

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED- NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE UNITÉ DE CONDITIONNEMENT DE PUISSANCE CONNECTÉE À UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

Présenté par :

- Haddi Abdelkadir
- Zahzouh Miloud
- Lachheb Youcef

Soutenu le : ...17/09/2020 devant le Jury :

| | | | |
|---------------------------|------------|-----------------------------------|------------------|
| <i>M. HABCHI Yacine</i> | <i>MCB</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Président</i> |
| <i>M. BRAHIMI Mohamed</i> | <i>MCB</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Encadreur</i> |
| <i>M. MEDJADJI Nacira</i> | <i>MAA</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Examineur</i> |

Naama – Algérie - 2020

Remerciements

D'abord et avant tout nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

J'exprime toute ma gratitude à l'administration et à l'ensemble du corps enseignant de Centre Université Salhi Ahmed Naàma pour leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme électrotechnique.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire

Dr. Mohammed Brahimi, je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

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

Nous tenant à remercier sincèrement Monsieur, Chef du département de Technologie **Badaoui Abdelhamid**

Je remercie mes frères, ma famille et mes amis pour leurs encouragements.

Enfin, mes sincères remerciements à ma mère et à mon père, car ils sont la source du succès.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents.

Ma mère, FATIMA HAMZA qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, MOHAMMED qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi

Mes frère ABDERRAHMANE et sœurs BOCHRA et HANIYA qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mon grand-père Mes oncles KOUIDER BOUDJMAA et mes cousins Hicham, Mohamed

Ma grand-mère et mon oncle et BERABH LHADJ DJADED HAOUARI Le cousin Ashraf, Yasser, Noureldine, Hamza, Mohamed

A tout mes amis Chafi, Malouk, Sahli, Khaled, Nassro, Meftah, Achraf, Djamel

A tout mes professeurs à centre universitaire Salhi Ahmed Naâma qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

A tout Travailleurs Résidence universitaire Naâma, Antri, fatehi, zalat, Abdelsamed, Moussa, Mourid, Adenan, Azdine

Haddi Abdelkadir

Dédicaces

On dédie ce modeste travail à nos parents :

Zahzouh Salem et Chaib Salma

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.

Miloud Zahzouh

Dédicaces

J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue

- ✓ *A ma très chère mère.*
- ✓ *A mon très cher père.*
- ✓ *A mes frères*
- ✓ *A mes chères sœurs*
- ✓ *A toute ma famille.*
- ✓ *A tous mes camarades de la promotion 2020 pour les bons moments passés ensemble.*



Lachheb Youcef

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier le comportement des composants de la chaîne photovoltaïque. Le type de convertisseur, utilisé dans le système, est un hacheur élévateur. Les méthodes de poursuite du point de puissance maximale 'MPPT' sélectionnées pour la simulation, sont l'incrémentation de la conductance et la méthode perturbation et observation 'P&O'.

Une partie de ce travail consiste à effectuer une étude théorique des composants constituant le système photovoltaïque global à savoir: le module photovoltaïque, le hacheur, et le régulateur MPPT. La seconde étape est consacrée à la simulation du système photovoltaïque, sous différentes conditions atmosphériques.

Mots-clés: Photovoltaïque; Conditionnement; Rayonnement; Modélisation; MPPT

Summary

This work aims to study the behavior of the components of the photovoltaic chain. The type of converter used in the system is a step-up chopper. The "MPPT" maximum power point tracking methods selected for the simulation are the conductance increment and the "P&O" perturbation and observation method. Part of this work consists in carrying out a theoretical study of the components constituting the overall photovoltaic system, namely:

the photovoltaic module, the chopper, and the MPPT regulator. The second step is devoted to the simulation of the photovoltaic system, under different atmospheric conditions.

Keywords: Photovoltaic; Conditioning; Radiation; Modelization; MPPT

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك مكونات السلسلة الكهروضوئية. نوع المحول المستخدم في النظام هو مفرمة تصاعدية. إن طرق تتبع نقطة الطاقة القصوى "MPPT" المحددة للمحاكاة هي زيادة التوصيل وطريقة الاضطراب والمراقبة "P&O". يتكون جزء من هذا العمل من إجراء دراسة نظرية للمكونات المكونة للنظام الكهروضوئي الكلي ، وهي: الوحدة الكهروضوئية ، والمروحية ، والمنظم MPPT. والخطوة الثانية مكرسة لمحاكاة النظام الكهروضوئي في ظل ظروف جوية مختلفة.

الكلمات المفتاحية: الضوئية , التكيف , الإشعاع , النمذجة , MPPT

Table des matières :

| | |
|---|------------|
| Remerciement | i |
| Dédicace..... | iv |
| Résumé..... | v |
| Sommaire..... | vi |
| Liste de figures..... | ix |
| Liste des Tableaux..... | xi |
| Nomenclature..... | xii |
| Introduction générale..... | 01 |
| Chapitre I : Generalités Sur Les Systemes Photovoltaïques. | |
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Historique..... | 4 |
| I.3. Rayonnement solaire..... | 6 |
| I.4. Déclinaison du soleil..... | 7 |
| I.5. Principe de la conversion photovoltaïque..... | 8 |
| I.6. configurations des systèmes PV..... | 9 |
| I.6 .2. Système autonome avec batterie..... | 9 |
| I.6.3. Système fonctionnant au fil du soleil..... | 10 |
| I.6.4. Système avec appoint électrique..... | 10 |
| I.7. Les différentes technologies photovoltaïques..... | 10 |
| I.7.1 .Cellules au silicium cristallin..... | 10 |
| I.7.1.1. Silicium métallurgique..... | 11 |
| I.7.1.2. Cellules monocristallines | 12 |
| I.7.1.3. Cellules multi cristallines | 13 |
| I.7.2. Cellules au silicium amorphe | 14 |
| I.7.3. Autres technologies..... | 15 |
| I.7.3.1. Cellules au CdTe : (sulfure de cadmium)..... | 15 |
| I.7.3.2. Cellules CIS : (cuivre-indium-sélénium) | 15 |
| I.7.4. Comparatif des différentes technologies..... | 16 |
| I.7.5. Photovoltaïque en l'Algérie..... | 17 |
| I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque..... | 19 |

| | |
|----------------------------------|----|
| I.8.1. Avantage..... | 19 |
| I.8.2. Inconvénients..... | 19 |
| I.9. Secteurs d'application..... | 19 |
| I.10. Conclusion | 20 |

Chapitre II : Modélisation d'un Systèmes photovoltaïques autonomes

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 21 |
| II.2. Modélisation de systèmes PV | 21 |
| II.2.1 Générateur photovoltaïque idéal..... | 21 |
| II.2.2 Générateur photovoltaïque réel..... | 22 |
| II.2.3 Paramètres de cellules photovoltaïques..... | 23 |
| II. 4. Modélisation des convertisseurs | 23 |
| II.4.1. Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire..... | 24 |
| II.4.1.1. Puissances des convertisseurs..... | 25 |
| II.4.1.2. Puissance instantanée | 25 |
| II.4.1.3. Puissance active..... | 25 |
| II.4.1.4. Puissance apparente..... | 26 |
| 4.1.4.1 Facteur de puissance..... | 26 |
| II. 4.2. Régulateur de charge..... | 26 |
| II. 4.2.1. Régulations de charge série..... | 26 |
| II. 4.2.2. Régulateur de charge de coupure | 27 |
| II. 4.2.3. Régulateur de charge à découpage..... | 27 |
| II. 4.2.4. Régulateur de charge série à coupure partielle | 27 |
| II. 4.2.5. Régulateur de charge parallèle | 27 |
| II.5. Modélisation de système de stockage | 28 |
| II.5.1. Batterie solaire | 29 |
| II.5.2. Capacité de batterie | 29 |
| II.5.3. Types des batteries..... | 30 |
| II.5.3.1 Batteries solaires..... | 30 |
| II.5.3.1.1 Batterie étanche | 30 |
| II.5.3.1.2. Batterie stationnaire solaire | 30 |
| II.5.3.1.3. Batterie à gel | 30 |
| II.5.3.2.1. Les batteries d'accumulateurs | 30 |
| II.5.3.2. Batteries inondés..... | 30 |
| II.5.3.2.2. Les batteries au plomb | 30 |

| | |
|---|----|
| II.5.3.2.3. Les batteries au Cadmium-Nickel | 31 |
| II.5.3.2.4. Les batteries au Nickel-Zinc | 31 |
| II.5.3.2.5. Les batteries au Lithium | 31 |
| a) Modèle de la charge de la batterie..... | 31 |
| b) Modèle de la décharge de la batterie | 32 |
| c) La tension de la batterie..... | 33 |
| d) Courant de batterie..... | 35 |
| e) Rendement de la Batterie | 35 |
| II.6. Le convertisseur DC/AC | 35 |
| Principe de fonctionnement | 36 |
| II.7. Commande MPPT..... | 38 |
| II.7.1. Principe du MPPT | 38 |
| II.7.2. Classification des commandes MPPT | 39 |
| II.7.2.1. MPPT Indirect..... | 39 |
| II.7.2.2. MPPT directs..... | 40 |
| II.8. Commande PWM..... | 40 |
| II.8.1.1. Structures des systèmes photovoltaïques..... | 40 |
| II.8.1.2. Structure avec hacheur et onduleur..... | 41 |
| II.8.1.3 Structures des systèmes à connexion directe..... | 41 |
| II.8.2.1. Installation mono-onduleur (onduleur central)..... | 42 |
| II.8.2.2. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)..... | 42 |
| II.8.2.3. Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)..... | 43 |
| II.9. Conclusion..... | 44 |

Chapitre III: Résultats De Simulation D'un Système Photovoltaïque

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction..... | 45 |
| III.2. Composants du système photovoltaïque..... | 45 |
| III.2.1. Champ photovoltaïque..... | 45 |
| III.2.1.1. Fiche technique du panneau solaire..... | 46 |
| III.2.2. Filtre..... | 49 |
| III.2.3. Convertisseur DC / AC monophasé..... | 49 |
| III.2.3.1. Contrôle de l'onduleur..... | 50 |
| III.2.4. Réseau public et charge..... | 55 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| III.3.Conclusion..... | 56 |
| CONCLUSION GENERALE..... | 57 |
| Bibliographie.. .. | 58 |

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.

| | |
|--|----|
| Figure. I.1: schéma de principe d'un générateur photovoltaïque | 03 |
| Figure. I.2: découvreur production l'énergie électrique par l'énergie solaire | 04 |
| Figure. I.3: les Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince généralité sur le système photovoltaïque..... | 05 |
| Figure. I.4: le premier satellite équipé des panneaux solaires | 05 |
| Figure. I.5: la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque..... | 06 |
| Figure. I.6: Réponse spectrale d'une cellule solaire (PV). | 07 |
| Figure. I.7: déclinaison du soleil | 07 |
| Figure. I.8: principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque..... | 08 |
| Figure. I.9: Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque | 09 |
| Figure. I.10: silicium..... | 10 |
| Figure. I.11: cellule au silicium multicristallin (photowatt international) | 12 |
| Figure. I.12 : Cellule monocristallin..... | 13 |
| Figure. I.13: Cellule multicristalline..... | 14 |
| Figure. I.14: Cellules au silicium amorphe | 14 |
| Figure. I.15: un modèle des panneaux solaires installé dans le sud | 17 |

Chapitre II : Modélisation d'un Systèmes photovoltaïques autonomes.

| | |
|--|----|
| Figure .II.1 : modèle simple d'une cellule PV. | 22 |
| Figure .II.2 : Modèle de la cellule PV à une diode. [14]..... | 22 |
| Figure .II.3: Schéma de convertisseur DC/DC[15]..... | 24 |
| Figure. II.4 : Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC [16]..... | 25 |
| Figure .II.5: Couplage de convertisseur avec un récepteur | 25 |
| Figure .II.6 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série..... | 26 |
| Figure II-7 : Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage | 27 |

| | |
|---|----|
| Figure II-8 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle..... | 28 |
| Figure II.9 Modèle R-C de la batterie..... | 28 |
| Figure II-10 : Schéma électrique de batterie..... | 33 |
| Figure II-11 : Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge..... | 33 |
| Figure II.12 : Evolution de la tension et du courant avec le temps durant la charge d'un élément plomb..... | 34 |
| Figure II.13: Schéma de L'onduleur | 37 |
| Figure II.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire..... | 39 |
| Figure II.15 Principe de la commande MPPT..... | 39 |
| Figure II.16 : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé..... | 41 |
| Figure II.17 : Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques..... | 42 |
| Chapitre III: Résultats de Simulation D'un Système Photovoltaïque. | |
| Figure III.1 : Modèle de simulation..... | 45 |
| Figure III.2: Courbe de l'évolution de l'éclairement..... | 47 |
| Figure III.3 : Courbe de tension de sortie du champ PV sous $E=250Wm^2$ et $750Wm^2$ | 48 |
| Figure III.4 : Courbe du courant de sortie du champ PV sous $E=250Wm^2$ et $750Wm^2$ | 48 |
| Figure III.5 : Courbe de puissance de sortie du champ PV sous $E=250Wm^2$ et $750Wm^2$... | 49 |
| Figure III.6 : Courbe de tension de sortie de l'onduleur | 50 |
| Figure III.7: Organigramme de l'algorithme MPPT de la Perturbation & Observation. | 51 |
| Figure III.8: Courbe de tension de Vdc de référence | 52 |
| Figure III.9: Courbe de tension de Vdc optimisé par MPPT..... | 52 |
| Figure III.10: Courbe de Id (courant actif)..... | 53 |
| Figure III.11: Courbe de Id de référence | 54 |
| Figure III.12: Courbe de Id (réactif)..... | 54 |
| Figure III.13: Courbe de tension de réseau | 55 |

| | |
|---|----|
| Figure III.14: Courbe de courant de réseau..... | 56 |
|---|----|

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïque.

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1: comparatif des différents matériaux PV..... | 16 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau 1.2: Programme d'électrification rurale solaire dans les 04 wilayas du Sud..... | 18 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tableau 1.3: Principales réalisations du CDER dans le domaine photovoltaïque..... | 18 |
|---|----|

Chapitre II : Modélisation d'un Systèmes photovoltaïques autonomes

| | |
|---|----|
| Tableau II.1 : Caractéristique de batterie plomb acide..... | 34 |
|---|----|

Chapitre III: Resultats De Simulation D'un Système Photovoltaïque.

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 : Tableau des caractéristiques électriques..... | 46 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tableau III.2 : Tableau des caractéristiques mécaniques..... | 47 |
|--|----|

Nomenclatureur

GPV : Générateur photovoltaïque

PV: photovoltaïque

Si: silicium

O : oxygène

C: carbone

HCl:osilane

H: hydrogène

DC/DC:hacheur

DC/AC: onduleur

DC : Courant continu

AC : Courant alternatif

E : Ensoleillement, Irradiation

T : Temperature

V_{pv} : Tension du panneau

I_{pv} : Courant du panneau

V_{oc} : tension de circuit ouvert

I_{cc} : courant de court circuit

VOPT : Tension optimale

IOPT : Courant optimal

R_s : résistance série

R_p : résistance parallèle

R_{ch} : résistance de charge

V_{Max} : tension maximale

I_{max} : intensité maximale

n_s : Nombre de cellules en série

n_p : Nombre de cellules en parallèle

K : semi conducteur

T_f : périodes de fermeture du semi conducteur

To : périodes d'ouverture du semi conducteur
Tc : période de cycle de commande
D : rapport cyclique
PLL : Phase Locked Loop
MLI : Commande par modulation de largeur d'impulsions
PWM MLI en anglais : *Pulse With Modulation*
iar,ibr,icr : Courant du réseau
Var,Vbr,Vcr : Tension du réseau
Vi : Tension d'entrée du hacheur
V0 : Tension de sortie du hacheur
Pr : Puissance active du réseau
Pch : Puissance active de la charge
Q : Puissance réactive de la charge
SOC : state-of-charge
Vbat : Tension de la batterie
Ibat : Courant de la batterie
Pbat : Puissance de la batterie

bat R : La résistance interne de batterie (ohm).
I bat : Courant de charge de batterie (A).
 η_{Bat} : Le rendement de la batterie (%).
T a : La température ambiante (°K).

I: Intensité aux bornes du générateur *A*
: Le courant de saturation de la diode *A*
V : Tension aux bornes du capteur [V]
: Photocourant [A], proportionnel à l'irradiation *G*, avec correction selon *T*.
: Résistance série[Ω].
: Résistance shunt(ou parallèle)[Ω].
A : le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2.
: Température de jonction.
T : la température absolue
K : Kelvin
Is : courant de saturation
n : facteur de qualité de la diode

I_{cc} : courant de court-circuit

V_{oc} : tension de circuit ouvert

FF : facteur de forme

S : surface de la cellule en m².

