cas contraire, où le semi-conducteur est dopé par des atomes de la colonne III (bore), d'où l'établissement de trois liaisons avec les atomes de silicium voisins, et reste un atome de silicium non lié, donc il y a un déficit en électron, on dit que le bore est un atome accepteur ; et le semi-conducteur est de type N.

II.6.3.Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre.

On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

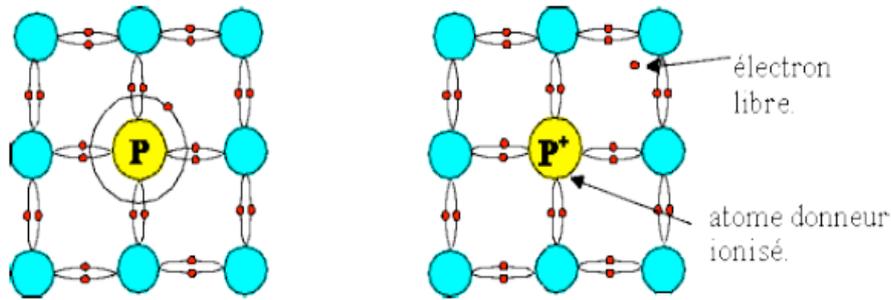


Figure (II.8) : dopage de type N

II.6.3. Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

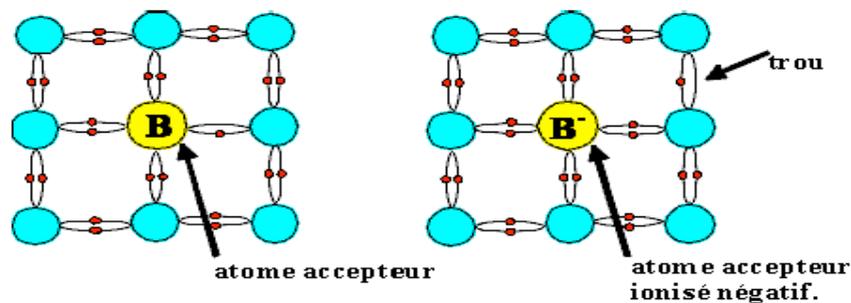


Figure (II.9) : dopage de type P

II.6.4. La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

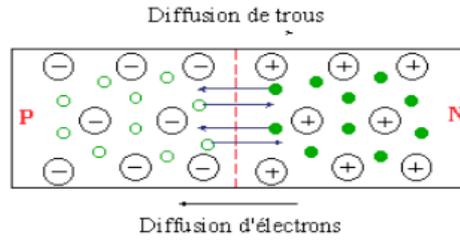


Figure (II.10) : jonction PN

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

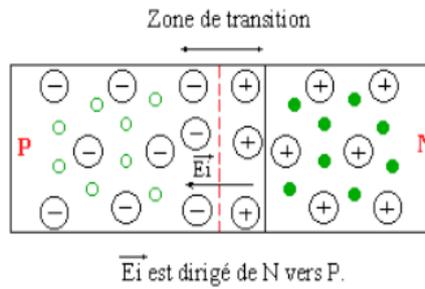
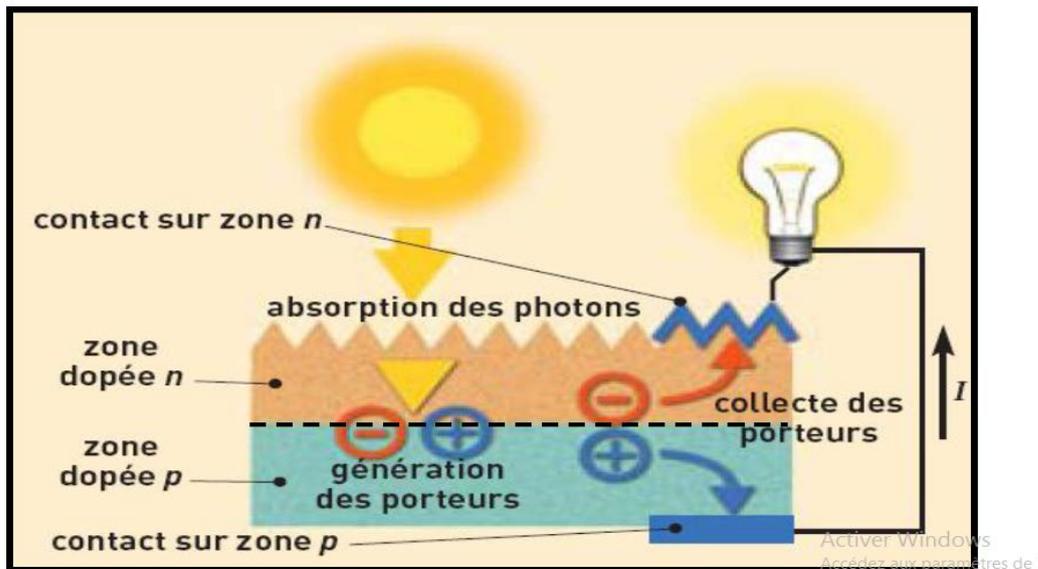


Figure (II.11) : la zone de transition.

II.7.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.



Figure(II.12) : Principe de la conversion photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N

II.8. Technologies des cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base D'arséniure de Gallium (GaAs), cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant

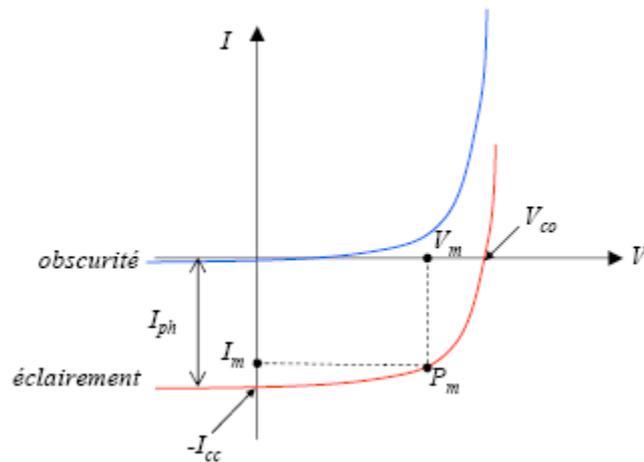
Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

| Type de cellules | Rendements des cellules (%) | | | Domaines d'applications |
|---------------------------|-----------------------------|---------|------------|---|
| | Théorique | En labo | disponible | |
| Silicium monocristallin | 27 | 24.7 | 14.6 | Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites) |
| Silicium poly cristallin | 27 | 19.8 | 12-14 | Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés) |
| Silicium amorphe | 25 | 13 | 6-8 | Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre, de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) |
| Arséniure de gallium GaAs | 29 | 27.5 | 18-20 | Système de concentrateur, espace (satellites) |
| CIS | 27.5 | 18.2 | 10-12 | Appareils de faibles puissances, modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) |
| Tellure de cadmium CdTe | 28.5 | 16 | 9-11 | Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment) |

Tableau (II.3) : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

II.9. Caractéristique électrique :

La variation du courant « A » (ou densité du courant « A/cm² ») en fonction de la tension « V », à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire; la figure (II.13) montre deux exemples de caractéristiques I – V de cellule solaire sans et avec éclairage.



Figure(II.13) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairage. [21]

II.9.1. Circuit électrique équivalent :

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s. Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante [22]

$$I_{\text{obs}} = I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

Ou

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_{th}: le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.5})$$

Ou

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).

Sous éclairement, un terme **I_{ph}**, tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représentée par l'équation suivante

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

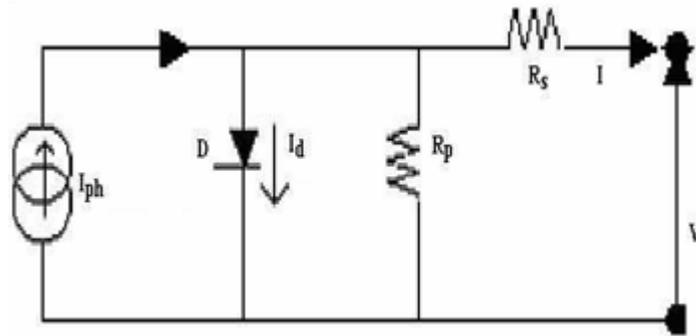
Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt $G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$ pour écrire l'équation (II.7) sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - G_{sh} (V + IR_s) \quad (\text{II.8})$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (II.14) par un générateur de courant (**I_{PH}**), une diode et deux résistances parasites (**R_S**) et (**R_{Sh}**).



Figure(II.14) : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire a jonction P-N [22]

- ❖ Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- ❖ La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- ❖ La résistance série R_s : modélise [23] les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_j aux bornes de la jonction pn. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- ❖ La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond [23] à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

II.9.2. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire :

À partir de la caractéristique I-V sous éclairage illustrée au dessus dans la figure (II.13), on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs [24]; I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m :

❖ Le courant de court circuit I_{cc} :

Le courant de court circuit I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ($V=0$). D'ou, en annulant la tension V dans l'équation (II.7), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{n V_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Pour la plus part des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme

$$I_s \left(\exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right)$$

devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas idéal [26] ($R_s \rightarrow 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (\text{II.11})$$

Le courant de court circuit I_{cc} se confond avec le photo courant I_{ph} :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (\text{II.12})$$

❖ La tension en circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation

$$V_{co} = nV_{th} \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.13})$$

❖ Le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_m = I_m \times V_m \quad (\text{II.14})$$

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement.

❖ Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini [23] comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$); d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.15})$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_m sera égale à ($I_{cc} \times V_{co}$). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre, s'appelle le rendement η :

Il est défini [23] comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est l'éclairement -irradiance- (en W/m^2) le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (\text{II.16})$$

Ou d'après (II.15)

$$P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (\text{II.17})$$

II.10. Les zones de caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (II.15) représente trois zones essentielles [27] :

a) **La zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région,

Le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) **La zone (2) :** correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire

Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du

Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **La zone (3) :** 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.

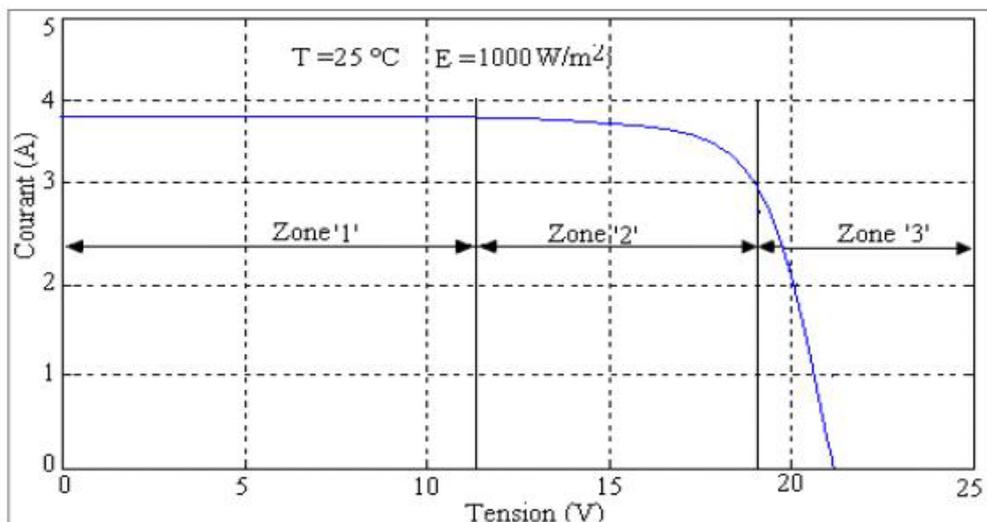
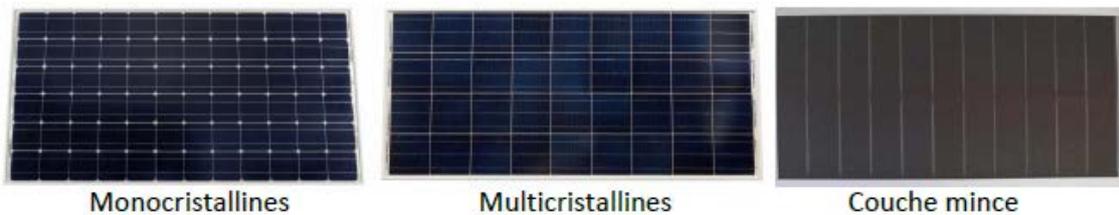


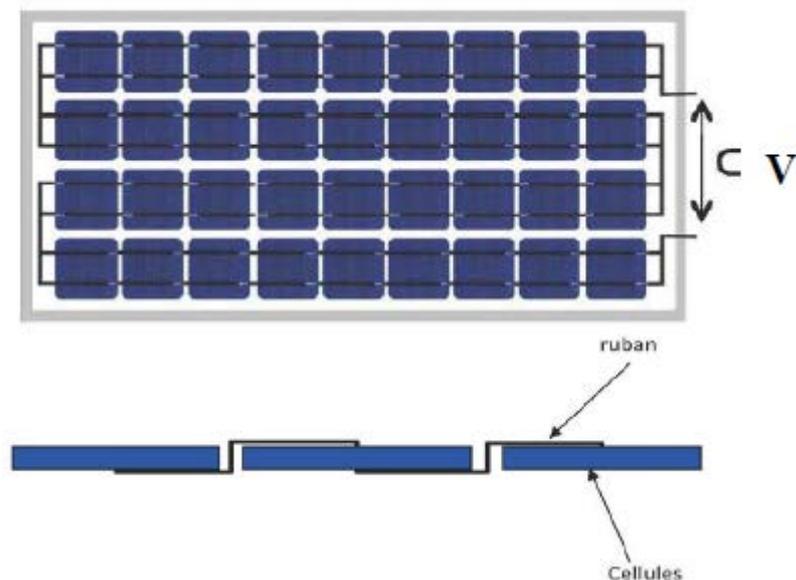
Figure (II.15) : Les différentes zones de Caractéristique I-V entre générateur et module Photovoltaïque

II.11. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [28].



Figure(II.16) : Module photovoltaïque.



Figure(II.17) : Câblage des cellules dans un module.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [28].

II.11.1.Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [28].



Figure(II.18) : Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



Figure(II.19) : Boîte de dérivation.

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation [28].

II.11.2. La constitution d'un module photovoltaïque :

- Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

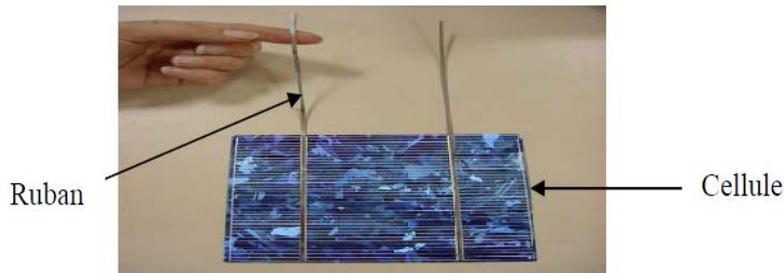


Figure (II.20) : Ruban métallique d'une cellule.

- les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR

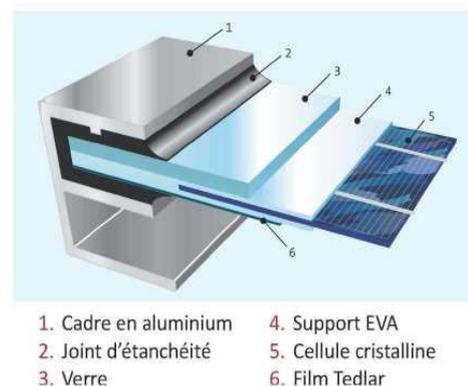
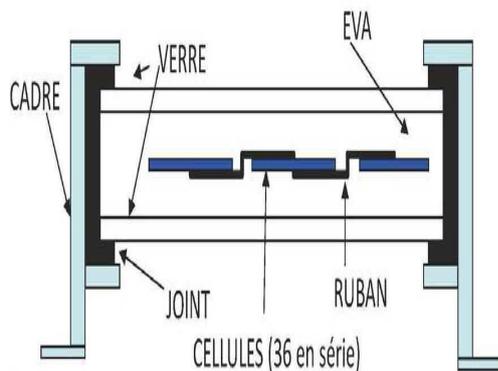


Figure (II.21) : Encapsulation des cellules.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés

II.11.3. Les principales caractéristiques d'un module :

❖ Puissance crête :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . En France l'éclairement maximum reçu, la puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir.

❖ Rendement :

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

❖ Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale P_o et la puissance maximale P_m que peut avoir la cellule : V_{co} , I_{cc} .

❖ Caractéristique courant-tension d'un module :

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [29].

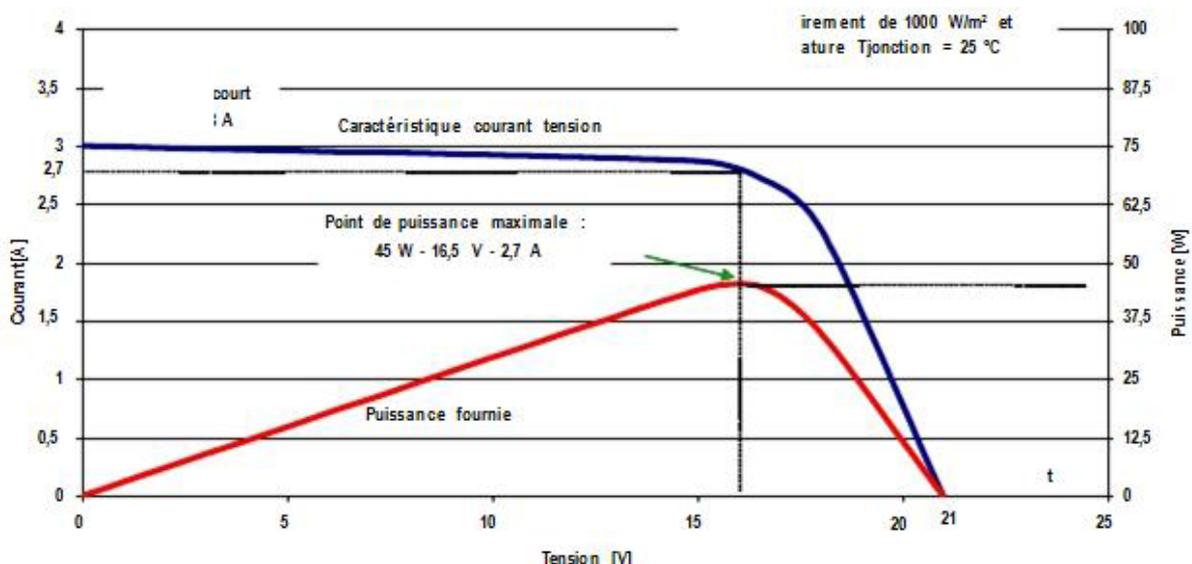


Figure (II.22) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

II.12. Influence de l'Éclairement :

Les figures (II.23) et (II.24) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement:

Nous avons fixé la température pour différents éclairagements.

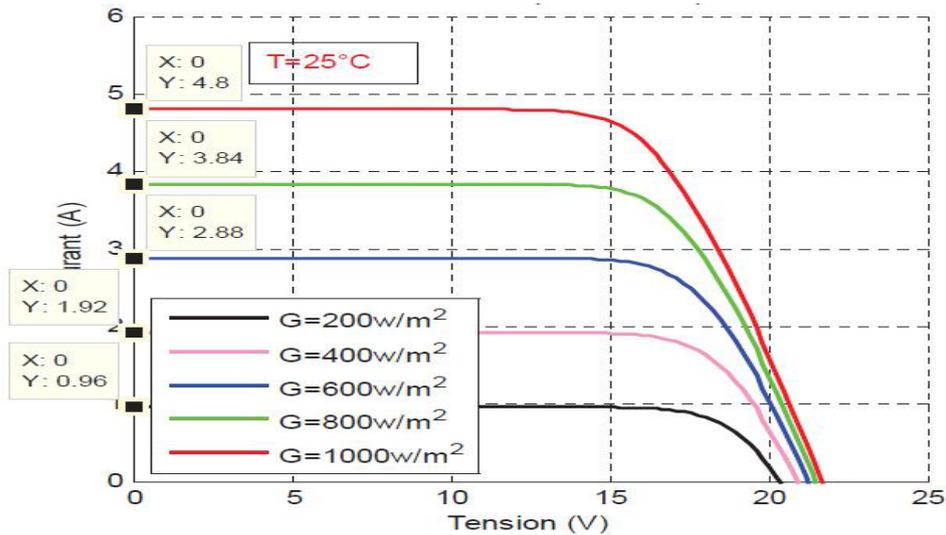


Figure (II.23) : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement [30].

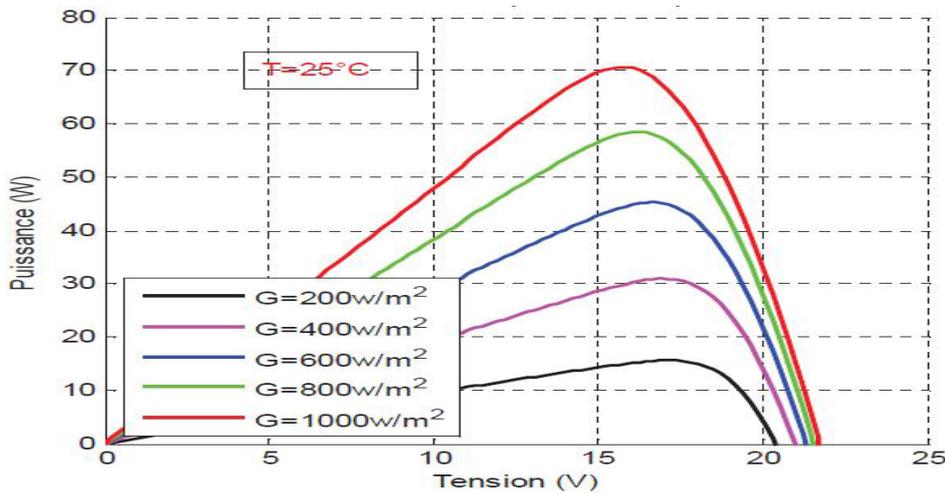


Figure (II.24) : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement [30].

Pour la figure (II.23) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=4.8\text{A}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ le courant $I_{sc}=3.84\text{A}$ 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.

II.13. Influence de la Température :

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figure (II.25) et (II.26) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

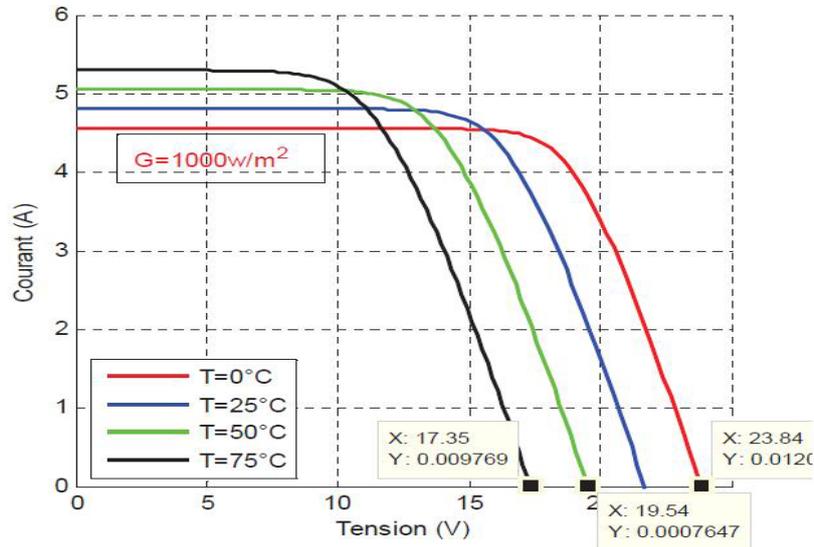


Figure (II.25) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température [30].

