

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique
Laboratoire des Dispositifs de Communication
et de Conversion Photovoltaïque



Mémoire de Magister En Génie Electrique

Option : Electricité solaire

Présenté par :

RAIS Younes

Ingénieur d'état en électronique de l'université cheikh larbi tebessi de Tébessa

Intitulé

Modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque

Soutenu publiquement le **30/06/2012** devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------|------------------------|------------------------|---------|
| Président : | LARBES Chérif | Professeur | E.N.P |
| Rapporteur : | MALEK Ali | Directeur de Recherche | C.D.E.R |
| Examineurs : | HADDADI Mourad | Professeur | E.N.P |
| | AIT-CHEIKH Md Salah | Maitre de Conférence | E.N.P |

ENP 2012

ملخص:

تعتبر المحولات مستمر-متناوب ذات أهمية كبيرة في تحويل التيارات الكهربائية المستمرة إلى تيارات متناوبة في الأنظمة الكهروضوئية التحسين في مردود هذه المحولات يؤدي إلى تحسين المردود الكلي للنظام الكهروضوئي توجد عوامل كثيرة تؤثر على مردود هذه المحولات ، من بينها التقنيات المستعملة ، نوع مكونات هذه المحولات ، طريقة التحكم ، حرارة التشغيل و فرق الكمون.

في هذا العمل قمنا بحساب مردود عدة محولات ذات مكونات مختلفة .

كلمات مفتاحية:

محول مستمر-متناوب , نظام كهروضوئي, الطاقة الشمسية

Résumé :

Dans un système photovoltaïque, l'onduleur a pour rôle la conversion de l'énergie solaire de la forme continue (DC) en une forme alternative (AC). L'amélioration du rendement de l'onduleur permet d'élever le rendement global de l'installation photovoltaïque.

Différents paramètres influent sur le rendement de l'onduleur, tels que la topologie utilisée, le type de composants de puissance, la stratégie de commande, la température de fonctionnement et la tension d'entrée.

Dans ce travail, le rendement de l'onduleur est représenté par différents modèles. Une comparaison des divers modèles est effectuée

Mots clés:

Convertisseur DC/AC, photovoltaïque, énergie solaire, onduleur

Abstract:

In a photovoltaic system, the inverter has a role of conversion of the solar energy of the continuous form (DC) into an alternative form (AC). The improvement of the efficiency of the inverter makes it possible to raise the total efficiency of the photovoltaic installation

Various parameters influence the efficiency of the inverter, such as used topology, the type of power, the control strategy, the operating temperature and the input voltage.

In this work, the output of the inverter is represented by various models. A comparison between the various models is carried out.

Key words:

DC/AC converter, photovoltaic, solar energy, inverte

Remerciements

Je tiens vivement à remercier Monsieur **MALEK Ali, Directeur de Recherche, CDER**, pour avoir proposé un sujet aussi intéressant, pour la confiance et l'intérêt qu'il m'a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur **LARBES Chérif, Professeur, ENP**, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens également à remercier Monsieur **HADDADI Mourad, Professeur, ENP**, pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur **AIT-CHEIKH Md Salah, Maître de conférence / A, ENP**, pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury.

Je tiens également à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce travail. Mes remerciements vont aussi vers le chef de département d'électronique Mr. **H.BOUSBIA-Salah**.

Je voudrais remercier tout particulièrement mes parents ainsi que mes frères et mes sœurs pour leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

Sommaire

Introduction générale :

Chapitre I : L'énergie solaire photovoltaïque :

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction : | 4 |
| I.2. L'effet photovoltaïque | 5 |
| I.2.1. Définition: | 5 |
| I.2.2. Le rayonnement solaire | 5 |
| I.3.1. Historique des cellules photovoltaïque : | 8 |
| I.4. La jonction PN utilisée comme un capteur photovoltaïque | 9 |
| I.4.1. Principe de fonctionnement : | 9 |
| I.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque: | 11 |
| I.6. Circuits équivalent et modèles mathématique: | 13 |
| I.6.1. Circuits équivalent et modèles mathématique d'une cellule photovoltaïque: | 13 |
| I.6.2. Modèles mathématique d'un panneau solaire: | 13 |
| I.6.3. Les conditions standards de test (STC : Standard Test Conditions) | 15 |
| I.6.3.1. Influence de la résistance shunt et série sur la courbe I (v) | 15 |
| I.6.3.2. Influence de l'ensoleillement sur les courbes I (V), P (V) | 15 |
| I.6.3.3. Influence de la température sur les courbes I (V), P (V) | 16 |
| I.6.3.4. Influence simultanée de l'ensoleillement et de la température | 16 |
| I.7. Rendement de la cellule photovoltaïque: | 17 |
| I.8. Les différentes technologies des cellules photovoltaïque: | 17 |
| I.9. Les systèmes photovoltaïques: | 20 |
| I.9.1. Le générateur photovoltaïque: | 24 |
| I.9.1.1. Principe: | 24 |
| I.9.1.2. Le module photovoltaïque | 24 |
| I.9.2. Système de stockage : | 25 |
| I.9.2.1. Types d'accumulateurs : | 27 |
| I.9.3. Système de régulation de charge /décharge d'une batterie : | 27 |
| I.9.3.1. Régulation de décharge : | 28 |
| I.9.3.2. Régulation de la charge : | 29 |
| I.10. Conclusion : | 31 |

Chapitre II: Les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT pour système photovoltaïque:

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction : | 33 |
| II.2. Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale : | 33 |
| II.2.1. Principe : | 33 |
| II.2.2. Interface de puissance..... | 36 |
| II.3. Les convertisseurs DC/DC : | 37 |
| II.3.1. Hacheur dévolteur « Buck Converter » : | 38 |
| II.3.1.1. Modèle mathématique du circuit équivalent : | 39 |
| II.3.1.2. Approximation des Petites ondulations | 39 |
| II.3.1.3. Etude de régime continue: | 40 |
| II.3.1.4. Le rapport de conversion : | 41 |
| II.3.2. Le hacheur survolteur « Boost converter »..... | 41 |
| II.3.2.1. Modèle mathématique du circuit équivalent : | 42 |
| II.3.2.2. Le rapport de conversion : | 43 |
| II.3.3. Convertisseur dévolteur-survolteur « Buck-Boost converter » | 43 |
| II.3.3.1. Modèle mathématique équivalent de convertisseur dévolteur-survolteur :..... | 45 |
| II.3.3.2. Le rapport de conversion : | 45 |
| II.4. Méthodes de poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT) :..... | 47 |
| II.4.1. Méthodes avec contre réaction de tension [16] [17] [18] :..... | 47 |
| II.4.1.1. Méthode à tension de référence fixe :..... | 47 |
| II.4.1.2. Méthode MPPT avec mesure de V_{oc} du panneau [16] [17] [18] :..... | 47 |
| II.4.1.3. Méthode MPPT avec cellule pilote : | 48 |
| II.4.2. Méthode avec contre réaction du courant [16], [17], [18] :..... | 49 |
| II.4.3. Méthodes avec contre réaction de puissance [16] [17] [18] :..... | 50 |
| II.4.3.1. Algorithme ‘perturbation et observation’ P&O..... | 51 |
| II.5. Conclusion : | 52 |

Chapitre III: Les onduleurs pour système photovoltaïque:

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction : | 53 |
| III.2. Définition et principe de fonctionnement des onduleurs : | 54 |
| III.2.1. Les Onduleurs monophasés : | 54 |
| III.2.1.1. Onduleur monophasé en demi-pont : | 54 |
| III.2.1.2. Onduleur monophasé en pont : | 55 |
| III.2.2. Les onduleurs triphasés : | 56 |
| III.2.3. Domaines d'application : | 57 |
| III.2.3.1. Domaine des fréquences fixes : | 57 |
| III.2.3.2. Domaine des fréquences variables : | 58 |
| III.2.4. La commande des onduleurs : | 59 |
| III.2.4.1. Technique MLI engendrée | 59 |
| III.2.4.2. Commande par hystérésis : | 62 |
| III.2.4.3. MLI optimisé (calculée) : | 63 |
| III.3. Concept technique des onduleurs photovoltaïque : | 63 |
| III.4. Technologies des onduleurs pour les systèmes couplés au réseau [10]: | 66 |
| III.4.1. Onduleurs Centraux : | 66 |
| III.4.2. Onduleurs string : | 67 |
| III.4.3. Onduleurs Multi-String : | 68 |
| III.5. Rendement des onduleurs photovoltaïques : | 68 |
| III.5.1. Rendement européen | 69 |
| Conclusion : | 70 |

Chapitre IV: Simulation et évaluation des résultats:

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction : | 71 |
| IV.2. Présentation des logiciels de simulations utilisées : | 71 |
| IV.2.1. Description du logiciel Mathworks Matlab inclu l'outil Simulink : | 71 |
| IV.2.2. Présentation du logiciel de simulation PSIM utilisé : | 71 |
| VI.3. Description du système photovoltaïque global : | 72 |
| VI.3.1. Le panneau photovoltaïque: | 73 |
| VI.3.1.1. Les caractéristiques électriques du panneau PV : | 75 |
| VI.3.1.1.1. Courbes courant-tension et puissance-tension du panneau PV : | 75 |
| VI.3.1.2.1. L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement du panneau PV : | 78 |

| | |
|---|----|
| VI.3.1.2.2. Influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV : | 79 |
| VI.3.2. Le contrôleur MPPT P&O : | 79 |
| VI.3.3. Le hacheur boost : | 80 |
| VI. 4. Simulation de la partie de commande : | 80 |
| VI.5. L'onduleur (DC\AC) et son filtre de sortie: | 82 |
| VI.5.1. Modélisation de rendements d'onduleur : | 86 |
| VI .5.1.1. Modélisation du rendement d'un onduleur à transistor MOSFET:..... | 87 |
| VI .5.1.1.1. Mesure effectuées et resultats : | 88 |
| VI .5.1.2. Modélisation du rendement d'un onduleur à transistor IGBT: | 89 |
| VI .5.1.2.1. Mesures effectuées et resultats : | 90 |
| VI .5.1.2.2. Mesures effectuées et resultats : | 93 |
| VI .5.1. 3. Rendement de l'onduleur IGBT pour différentes tensions d'entrée | 95 |
| IV.6. Explications des résultats de la modélisation : | 95 |
| Conclusion : | 95 |

Conclusion générale:

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Module photovoltaïque : | 4 |
| Figure I.2. Répartition spectrale du rayonnement solaire | 7 |
| Figure I.3. Schéma d'une cellule photovoltaïque..... | 8 |
| Figure I.4. Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard..... | 9 |
| Figure I.5. Courant crée par la jonction. | 10 |
| Figure I.6.Caractéristique $I(v)$ d'une jonction polarisée sous différent éclairéments. | 11 |
| Figure I.7. Paramètre électrique d'une cellule photovoltaïque. | 12 |
| Figure I.8. Schéma du circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque. | 13 |
| Figure I.9. Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque et son symbole. | 14 |
| Figure I.10. Effet de la résistance shunte et série sur la caractéristique $I(v)$ d'un GPV | 15 |
| Figure I.11. Effet de l'enseillement sur les caractéristiques $I(v)$, $P(v)$ d'un GPV..... | 17 |
| Figure I.12. Effet de la température sur les caractéristiques $I(v)$, $P(v)$ d'un GPV..... | 17 |
| Figure I.13. Effet simultanée de l'enseillement et de la température sur les caractéristiques $I(v)$, $P(v)$ d'un GPV..... | 20 |
| Figure I.14. Rendements records de cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire.. | 21 |
| Figure I.15. Les differents technologies des cellules photovoltaïque. | 22 |
| Figure I.16. Installation photovoltaïque autonome | 22 |
| Figure I.17. Installation photovoltaïque couplée au réseau..... | 24 |
| Figure I.18. Schéma synoptique résumant les divers types de systèmes PV | 24 |
| Figure I.19. Association des cellule photovoltaïque en série..... | 25 |
| Figure I.20. Association des cellule photovoltaïque en série..... | 26 |
| Figure I.21. Processus de production d'un module photovoltaïque..... | 26 |
| Figure I.22. Module en série avec diode by-pass et leurs caractéristiques. | 27 |
| Figure I.23. Module en parallèle avec diode anti-retour et leurs caractéristiques..... | 30 |
| Figure I .24. Schéma de principe d'un régulateur de charge série | 31 |
| Figure I.25. Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage | 34 |
| Figure I .26. Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle..... | 34 |
| Figure II.1. Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge. | 35 |
| Figure II.2.Connexion électrique directe entre un générateur PV et une batterie..... | 36 |
| Figure II.3. Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figure II.4. Utilisation d'un MPPT sur un convertisseur, (a) Caractéristique I(V) à la sortie du convertisseur. (b) Caractéristique P(V) à la sortie du convertisseur. (c) Caractéristique I(V) à la sortie du module solaire. | 37 |
| Figure II.5: Circuit idéal de convertisseur Buck. | 38 |
| Figure II.6: Circuit équivalent d'un convertisseur Buck ; (A) : $t \in [0, d.T_s]$; commutateur fermé, (B) : $t \in [dT_s, T_s]$; commutateur ouvert..... | 40 |
| Figure II.7: Forme d'onde de tension d'inductance $v_l(t)$ pour un hacheur dévolteur. | 41 |
| Figure II.8: Rapport de conversion M en fonction du rapport cyclique d pour un convertisseur dévolteur..... | 42 |
| Figure II.9. Circuit idéal du hacheur survolteur..... | 42 |
| Figure II.10. Circuit équivalent d'un hacheur survolteur (A) : $t \in [0, d.T_s]$; commutateur fermé, (B) : $t \in [dT_s, T_s]$; commutateur ouvert..... | 44 |
| Figure II.11. Le rapport de conversion M en fonction de d | 44 |
| Figure II.12. Circuit idéal du hacheur dévolteur-survolteur..... | 44 |
| Figure II.13. Circuit équivalent d'un hacheur dévolteur survolteur (A) : $t \in [0, d.T_s]$; commutateur fermé, (B) : $t \in [dT_s, T_s]$; commutateur ouvert : | 46 |
| Figure II.14. Le rapport de conversion M en fonction de d | 47 |
| Figure II.15. Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation | 47 |
| Figure II.16. Intervalles de variation de la tension de fonctionnement optimale pour des ensoleillements et des températures variables..... | 48 |
| Figure II.17. Méthode de la contre réaction en courant | 49 |
| Figure II.18. Schéma de la méthode à contre réaction de puissance..... | 50 |
| Figure II.19. Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O). | 54 |
| Figure III.1. Schéma de principe d'un onduleur de tension en demi-pont. | 55 |
| Figure III.2. Différentes formes des signaux..... | 56 |
| Figure III.3. Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont..... | 57 |
| Figure III.4. Tensions et leurs spectres. | 57 |
| Figure III.5. Schéma de principe d'un onduleur triphasé. | 58 |
| Figure III.6. Signaux de sortie pour un onduleur triphasé. | 59 |
| Figure III.7. Schéma de principe d'un onduleur pour alimentation de secours..... | 59 |
| Figure III.8. Schéma de principe d'un onduleur pour la conduite d'un moteur. | 60 |
| Figure III.9. Principe de commande des courants par MLI. | 60 |

| | |
|--|----|
| Figure III.10. MLI à échantillonnage naturel..... | 61 |
| Figure III.11. MLI à échantillonnage régulier symétrique..... | 62 |
| Figure III.12. MLI à échantillonnage régulier asymétrique..... | 63 |
| Figure III.13. Principe de commande des courants par hystérésis..... | 63 |
| Figure III.14. MLI optimisé (Calculé)..... | 64 |
| Figure III.15. Circuit simple utilisant un pont de transistors [31]..... | 64 |
| Figure III.16. Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur [31]. | 65 |
| Figure III.17. Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence [31]..... | 65 |
| Figure III.18. Circuit à 4 étages avec montage push pull [32]..... | 66 |
| Figure III.19. Onduleur sans transformateur dit « à Topologie de « Karschny » [32]..... | 67 |
| Figure III.20. Représentation schématique des Onduleurs Centraux [33]..... | 68 |
| Figure III.21. Représentation schématique des Onduleurs string [33]..... | 68 |
| Figure III.22. Représentation schématique des Onduleurs Multi-String [33]..... | 69 |
| Figure IV.1. Composition du logiciel psim..... | 72 |
| Figure VI.2. Schéma synoptique pour la simulation du système photovoltaïque..... | 73 |
| Figure VI.3. Modèle ‘SIMULINK’ du panneau photovoltaïque..... | 74 |
| Figure VI.4. Modèle ‘SIMULINK’ du système solaire sans régulateur..... | 75 |
| Figure VI.5. Caractéristiques $I = f(V)$ du panneau PV (température=25°C insolation=1000W/m ²)..... | 75 |
| Figure VI.6. Caractéristiques $P = f(V)$ du panneau PV..... | 76 |
| (Température=25°C, insolation=1000W/m ²)..... | 76 |
| Figure VI.7. Courbe de puissance en fonction de temps..... | 77 |
| Figure VI.8. Courbe de courant en fonction de temps..... | 77 |
| Figure VI.9. Courbe de tension en fonction de temps..... | 77 |
| Figure VI.10. Caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairagements..... | 78 |
| Figure VI.11 : Caractéristiques Puissance Tension pour différents éclairagements..... | 79 |
| Figure VI.12. Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures..... | 80 |
| Figure VI.13: Caractéristiques Puissance–Tension pour différentes températures..... | 81 |
| Figure VI.14. Modèle ‘SIMULINK’ de la méthode ‘perturbation et observation’..... | 81 |
| VI.4.1. Fonctionnement du système sous des conditions constantes :..... | 82 |
| Figure IV.15. Variation de la tension du GPV et du courant et de la puissance..... | 82 |
| Figure IV.16. Variation de la tension et de puissance de la batterie..... | 82 |
| Figure VI.17. Onduleur monophasé..... | 83 |
| Figure VI.18. Schémas de l’onduleur sous PSIM..... | 83 |

| | |
|--|----|
| Figure VI.19. Schéma du filtre..... | 84 |
| Figure VI.20. Allure du courant et de tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=1\text{kHz}$ | 85 |
| Figure VI.21. Spectre du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=1\text{kHz}$ | 85 |
| Figure VI.22. Allure du courant et de tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p= 3\text{kHz}$ | 86 |
| Figure VI.23. Spectre du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=3\text{kHz}$ | 86 |
| Figure VI.24. Allure du courant et de tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=5\text{kHz}$ | 87 |
| Figure VI.25. Spectre du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=5\text{kHz}$ | 87 |
| Figure VI.26. Onduleur monophasé à transistor MOSFET. | 88 |
| Figure VI.27. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (48v) en fonction de la puissance nominale d'entrée. | 89 |
| Figure VI.28. Onduleur monophasé à transistor IGBT..... | 90 |
| Figure VI.29. Allure de courant et de tension à l'entrée et à la sortie de l'onduleur. | 91 |
| Figure VI.30. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (24v) en fonction de la puissance nominale d'entrée. | 93 |
| Figure VI.31. Circuit à pont de transistors IGBT avec convertisseur élévateur sous PSIM. | 93 |
| Figure VI.32. Tension à la sortie du convertisseur boost DC/CD..... | 95 |
| Figure VI.33. Allure de courant et de tension à la sortie de l'onduleur. | 96 |
| Figure VI.34. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (96v) en fonction de la puissance nominale d'entrée. | 96 |

Nomenclature

E : Energie en (Joule).

l: Longueur d'onde en [m].

h : Constante de Planck.

ν : Fréquence des photons en (Hz).

c : Vitesse de la lumière (m/s).

Es : Ensoleillement (W/m^2)

SS : Durée l'ensoleillement (h).

I : Le courant délivré par le module (A).

I_p : Photo courant (A).

I_d : Courant de diode (A).

I_{sh} : Le courant shunt (A).

T_a : Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$).

V: Tension du module (V).

T_j : La température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).

R_{ser} : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

A : Facteur d'idéalité.

E_{ref} : Irradiation de référence $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

T_{ref} : Température de référence 25°C .

n_s : Nombre de cellule en série dans un module.

e_0 : La charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

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

P_{ch} : Puissance demandée par la charge (W).

P_{pv} : Puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (W).

E : Tension continue (V).

V_{ond} : Tension à la sortie de l'onduleur (V).

V_{dc} : Tension continue (V).

V_{oc} : Tension en circuit ouvert.

G1, G2, G3, G4 : Signaux de commande.

MLI : Modulation en L'largeur D'impulsion.

MPPT : Maximum power point tracking.

η_{euro} : Rendement européen.

η_{max} : Rendement Maximum.

P_s : Puissance de sortie.

P_e : Puissance d'entrée.

Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources 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.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des microturbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

La production de l'électricité à partir d'un système photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellule photovoltaïque.

La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1990-1995, pour dépasser 27000 MWc en 2011 [1].

Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les modules solaires pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative utilisée sur place (systèmes autonomes) ou connectée au réseau.

L'objectif principal dans ce travail est de modéliser le rendement d'un convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque autonome.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre parties.

Dans la première partie, on fait une description générale, et les principes de base de la conversion photovoltaïque.

Dans la seconde partie nous rappellerons les principales techniques de poursuite MPPT et les convertisseurs DC/DC.

Dans la troisième partie nous présentons une étude générale sur les onduleurs, concept technique des onduleurs photovoltaïques, et en citant quelques stratégies de commandes utilisées.

La quatrième partie est consacrée pour la modalisation du rendement d'un onduleur monophasé dans un système photovoltaïque.

I.1. Introduction :

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. L'être humain peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité.

La transformation de l'énergie solaire en électricité s'effectue grâce à des cellules solaires (appelées aussi cellules photovoltaïque ou encore photopile) qui sont associées pour former des modules solaires. eux-même associés pour former des panneaux. Le but des associations est d'obtenir des tensions ou des courants suffisants. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très long temp.

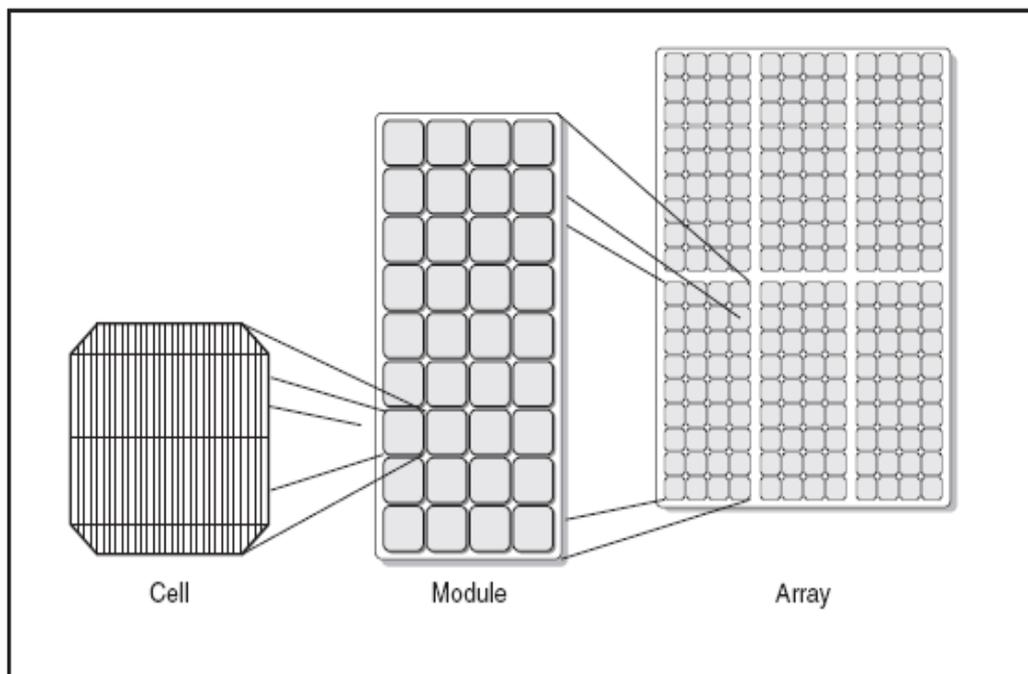


Figure I.1. Module photovoltaïque :

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelque notion sur la source d'énergie qui représente le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïque. Leurs caractéristiques principales et les différentes technologies. Puit nous aborderons les générateurs photovoltaïques.

I.2. L'effet photovoltaïque :

I.2.1. Définition:

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. On utilise pour cela une photopile. L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière.

Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une ddp entre les faces extérieures de la jonction est créée : La photopile est prête à fonctionner [1].

I.2.2. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} , Qui s'écrit [2]:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Dans laquelle ' λ ' représente la longueur d'onde, ' h ' la constante de Planck et ' c ' la vitesse de la lumière.

Hors atmosphère, l'énergie moyenne annuelle reçue par la terre est d'environ 5,5 KWh/m² et par jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomène complexe d'absorption par les gaz, de diffusion par les molécules, et d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

Le flux énergétique reçu au sol dépend ainsi de nombreux facteurs et son maximum au sol ne dépasse guère 1000 W/m² avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère. Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée.

Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires.

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient m appelé masse atmosphérique ou **nombre d'air masse**

AM défini par :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (I.2)$$

θ : Élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith).

Ainsi lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions **AM1** car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7,8Km). Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2, hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions **AM0**.

Le concept de nombre d'air masse caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire

(1353 W/m² pour **AM0**, 833 W/m² pour **AM1**, **5**); d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques.

Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre **AM1.5**, une puissance incidente de **1000W/m²** et une température de **25°C** et c'est ce que nous allons utiliser sauf indication contraire. C'est dans de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné. On peut dire que, outre l'influence de l'atmosphère, le flux solaire reçu sur une surface dépend :

- De l'orientation et de l'inclinaison de la surface.
- De la latitude du lieu et de son degré de pollution.
- De la période de l'année.
- De l'instant considéré dans la journée.
- De la nature des couches nuageuses.

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de [3]:

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm),

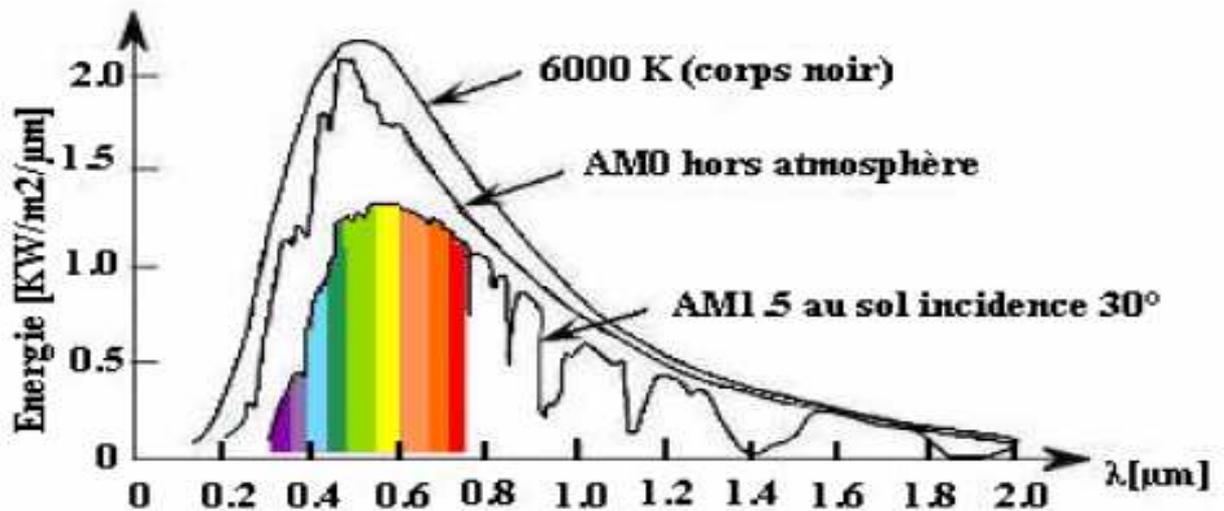


Figure I.2. Répartition spectrale du rayonnement solaire [4].

I.3. Les cellules photovoltaïques:

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellurure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée [5].

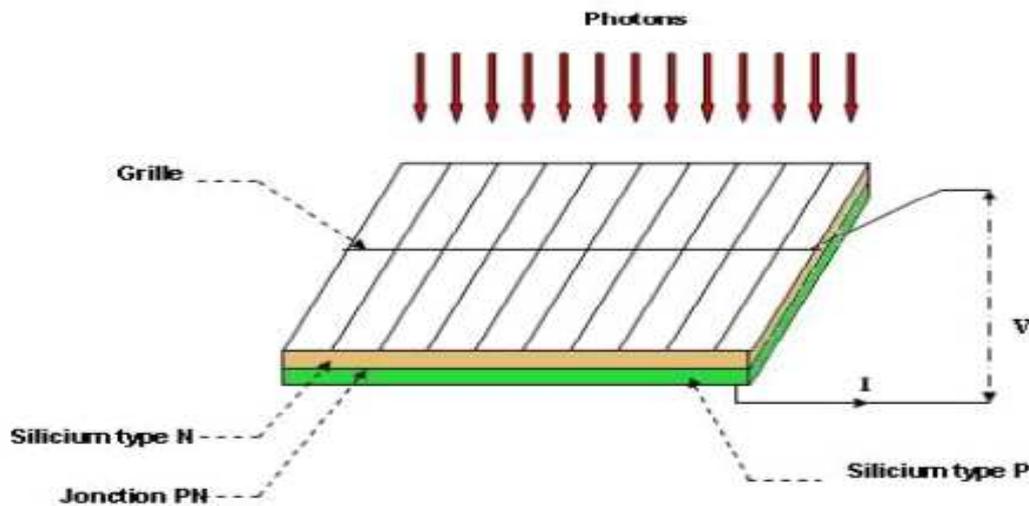


Figure I.3. Schéma d'une cellule photovoltaïque.

I.3.1. Historique des cellules photovoltaïques :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [6] :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés".

C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

I.4. La jonction PN utilisé comme un capteur photovoltaïque :

I.4.1. Principe de fonctionnement :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p . Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p .

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p . Une jonction PN a été formée.

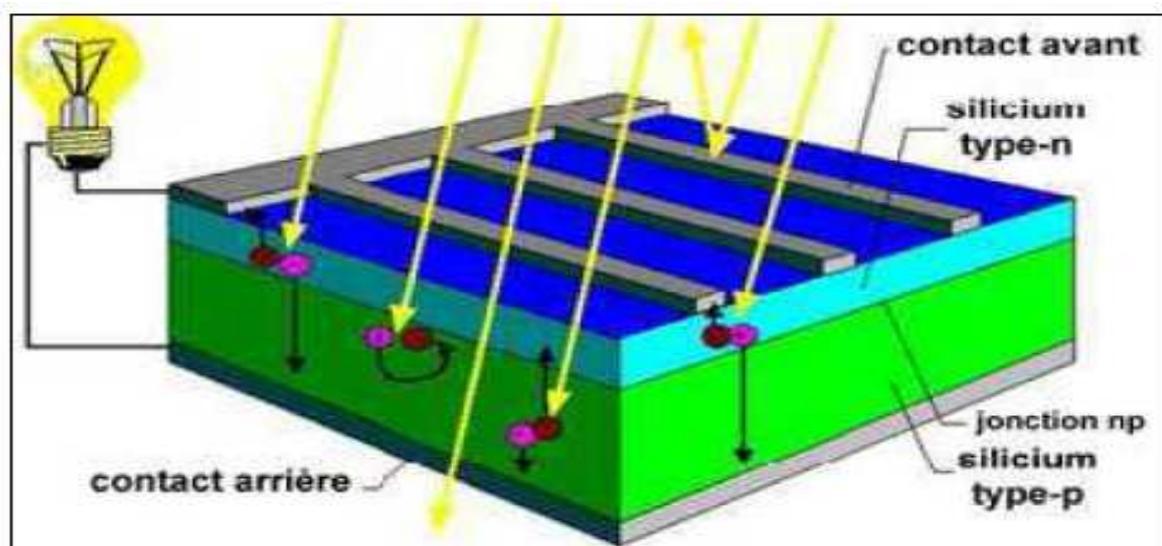


Figure I.4. Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard [6].

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, figure I.4, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible, figure I.5. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

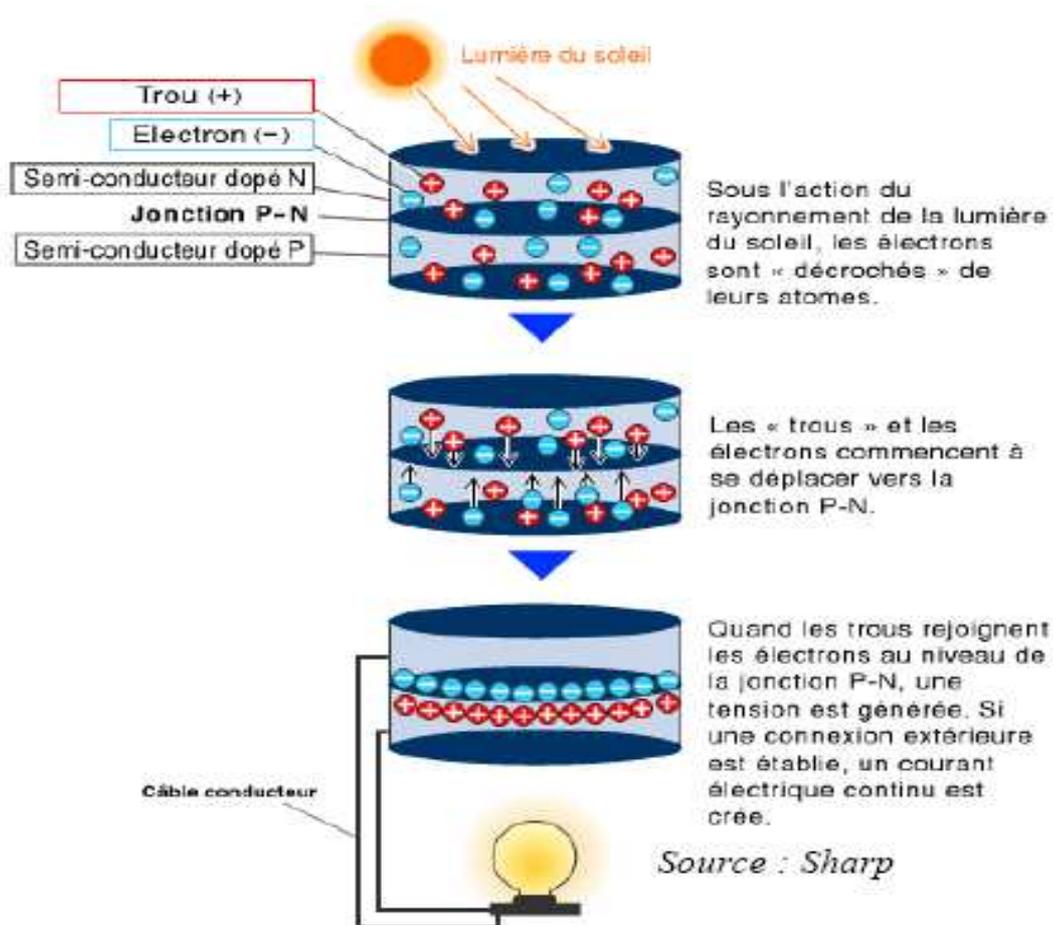


Figure I.5. Courant crée par la jonction.