E : l'ensoleillement en W/m².

V_e : tension d'entrée

V_s : tension de sortie

DC : continue

MOSFET : Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor

S : puissance apparente

α : rapport cyclique

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsions

AC : Courant Alternatif

DC : Courant continu

MPPT : Maximum Power Point Tracking (suivi du point maximal de puissance)

PWM :Pulse Width Modulation (MLI, modulation de largeur d'impulsions)

V_g :Tension du réseau

I_g : Courant du réseau

f :Fréquence

s : Second

V : Volt

A : Ampère

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet l'énergie est un facteur essentiel au développement économique, dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse [1], [2].

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement [3], [1].

Notons que l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La moyenne annuelle d'insolation dépasse les 3000 heures. C'est aussi le plus important de tout le bassin méditerranéen avec 169440TWh/an. L'énergie solaire moyenne reçue est de 1700 kWh/m²/an au niveau des régions côtières ; 1900 kWh/m²/an dans les Hauts-Plateaux et 2650kWh/m²/an au Sahara. Notre pays peut donc couvrir certains de ses besoins en énergie par les systèmes photovoltaïques [4] .

Par ailleurs aujourd'hui nous distinguons plusieurs sources d'énergies renouvelables : l'énergie Hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire). L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. Notre étude est réservée à l'installation d'un système solaire qui alimente un bâtiment d'équipement électrique.

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable. C'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes

solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement[5] . Notre thèse se compose de deux parties: une partie théorique et une partie pratique. La première partie théorique consiste en une analyse des différents concepts de base. La deuxième partie est une partie analytique, et cette étude a été organisée en trois chapitres comme suit:

Le premier chapitre, nous présentons des généralités sur la technologie du système photovoltaïque et de leur fonctionnement, En commençant par les avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que le principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Nous suivrons ensuite dans le deuxième chapitre, on va représenter le système photovoltaïque autonome et leurs composants, et on vient de présenter une méthode de calcul optimal simple. Dans le troisième chapitre Ce travail a pour but d'étudier le comportement des composants de la chaîne photovoltaïque. Le type de convertisseur, utilisé dans le système, est un hacheur élévateur. La méthode de poursuite du point de puissance maximale 'MPPT' sélectionnées pour la simulation, et la méthode perturbation et observation 'P&O'.

Enfin, nous terminons notre travail par est conclusion générale des perspectives.

Chapitre I :
Généralités Sur Les
Systemes
Photovoltaiques

I.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée[6].



Figure I.1: schéma de principe d'un générateur photovoltaïque.

On début cette chapitre par les connaissances de base de tout ce qui concerne photovoltaïque. Nous présenterons ensuite le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Enfin nous présenterons le développement d'utilisation l'énergie solaire en Algérie.

Le chapitre deux est une présentation de les trois type de convertisseurs statique photovoltaïque. Nous montrons ensuite au chapitre trois la dimension de l'installation photovoltaïque, nous fait ensuite au chapitre quatre une étude économique de dispositif. Au chapitre cinq nous représentera l'étude technico économique d'une installation photovoltaïque. À la fin de se recherche fait une conclusion général.

I.2. Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

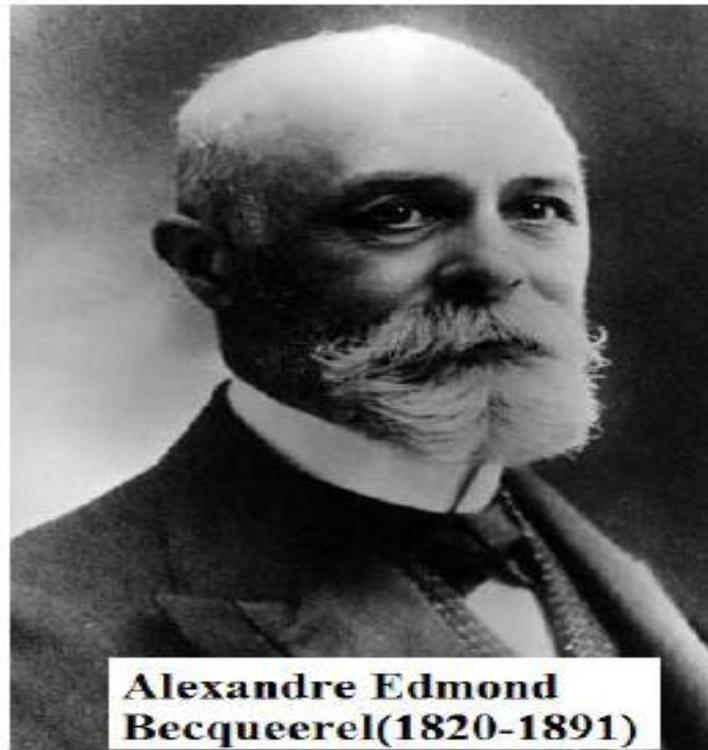


Figure I.2: découvreur production l'énergie électrique par l'énergie solaire.

patiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie s



Figure I.3: les Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince généralité sur le système photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

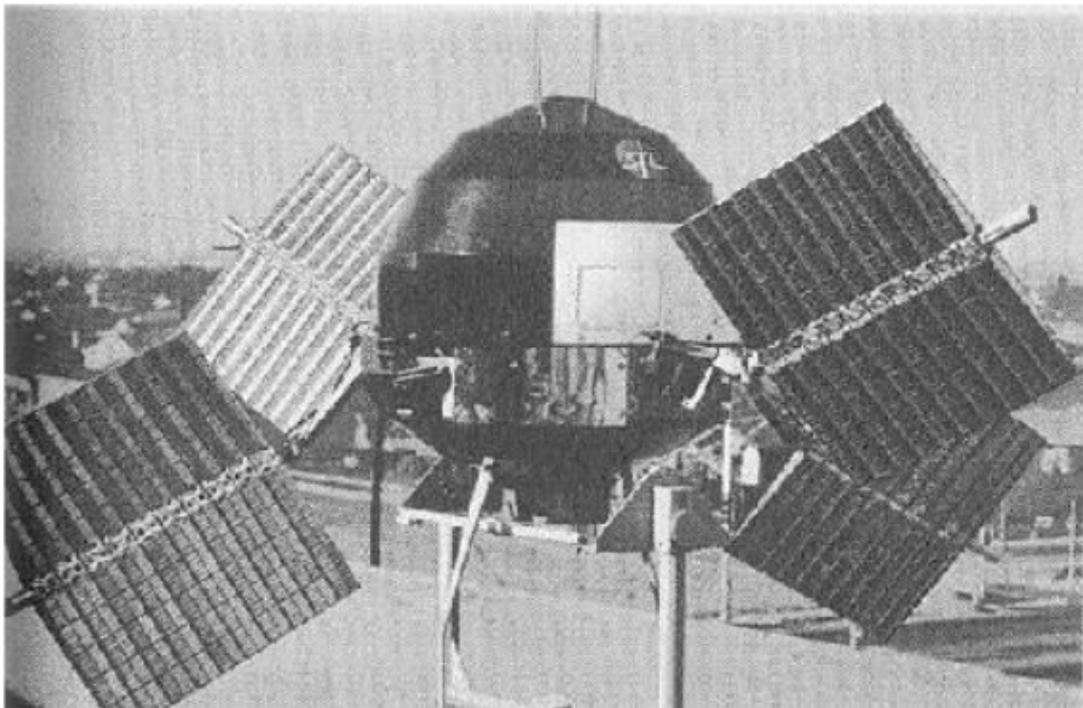


Figure I.4: le premier satellite équipé des panneaux solaires.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie

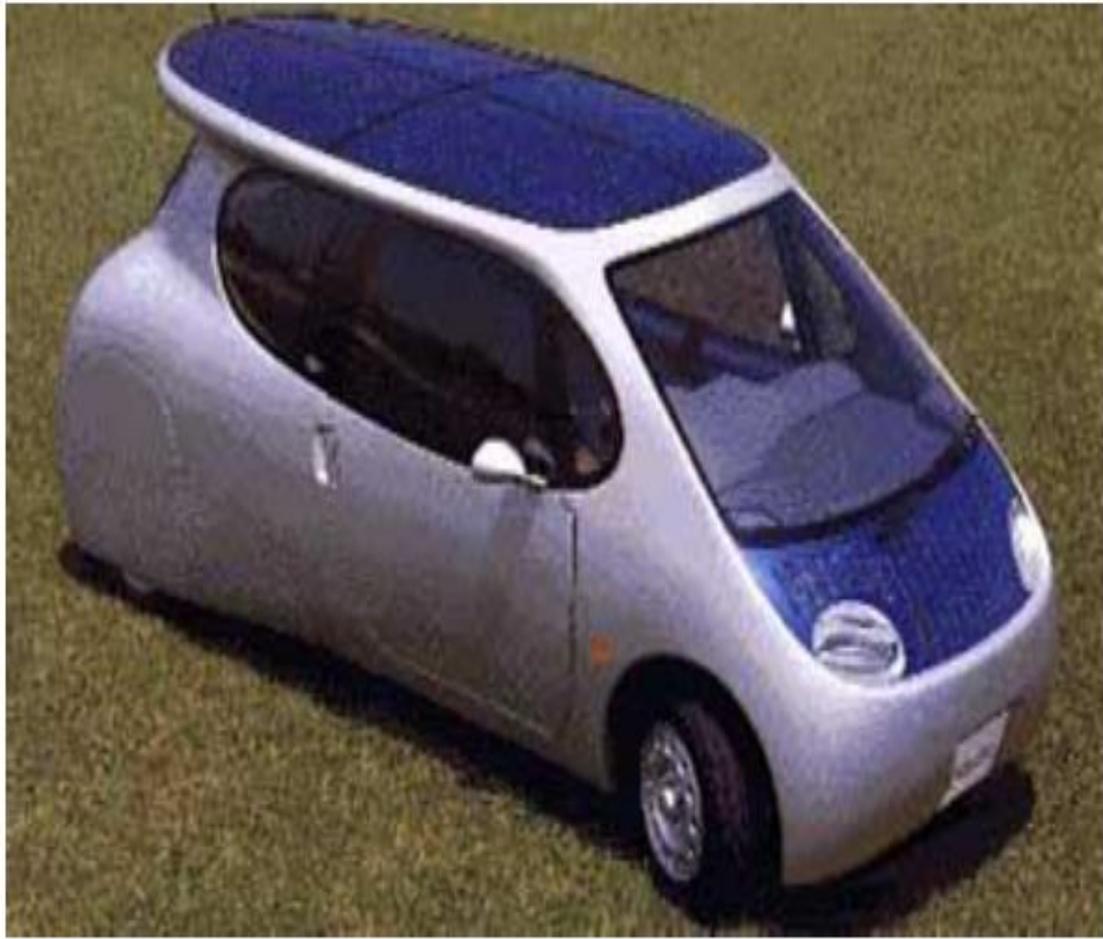


Figure 1.5: la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque.

I.3. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie[7] .

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$, l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$) [7] .

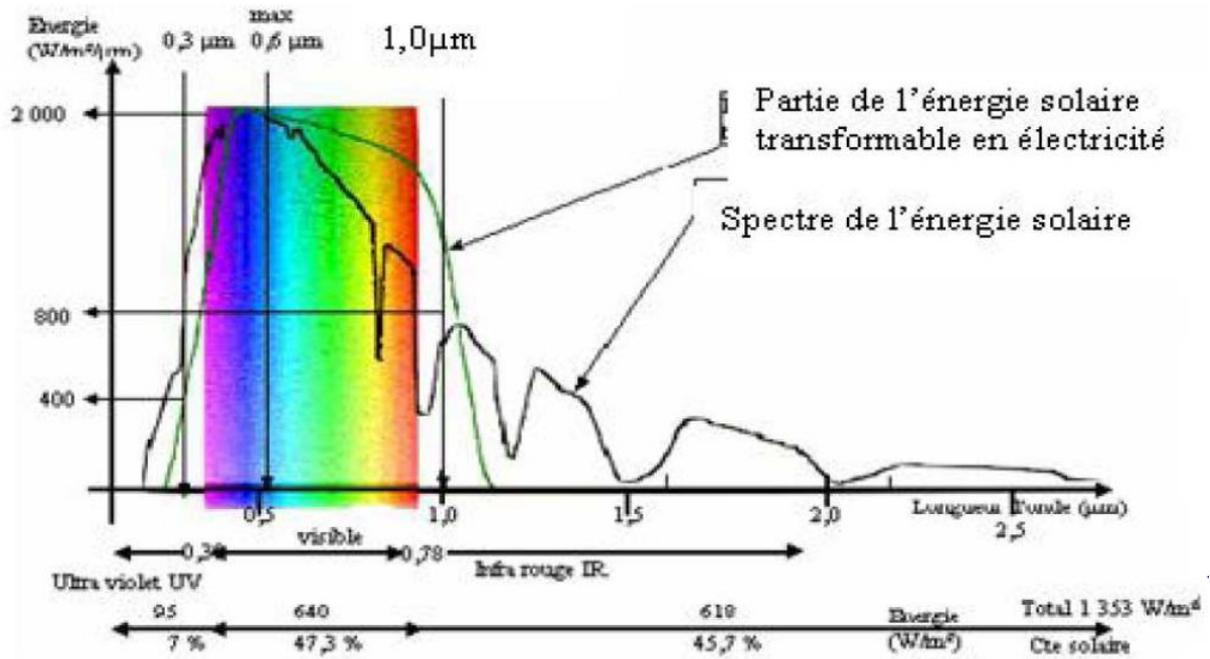


Figure I.6 : Réponse spectrale d'une cellule solaire (PV).

Au cours de ces dix derniers années ce spectre à été homologués par l'organisation international de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000 W/m^2 Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison L'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.) [7] .

I.4.Déclinaison du soleil

L'angle forme par la direction des rayons du soleil et le plan quatorial est appellé declinaison du soleil δ .notée ,il varie,tout au è long de l'annèe,entre deux valeurs extrêmes -23.45° et $+23.45^\circ$ environ.

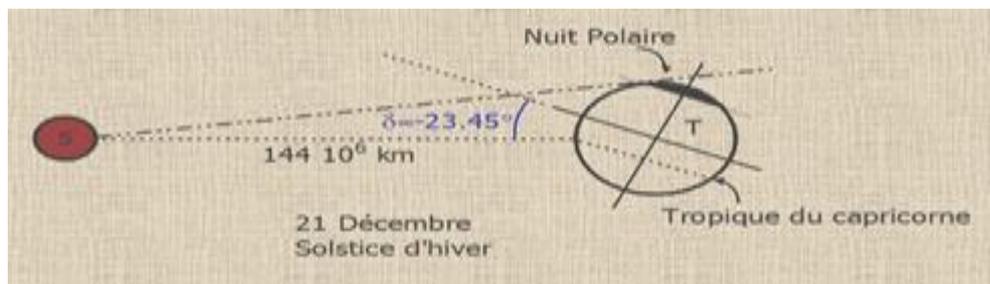


Figure I.7 : declinaison du soleil.

I.5. Principe de la conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet Photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [8]. La figure (I.4) illustre une cellule PV typique .

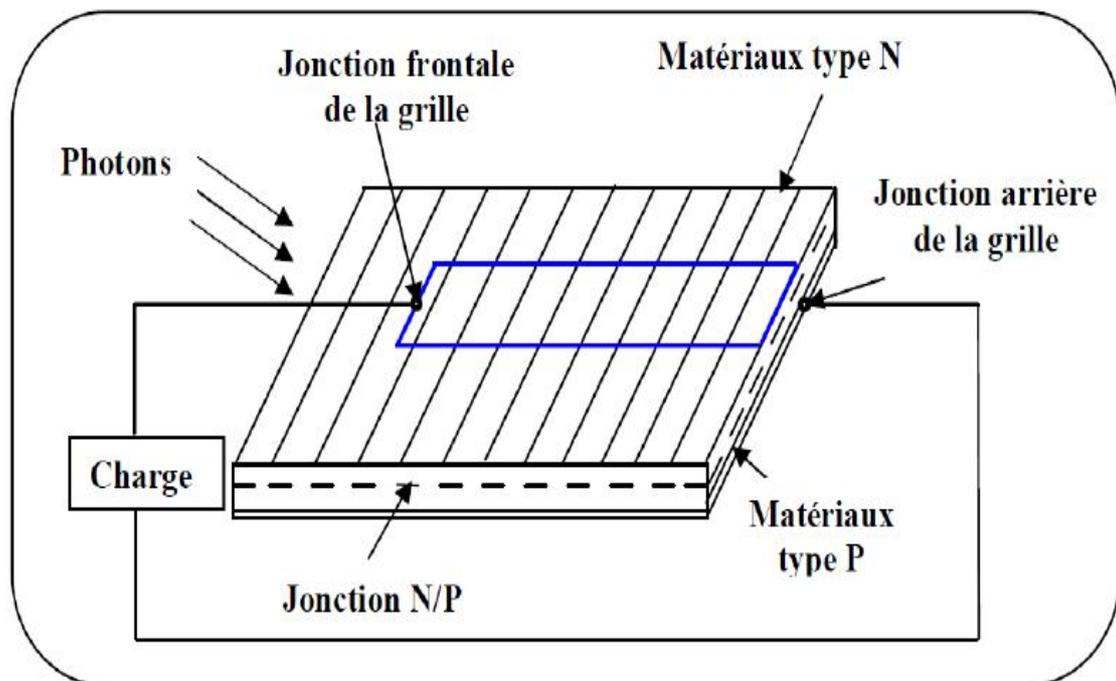


Figure I.8 : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches [2] . Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert *VOC*. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit *ISC* et dépend fortement du niveau d'éclairement[9] .