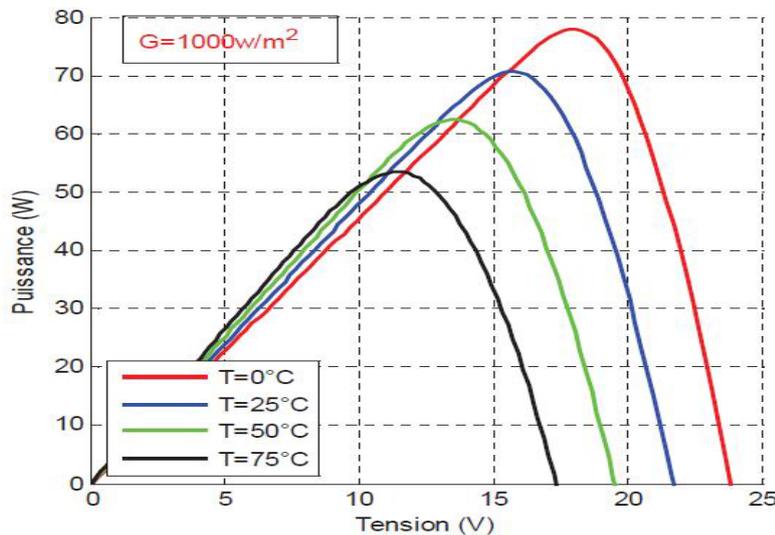


Figure (II.26) : La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température [30].

Pour la figure (II.25) 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 (II.26).

II.14. Association des cellules :

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elle pour former un module photovoltaïque. Ainsi que le regroupement de ces modules pour former un panneau solaire. Dans un module les cellules on toujours regroupés en série alors que dans un panneau les modules sont groupés en parallèle ou série parallèle. La figure (II.27) montre une association des cellules :

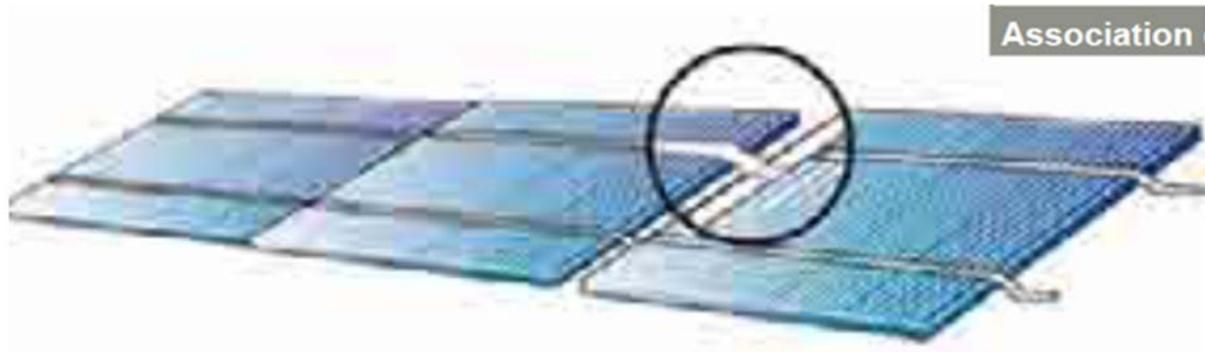


Figure (II.27) : Association des cellules.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pn} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

(II.18)

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV

V_{pn} : la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

II.14.1. Connexion en série :

Dans un groupement en série, les cellules produisent le même courant dans toute la branche. On prendra soin de ne pas connecter en série que des cellules de caractéristique identique. La tension du panneau sera l'addition de toutes les tensions des cellules qui le compose. La caractéristique courant tension d'un groupement série sera homothétique de la courbe $I(V)$ d'une cellule de base.

$$V_{CO_{tot}} = \sum_{i=1}^{i=N} V_1 = NV_{CO} \quad (\text{II.19})$$

$$I_{CC_{tot}} = I_{CC} \quad (\text{II.20})$$

Avec : N : Nombre de cellules en série.

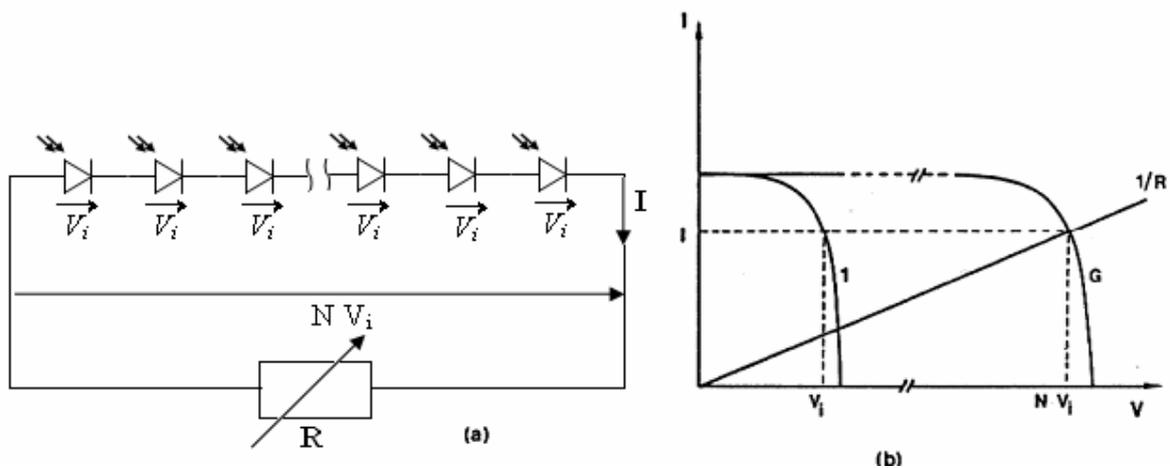


Figure (II.28) : Connexion en série.

II.14.2. Connexion en parallèle :

Pour un groupement en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension. Les courants dans ce cas s'ajoutent. La caractéristique du module figure (II.29) est obtenue en multipliant point par point pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par Np . Pour les résistances on additionne les inverses des résistances série et parallèle [31].

$$V_{CO_{tot}} = V_{CO} \quad (\text{II.21})$$

$$I_{cc_{tot}} = \sum_{i=1}^{i=N_p} I_i = N_p I_{cc} \quad (\text{II.22})$$

Ou : N_p : Nombre de cellules en parallèle.

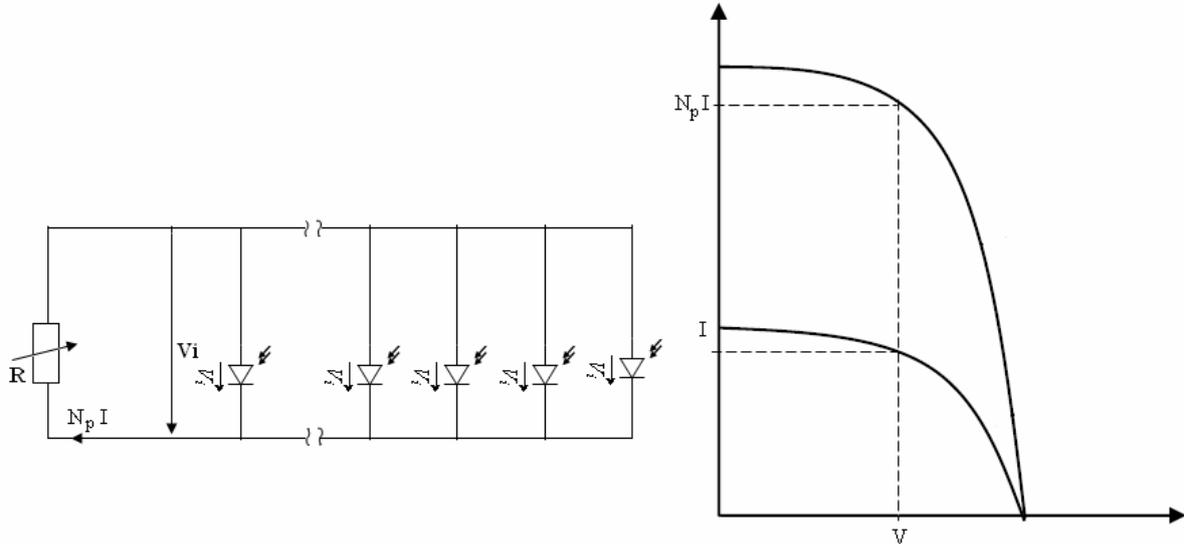


Figure (II.29) : Connexion en parallèle.

II.14.3. Connexion mixte :

Le groupement mixte ou hybride figure (II.29) est un assemblage de N branches de cellules photovoltaïques en parallèles, ou chaque branche est l'association de M cellules en séries. Les valeurs de la tension du circuit ouvert V_{pv} et le courant de court circuit I_{pv} délivré par ce panneau photovoltaïque sont en fonction des caractéristiques des cellules élémentaires

(V_{co} , I_{cc}), donné par :

$$V_{pv} = M V_{co} \quad (\text{II.23})$$

$$I_{pv} = N I_{cc} \quad (\text{II.24})$$

La puissance fournie par le module est :

$$P_{pv} = M N V_{co} I_{cc} \quad (\text{II.25})$$

Avec : V_{co} , I_{cc} : tension de circuit ouvert et courant de court circuit de la cellule élémentaire.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

M, N : nombre de cellules en séries et nombre de branches en parallèles.

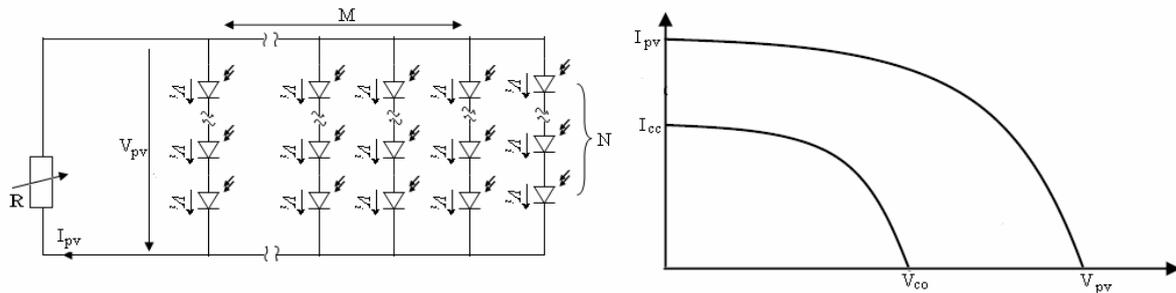


Figure (II.30) : Connexion mixte.

II.15. Déséquilibre dans un générateur PV :

Dans les associations série et parallèle, les modules PV étaient considérés identiques vis-à-vis de l'éclairement et de la température, mais en réalité, ce n'est pas toujours le cas. Les problèmes rencontrés sont liés au fait qu'une cellule peut être amenée à travailler comme récepteur électrique au lieu de générer de l'énergie. Cela se produit notamment si elle est ombragée.

Donc, elle est soumise à une tension inverse égale à la somme des tensions de toutes les autres cellules

Pour cela, il faut assurer une protection contre ces phénomènes de retour de courant qui causent des risques destructifs, comme le montre la figure

II.15.1. 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

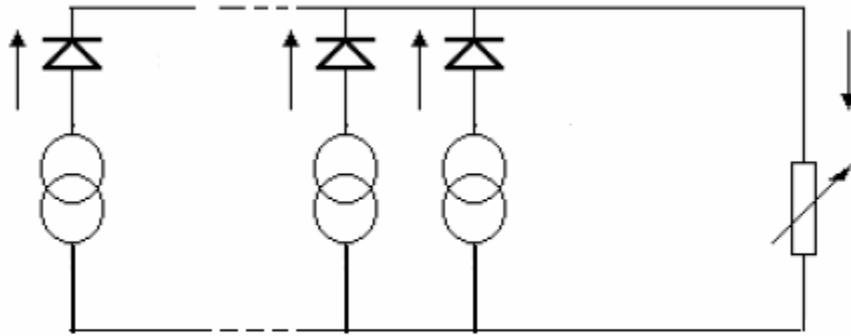


Figure (II.31) : Protection par diode anti -retour.

II.15.2. 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.

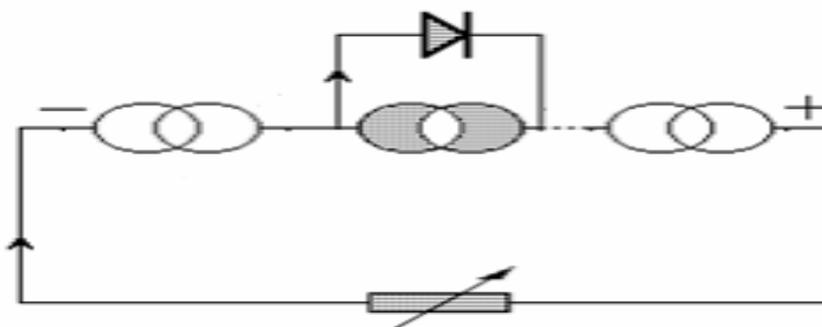


Figure (II.32) : Protection par diode by-pass.

II.16. 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 Méga Watt

- 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 [27].

❖ **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, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) 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 1 eV. 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 [27].

II.17.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil), le monde de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule Photovoltaïque et module photovoltaïque.

chapitre III

III.1.Introduction :

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [32].

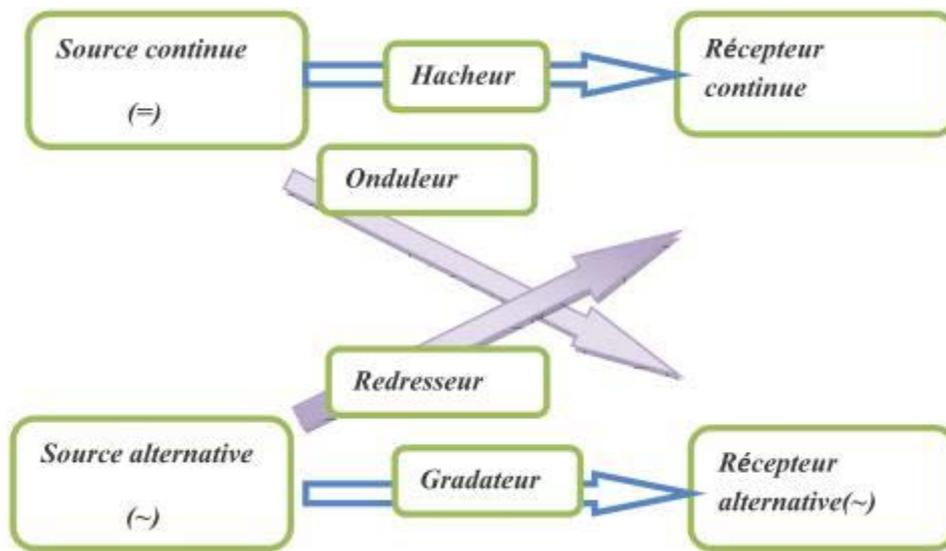


Figure (III.1) : les différents types de convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement on commence par les convertisseurs (DC-DC) et sont différents types, et on termine par les convertisseurs (DCAC).

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation

III.2.Les Hacheurs :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [33].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a des bons rendements dans les hacheurs [34].

Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [35].

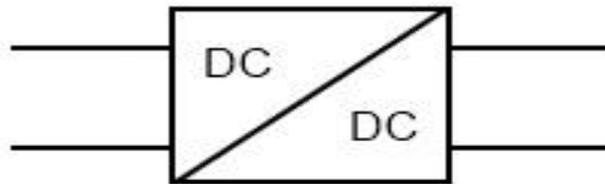


Figure (III.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

III.2.1.Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer:

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck).
- hacheur élévateur (ou boost) [3].

III.2.2.Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (III.3) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [28].

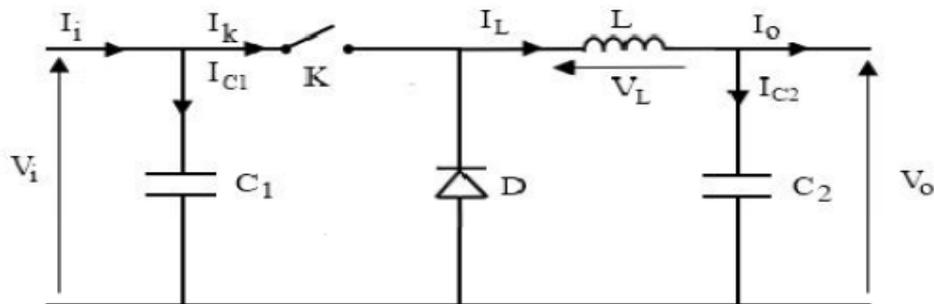


Figure (III.3) : Schéma électrique d'un hacheur buck.

a)-Fonctionnement

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

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [28].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (III.4) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [28].

$$V_0 = \alpha \cdot v_i \quad (III.1)$$

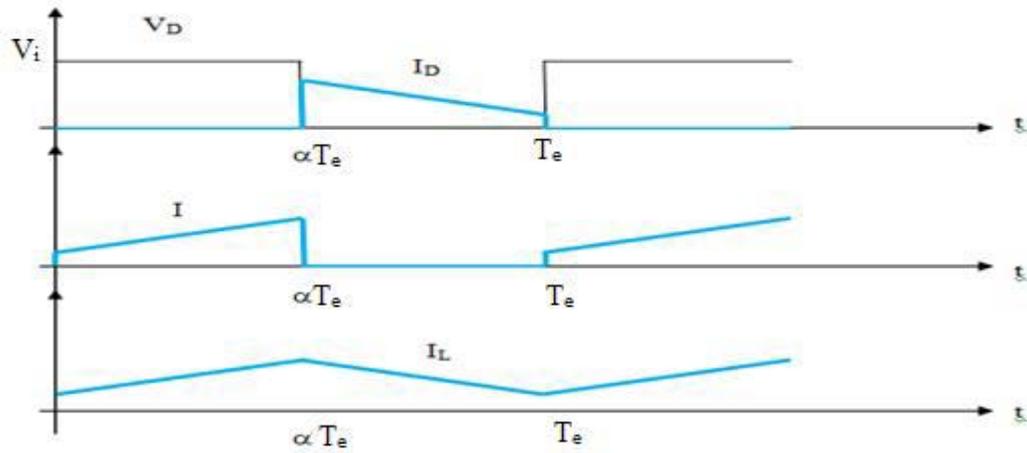


Figure (III.4) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (III.6) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha) T_e$ [28].

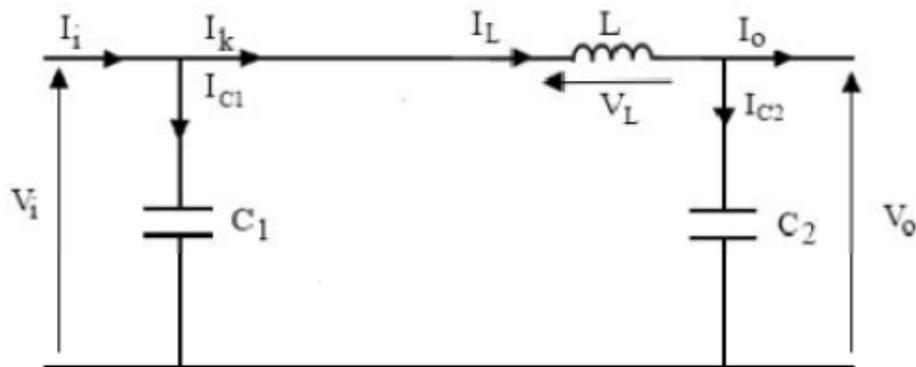


Figure (III.5) : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (III.2)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (III.3)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (III.4)$$

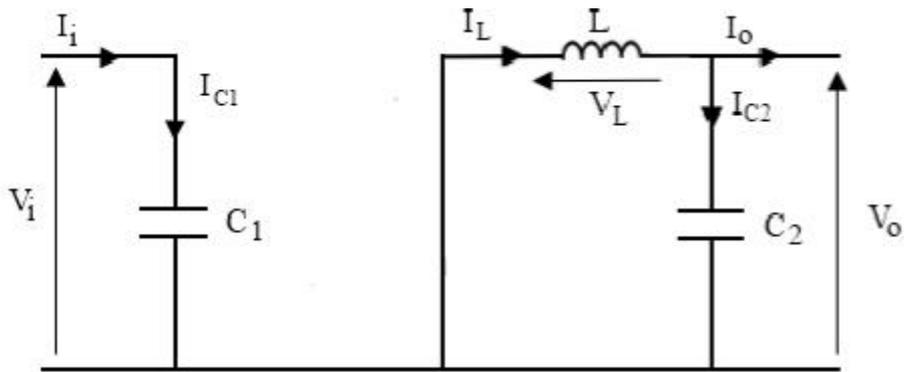


Figure (III.6) : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (III.5)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (III.6)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (III.7)$$

III.2.3.Hacheur boost:

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [28]. Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (III.7). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [34].

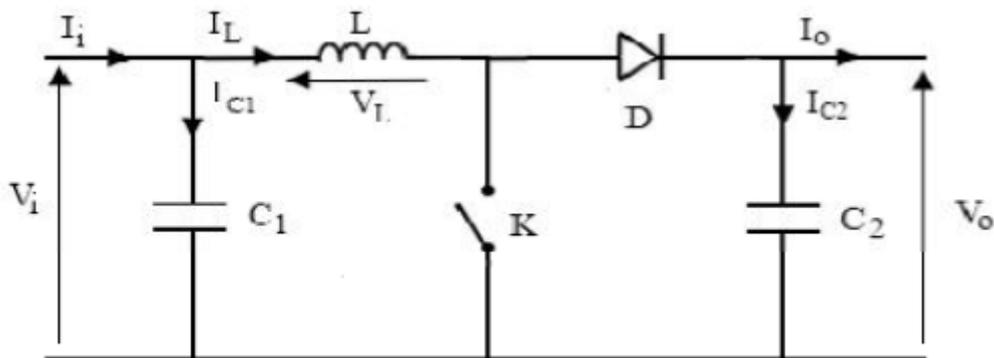


Figure (III.7) : Schéma électrique d'un hacheur boost

a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [28]

$$V_0 = (1 - \alpha)V_i \quad (III.8)$$

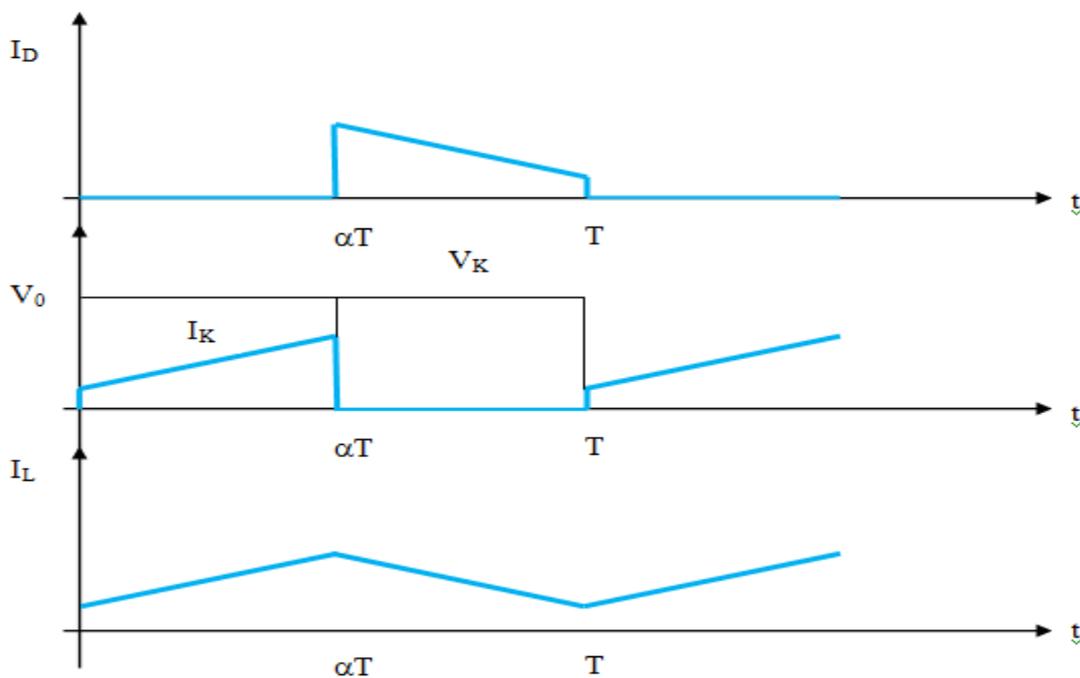


Figure (III.8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (III.9) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre $[0, \alpha T_e]$ [28].