I.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Les caractéristiques d'une cellule solaire sont évidemment celle d'une diode classique, la photo courant déplaçant la caractéristique courant-tension comme cela apparaît à la figure I.6.

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées en figure I.6. Sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

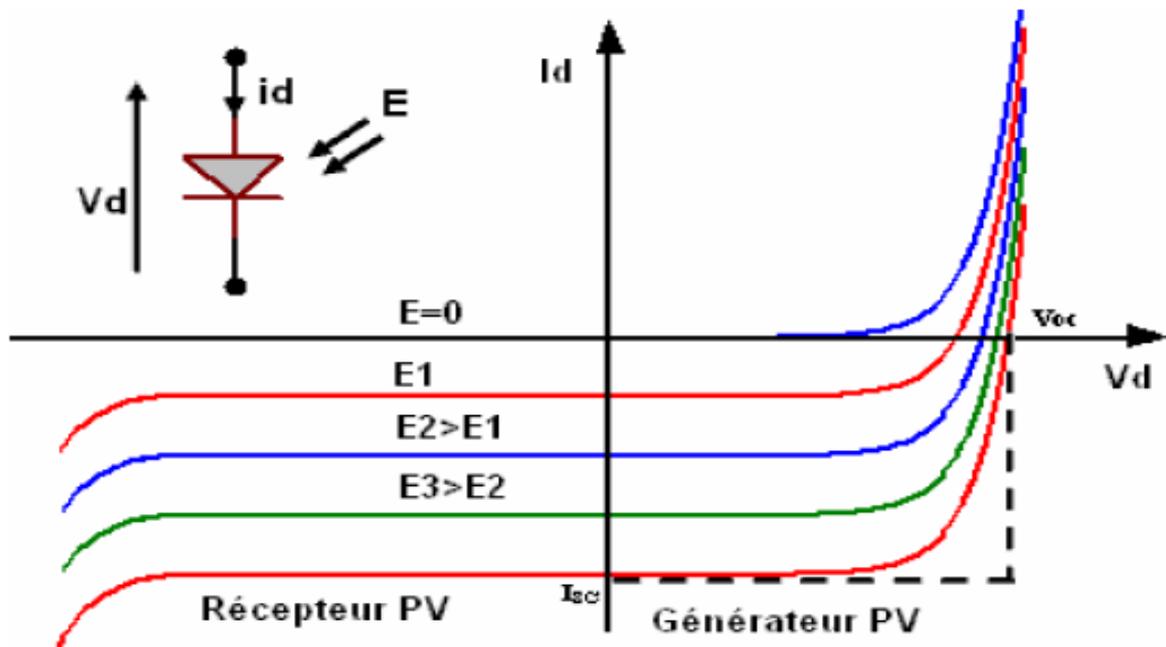


Figure I.6. Caractéristique $I(v)$ d'une jonction polarisée sous différents éclairages.

$E=0$ éclairage nul (à l'obscurité).

E_1, E_2 et E_3 éclairage pas nul.

Le courant délivrer sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit:

$$I_d(V_d) = I_{ph} - I_{obs}(v) \quad (I.3)$$

Avec: I_{ph} : densité de courant photogénéré et I_{obs} : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (1.3) peut être écrite sous la forme suivante:

$$I_d(V_d) = I_{ph} - I_s (\exp(q \cdot v / K \cdot T) - 1) \quad (I.4)$$

avec I_s : courant de saturation de la diode, q : charge élémentaire, K : constante de Boltzmann, T : température.

Ainsi dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent: le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure I.7.

A partir de la caractéristique $I(v)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propre à la cellule et notamment :

I_{cc} : courant de court-circuit (obtenir pour $V=0$) ;

V_{co} : tension en circuit ouvert (obtenir pour $I=0$) ;

I_m : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

V_m : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

η : rendement de conversion ;

FF : facteur de forme (fill factor);

MPP : le point de puissance maximale ;

FF = (puissance maximale délivrée sur la charge) / ($V_{co} * I_{cc}$) :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.5)$$

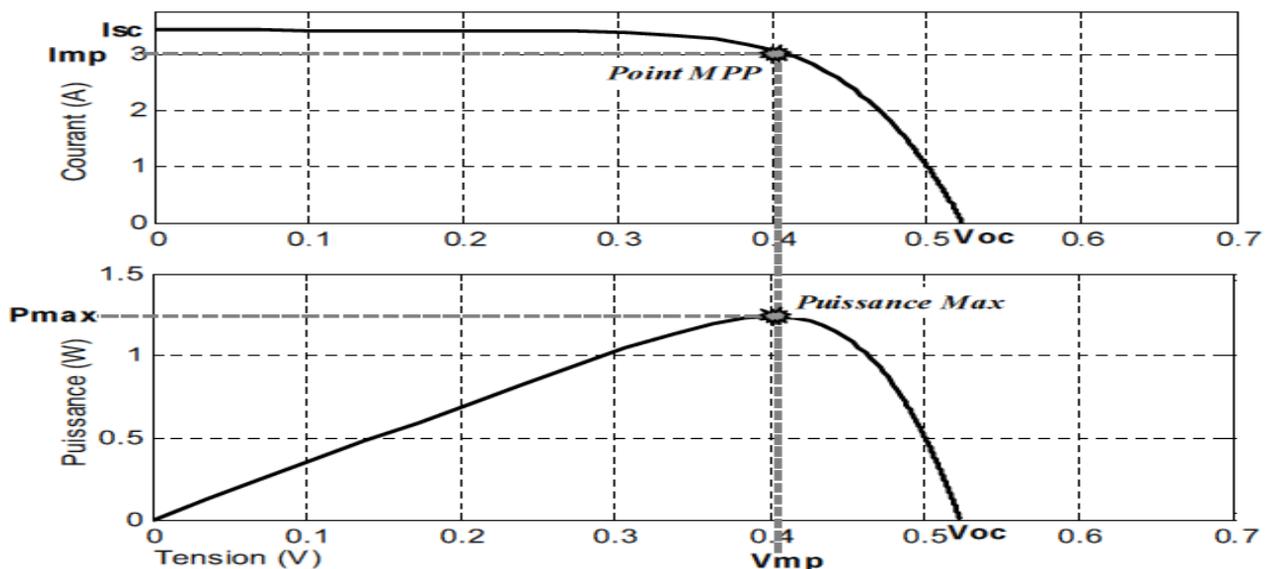


Figure I.7. Paramètre électrique d'une cellule photovoltaïque.

I.6. Circuits équivalent et modèles mathématiques:

I.6.1. Circuits équivalents et modèles mathématiques d'une cellule photovoltaïque :

Les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque représenté sur la figure I.8.

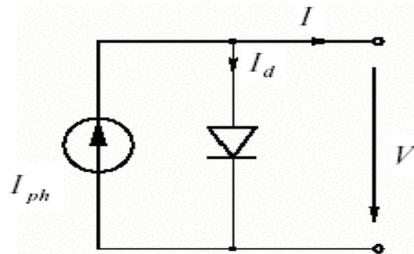


Figure I.8. Schéma du circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque.

L'application de la loi de Kirchhoff et de l'équation de diode exponentielle (I.6) mène au modèle mathématique simple pour une cellule photovoltaïque (I.7) [7].

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right], \quad (\text{I.6})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right]. \quad (\text{I.7})$$

I et V sont respectivement le courant et la tension de sortie de la cellule. I_{ph} est le photocourant produit et I_s est le courant de saturation inverse de la diode. En plus, le modèle dépend de la température T , de la constante de charge élémentaire q ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) et de la constante de Boltzmann k ($1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).

Avec ce modèle, il n'est pas surprenant que la caractéristique I - V d'une cellule photovoltaïque soit tout à fait semblable à celle d'une diode normale. La différence principale est l'existence de la tension V_{oc} de circuit ouvert qui mène au courant I_{sc} de court-circuit comme le courant d'offset de la courbe figure I.6. Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité totale se comportera comme une diode normale [8], [9].

Les mesures réelles sur de vraies cellules dans des conditions de fonctionnement diverses montrent cependant le besoin de modèles plus sophistiqués.

En particulier la résistance interne du dispositif doit être prise en compte. Ceci mène au « modèle de deux diode » largement répandu, représenté sur la figure I.9. [8], [7].

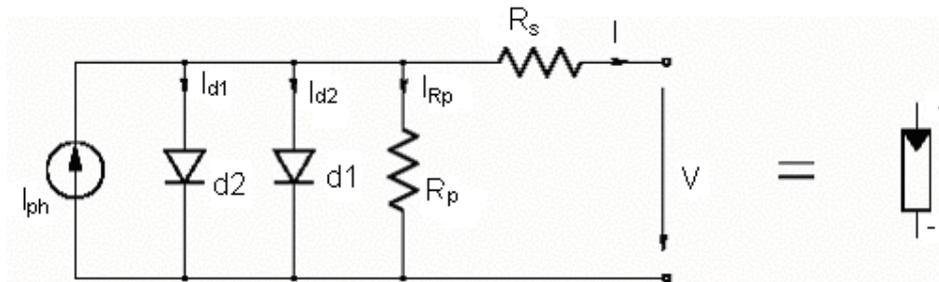


Figure I.9. Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque et son symbole.

La figure I.9 est une représentation du modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension qui est donnée par [10]:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p}. \quad (I.8)$$

I_{s1} et I_{s2} sont les courants de saturation des diodes, n_1 et n_2 les facteurs de pureté de la diode, R_s et R_p sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle, et T la température absolue en Kelvin. L'équation contient également la charge élémentaire constante q ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) et la constante de Boltzmann k ($1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$). Le photo-courant $I_{ph,max}$ est atteint à une insolation maximum, souvent on a ($I_{ph} = S \cdot I_{ph,max}$) avec S : pourcentage d'insolation.

Il est évident de l'équation (I.7), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph} et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par HANNES [7] :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}|_{(T=298 \cdot K)} \left[1 + (T - 298 \cdot K) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (I.09)$$

$$I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (I.10)$$

$$I_{s2} = K_2 T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (I.11)$$

Où E_g est la bande d'énergie du semi-conducteur et

$$K_1 = 1,2 \text{ A/cm}^2 \cdot K^3 \quad (\text{I.12})$$

$$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot K^{5/2}. \quad (\text{I.13})$$

I.6.2. modèles mathématique d'un panneau solaire

Dans les systèmes d'énergie photovoltaïque, des cellules sont combinées dans des rangées de pile solaire reliant un certain nombre de cellules en série. La considération du modèle de circuit équivalent la figure I.9, mène à l'équation pour une rangée photovoltaïque de cellules (généralement appelée un panneau solaire ou une rangée solaire) avec z cellules photovoltaïques raccordées en série (I.14) [7].

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IzR_s)}{zn_1kT}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IzR_s)}{zn_2kT}} - 1 \right] - \frac{V + IzR_s}{zR_p}. \quad (\text{I.14})$$

Ces panneaux alors peuvent être encore arrangés en série ou en parallèle pour réaliser la tension et les valeurs de courant désirés pour le système.

I.6.3. Les conditions standards de test (STC : Standard Test Conditions) :

Afin de comparer entre elles différentes photopiles (on va aussi voir que c'est valable pour les modules qui sont constitués d'associations de cellules), on a standardisé des tests de mesure (IEC 60904/DIN EN 60904 standards) [11]:

- Irradiation de 1000 W/m²
- Température de cellule à 25°C avec une tolérance de ±2°C
- Spectre lumineux défini selon la norme IEC 60904-3 avec AM=1,5

D'après l'équation (I.14), la caractéristique I-V est influencée par l'éclairement, la température, la résistance shunt, et la résistance série.

I.6.3.1. Influence de la résistance shunte et série sur la courbe I (v) :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible.

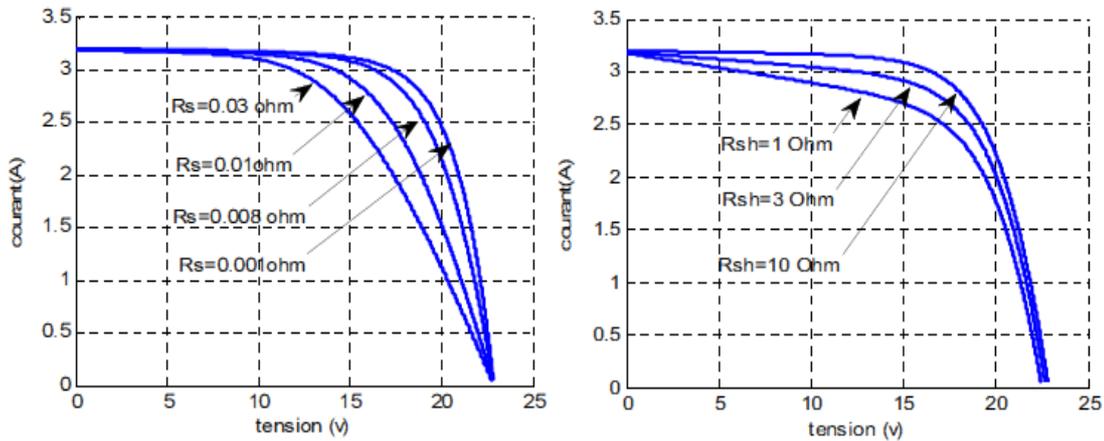


Figure I.10. Effet de la résistance shunte et série sur la caractéristique I (v) d'un GPV.

I.6.3.2. Influence de l'ensoleillement sur les courbes I (V), P (V) :

La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale du module (Pm) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- les points de puissance optimale se situent dans un intervalle de tension réduit.

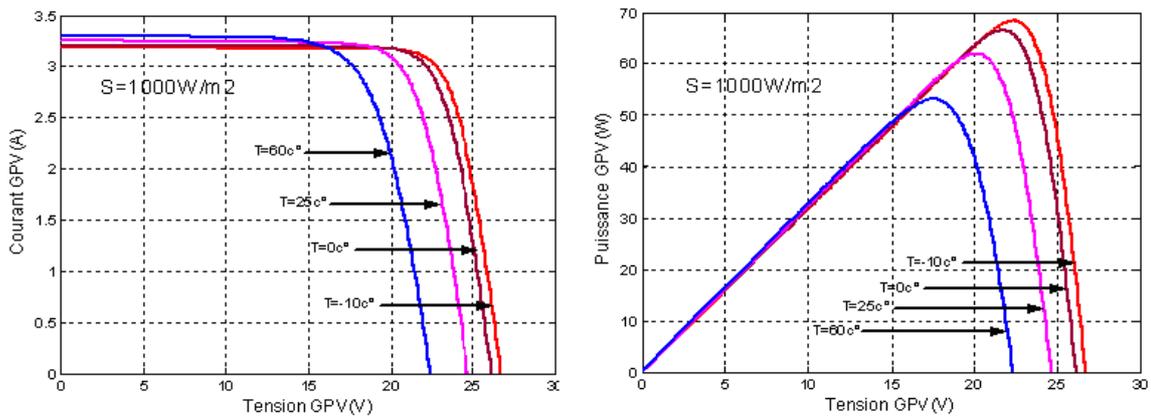


Figure I.11. Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I (v), P (v) d'un GPV.

I.6.3.3. Influence de la température sur les courbes I (V), P (V) :

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique I=f (I,V) du module PV. Pour le silicium, lorsque la température augmente [3]:

- le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm²/°C/Cellule.
- la tension décroît de 2,2 mV/°C/cellule.

D'où, une baisse de puissance d'environ 0,4%/°C.

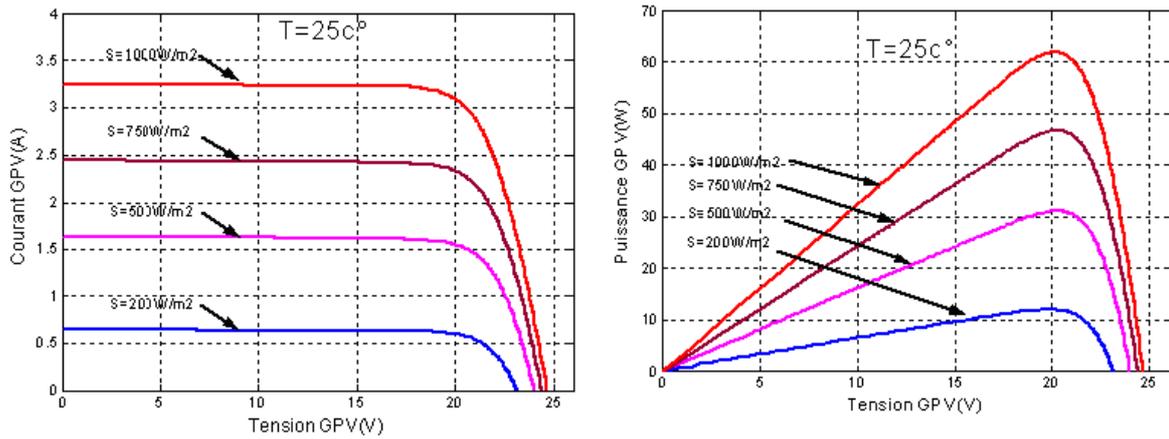


Figure I.12. Effet de la température sur les caractéristiques $I(v)$, $P(v)$ d'un GPV

I.6.3.4. Influence simultanée de l'ensoleillement et de la température :

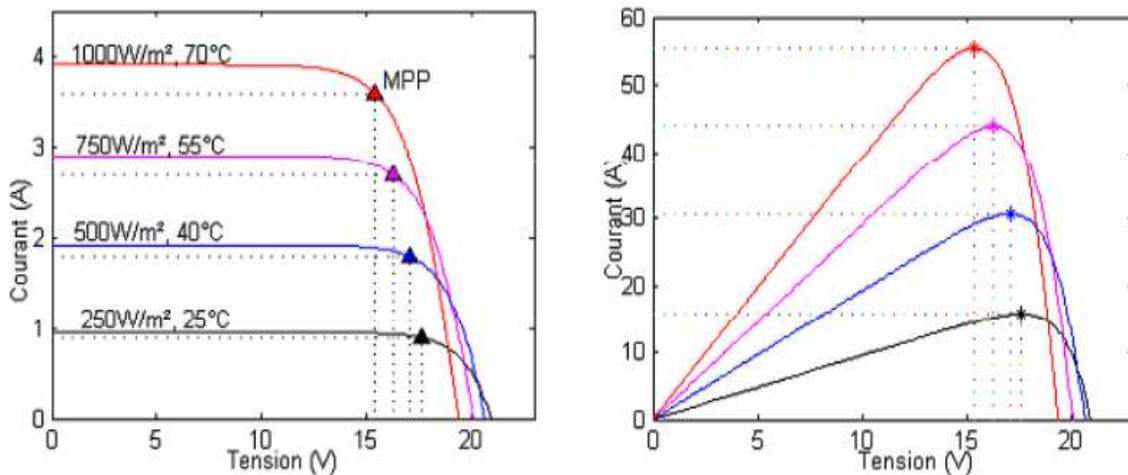


Figure I.13. Effet simultanée de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques $I(v)$, $P(v)$ d'un GPV.

I.7. Rendement de la cellule photovoltaïque [11] :

Toute l'énergie de la lumière solaire n'est pas transformée en électricité car :

1. Certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles (On améliore l'absorption des photons par l'application de couches anti-reflets en dioxyde de Titane TiO_2 ou en nitrure de silicium hydrogéné $SiN, J1$).
2. D'autres ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron.
3. Seuls les photons d'énergie suffisante sont absorbés et créent des paires électrons-trous, l'énergie excédentaire est cédée aux électrons sous forme d'énergie cinétique qu'ils perdent rapidement pour se retrouver sous forme de chaleur. Ce sont ces paires créées qui seront séparées par le champ électrique interne et qui constituent le photo courant.

4. Enfin de nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinaient avant d'avoir fourni un courant utile.

D'autres facteurs tels que les résistances de contact, fuites, ombrage par le peigne de contact, sont à l'origine d'autres pertes ce qui fait que le rendement d'une photopile est sérieusement limité (Le rendement est défini comme le rapport entre la puissance reçue et la puissance délivrée).

En gros, sur le total de la radiation solaire reçue, on estime à peu près :

- 3% de pertes par réflexion et par ombrage causé par la grille de contact avant.
- 23% des photons à faible énergie (grande longueur d'onde).
- 32% des photons à trop forte énergie.
- 8,5% de pertes par recombinaisons.
- 20% dus à la ddp dans la cellule particulièrement dans la zone de charge d'espace.
- 0,5% de pertes dans les résistances de séries.

Il ne reste alors que 13% de l'énergie qui sera utilisable.

Pour les cellules au Si monocristallin, le rendement théorique maximal est de l'ordre de 28%.

En pratique, pour ce type de cellules, actuellement les plus utilisées, leur rendement typique de l'ordre de 12-15 %.

Les recherches se poursuivent pour tenter d'améliorer les rendements.

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses [12].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} * I_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (I.15)$$

Le tableau ci-dessous résume l'état actuel des connaissances sur les grandes familles de cellules photovoltaïques :

| <i>Type de cellule</i> | <i>Rendement module commercial</i> | <i>Module prototype maximum</i> | <i>Record en laboratoire</i> |
|--|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Cellules organiques | – | – | 5% |
| Silicium cristallin (couche mince) | 7 % | 9,4 % | – |
| Silicium amorphe (couche mince) | 5 à 9 % | 10,4 % | 13,4 % |
| CdTe (Tellurure de Cadmium) | 6 à 9 % | – | 16,7 % |
| CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) | 9 à 11 % | 13,5 % | 19,3 % |
| Silicium polycristallin | 11 à 15 % | 16,2% | 20,3 % |
| Silicium mono cristallin | 12 à 20 % | 22,7 % | 24,7 % |
| Cellule multijonctions (technologie spatiale) | – | 25 à 30 % | 39 % |

Tableau I.1. Rendement des cellules photovoltaïque [11].

D'une manière générale, on peut augmenter le rendement des cellules photovoltaïques :

- soit en purifiant au maximum le semi-conducteur utilisé,
- soit en empilant plusieurs semi-conducteurs qui vont chacun utiliser une longueur d'onde lumineuse un peu différente et donc, à plusieurs, être plus efficaces.

Mais plus le rendement est élevé, plus la cellule est chère. Ainsi, les cellules multijonctions utilisées dans l'espace (Gallium-Indium-Phosphore / Arséniure de Gallium / Gallium/Germanium) sont extrêmement coûteuses.

Autre problème : les cellules CdTe sont moins chères que celles au silicium amorphe et légèrement plus performantes, mais elles contiennent du cadmium qui est un métal très toxique.

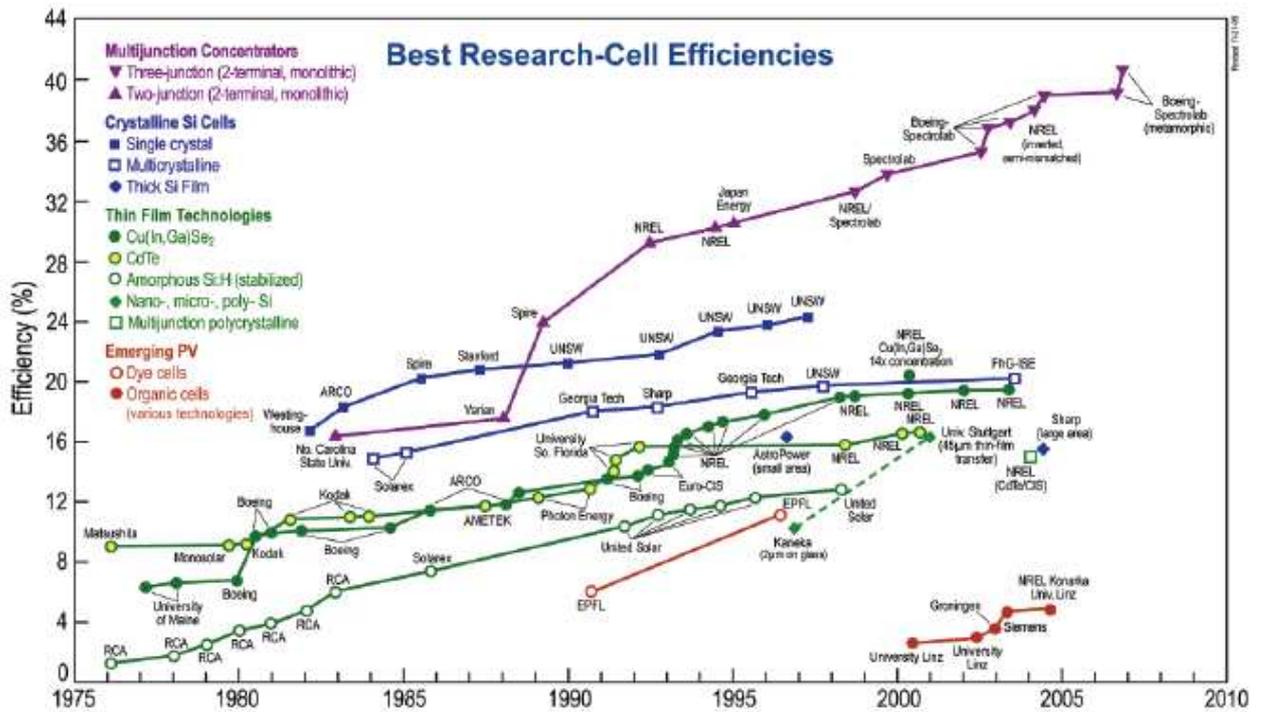


Figure I.14. Rendements record de cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire.

I.8. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques [6]:

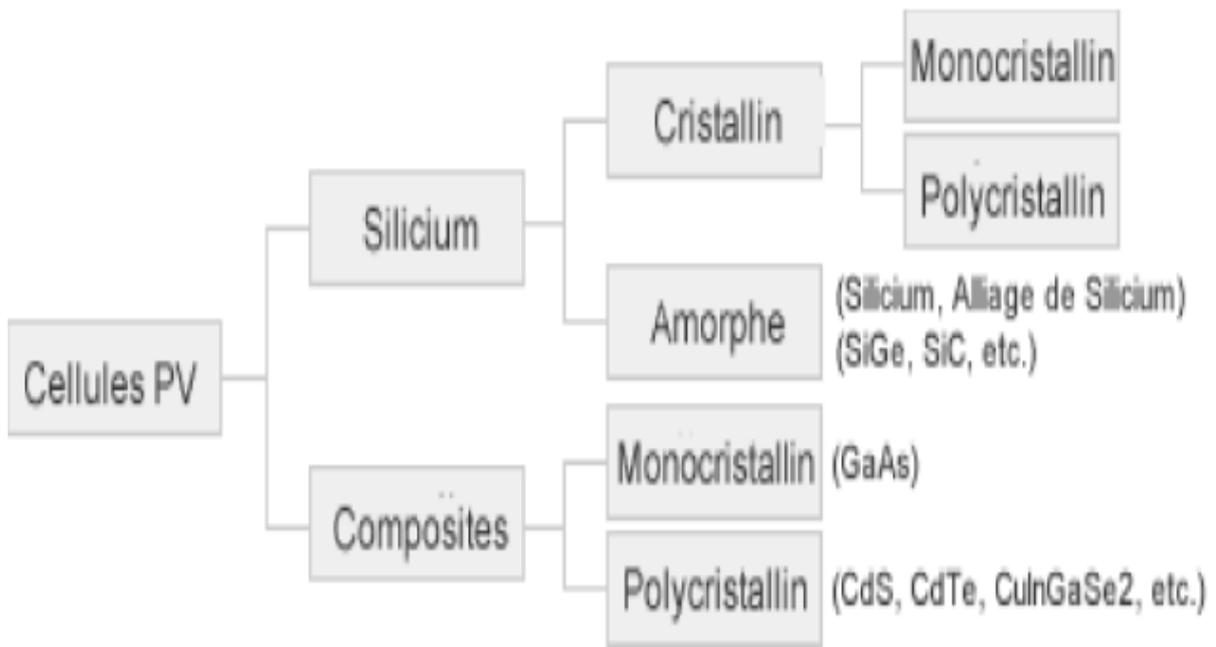


Figure I.15. Technologie des cellules photovoltaïque.

Il existe un grand nombre de technologies qui mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Comme le montre la figure I.8. Beaucoup ne sont pas encore industrialisées et restent encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couches minces à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

Le tableau ci-dessous présenter une comparaison entre différentes technologies.

| Matériau | Rendement | Longévité | caractéristiques | Principales utilisations |
|---|---|-------------|---|---|
| Silicium mono cristallin | 12 à 18% <i>(24,7% en laboratoire)</i> | 20 à 30 ans | * Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse. | Aérospatiale, modules pour toits, façades,... |
| Silicium poly cristallin | 11 à 15% <i>(19,8% en laboratoire)</i> | 20 à 30 ans | * Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial. | Modules pour toits, façades, générateurs... |
| Amorphe | 5 à 8% <i>(13% en laboratoire)</i> | | * 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 délivrée 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% <i>(27.5% en laboratoire)</i> | | * Lourd, fissure facilement | Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites) |
| Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.) | 8% <i>(16% en laboratoire)</i> | | Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes | Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment |

Tableau I.2. Ccomparatif des différentes technologies [6].

I.9. Les systèmes photovoltaïques :

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 220 Volts alternatif. La chaîne de puissance d'un GPV où une charge est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (DC) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiqué sur la figure I.16 :

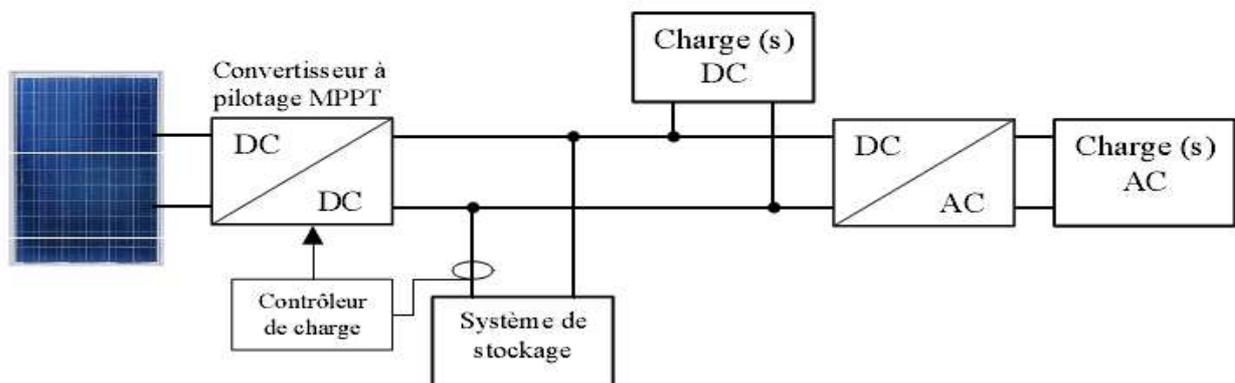


Figure I.16. Installation photovoltaïque autonome

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique de stockage de l'électricité. Pour des raisons de sécurité, l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend le système de production d'origine renouvelable inopérant. Un redresseur est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins.