I.6. configurations des systemes PV

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'appoints

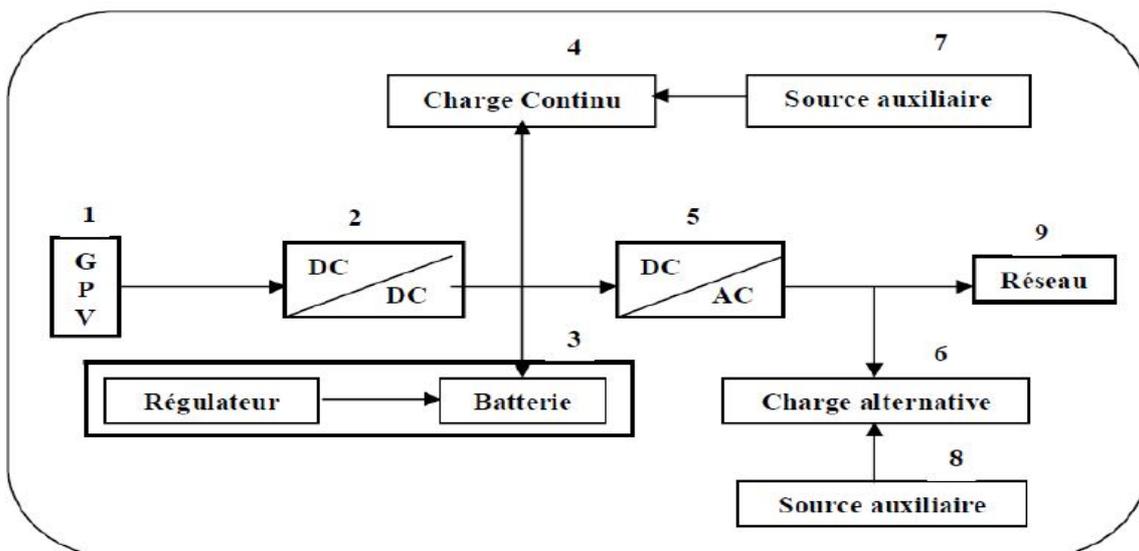


Figure I.9 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.

I.6.1. Système autonome sans batterie:

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge[4] .

I.6.2. Système autonome avec batterie:

Ces systèmes sont représentés par les blocs dans le cas où la charge est de type continu et les blocs si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire[4].

I.6.3. Système fonctionnant au fil du soleil:

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit[4].

I.6.4. Système avec appoint électrique:

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu et ; ou de type alternatif. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie[4].

I.7. Les différentes technologies photovoltaïques

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium).



Figure 1.10: silicium.

Il Ya quelques matériaux constituant des cellules solaires comme le silicium cristallin et le silicium amorphe.

On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- les matériaux solides cristallisés
- les couches minces

Ces couches minces sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible (de l'ordre du micron et en deca) et déposées sur un support. Alors que les photos piles cristallines sont massives et épaisses de 0,15-0,4 mm.

I.7.1 .Cellules au silicium cristallin :

Les cellules au silicium cristallin sont les plus répandues. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériau « cristallin », c'est parce que le silicium qui les constitue est ordonné, avec un arrangement parfait des atomes, selon une structure atomique ordonnée de type tétraédrique.

Si la photopile est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin et elle à un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Si par contre la photopile est faite de silicium multicristallin (on dit plus couramment polycristallin), elle est composée de plusieurs cristaux assemblés, et présente l'aspect d'une mosaïque compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelque centimètres, appelés « grains ».

I.7.1.1. Silicium métallurgique :

Le silicium n'existe dans la nature que sous forme oxydée puisqu'il est le constituant de base du sable, sous forme de silice. Pour fabriquer du silicium pur, on va donc employer du sable sous forme de quartz cristallisé. Le procédé de raffinage est une réduction dans un four à arc électrique par du carbone. La réaction suit l'équation :



On fabrique selon ce procédé plus d'un million de tonnes de ce silicium par an, dit « métallurgique ». Sa pureté est de l'ordre de 98 à 99%, les impuretés les plus importantes étant l'aluminium et le fer. Sa principale utilisation est comme composant de l'aluminium et de l'acier. Une petite proportion de cette production, quelques dizaines de tonnes, sera purifiée pour l'industrie électronique.

Pour obtenir un matériau suffisamment pur pour fabriquer des composants électroniques, on utilise le procédé Siemens qui transforme le silicium en trichlorosilane à l'aide d'acide chlorhydrique :

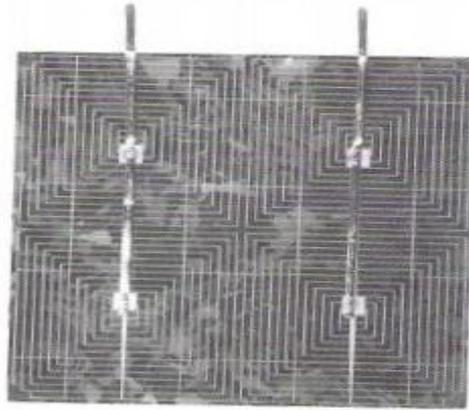


Figure1.11: cellule au silicium multicristallin (photowatt international).

I.7.1.2. Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un mono- cristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse

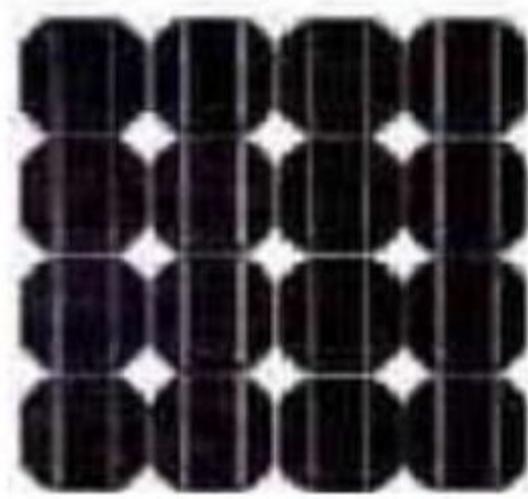


Figure I.12: Cellule monocristallin.

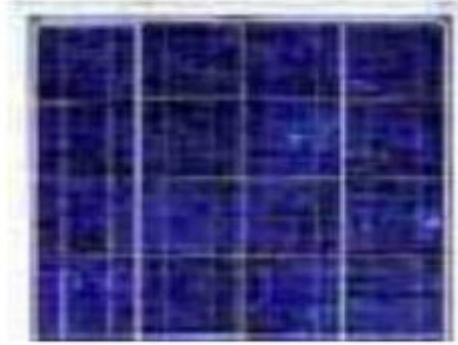
I.7.1.3. Cellules multicristallines :

Les cellules multicristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans.

Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.

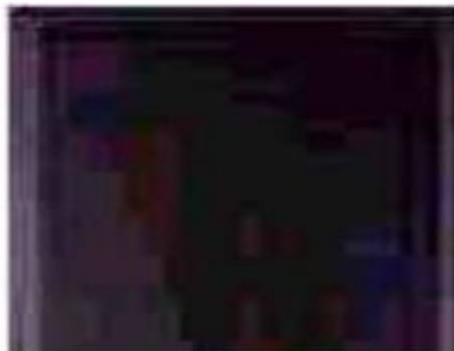


FigureI.13: Cellule multicristalline.

I.7.2. Cellules au silicium amorphe :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

Nota : En chimie, un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres sont des composés amorphe



FigureI.14: Cellules au silicium amorphe.

I.7.3. Autres technologies :

Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Voici quelques-unes d'entre-elles.

I.7.3.1. Cellules au CdTe : (sulfure de cadmium)

Ce matériau est intéressant du fait de son gap optique 1,45 eV et de sa forte absorption qui permet en moins de 2 μ m d'épaisseur d'absorber la quasi-totalité du spectre visible. Il est ordinairement déposé sur du CdS (sulfure de cadmium) de type n, qui sert de couche avant, pour former une hétérojonction (jonction à matériaux). Les résultats de laboratoire sont très intéressants avec notamment un rendement de 15,8 obtenus par une équipe de Floride.

I.7.3.2. Cellules CIS : (cuivre-indium-sélénium)

Le thin film met en oeuvre 1% seulement du silicium utilisé pour la fabrication de modules cristallins équivalents. Les cellules thin film sont plutôt utilisées pour des applications "courant faible". Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir car le rendement ne chute pas avec la température. Cependant, le rendement est de l'ordre de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Il y a un risque de toxicité vis-à-vis de l'environnement pour les modules CIS qui présentent un meilleur rendement que l'amorphe pur.

I.7.4. Comparatif des différentes technologies :

Tableau 1.1: comparatif des différents matériaux PV.

| Matériau | Rendement | caractéristiques | Principales utilisations |
|---|------------------------------------|---|--|
| Silicium mono Cristallin | 12 à 18% (24.7% en laboratoire) | Tres performant Stabilité de production d'w Méthode de production coûteuse et laborieuse | Aérospatiale, modules Pour toits, façades... |
| Silicium poly Cristallin | 11 à 15% (19.8% en laboratoire) | Adapte à la production à grande échelle. Stabilité de production d'w. Plus de 50% du marché mondial | Modules pour toit, façades, générateurs |
| Amorphe | 5 à 8% (13% en laboratoire) | Peut fonctionner sous la lumière Fluorescente. Fonctionnement si faible luminosité. Fonctionnement par temps couvert. Fonctionnement si ombrage partiel. La puissance de sortie varie dans le Temps. En début de vie, la puissance Delivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois | Appareils électroniques: montres, calculatrices Intégration dans le bâtiment |
| Composite mono cristallin (GaAs) | 18 à 20% (27.5% en laboratoire) | Lourd, fissure facilement. | Systemes de concentrateurs Aérospatiale (satellites) |
| Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ , etc.) | 8% (16% en laboratoire) | Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes | Appareils électroniques: montres, calculatrices Intégration dans le bâtiment |

I.7.5. Photovoltaïque en l'Algérie :

Plusieurs projets photovoltaïques d'une capacité totalisant 800 MWc sont envisagés d'ici 2020. D'autres projets à petite échelle ont été réalisés, particulièrement par SONELGAZ. Ainsi, entre 1992 et 2005, 18 villages du sud algérien, soit environ 1.000 ménages, ont bénéficié d'installations photovoltaïques pour la satisfaction des besoins essentiels (éclairage, réfrigération, télévision, ventilation) en électricité. [10]

D'autres programmes sont en cours comme le programme complémentaire de soutien à la croissance en vue de l'électrification de 20 villages du sud de l'Algérie et celui du développement des hauts plateaux qui concerne une soixantaine de localités des zones steppiques.

Sonelgaz a introduit la filière solaire pour une 20 de villages du programme de l'électrification rurale dans le but d'impulser l'utilisation des énergies renouvelables et notamment le photovoltaïque.

Ces villages situés dans le Sud et à nombre de foyers réduits, étaient caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication.



Figure I.15: un modèle des panneaux solaires installé dans le sud.

Cette électrification rurale solaire a concerné 20 villages répartis dans les 04 wilayas du Sud : Tamanrasset – Tindouf – Illizi – Adrar dont les consistances physiques sont les suivantes :

Tableau 1.2: Programme d'électrification rurale solaire dans les 04 wilayas du Sud.

| Wilayas | Puissance crêt (Wc) | Nombre de systèmes | Type de systèmes | | | Nombre de foyers |
|-------------|---------------------|--------------------|------------------|--------|--------|------------------|
| | | | 1.5 kwc | 03 kwc | 06 kwc | |
| Tamanrasset | 277.5 | 60 | 3 | 23 | 34 | 555 |
| Illizi | 75 | 20 | 6 | 6 | 8 | 150 |
| Tindouf | 78 | 20 | 0 | 14 | 6 | 156 |
| Adrar | 22.5 | 08 | 1 | 7 | 0 | 45 |

Aussi installé plusieurs systèmes de plusieurs kW dans différentes régions du pays, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 1.3: Principales réalisations du CDER dans le domaine photovoltaïque.

| Région | Usage | Puissance installée et systèmes |
|---------------------|---|--|
| Batna (Est Algérie) | Electrification de logements pour enseignants | 10KWc |
| Oum El bouaghi | Pompage | 5 systèmes dans différents site de la région |
| Tiaret | Eclairage, pompage, santé | Plusieurs systèmes |
| Centrale | Téléphonie rurale | 8 relais de 160 w |
| Déférentes régions | Balisagea érien et signalisation | 15radio-baises dans plusieurs aéroports |
| Sud | Alimentation de relais hertziens | 10 systèmes de 2 kWc |

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont: [11].

I.8.1. Avantage :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

I.8.2. Inconvénients :

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

I.9. SECTEURS D'APPLICATION

- **Domaine spatial** : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.
- **Télécommunications** : Téléphonie rurale, radiotéléphonie,... Sites isolés : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...
- **Sites isolés** : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...

- **Acquisition de données** : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).
- **Domaine du transport** : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

I.10 .Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, les technologies de fabrication de la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques et le domaine d'application.

Chapitre II :
Modélisation d'un
Systeme
photovoltaïques
autonome

II.1. Introduction

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant la consommer il aura fallu la produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement d'intérêt par une production dépassant 1800 MW à travers le monde. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. [12]

Après avoir présenté et citer les différents composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système. Dans ce chapitre, nous nous proposons de le modéliser ces composants. Dans un premier temps, nous décrirons les différents modèles électriques équivalents d'un générateur PV rencontrés ans la littérature. Ensuite, nous passerons à l'étude des différents modèles de convertisseurs. Une fois ces étapes franchies, nous procédons à leurs modélisations en vue de les intégrer au système PV connecté au réseau.

II.2. Modélisation de systèmes PV

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

La modélisation des modules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus en moins de détails.

Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et la température de la cellule.

II.2.1 Générateur photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'air de transition p-n de la cellule PV (Figure 3.2).

Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I et le reste, le courant I_D , dans la diode.

Nous avons alors la relation (II,1):[13]

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II},1)$$

Pour un générateur idéal, la tension aux bornes da la résistance égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_D$

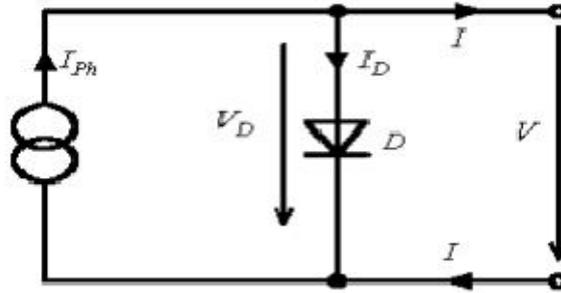


Figure II.1: modèle simple d'une cellule PV.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_D = \left(\left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (II,2)$$

Avec :

I_s : courant de saturation inverse de la diode,

$V_t = kT/q$, potentiel thermique,

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left(\left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (II,3)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles.

II.2.2 Générateur photovoltaïque réel

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle, comme montre la Figure II.2. [14].

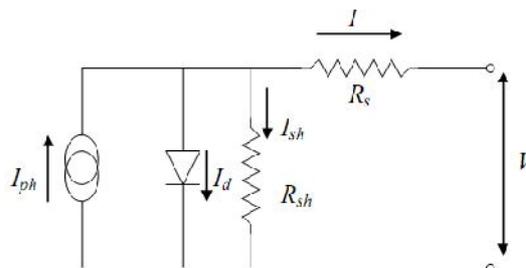


Figure II.2 : Modèle de la cellule PV à une diode.