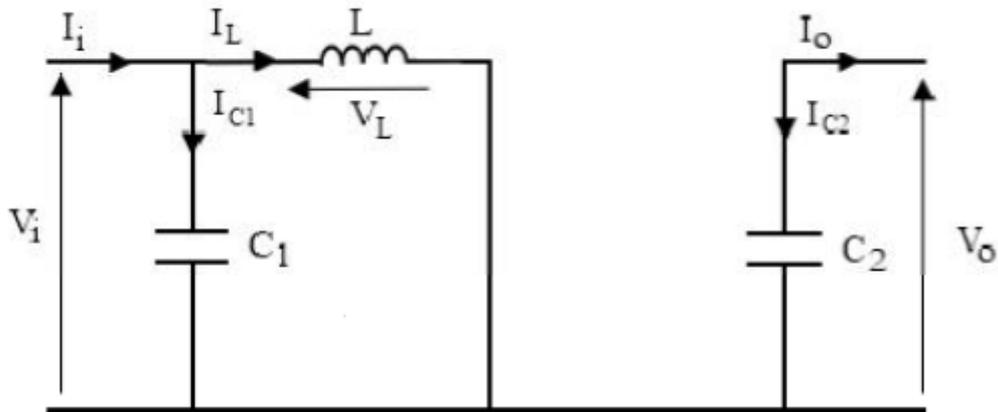


Figure (III.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (III.9)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = -I_O(t) \quad (III.10)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (III.11)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

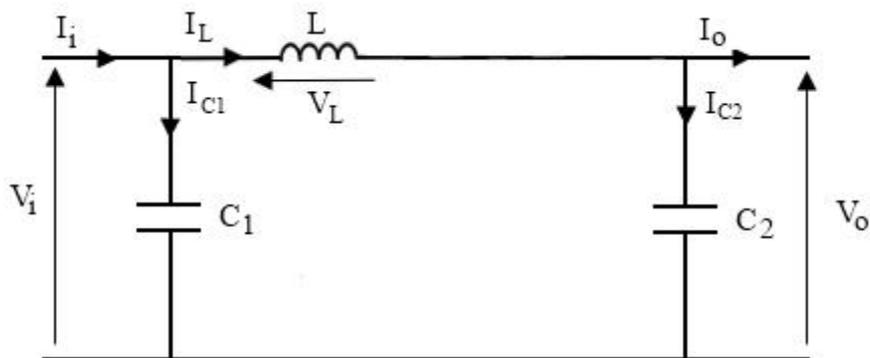


Figure (III.10) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{III.12})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (\text{III.13})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (\text{III.14})$$

III.3. Les onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [36].

III.3.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [30].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

III.3.2. Onduleur triphasé :

Afin de convertir la tension à la sortie du générateur photovoltaïque en tension alternative on doit utiliser un onduleur de tension MLI.

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif ; il permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée.

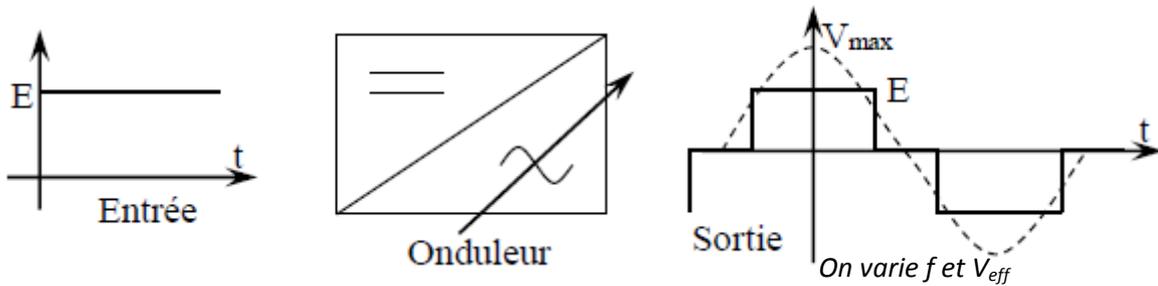


Figure (III.11) : symbole d'un convertisseur continu alternatif

Selon la nature de la source à l'entrée, on distingue :

- Onduleur de tension
- Onduleur de courant

III.3.3. Domaine d'utilisation des onduleurs :

Les onduleurs sont utilisés dans plusieurs applications industrielles :

- Alimentation sans interruption : En temps normal, la batterie est maintenue en charge, mais l'énergie est fournie par le réseau via le redresseur et l'onduleur. En cas de défaut de réseau, l'énergie est fournie par la batterie via l'onduleur.

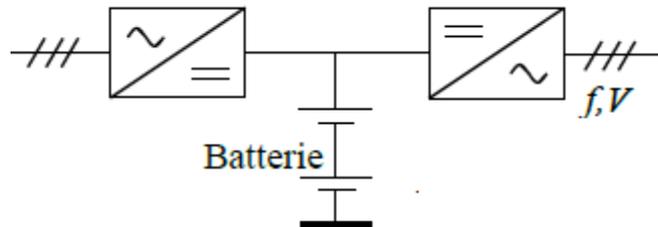


Figure (III.12) : Alimentation sans interruption

- Alimentation des moteurs à courants alternatifs à fréquence et tension variables : (éventuellement réversible)

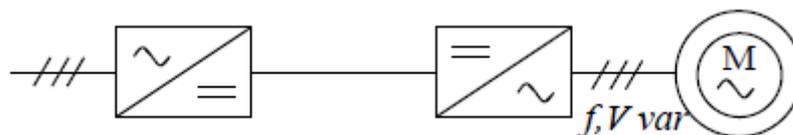


Figure (III.13) : Alimentation d'un moteur à courant alternatif à travers un onduleur

- Alimentation de charges réactives (fours, ou onduleurs "à résonance", ...).

III.4. La commande à MLI :

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse With Modulation ou **Modulation de la Largeur d'Impulsion** en Français) est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois référence sinusoïdales sont déphasées de 120° à la même fréquence f

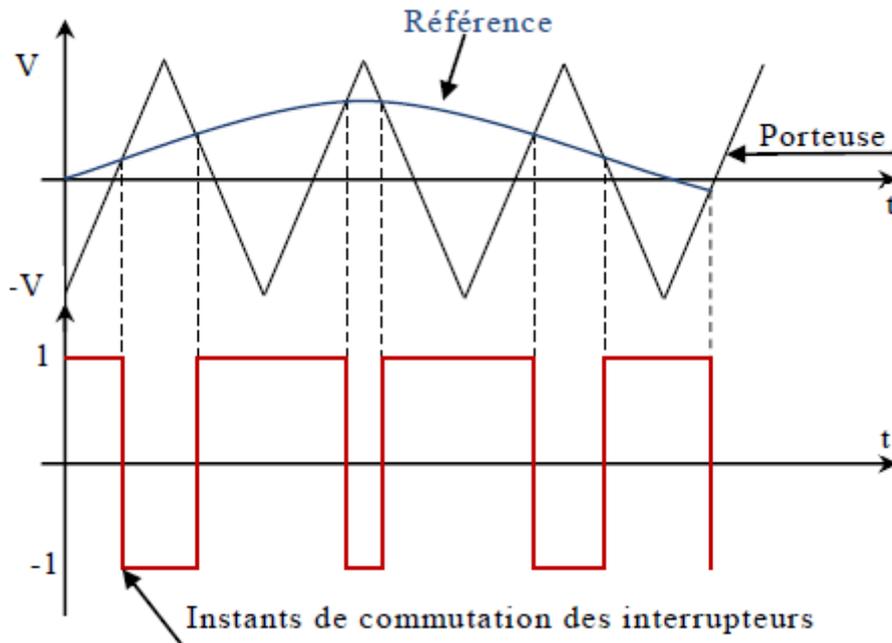


Figure (III.14) : Principe de la MLI bipolaire.

III.4.1. Caractérisation de la modulation :

Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :

- **L'indice de modulation m** , égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) sur la fréquence de la référence (modulante).

$$m = \frac{f_p}{f_m} \text{ Avec } m > 1 \quad (\text{III.15})$$

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

On choisit généralement m supérieure à l'unité parce que l'augmentation mène au déplacement des harmoniques vers des fréquences élevés. Dans la simulation on constate que les valeurs très élevées de m provoquent une augmentation des déchets de tension, ce qui nous oblige à optimiser la valeur de m .

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{III.16})$$

- **Le coefficient de réglage en tension 'r'**, égal au rapport de l'amplitude de la tension de la référence sur celle de la porteuse.

D'ordinaire la modulation est **synchrone**, c'est-à-dire f_p est un multiple entier de f_m . La tension de sortie u est alors vraiment périodique et a bien une période T égal à $1/T_m$.

Mais 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. En modulation synchrone, si m est impair, l'alternance négative de u reproduit au signe près son alternance positive. Le développement en série de Fourier de u ne comporte que des harmoniques impairs.

La tension à la sortie du redresseur sera convertie en alternatif par un onduleur de tension triphasé à commande MLI

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif ; il permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée.

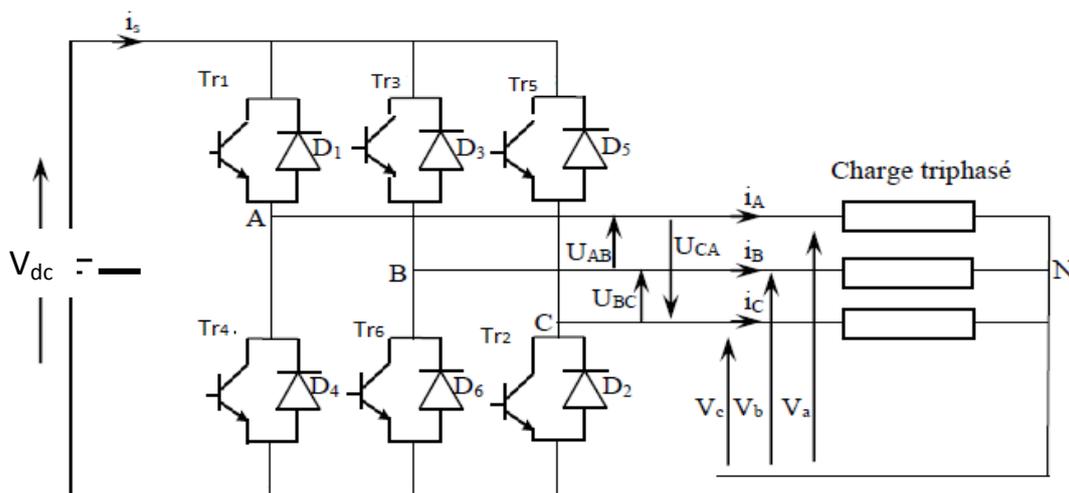


Figure (III. 15) : onduleur de tension triphasé

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

La commande des six interrupteurs est complémentaire. Ils imposent les tensions composées à la sortie de l'onduleur ; ainsi pour la tension V_{AB} on aura :

$$V_{AB} = V_{dc} \text{ si } K_1 \text{ est fermé et } K_2 \text{ est ouvert ;}$$

$$V_{AB} = 0 \text{ si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermés}$$

$$V_{AB} = -V_{dc} \text{ si } K_1 \text{ est ouvert et } K_2 \text{ est fermé}$$

$$V_{AB} = 0 \text{ si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ ouverts}$$

Si le récepteur est équilibré, on peut passer des tensions composées aux tensions simples par les relations suivantes :

$$V_{AN} = \frac{1}{3}(V_{AB} - V_{CA}) \tag{III.17}$$

$$V_{BN} = \frac{1}{3}(V_{BC} - V_{AB}) \tag{III.18}$$

$$V_{CN} = \frac{1}{3}(V_{CA} - V_{BC}) \tag{III.19}$$

| | K_1 | K_2 | K_3 | V_A | V_B | V_C |
|---|-------|-------|-------|--------------|---------------|--------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | $2/3V_{dc}$ | $-1/3 V_{dc}$ | $-1/3V_{dc}$ |
| 2 | 1 | 1 | 0 | $1/3V_{dc}$ | $1/3V_{dc}$ | $-2/3V_{dc}$ |
| 3 | 0 | 1 | 0 | $-1/3V_{dc}$ | $2/3V_{dc}$ | $-1/3V_{dc}$ |
| 4 | 0 | 1 | 1 | $-2/3V_{dc}$ | $1/3V_{dc}$ | $1/3V_{dc}$ |
| 5 | 0 | 0 | 1 | $-1/3V_{dc}$ | $-1/3V_{dc}$ | $2/3V_{dc}$ |
| 6 | 1 | 0 | 1 | $1/3V_{dc}$ | $-2/3V_{dc}$ | $1/3V_{dc}$ |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau (III.1) : donne les huit combinaisons possibles des trois interrupteurs

Vu que la commande des interrupteurs est complémentaire, on peut utiliser une onde de modulation unique. Ses interactions avec les trois tensions de référence, une par demi-pont, donnent les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs K_1 et K_4 , K_3 et K_6 , K_5 et K_2 .

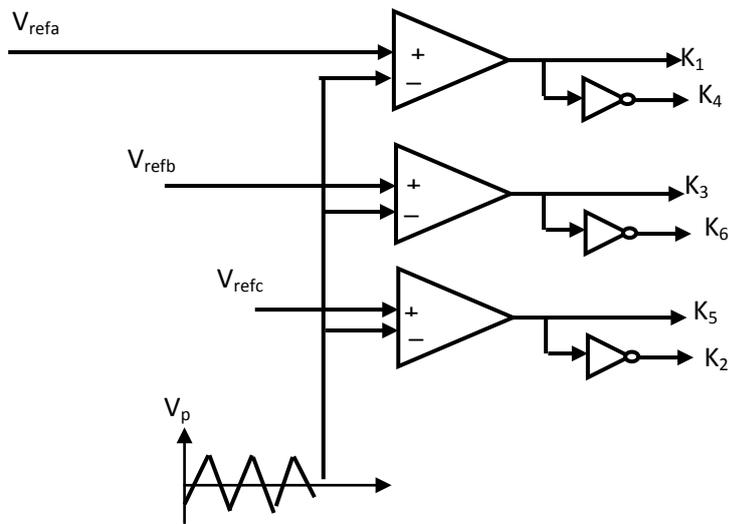


Figure (III.16) : Commande en demi- pont

Pour que les trois tensions de sortie soient identiques, à un tiers de leur période près, en modulation synchrone on adopte un indice de modulation m multiple de 3.

Si la charge connectée à la sortie de l'onduleur est un moteur à courant alternatif on doit fonctionner le moteur à flux constant. Pour ce faire on doit maintenir le rapport U/f constant. Cette commande est appelée commande scalaire.

$$\frac{U}{f} = cst \tag{III.20}$$

III.4.2.MLI bipolaire :

Elle est celle présentée précédemment ; le signal de sortie vaut $\pm V_{dc}$. Le spectre de la tension de sortie comporte des raie autour de la fréquence de découpage et de ses multiples.

Example1 : Modulation bipolaire

$$m = 10, r = 0.85$$

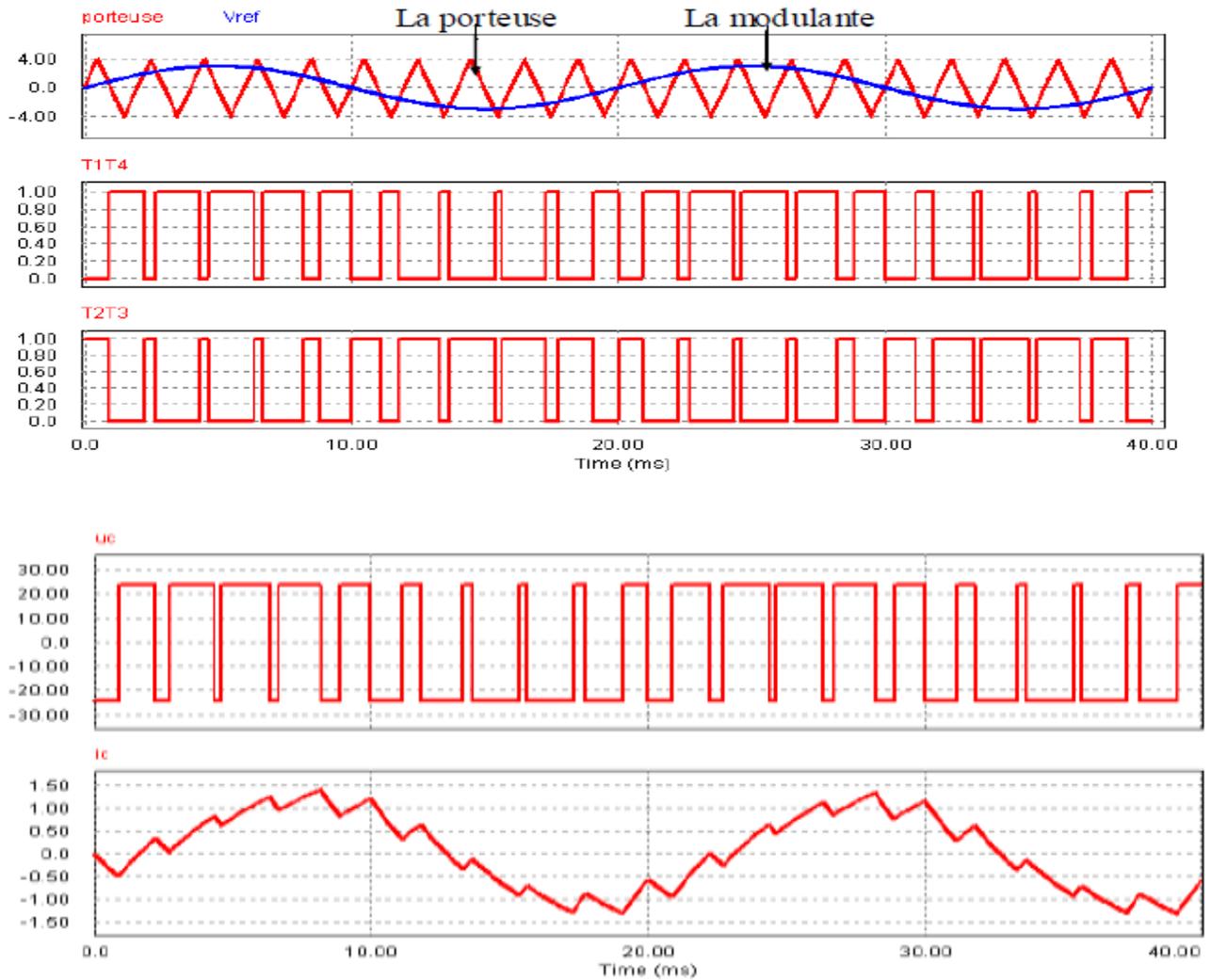


Figure (III.17) : MLI bipolaire ($m=10, r=0.85$)

III.4.3.MLI unipolaire :

Elle s'obtient en utilisant la configuration $(0, V_{dc})$ de 0 à $T/2$ puis $(0, -V_{dc})$ pendant la 2^{ème} demi période.

Exemple2 : Modulation unipolaire

$$m = 10, r = 0.85$$

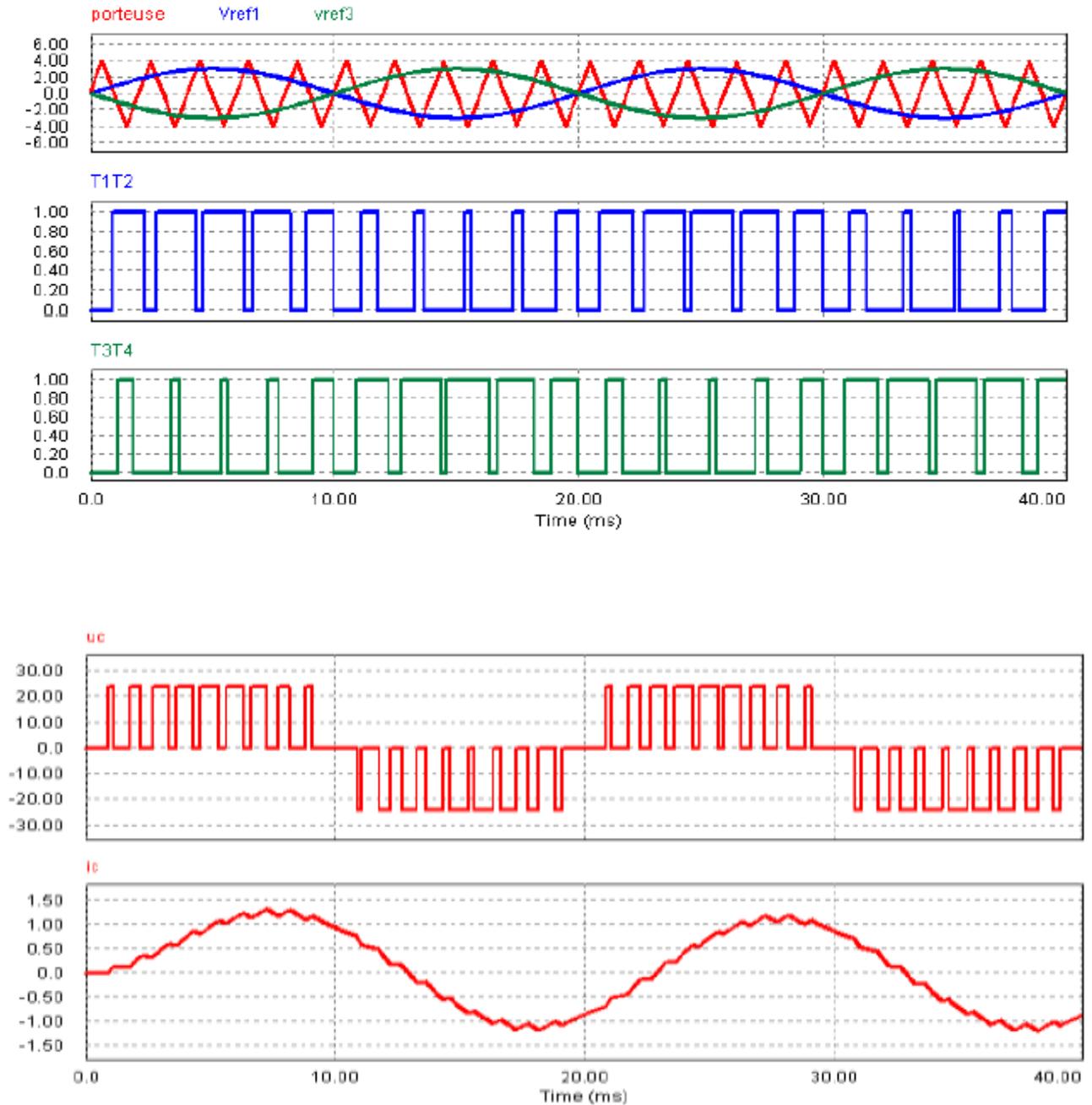


Figure (III. 18) : MLI bipolaire ($m=10$, $r=0.85$)

III.5.La commande MPPT :

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique Les systèmes

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [37].

III.5.1.Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [37].

III.5.2.Principe du MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [37].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.19).