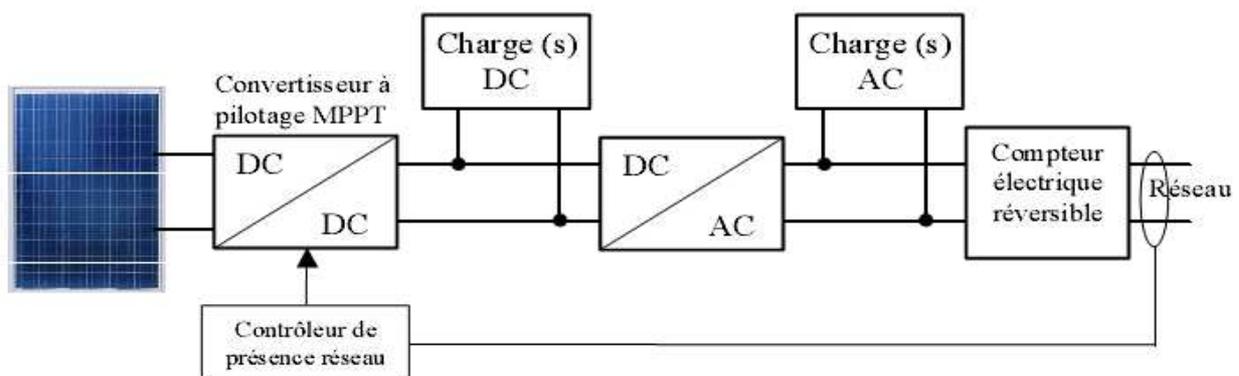


Figure I.17. Installation photovoltaïque couplée au réseau

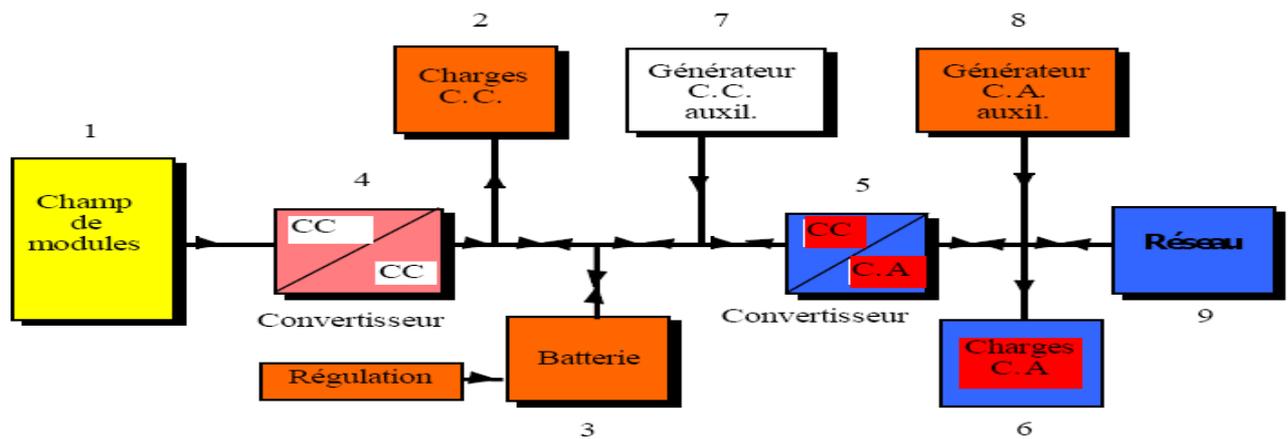


Figure I.18. Schéma synoptique résumant les divers types de systèmes PV

Le générateur photovoltaïque, résultat d'un assemblage série-parallèle de modules, défini par sa puissance et sa tension d'utilisation,

- La partie stockage, constituée de batteries d'accumulateurs, en assemblage série-parallèle dont la tension nominale est appareillée à celle du générateur PV,
- Un régulateur de charge dont la fonction est de protéger les éléments de la partie stockage,
- Un convertisseur DC/DC qui permet de suivre le point de puissance maximal du groupement de modules PV et donc d'adapter à chaque instant l'impédance vue par les modules,
- Un convertisseur DC/AC appelé onduleur qui permet la transformation du courant continu fourni par l'ensemble générateur PV/Stockage en courant alternatif,
- Un générateur auxiliaire dont le rôle est dans la plupart des cas de pallier les insuffisances de l'ensemble générateur PV/Stockage.

Ces systèmes peuvent être de type continu et lorsqu'ils sont activés par le système de gestion de l'énergie (régulateur), ils chargent alors directement les batteries et alimentent les charges. Ils peuvent également prendre la relève de l'alimentation du convertisseur DC/AC si les batteries déchargées ont été déconnectées par la régulation. Ces générateurs peuvent être également installés du côté alternatif où ils alimentent directement les charges en cas de nécessité. Si le convertisseur DC/AC est réversible et peut fonctionner en redresseur il est possible également dans ce cas de recharger les batteries.

- Des charges (DC et/ou AC) qui correspondent aux appareils alimentés par le système. En fonction de l'utilisation envisagée, seuls certains composants constituent le système PV. Les spécifications techniques du système sont alors déterminées lors de la phase de dimensionnement en fonction des deux entrées du système que sont la ressource et la consommation prévisibles.

1.9.1. Le générateur photovoltaïque :

1.9.1.1. Principe :

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

$$P_{pv} = N_s * V_{pv} * N_p * I_{pv} \quad (1.16)$$

Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension (**figure I.19**).



Figure I.19. association des cellule photovoltaïque en série.

si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera figure I.20.

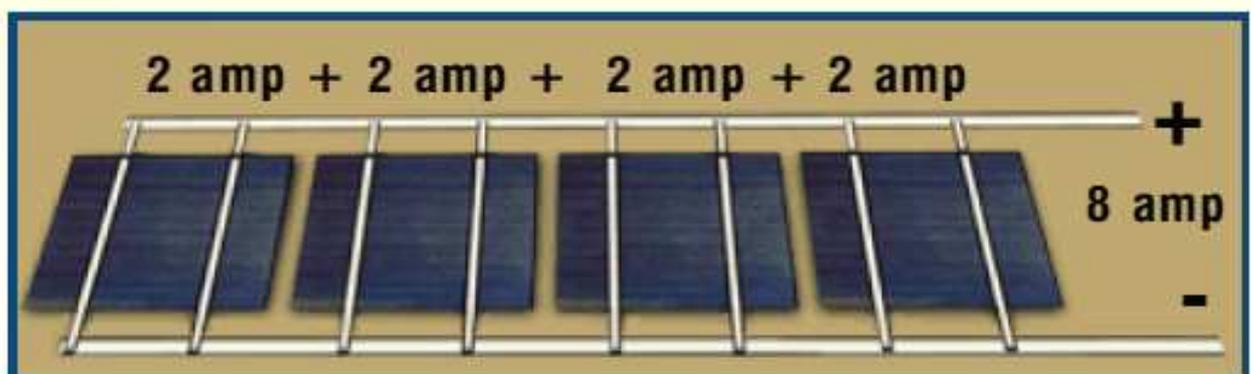


Figure I.20. association des cellule photovoltaïque en série.

1.9.1.2. Le module photovoltaïque :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.



Figure I.21. Processus de production d'un module photovoltaïque.

1.9.1.2.1. Association de modules photovoltaïques :

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

Dans un groupement de ns module en série, tous sont traversés par un même courant.

$V_{sc} = n_s \cdot V_{c0}$; figure I.22.

Pour un groupement de np modules identiques en parallèle **figure I.23** : $I_{pcc} = n_p \cdot I_{cc}$.

a. Association en série :

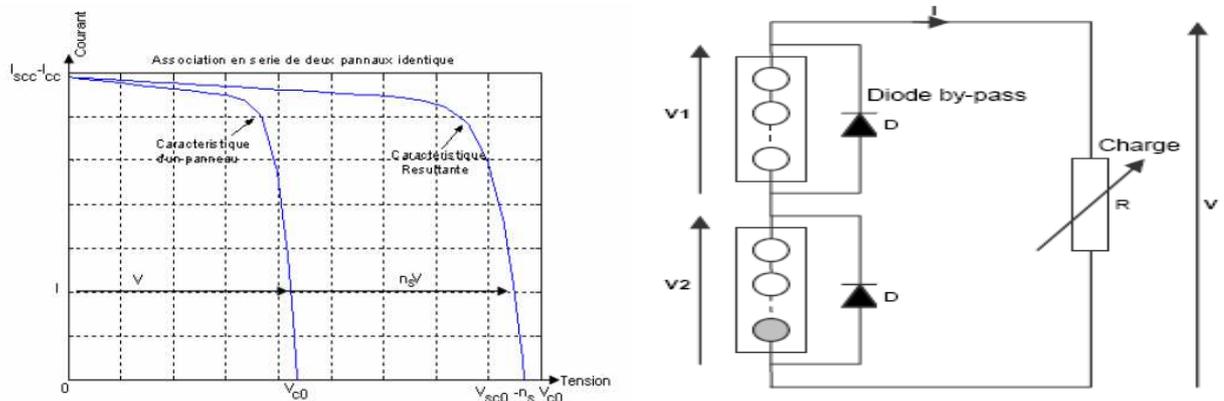


Figure I.22. Module en série avec diode by-pass et leurs caractéristiques.

b. Association en parallèle :

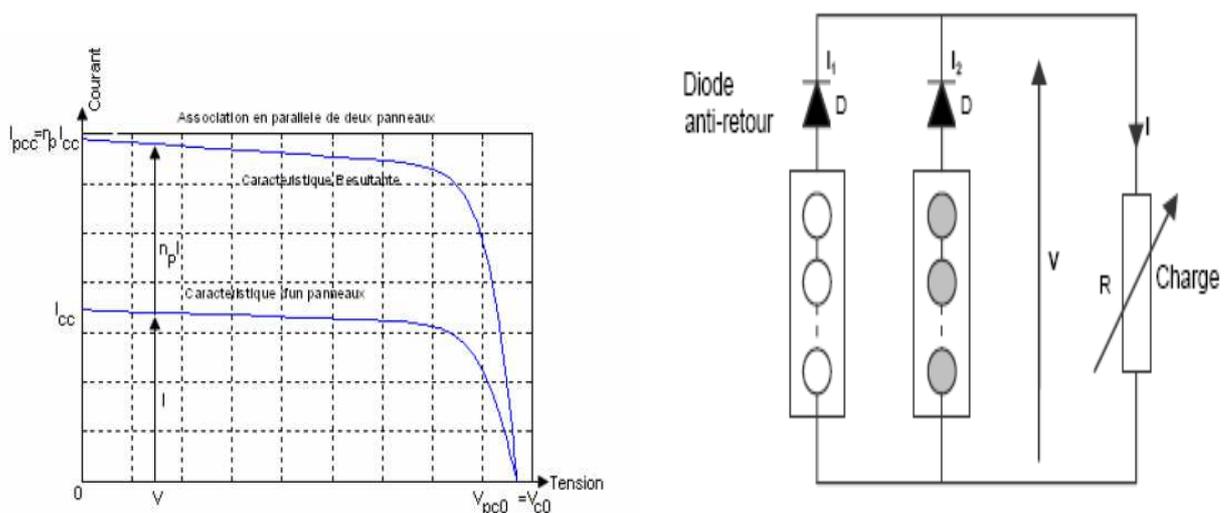


Figure I.23. Module en parallèle avec diode anti-retour et leurs caractéristiques.

I.9.2. système de stockage :

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principales [13].

-Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).

-Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

- *Capacité en Ampère heure* : Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que : [13]

- *Rapports de chargement et déchargement* : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.
- *Température* : Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [13].
- *La durée de vie* : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [13].
- *Profondeur de décharge* : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.
- *La tension d'utilisation* : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

- *Le rendement* : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- *Le taux d'autodécharge* : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

I.9.2.1. Types d'accumulateurs :

a) Les Accumulateurs au plomb acide :

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [14].

b) Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [15] :

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 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 toxique à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas de gel.

I.9.3. Système de régulation de charge /décharge d'une batterie :

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin de maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives.

A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs :

I.9.3.1. Régulation de décharge :

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-régler bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil.

I.9.3.2. Régulation de la 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.

a) Régulation 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.

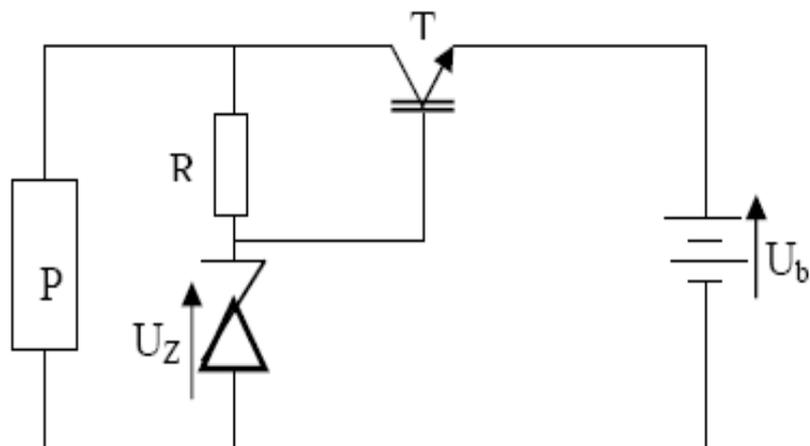


Figure I .24. Schéma de principe d'un régulateur de charge série [16hadj].

b) 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.

c) 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.

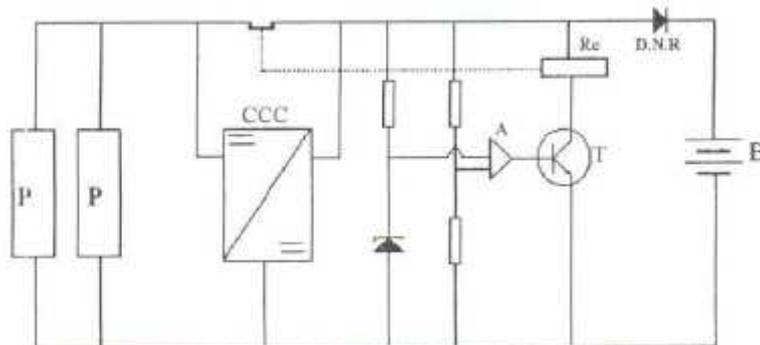


Figure I.25. Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage [16].

d) 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.

e) 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 [16]:

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.

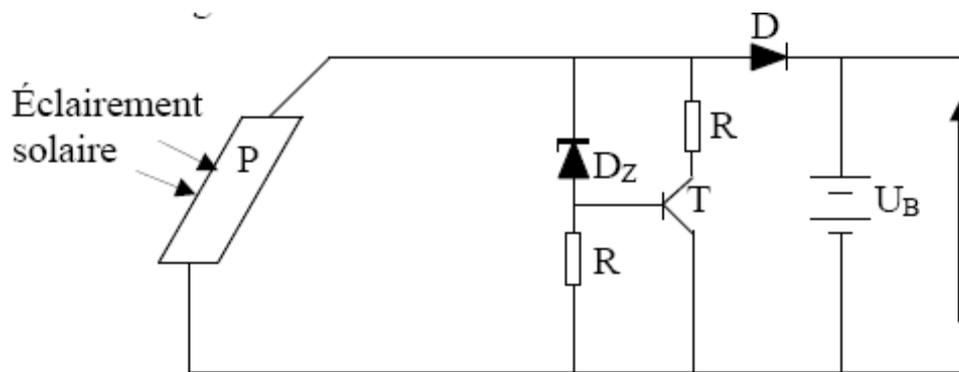


Figure I .26. Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle [16].

Conclusion :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles) qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

Il est important de surveiller l'état de charge ou décharge d'une batterie au plomb pour la conserver en bon état car un fonctionnement prolongé dans un sens ou dans l'autre aboutirait à la destruction définitive de l'accumulateur

II.1 Introduction :

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et du faible rendement des dispositifs de conversion photons-électrons mis en œuvre (entre 12% et 17%), le développement de cette énergie à grande échelle nécessite avant tout une amélioration de ces systèmes de telle sorte qu'ils puissent fonctionner, à tout instant, à leur puissance maximale.

L'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

Pour remédier à cette dernière influence, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit la charge [17]. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature 'Recherche du Point de Puissance Maximale' ou bien 'Maximum Power Point Tracking' en anglo-saxon (MPPT). Le principe de base, comme l'indique son nom, commun à toutes ces commandes est d'effectuer une recherche permanente du point de puissance maximale (PPM). Ainsi, la principale fonction effectuée par ces commandes est d'assurer, à tout instant, une parfaite adaptation entre le générateur PV et sa charge fonctionnant au point de puissance max, le rôle d'interface de puissance étant assuré par un convertisseur statique.

Dans ce chapitre nous présenterons un état de l'art sur les différentes lois de commandes MPPT possibles pouvant s'adapter à ce type de conversion d'énergie.

Aussi nous allons essayer d'illustrer quelques détails sur les circuits des convertisseurs DC/DC et leurs modèles mathématiques.

Dans ce chapitre aussi, nous rappelons rapidement le fonctionnement d'un générateur PV connecté à une charge et comment à travers une commande adéquate, nous pouvons améliorer son fonctionnement.

II.2. Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale :

II.2.1. Principe :

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Chaque charge, que ce soit en continu (DC) (batteries, certains appareils électroménagers destinés à des réseaux continus isolés) ou bien en alternatif (AC) (réseau électrique Algérien 220 V/50 Hz, certains moteurs), possède un comportement propre.

De plus, souvent, la charge varie brutalement en fonction de la consommation des utilisateurs, ce qui est souvent difficile à prévoir surtout sur des petits réseaux locaux.

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge purement résistive R_i d'une part et d'autre part entre un générateur PV et une batterie d'une résistance interne R_i . Nous regardons l'influence de la nature de la charge, comme illustré dans la figure II.1 et figure II.2.

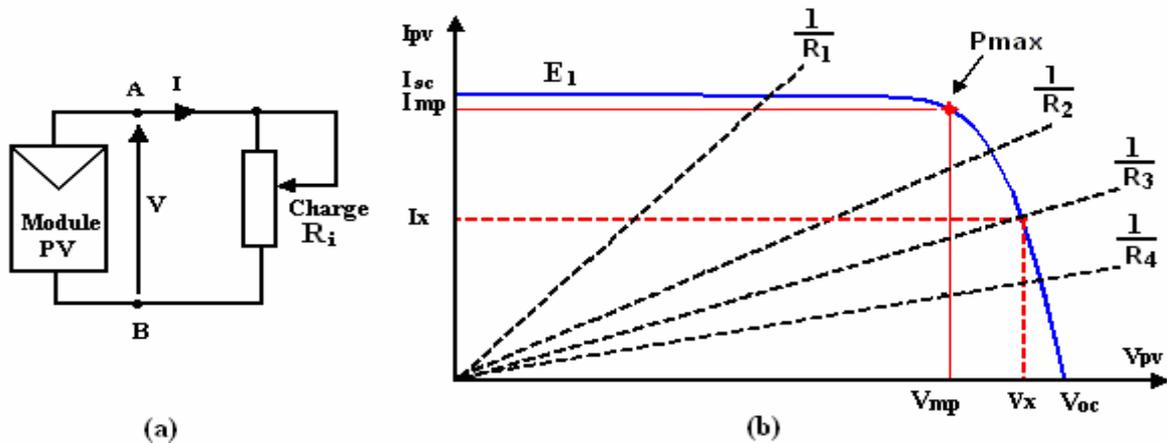


Figure II.1. (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge.
 (b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous un niveau d'éclairement E_1 avec une charge résistive variable (R_1, R_2, R_3, R_4)

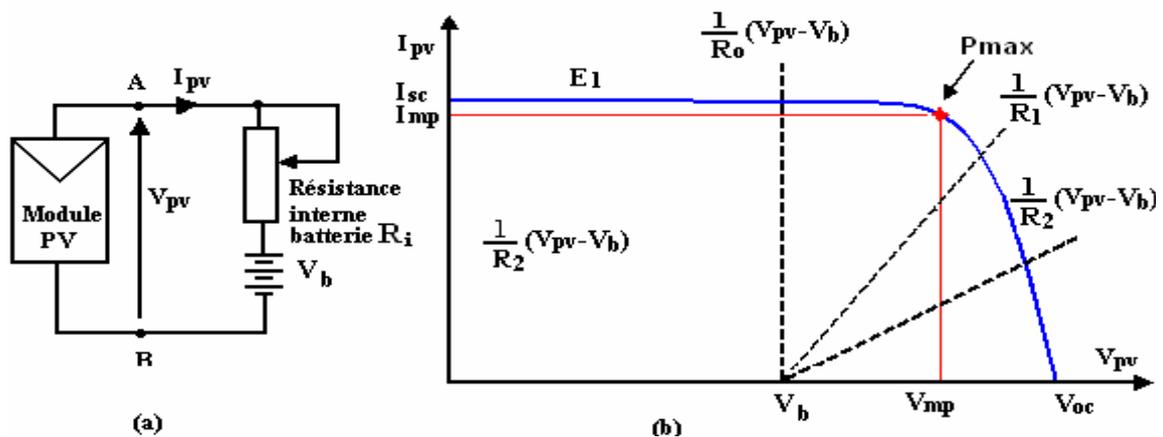


Figure II.2. (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une batterie.
 (b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous un niveau d'éclairement E_1 avec une batterie comme charge ayant ou par une résistance interne R_i Variable (R_1, R_2)

Comme nous pouvons le constater sur la figure II.1(b) et la figure II.2(b), le fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé. En effet, pour la charge résistive ou pour l'accumulateur de résistance interne R_i sont données pour différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (PPM) et noté dans notre cas P_{max} . Ces formes correspondent à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée. Pour la charge de type batterie, le point de connexion source-charge n'est pas optimal. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe source-charge, le rendement de l'ensemble est rarement optimal.

Dans le cas d'une connexion directe entre une batterie et un générateur PV, le rendement du système dépend de l'écart entre la tension optimale du générateur PV (V_{op}) et la tension de batterie (V_b) qui varie en fonction de son état de charge. Ainsi pour une batterie au plomb de tension nominale de 12V et un générateur PV constitué par exemple d'un module BP585 [18] de tension optimale $V_{OP}=16,7$ et de courant optimal $I_{op}= 4,7A$:

- Avec la tension de la batterie en début de charge égale à 12 V et le courant de charge I_b égal à 5A, le point de fonctionnement sera égal au courant de court circuit du générateur PV,

$I_{CC}=5A$, Le rendement de l'ensemble sera :

$$\eta = \frac{V_b \times I_b}{V_{op} \times I_{op}} = \frac{12 \times 5}{16.7 \times 4.7} = 76.4\%$$

- Si l'état de charge de la batterie est telle que sa tension vaut 14 V, le rendement atteint alors :

$$\eta = \frac{14 \times 4.9}{16.7 \times 4.7} = 87.4\%$$

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée P_{max} qui correspond à :

$$\eta = \frac{14 \times 4.9}{16.7 \times 4.7} = 87.4\%$$

Où V_{OP} et I_{OP} représentent respectivement les tensions et courants optimaux du générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée.

II.2.2. Interface de puissance

Considérons l'exemple de la figure II.3, correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost).

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque la charge à besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV, comme elle le montre la figure II.3.

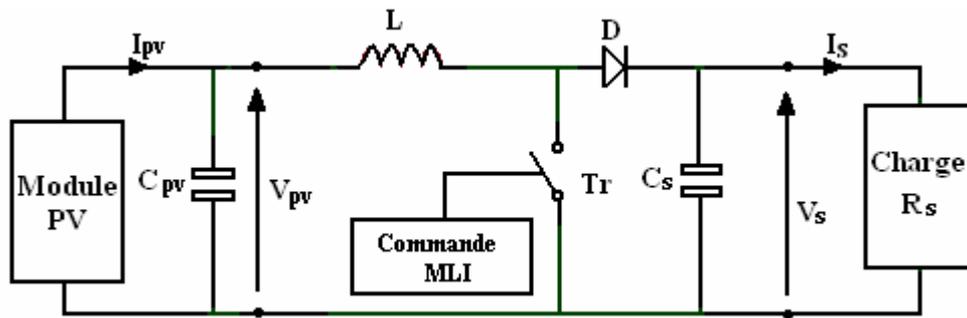


Figure II.3. Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.

L'adaptation entre la source et la charge est réalisée par la variation du rapport cyclique d . En effet, si nous supposons que le boost fonctionne en conduction continue et si nous considérons que le rendement de ce dernier avoisine les 100%, alors les relations électriques entre les grandeurs d'entrée du convertisseur (correspondant à I_{PV} et V_{PV} du générateur PV) et de sortie du convertisseur (respectivement I_S et V_S) ne dépendent que du rapport cyclique d . L'adaptation optimale est alors réalisée lorsque I_{PV} et V_{PV} valent respectivement I_{OP} et V_{OP} . Ceci correspond alors à une résistance optimale R_{OP} du générateur répondant à l'équation suivante :

$$R_{op} = \frac{V_{op}}{I_{op}} = (1-d)^2 \times \frac{V_s}{I_s} = (1-d)^2 \times R_s \quad (II.1)$$

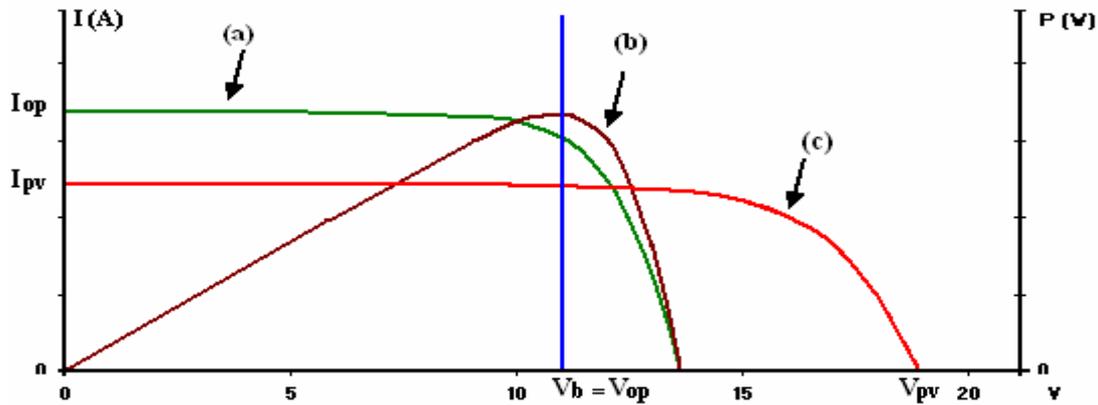


Figure II.4. Utilisation d'un MPPT sur un convertisseur, (a) Caractéristique $I(V)$ à la sortie du convertisseur. (b) Caractéristique $P(V)$ à la sortie du convertisseur. (c) Caractéristique $I(V)$ à la sortie du module solaire.

L'utilisation d'un convertisseur entre la source et la charge (batterie) permet une translation de la caractéristique de puissance $P(V)$ sur l'axe des tensions au fur et à mesure que la batterie se charge ou se décharge de telle sorte que le sommet de la caractéristique de puissance P_{\max} restera toujours autour de la tension de la batterie V_b . Cela s'effectue par un réarrangement de la caractéristique $I(V)$ à la sortie du convertisseur comme le montre la Figure II.4.

Cette adaptation source/charge qui se fait en intercalant un convertisseur peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique d pour que d'un côté, le générateur puisse fonctionner à la valeur optimale de la charge R_{OP} et d'un autre côté, que la charge puisse varier « *à sa guise* » dans la mesure où le point d'intersection *source-charge* continue d'exister.

Il est alors à remarquer qu'une seule grandeur électrique aux bornes de la charge (courant ou tension) pourra être régulée. Cela impose donc une hypothèse de fonctionnement de la charge qui doit, soit accepter un courant quelconque lorsqu'elle impose la tension à la sortie du convertisseur statique, soit de grandes variations de tensions.

Pour que l'adaptation se fasse automatiquement à tout instant, un certain nombre de lois de commande ont été élaborées. Toutes ont pour objectif d'effectuer une recherche automatisée du PPM du système, en se basant sur la nature *convexe* des courbes de puissance du générateur PV ou, plus généralement, d'une source non-linéaire.

II.3. les convertisseurs DC/DC :

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le

rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque).

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_S > V_e$.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_S < V_e$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents : c'est le « FLYBACK » traduction : volant sur le dos, car V_S est inversée par rapport à V_e .

II.3.1. Hacheur dévolteur « Buck Converter » :

La figure II.5 présente le convertisseur buck ou convertisseur dévolteur (abaisseur de tension) ou hacheur série. Son rôle principal est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

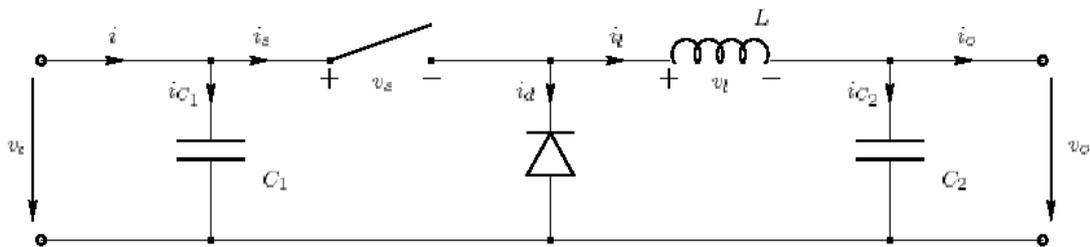


Figure II.5: Circuit idéal de convertisseur Buck.

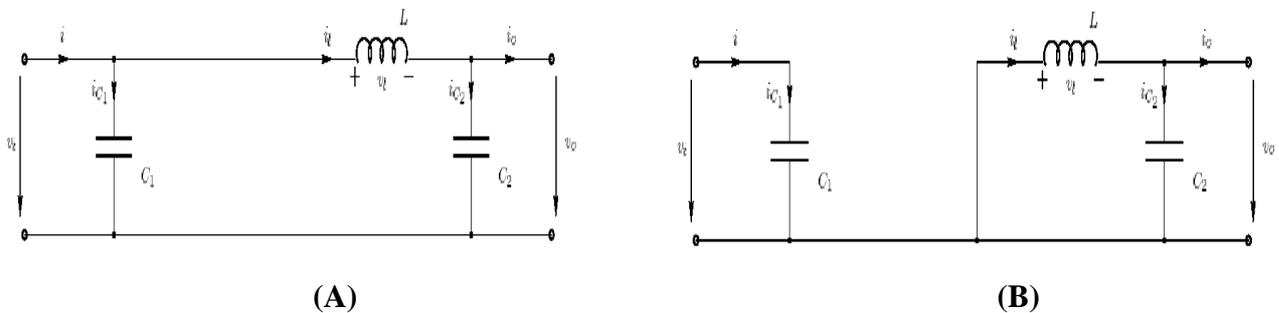


Figure II.6: circuit équivalent d'un convertisseur Buck ; (A) : $t \in [0, d.T_s]$; commutateur fermé, (B) : $t \in [dT_s, T_s]$; commutateur ouvert.

Quand le commutateur est fermé figure I.5 (c.à.d. $t \in [0, d.T_s]$), la diode se bloque et un courant circulera dans la charge à travers l'inductance. Dès que le commutateur sera ouvert ($t \in [dT_s, T_s]$), la source et la charge ne sont plus en contact durant cette phase. La diode sera saturée et l'inductance maintiendra le courant dans la charge. Figure II.5.

II.3.1.1. Modèle mathématique du circuit équivalent :

Pour étudier le convertisseur dévolteur, on l'analyse pour les deux états du commutateur (ouvert et fermé).

1- Quand le commutateur est fermé figure II.6(A) (c.à.d. $t \in [0, dT_s]$), on a les équations suivantes :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), \quad (\text{II.2})$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t), \quad (\text{II.3})$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t). \quad (\text{II.4})$$

2- Quand le commutateur est ouvert ($t \in [dT_s, T_s]$), figure II.6(A). On a les équations suivantes :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t), \quad (\text{II.5})$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t), \quad (\text{II.6})$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = -v_0(t). \quad (\text{II.7})$$

II.3.1.2. Approximation des Petites ondulations

Les variables dans les équations (II.2) à (II.7) ont une composante constante et des harmoniques. La valeur de la composante constante est pratiquement égale à la valeur moyenne de la variable.

Par conséquent l'ondulation peut être négligée et le signal peut être rapproché à sa composante constante.

Cette approximation s'appelle *l'approximation des petites ondulations* ou l'approximation ondulation linéaire, elle facilite beaucoup l'analyse mathématique des hacheurs.

Les équations (I.18) à (I.23) pour dT_s deviennent comme suit :

$$i_{c1} = I - I_l \quad (\text{II.8})$$

$$i_{c2} = I_l - I_0 \quad (\text{II.9})$$

$$V_l = V_i - V_0 \quad (\text{II.10})$$

Et similairement pour $d'T$

$$i_{c1} = I \quad (\text{II.11})$$

$$i_{c2} = I_l - I_0 \quad (\text{II.12})$$

$$v_l = -V_0 \quad (\text{II.13})$$

II.3.1.3. Etude de régime continu:

Les valeurs de la composante constante de la tension d'inductance et du courant de condensateur sont définies comme la moyenne de leur signal original.

$$V_l = \langle v_l \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_l(t) dt, \quad (\text{II.14})$$

$$I_c = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \quad (\text{II.15})$$

Utilisant la relation $v_l = L \frac{di_l}{dt}$ et $i_c = C \frac{dv_c}{dt}$ obtient :

$$i_l(T_s) - i_l(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_l(t) dt, \quad (\text{II.16})$$

$$v_c(T_s) - v_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \quad (\text{II.17})$$

Quand l'état d'équilibre est atteint, les valeurs initiales et finales pendant une période de changement doivent être égales:

$$i_l(t + T_s) = i_l(t), \quad (\text{II.18})$$

$$v_c(t + T_s) = v_c(t) \quad (\text{II.19})$$

Il est maintenant possible de récrire les équations (II.18) et (II.19) comme suit:

$$0 = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_l(t) dt, \quad (\text{II.20})$$

$$0 = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c(t) dt. \quad (\text{II.21})$$

En comparant les équations (II.20) et (II.321), pour les valeurs moyennes de v_l et i_c dans (II.16) et (II.17) il est évident que les valeurs de la composante constante pour la tension d'inductance et le courant de condensateur doivent être nulle.

$$V_l = \langle v_l \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_l(t) dt \quad (\text{II.22})$$

$$I_c = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \quad (\text{II.23})$$

II.3.1.4. Le rapport de conversion :

Les équations (II.12) et (II.13) qui explicitent la tension aux bornes de l'inductance dans les deux périodes, fermeture et ouverture du commutateur, donnent la figure I.17.

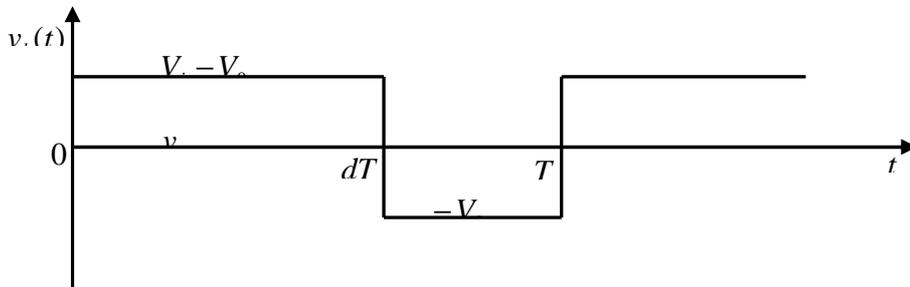


Figure II.7: Forme d'onde de tension d'inductance $v_i(t)$ pour un hacheur dévolteur.