L'équation de la caractéristique est alors :

$$I = I_{ph} - I_D \left\{ e^{\left[\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_j} \right]} - 1 \right\} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II},4)$$

I: Intensité aux bornes du générateur *A*

I_s: Le courant de saturation de la diode *A*

V : Tension aux bornes du capteur [V]

I_{ph} : Photocourant [A], proportionnel à l'irradiation *G*, avec correction selon *T*.

R_s : Résistance série[Ω].

R_{sh} : Résistance shunt(ou parallèle)[Ω].

q : Charge de l'électron = 1.6.10⁻¹⁹Coulomb.

k : Constante de Boltzmann=1.38.10⁻²³ J/K.

A : le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2.

T_j : Température de jonction.

Nous obtenons une équation implicite en *I* et *V* qui peut être résolue grâce à une méthode numérique.

II.2.3.Paramètres de cellules photovoltaïques

La caractéristique I-V

Tension à circuit ouvert, *V_{oc}*

Courant de court-circuit, *I_{cc}*

Point de fonctionnement optimum, (*V_m*, *I_m*)

Rendement de conversion

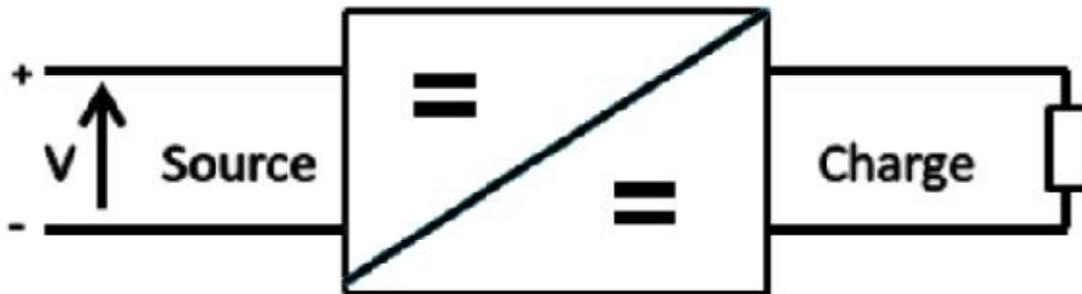
Facteur de forme, *ff*

II. 3.Modélisation des convertisseurs

Les convertisseurs DC/DC sont des circuits électriques servant à transformer une tension continue en une autre tension continue avec un rapport de transformation bien défini.

$$K = \frac{V_e}{V_s} \quad (\text{II.5})$$

Avec V_s la tension de sortie, V_e la tension d'entrée, K le rapport de transformation. Il peut être supérieur à l'unité, dans ce cas on dit que le convertisseur est dit élévateur (survolteur). Comme il peut être inférieur à l'unité, et dans ce cas il est dit abaisseur (dévolteur).



FigureII.3:Schéma de convertisseurDC/DC.

En réalité la tension V_e est la tension fournie par les panneaux solaires, et la tension V_s est celle qui doit alimenter la charge.

Les convertisseurs continu-continu sont devenus une composante essentielle surtout dans l'électronique embarquée et dans d'autres applications industrielles. Grâce à leurs faibles poids et leurs rendements de plus en plus élevés, leurs faibles encombrements ainsi que et leurs coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance [15].

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

II.3.1. Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandé (un transistor de puissance qui fonctionne en commutation ; 0 1) à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe de l'hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique.

Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en

général une tension DC constante [16].

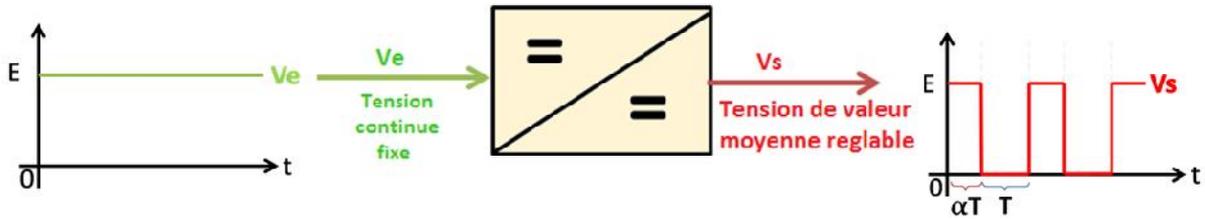


Figure II.4 : Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC.

II.3.1.1. Puissances des convertisseurs

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur. Nous adopterons la convention "générateur" pour le convertisseur et donc la convention "récepteur" pour le récepteur [15].

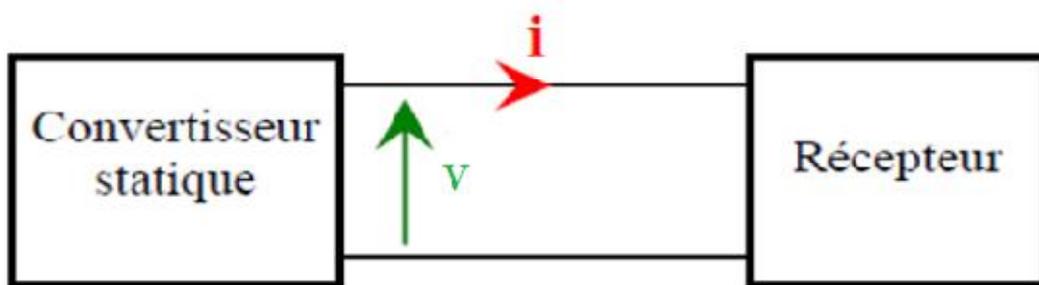


Figure II.5: Couplage de convertisseur avec un récepteur .

II.3.1.2. Puissance instantanée

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit "courant \times tension". En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$P(t) = V(t) \cdot i(t) \tag{II.6}$$

II.3.1.3. Puissance active

La puissance active P (watt) est la valeur moyenne de la puissance instantanée $P(t)$:

$$P(t) = P_{moyenne} \leq V(t) \cdot i(t) > \tag{II.7}$$

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on a :

$$P(t) = V \cdot I \cos \varphi \tag{II.8}$$

II.3.1.4. Puissance apparente

La puissance apparente S est définie par le produit " $V_{eff} \times I_{eff}$ ". C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$S = V \cdot I \quad (\text{II.9})$$

➤ Facteur de puissance

Pour évaluer ce phénomène, on définit le facteur de puissance k ($k < 1$) :

$$K = \frac{V(t) \cdot i(t)}{V_{eff} \cdot I_{eff}} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Soit } k = \frac{P}{S}$$

$$k = \cos \varphi \quad (\text{II.11})$$

II. 3.2. Régulateur de charge

La régulation de la charge effectuée par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge. Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb. [17].

II.3.2.1. Régulations de charge série :

Le principe consiste à intercaler entre le panneau PV et la batterie un dispositif qui module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante :

Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_Z , le courant délivré par le panneau charge la batterie à travers un transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers la résistance.

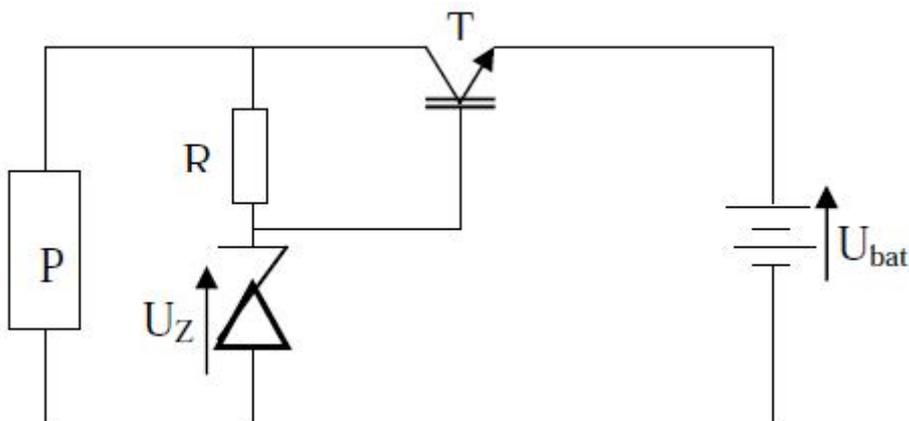


Figure II.6:Schéma de principe d'un régulateur de charge série.

II.3.2.2. Régulateur de charge de coupure :

Ce régulateur comporte un relais qui connecte et déconnecte le générateur PV à deux seuils différents et qui sont commandés par une unité de contrôle. Ils mesurent en permanence la tension aux bornes de la batterie.

II.3.2.3. Régulateur de charge à découpage

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu - continu qui délivre à la batterie sa tension de floatant chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut.

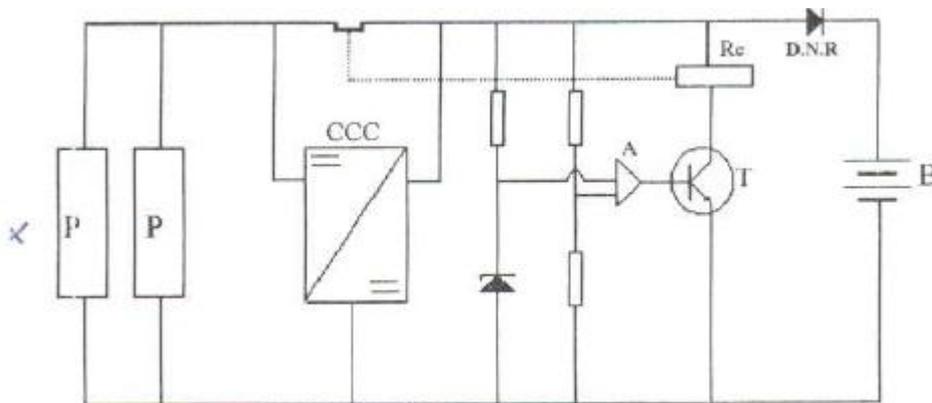


Figure II.7: Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage .

II.3.2.4. Régulateur de charge série à coupure partielle :

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau PV en deux parties. Chacune délivrer une même tension selon le principe suivant : une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure tant que l'autre partie est branchée directement pour la charge de la batterie en permanence.

II.3.2.5. Régulateur de charge parallèle :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant [17]:

Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge.

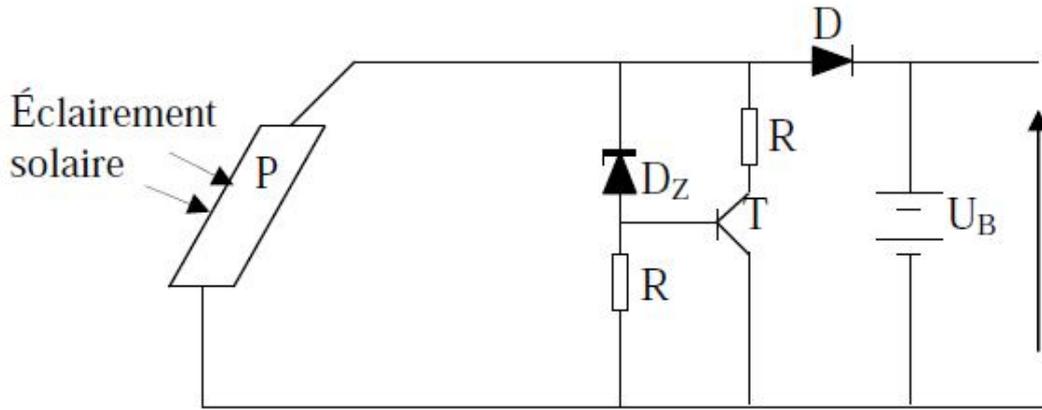


Figure II.8:Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle.

II.4. Modélisation de système de stockage

La batterie peut être représentée par son circuit équivalent [18]

montré par la figure .(II.9)

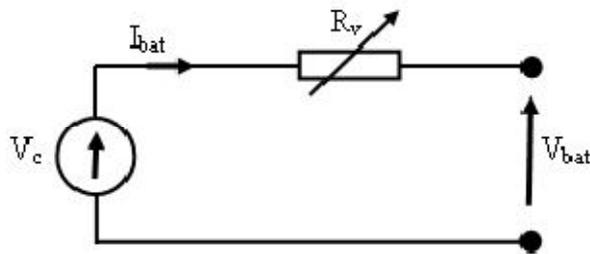


Figure II.9:Modèle R-C de la batterie.

Où,

V_c : source de tension idéale d'entrée ;

V_{bat} : tension aux bornes de la batterie ;

I_{bat} : courant développé par la batterie ;

R_v : résistance interne variable de la batterie ;

Avec,

$$R_v = R_i + K \frac{C}{C - \int_0^t I_{bat} dt} \quad (II,12)$$

R_i : résistance interne ;

k : tension de polarisation ;

C : capacité de la batterie ;

De la figure 4.5, on déduit l'équation de la tension aux bornes de la batterie, suivante:

$$V_{bat}(t) = V_c - R_V I_{bat}(t) \quad (\text{II},13)$$

Et, l'état de charge (EDC) de la batterie est :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II},14)$$

Avec,

C_{bat} : capacité nominale de la batterie ;

Q_d : quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

En littérature, deux (2) types d'accumulateurs sont distingués [18], notamment : ceux contenant une réaction chimique irréversible donc non rechargeables et ceux dont la réaction est réversible sont rechargeables. On y trouve, le modèle le plus populaire les piles rechargeables.

Dans le cadre de la réalisation de ce mémoire, nous nous sommes intéressés au stockage réversible (chargement, déchargement), en vue de le considérer dans la configuration du système étudié (système photovoltaïque, hacheur, bus continu, batterie, onduleur, réseau, charge). A cet effet, le système de stockage doit se charger et se décharger adéquatement donc nécessite un système de charge et décharge.

II.4.1. Batterie solaire

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système, sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par : [19]

-Ampérage en Ampère heure (Ah)

-Voltage en Volt.

II.4.2. Capacité de batterie :

La capacité d'une batterie représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via l'électrolyte et matériaux actifs des électrodes sur une charge. Elle est exprimée en Ampère heure (1Ah=3600 Coulomb) ou en Wattheure Wh (1Wh = 3600 J).

La capacité de batterie dépend de plusieurs facteurs. Elle est déterminée sous des conditions de décharge fixée, habituellement à courant constant ($C=I.t$) avec t : le temps de décharge au bout de laquelle la tension atteint une certaine valeur prédéfinie.

En pratique, cette capacité dépend du courant, du temps de décharge ainsi que de la température. Par exemple, la capacité qui est extraite en 5 heures jusqu'à atteindre la tension minimale acceptée est appelée capacité 5 heures ou C5 en abrégé. Le courant de décharge correspondant est appelé courant I5.

II.4.3.Types des batteries

II.5.3.1Batteries solaires

Les batteries sont de plusieurs types, à savoir [20]

- **Batterie étanche** : c'est une batterie fermée, étanche, sèche, sans maintenance ni entretien, à installer à l'abri de la chaleur et l'humidité, à ne pas stocker plus de 4 à 5 mois, très chère, durée de vie de 17 à 10 ans.
- **Batterie stationnaire solaire** : c'est une batterie ouverte (humide), avec entretien (l'ajout de l'acide chlorhydrique ou l'eau distillée chaque 6 mois), prix moins chère, durée de vie 10 à 15 ans.
- **Batterie à gel** : c'est une batterie ouverte destiné à zones froides (neige, verglas), avec entretien (l'ajout de l'antigel mono-propylène glycol chaque 6 mois), prix moyen, durée de vie 15 ans.

II.4.3.2.Batteries inondés

Les batteries sont de plusieurs types, à savoir [21]

- **Les batteries d'accumulateurs :**

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV, elle est nécessaire pour faire face aux heures de non production.

Le fait que l'énergie solaire ne soit pas disponible sur l'ensemble d'une période de fonctionnement du système alimenté impose l'utilisation de batteries dans les installations autonomes pour stocker l'énergie.

Dans les systèmes solaires autonomes on utilise principalement

- **Les batteries au plomb :**

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives, bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative, ces électrodes plongent dans

une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

La tension varie entre 1.7 Volts et 2.4 Volts par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. Ces accumulateurs ont un rendement énergétique de l'ordre 70 à 85 %. En raison de leur maintenance nécessaire, ils sont réservés aux systèmes photovoltaïques de puissance.

➤ Les batteries au Cadmium-Nickel :

La tension de ce type d'accumulateurs varie entre 1.15 et 1.45 Volts par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%.

En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel.

➤ Les batteries au Nickel-Zinc :

Ces accumulateurs sont encore dans le domaine de la recherche mais ils ont l'intérêt d'utiliser des matériaux moins coûteux est moins toxiques, leur tension varie entre 1.6 et 1.8 Volts et leur inconvénient principal lié à la durée de vie qui reste limitée par un nombre de cycles.