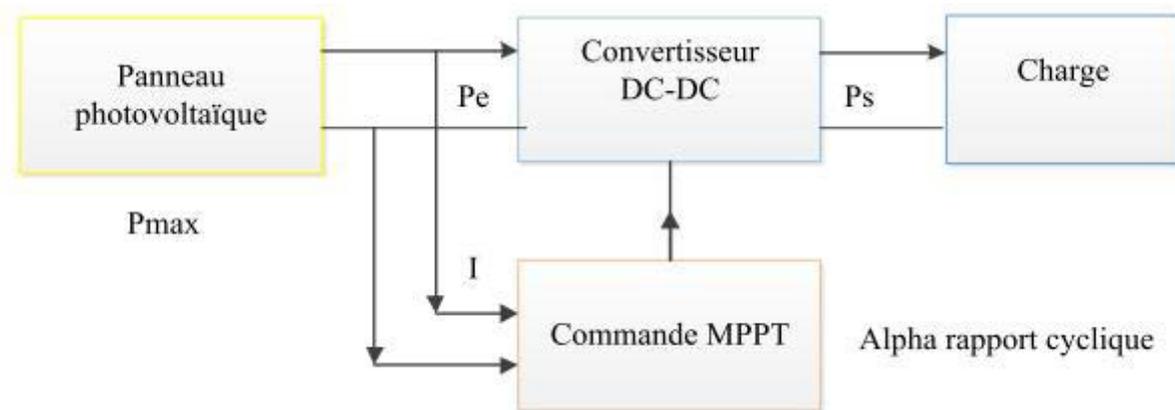


Figure (III.19) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

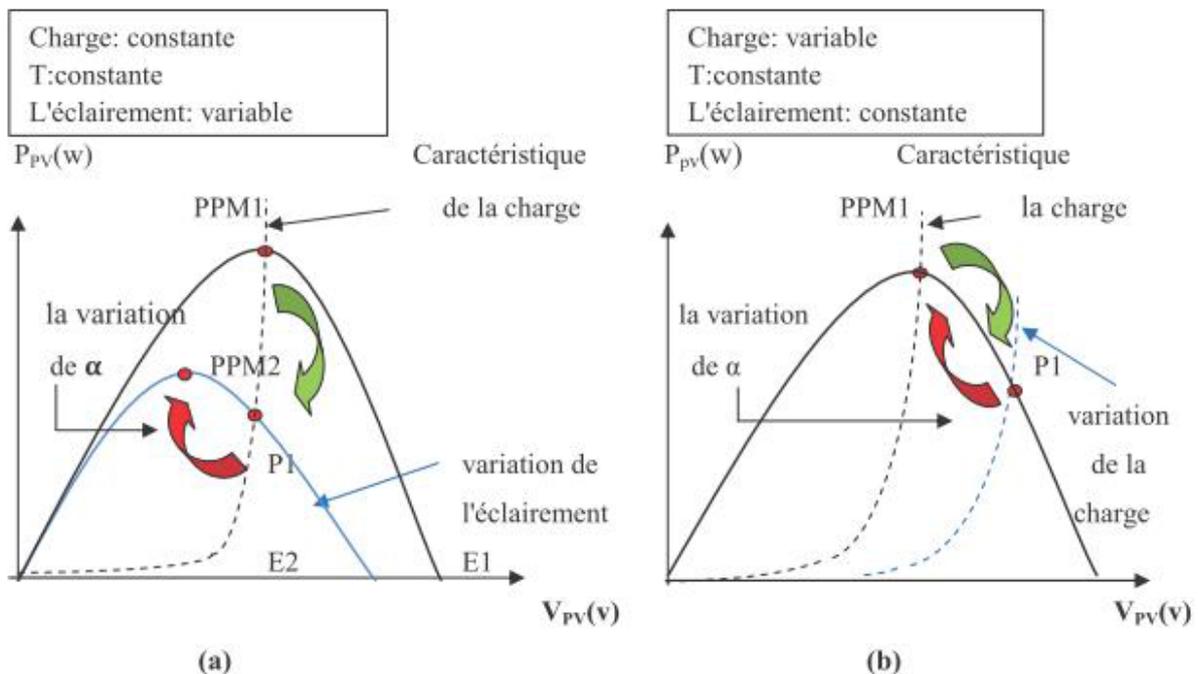
qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (III.20) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [32].



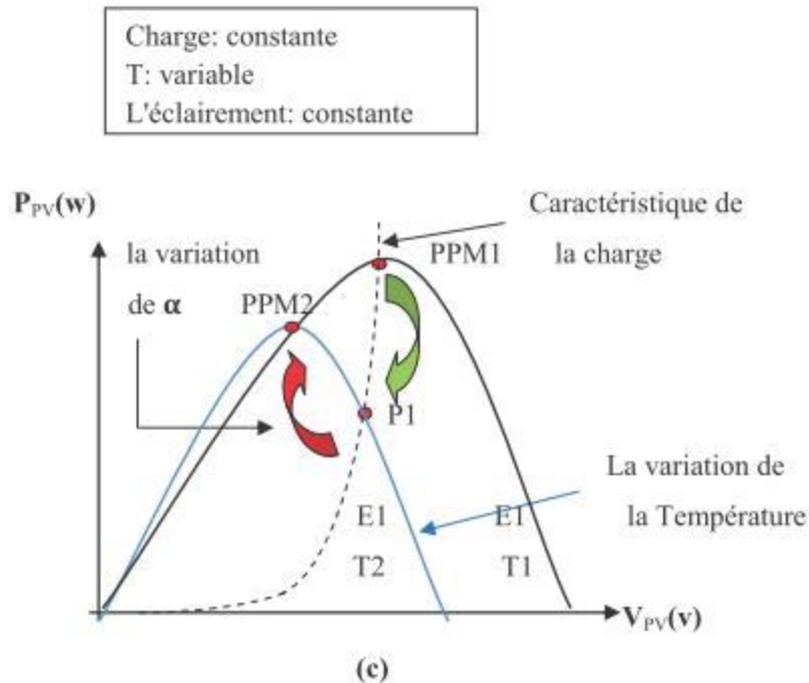


Figure (III.20) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

III.5.3. Classification des techniques MPPT :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [32].

III.5.4. Les premiers types de technique MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM) [32].

Ce dernier est décrit en figure (III.21) et peut être implanté entièrement en numérique.

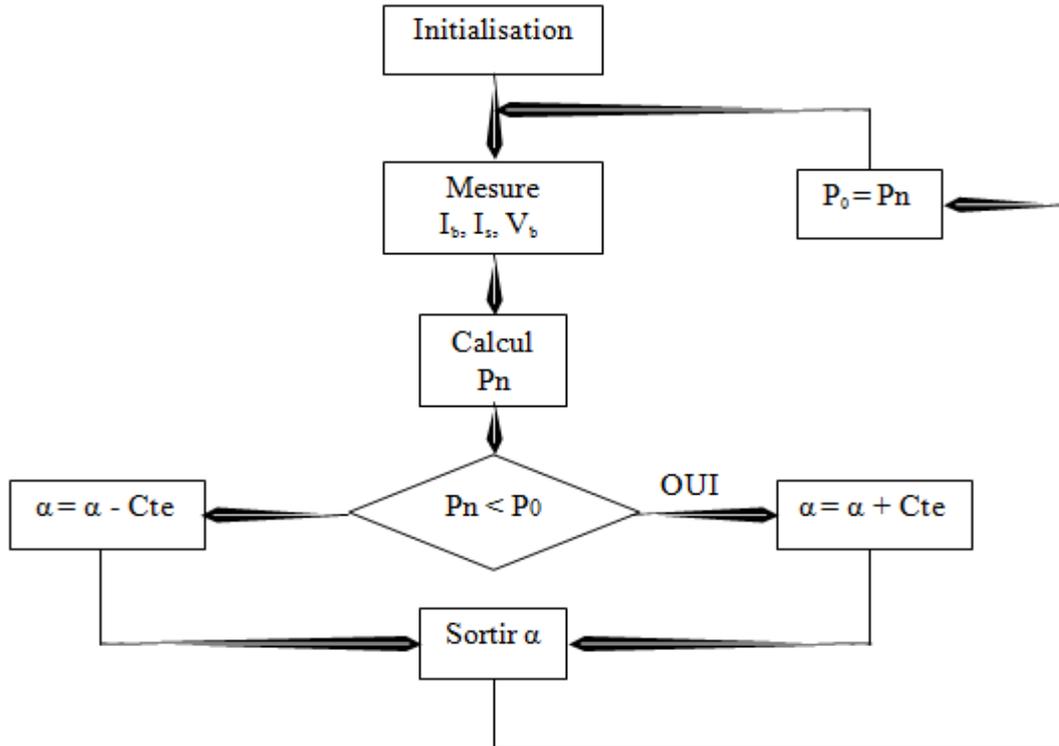


Figure (III.21) : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique.

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une puissance initiale P_0 après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la batterie et du courant de charge I_s , le produit $[(I_b + I_s) \times V_b]$ est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée P_n délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectuée.

Cette image est alors comparée à la puissance P_0 , si P_n est inférieure à P_0 , alors α est incrémenté, sinon α est réduit. Une fois α modifié, P_0 prend la valeur P_n et on effectue une nouvelle mesure de I_b, V_b et I_s pour calculer la nouvelle puissance P_n .

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur [35].

III.5.5. Evolution du point d'opération du générateur PV :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela, nous comparons un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t-1$) (figure III.22).

Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal.

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent [35].

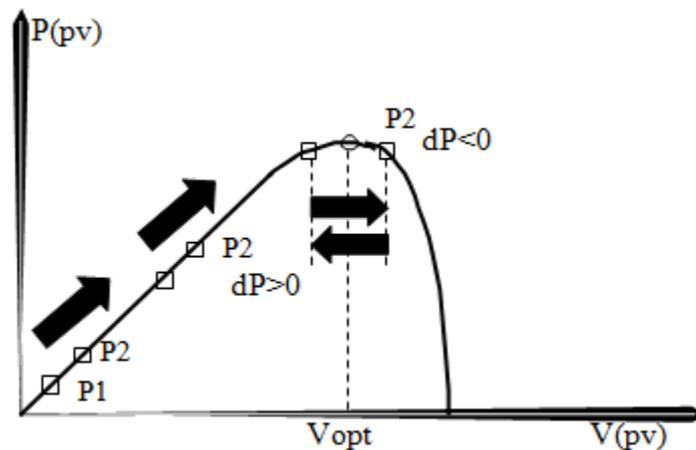


Figure (III.22) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir [35] :

La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.

Des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure(III.23).Le point de fonctionnement (P_1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance l'avant le

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance 2. En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

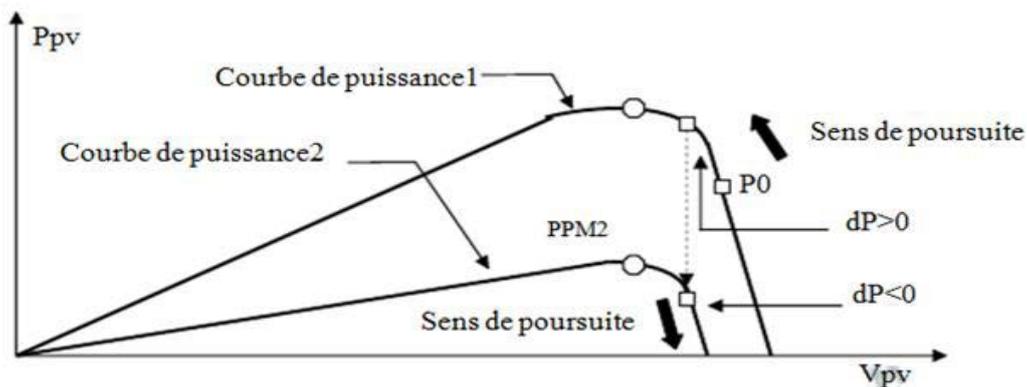


Figure (III.23) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

III.6. Les méthodes de poursuite de MPPT :

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [28].

III.6.1. Méthodes à contre réaction de tension :

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [37].

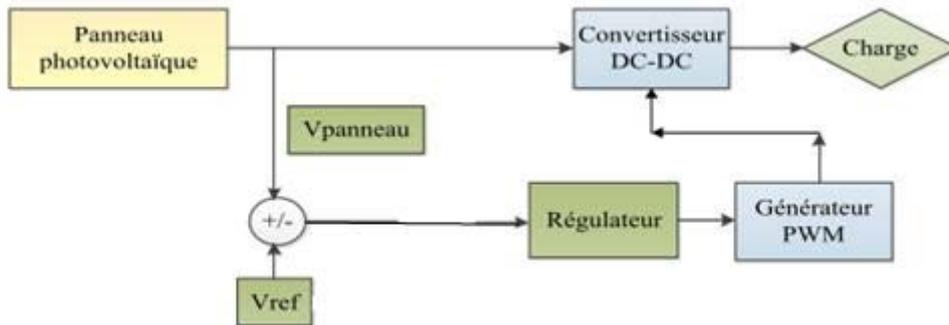


Figure (III. 24) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

- Référence fixe.
- Référence en fonction de V_{oc} .
- Tension de référence externe (Cellule pilote).

III.6.2.Méthodes à contre réaction de courant :

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (III.25) [37].

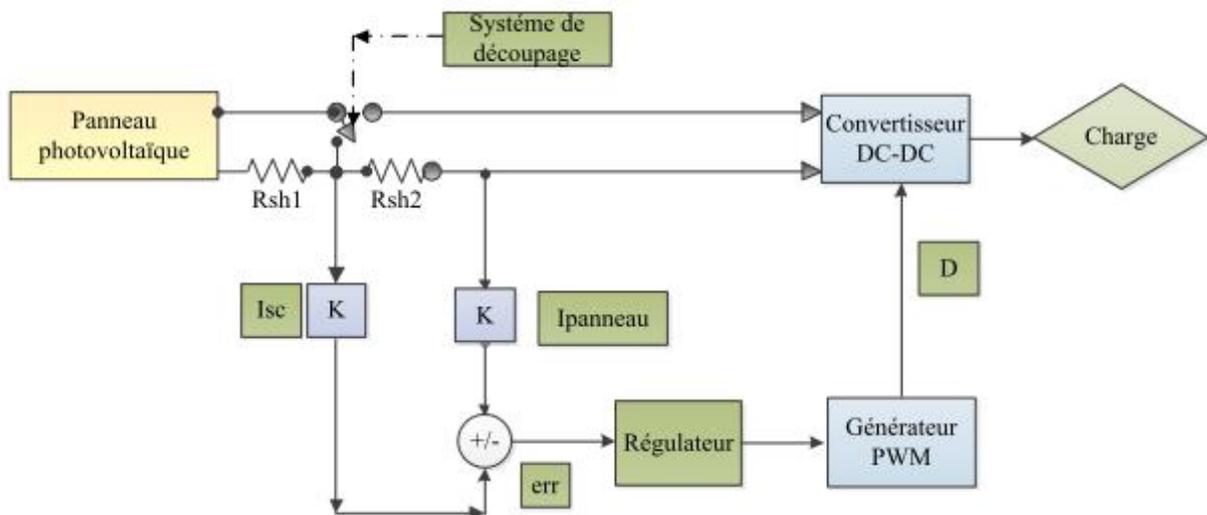


Figure (III. 25) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction d' I_{sc}

❖ Ainsi nous avons présenté les méthodes suivantes :

- Référence en fonction du courant de court-circuit I_{cc} .
- Référence externe (Cellule pilote).

III.6.3.Méthodes à contre réaction de puissance :

Les méthodes à contre réaction de puissance se bases sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P = V \times I$ [37].

III.6.3.1.Algorithme perturbation et observation :

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D).

Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure (III.26) [28].

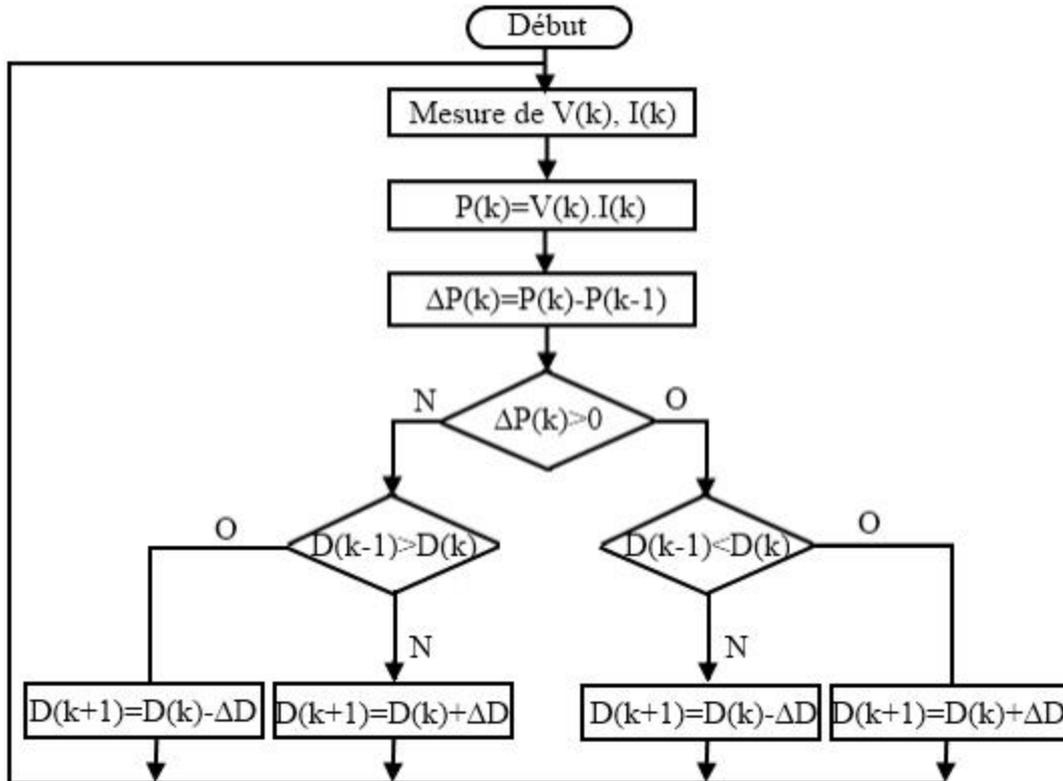


Figure (III.26) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

III.6.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance :

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [28]:

$$\frac{dp}{dv} = I + V \frac{dI}{dv} \quad (III.21)$$

$$\frac{1}{v} \frac{dp}{dv} = \frac{I}{v} + \frac{dI}{dv} \quad (III.22)$$

On définit la conductance de la source et incrémentation de la conductance puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (III.8) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il l'incrémentale conductance et vice-versa [28], comme suit:

$$\frac{dp}{dv} > 0 \text{ si } \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \quad (III.23)$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 \text{ si } \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \quad (III.24)$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \text{ si } \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \quad (III.25)$$

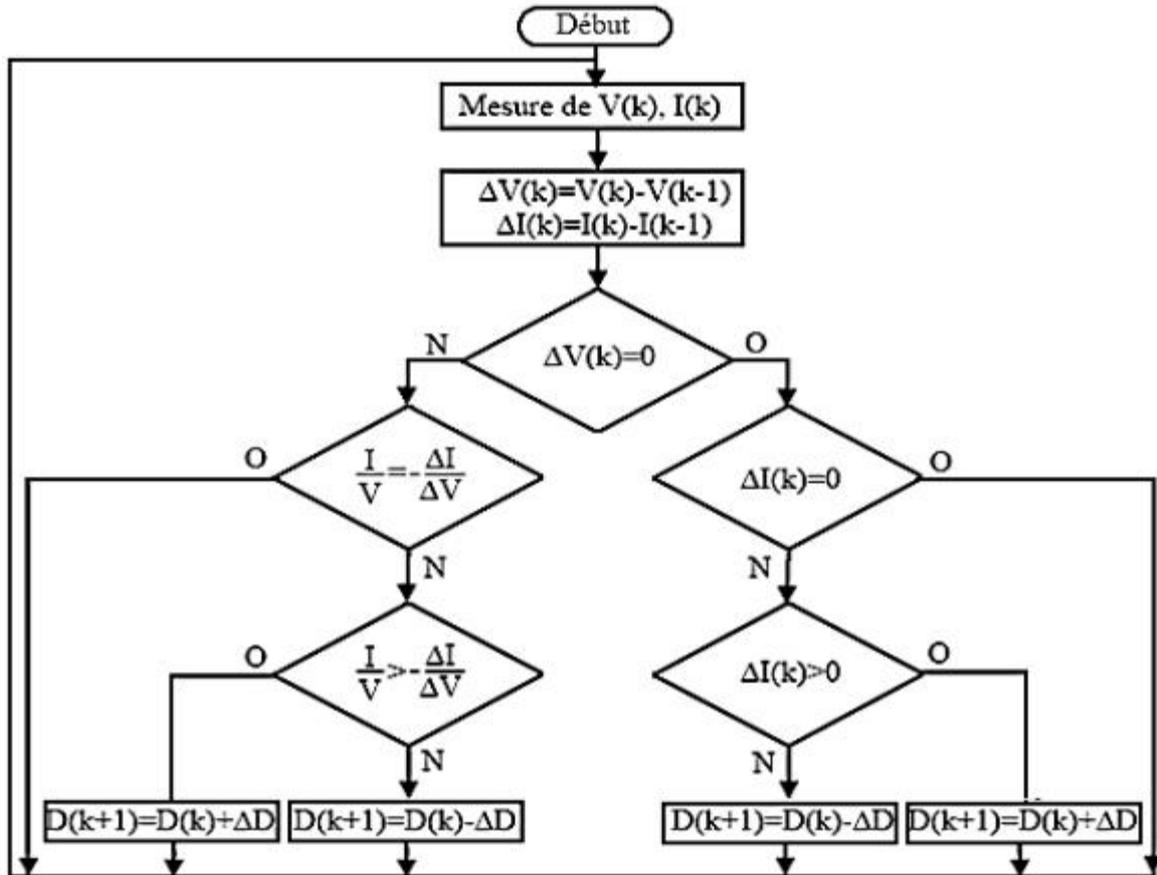


Figure (III.27) : Algorithme incrémental conductance.

III.7 Etude de la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur :

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces installations.

En revanche, ils ont participé à détériorer la "qualité" du courant et la tension des réseaux de distribution et des charges connectées.

Les déformations de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de

Chapitre 3 : association panneau-hacheur et algorithme MPPT

fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques.

Cette partie est consacrée à l'étude de la qualité de la tension délivrée par l'onduleur.

Dans un premier temps, on présentera la pollution harmonique, ensuite nous présentons les résultats de simulation des tensions à la sortie de l'onduleur de tension et les spectres correspondant. Une comparaison des taux de distorsions harmonique sera introduite en fin de chapitre. Quelques solutions utilisées à diminuer ces harmoniques sont présentées

III.7.1 Harmoniques :

On appelle harmoniques (de tension ou de courant) une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental .Ils sont produits dans de faibles proportions et avec de faibles niveaux de distorsion par les appareils de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ce sont les charges domestiques et industrielles qui présentent la plus grande majorité des sources d'harmoniques [35].

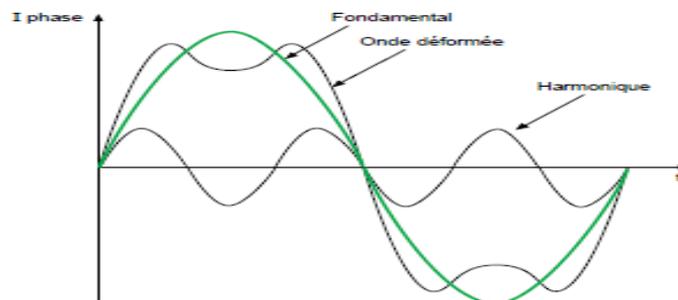


Figure (III.28) : Exemple de signaux déformés par les harmoniques

III.7.2. Normes et recommandation pour la limitation des harmoniques :

Les distributeurs et les utilisateurs de l'énergie électrique sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies:

- _ Au niveau international, par la CEI
- _ Au niveau européen, par la CENELEC
- _ Au niveau français, par l'UTE et le CEF

III.7.3. Inter harmoniques et infra- harmoniques :

Les inter harmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental. Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteur stels que fours à arc, machines à souder et convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cyclo convertisseurs).

Les infra- harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10 Hz, 20 Hz...

La présence d'inter harmonique ou d'infra harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à T (T période du fondamental), ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier.

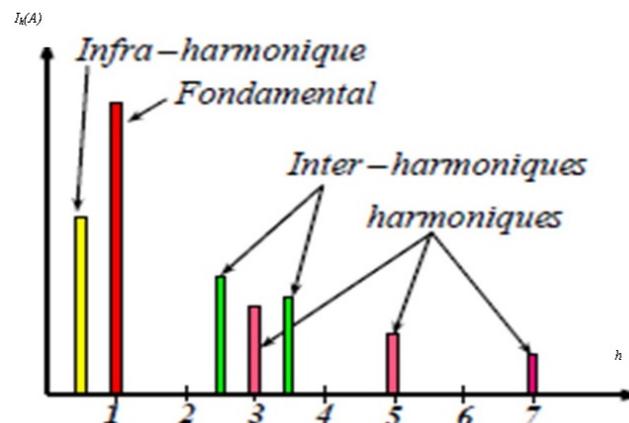


Figure (III.29) : Inter-harmoniques et infra-harmoniques

III.7.4. Grandeurs Caractérisant la pollution harmonique :

Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquences différentes de celle du fondamental.

a. Représentation de Fourier

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courants et tensions des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde pure.