L'expression de la tension moyenne d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde sur la figure I.17, la tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$v_i(t) = d(V_i - V_o) + d'(-V_o) = 0 \quad (\text{II.24})$$

En utilisant les équations (I.24) (I.25) et (I.26) (I.27) et en appliquant le principe de l'équilibre des charges capacitives on obtient les expressions pour les courants moyens de condensateur.

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'I = 0, \quad (\text{II.25})$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'(I_l - I_o) = 0. \quad (\text{II.26})$$

L'avantage de la combinaison de (I.40) et (I.42) avec (I.17) mène à trois équations simples qui décrivent les caractéristiques du courant continu à l'état d'équilibre d'un hacheur dévolteur.

$$dV_i = V_o \quad (\text{II.27})$$

$$I = dI_l \quad (\text{II.28})$$

$$I_l = I_o \quad (\text{II.29})$$

A partir de l'équation (II.27), le rapport de conversion de hacheur dévolteur est donné sur la forme suivant :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = d. \quad (\text{II.30})$$

La figure (II.8) illustre cette relation linéaire.

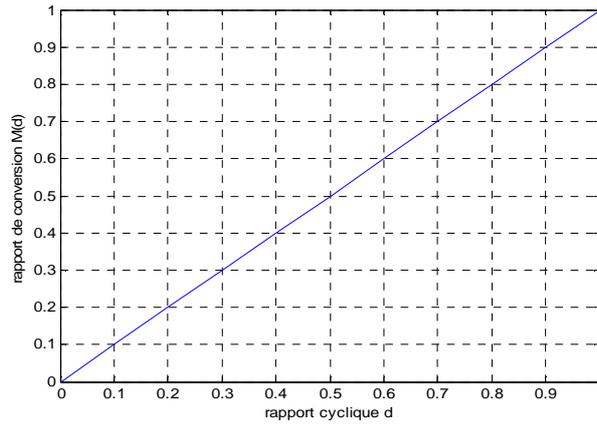


Figure II.8: rapport de conversion M en fonction du rapport cyclique d pour un convertisseur dévolteur.

C'est l'équation (II.27) qui montre bien que le convertisseur buck est un abaisseur de tension, car la tension de sortie du convertisseur égale à la tension d'entrée multipliée par un coefficient qui varie dans l'intervalle $[0,1]$.

II.3.2. Le hacheur survolteur « Boost converter »

Le convertisseur Boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, le schéma de la figure II.9 représente le circuit électrique du Boost. En premier temps dT_s (figure II.10), le Transistor S est fermer, le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et a mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la premier période, le transistor S s'ouvre et l'inductance L se suppose à la diminution de courant I_L , ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z a travers la diode D [7].

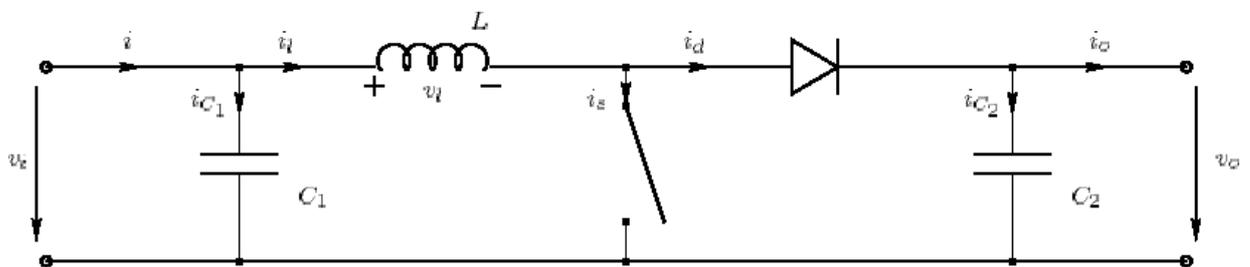


Figure II.9. Circuit idéal du hacheur survolteur

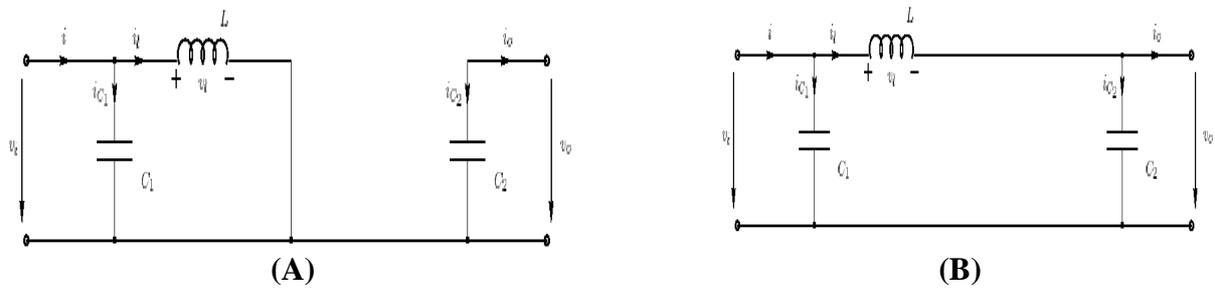


Figure II.10. Circuit équivalent d'un hacheur survolteur (A) : $t \in [0, dT_s]$; commutateur fermé, (B) : $t \in [dT_s, T_s]$; commutateur ouvert.

II.3.2.1. Modèle mathématique du circuit équivalent :

La figure II.10 représente le modèle équivalent de l'hacheur survolteur.

1- Quand le commutateur est fermé (figure II.10(A)) (c.à.d. $t \in [0, dT_s]$), on a les équations suivantes :

$$\begin{aligned} i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), \\ i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t), \\ v_l(t) &= L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t). \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

2- Quand le commutateur est ouvert ($t \in [dT_s, T_s]$), (Figure II.10(B)). On a les équations suivantes :

$$\begin{aligned} i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), \\ i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t), \\ v_l(t) &= L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t). \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

II.3.2.2. Le rapport de conversion :

L'approximation d'ondulation permet de négliger l'ondulation de commutation dans les signaux du convertisseur et de remplacer la valeur de ces signaux par leurs valeurs moyennes. Ceci simplifie les équations (II.31) à :

$$\begin{aligned} i_{C1} &= I - I_l \\ i_{C2} &= -I_0, \\ v_l &= V_i. \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

$$\begin{aligned}
 i_{C1} &= I - I_l \\
 i_{C2} &= I_l - I_0, \\
 v_l &= V_i - V_0.
 \end{aligned}
 \tag{II.34}$$

Pour trouver les valeurs moyennes de i_{C1} , i_{C2} et V_i pendant toute la durée T_s les équations (II.33) et (II.34) sont substituées en (II.35):

$$x(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(\tau) d\tau = \frac{1}{T_s} \left[\int_t^{t+\alpha T_s} x|_{[0, \alpha T_s]}(\tau) d\tau + \int_{t+\alpha T_s}^{t+T_s} x|_{[\alpha T_s, T_s]}(\tau) d\tau \right].
 \tag{II.35}$$

En régime permanent :

$$\begin{aligned}
 \langle i_{C1}(t) \rangle &= d(I - I_l) + d'(I - I_l) = 0, \\
 \langle i_{C2}(t) \rangle &= d(-I_0) + d'(I_l - I_0) = 0, \\
 \langle v_l(t) \rangle &= dV_i + d'(V_i - V_0) = 0.
 \end{aligned}
 \tag{II.36}$$

Avec $d = 1 - d'$ on peut simplifier les équations à :

$$I = I_l
 \tag{II.37}$$

$$I_0 = d' I_l,
 \tag{II.38}$$

$$V_i = d' V_0.
 \tag{II.39}$$

Le rapport de conversion $M(d)$ est donc écrit sous la forme suivante :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{d'} = \frac{1}{1-d}.
 \tag{II.40}$$

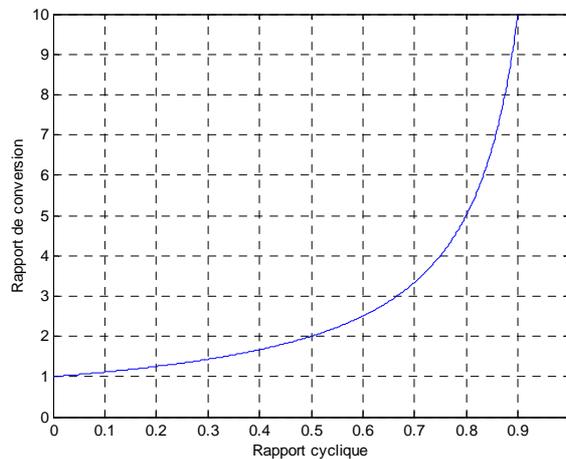


Figure II.11. Le rapport de conversion M en fonction de d

C'est l'équation (II.39) qui montre bien que le convertisseur boost est un éleveur de tension.

II.3.3. Convertisseur dévolteur-survolteur « Buck-Boost convertier »

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

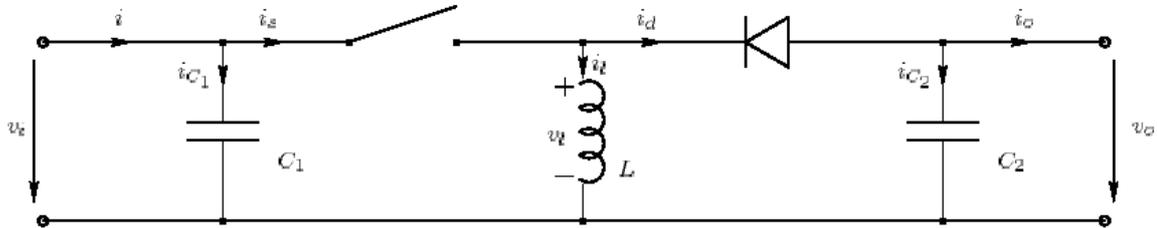


Figure II.12. Circuit idéal du hacheur dévolteur-survolteur.

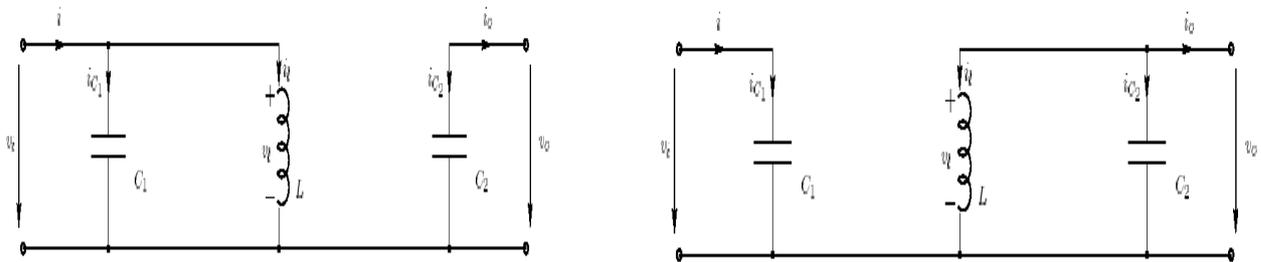


Figure II.13. Circuit équivalent d'un hacheur dévolteur-survolteur(A) : $t \in [0, dT_s]$; commutateur fermé, (B) : $t \in [dT_s, T_s]$; commutateur ouvert :

II.3.3.1. Modèle mathématique équivalent de convertisseur dévolteur-survolteur :

La figure II.12 montre le schéma de circuit équivalent idéal de convertisseur dévolteur-survolteur. Quand le commutateur est fermé pendant l'intervalle dT_s de la période T_s de commutation. Le courant commence à circuler de la source d'entrée jusqu'à la masse à travers l'inductance (figure II.13). Après que le commutateur s'ouvre au début de l'intervalle dT , Le courant est maintenu grâce à la nature de l'inductance, mais cette fois il circule à travers la diode et la charge. Puisque le courant est forcé à traverser la charge, la tension de sortie V_o de convertisseur dévolteur-survolteur est négative. La variation du rapport cyclique d changera le rapport de conversion entre l'entrée et la sortie de tension V_o/V_i .

1- Application de loi de Kirchhoff sur la première période on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t), \\
 v_l(t) &= L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t).
 \end{aligned}
 \tag{II.41}$$

2- Dans la deuxième période $d'T$ à partir de la figure I.25 on exprime les équations :

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t), \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t), \\
 v_l(t) &= L \frac{di_l(t)}{dt} = v_0(t).
 \end{aligned}
 \tag{II.42}$$

II.3.3.2. Le rapport de conversion :

L'approximation de l'existence de petites d'ondulations permet de remplacer les variables dépendantes du temps dans (II.41) et (II.42) par leurs valeurs moyennes. Ceci donne pour dT

$$\begin{aligned}
 i_{C1} &= I - I_l \\
 i_{C2} &= -I_0 \\
 v_l &= V_i
 \end{aligned}
 \tag{II.43}$$

Et pour $d'T$:

$$\begin{aligned}
 i_{C1} &= I, \\
 i_{C2} &= -I_l - I_0 \\
 v_l &= V_0
 \end{aligned}
 \tag{II.44}$$

En régime permanent :

$$\begin{aligned}
 \langle i_{C1}(t) \rangle &= d(I - I_l) + d'I = 0, \\
 \langle i_{C2}(t) \rangle &= d(-I_0) + d'(-I_l - I_0) = 0, \\
 \langle v_l(t) \rangle &= dV_i + d'V_0 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{II.45}$$

Le modèle ramené à une moyenne équilibrée pour un convertisseur dévolteur-survolteur idéal, maintenant peut être dérivé en multipliant hors des équations (II.45). Ceci avec $d = 1 - d'$.

Donc on peut exprimer le rapport de conversion à partir de l'équation (II.45) :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{d}{d'} = \frac{d}{1-d}.
 \tag{II.46}$$

La figure I.26 illustre le rapport conversion du convertisseur dévolteur-survolteur.

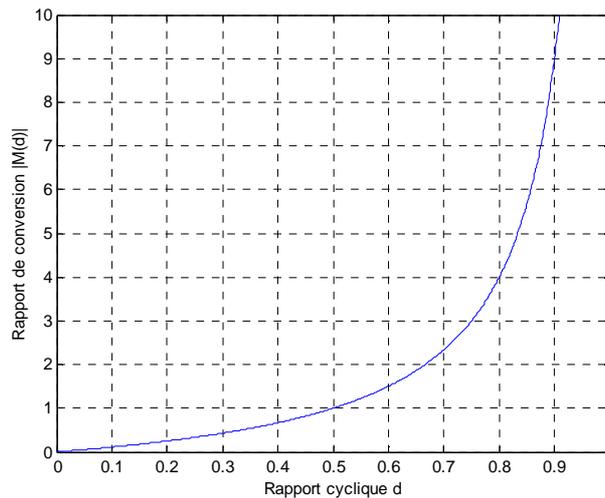


Figure II.14. Le rapport de conversion M en fonction de d .

II.4. Méthodes de poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT) :

II.4.1. Méthodes avec contre réaction de tension [19] [20] [21] :

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure II.15. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

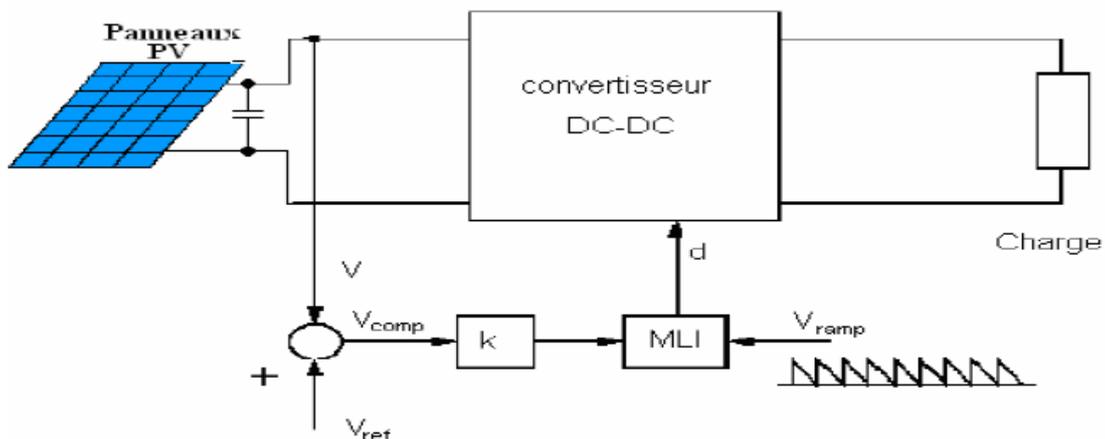


Figure II.15. Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation [19]

II.4.1.1. Méthode à tension de référence fixe :

C'est la méthode basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique d du convertisseur DC-DC. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (figure II.16), relevées par des tests sous différentes conditions

d'insolation et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'insolation et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année.

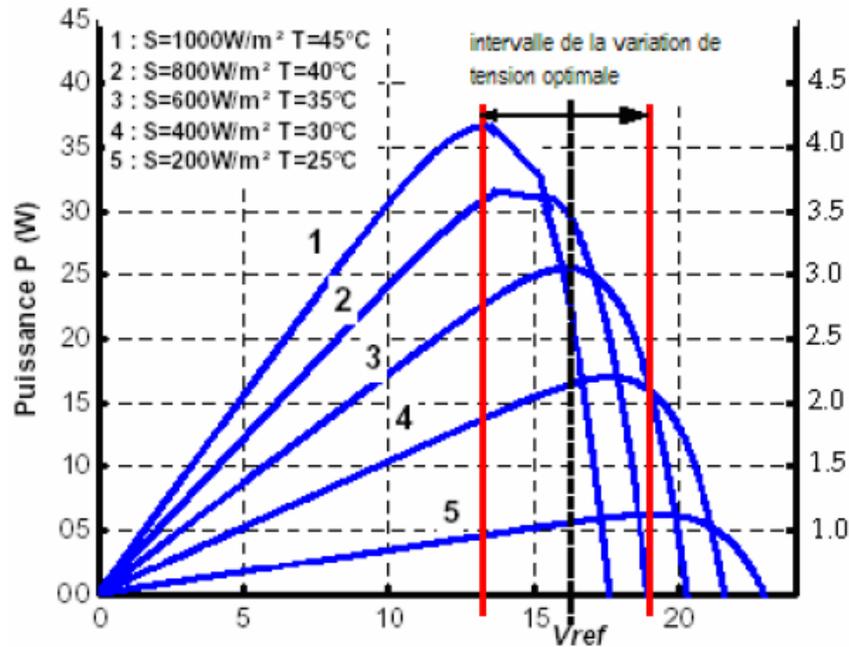


Figure II.16. Intervalles de variation de la tension de fonctionnement optimale pour des ensoleillements et des températures variables [21].

II.4.1.2. Méthode MPPT avec mesure de V_{oc} du panneau [19] [20] [21] :

La tension à vide du panneau V_{oc} est mesurée en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, stockant la valeur mesurée, et puis ajustant la tension de référence V_{ref} sur une certaine fraction de la tension du circuit ouvert qui a été expérimentalement déterminée pour être 76% de V_{oc} . Cette tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau V et le signal d'erreur résultant V_{comp} est employé comme entrée dans la commande MLI du convertisseur DC-DC.

Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération de facteurs importants comme l'insolation et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en compte. L'interruption du fonctionnement du système avec une certaine fréquence engendre des pertes qui sont estimées à 0,05% de la puissance maximale disponible. On estime que des pertes provoquées par l'inexactitude de localisation du point de puissance maximal (MPP) réel sont autour 0,5%. L'interruption fréquente du système provoque une augmentation du bruit électrique.

II.4.1.3. Méthode MPPT avec cellule pilote :

Pour éviter les inconvénients liés à l'interruption fréquente de l'exploitation du système, on propose l'utilisation d'une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée photovoltaïque. Sa tension V_{oc} est constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions de fonctionnement courantes du panneau. V_{oc} de la cellule pilote est multipliée par un certain facteur constant pour être comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction.

Puisque cette méthode emploie toujours un facteur fixe pour estimer la tension optimale V_{mp} d'une valeur mesurée de V_{oc} , le point de puissance maximal n'est toujours pas vraiment obtenue. Cette technique est fondée sur la connaissance des caractéristiques de la rangée photovoltaïque pour estimer le lieu du point de puissance maximale.

II.4.2. Méthode avec contre réaction du courant [19], [20], [21] :

Dans toutes les méthodes MPPT présentées jusqu'ici, une mesure de I et V a été employée pour obtenir des informations sur la puissance actuelle de sortie du panneau. Basé sur cette information le mécanisme MPPT ajuste la tension V de sortie de panneau pour déplacer le point de fonctionnement des piles solaires plus près de leur MPP.

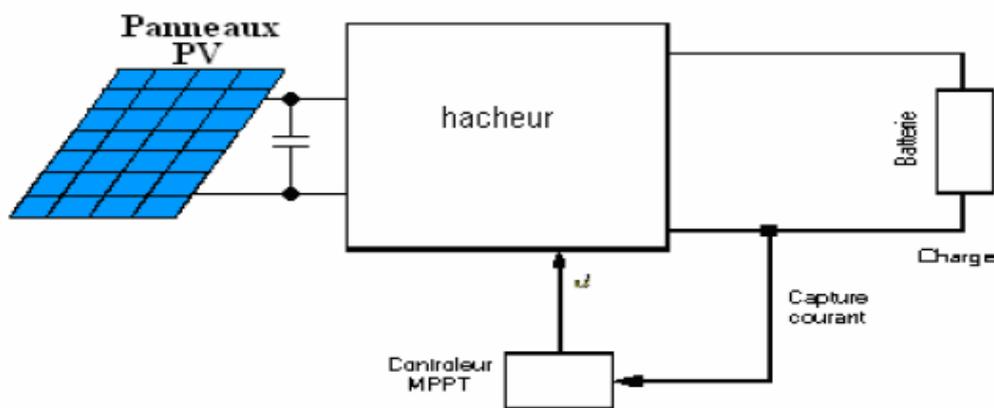


Figure II.17. Méthode de la contre réaction en courant

II.4.3. Méthodes avec contre réaction de puissance [19] [20] [21] :

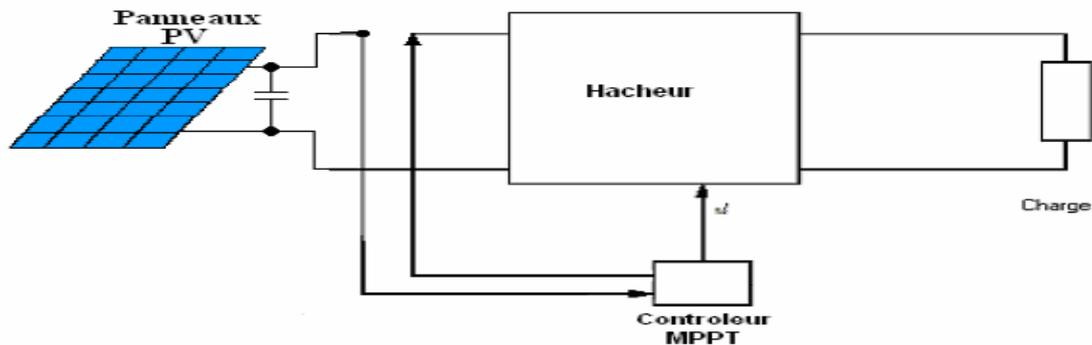


Figure II.18. Schéma de la méthode à contre réaction de puissance.

Le but de cette méthode est aussi d'augmenter la puissance de sortie du panneau PV. Certaines applications demandent de maximiser la puissance à la charge, mais selon les travaux de Sullivan et Power [22] il apparaît que maximiser la puissance au niveau de la charge (ex. moteur à courant continu) revient parfois à maximiser aussi la puissance absorbée dans son enroulement, sans avoir une maximisation de puissance mécanique à la sortie.

Donc pour ne pas acheminer l'architecture de la commande MPPT de la présente méthode dans le contexte de l'exigence en puissance d'une charge, il est préférable de concevoir une architecture générale capable de poursuivre la maximisation de la puissance électrique juste à la sortie du panneau solaire.

Son principe de base est donc bâti autour de la mesure des deux composantes principales, le courant I_{PV} et la tension V_{PV} de sortie du panneau. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composantes $P_{PV} = I_{PV} V_{PV}$ par un algorithme de recherche itératif qui se charge de trouver et de corriger en temps réel la position du PPM, donc la puissance maximale, en effectuant la recherche dans un sens. L'algorithme maintient ce sens si la puissance de sortie augmente constamment et dans le cas contraire il change le sens de recherche, étant donné que l'opération toute entière est numérisée. On peut dire que le PPM à une certaine précision n'est jamais atteint, ce qui est dû d'une part aux valeurs arrondies par la carte d'acquisitions, des grandeurs mesurées à la sortie du panneau PV, et d'autre part, au calcul de la dérivée $dP \approx \Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$ qui est toujours approchée avec une certaine précision.

II.4.3.1. Algorithme ‘perturbation et observation’ P&O

C’est l’algorithme de poursuite du 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 V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l’observation de l’effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure IV.6 montre l’organigramme de l’algorithme de P&O tel qu’il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

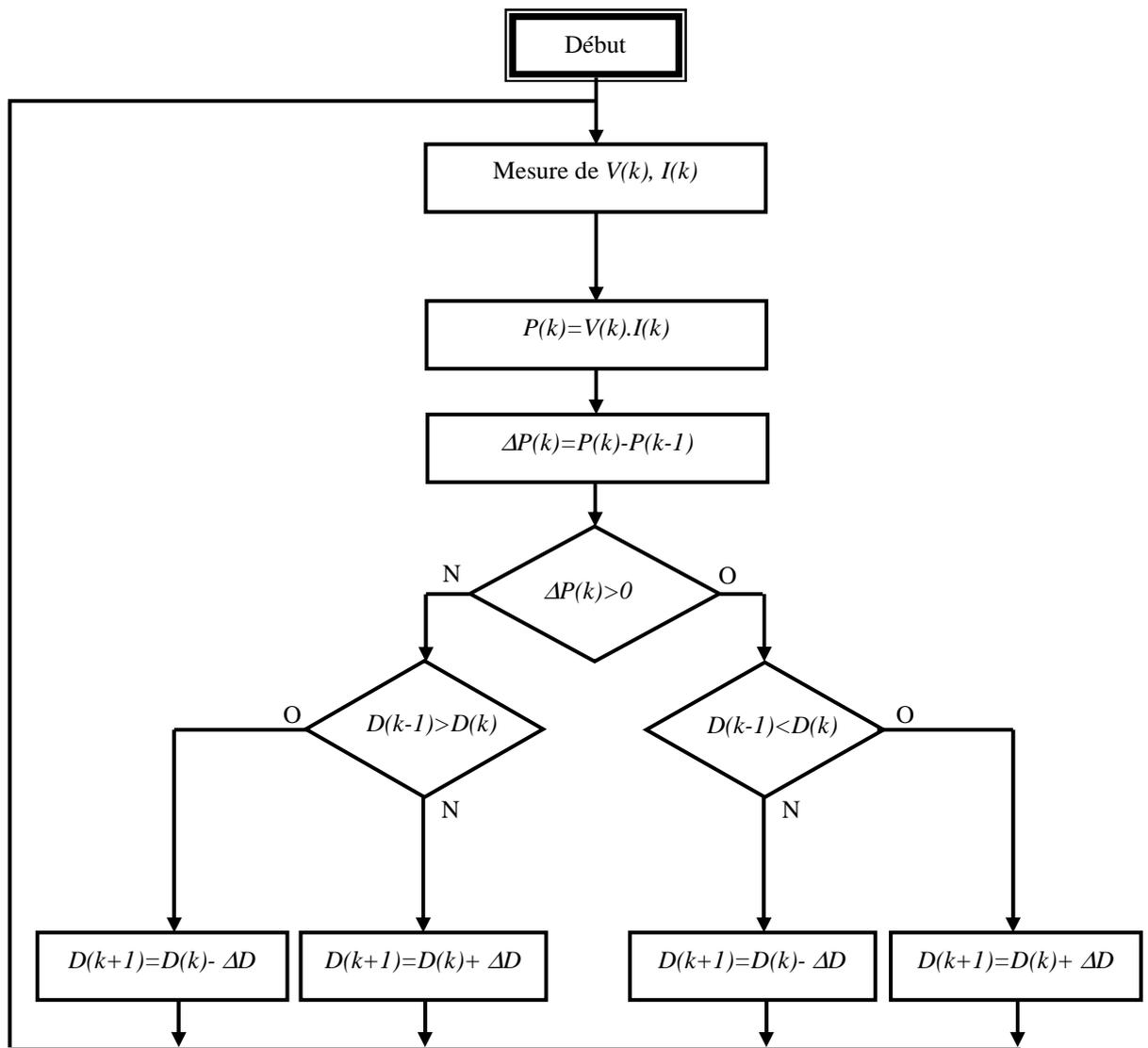


Figure II.19. Organigramme de l’algorithme perturbation et observation (P&O).

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpage qui ne sont rien d'autre que des convertisseurs continus/continus.

Ces convertisseurs utilisent comme un bloc d'adaptation entre le générateur photovoltaïque qui présente la source de l'énergie et la charge. Nous avons présenté aussi les différentes méthodes de la poursuite du point de puissance maximum (MPPT) rencontrées dans la littérature.

III.1. Introduction :

La transformation du courant photovoltaïque, de nature essentiellement continue, en courant alternatif usuel 230 V / 50 Hz est effectuée par des appareils électroniques appelés convertisseurs statiques, ou onduleurs.

Les exigences d'entrée et de sortie, requises pour les installations autonomes et pour le couplage au réseau, sont extrêmement différentes, et les appareils correspondants forment deux classes bien distinctes de produits.

- Onduleurs pour installations autonomes :

Dans les installations autonomes familiales, la plupart des appareils fonctionnent directement sur le circuit continu de la batterie (12, 24 ou 48 V). L'usage d'un onduleur occasionne des pertes importantes, et devrait être réservé aux appareils non disponibles sur le marché en version courant continu, ou à l'emploi occasionnel d'appareils standard.

La gamme de puissance des onduleurs domestiques va de 100 à 2000 W. Ils fonctionnent avec une tension d'entrée fixe, et une puissance de sortie variable selon la charge. La forme du signal alternatif peut être carrée, trapézoïdale ou sinusoïdale. Pour une utilisation prolongée, la consommation à vide est un facteur déterminant. Ces appareils seront décrits en détail dans ce sur les installations autonomes.

- Onduleurs pour le réseau :

Les onduleurs pour la connexion au réseau ont une puissance nominale d'environ 100 W à plusieurs centaines de kW. Jusqu'à 3.3 kW, ils fonctionnent en général en 230 V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension).

Etant connecté directement sur le champ PV, leur tension et leur courant d'entrée sont donc très variables avec les conditions d'ensoleillement et de température ambiante.

L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum (souvent notée MPPT pour Maximum Power Point Tracking), c'est-à-dire l'adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit $P = U \cdot I$ sur la caractéristique du champ PV.

III.2. Définition et principe de fonctionnement des onduleurs :

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui servent principalement à alimenter, à fréquence fixe ou variable, des charges alternatives. Le but recherché est l'obtention pour chaque tension de sortie d'une forme d'onde approximant au mieux la sinusoïde.

L'onduleur est dit autonome si l'établissement et la connexion entre l'entrée et la sortie ne dépendent que de la commande des semi-conducteurs.

On distingue deux types d'onduleurs :

Les onduleurs autonomes de tension : sont alimentés par une source de tension continue, d'une impédance interne négligeable et de tension constante peu affectée par les variations du courant qui la traverse. Les onduleurs autonomes de courant sont alimentés par une source de courant [5].

III.2.1. Les Onduleurs monophasés :

Ce type d'onduleurs est destiné à alimenter des charges alternatives monophasées, on distingue deux configurations de base : [23] [24]

III.2.1.1. Onduleur monophasé en demi-pont :

Les figures (III.1) (III.2) montrent respectivement la structure d'un onduleur monophasé en demi-pont et les formes des différentes grandeurs.

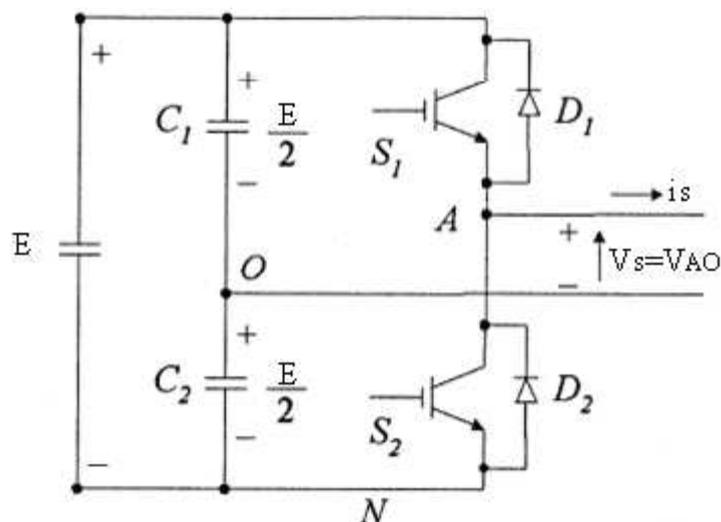


Figure III.1. Schéma de principe d'un onduleur de tension en demi-pont.