➤ Les batteries au Lithium :

Ces nouveaux accumulateurs utilisent un électrolyte liquide organique, leur intérêt réside dans une forte capacité par unité de masse, une très bonne étanchéité et une stabilité importante vis-à-vis de la température. Leur développement est subordonné à une augmentation du nombre de cycles qu'ils peuvent accepter.

a) Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrit par [22] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t) / \eta_{inv}) \cdot \eta_{Bat} \quad (II-15)$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et $(t-1)$ respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t , η_{inv} et η_{Bat} sont les rendements de

l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65–0.85 selon le chargeant courant), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1

b) Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimé comme suite [22] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_L(t) / \eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (II-16)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat \min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat \max}$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{Bat \min} = C_{Bat \max}$), et la capacité minimum est déterminée par le profondeur de la charge (DOD)

$$C_{Bat \min} = DOD \cdot C_{Bat, N}$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $SOC_{\min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie. Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{Bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{dech} \cdot DOD} [Wh] \quad (II-17)$$

$$C_{Bat} [Ah] = \frac{E_{Bat}}{V_b} [Wh]$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_b : La tension du système.

DOD : Le profondeur de décharge.

c) La tension de la batterie

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure (II-7) [23].

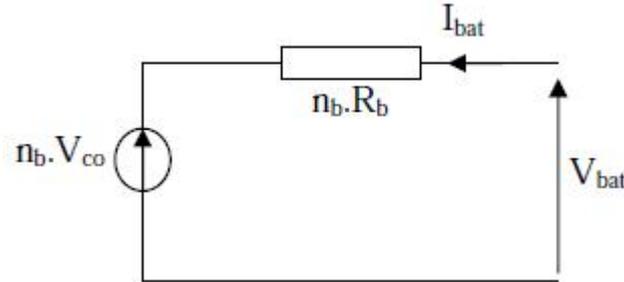


Figure II.10:Schéma électrique de batterie.

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation [23]:

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (\text{II-18})$$

Où $V_{bat}(t)$ est la tension de circuit ouvert au temps t, V_{co} ; et $R(t)$ est la résistance interne de batterie, Ohms ; la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge.

La figure (II.8) reprend l'évolution de la tension durant la charge d'une cellule de batterie plomb acide. La charge théorique d'une batterie au plomb s'effectue donc en trois phases.

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)) \quad (\text{II-19})$$

Où VF est la force électromotrice ; b est un constant empirique.

La variation de V_{co} en fonction de l'état de charge (SOC) est représentée par la figure suivante :

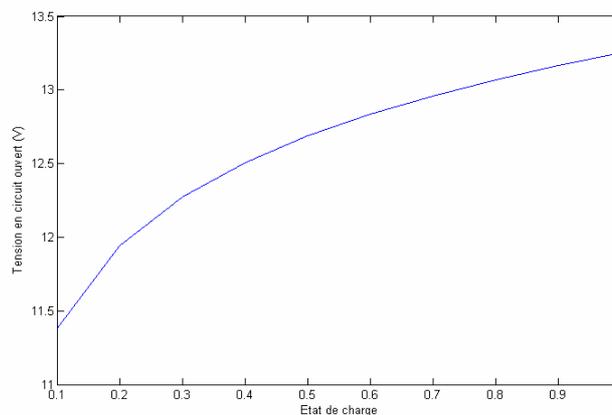


Figure II.11:Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge.

La variation de la résistance interne d'une batterie, $R_{bat}(t)$, est principalement dû à deux composants, à savoir, la résistance de électrode $R_{électrode}$, et la résistance de électrolyte $R_{électrolyte}$

$$R_{bat}(t) = R_{électrode} + R_{électrolyte}$$

La variation de $R_{électrode}$ et $R_{électrolyte}$ en fonction de l'état de charge SOC peut être exprimée

par :

$$R_{électrolyte} = r_1 + r_2(SOC(t)) \text{ Et } R_{électrode} = [r_3 - r_4(SOC(t))]^{-1} \quad (II-20)$$

Où r_1 , r_2 , r_3 , et r_4 sont des constantes empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge. Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant [23]:

Tableau (II-1) : Caractéristique de batterie plomb acide.

| Paramètres | Mode de charge | Mode de décharge |
|------------|--------------------|----------------------|
| VF | 13.250V | 12.662V |
| b | 0.810 | 0.724 |
| r_1 | 0.062 Ohms | 0.055 Ohms |
| r_2 | 0.046 Ohms | -0.010 Ohms |
| r_3 | 95.638 $Ohms^{-1}$ | 4.270 $Ohms^{-1}$ |
| r_4 | 52.671 $Ohms^{-1}$ | -100.730 $Ohms^{-1}$ |

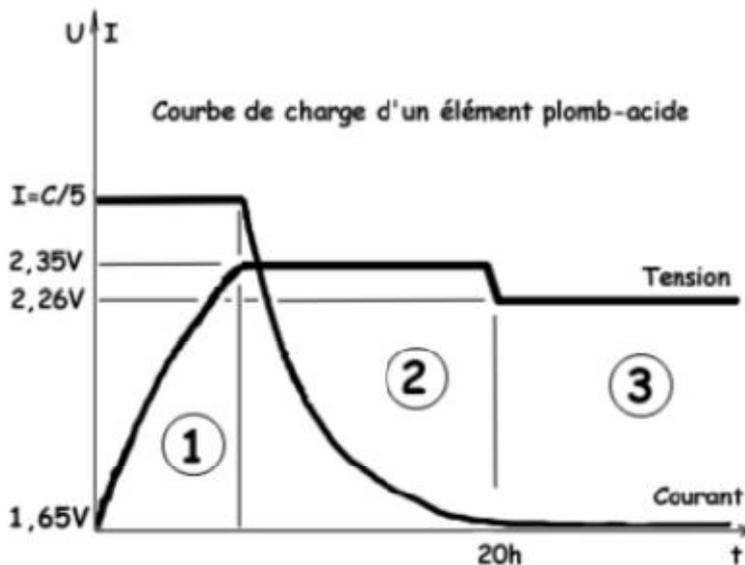


Figure II.12: Evolution de la tension et du courant avec le temps durant la charge d'un élément plomb acide

d) Courant de batterie

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par [31] :

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)}{V_{Bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} \quad (\text{II-21})$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est [31] :

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} - \frac{P_{pv}}{V_{Bat}(t)} \quad (\text{II-22})$$

e) Rendement de la Batterie

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{Bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{inici}} \quad (\text{II-23})$$

En pratique, le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité de l'ordre de 100A/h. donc la puissance fournie par une batterie peut

$$P_{fourni} = \eta_{bat} \cdot P_{inici} \quad (P_{inici}: \text{Puissance du générateur}).$$

II.5. Le convertisseur DC/AC :

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.

II.6.Principe de fonctionnement

La création d'une sinusoïde à partir d'une tension continue s'obtient grâce à des impulsions de tension de largeur bien déterminée, cette technologie fait appel à la MLI (Modulation de Largeur d'impulsion) ou PWM (Pulse width Modulation)

En pratique, l'onduleur est composé d'un ensemble de composants actifs (interrupteurs électroniques) et de composants passifs (transformateur). L'onduleur doit tolérer une large plage de tension en entrée (10% à +30%) à cause des variations de tension nominale de la batterie selon les différentes conditions de fonctionnement.[24]

Il y a deux types d'onduleurs utilisés pour assurer une telle conversion.

- Onduleur Monophasé
- Onduleur triphasé

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale [25].

Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

La figure suivante illustre un onduleur triphasé autonome à fréquence variable à commutation forcée de type MLI (modélisation, de largeur d'impulsion) opéré en source de tension. Il est alimenté à partir de la tension continue générée conjointement par le redresseur et le hacheur série, il est réalisé à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de ses particularités à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de

KHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tout les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors [26].

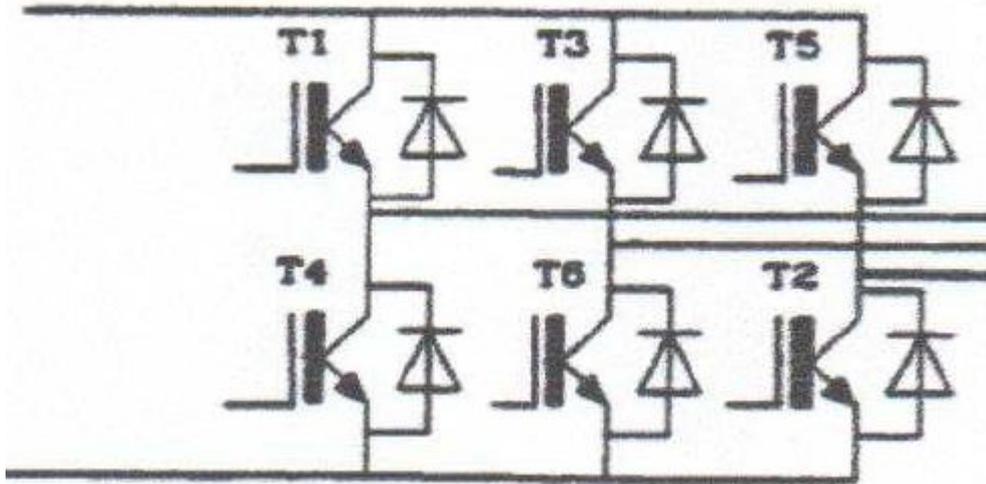


Figure II.13:Schéma de L'onduleur

- **la puissance nominale** : C'est la puissance exprimée en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tout les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

- **Le rendement** : c'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

- **La consommation à vide** : Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit) [27].

Pour cette raison, il est important de limiter les pertes à un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220v – 50Hz). La plus ou moins grande pureté de la tension de sortie est obtenue grâce à :

Un système de régulation qui tend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée.

Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

II.7. Commande MPPT

C'est un montage électronique au niveau du régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque.

Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% : pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [16].

Les cellules PV utilisent pour fournir de l'énergie dans le but d'obtenir la puissance maximale du panneau.

Un serveur MPPT est utilisé pour la commande du hacheur. Cette technique a été développée depuis 1968 et il a eu un rôle essentiel pour le fonctionnement du panneau.

Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique D automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau, ainsi quels que soient les conditions météorologiques T et G , la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [16].

II.7.1. Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [16]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure II.4 comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

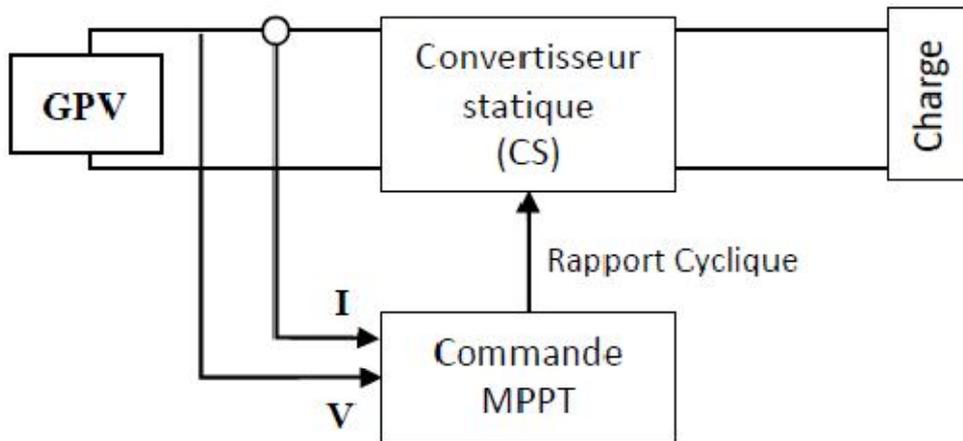


Figure II.14:Chaîne de conversion d'énergie solaire

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [16]

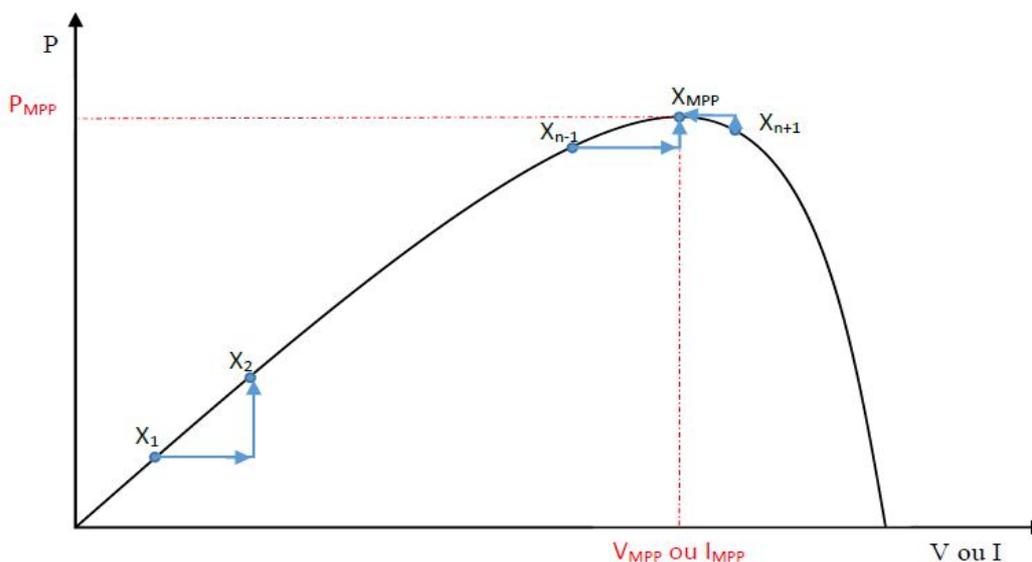


Figure II.15:Principe de la commande MPPT

II.7.2. Classification des commandes MPPT

Il est possible de classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus

intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [16].

II.7.2.1. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

II.7.2.2. MPPT directs

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation.

Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

II.8. Commande PWM

II.8.1. Structures des systèmes photovoltaïques

Deux types de structures de système photovoltaïque existent : un système à connexion directe au réseau à l'aide d'un onduleur et un système avec un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – continu (un onduleur délivre une tension modulée) [29].

II.8.2. Structure avec hacheur et onduleur

Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [30]. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable [31] [32].

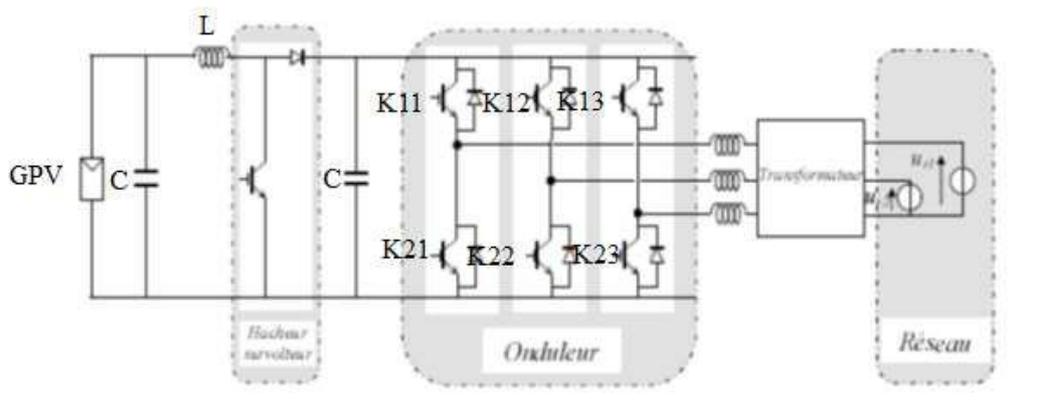


Figure II.16: Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé

II.8.3. Structures des systèmes à connexion directe

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension (DC) de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent sinusoïdale délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de également la puissance assurent une e surveillance fiable du réseau pour puissance maximum. De plus, ils interrompre l'alimentation en cas de protéger ce dernier contre les pannes et Actuellement, il existe problèmes survenant soit du

réseau soit de l'installation. solutions techniques principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes[33]

- Un seul onduleur pour toutes les installations (onduleur simple ou central, **figure II.20a**)
- Un onduleur string (pour chaque string, **figure II.20b**)
- Installations multi-onduleurs (installations multi-onduleurs, **figure II.20c**)

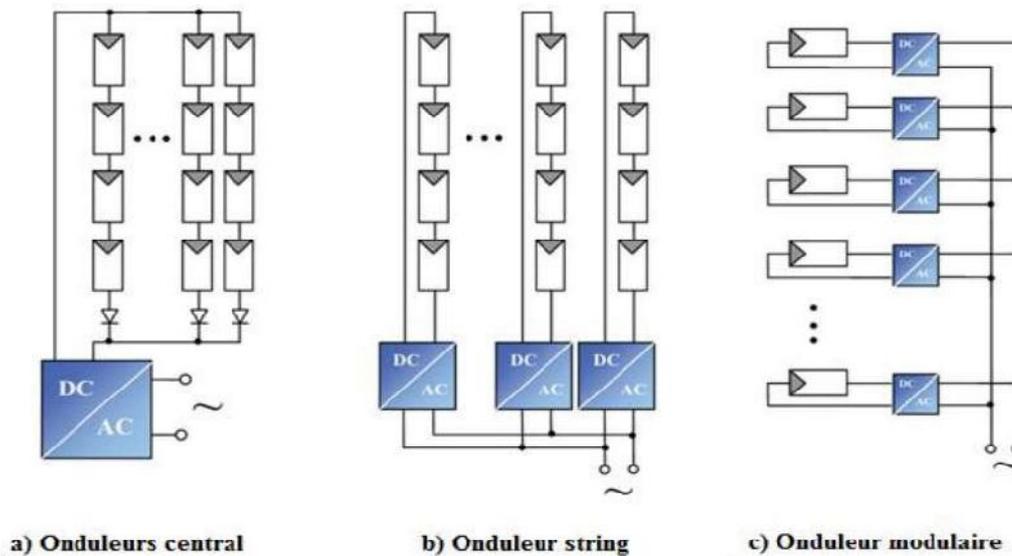


Figure II.17: Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques.