FOURIER a démontré que toute fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence f peut être représentée selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme composée :

- D'un terme sinusoïdal de fréquence f : c'est le signal principal qui a la fréquence du signal d'origine, ce terme est appelé le fondamental.
- De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples de la fréquence du fondamental. Ces fréquences sont appelées harmoniques.
- D'une éventuelle composante continue d'amplitude y_0 .

L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental. Par la décomposition de FOURIER, une fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence f peut être représentée selon la décomposition harmonique sous la forme :

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)\} \quad (\text{III.26})$$

Avec: a_0, a_n, b_n les coefficients de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y(t) dt \quad (\text{III.27})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos(nt) dt \quad (\text{III.28})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin(nt) dt \quad (\text{III.29})$$

b. Rang de l'harmonique, Spectre de fréquence, Taux de distorsion

- Le **rang h d'un harmonique** est le rapport de sa fréquence à celle du fondamental dont le rang est 1.

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{III.30})$$

- Le **spectre de fréquence** est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang.

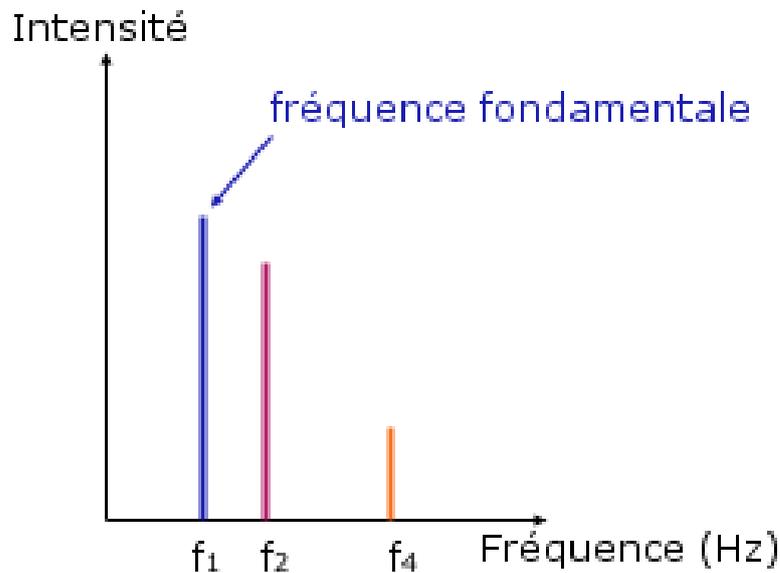


Figure (III.30) : Représentation d'un spectre

- Le **taux de distorsion** est un paramètre qui définit la déformation de la grandeur non sinusoïdale. Il exprime le taux d'harmoniques existants dans un signal périodique. Si on considère la présence des courants harmoniques dans le réseau ; le taux de distorsion harmonique en tension sera :

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (V_h)^2}}{V_1} \quad (\text{III.31})$$

Avec, n l'ordre de l'harmonique le plus élevé contenu dans le courant

c. Facteur de puissance

La présence des harmoniques dans le réseau électrique inclue la notion de puissance déformante **D**, d'où la puissance apparente **S** sera exprimée comme suit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{III.32})$$

S : Puissance apparente en Volt Ampère

P : Puissance active en Watt.

Q : Puissance réactive en VAR.

D : Puissance déformante Volt Ampère Déformant

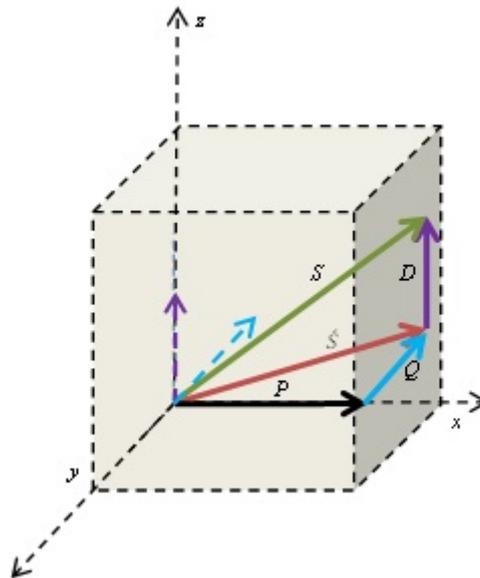


Figure (III.31) : Représentation des puissances en présence des harmoniques

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre on a détaillé tous les éléments intervenant dans le système PV.), modèle de la cellule, hacheur survolteur, méthodes MPPT tel que l'algorithme d'incrémental de l'inductance et méthode de perturbation et observation et onduleur à MLI. Le chapitre IV sera consacré à la validation de cette théorie par simulation à l'aide du logiciel Matlab.

chapitre IV

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

Afin de valider la modélisation des caractéristique du panneau, l'algorithme MPPT (P&O) pour la maximisation de la puissance lors de diminution de l'éclairement, et la conversion de la tension continue en alternative, on a procéder à la simulation par Matlab Simulink.

IV.1. Simulation des caractéristiques du générateur photovoltaïque à température et éclairement constant :

Lors de la simulation on choisit le panneau Soltech (1S TH-215-P.). Il contient 40 rangés (strings) en parallèles, 10 module en série, chaque module contient 60 cellule en séries.

Les caractéristiques physiques et électriques d'un **module** sont données par le tableau (IV.1)

| Les paramètres | symbole | Valeur |
|--|-----------|---------|
| Tension de circuit ouvert | V_{CO} | 36.3V |
| Courant de court-circuit | I_{CC} | 7.84 |
| Tension de puissance maximale | V_{mp} | 29V |
| Courant de puissance maximale | I_{mp} | 7.35A |
| Puissance maximale | P_{MAX} | 213.15W |
| Nombre de cellule en série par modules | N_s | 60 |
| Nombre de rangées en parallèle | N_p | 40 |
| Coefficient de température | K_T | 0.36099 |

Tableau (IV. 1) : Caractéristiques d'un module.

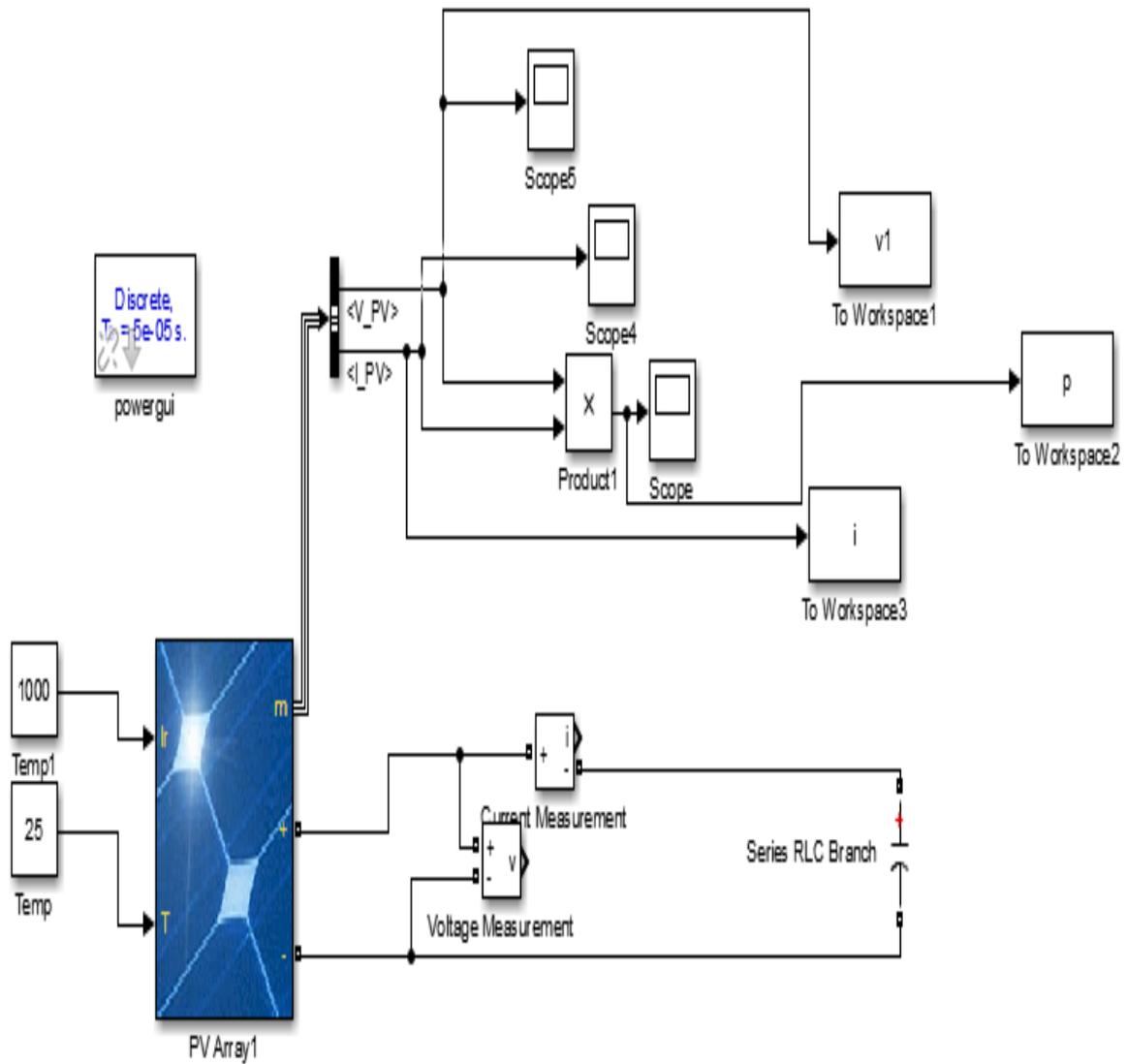


Figure (IV.1) : Schéma de montage pour la simulation des caractéristiques du générateur photovoltaïque

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

Lors de la simulation $C=1000\mu\text{F}$

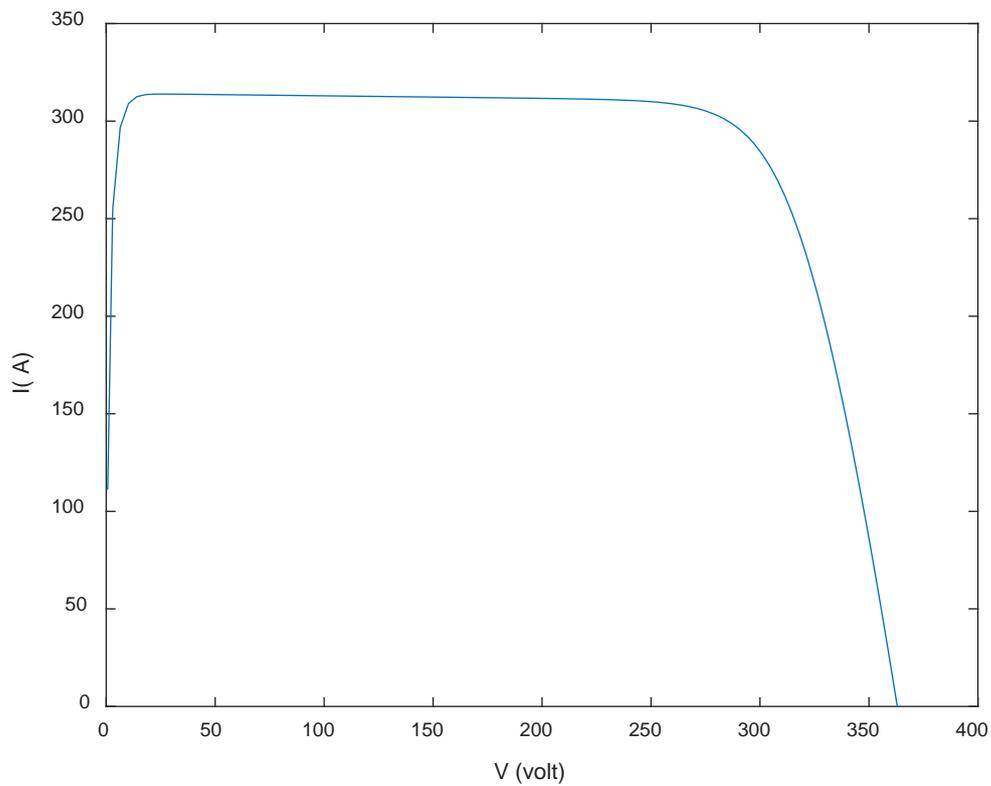


Figure (IV. 2) : Caractéristique $I=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ$)

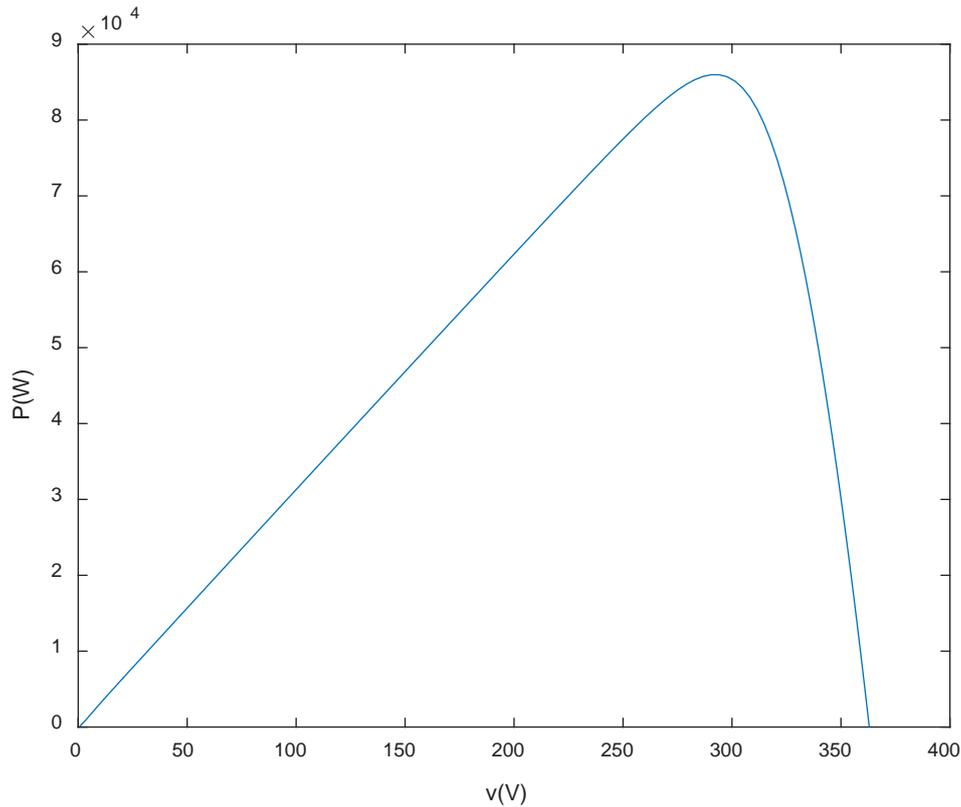


Figure (IV.3) : Caractéristique $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

IV.2 .Simulation de l'influence des variations climatique sur les caractéristiques du générateur :

Afin de constater l'influence des conditions climatiques (G , T) sur les caractéristiques, nous avons considéré les deux cas suivants :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ($T= 25^\circ$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante
- Pour visualiser l'influence de la température, on fixe l'éclairement ($G= 1000\text{w/ m}^2$) et on fait varier la température afin de voir l'influence de celle-ci sur les caractéristiques du générateur

IV.2.1. Variation de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement (G) entre 400w/m^2 et 1000w/m^2 avec un pas de 200w/m^2 , les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ sont données par les courbes ci-dessous

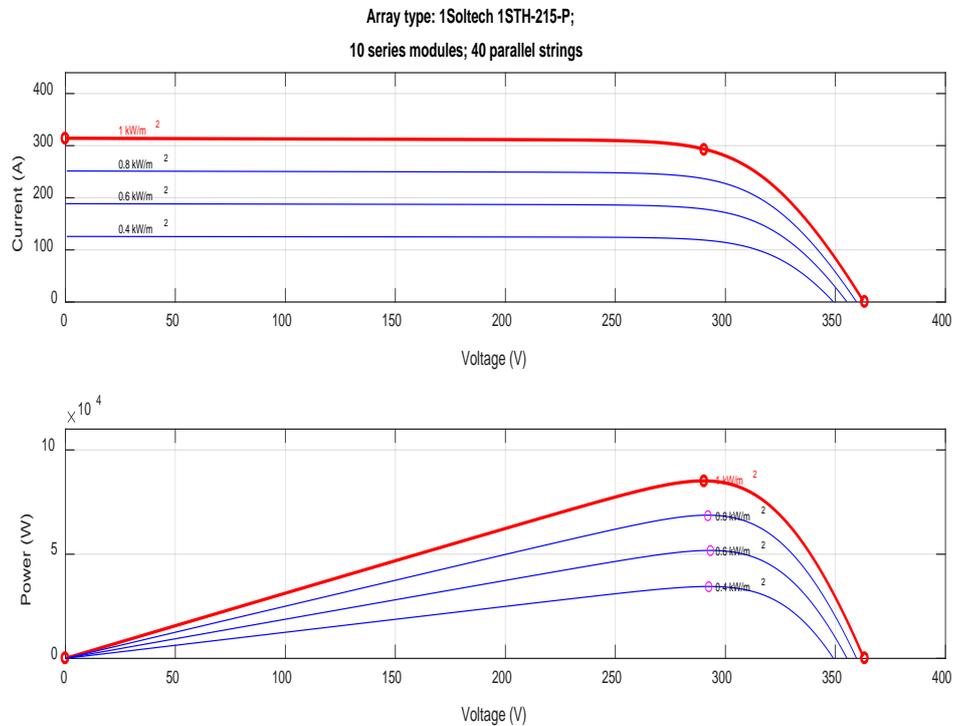


Figure (IV.4) : Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour différents éclairement à température constante ($T=25^\circ$)

D'après les courbes, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (G) et une faible diminution de la tension de circuit ouvert.

On remarque aussi sur la courbe $P=f(V)$ que l'affaiblissement de l'éclairement diminue considérablement le point maximale de la puissance.

IV.2.2. Variation de la température :

En faisant varier la température (T) entre 10° et 55° , l'influence de celle-ci sur les caractéristiques pour un éclairement ($G=1000\text{w/m}^2$) est donnée par la courbe ci-dessous.

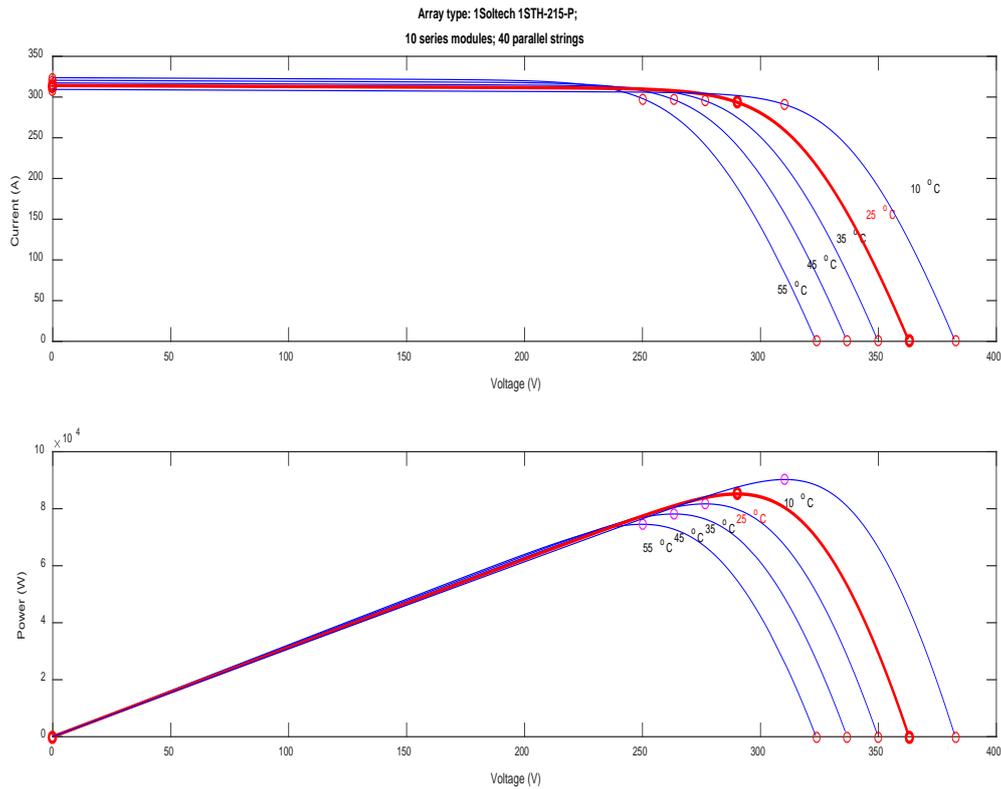


Figure (IV. 5) : Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour différents températures é éclairage constant ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$)

On constate que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

IV.3.Simulation d'un générateur PV associé à un hacheur survolteur :

Avant d'utiliser l'algorithme Perturbe and Observe pour l'optimisation du maximum de puissance ; on simule le générateur PV connecté à une charge résistive inductive ($R=100\Omega$, $L=0.1\text{H}$) avec un condensateur à la sortie ($C=1000\mu\text{F}$). D est le rapport cyclique.