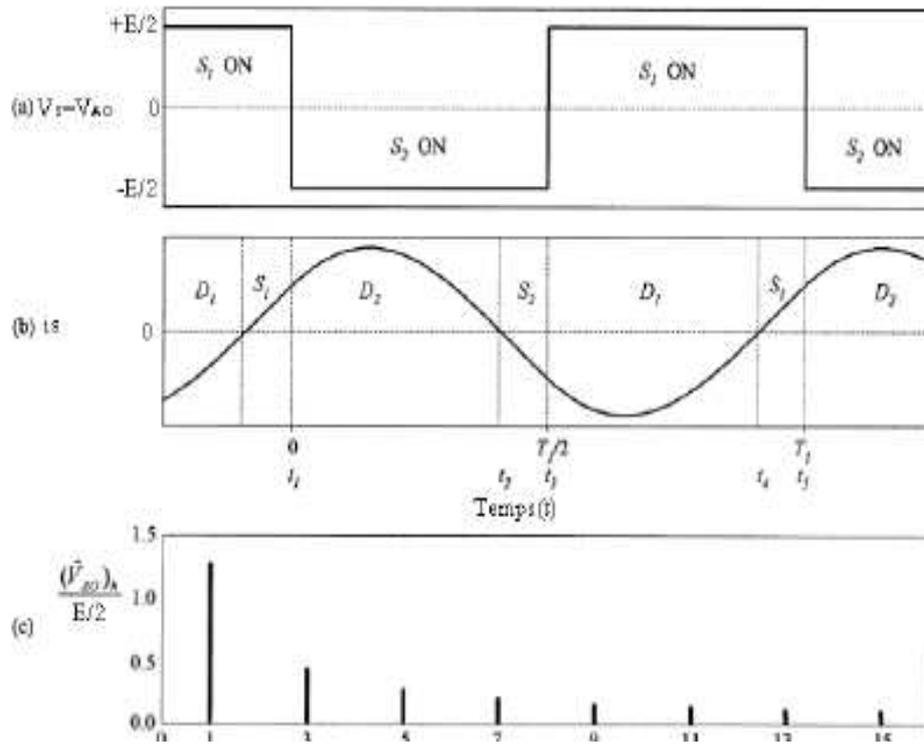


Figure III.2. Différentes formes des signaux

- (a) Tension de sortie.
- (b) Courant dans la charge.
- (c) Spectre normalisé de la tension de sortie.

III.2.1.2. Onduleur monophasé en pont :

Les figures (III.3) (III.4) montrent respectivement la structure d'un onduleur monophasé en pont et les formes des différentes grandeurs.

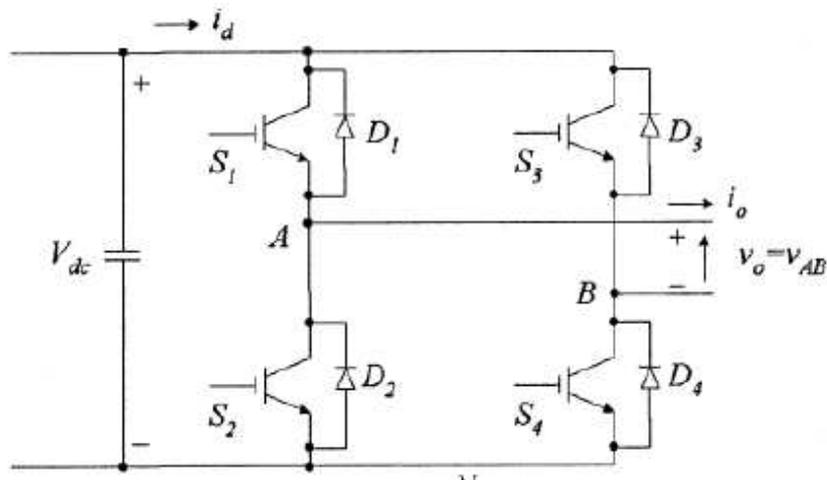


Figure III. 3. Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont.

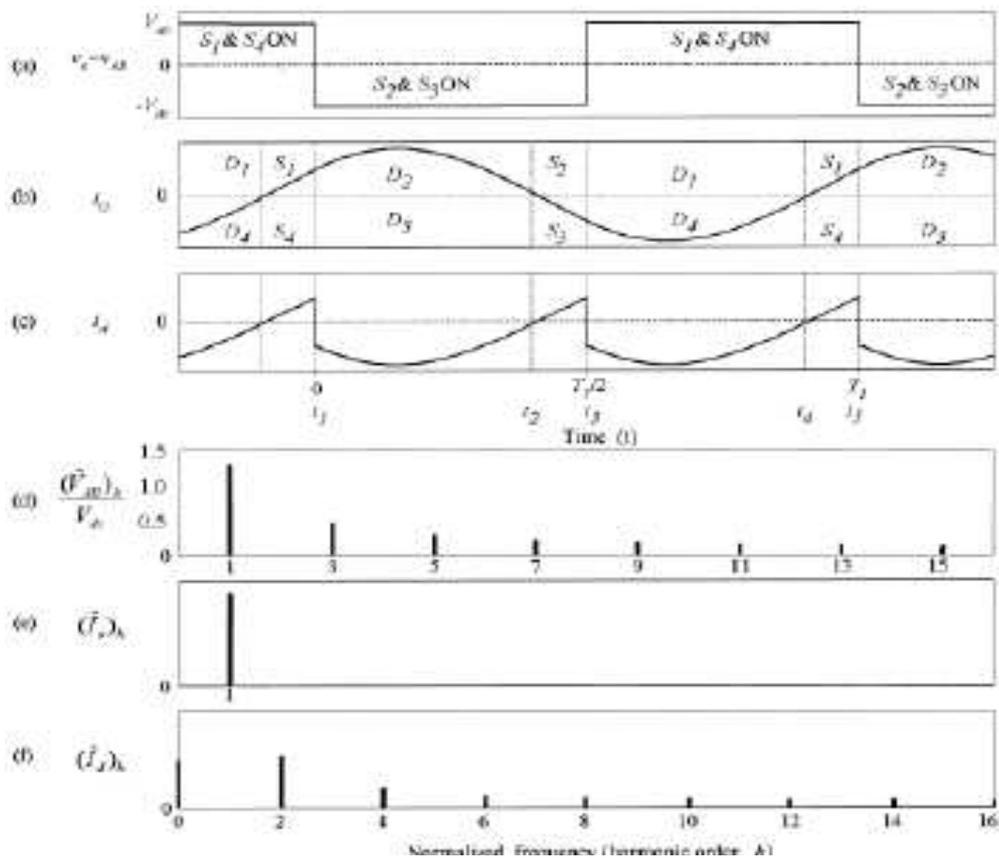


Figure III.4. Tensions et leurs spectres.

III.2.2. Les onduleurs triphasés :

Les onduleurs monophasés sont utilisés pour des applications de faible puissance, alors que les onduleurs triphasés couvrent la gamme de moyenne et de forte puissance. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [21].

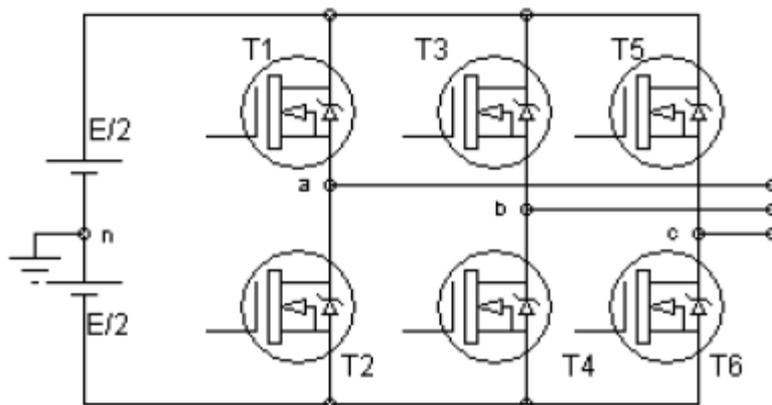


Figure III.5. Schéma de principe d'un onduleur triphasé.

La figure III.5 montre un onduleur de tension triphasé constitué de trois cellules de base. Une charge triphasée est raccordée aux points milieu a, b et c. La tension d'entrée est généralement fournie par un redresseur.

Si on commande les interrupteurs des trois cellules avec un déphasage d'un tiers de période fondamentale, les trois tensions simples V_{an} , V_{bn} et V_{cn} (vis-à-vis du point milieu fictif n à l'entrée) sont également déphasés d'un tiers de période fondamentale les unes par rapport aux autres. Il en va de même des trois tensions composées, par exemple $V_{ab}=V_{an}-V_{bn}$. Ceci est illustré par la figure I.8 pour une onde carrée.

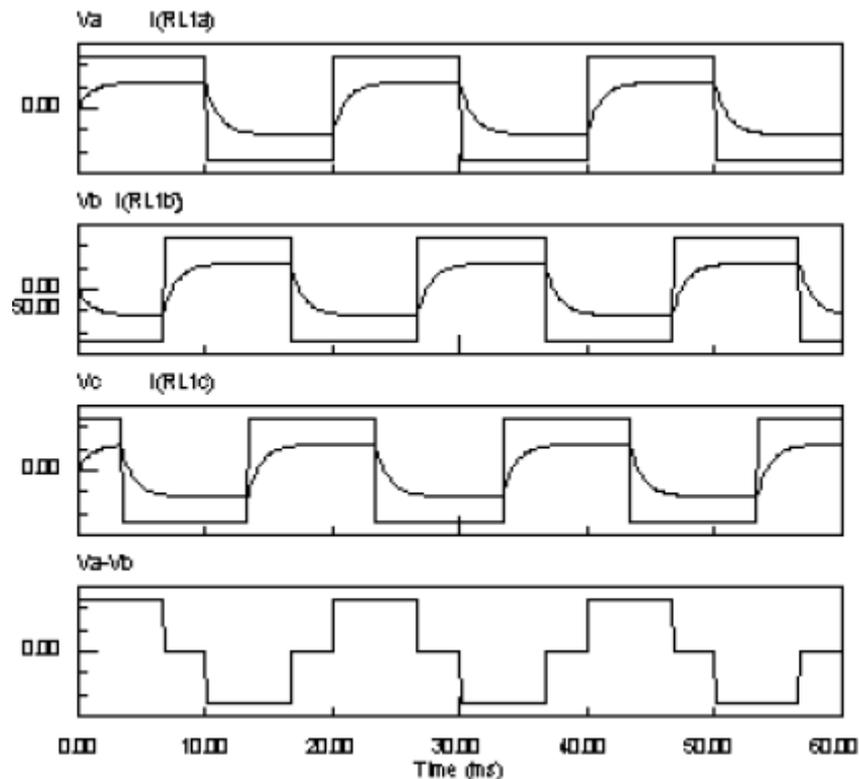


Fig. III.6. Signaux de sortie pour un onduleur triphasé.

III.2.3. Domaines d'application :

Ils sont également caractéristiques de deux grandes familles, respectivement celle des systèmes à fréquence fixe et celle des systèmes à fréquence variable [23] [25].

III.2.3.1. Domaine des fréquences fixes :

Dans ce premier domaine, l'onduleur est destiné à palier les défaillances ou même l'absence d'un réseau alternatif en recréant la tension correspondante à partir d'une batterie. Le schéma de principe d'une telle application est donné par la figure III.9.

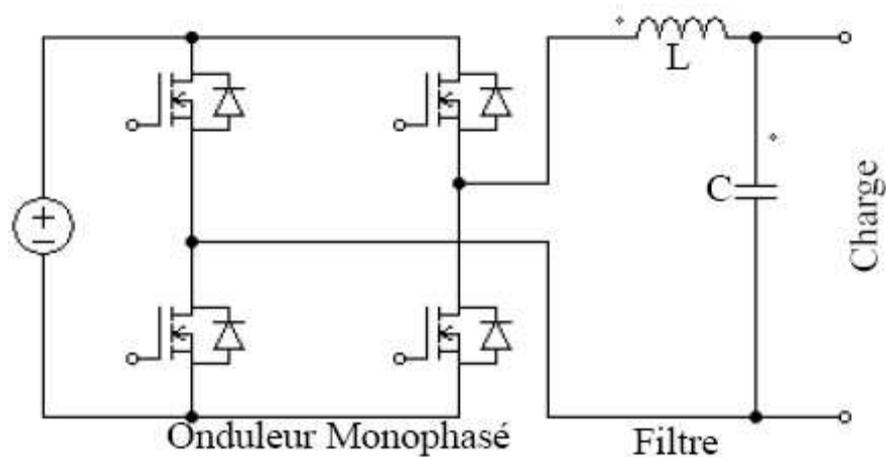


Figure III.7. Schéma de principe d'un onduleur pour alimentation de secours.

Cette application requiert généralement la fourniture d'une tension de sortie très pure, donc sans les harmoniques de découpage, d'où la nécessité d'un filtre de sortie.

III.2.3.2. Domaine des fréquences variables :

Dans ce deuxième domaine, l'onduleur est généralement alimenté par l'intermédiaire d'un réseau alternatif. La source continue est donc un redresseur suivi d'un filtre d'entrée qui peut avoir une double fonction, à savoir éliminer les composantes harmoniques de courant issues de l'onduleur, et les composantes harmoniques de tension dues au redressement.

Une autre différence notable par rapport au cas précédent réside dans le domaine de fonctionnement beaucoup plus étendu tant en fréquence fondamentale (de quelques hertz à quelques centaines de hertz) qu'en amplitude.

Le schéma de principe d'une telle application est donné par la figure III.10

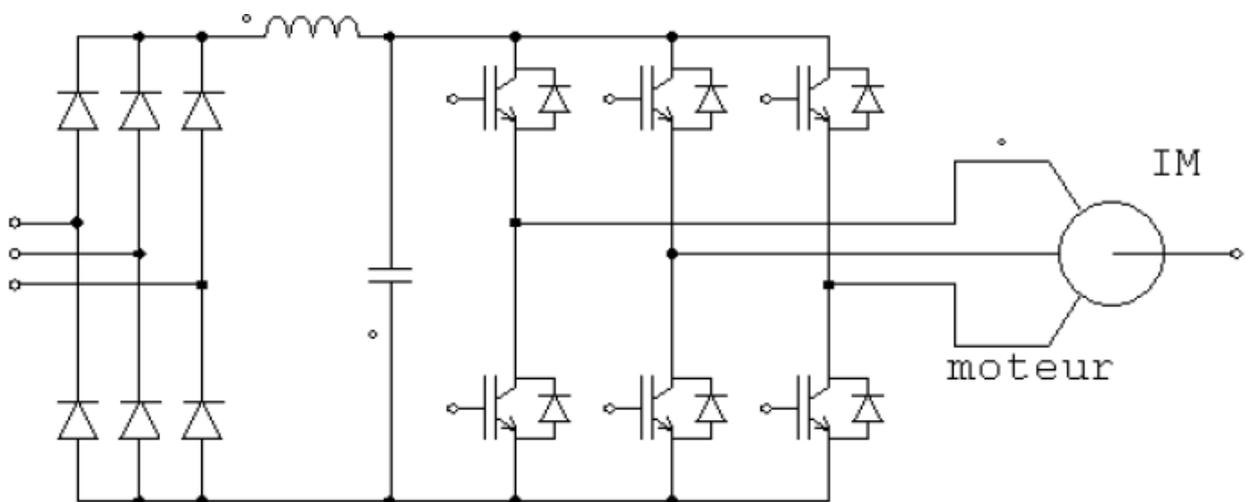


Figure III.8. Schéma de principe d'un onduleur pour la conduite d'un moteur.

III.2.4. La commande des onduleurs :

Plusieurs stratégies de commande des onduleurs ont été développées dans la littérature dont les principes consistent soit:

- Analogique : Consiste en la génération des signaux de commande des interrupteurs de puissance par l'asservissement de la tension de sortie de l'onduleur à une référence de tension sinusoïdale: c'est la commande dite implicite, technique analogique telle que principalement la MLI engendrée, la Modulation Delta, la commande à hystérésis.
- Numérique : Consiste en la détermination des instants de commutation des composants de puissance formant l'onduleur par le biais du développement en série de Fourier des formes d'onde souhaitées en sortie répondant à des critères bien définies (taux d'harmoniques, valeur du terme fondamental) : c'est la commande dite explicite où la commande des interrupteurs se fait d'une façon numérique telle que la technique de la sortie sinusoïdale synthétisée ou la modulation programmée [26].

III.2.4.1. Technique MLI engendrée [27] [28]:

La commande MLI Triangulo-sinusoïdale consiste dans la comparaison d'une valeur de tension de référence de fréquence F_r , image du signal souhaité à la sortie appelée modulante, à une porteuse triangulaire ou en dent de scie de fréquence F_p . Les points d'intersection entre la modulante et la porteuse engendrent l'enclenchement/déclenchement constituant ainsi une impulsion de durée variable et l'ensemble de ces impulsions reconstitue, de ce fait, le fondamental de la sinusoïde de référence [29].

L'étude de la MLI se base sur deux paramètres qui caractérisent la commande:

L'indice de modulation m qui est l'image du rapport des fréquences de la porteuse F_p sur la référence F_r . Si m est entier la modulation est synchrone. Elle est asynchrone dans le cas contraire.

Le taux de la modulation r qui est l'image du rapport des amplitudes des tensions de la référence V_{rm} sur celle de la porteuse V_{pm} .

$$m = \frac{F_p}{F_r}$$

$$r = \frac{V_m}{U_{pm}}$$

Pour éliminer les harmoniques de rang pair et les harmoniques de rang 3, l'indice de modulation m doit être impair et multiple de 3.

La porteuse la plus adaptée aux convertisseurs à deux niveaux est la triangulaire bipolaire [30].

Dans cette technique de commande on peut distinguer :

- MLI à échantillonnage naturel.
- MLI optimisé.

III.2.4.1.1. MLI à échantillonnage naturel :

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et le courant de référence. Cette dernière est ensuite comparée à un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure III.11.

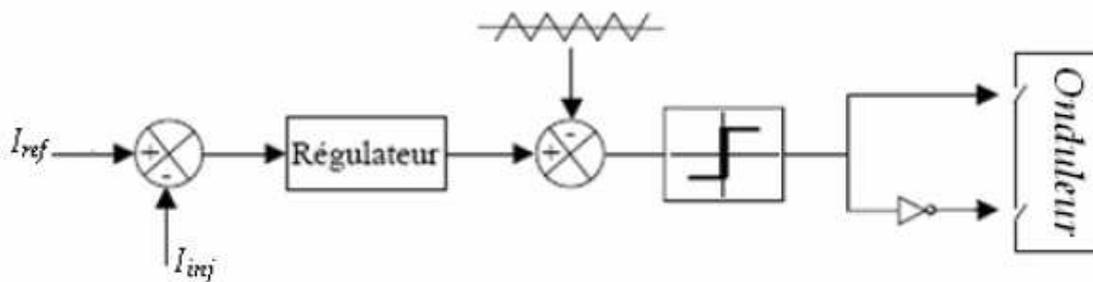


Figure III.9. Principe de commande des courants par MLI.

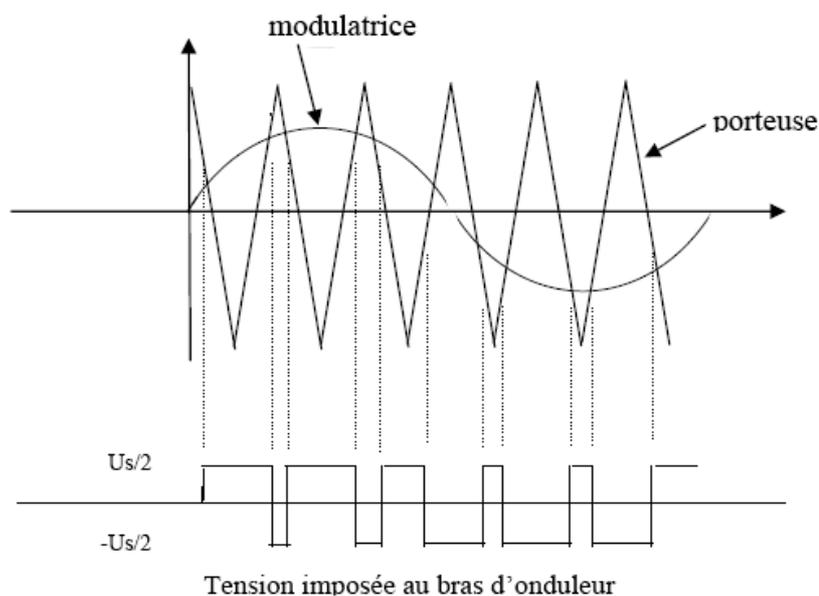


Figure III.10. MLI à échantillonnage naturel.

Cette modulation présente l'inconvénient de générer des impulsions dissymétriques par rapport à la période de la porteuse. Ainsi, les instants de commutation ne peuvent être exprimés sous forme analytique simple, ce qui rend délicate la mise en œuvre dans les applications numériques. D'autres techniques de MLI à échantillonnage naturel existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

➤ **Echantillonnage régulier symétrique :**

Contrairement à la M.L.I. naturelle, l'échantillonnage des tensions de référence se fait à des instants périodiquement espacés. L'onde modulante est échantillonnée à chaque sommet positif de l'onde triangulaire. Cette procédure produit une onde qui est une approximation de la référence sinusoïdale.

L'impulsion générée est symétrique par rapport au centre de la période et la méthode est dénommée M.L.I régulière symétrique. Les instants d'échantillonnage, régulièrement espacés, ne dépendent pas du processus de modulation. Les deux transitions de l'impulsion de commande dépendent de la même valeur échantillonnée. Cette méthode est facilement réalisable en temps réel.

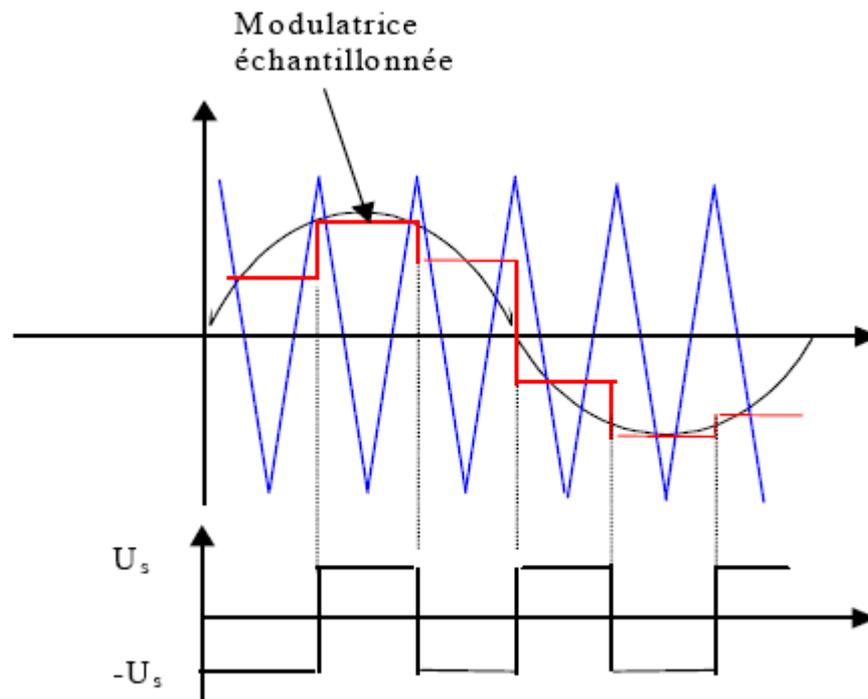


Figure III.11. MLI à échantillonnage régulier symétrique

➤ **Modulation régulière asymétrique :**

Une réduction de la distorsion harmonique peut être obtenue si nous effectuons deux échantillonnages de la tension de référence sinusoïdale par période de l'onde triangulaire.

Avec ce type de fonctionnement, chaque transition de l'impulsion de commande est définie à partir d'une valeur différente du signal échantillonné. La méthode est donc dénommée M.L.I. régulière asymétrique.

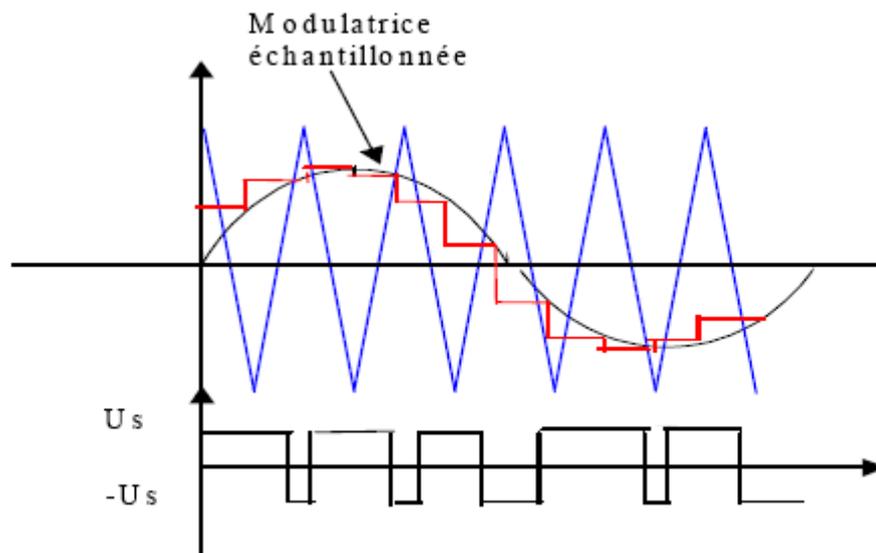


Figure III.12. MLI à échantillonnage régulier asymétrique

III.2.4.2. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure, un ordre de commande est transmis de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre (**figure III.15**), est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, ne permettent pas de maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

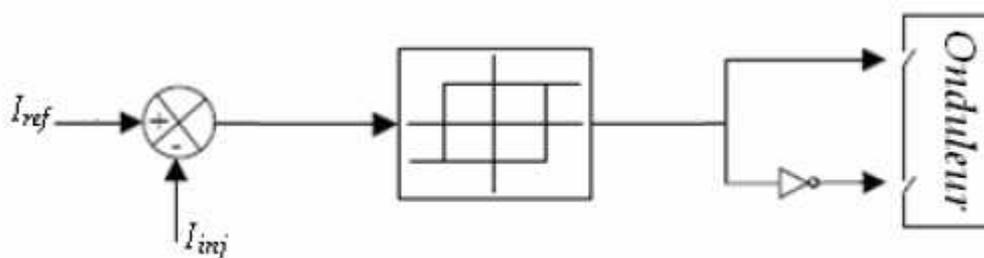


Figure III.13. Principe de commande des courants par hystérésis.

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation toujours fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

III.2.4.3. MLI optimisée (calculée) :

Les ondes MLI optimisées sont apparues avec le développement des applications à microprocesseurs. Le principe consiste à définir une onde MLI avec des caractéristiques particulières à partir de la prédétermination des différents angles de commutation. Ces caractéristiques sont obtenues à partir de l'optimisation de certains critères tels que l'élimination d'harmoniques, la minimisation du taux de distorsion harmonique, etc.

Cette méthode à optimisation des angles de commutation nécessite des algorithmes de calcul performants ainsi que des calculateurs puissants.

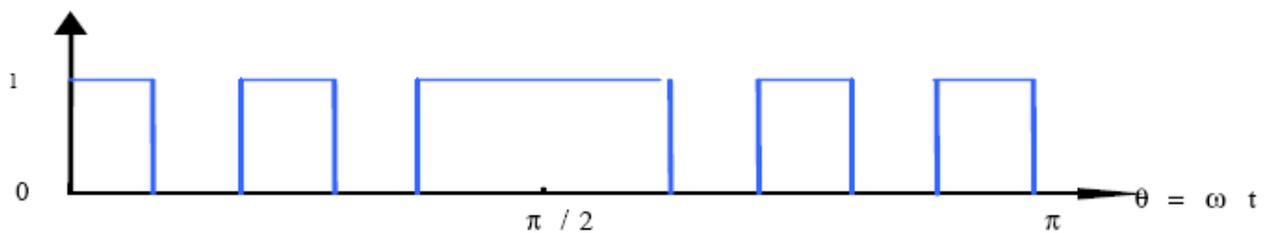


Figure III.14. MLI optimisé (Calculé)

III.3. Concept technique des onduleurs photovoltaïque :

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser une conversion d'énergie électrique :

La figure III.17 présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par un circuit LC.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage

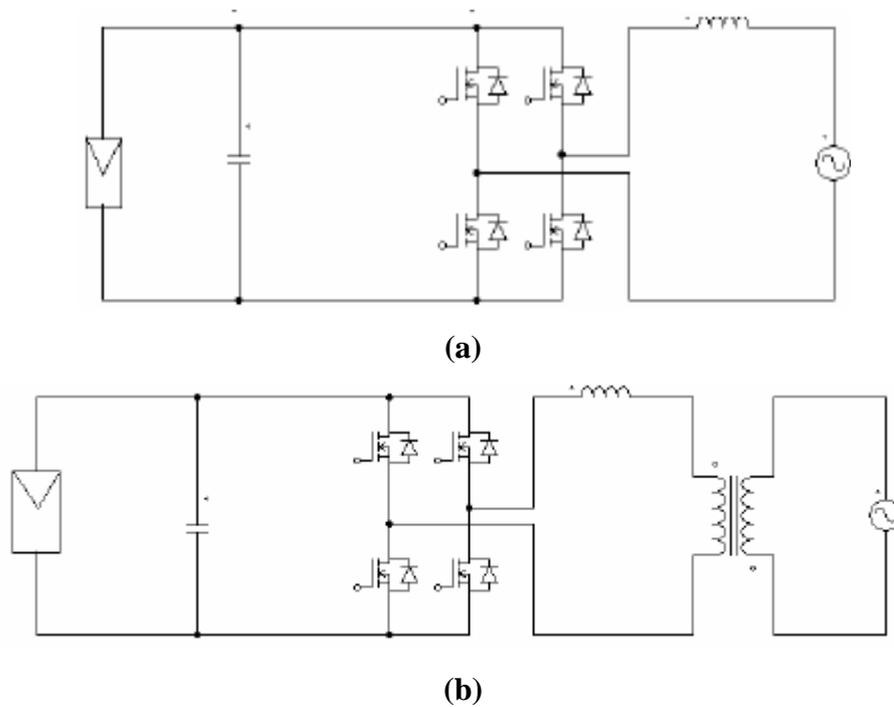


Figure III.15. Circuit simple utilisant un pont de transistors [31].

(a) Onduleur sans transformateur.

(b) Onduleur avec transformateur 50 Hz.

Pour travailler sur une gamme de tensions d'entrée plus large, un convertisseur élévateur « boost » peut être rajouté en entrée du pont (figure III.16).

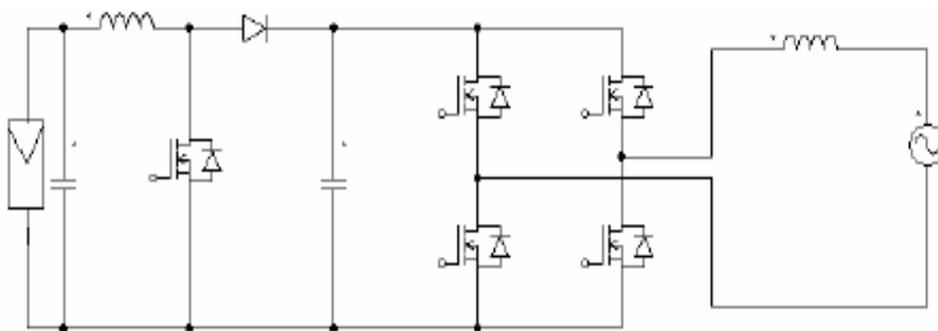


Figure III.16. Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur [31].

Le montage de la figure III.17 comprend 3 étages différents. Il est composé d'un transformateur haute fréquence qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur.

À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

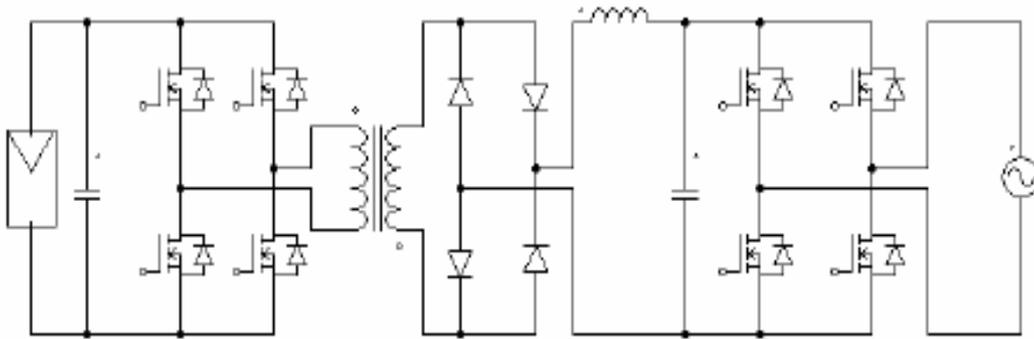


Figure III.17. Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence [31]

Le montage de la figure III.18 est constitué de 4 étages. Ce circuit nécessite le contrôle de 7 interrupteurs contre 8 pour celui de la figure III.18.

Il est composé d'un convertisseur abaisseur de tension, d'un montage dit « pushpull » suivi d'un redresseur, et d'un pont de sortie.

La partie « convertisseur abaisseur + transformateur push pull » permet d'adapter la tension d'entrée. Elle permet à l'onduleur d'avoir une plus large gamme de tensions d'entrée possible donc une plus grande flexibilité d'association avec les modules PV. Le redresseur « redresse » la tension en sortie du push pull, et le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

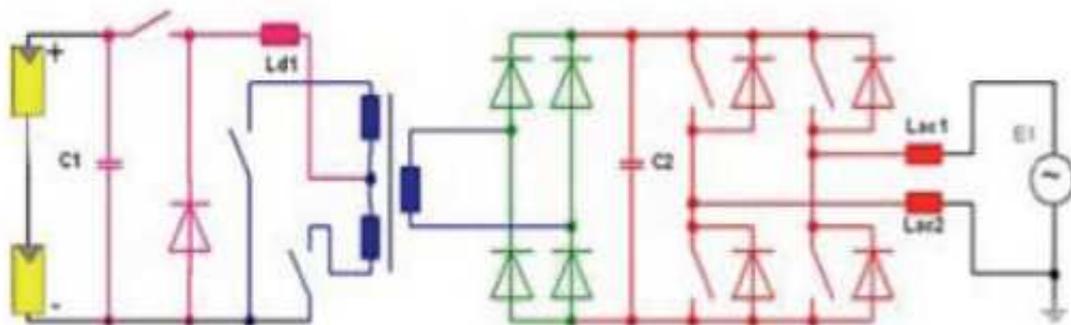


Figure III.18. Circuit à 4 étages avec montage push pull [32]

Enfin, le montage de la figure III.19 représente un exemple simple de la technologie des onduleurs sans transformateur. En éliminant le transformateur, générateur de pertes importantes dans le circuit lors de la conversion de puissance, on peut augmenter le rendement.