II.8.4. Installation mono-onduleur (onduleur central)

Cette configuration est utilisée dans les petites installations avec des modules du même type ayant la même exposition. La présence d'un onduleur unique présente des avantages économiques, en réduisant l'investissement initial et les coûts d'entretien.

Cependant, la défaillance de l'onduleur peut entraîner l'arrêt de la production de l'ensemble de l'installation. De plus, cette solution n'est pas très adaptée à l'agrandissement de l'installation PV, car elle augmente les problèmes de protection contre les surintensités et ceux liés à un ombrage différent ,autrement dit lorsque l'exposition des panneaux n'est pas la même dans l'ensemble de l'installation.

Le fonctionnement de l'onduleur est régulé par le MPPT en tenant compte des paramètres moyens des strings raccordés à l'onduleur ; par conséquent, si tous les strings sont raccordés à un onduleur unique, l'ombrage ou la défaillance de tout ou partie des strings entraîne une

réduction accrue des performances électriques de l'installation par rapport à d'autres configurations.

II.8.5. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)

Dans une installation de taille moyenne, chaque string peut être directement raccordé à propre onduleur et donc fonctionner selon son propre Maximum Power Poin. Dans cette configuration, la diode, qui empêche la source de circuler dans le sens inverse, est généralement

incluse dans l'onduleur. Ce dernier réalise un diagnostic de la production et assure également la protection contre les surintensités et les surtensions d'origine atmosphérique du côté DC.

De plus, la présence d'un onduleur sur chaque string limite les problèmes de couplage entre les modules et les onduleurs de même que la réduction des performances causée par l'ombrage ou une exposition différente. Par ailleurs, avec plusieurs strings, des modules présentant différentes caractéristiques peuvent être utilisés, augmentant par conséquent l'efficacité et la fiabilité de l'ensemble de l'installation.

II.8.6. Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module. Dans les installations de grande taille, le champ PV est généralement divisé en un plus grand nombre de parties (sous-champs), chacune étant alimentée par un onduleur auquel différents strings sont raccordés en parallèle. Par rapport à la configuration précédente, le nombre d'onduleurs est dans ce cas inférieur, entraînant une réduction conséquente de l'investissement et des coût d'entretie.. Cette configuration présente également l'avantage de réduire les problèmes liés à l'ombrage et à la différence d'exposition des strings mais également ceux liés à l'utilisation de modules différents, à condition que les strings du sous champ ayant des modules et une exposition identiques soient raccordés au même onduleur.

De plus, la défaillance d'un onduleur n'implique pas la perte de production de l' ensemble de l'installation (comme dans le cas de l'onduleur unique) mais du sous-champ correspondant uniquement. Il est recommandé de pouvoir déconnecter chaque string séparément, de manière à ce que les vérifications de fonctionnement et d'entretien requises puissent être réalisées sans mettre hors service l'ensemble du générateur PV. Dans cette configuration, le diagnostic de

l'installation est réalisé par un système de supervision qui vérifie la production des différents strings.

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque, puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur DC-DC qui représente un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, les différents systèmes de stockage, le convertisseur DC-AC ainsi que l'algorithme d'optimisation MPPT.

Chapitre III :
Résultats de
Simulation du Système
Photovoltaïque

III.1. Introduction

En énergie renouvelable, il est important de signaler qu'il faut respecter un certain nombre d'étapes. Ces dernières sont facilement déterminées si nous utilisons un logiciel relatif de simulation pour définir les différents éléments constituant un system PV.

Dans ce chapitre, nous avons simulé les cellules PV a partir de MATLAB SIMULINK ensuite nous présentons les résultats de simulation d'une centrale PV, en utilisant une technologie de modules Trina Solar TSM-250 connectés en série du modèle NREL System Advisor (au silicium poly cristallin).

III.2. Composants du système photovoltaïque

III.2.1. Champ photovoltaïque

Le modèle de générateur photovoltaïque met en œuvre un générateur photovoltaïque constitué de modules PV connectés en série et en parallèle. Il permet de modéliser une variété de modules PV prédéfinis disponibles à partir du modèle NREL System Advisor [34] ainsi qu'un module PV défini par l'utilisateur. Le bloc de panneaux photovoltaïques possède deux entrées qui vous permettent de fournir des données de rayonnement solaire variables (entrée I_r en W / m^2) et de température (entrée T en degrés C). Le générateur photovoltaïque se compose d'une chaîne de 14 modules Trina Solar TSM-250 connectés en série. À 25 degrés. C et avec un rayonnement solaire de $1000 W / m^2$, le champ peut produire 3500 W.

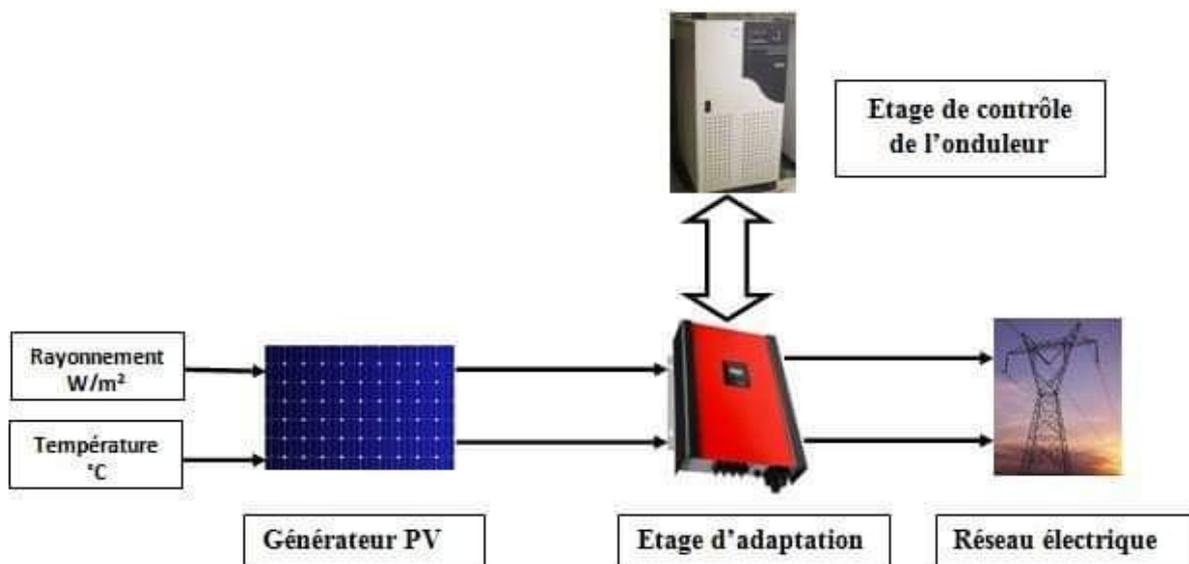


Figure III.1 : Modèle de simulation.

III.2.1.1. Fiche technique du panneau solaire

- **Caractéristiques électriques**

Tableau III.1 : Tableau des caractéristiques électriques. [35]

| | |
|--|--|
| Caractéristiques électriques DC | |
| Puissance nominale STC | 250 W |
| Puissance nominale PTC | 227.5 W |
| Puissance PTC par unité de surface | 152.7 W/m² (14.2 W/ft²) |
| Efficacité maximale | 15.27 % |
| Tolérances de puissance | 0 %/+3 % |
| Nombre de cellules | 60 |
| Tension nominale | n'est pas applicable |
| Imp | 8.27 A |
| Vmp | 30.3 V |
| Icc | 8.79 A |
| Voc | 38 V |
| NOCT | 44 °C |
| Coefficient de température de Icc | 0.05 % /K |
| Coefficient de température de puissance | -0.41 %/K |
| Coefficient de température de tension | -0.122 V/K |
| Calibre des fusibles en série | 15 A |
| Tension maximale du système | 600 V |

- **Caractéristiques mécaniques**

Tableau III.2 : Tableau des caractéristiques mécaniques. [35]

| | |
|---|--------------------------------|
| Caractéristiques mécaniques | |
| Type | Silicium polycristallin |
| Type de borne de sortie | Connecteur multicontact |
| Jauge de fil de câble de sortie | 12 AWG |
| Type de fil de câble de sortie | PV Câble |
| Longueur du fil du câble de sortie | 1000 mm (39,4 in) |
| couleur du cadre | Noire |
| Couleur de la feuille de fond | Données non disponibles |
| Longueur | 1605 mm (65 in) |
| Largeur | 992 mm (39,1 in) |
| Profondeur | 35 mm (1,4 in) |
| Poids | 18,5 Kg (40,8 lb) |
| Méthode d'installation | Support monté |

➤ **Résultats de simulation**

Les résultats de simulation pour des entrées météorologiques réelles, (Éclairement et température).

Variation de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 250w/m² et 750w/m².

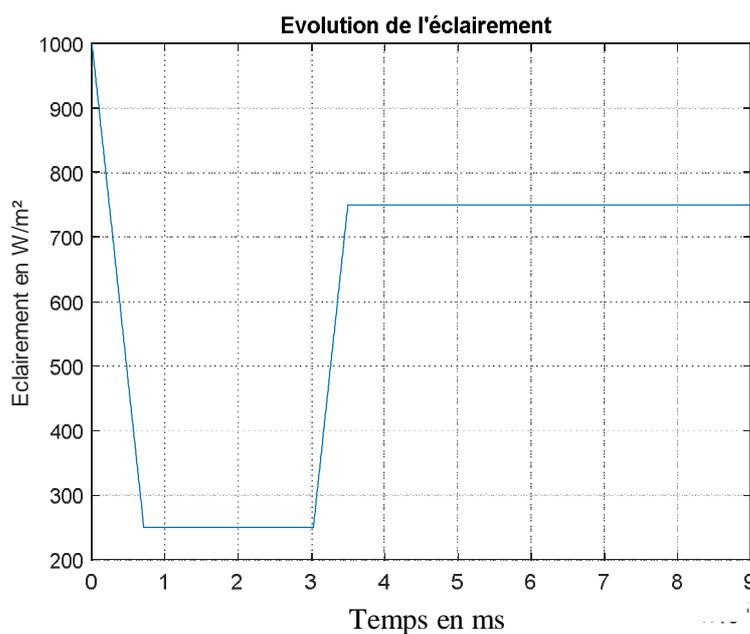


Figure III.2: Courbe de l'évolution de l'éclairement.

Les caractéristiques $V=f(t)$, $I=f(t)$ et $P=f(t)$ sont données par les courbes ci-dessous.

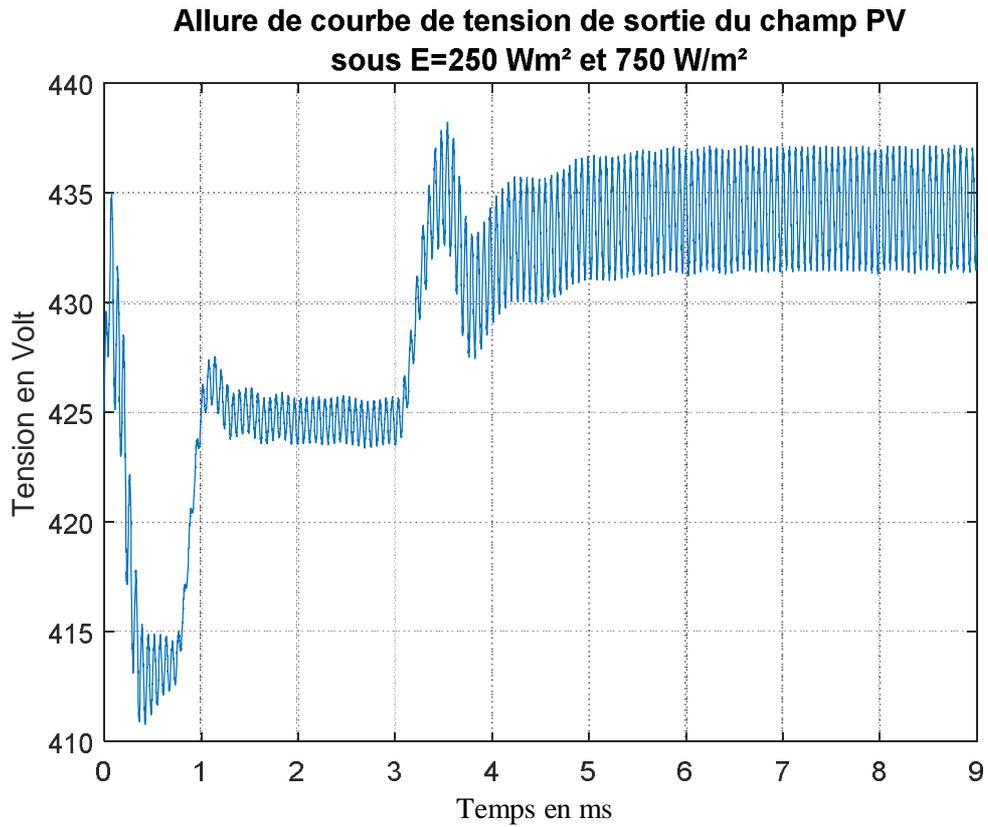


Figure III.3 : Courbe de tension de sortie du champ PV sous $E=250 \text{ W/m}^2$ et 750 W/m^2

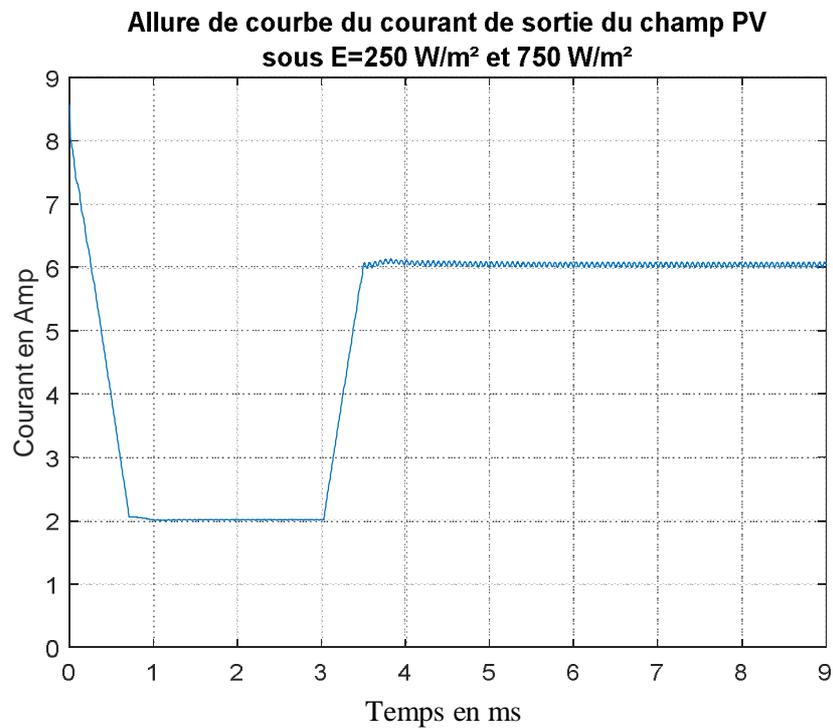


Figure III.4 : Courbe du courant de sortie du champ PV sous $E=250 \text{ W/m}^2$ et 750 W/m^2