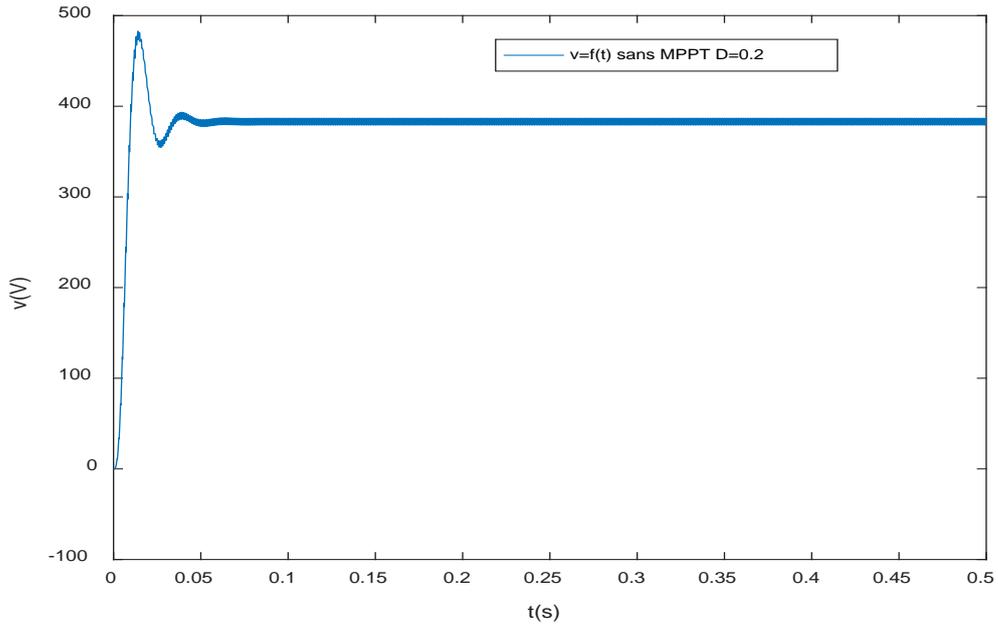


Figure (IV.6) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque sans MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

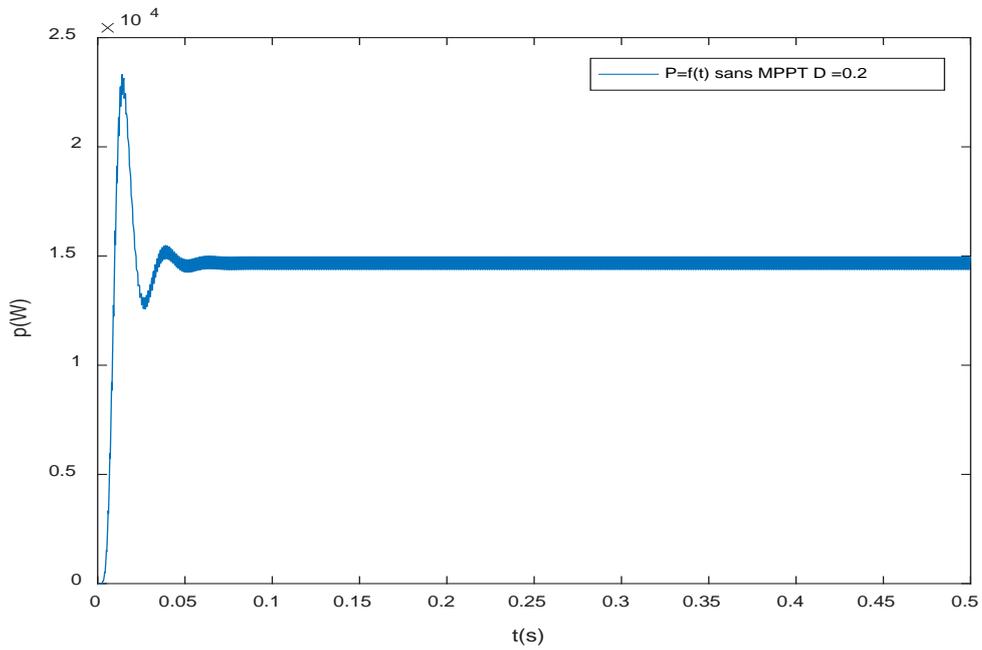


Figure (IV.7) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque sans MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

D'après les courbes de tension et de puissance le point de fonctionnement est au alentours de 370V, 14000W

Lors de la poursuite du point maximale de puissance on utilise l'algorithme perturbation et observation. Au début on considère que l'éclairement est constant égale à 1000w/m^2 . On essaye de ramener le point de fonctionnement au maximum de la courbe $P=f(V)$, lors d'un ensoleillement égale à 1000W/m^2

IV.3.1. Maximisation de la puissance du générateur pour un éclairement constant ($G=1000\text{W/m}^2$) :

Lors de simulation du générateur avec un algorithme MPPT on utilise le schéma suivant :

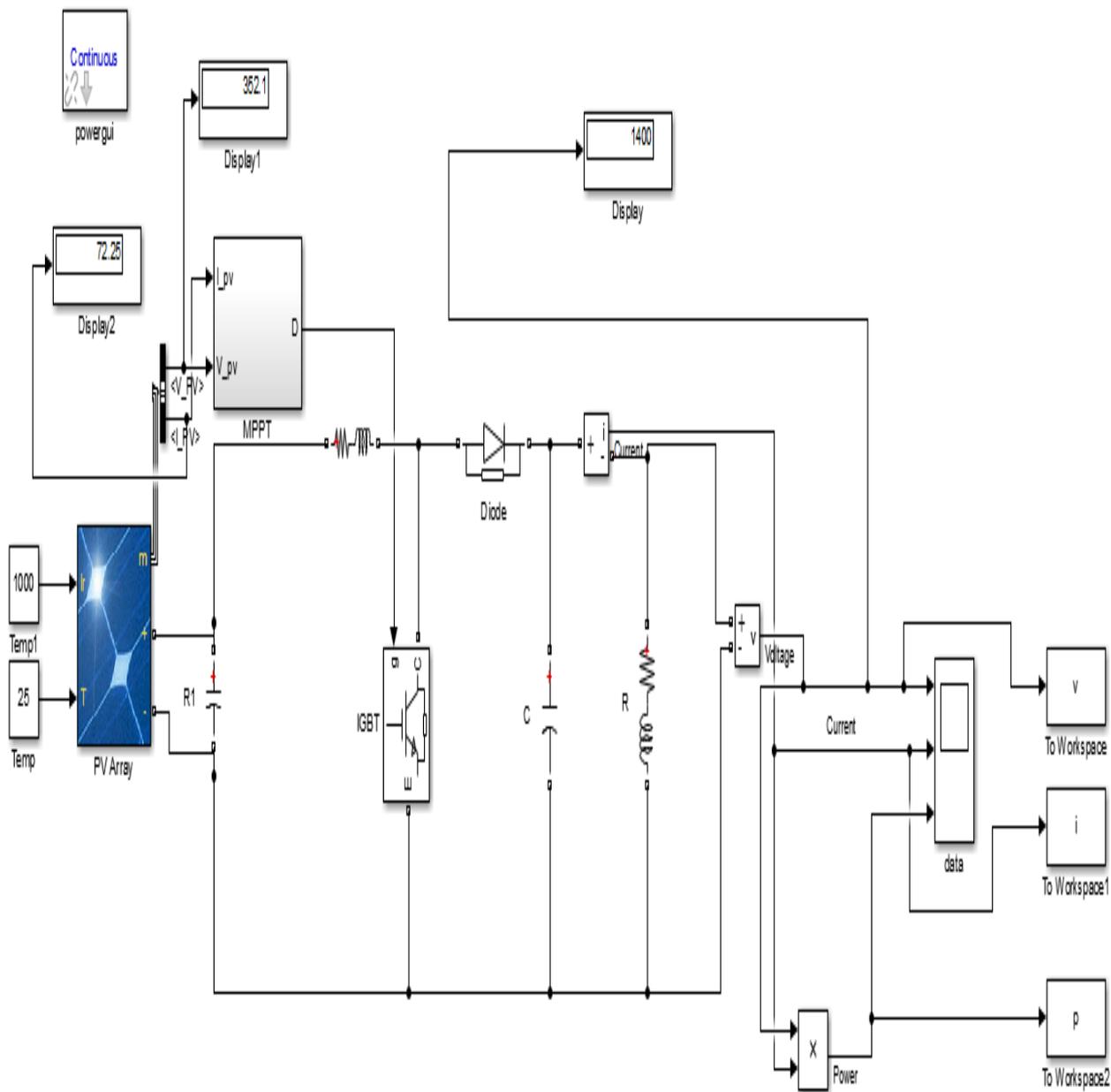


Figure (IV.8) : Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par l'algorithme P&O, lors d'un éclairement constant et température constante

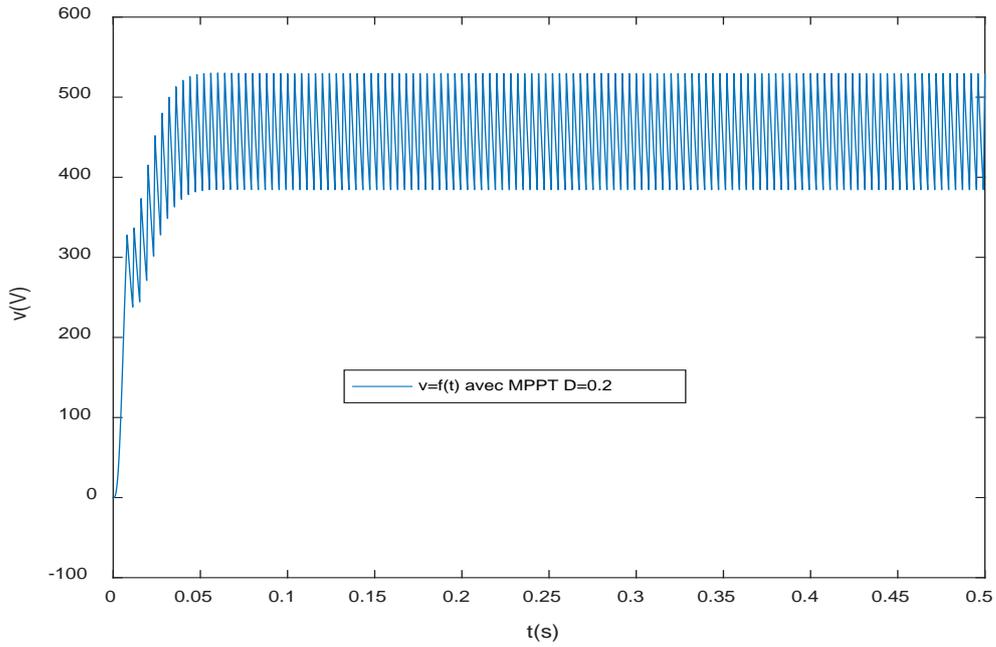


Figure (IV. 9) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.2$

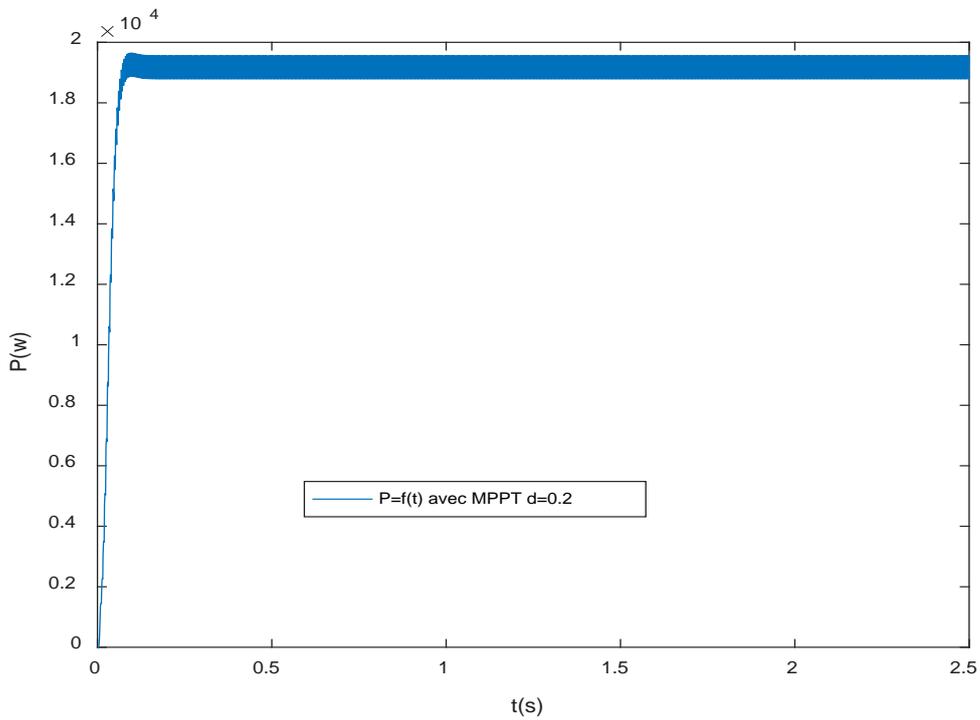


Figure (IV.10) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.2$

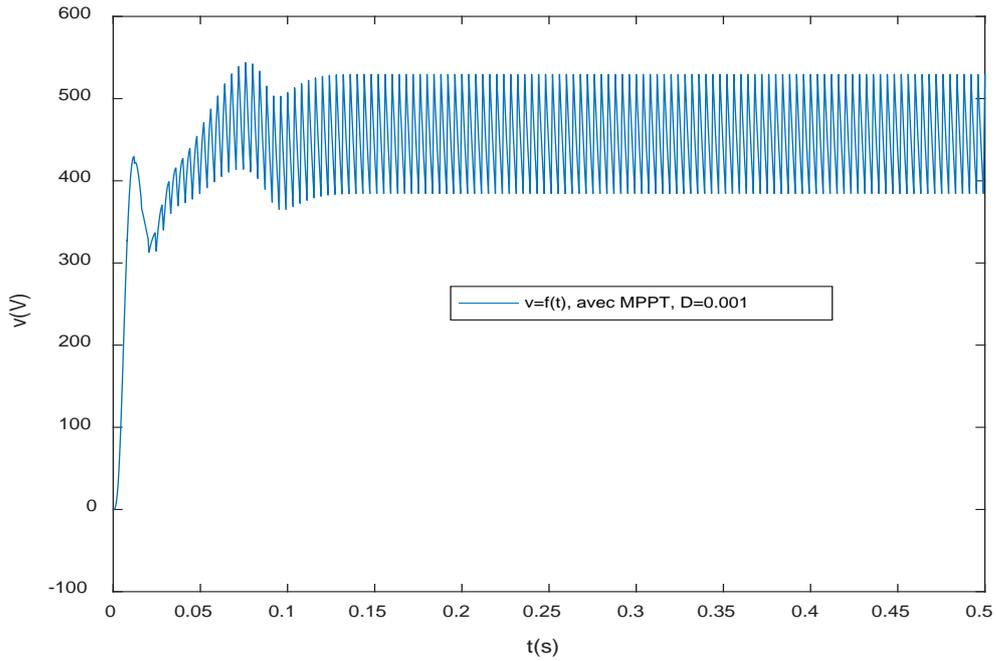


Figure (IV.11) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.001$

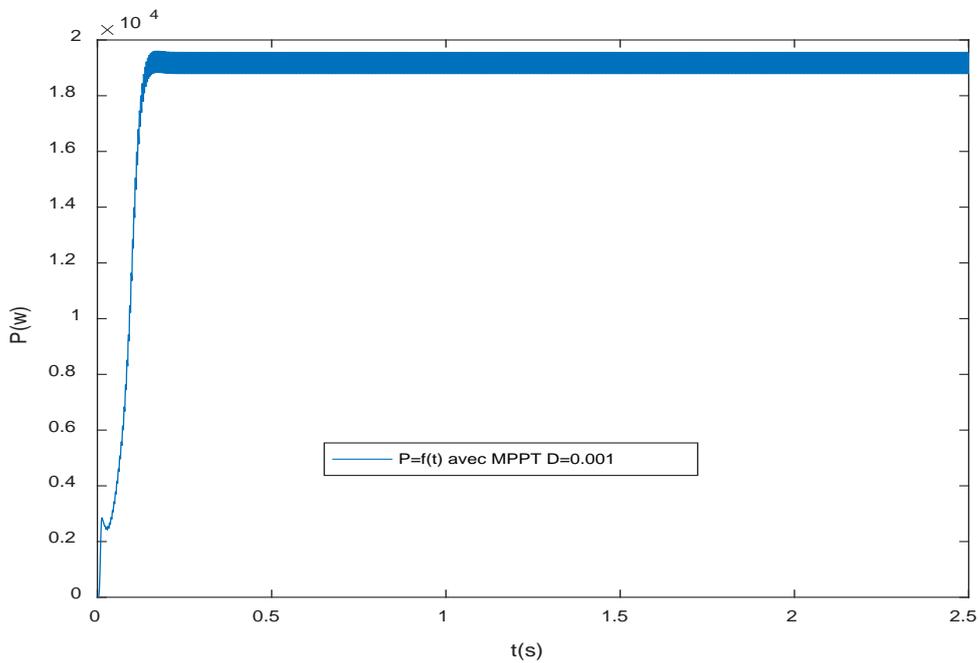


Figure (IV.12) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.001$

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

L'algorithme améliore le point de fonctionnement. Les résultats de simulation montrent que pour un faible rapport cyclique D, on aura une réponse plus lente que pour le cas de D grand.

IV.3.1. Maximisation de la puissance du générateur pour une température constante et un éclairement variable de $1000\text{W}/\text{m}^2$ à $400\text{W}/\text{m}^2$

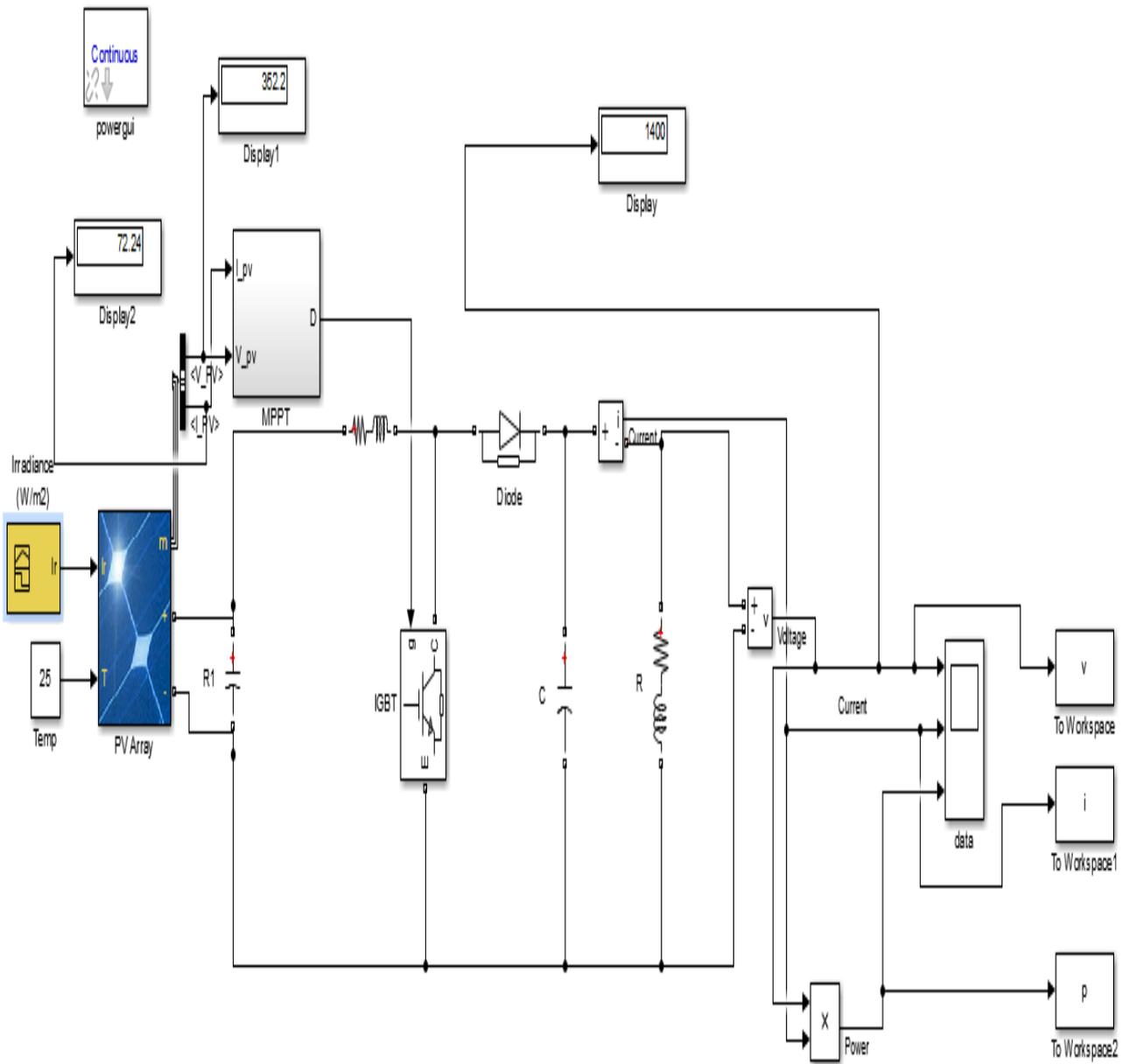


Figure (IV. 13) : Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par l'algorithme P&O pour un affaiblissement de l'éclairement

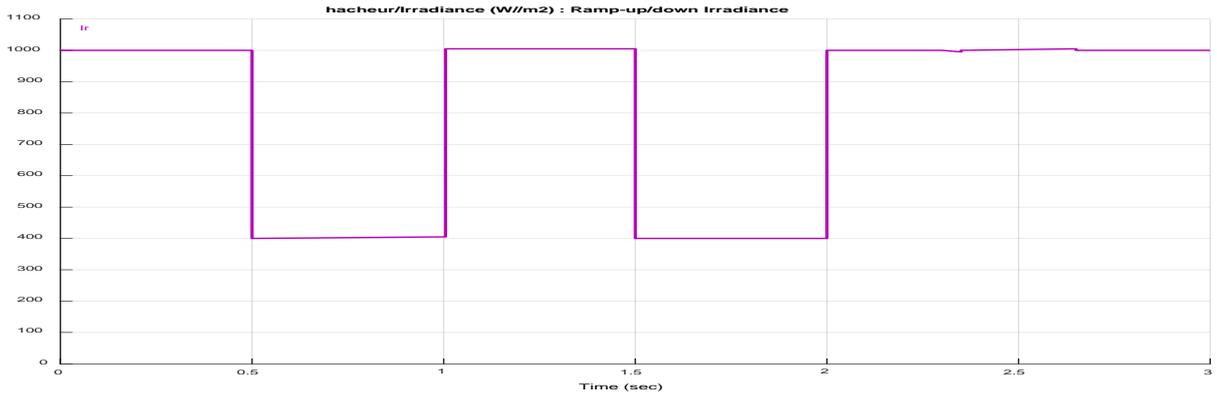


Figure (IV. 14) : Variation de l'éclairement

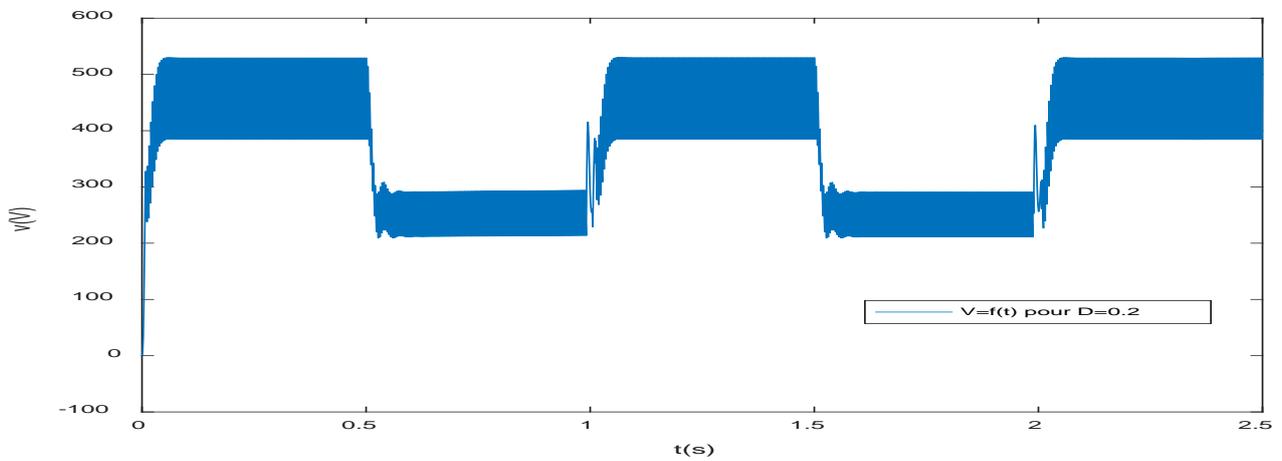


Figure (IV.15) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement

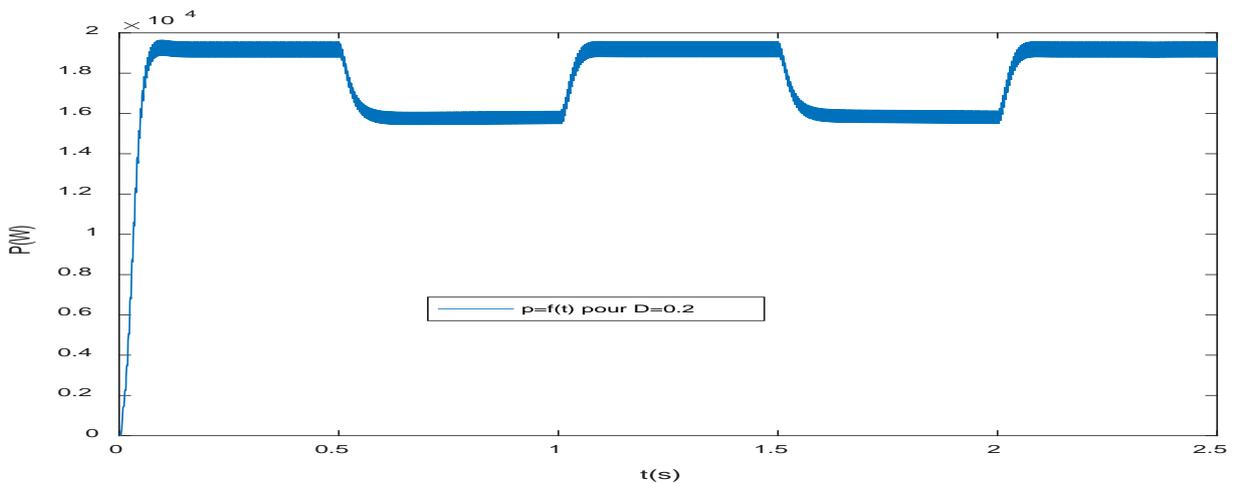


Figure (IV. 16) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

On constate que l'algorithme P&O affaibli la tension du générateur lorsque l'éclairement diminue afin d'optimiser le nouveau point maximal de la puissance.