Il faut cependant prendre en compte les problèmes de compatibilité électromagnétique que le transformateur permettait d'éliminer par isolation galvanique.

Dans ce circuit, S1 (pour les courants positifs et négatifs) et S2 (pour les courants positifs) sont commandés en haute fréquence et les autres interrupteurs en 50Hz (fréquence du réseau).

Pour des tensions d'entrée plus grandes, S1 peut être contrôlé seul en haute fréquence et les 4 autres en 50Hz pour former un convertisseur abaisseur et un convertisseur push pull.

Dans les 2 cas, le désavantage de ce montage est la très forte tension appliquée aux bornes des interrupteurs.

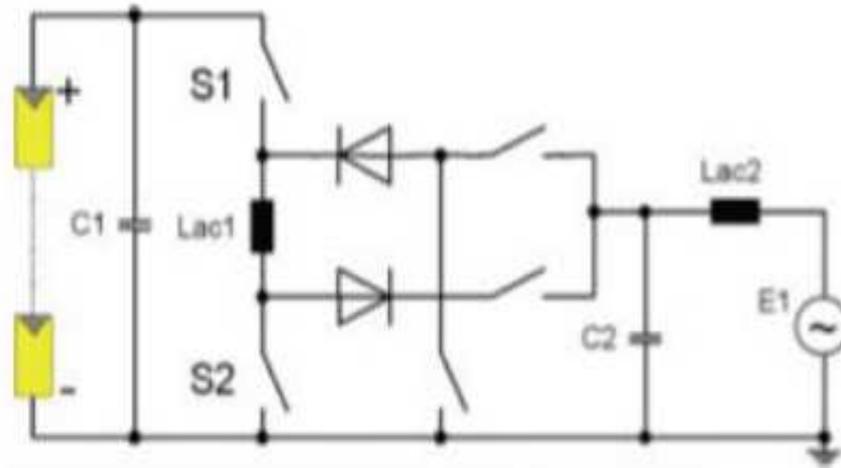


Figure III.19. Onduleur sans transformateur dit « à Topologie de « Karschny » [32]

III.4. Technologies des onduleurs pour les systèmes couplés au réseau [33]:

A l'heure actuelle, les installations PV d'alimentation du réseau sont l'exploitation de la photovoltaïque la plus importante. Il existe pour ces installations des approches différentes au niveau de leur conception. Elles ont cependant toutes en commun de disposer d'un générateur PV directement relié au réseau par le biais d'un onduleur que le générateur alimente en énergie solaire. C'est pourquoi les onduleurs jouent un rôle clé au regard de l'efficacité énergétique et de la fiabilité. Leur rôle ne se limite pas à transformer le courant continu (DC) généré par le panneau PV en courant alternatif (AC) de tension et de fréquence souhaitées, mais consiste également à exploiter le champ PV à son point de puissance maximal (Maximum Power Point MPP). De plus, les onduleurs doivent assurer une surveillance fiable du réseau pour le protéger contre les défaillances et interrompre l'alimentation en cas d'erreurs du réseau.

A l'heure actuelle, il existe principalement trois topologies d'onduleurs et configurations d'installation qui fournissent différentes solutions techniques valables, à choisir en fonction des conditions locales :

III.4.1. Onduleurs Centraux :

La majorité des panneaux PV d'une installation importante (> 10 kW) sont montés en série pour former des Strings, eux-mêmes montés en parallèle au moyen de diodes string. Le générateur PV ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur central (voir la Figure III.20). Les onduleurs centraux présentent une grande efficacité à des coûts spécifiques faibles.

Un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel portent cependant préjudice à une exploitation optimale de chaque string PV, entraînant une baisse du rendement énergétique possible. De plus, la fiabilité de l'installation est limitée car elle dépend d'un seul onduleur. Une panne de l'onduleur central entraîne l'immobilisation de toute l'installation.

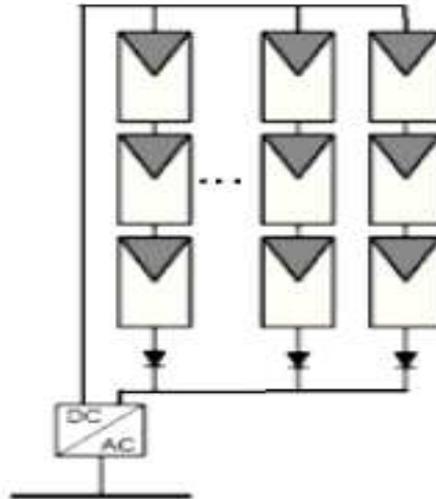


Figure III.20. Représentation schématique des Onduleurs Centraux [33]

III.4.2. Onduleur string :

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est ici aussi, sous divisé en strings. Chaque rangée est toutefois reliée à son propre onduleur string (figure III.21). Le technique string minimise le risque de problèmes d'adaptation de ces modules, réduit les pertes dues aux ombrages et contourne celles occasionnées par les diodes de string et par un câblage très long du côté du générateur DC.

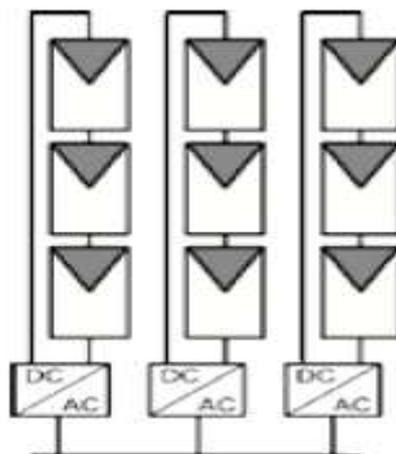


Figure III.21. Représentation schématique des Onduleurs string [33]

Ces propriétés techniques supérieures entraînent une réduction des coûts du système et améliorent le rendement énergétique et la fiabilité de l'installation.

III.4.3. Onduleurs Multi-String :

L'onduleur Multi-String permet le raccordement et le fonctionnement au MPP de plusieurs strings raccordés à une unité de puissance commune par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC. Il offre ainsi une solution compacte et économique tout en jouissant de tous les avantages du technique string.

On a recours aux onduleurs multi strings dans les installations PV d'une plage de puissance allant de 3 à 10 kW.

Dans cette configuration, chaque panneau dispose de son propre onduleur (Figure III.22) de sorte que toute perte due à l'adaptation est écartée. Au demeurant, le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste en deçà de celui de l'onduleur string.

Les onduleurs intégrés aux panneaux conduisent à des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, car chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre, nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux à installer entraîne un travail de montage nettement plus important. Ce concept ne s'applique donc principalement qu'aux installations PV d'une puissance allant de 50 à 400 W.

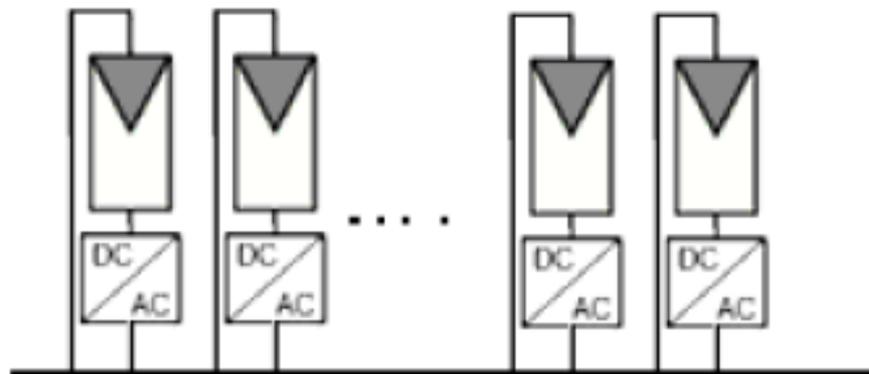


Figure III.22. Représentation schématique des onduleurs Multi-String [33]

III.5. Rendement des onduleurs photovoltaïques :

L'efficacité des onduleurs ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années. Cette amélioration participe, bien entendu, à la constante diminution des coûts de l'électricité générée par le PV.

Il y a 15 ans, 90% était considéré comme un très bon rendement des systèmes PV.

Aujourd'hui, les meilleurs onduleurs atteignent des pics de rendement de 98% et la moyenne est à 95,2% [32].

L'autre amélioration frappante est celle du «rendement européen», qui prend en compte l'efficacité à charge partielle de l'onduleur. À cause d'un mauvais rendement à charge partielle, la valeur du Rendement européen est plus faible que celle du rendement maximal. Il y a 15 ans, elle pouvait atteindre jusqu'à 5% de moins que le rendement maximal alors qu'aujourd'hui la différence est comprise entre 1 et 2%, pour les meilleurs modèles.

Le Rendement européen moyen des onduleurs présents sur le marché en 2007 est de 94,4 % [32].

D'un point de vue technique, il devrait être possible de réduire à 0,5% cet écart en optimisant l'efficacité à charge partielle.

Le rendement maximal est aussi amené à augmenter jusqu'à 99% dans les prochaines années. Une augmentation de 1% (de 98% à 99%) de l'efficacité signifie des pertes thermiques divisées par 2, ce qui est extrêmement important pour l'amélioration de la durée de vie des composants et donc des onduleurs.

Moins de pertes thermiques signifient également que les systèmes de refroidissements ne sont plus nécessaires et que les dimensions des boîtiers des onduleurs peuvent être réduites.

Cette amélioration du rendement peut être obtenue en optimisant les composants utilisés afin d'avoir le moins de pertes de chaleur possible.

Les recherches sur les premiers transistors de puissance en nanotubes continuent. Ils pourraient remplacer les transistors IGBT et diminuer considérablement les pertes, déjà faibles avec les IGBT.

Un moyen de réduire les pertes dans les transistors est d'en monter plusieurs en parallèle plutôt qu'un seul, afin de diminuer les pertes lors du fonctionnement à charge partielle.

III.5.1. Rendement européen [32] :

L'onduleur ne fonctionnant pas à charge maximale toute l'année, la notion de rendement européen permet de prendre en compte la fréquence et les variations d'ensoleillement.

Il se calcule avec la formule :

$$\eta_{\text{Euro}} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06*\eta_{10\%} + 0,13*\eta_{20\%} + 0,1*\eta_{30\%} + 0,48*\eta_{50\%} + 0,2*\eta_{100}.$$

Les $\eta_x\%$ correspondent aux rendements de l'onduleur pour $x\%$ de la puissance nominale (charge), cf. figure 23.

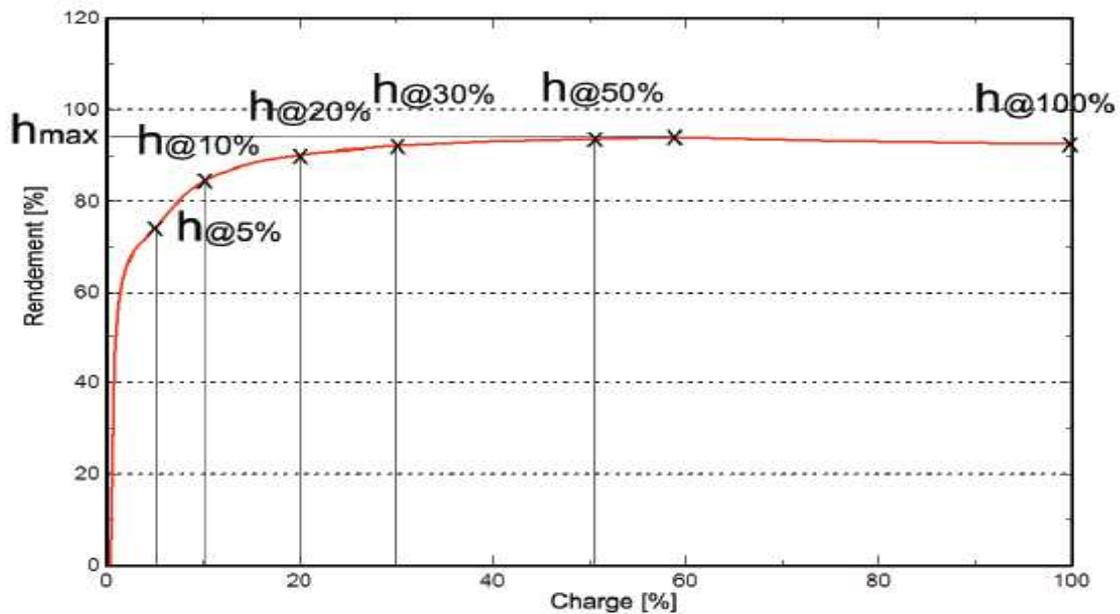


Figure 23. Courbe typique du rendement d'un onduleur PV en fonction de sa charge, illustrant les points nécessaires au calcul du rendement européen.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce présent chapitre un rappel théorique sur les différents types des onduleurs, ainsi que les différentes topologies de ces derniers pour les installations photovoltaïques autonome et couplé au réseau.

La partie commande des onduleurs présente une part décisive, elle permet de modifier voire améliorer la qualité des signaux de sortie.

La technique MLI présente l'une des techniques les plus utilisées, elle permet d'obtenir un bon spectre de sortie en augmentant l'indice de modulation.

IV.1. Introduction :

Ce chapitre concernant à la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque autonome piloté par un onduleur monophasé permettant une meilleure adaptation source/charge, pour alimenter une charge alternatif à partir d'une source continue délivrée par le générateur photovoltaïque.

Afin de prévoir le comportement d'une installation photovoltaïque autonome, nous allons modéliser les différents composants de cette installation et simuler son fonctionnement dans l'environnement matlab (simulink) et PSIM.

Et en fin nous allons calculer et modéliser le rendement de l'onduleur en fonction de la charge.

IV.2. Présentation des logiciels de simulations utilisées :

Les logiciels de simulations sont des outils puissants qui testent et évaluent l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécution du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlables.

La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

La simulation est effectuée avec deux logiciels de simulation Simulink incluse dans le logiciel de Mathworks Matlab *et* PSIM de Power Sim spécialisé dans l'électronique de puissance.

IV.2.1. Description du logiciel Mathworks Matlab inclu l'outil Simulink :

L'utilisation de 'Simulink' en raison de la possibilité de simuler des systèmes mixtes (continus et discrets). Le système continu est utilisé pour la simulation des différentes parties analogiques (panneau solaire, batterie etc.). Le système discret est utilisé pour simuler les méthodes de tracking algorithmes 'perturbation et observation etc.' le 'Simulink' nous permet aussi de changer facilement les conditions atmosphériques (ensoleillement, température) afin d'évaluer la trajectoire de tracking du MPP des différentes techniques MPPT vis-à-vis des changements brusques ou lents de ces conditions il nous permet aussi de calculer les différents paramètres caractéristiques du système.

IV.2.2. Présentation du logiciel de simulation PSIM utilisé :

PSIM est un logiciel de simulation spécifiquement conçu pour l'électronique de puissance et la commande des systèmes. Par une simulation rapide, avec une interface utilisateur agréable. PSIM fournit un environnement puissant de simulation pour l'analyse des convertisseurs de

- L'onduleur
- Filtre LC

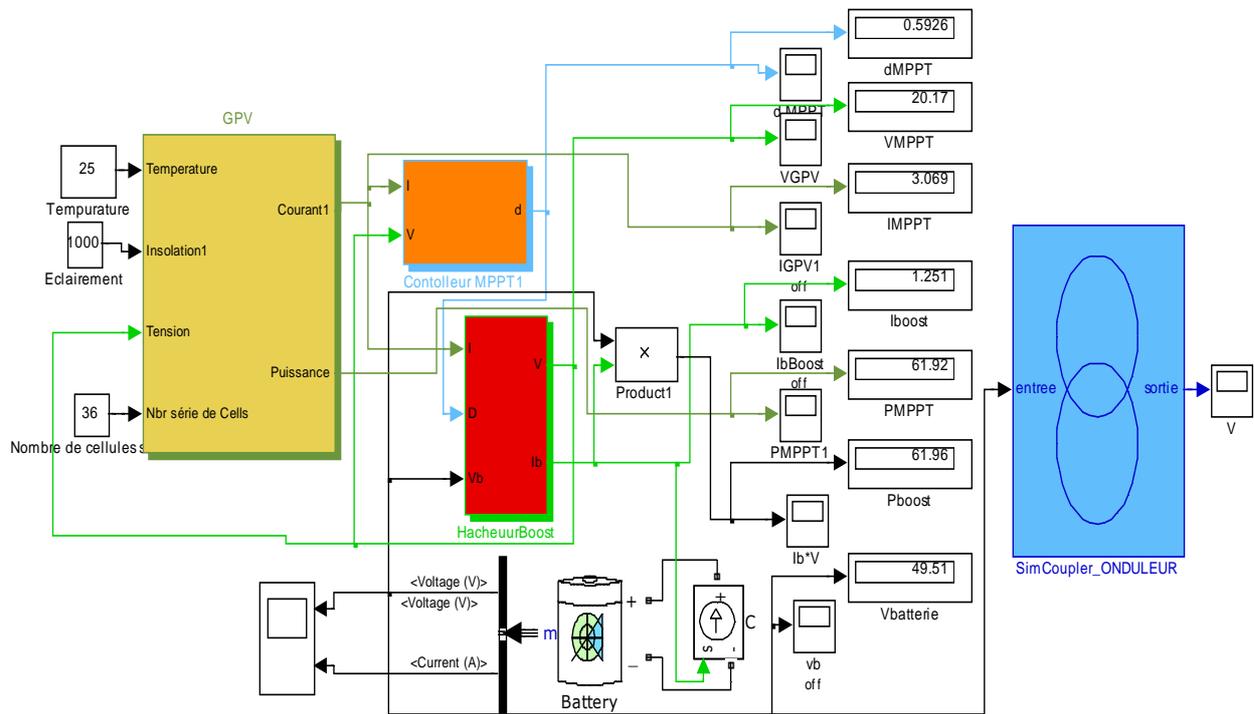


Figure VI.2. Schéma synoptique pour la simulation du système photovoltaïque.

Nous allons fournir dans ce qui suit une description sommaire de chaque bloc composant ce système.

VI.3.1. Le panneau photovoltaïque:

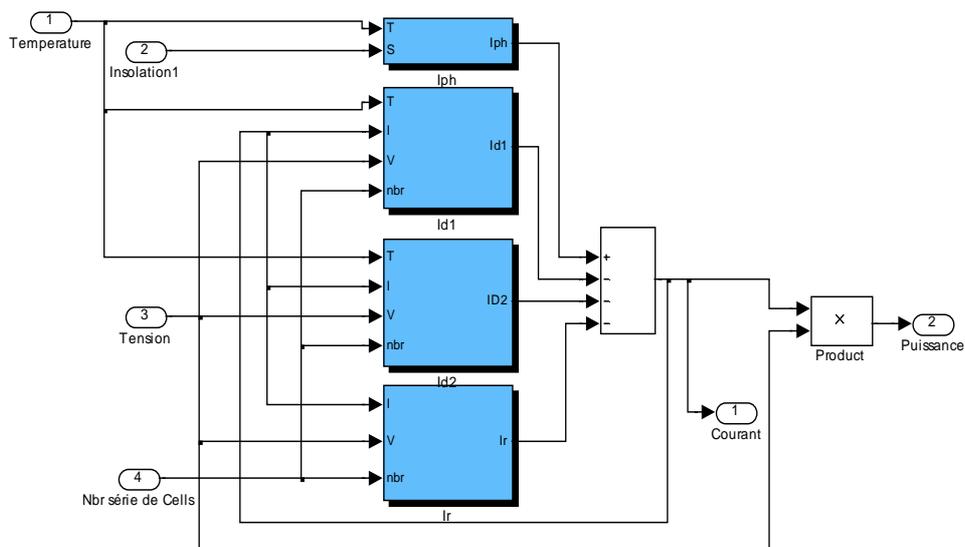


Figure VI.3. Modèle 'SIMULINK' du panneau photovoltaïque.

La figure (VI.3) montre le schéma fonctionnel du panneau photovoltaïque sous Simulink, ce schéma modélise les équations mathématiques du panneau photovoltaïque vu dans le chapitre I qui sont :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IzR_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IzR_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + IzR_s}{zR_p}. \quad (\text{VI.1})$$

Avec :

$$I_{ph}(T) = I_{ph} \Big|_{(T=298.K)} \left[1 + (T - 298 \cdot K) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (\text{VI.2})$$

$$I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (\text{VI.3})$$

$$I_{s2} = K_2 T^2 e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (\text{VI.4})$$

$$K_1 = 1,2 \text{ A/cm}^2 \cdot K^3 \quad (\text{VI.5})$$

$$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot K^{5/2}. \quad (\text{VI.6})$$

D'après ces équations on se trouve devant un bloc de simulation qui a comme entrées :

➤ Les valeurs de température et d'ensoleillement : en changeant ces valeurs on peut évaluer la réaction du système contre différents changement des conditions atmosphérique.

Et qui a comme sorties :

➤ Le courant et la tension du panneau :

Et le nombre de cellules z est considéré comme un paramètre définissant le panneau.

On donne [34]:

$$I_{ph} \Big|_{(T=298.K)} = 3.25 \text{ A}.$$

$$R_p = 30 \Omega.$$

$$R_s = 15 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

$$E_g = 1.1 \text{ ev}.$$

$$n_1 = 1; n_2 = 2.$$

$$k = 1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}.$$

$$q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Nous simulons ce modèle (Figure VI.3), pour les différentes Couples (Ensoleillement (E), Température (T)).

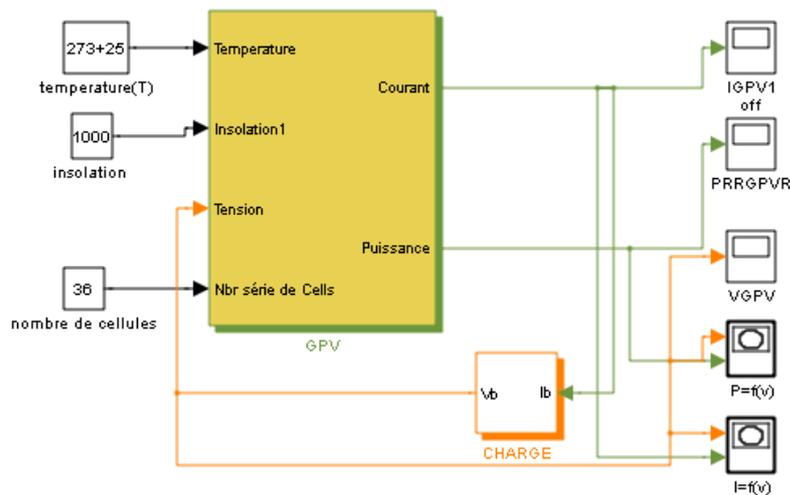


Figure VI.4. Modèle 'SIMULINK' du système solaire sans régulateur.

- Le panneau comporte 36 cellules en série.
- La charge c'est la batterie.

Puis nous traçons les caractéristiques Courant–Tension (figure VI.5) et les caractéristiques Puissance–Tension (figure VI.6). Ces caractéristiques valident le modèle développé ci-dessus.

VI.3.1.1. Les caractéristiques électriques du panneau PV :

VI.3.1.1.1. Courbes courant-tension et puissance-tension du panneau PV :

Les courbes caractéristiques d'un panneau PV: représente la variation du courant et de la puissance en fonction de la tension aux bornes du panneau PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes du panneau PV).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (température=25°C, insolation=1000W/m²).

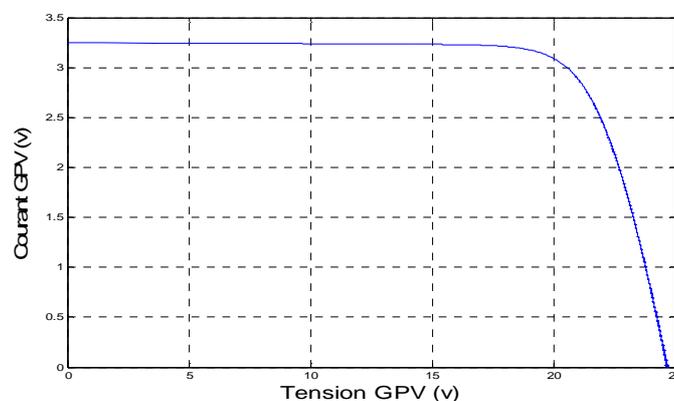


Figure VI.5. Caractéristiques $I = f(V)$ du panneau PV (température=25°C, insolation=1000W/m²)

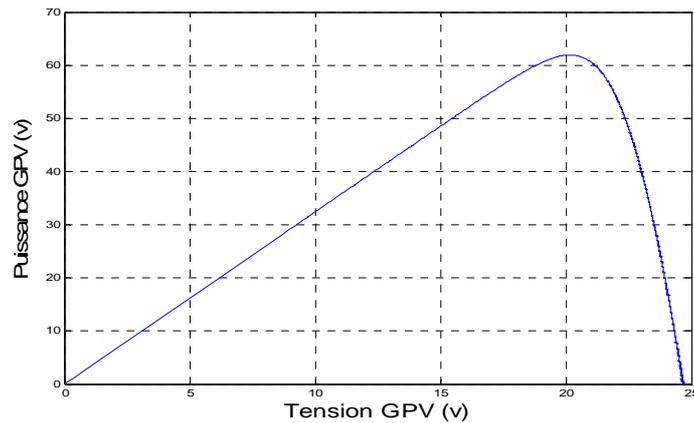


Figure VI.6. Caractéristiques $P=f(V)$ du panneau PV
(Température=25°C, insolation=1000W/m²)

D'après cette caractéristique on cite :

A. Tension de circuit ouvert V_{CO} (pour $I_{CO} = 0$)

La Tension de circuit ouvert V_{CO} du panneau est égale a : 24.67volts

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du panneau PV, cette valeur ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse,

B. Courant de court-circuit I_{CC} (pour $V_{CC} = 0$)

le courant I_{CC} du panneau est égale a : 3.24A

Il est directement proportionnel à l'éclairement G (W / m²), à la température ambiante,

On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du panneau.

C. La puissance maximale

La puissance maximum P_{max} correspondrait à la valeur : 61.91 Watt. (Figure VI.7).

Les résultats de simulation des figures suivantes VI.8 et VI.9 montrent bien les valeurs de puissance, courant et tension du module PV :

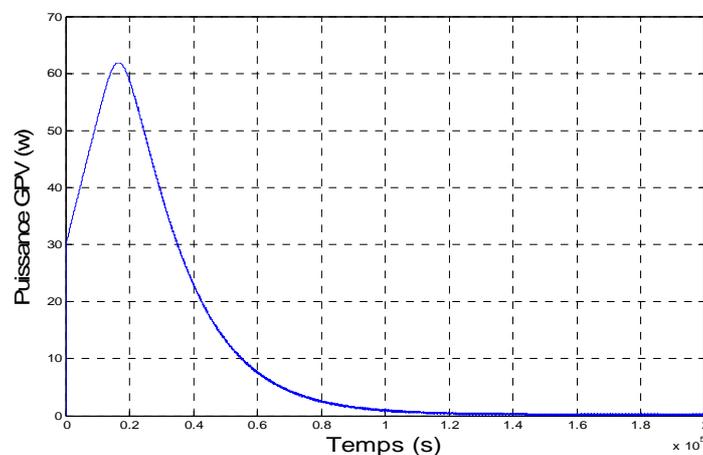


Figure VI.7. Courbe de puissance en fonction de temps

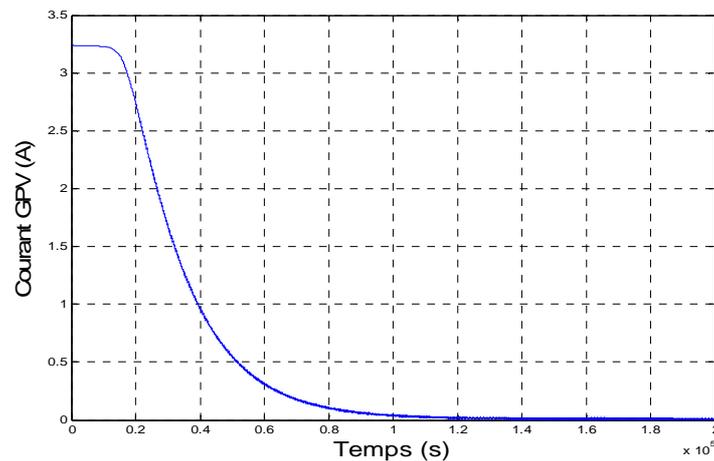


Figure VI.8. Courbe de courant en fonction de temps

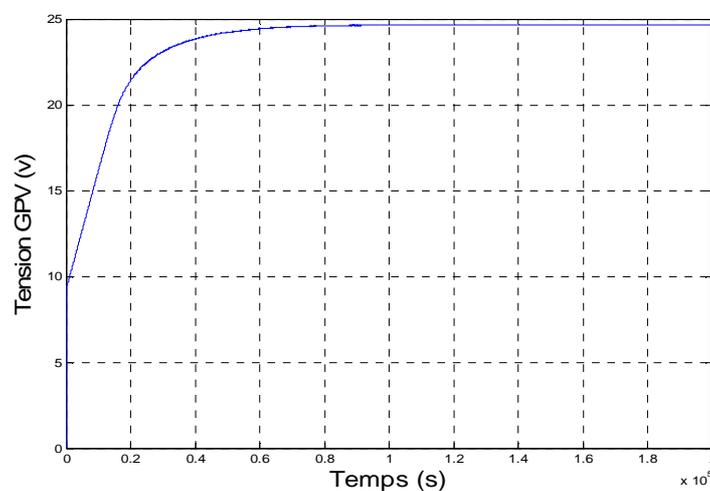


Figure VI.9. Courbe de tension en fonction de temps.

VI.3.1.2. L'influence de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement du panneau PV :

VI.3.1.2.1. L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement du panneau PV :

L'énergie électrique produite par un panneau PV dépend de l'éclairement qu'il reçoit sur sa surface. La figure suivante (figure VI.10) représente la caractéristique courant-tension d'un panneau PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température constante = 25°C. On remarque que la tension V_{\max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{\max} qui augmente fortement avec l'éclairement (figure VI.11). Donc la puissance augmente aussi (figure VI.11).