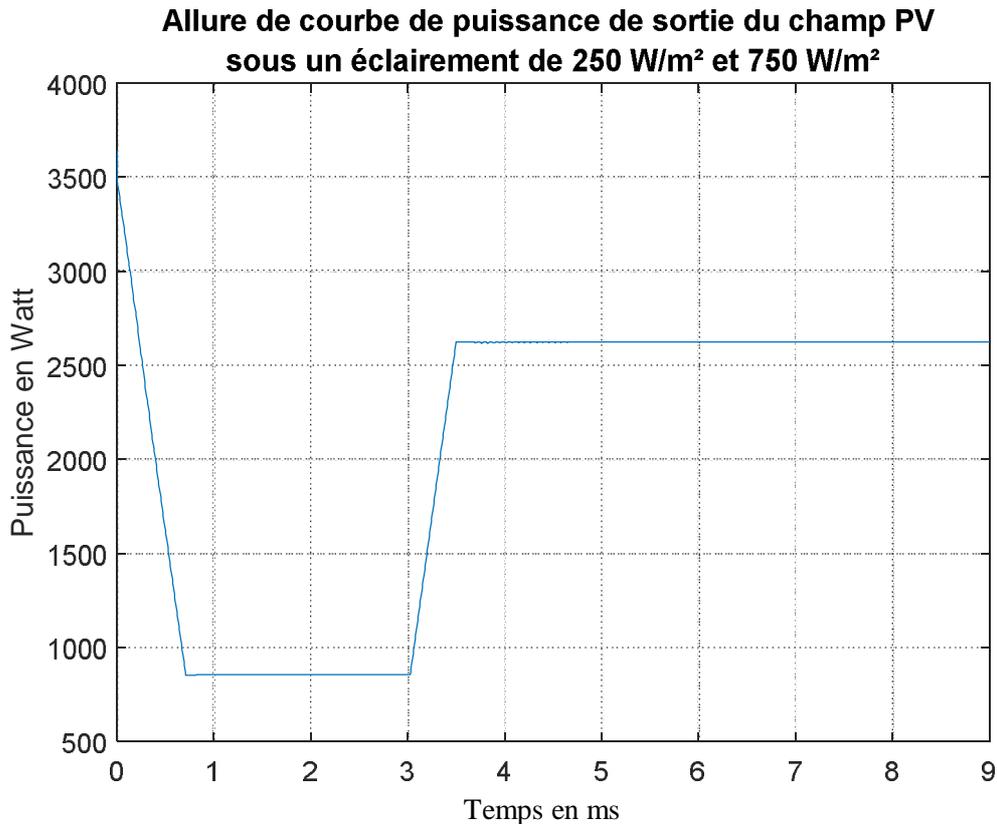


Figure III.5 : Courbe de puissance de sortie du champ PV sous $E=250Wm^2$ et $750Wm^2$

D'après les courbes, on remarque aussi sur les courbes que l'affaiblissement de l'éclairage diminue la tension et le courant, donc elle diminue considérablement le point maximale de la puissance.

III.2.2. Filtre

Deux petits condensateurs, connectés aux bornes + et - du générateur photovoltaïque, sont utilisés pour modéliser la capacité parasite entre les modules PV et la terre.

III.2.3. Convertisseur DC / AC monophasé

L'onduleur est modélisé à l'aide d'un module IGBT monophasé à pont complet (pont en H). La topologie du filtre côté réseau est la configuration LCL classique avec les inductances réparties également entre la ligne et les branches neutres.

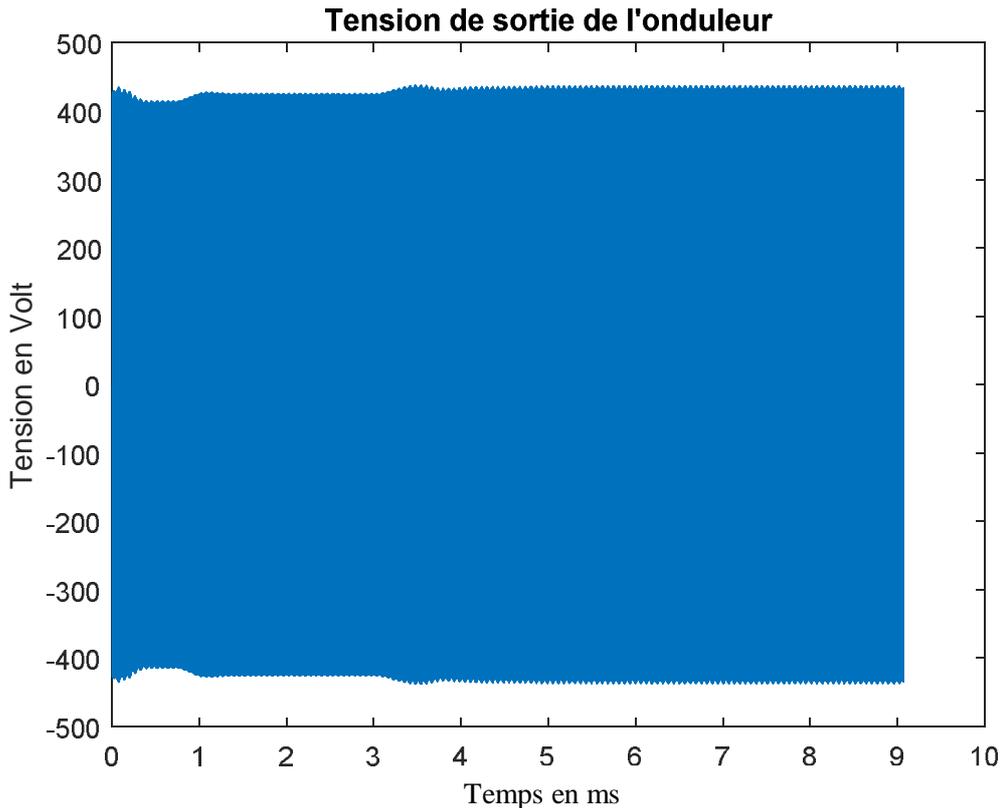


Figure III.6 : Courbe de tension de sortie de l'onduleur

III.2.3.1. Contrôle de l'onduleur

Le système de contrôle contient cinq sous-systèmes principaux basés sur Simulink:

➤ Contrôleur MPPT

Le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basé sur la technique de perturbation et d'observation. Ce système MPPT fait varier automatiquement le signal de référence VDC du régulateur VDC de l'onduleur afin d'obtenir une tension continue qui extraira la puissance maximale de la chaîne PV. [36]

L'algorithme perturbation et observation 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.7). [37]

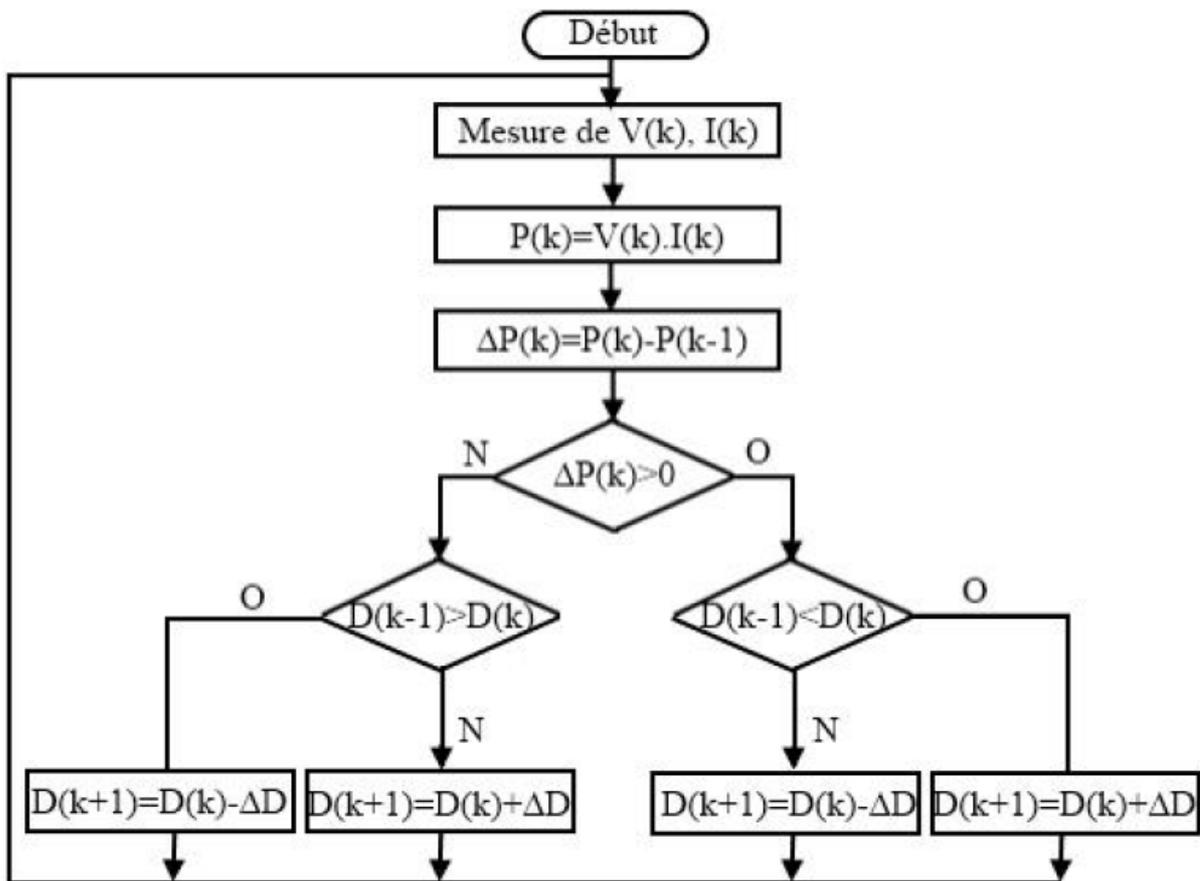


Figure III.7: Organigramme de l'algorithme MPPT de la Perturbation & Observation.

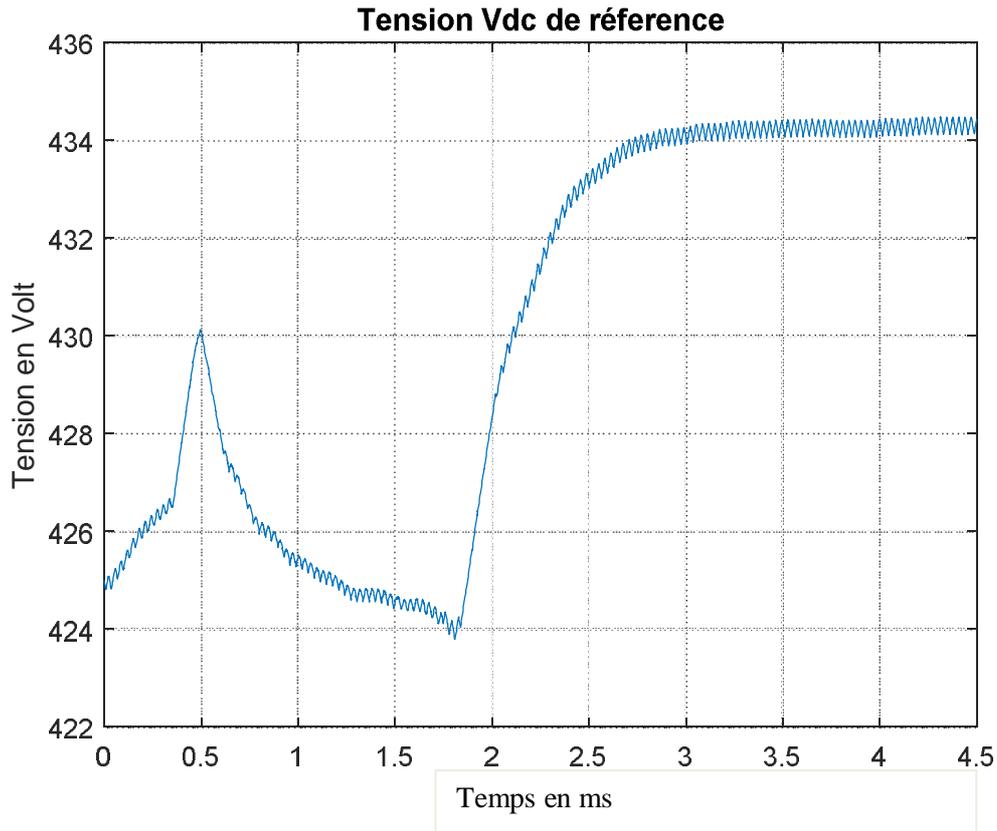


Figure III.8: Courbe de tension de Vdc de référence

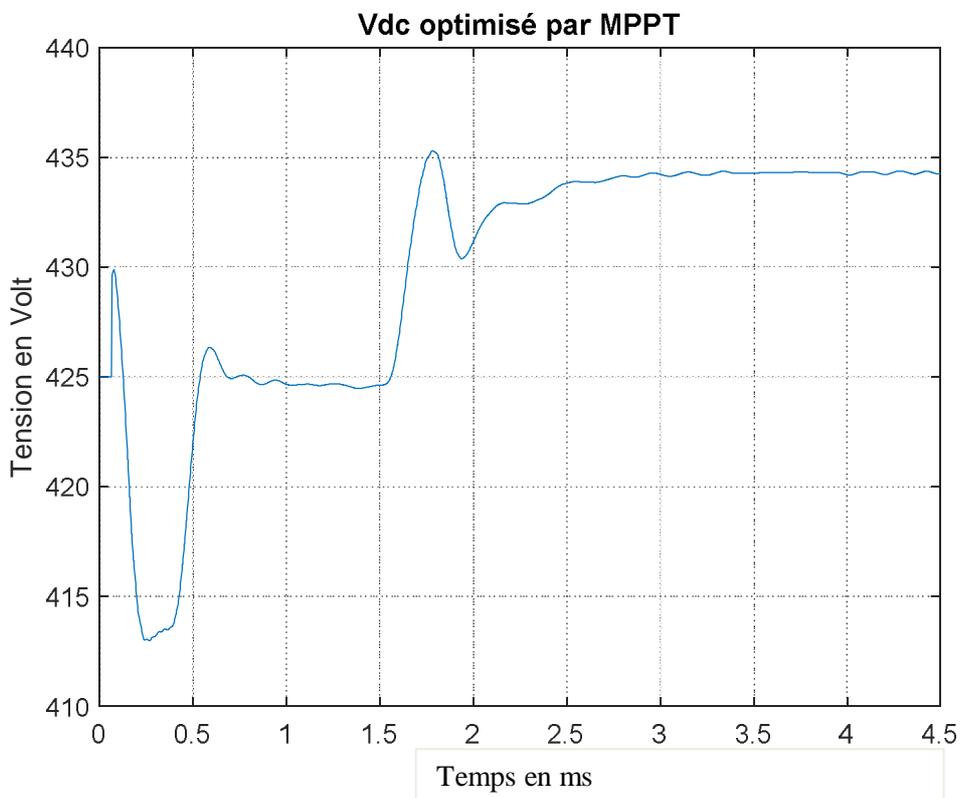


Figure III.9: Courbe de tension de Vdc optimisé par MPPT

➤ Régulateur V_{DC}

Le principe de régulation est indispensable dans les dispositifs de contrôle/commande de systèmes automatiques. Les grandeurs importantes sont les variables et les paramètres. Les paramètres sont considérés comme constants, alors que les variables évoluent dans le temps. Un système de conversion peut avoir une ou plusieurs entrées et sorties. Les entrées sont souvent des produits bruts ou de l'énergie, et peuvent être de deux types : actions et/ou perturbations. Les actions sont maîtrisables par l'utilisateur et donc commandable ; les perturbations ne sont pas maîtrisables par l'utilisateur. Les sorties sont, en général, des produits finis dont on spécifie la qualité et la quantité (grandeur réglée). La relation entre les entrées et les sorties fait souvent intervenir le temps : on parle alors de système dynamique. Sinon, le système est statique et son modèle mathématique correspond à des équations de bilans (bilans massiques, bilans énergétiques). Ainsi pour pouvoir réguler et contrôler notre convertisseur, nous devons d'une part modéliser le système sous forme mathématique et d'autre part, concevoir le régulateur. [38]