IV.4.Résultats de simulation de l'onduleur :

Lors de la conversion de la tension continue en alternative on considère une tension à la sortie du PV égale à 200V.

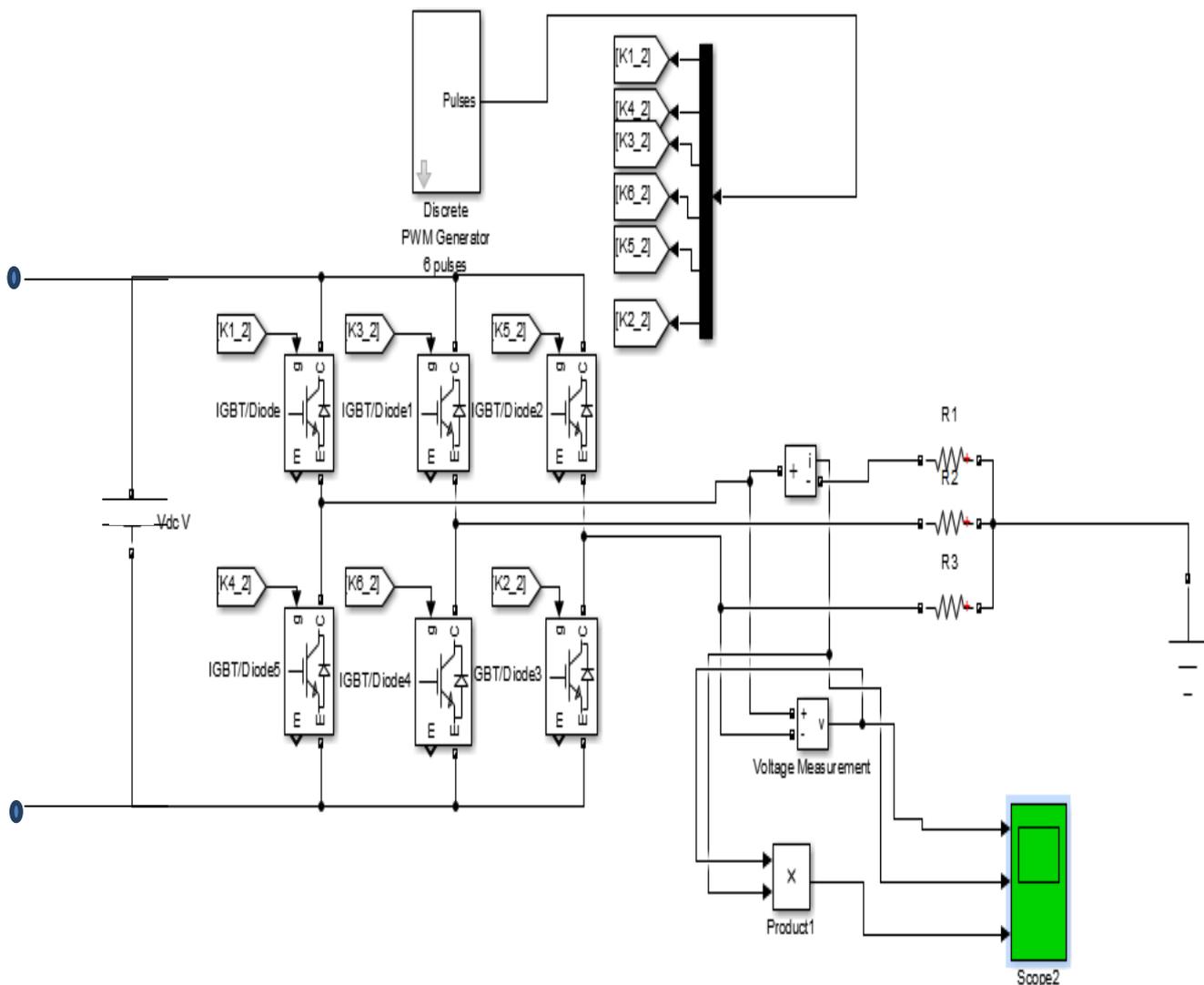
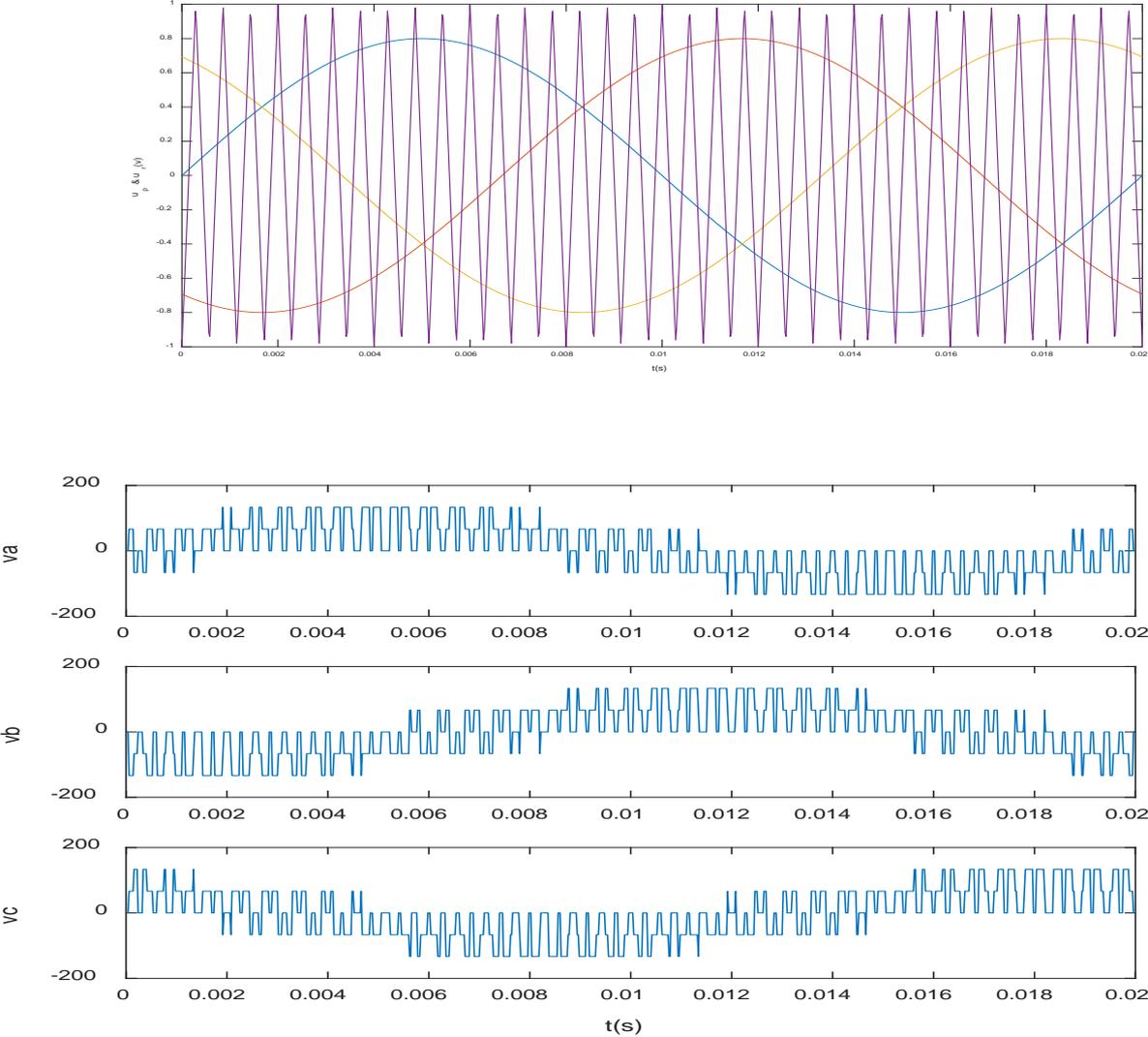


Figure (IV.17) : onduleur de tensions triphasé

a- Variation du coefficient de réglage :



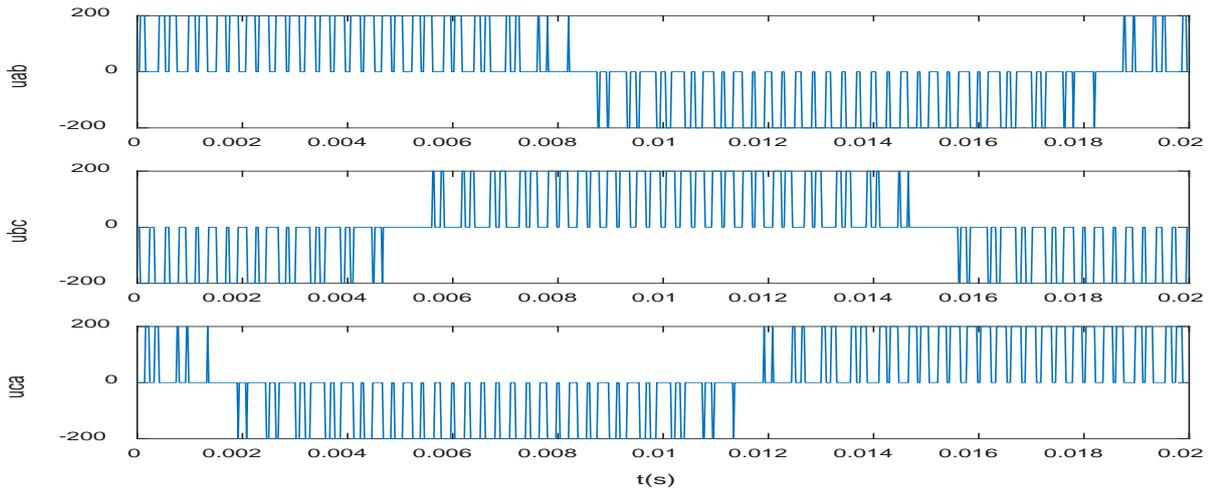


Figure (IV. 18) : tensions simples, composées pour $r=0,8$, $m=35$

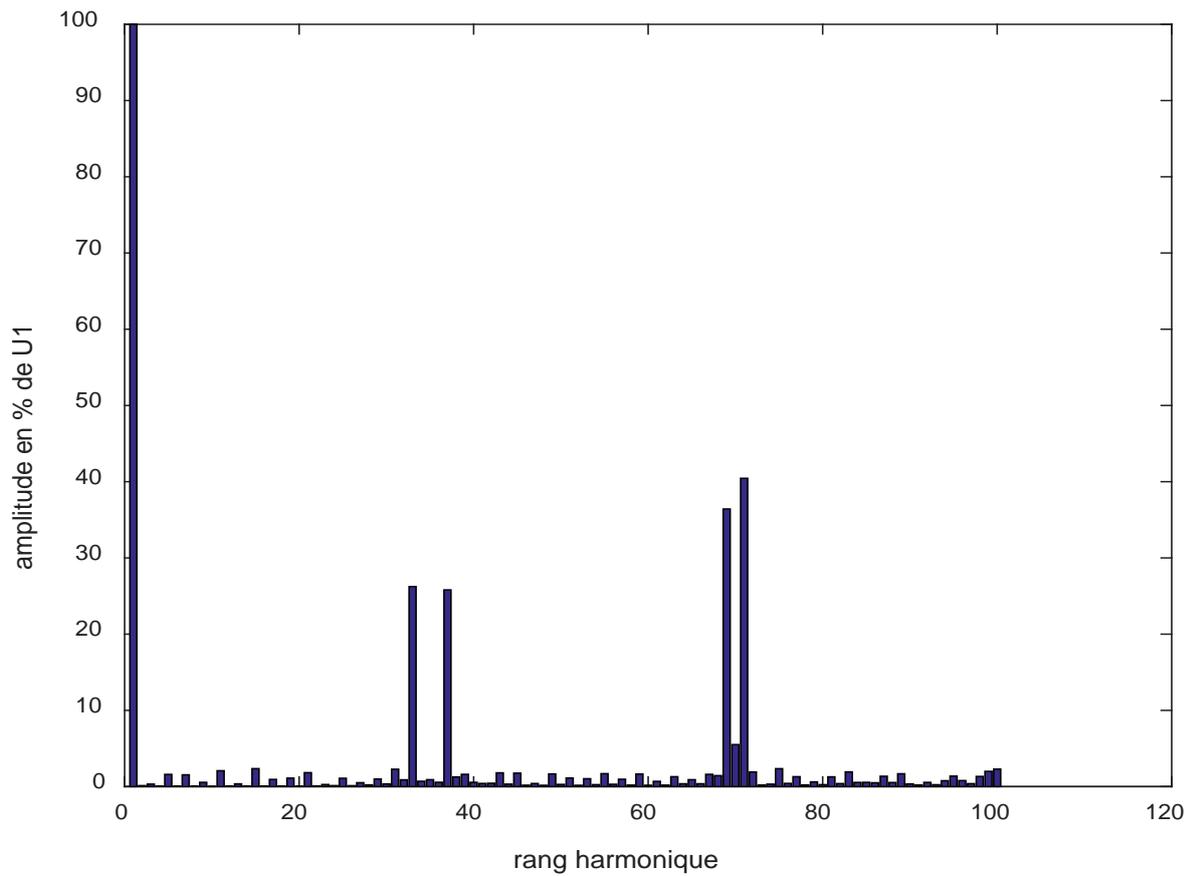


Figure (IV. 19) : spectre de la tension simple pour $r=0,8$, $m=35$

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

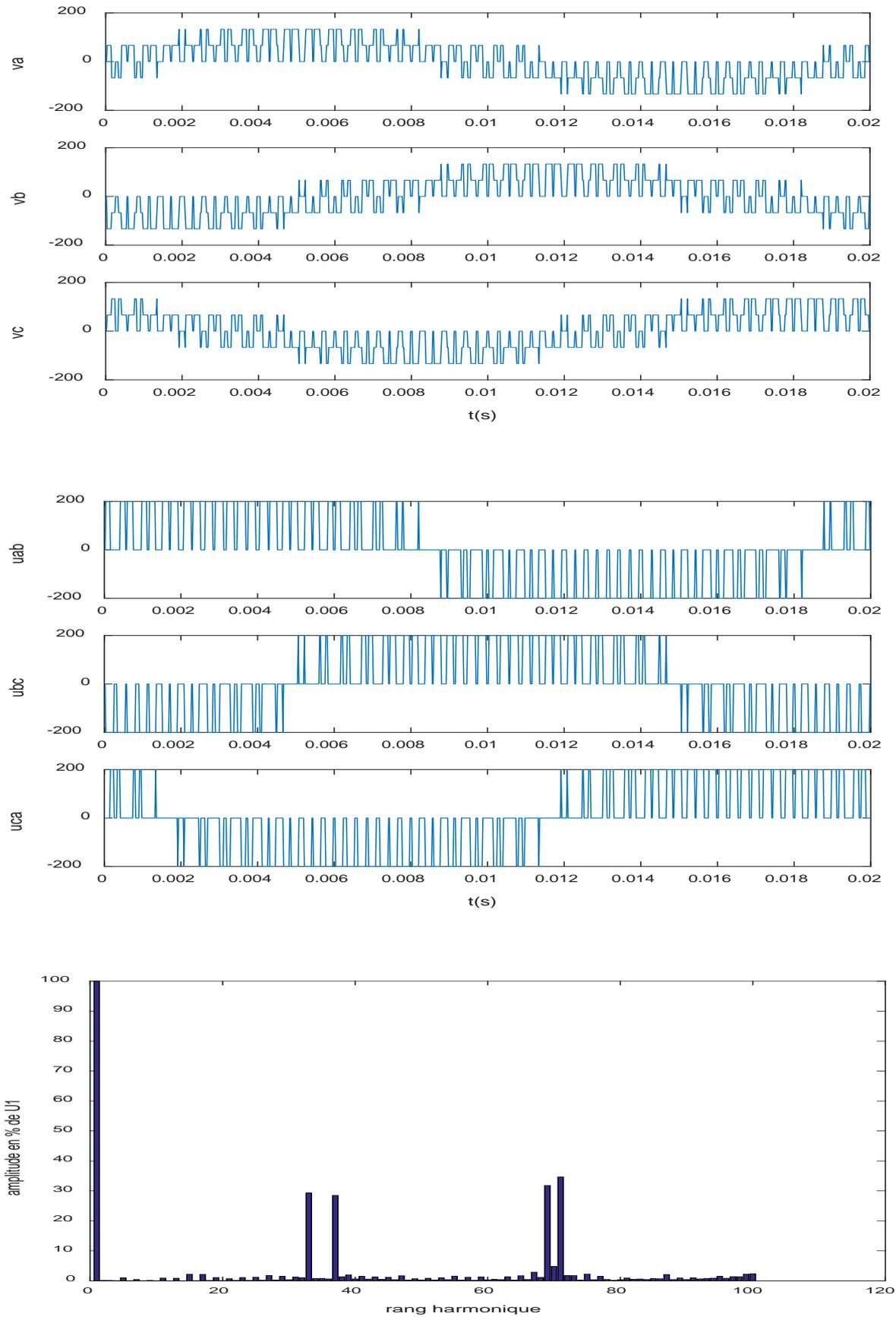


Figure (IV. 20) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple $r=0,85$, $m=35$

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

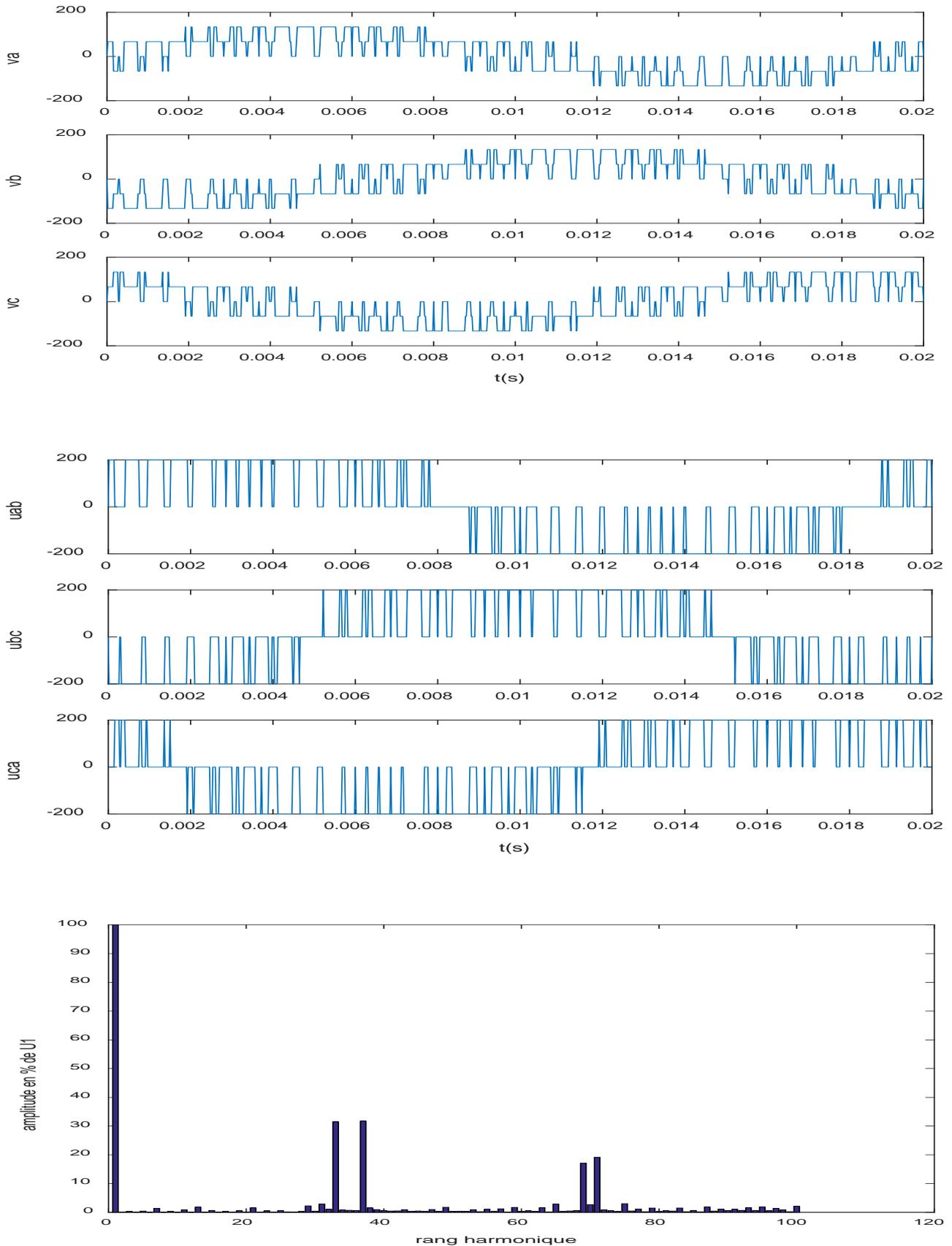


Figure (IV.21) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour

$$r=1, m=35$$

b- Variation de l'indice de modulation :

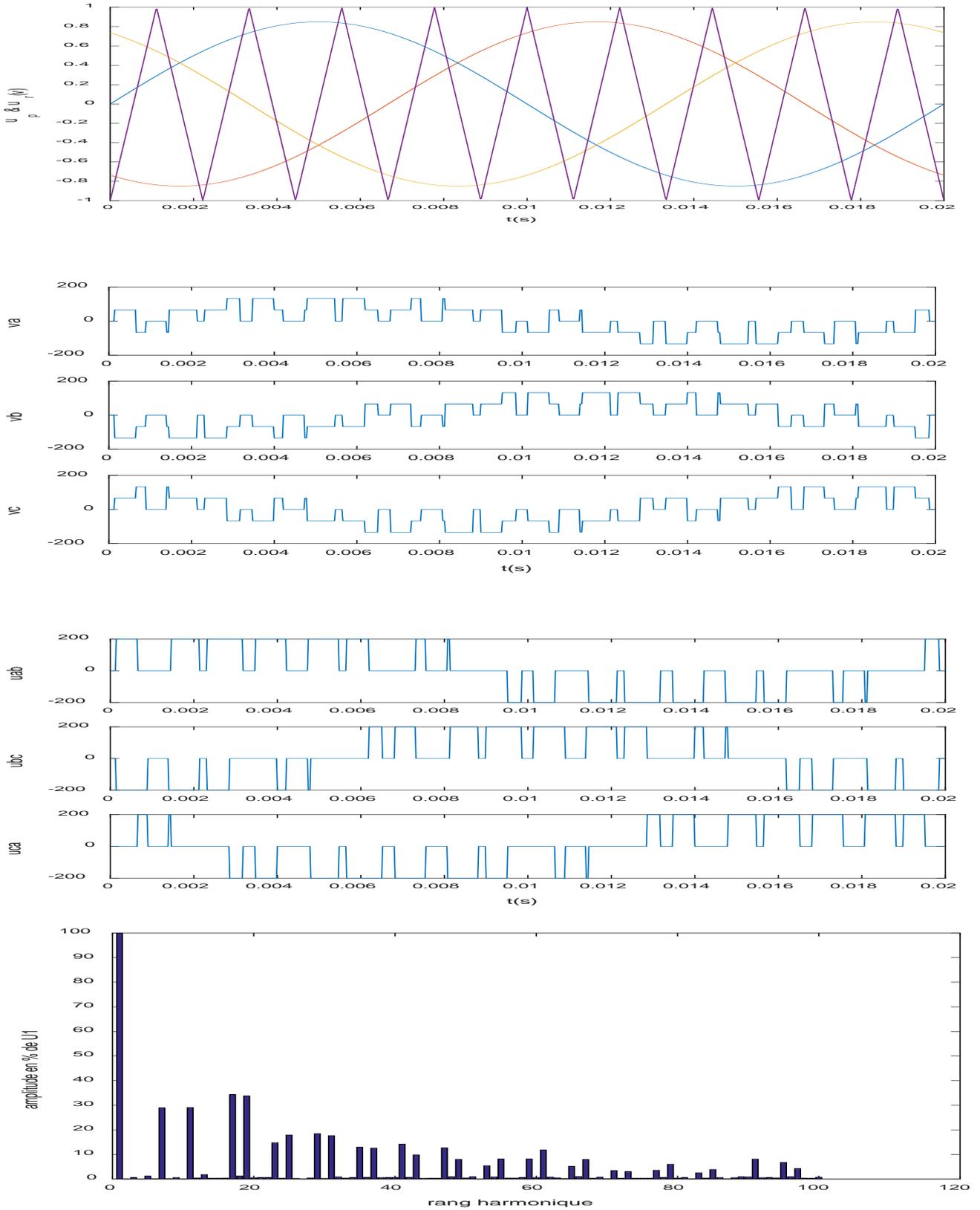


Figure (IV. 22) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $r=0,85$, $m=9$