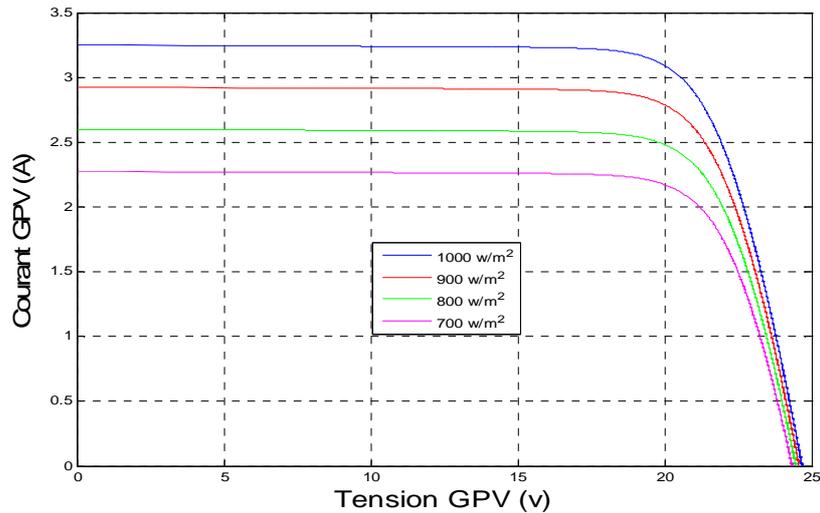


Figure VI.10. Caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairements

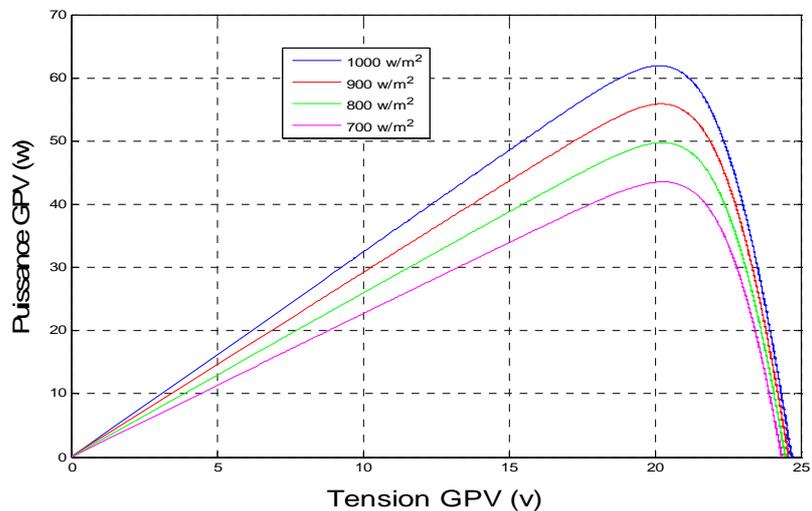


Figure VI.11 : Caractéristiques Puissance Tension pour différents éclairements

VI.3.1.2.2. L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV :

Les caractéristiques électriques du panneau PV dépendent de la température. Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension ainsi que de la puissance en fonction de la température, les autres conditions extérieures restant fixes :

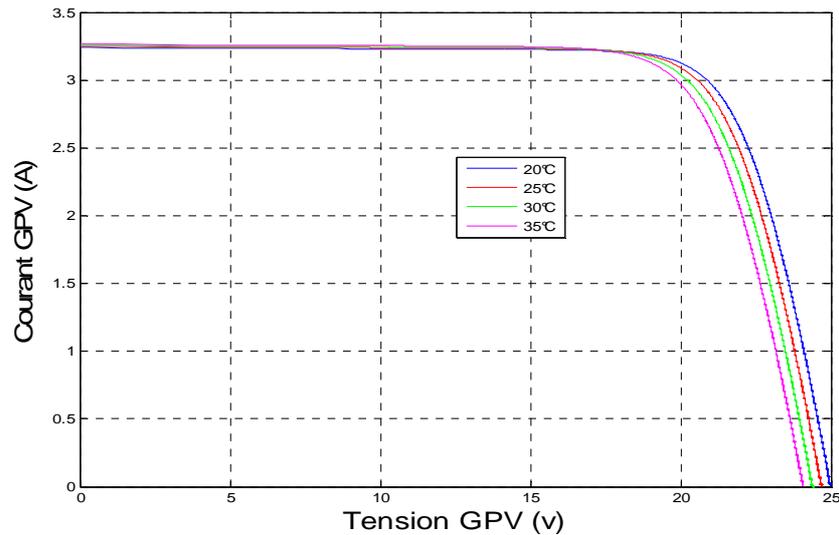


Figure VI.12. Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures

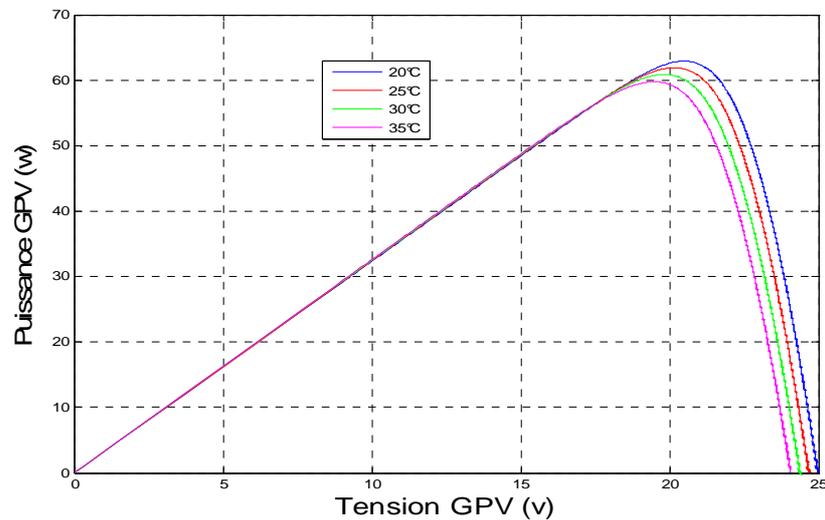


Figure VI.13: Caractéristiques Puissance-Tension pour différentes températures

VI.3.2. Le contrôleur MPPT P&O :

Cette méthode de contrôle étudié dans le chapitre II est une méthode célèbre déjà étudié par plusieurs littératures. Comme on a vu dans la section II.4; le fonctionnement de l'algorithme P and O est bien expliqué sur l'organigramme de la figure II.6 ce dernier on peut le modéliser sous Simulink comme suit (Figure VI.14).

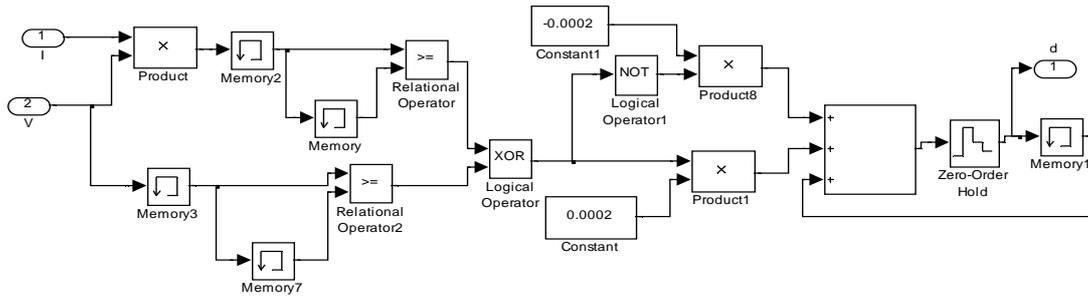


Figure VI.14. Modèle 'SIMULINK' de la méthode 'perturbation et observation'

VI.3.3. L'hacheur boost :

Les équations de base pour le hacheur survolteur ont été données dans la section II.3.2.1 comme expressions (II.31) et (II.32) ces équation mènent au modèle suivant :

$$i_l = i - C_1 \frac{dv}{dt},$$

$$i_b = (1 - d)i_l - C_2 \frac{dv_b}{dt}, \quad (\text{VI.7})$$

$$v = (1 - d)v_b + L \frac{di_l}{dt}.$$

Les valeurs des composantes utilisées sont [7]:

$C_1 = 2200\mu\text{F}$ (Boost), $47\mu\text{F}$.

$C_2 = 47\mu\text{F}$ (Boost), $2200\mu\text{F}$.

$L = 90\mu\text{H}$.

VI. 4. Simulation de la partie de commande :

Dans tout ce qui suit la configuration utilisée dans la simulation est la suivante :

- un panneau photovoltaïque, contenant 36 cellules en série.
- une batterie, de tension de fonctionnement égale à 48V.
- un hacheur boost.

VI.4.1. Fonctionnement du système sous des conditions constantes :

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constantes, on prend les valeurs de conditions standard : la température= 25°C et l'ensoleillement= $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Le but de ces simulations est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP. Il sert aussi à évaluer les pertes dues aux oscillations autour de ce point.

Les figures (VI.15 et VI.16) montrent la variation de la tension et de courant du panneau et de la tension de la batterie ainsi que la puissance du panneau en fonction du temps.

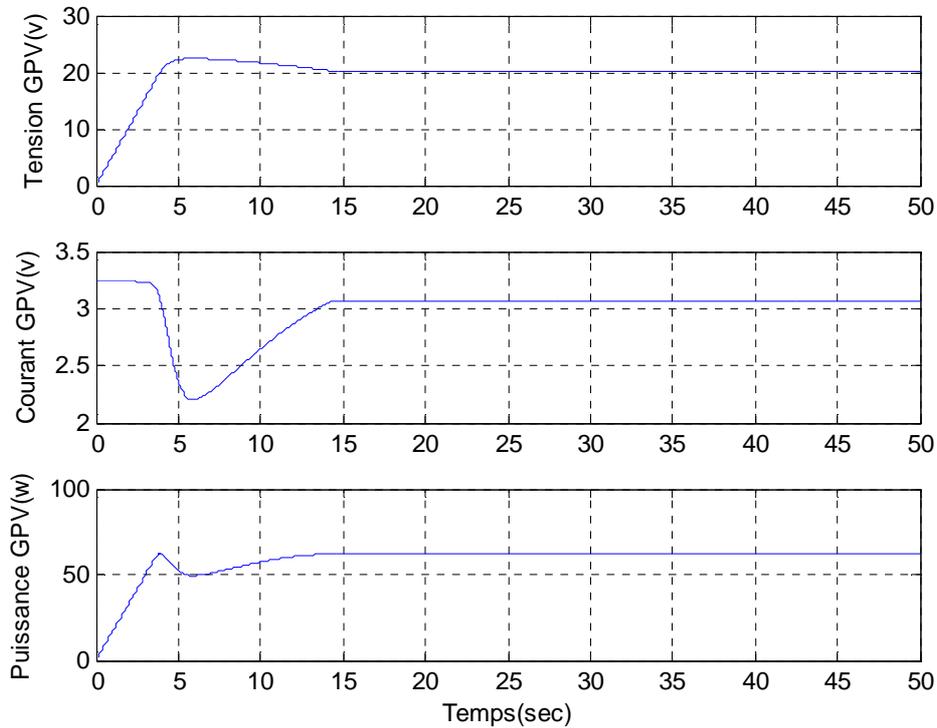


Figure IV.15. Variation de la tension du GPV et du courant et de la puissance.

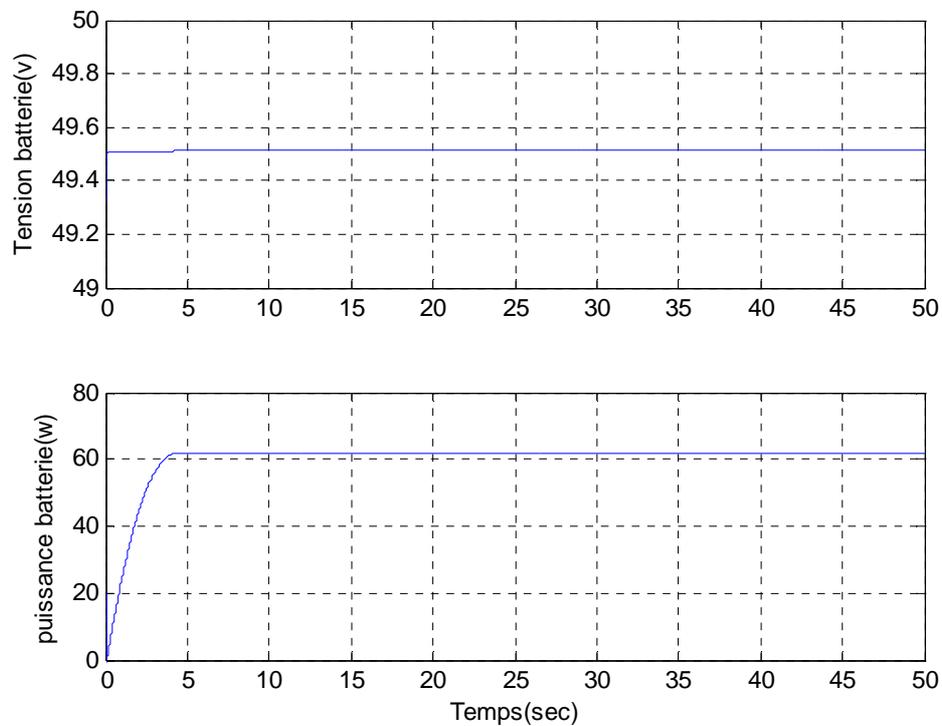


Figure IV.16. Variation de la tension et de puissance de la batterie.

VI.5. L'onduleur (DC/AC) et son filtre de sortie:

Un convertisseur DC/AC est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif à partir d'une source continue. Le schéma bloc est montré à la figure VI.17.

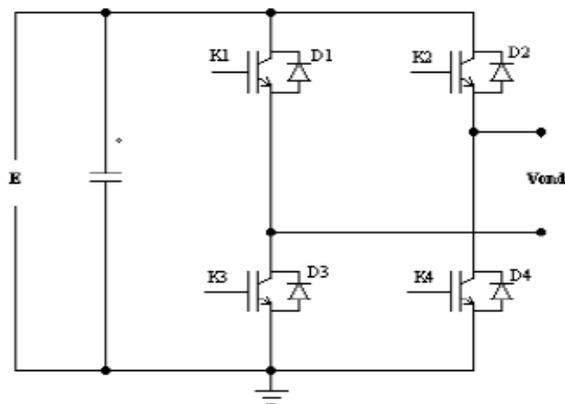


Figure VI.17. Onduleur monophasé

Avec :

E : Tension continue.

V_{ond} : Tension à la sortie de l'onduleur.

K1, K2, K3, K4 : Transistors de puissance

D1, D2, D3, D3 : Diodes de roue libre.

Pour élaborer le modèle de l'onduleur nous allons considérer que :

K1, K4 Sont amorcés et bloqués par un même signal de commande T1/T4

K2, K3 Sont amorcés et bloqués par un même signal de commande T2/T3

La figure suivante représente le schéma de l'onduleur ainsi que sa commande et le filtre de sortie.

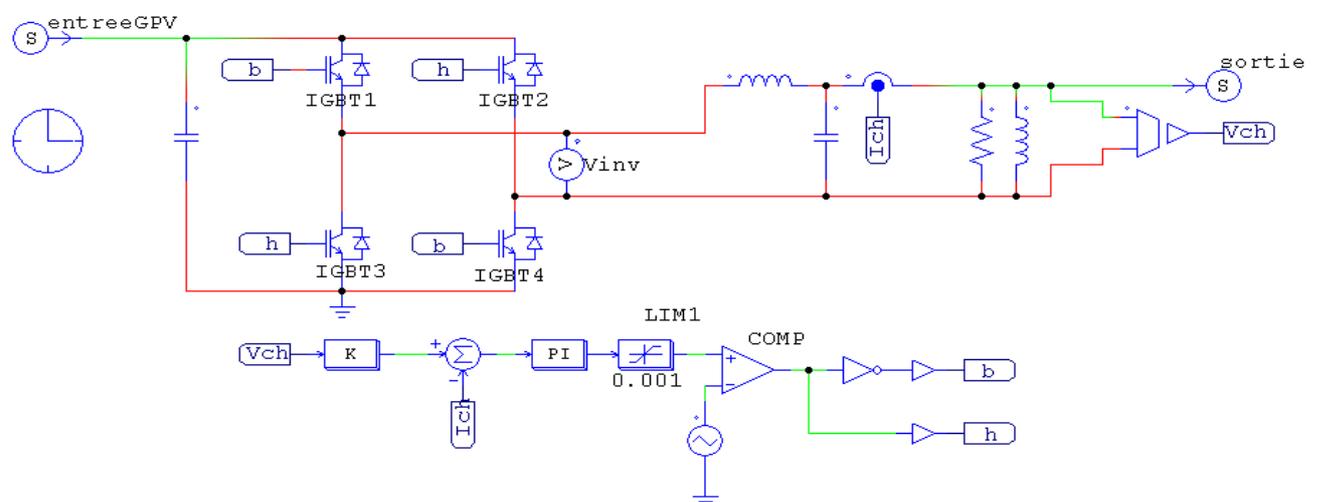


Figure VI.18. Schémas de l'onduleur sous PSIM.

Le filtre utilisé est du type passe-bas dont le rôle principal est d'atténuer les ondulations de la tension et du courant généré par l'onduleur, le schéma du filtre est donné par la figure (VI.19) :

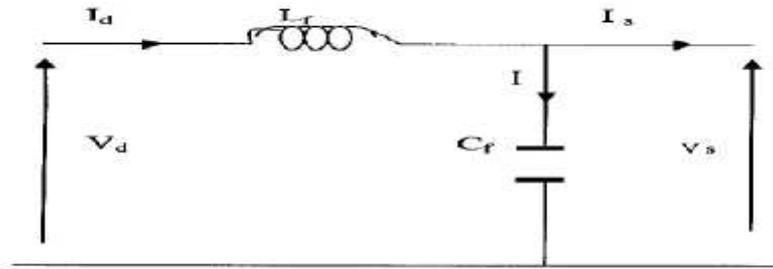


Figure VI.19. Schéma du filtre

Les équations du filtre sont données par :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{V_d - V_s}{L_f} \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{I_d - I_s}{C_f} \end{cases}$$

La fonction de transfert correspondante s'exprime comme :

$$F(S) = \frac{V_s(S)}{V_d(S)} = \frac{1}{L_f C_f \cdot S^2 + 1}$$

Cette fonction de transfert est du deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

Ce filtre permet de filtrer la tension créée par l'onduleur il élimine les harmoniques d'ordre supérieurs et le condensateur C_f permet de générer la puissance réactive nécessaire. Elle peut aussi absorber le courant négatif restitué par la charge.

L'allure du courant et de tension à la sortie de l'onduleur pour différentes fréquences de la porteuse apparaissent sont illustrés par les figures suivantes :

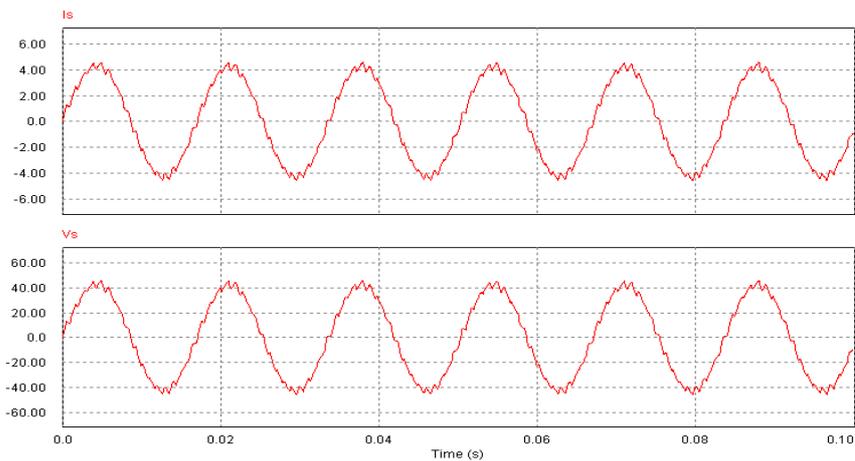


Figure VI.20. Allure du courant et de tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=1\text{kHz}$

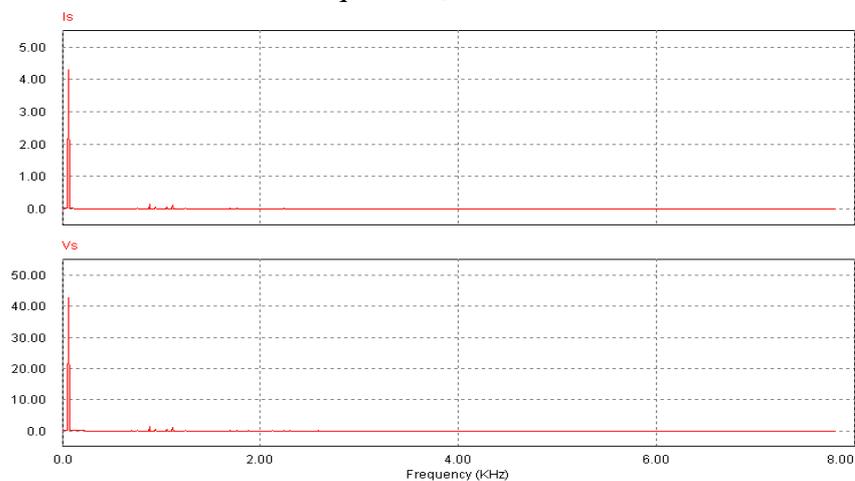


Figure VI.21. Spectre du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=1\text{kHz}$

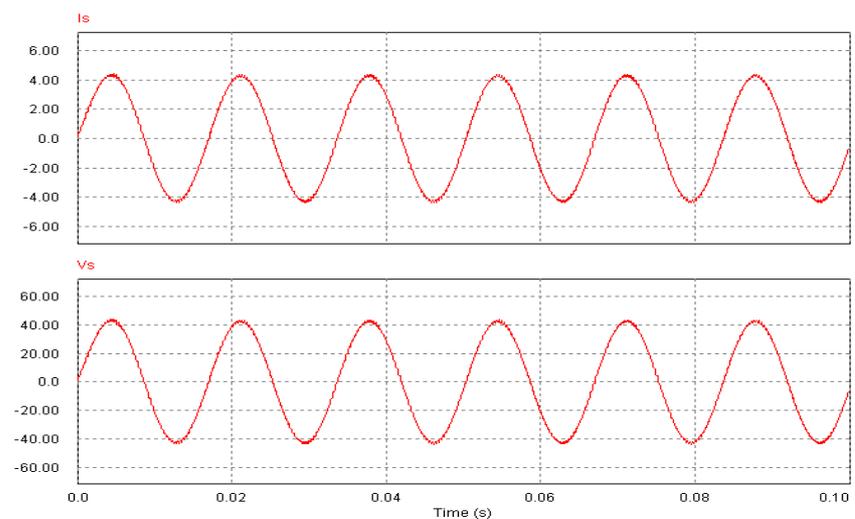


Figure VI.22. Allure du courant et de tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=3\text{kHz}$.

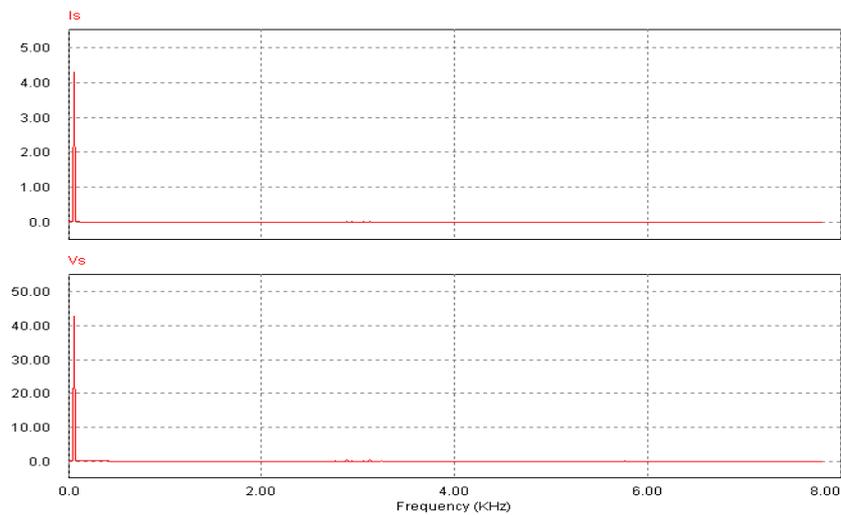


Figure VI.23. Spectre du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=3\text{kHz}$

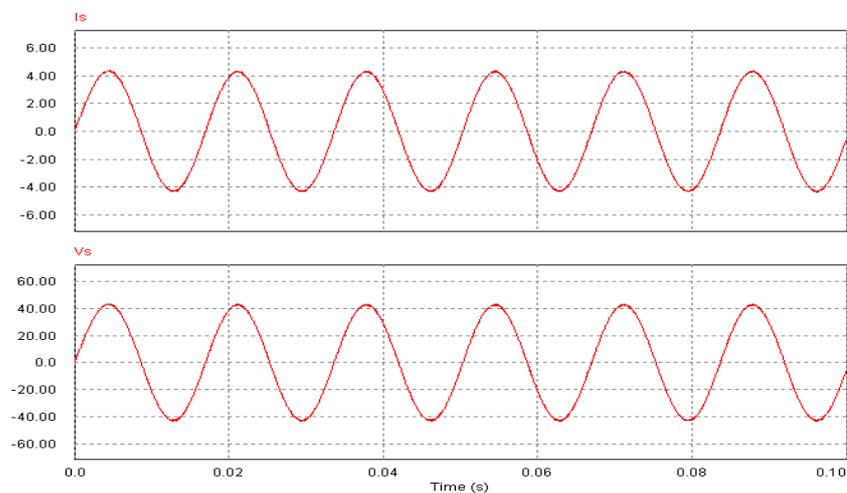


Figure VI.24. Allure du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=5\text{kHz}$

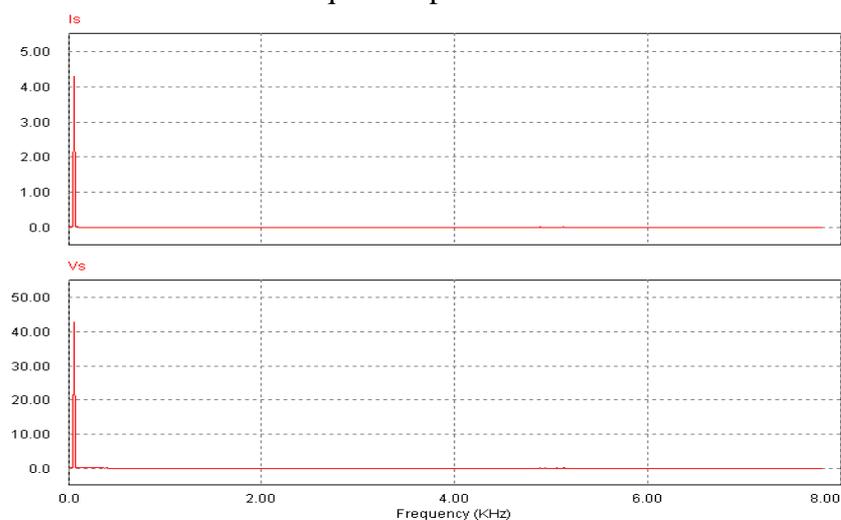


Figure VI.25. Spectre du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur pour une porteuse de fréquence $f_p=5\text{kHz}$.

On constate d'après les figures (VI.21, VI.23, VI.25) que l'allure du courant et la tension à la sortie de l'onduleur dépend de la fréquence de la porteuse (f_p), telle que plus la fréquence de la porteuse est grande et plus la forme du signal du courant et du tension se lisse. Mais il faut tenir compte la fréquence de commutation des interrupteur électronique (IGBT) utilisée en pratique.

VI.5.1. Modélisation de rendements d'onduleur :

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à l'onduleur à celle entrante.

Cette caractéristique est représentée par la fonction [35] :

$$\eta_o = f(P_{ch}) \text{ ou encore } \eta_o = f(\text{taux de charge}).$$

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge (voir Figure IV-18).

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV.

De tels dispositifs devraient délivrer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible.

Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. Le modèle de rendement se traduit par la relation suivante [36]:

$$\eta = \frac{\text{Puissance en sortie}}{\text{Puissance en entrée}} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

La puissance d'entrée $P_{DC} = U_{DC} \times I_{DC}$.

La puissance de sortie $P_{AC} = U_{\text{eff,AC}} \times I_{\text{eff,AC}} \times \cos \varphi$.

Le rendement est un nombre compris entre 0 et 1. On peut aussi l'exprimer en pourcentage.

Dans ce cas, il prend des valeurs comprises en 0 % et 100 %.

Un rendement de 100 % signifie que la puissance délivrée en sortie AC est égale à la puissance fournie par le groupe photovoltaïque en entrée DC. Ce cas idéal ne peut pas exister car il existe des pertes de puissance induite par les composants de l'onduleur. Ainsi, un onduleur présente généralement un rendement de l'ordre de 97 %, c'est-à-dire que 97 % de la puissance en entrée DC est transmise à la sortie AC. Les 3 % restants représentent des pertes par échauffement des composants de l'onduleur.

Dans ce travail, nous allons modéliser le rendement d'un onduleur monophasé avec différentes paramètres qui influent sur ce dernier tel que la tension d'entrée le type du composant de puissance utilisé.

VI .5.1.1. Modélisation du rendement d'un onduleur à transistor MOSFET:

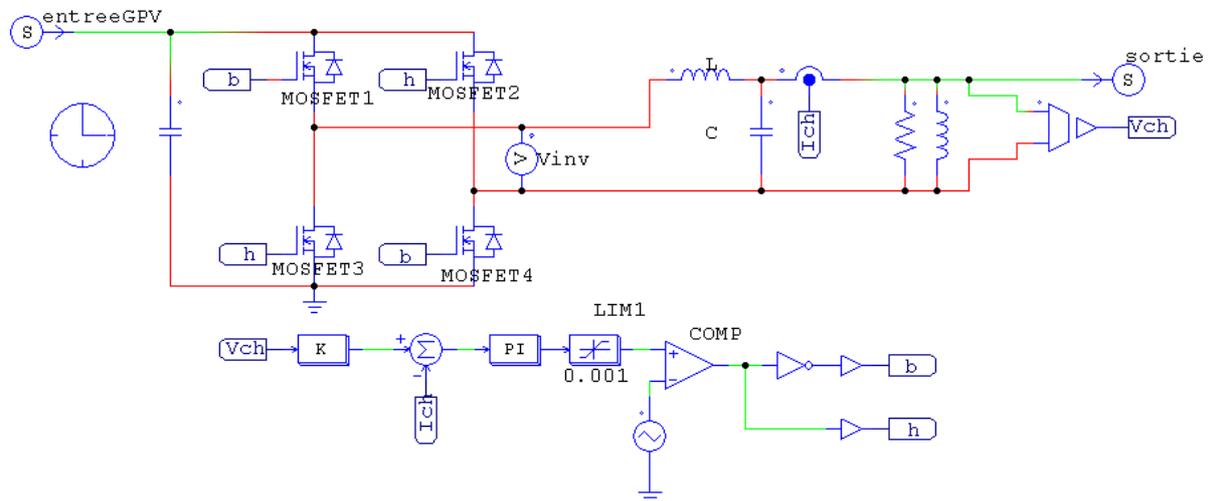


Figure VI.26. Onduleur monophasé à transistor MOSFET.

L'énergie produite par le système PV passe dans l'onduleur qui hache la tension et crée une tension de sortie sinusoïdale de fréquence 50Hz a l'aide d'un PWM et d'un filtre adapté.

VI .5.1.1.1. Mesure effectuées et resultats :

Nous avons vu précédement que le rendement de l'onduleur dependait de la tension d'entrée côté DC et de la puissance de sortie côté AC . cette double dependance est illustrée par la courbe de rendement ci- dessous.

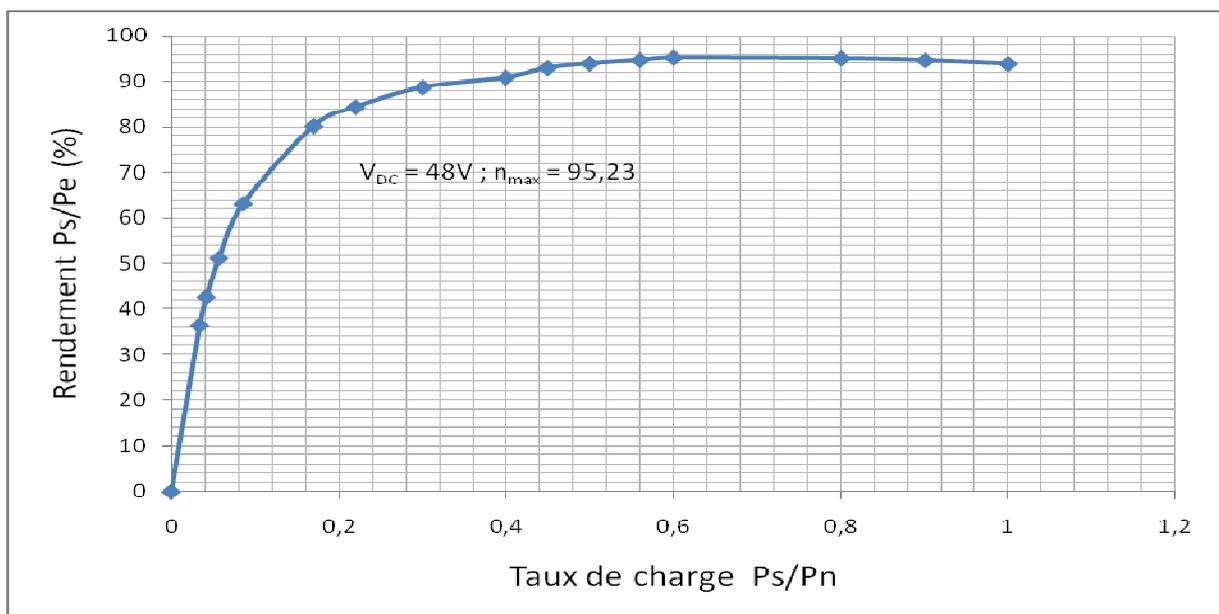


Figure VI.27. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (48v) en fonction de la puissance nominale d'entrée.

Le rendement maximal est la plus grande valeur atteinte par la courbe de rendement (voir courbe de rendement ci-dessus).

La valeur de ce rendement maximal ne rend pas réellement compte de la qualité de l'onduleur, car il est associé à une puissance de sortie donnée. L'onduleur ne fonctionne pas toujours à cette puissance, compte-tenu que le groupe photovoltaïque, au quel il est relié, ne délivre jamais la même puissance (à cause de la variation de l'éclairement incident sur les modules photovoltaïques). De ce fait, l'onduleur ne fonctionne pas tout le temps à son rendement maximal.

Le rendement européen a donc été introduit pour pouvoir calculer un rendement global de l'onduleur, sur toute sa plage (puissance de sortie) de fonctionnement.

La méthode de calcul du rendement européen considère que :

- L'onduleur fonctionne à 5% de sa puissance nominale, pendant 3% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 10% de sa puissance nominale, pendant 6% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 20% de sa puissance nominale, pendant 13% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 30% de sa puissance nominale, pendant 10% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 50% de sa puissance nominale, pendant 48% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 100% de sa puissance nominale, pendant 20% du temps.

On calcule alors le rendement européen de l'onduleur, noté η_{euro} , par la formule suivante :

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * \eta_{5\%} + 0,06 * \eta_{10\%} + 0,13 * \eta_{20\%} + 0,1 * \eta_{30\%} + 0,48 * \eta_{50\%} + 0,2 * \eta_{100\%}.$$

Les valeurs de $\eta_{5\%}$, $\eta_{10\%}$, $\eta_{20\%}$, $\eta_{30\%}$, $\eta_{50\%}$ et $\eta_{100\%}$ se calculent directement sur la courbe de rendement de l'onduleur.

La figure VI.27 en haut représentent une modélisation du rendement de l'onduleur, On remarque que le rendement η augmente moins rapide avec le taux de charge, pour atteindre un rendement maximum de 95.23%.

Graphiquement, nous trouvons:

➤ **Rendement maximal (η_{max}) :**

$$\eta_{\text{max}} = 95.23\%.$$

Le rendement maximum est de 95.23% pour $V_{\text{DC}}=48\text{v}$, à 60% de la puissance nominale d'entrée.