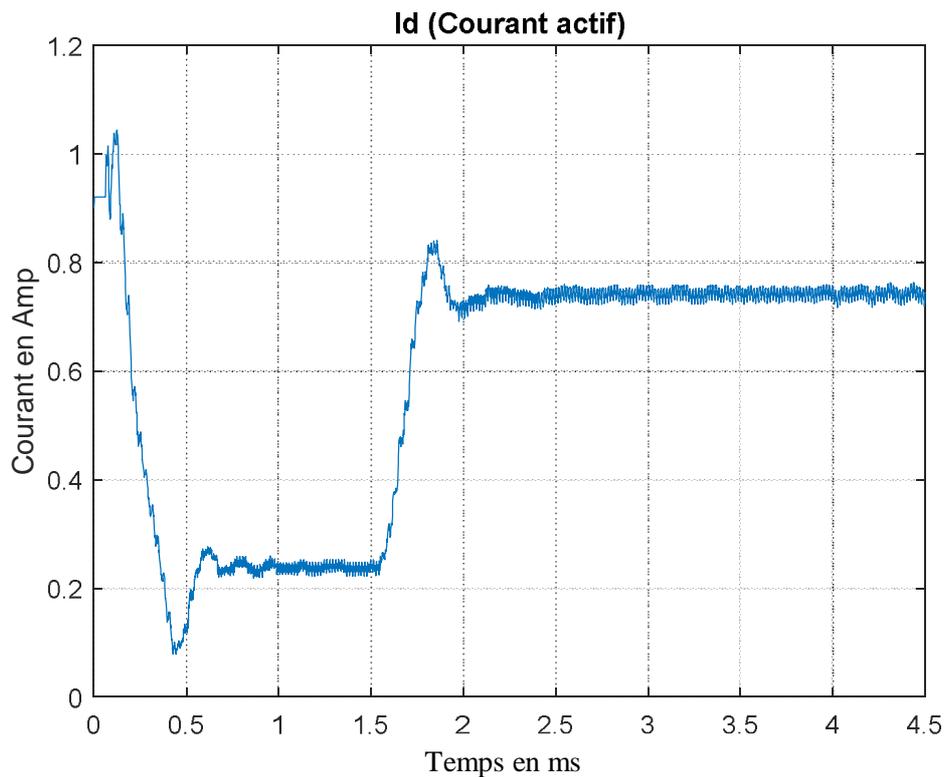


Figure III.10: Courbe de I_d (courant actif)

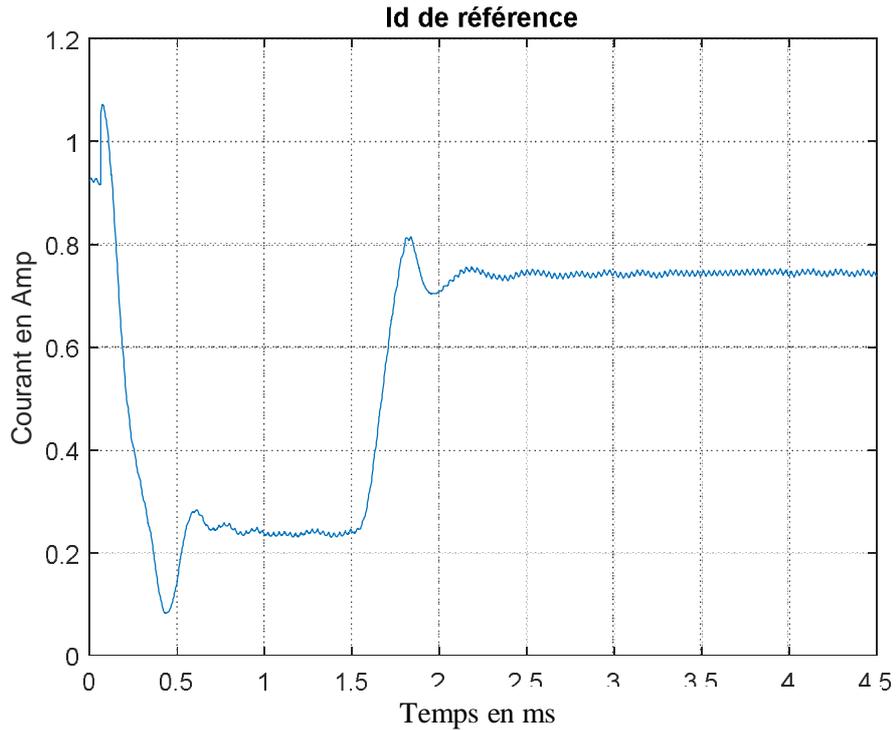


Figure III.11: Courbe de I_d de référence

➤ **Régulateur de courant**

Sur la base des références de courant I_d et I_q (courant réactif), le régulateur détermine les tensions de référence requises pour l'onduleur. Dans notre cas, la référence I_q est définie sur zéro.

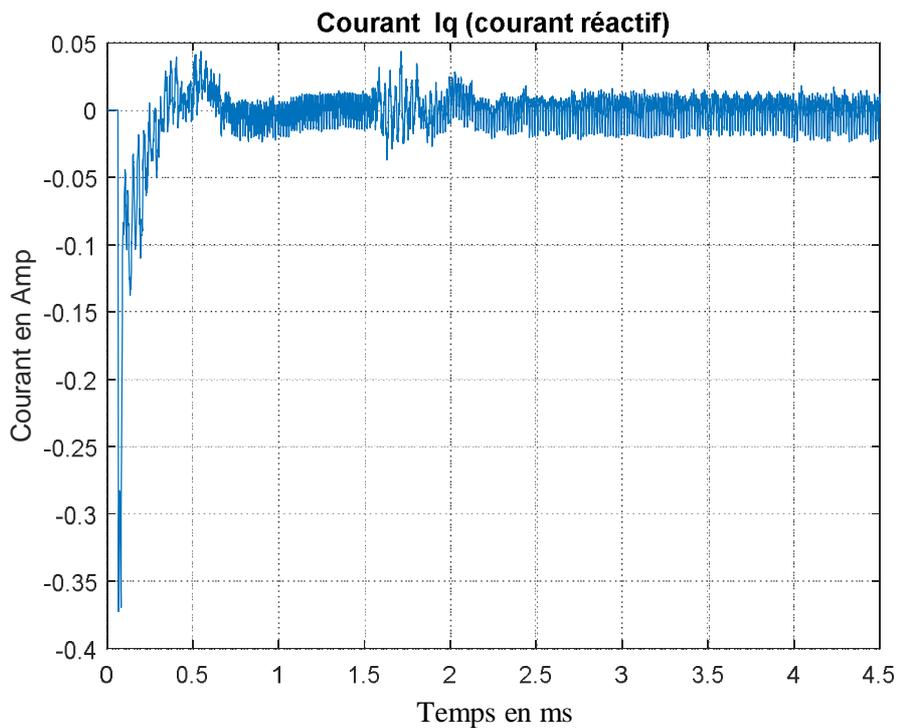


Figure III.12: Courbe de I_q (réactif)

➤ **PLL & Mesures**

PLL pour un saut de tension

PLL pour un saut phase

PLL pour une distorsion harmonique

➤ **Générateur PWM**

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 .

III.2.4. Réseau public et charge

On représente le réseau électrique de publique d'amplitude $V_{réseau}=340\text{ V}$, $I_{réseau} =15\text{ A}$ et de fréquence $f=50\text{ HZ}$.

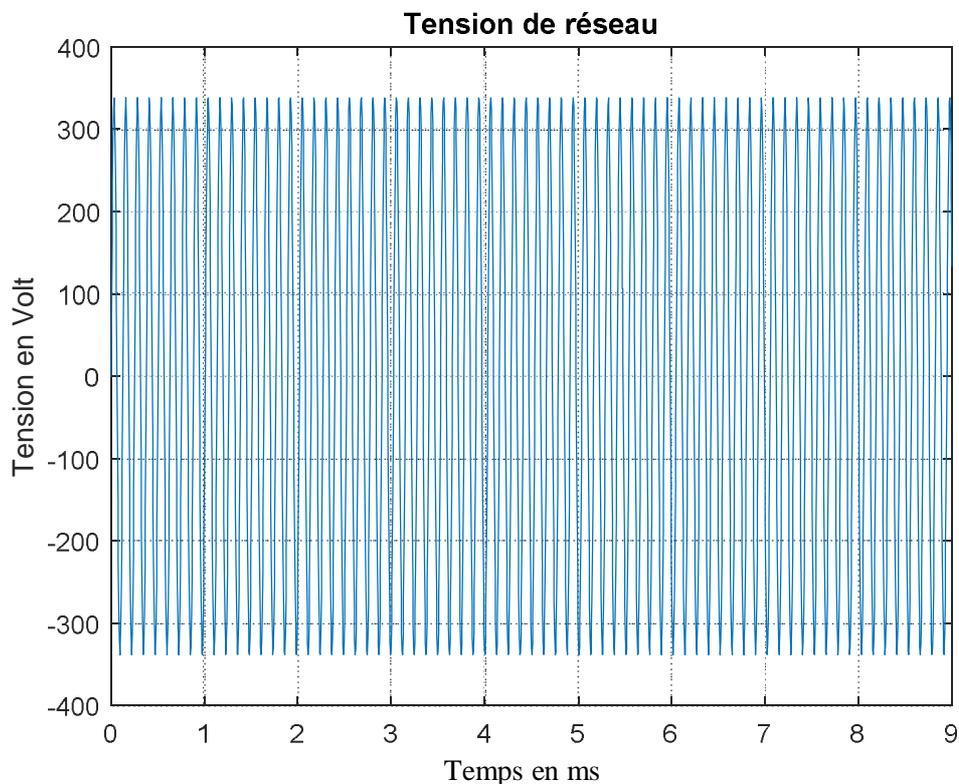


Figure III.13: Courbe de tension de réseau

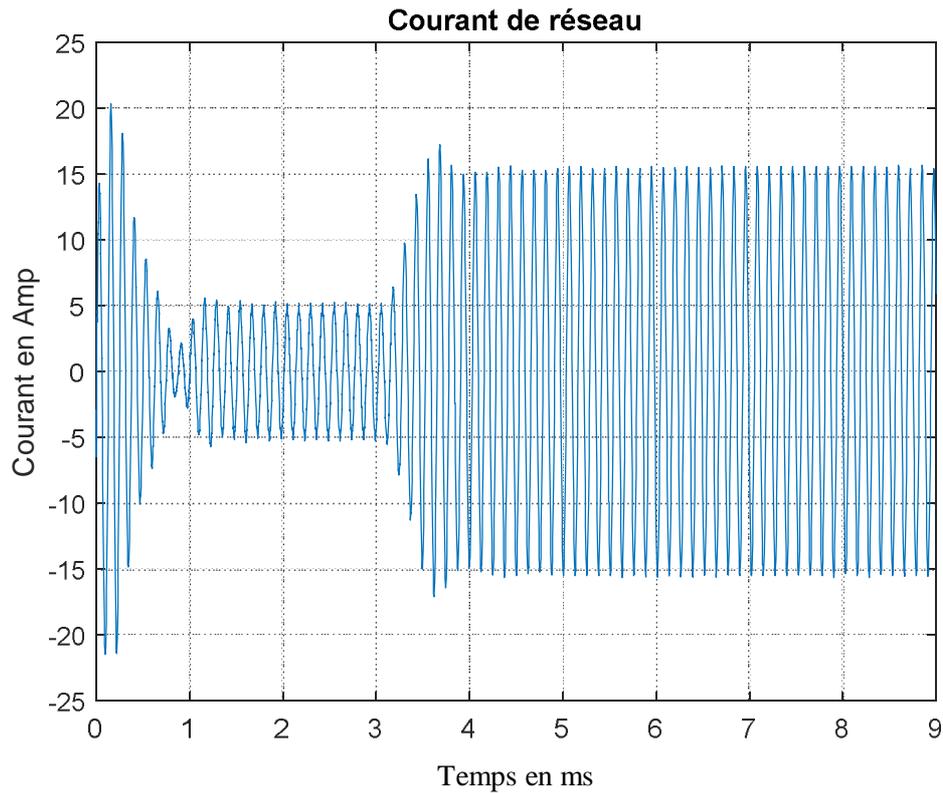


Figure III.14: Courbe de courant de réseau

III.3.Conclusion

Suite aux résultats obtenus par simulation numérique, nous pouvons conclure que la centrale PV TSM-250 du modèle NREL System Advisor (TSM-250) au silicium poly cristallin permet une production maximale d'énergie. Les pertes dues à la qualité de l'onduleur on une influence importante sur l'énergie produite par la centrale PV, d'où la nécessité d'opter pour une technologie permettant la meilleure efficacité annuelle possible de ce composant qui représente l'élément clé et le plus délicat d'une installation PV.

CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons présenté a pour objet de mettre au point un étage de conditionnement de puissance connecté à un système photovoltaïque. Le but est d'augmenter le rendement de la conversion.

Ce travail a été consacré à la modélisation des composants des systèmes photovoltaïques puis à une simulation de l'étage de conversion en optimisant la puissance fournie par le générateur à la charge considérée. 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 croit, 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 'P & O' 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.

Bibliographiques :

- [1]Ch. p. De. Brichabaut, Ch.Yauge le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique Technique et documentation Lavoisier 1982.
- [2]J .Royer,T.Djiako, E.SCHILLER le pompage photovoltaïque manuel de cour a l'intention des ingénieurs et techniciens bibliothèque national de CANADA 1998.
- [3]B .Equer le pompage photovoltaïque manuel de cours , énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [4]Y.Baklli Etude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur PV mémoire Magister ,Université de Boumerdes 2005.
- [5] Pompage photovoltaïque:guide à l'intention des ingénieurs et techniciens , Institut de L'énergie et de l'environnement de la francophonie , Université d'OTTAWA.
- [6]B.Flèche , D.Delagnes, Energie solaire photovoltaïque. 2007.
- [7]C.Bernard, station solaire autonome pour l'alimentation station pompage l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006.
- [8]K.Benlarbi, L, Mokrani, M.S .Nait-Said , Afuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water system , Solar Energy 77 -2004.
- [9]Note de cours : Electricité solaire photovoltaïque ,2IE, Zacharie KOALAGA.
- [10]ABIL, M.M,*création d'une entreprise d'instalation des panneaux solaires, mémpire de master,université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.*
- [11]Sofia, D.B.L., *Cours Energie solaire photovoltaïque.* 2015.
- [12] B. Mohammed, Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome , Centre universitaire de Bechar, 2008.
- [13]Akassewa Tchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [14]M.GUENOUNOU Abderrezak, Mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristiques directe et inverse des modules photovoltaïques de différents technologies,

Bibliographiques :

Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2009.

[15]ABID Ayyoub, BECHLAGHEM Yassine, Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque , Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2017.

[16]Abada S, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic, Mémoire de grade de Maître des Sciences (M. Se.), Université Laval Québec, 2011.

[17]Z.Bachi, S.Elfordil, Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque, université de Blida.

[18]Vincent Benamara, Étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage, École de technologie supérieure université du Québec, Montréal 2012

[19]GUEDAOURIA.H, Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar, Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.

[20]Libro de Ingeniería sin fronteras.

[21]B.Samia, *contribution à l'étude d'un générateur photovoltaïque dote de système de suivi du soleil comparaison et application au site de Tlemcen*, Thèse de Magister, Université Tlemcen, Mai 2004.

[22]TheBogdan, S.B, Salameh, Z.M, 1996. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. IEEE.

[23]C.Chaurey , S.Deambi. 1992, Battery storage Power systems: an verview .Renewable Energy 2 (3):227-235.

[24]M.Chikh, Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté aux batteries.

[25]D.Thévenard, and M.Ross , validation and Verification of Component Models and System Models for the PV, CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.

[26]M. Dahbi, Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne.

Bibliographiques :

[27]D.Turcotte,M.Ross,F.Sheriff. Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.

[28]J.P.Ferrieux,F.Forest.Dunod,alimentations à découpage, convertisseurs à résonance.

[29]F. Ansari ,A. K. Jha, Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm,international journal of research in engineering & applied sciences, issn: 2294- 3905, PP 19-30,2011.

[30]Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque, Y .PANKOW, Thèse doctorat, LEEPL, 2004

[31] Residential photovoltaic energy storage system. IEEE Trans. on Industrial Electronics, S. J. Chiang, K.T. Chang, and C.Y. Yen. 1998.

[32]Rural south africa and photovoltaic weak grid interface systems.M.N. Mather, M. Malengret, and J.H Enslin. EPE Lausanne, 1999.

[33]Topology for decentralised solar energy inverters with a low voltage ac bus. B. Lindgren, EPE Lausanne,1999.

[34]A. Meflah, Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque, Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.

[35] <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules>.

[36] Lin, F.-J, Lu, K.-C, Ke, T.-H., Yang, B.-H., and Chang, Y.-R, Reactive power control of three-phase gridconnected pv system during grid faults using takagi–sugeno–kang probabilistic fuzzy neural network control , IEEE Transactions on Industrial Electronics 62, 9 (2015), 5516–5528.

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

[38] M.El ajjouri ,Méthode avancée de contrôle commande d'un onduleur monophasé pour une réduction de la banque de condensateurs, en vue d'accroître la durée de vie du convertisseur , Université Du Québec A Montréal, décembre 2018.

Bibliographiques :