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

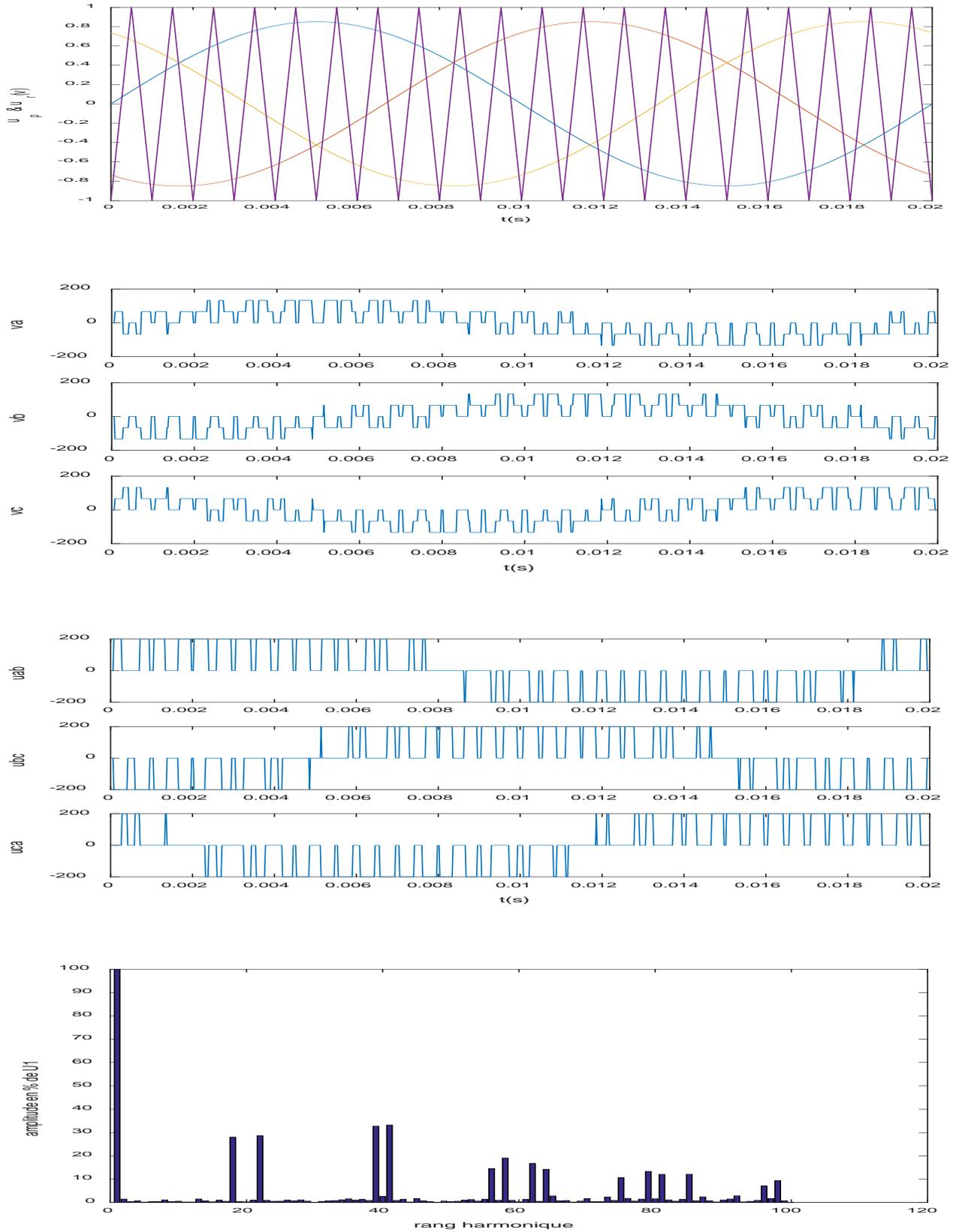


Figure (IV. 23) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour

$r=0,85$, $m=20$

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

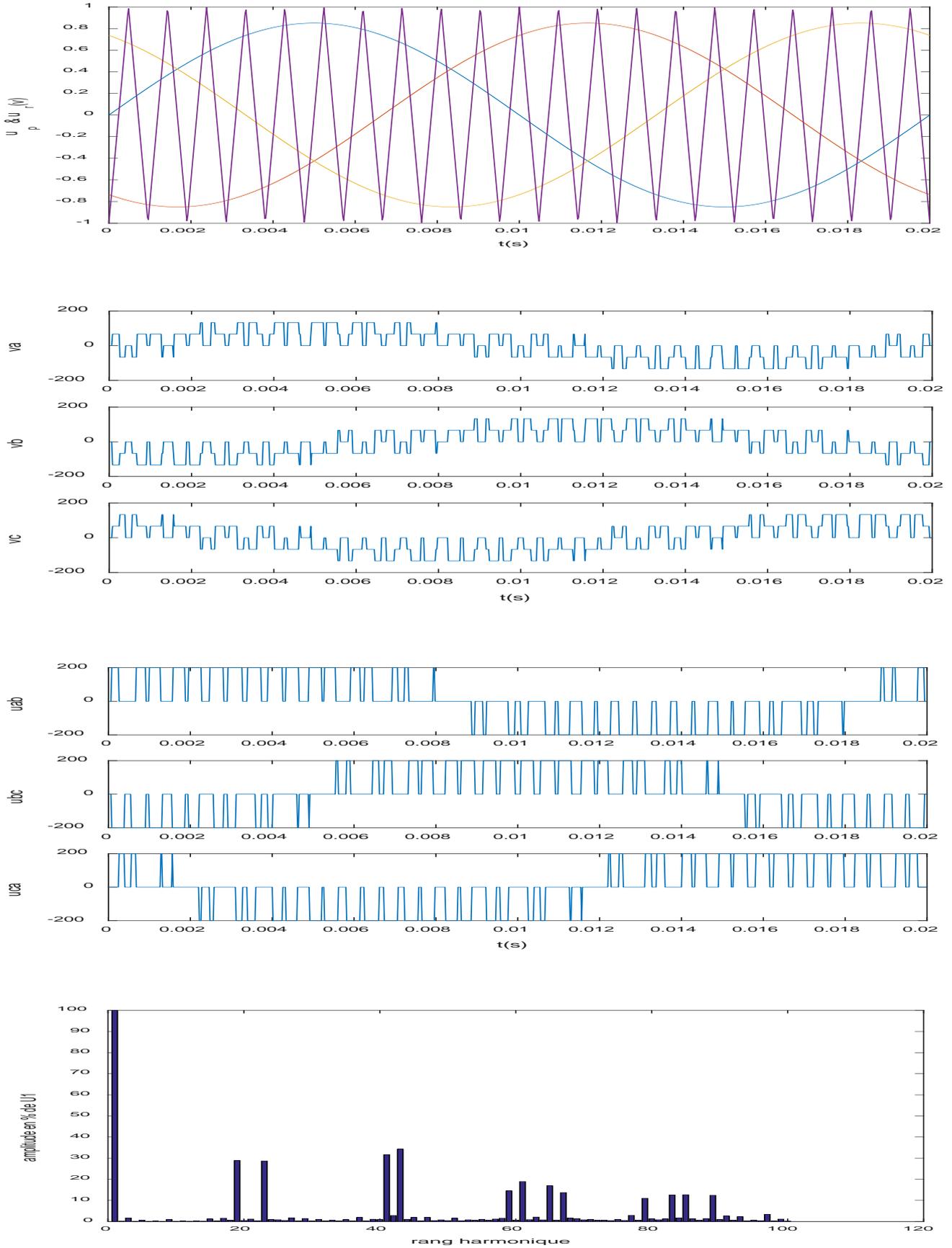


Figure (IV. 24) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour $r=0.85$, $m=21$

c- Variation de la fréquence de la référence

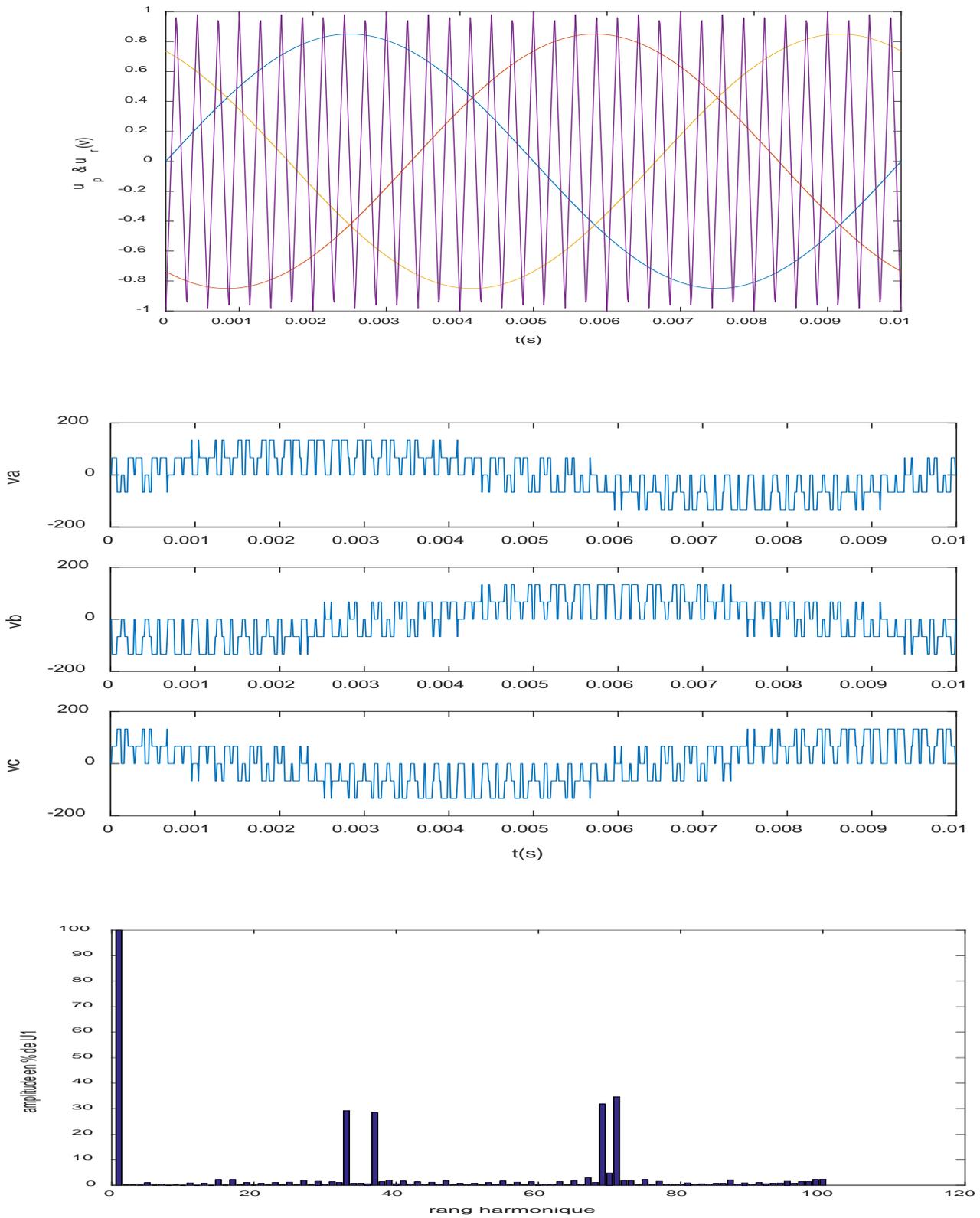


Figure (IV. 25) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour

$f_r = 100\text{HZ}$, $m = 35$, $r = 0.85$

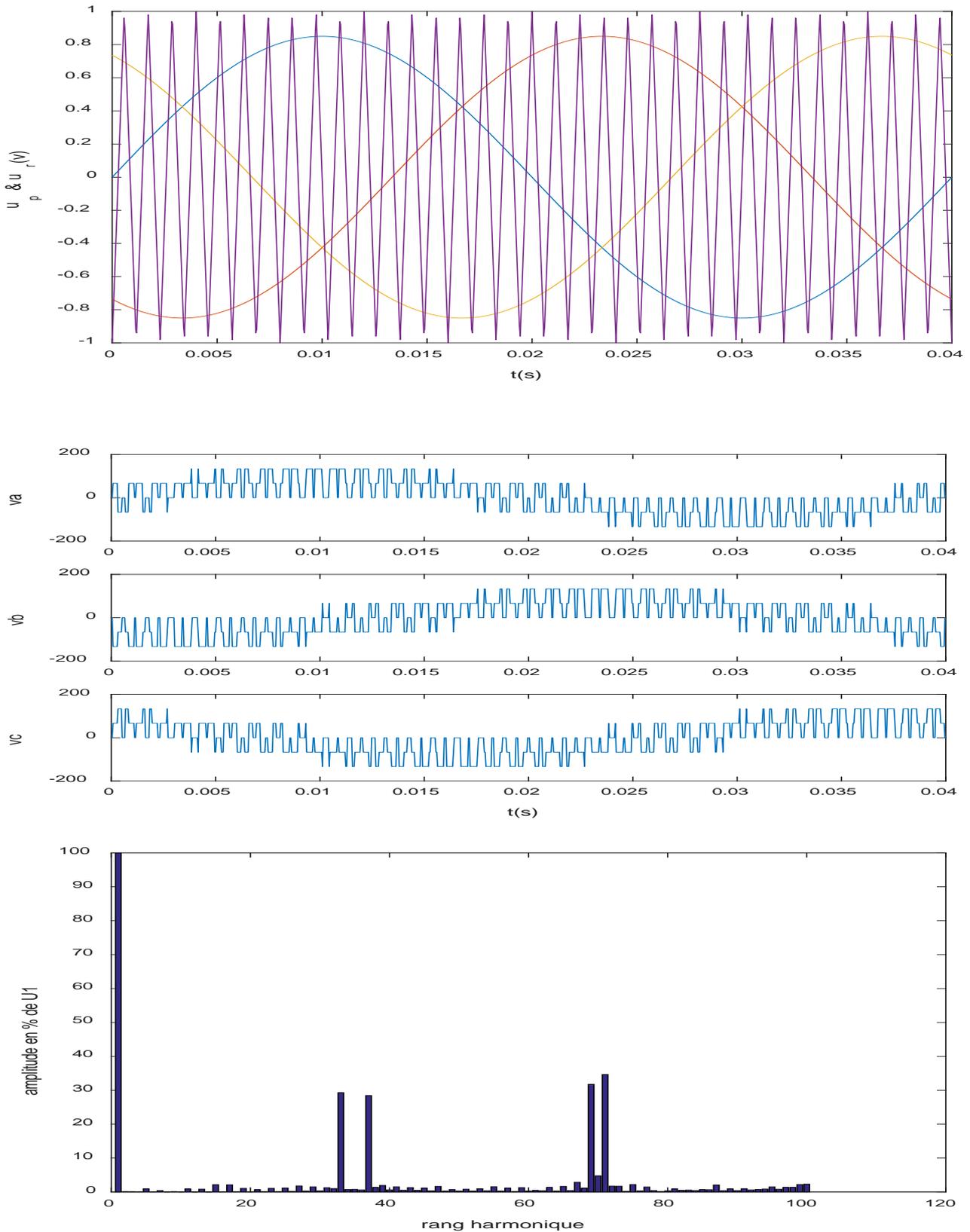


Figure (IV. 26) : tensions simples, composées et spectre de la tension simple pour

$f_r = 25 \text{ HZ}$, $m = 35$, $r = 0.85$

d- Comparaison des taux de distorsion :

| Cas étudié | Variation de r | | | Variation de m | | |
|------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 1 ^{er} cas | 2 ^{ème} cas | 3 ^{ème} cas | 4 ^{ème} cas | 5 ^{ème} cas | 6 ^{ème} cas |
| r | 0.8 | 0.85 | 1 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| m | 35 | 35 | 35 | 9 | 20 | 21 |
| THDV% | 66.9641 | 63.305 | 72.503 | 81.8311 | 75.2828 | 74.6501 |

Tableau (IV.2) : Comparaison des taux de distorsion harmonique pour chaque cas

e- Interprétation des résultats :

- La tension simple est en escalier. Elle prend les niveaux suivants : 0, (1/3) Vdc, (2/3)Vdc, (-1/3)Vdc, (-2/3)Vdc,
- La tension composée est à deux niveaux : 200V, -200V.
- A partir du tableau IV.1 ; on remarque que le rapport de modulation $r=0.85$ offre un meilleur taux de distorsion harmonique
- Pour m impair (4^{ème} cas (m=9), et 6^{ème} cas (m=21)), le spectre de la tension simple ne comporte que des harmoniques impairs. Les harmoniques paires n'existent pas.
- Pour m pair (5^{ème} cas), on remarque la présence des harmoniques paires.
- Le tableau IV.I montre que la valeur efficace de la tension à la sortie de l'onduleur varie avec la variation de r et m.

Chapitre 4 : simulation d'un générateur photovoltaïque

- Les figures IV.25 et VI.26 montrent que l'on peut régler la fréquence de la tension alternative à la sortie de l'onduleur en modifiant la fréquence de la référence lors de la commande à MLI.

IV.5.Conclusion :

- Lors de la commande de l'onduleur de tension triphasé à MLI afin de faire varier la tension efficace de sortie et la fréquence on a procédé à la simulation par Matlab. Les résultats de simulation de l'étude harmonique de la tension de sortie montrent que pour un indice de modulation élevé ; les harmoniques sont rejetés vers des fréquences plus élevés ce qui réduit leurs amplitudes et facilite le filtrage. Cependant ; m est limité par les temps des commutations des semi-conducteurs des convertisseurs et donc par la largeur minimale des impulsions.

conclusion Général

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail a été consacré à la modélisation d'un générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une diode. On a tracé la caractéristique courante tension et puissance tension.

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

- Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante.
- L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension et une légère augmentation du courant par suite une baisse du rendement maximal.

Lorsque l'ensoleillement diminue on propose l'algorithme Perturb and Observe pour l'optimisation de la puissance maximale. Les résultats de simulation montrent que cet algorithme est sensible au choix du rapport cyclique initial du hacheur survolteur.

Vu que la sortie du générateur PV est continu, et afin d'alimenter une charge en alternatif on a connecté le générateur à un onduleur à MLI. Les résultats de simulation montrent que :

- En modulation synchrone, si m est impair, l'alternance négative de u reproduit au signe près son alternance positive. Le développement en série de Fourier de u ne comporte que des harmoniques impairs
- Au contraire si m est pair, on trouve dans le développement série de Fourier de u une composante continue, des harmoniques pairs et impairs.
- Lorsque $m \geq 15$, les raies des harmoniques se répartissent par groupe.
- Pour une modulation synchrone suffisamment importante ($m \geq 15$), les raies des harmoniques se répartissent par groupe au rang : 1, ($m-2, m, m+2$), ($2m-5, 2m-3, 2m-1, 2m+1, 2m+3, 2m+5$),

Conclusion générale

Les harmoniques sont rejetés vers des fréquences plus élevés ce qui réduit leurs amplitudes et facilite le filtrage. Afin d'alimenter les charges par des tensions alternatives sinusoïdales, on propose d'effectuer un filtrage passif ou même un filtrage actif.

Bibliographique

- [1] : Olivier Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [2]: Site Internet, <http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables>, consulté le 12/06/2013.
- [3]: B. Flèche, D. Delagnes, « energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [4] : baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de constantine 2007.
- [5] **A. Khelif**, " Expérience, potentiel et marché photovoltaïque algérien", New Energy Algeria, NEAL, 2010.
- [6] **UbiFrance et les missions économiques**, " Les énergies renouvelables en Algérie", Fiche de synthèse, Alger, juillet, 2010.
- [7] **Guide**, "Guide des énergies renouvelables", Publication éditée par le Ministère de l'énergie et des mines, 2007.
- [8] **Rapport**, " Programme de développement des énergies renouvelables ", Sonelgaz, Deuxième congrès Algéro-Allemand sur l'environnement, novembre, 2010.
- [9] **Séminaire**, " Potentialités et perspectives pour les énergies renouvelables en Algérie", Séminaire Algéro-Allemand sur le partenariat dans le domaine de l'énergie solaire, Sonelgaz, janvier, 2011.
- [10] **S. Bentouba, A. Slimani et M.S. Boucherit**, " Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie", Revue des énergies renouvelables CER'07, Oujda, pp. 109-112, 2007.
- [11] **B. Chikh-Bled, I. Sari-Ali, B. Benyoucef**, " Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque", Revue internationale d'héliotechnique, N° 41, pp. 24-30, 2010.
- [12] www.cder.dz
- [13] www.memalgeria.org/fr/enr/energie%20solaire/pres_20-villages.htm
- [14] **M. Madani**, "Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces ", Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2006.
- [15] **MEM**, " Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique", 2011.
- [16] www.neal-dz.net

[17] www.aprue.org.dz

[18] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.

[19] **A. Labouret, P. Cumunel, J-P. Braun, B. Faraggi**, " Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque ", Dunod, 3ème édition, Paris, 2001.

[20] **M.Blhadj** ''Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome '' Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.

[21] S. M. Sze, K. N. Kwok, Physics of Semiconductor Devices, 3rd edition, WILEY INTERSCIENCE, New Jersey, 2006.

[22] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.

[23] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque (volume1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.

[24] Z. Djessas, Extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire à deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétiques, Mémoire de magistère, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.

[26] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.

[27] **I.Bendjamaa** ''Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque '' Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.

[28] **M.N.Mchalikh et CH.Hmada**''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[29] **M.Amaud Deves** '' énergie photovoltaïque (Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales)'' document technique Rédition 2003 FNDAE n 12.

[30] **O.BENSEDDIK et F.DJALOUD** '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.

[31] Alin Ricaurd : Photopiles solaires. Edition presses polytechniques et universitaires romandes, (1997).

[32] **S.Lhlah** '' Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)'' Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.

[33] **CH.Maher** ''Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque'' Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.

- [34] **K.Sobaihi** ‘‘ étude et réalisation d’un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction ‘‘ Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [35] **Alain Bilbao Ibarreta** ‘‘ Réalisation de commandes MPPT Numériques ‘‘ Rapport de stage Projet Fin d’Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.
- [36] **BOUKAROURA Abdelkader**’’ Modélisation et Diagnostic d’un Onduleur Triphasé Par l’Approche Bond Graph ‘‘Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [37] **F.Slama** ‘‘ Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ‘‘ Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- 01/04/2011.

ملخص

الطاقات المتجددة أو النظيفة هي دليل للوقود الاحفوري لأنها لا تنضب، لا تتسبب في اختلال التوازن البيئي و لا تنبعث منها

غازات دفيئة أو نفايات. من بين هذه الطاقات نذكر طاقة الرياح، وطاقة الكتلة الحيوية و الطاقة الشمسية

نظرا لموقعها الجغرافي الجزائر لديها مخزون شمسي في الحوض الأبيض المتوسط.

نتائج محاكاة الحلقة الشمسية من النوع (1S TH-215-P) 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 ces énergie on cite l'énergie éolienne, l'énergie biomasse, 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 anneau solaire du type (1S TH-215-P) montrent qu'il se caractéristique par des caractéristique fluctuantes qui dépendent des conditions climatique (irradiation solaire, température.....)

Dans ce mémoire nous avons modélisé et optimiser la puissance MPPT d'un panneau photovoltaïque connecté à une charge résistive par la méthode perturb and observe pour un chargement dans l'éclairément

Enfin le panneau PV étant une source de tension continue l'alimentation d'une charge de nature alternative nécessite un onduleur a 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 wind energy, biomass energy, 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 (1S TH-215-P) 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 illuminance

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