➤ **Rendement européen (η_{euro}) :**

$$\eta_{5\%} = 50\%. \quad \eta_{10\%} = 70\%. \quad \eta_{20\%} = 84\%. \quad \eta_{30\%} = 90\%. \quad \eta_{50\%} = 95\%. \quad \eta_{100\%} = 94\%.$$

Soit un rendement européen qui vaut :

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * \eta_{5\%} + 0,06 * \eta_{10\%} + 0,13 * \eta_{20\%} + 0,1 * \eta_{30\%} + 0,48 * \eta_{50\%} + 0,2 * \eta_{100\%}.$$

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * 44 + 0,06 * 66 + 0,13 * 84 + 0,1 * 90 + 0,48 * 95 + 0,2 * 94.$$

$$\eta_{\text{euro}} = \mathbf{90.60\%}.$$

VI .5.1.2. Modélisation du rendement d'un onduleur à transistor IGBT:

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser la conversion d'énergie électrique :

➤ Première topologie :

La figure suivante présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors IGBT commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par un filtre LC afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence 50Hz.

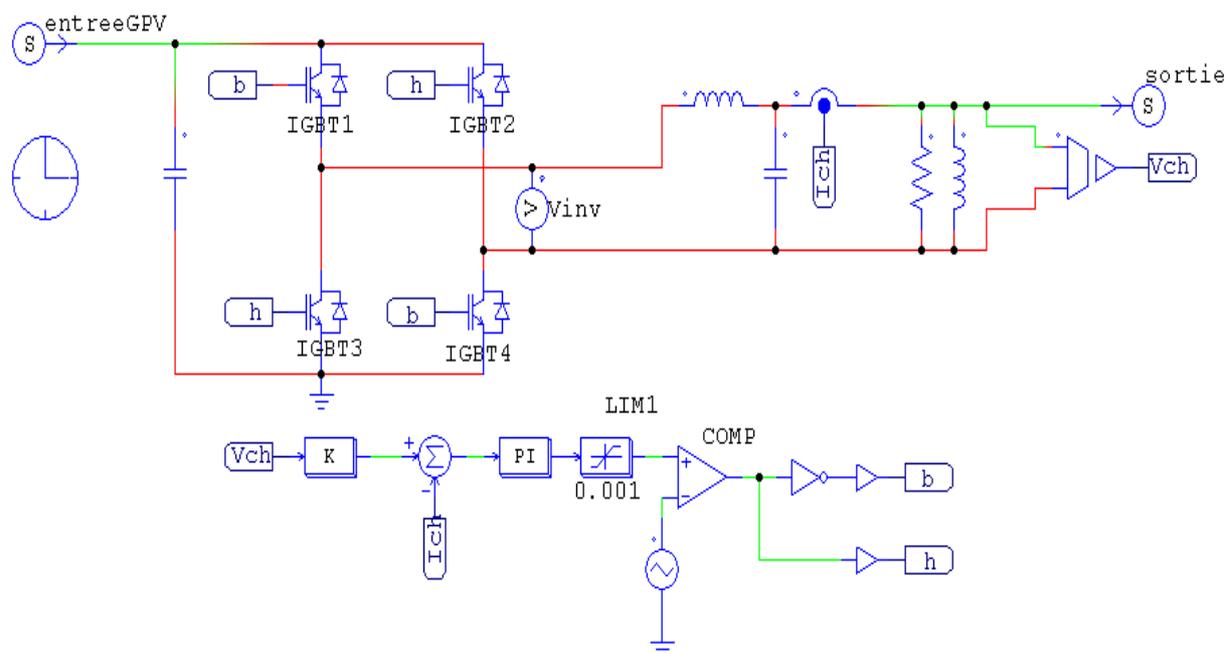


Figure VI.28. Onduleur monophasé à transistor IGBT.

VI .5.1.2.1. Mesure effectuées et résultats :

La figure (IV.29) représente la variation de la tension et du courant à l'entrée et à la sortie de l'onduleur.

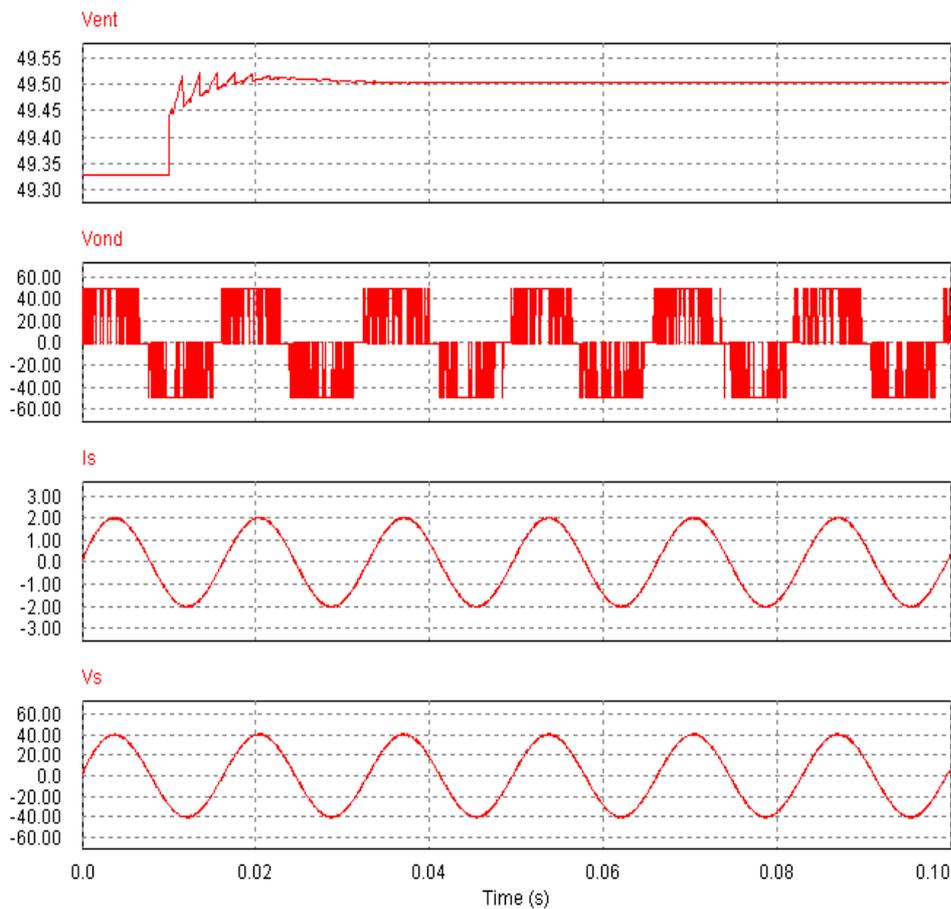


Figure VI.29. Allure de courant et de tension a l'entrée et a la sortie de l'onduleur.

Nous avons vu précédemment que le rendement de l'onduleur dépendait de la tension d'entrée côté DC et de la puissance de sortie côté AC . cette double dépendance est illustrée par la courbe de rendement ci-dessous .

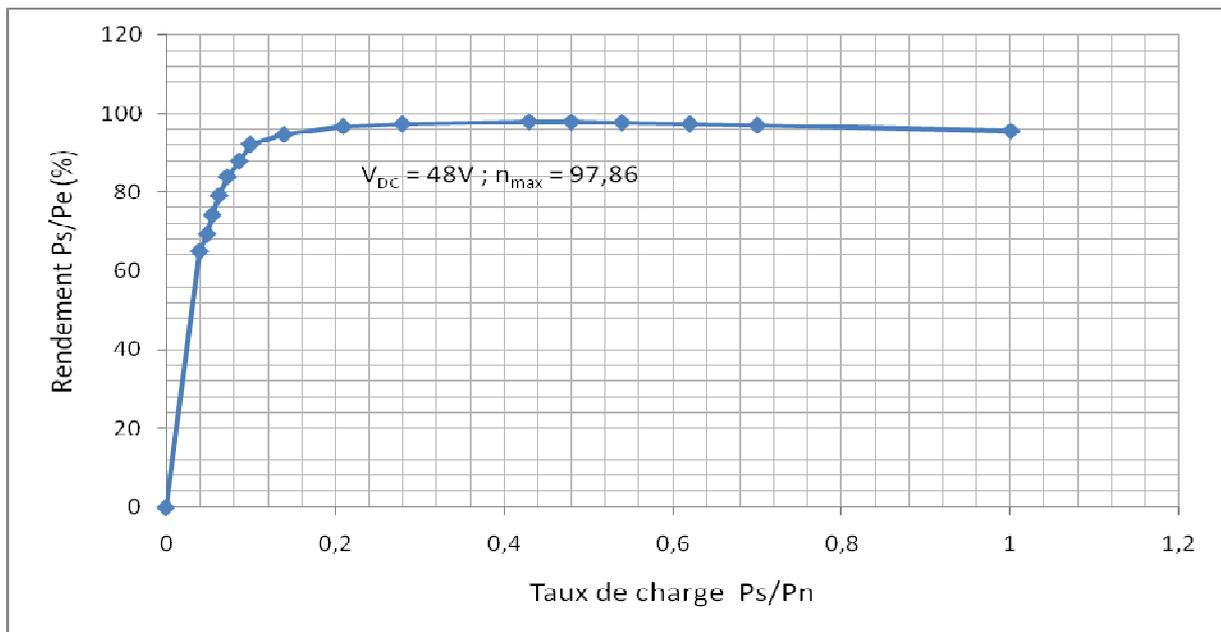


Figure VI.30. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (48v) en fonction de la puissance nominale d'entrée.

La figure VI.30 en haut représentent une modélisation du rendement de l'onduleur, On remarque que le rendement η augmente rapidement avec le taux de charge, pour atteindre un rendement maximum de 97.86%.

Graphiquement, nous trouvons:

➤ **Rendement maximal (η_{\max}) :**

$$\eta_{\max} = 97.86\%.$$

Le rendement maximum est de 97.86% pour $V_{DC}=48v$, à 40% de la puissance nominale d'entrée.

➤ **Rendement européen (η_{euro}) :**

$$\eta_{5\%} = 68\%. \quad \eta_{10\%} = 92\%. \quad \eta_{20\%} = 97\%. \quad \eta_{30\%} = 97\%. \quad \eta_{50\%} = 97\%. \quad \eta_{100\%} = 95\%.$$

Soit un rendement européen qui vaut :

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * \eta_{5\%} + 0,06 * \eta_{10\%} + 0,13 * \eta_{20\%} + 0,1 * \eta_{30\%} + 0,48 * \eta_{50\%} + 0,2 * \eta_{100\%}.$$

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * 68 + 0,06 * 92 + 0,13 * 97 + 0,1 * 97 + 0,48 * 97 + 0,2 * 95.$$

$$\eta_{\text{euro}} = 95.43\%.$$

➤ **Deuxième topologie:**

C'est un circuit à 2 étages. L'énergie produite par le système PV accède au premier étage, constitué du convertisseur élévateur, à travers un filtre LC. Il élève la tension d'entrée et alimente un circuit intermédiaire auquel est relié le pont de sortie qui hache la tension et crée une tension de sortie sinusoïdale de fréquence 50Hz à l'aide d'un PWM et d'un filtre adapté. L'utilisation d'un convertisseur élévateur élargit la gamme de tensions MPP du GPV entre 48 et 96v.

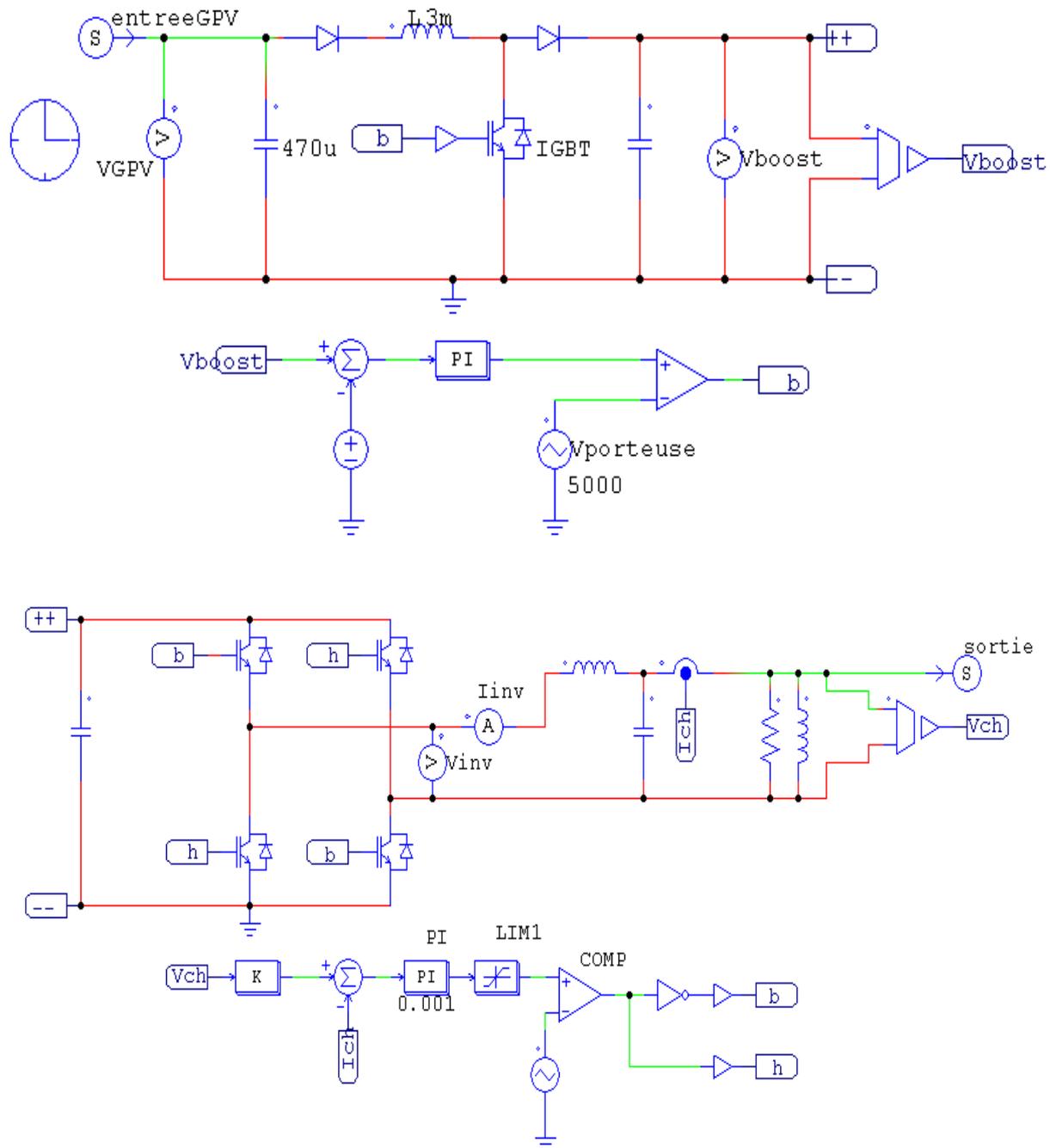


Figure VI.31. Circuit à pont de transistors IGBT avec convertisseur élévateur sous PSIM.

VI .5.1.2.2. Mesure effectuees et resultats :

La figure (Figure VI.32) représente le comportement du convertisseur DC/DC et l'allure de courant et de tension a la sortie de l'onduleur.

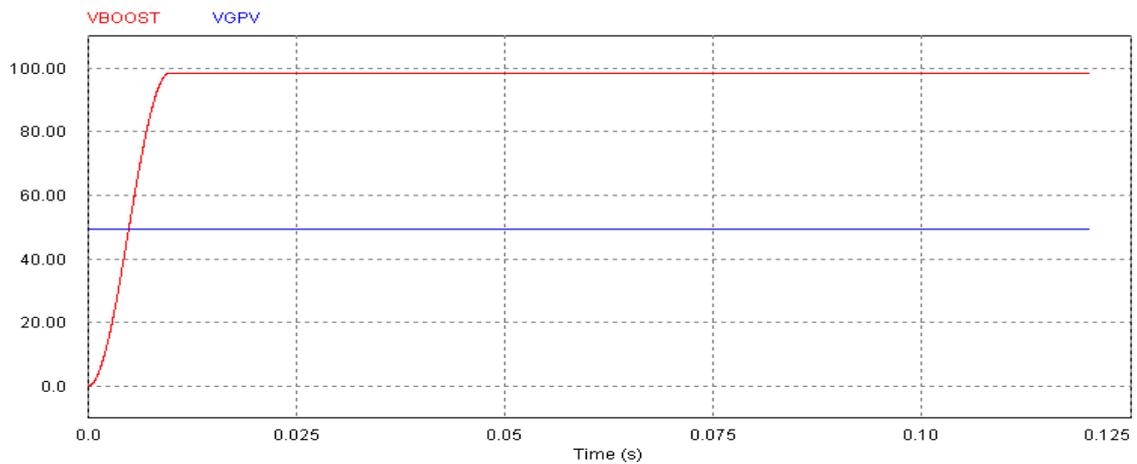


Figure VI.32. Tension à la sortie du convertisseur boost DC/CD

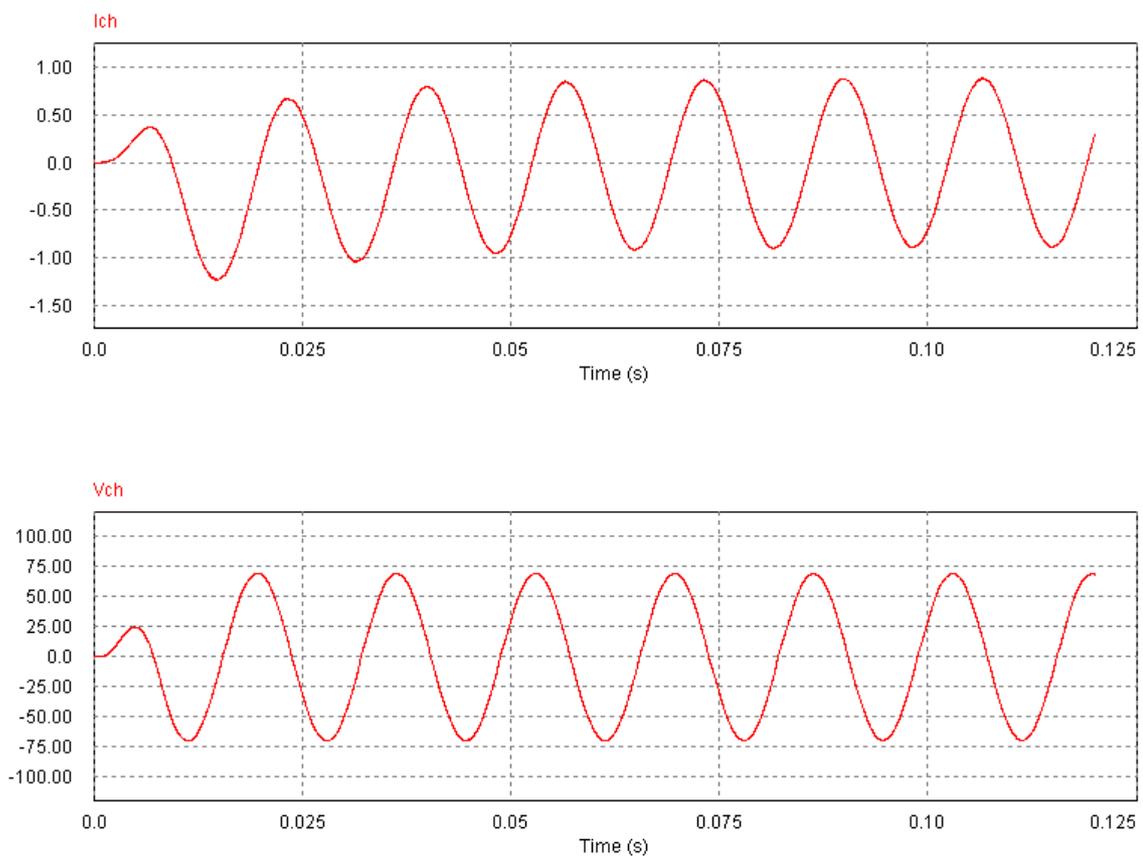


Figure VI.33. Allure de courant et de tension a la sortie de l'onduleur.

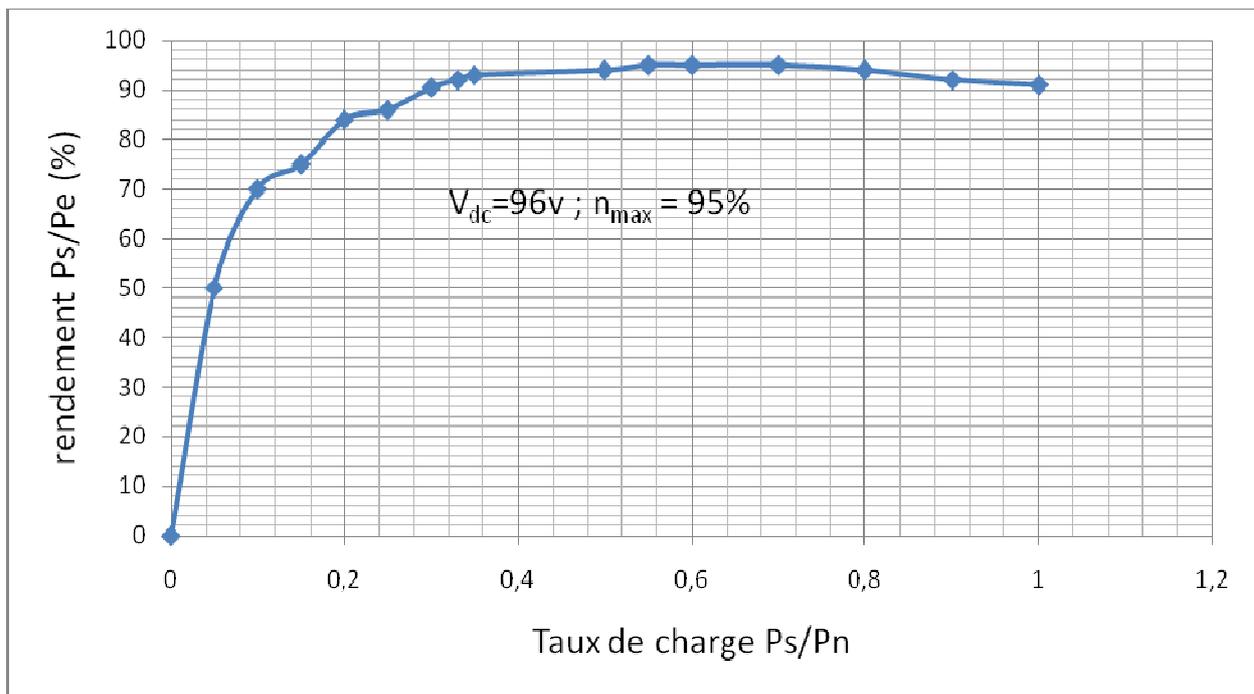


Figure VI.34. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (96v) en fonction de la puissance nominale d'entrée.

Graphiquement, nous trouvons:

➤ **Rendement maximal (η_{\max}) :**

$\eta_{\max} = 95\%$.

Le rendement maximum est de 97.86% pour $V_{DC}=48v$, à 40% de la puissance nominale d'entrée.

➤ **Rendement européen (η_{euro}) :**

$\eta_{5\%} = 50$. $\eta_{10\%} = 70\%$. $\eta_{20\%} = 84\%$. $\eta_{30\%} = 93\%$. $\eta_{50\%} = 95\%$. $\eta_{100\%} = 91\%$.

Soit un rendement européen qui vaut :

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * \eta_{5\%} + 0,06 * \eta_{10\%} + 0,13 * \eta_{20\%} + 0,1 * \eta_{30\%} + 0,48 * \eta_{50\%} + 0,2 * \eta_{100\%}.$$

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * 50 + 0,06 * 70 + 0,13 * 84 + 0,1 * 93 + 0,48 * 95 + 0,2 * 91.$$

$\eta_{\text{euro}} = 91\%$.

VI .5.1. 3. Rendement de l'onduleur IGBT pour différent tension d'entrée :

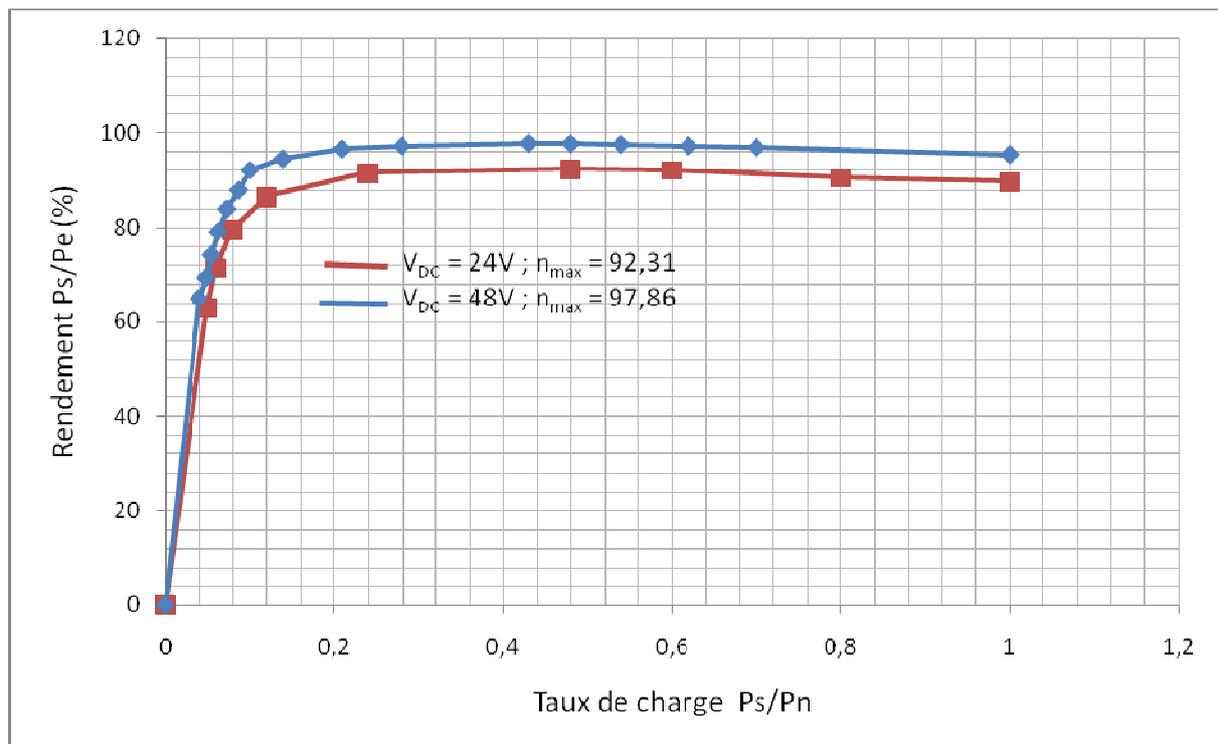


Figure VI.35. Tracé de l'efficacité de l'onduleur à la tension d'entrée (24 et 48v) en fonction de la puissance nominale d'entrée, dont la courbe passant par les maxima et minima d'efficacité.

La figure en haute représente la courbe du rendement d'un onduleur IGBT pour différent tension d'entrée (24 et 48v), on remarque :

Un rendement max est 97,86% ne peut être atteint que pour des valeurs de tension d'entrée autour de 48v et un rendement européen calculé précédemment égale 95.43%.

Un rendement de 92.31% est pour une tension de 24v, et un rendement européen qui vaut :

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * \eta_{5\%} + 0,06 * \eta_{10\%} + 0,13 * \eta_{20\%} + 0,1 * \eta_{30\%} + 0,48 * \eta_{50\%} + 0,2 * \eta_{100\%}.$$

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 * 72 + 0,06 * 84 + 0,13 * 91 + 0,1 * 92 + 0,48 * 92 + 0,2 * 90.$$

$$\eta_{\text{euro}} = 90\%.$$

IV.6. Explications des résultats de la modélisation :

Le rendement d'un onduleur à transistor IGBT dont la tension d'entrée égale 48v s'est avéré être le plus élevé (95.43%). Il est supérieur de 5 % par rapport au rendement des onduleurs à transistor MOSFET (90.60%), et d'environ 6% par rapport au rendement des onduleurs IGBT dont la tension d'entrée égale 24v (89%), et d'environ 3% par rapport au rendement des onduleurs IGBT dont la tension d'entrée égale 96v (91%).

Conclusion :

La décomposition en blocs du système général représenté sur la figure VI.1, nous a permis de modéliser chaque bloc séparément de simuler dans le l'environnement matlab (SIMULINK) et PSIM. La simulation du système global permet de déterminer son comportement dans le temps.

Pour conclure nous avons simulé et comparé différentes structures de conversion DC/AC afin de trouver le meilleur rendement de l'onduleur. Dans tous les cas de simulation (onduleur à MOSFET et onduleur à IGBT), l'onduleur ne fonctionnant pas à charge maximale toute l'année.

Conclusion générale :

Nous avons donc présenté un système de convertisseur qui transforme la tension continue fournie par des modules solaires en une tension alternative de fréquence 50 Hertz dans le but de l'utilisation autonome.

Ce système est composé d'un commutateur à transistor IGBT qui la convertit en une tension alternatif et d'un filtre de type passe-bas dont le rôle principal est d'atténuer les ondulations de la tension et du courant généré par l'onduleur.

Dans ce travail nous avons simulé les différents composants d'un système photovoltaïque, et dans le but de modéliser le rendement d'un onduleur alimenté par un générateur photovoltaïque, donc Nous avons étudié l'influence du type de composant de puissance utilisé dans la commutation et la tension d'entrée sur le rendement de l'onduleur.

Nous résumons les résultats comme suit :

1. Le rendement de l'onduleur à transistor IGBT plus élevé par rapport l'onduleur à transistor MOSFET.
2. La variation de la tension d'entrée de l'onduleur influent sur le rendement de l'onduleur.

Références Bibliographiques

- [1] http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/04/03/photovoltaïque-l-offre-est-aujourd-hui-deux-fois-supérieure-a-la-demande_1679531_3244.html.
- [2] ISSAADI Salim , Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones. Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [3] Cours : Applications photovoltaïques *Par : Dr A. Hamidat.*
- [4] H. Knopf, Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle. Master thesis, Portland State University (1999).
- [5] Cellule photovoltaïque - Wikipédia.htm
- [6] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [7] HANNES KNOPF analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (mppt) methods for a solar powered vehicle, Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University 1999.
- [8] H.J. Möller. Semiconductors for Solar Cells. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.
- [9] Alan L. Fahrenbruch and Richard H. Bube. Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion. Academic Press, Inc, New York, NY, 1983.
- [10] R. Gottschalg, M. Rommel, D. G. In_eld, and H. Ryssel. Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation. In 14th European Photo-voltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Barcelona, Spain, 1997.
- [11] Cours : économie de l'énergie maitrise et application par : Pr M.Haddadi
- [12] TOUAFEK.Khaled, Etude d'un capteur solaire thermique photovoltaïque, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [13] N. Achabou,A Malek , N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [14] D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003
- [15] Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004
- [16] Z.Bachi, S.Elfodil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », Thèse de Magister, université de Blida 2007.

- [17] A.F. Boehinger. Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-4, n°1, pp 102-111, 1968.
- [18] <http://www.photowatt.com>
- [19] W. Kleinkauf, F. Raptis, O. Haas , " Electrification with Renewable Energies, Hybrid Plant Technology for Decentrali- zed, Grid-Compatible Power Supply ", Excerpt from Themes 96/97 Solar Ener- gy Association, Germany.
- [20] SANDIA REPORT, "Status and Needs of Power Electronics for Photovoltaic Inverters", SAND2002-1535, Unlimited Release, Printed, June 2002.
- [21] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, "Etat de l'art des aérogénérateurs », L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect-ecrin, pp. 97-154, 2002.
- [22] Charles R. Sullivan and Matthew J. Powers. *High-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle*. In Proceedings of the 1993 IEEE 24th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC Record – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, pp 574-580, Seattle, WA, USA, June 1993.
- [23] E.Acha, V.G.Agelidis,O.Anaya-Lara,"Power Electronics Control in Electrical Systems" Newnes 2002
- [24] R.KABOUCHE,"Etude et élaboration d'une technique MLI à élimination d'harmoniques optimale", Mémoire de Magister en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2002
- [25] H.Foch, F.Forest et T.Meynard, "Onduleurs de tension. Structures. Principes. Applications" Techniques de l'ingénieur, vol. D31, N0 D3176, Novembre 1998.
- [26] F.Cherfa, " étude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique bt", Mémoire de magister en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004
- [27] S.Berto, A.Paccagnella, M.Ceschia,"Potentials and Pitfalls of FPGA Application in Inverter Drives - a Case Study" in Proc. IEEE ICIT 2003, pp.500-505
- [28] J P Deschamps, G JAntoine Bioul,"Synthesis of Arithmetic Circuits FPGA, ASIC, And Embedded Systems" JOHN WILEY & SONS, 2006.
- [29] E.M.BERKOUK,"Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées alimentées par des convertisseurs directs et indirects. Application gradateurs et onduleurs multiniveaux."Thèse de doctorat. C.N.A.M., Paris 1992
- [30] E.Acha, V.G.Agelidis,O.Anaya-Lara,"Power Electronics Control in Electrical Systems" Newnes 2002

Références Bibliographiques

- [31] Z .Salam S.I.Safie L.J.Yiap "An On-Line Harmonics Elimination PWM Scheme for Three-phase Voltage Source Inverters" Fifth International Conference Power Electronics and Drive Systems IEEE PEDS, Vol.1, 17-20 Nov 2003.
- [32] Violaine Didier, Bruno Gaidon « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l' Art et Etude des Performances » - HESPUL-Aout 2007.
- [33] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, "Power Converters and Control of Renewable Energy Systems", Zhe Chen Aalborg University, Institute of Energy Technology, Denmark.
- [34] M. Haddadi, A. Malek et M.S. Ait-cheikh « *Programme de Calcul d'un Eclairage Domestique Photovoltaïque* », Actes du Premier Séminaire sur la Contribution de l'Energie Solaire dans le Développement Durable - ENERSOLE'01, pp. 221-225, Adrar, 30-31 octobre 2001.
- [35] : M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, université de constantine 2007.
- [36]: A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin » Rev .Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).