

SOMMAIRE :

CHAPITRE I : LES ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES.....	12
I- GENERALITES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES ONDULEURS :	13
I-1- Définition :	13
I-2- Onduleur photovoltaïque :	14
I-3- Classification des onduleurs photovoltaïques :	15
I-3-1- Onduleurs munis d'un transformateur basse fréquence :	16
I-3-2- Onduleurs muni d'un transformateur, haute fréquence :	17
I-3-3- Onduleurs sans transformateur :	18
I-4- Caractéristiques d'un onduleur photovoltaïque :	19
I-4-1- Côté continu de l'onduleur :	19
I-4-1-1- Tension d'entrée maximale :	19
I-4-1-2- Courant d'entrée maximale :	19
I-4-1-3- Puissance d'entrée maximale :	19
I-4-2- Côté alternatif de l'onduleur :	20
I-4-2-1- Puissance AC nominale :	20
I-4-2-2- Puissance AC maximale :	20
I-4-2-3- Courant de sortie minimale :	20
I-4-2-4- Courant de sortie maximale :	20
I-4-2-5- Facteur de puissance :	20
I-4-3- Le rendement de l'onduleur :	21
I-4-3-1- Méthode de calcul du rendement européen :	22
II- TOPOLOGIES DES ONDULEURS :	24
II-1- L'onduleur central :	25
II-2- Les onduleurs strings :	26
II-3- Les onduleurs intégrés aux panneaux :	26
II-4- La conversion multi-string :	26
II-5- Conclusion :	28
chapitre II :Etude et simulation d'un onduleur en pont.	29
.....	29
I- INTRODUCTION :	30
II- ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR PV EN PONT MONOPHASE :	31
II-1- Commande pleine onde :	31
II-1-1- Etude du régime transitoire :	32
II-1-2- Régime permanent :	34
II-1-3- Problématique :	37
II-1-4- Etude harmonique de la commande pleine onde :	38
II-1-5- Conclusion.....	41

<i>II-2- Commande MLI :</i>	41
II-2-1- Etude de la commande des interrupteurs :	41
II-2-1-1- Stratégie de commande :	41
II-2-1-2- Réalisation de la commande :	41
II-2-2- Etude du fonctionnement :	44
II-2-2-1- Commande MLI :	44
II-2-2-2- Simulation :	44
II-2-2-3- Etude spectrale :	46
II-2-3-1- Influence de la fréquence de découpage :	46
II-2-3-2- Influence de l'amplitude de modulation :	48
<i>II-3- Filtrage :</i>	49
II-3-1- Etude du filtre passe-bas RC :	49
II-3-2- Influence d'une charge sur le filtre RC :	52
<i>II-4- Conclusion :</i>	56
CHAPITRE III : ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU ..	
.....	57
I- INTRODUCTION :	58
II- CONVERTISSEUR DC-DC TYPE HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST) :	59
<i>II-1- principe de fonctionnement :</i>	59
<i>II-2- équation d'entrée/ sortie d'un convertisseur survolteur :</i>	61
III- SUIVEUR DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE(MPPT) :	62
<i>III-1- Principe de l'algorithme de recherche de PPM :</i>	62
<i>III-2- Code C de l'algorithme de recherche :</i>	63
IV- SIMULATIONS ET RESULTATS :	64
<i>IV-1- Première simulation :</i>	66
<i>IV-2- Effet de l'ensoleillement et de la température:</i>	67
<i>IV-3- Simulation du système PV entier:</i>	72
<i>IV-4- Conclusion :</i>	75
Conclusion générale.....	76
Bibliographie.....	77

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : SCHEMA SYMBOLIQUE DE L'ONDULEUR.	13
FIGURE 1.2 : ONDULEUR DE COURANT (ENTREE COURANT CONTINUE, SORTIE TENSION ALTERNATIF), ONDULEUR DE TENSION (ENTREE TENSION CONTINU, SORTIE COURANT ALTERNATIF).	14
FIGURE 1.3 : COURBE CARACTERISTIQUE D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.	14
FIGURE 1.4 : ONDULEUR EN PONT AVEC TRANSFORMATEUR BF [3].	16
FIGURE 1.5 : ONDULEUR AVEC TRANSFORMATEUR HF.	17
FIGURE 1.6 : ONDULEUR SANS TRANSFORMATEUR.	18
FIGURE 1.7 : PARTIE DC ET PARTIE AC D'UN ONDULEUR.	19
FIGURE 1.8 : DEPHASAGE ENTRE COURANT ET TENSION (FACTEUR DE PUISSANCE) [2].	21
FIGURE 1.9 : COURBE DE RENDEMENT POUR TROIS TENSIONS D'ENTREE.	22
FIGURE 1.10 : FICHE TECHNIQUE DE L'ONDULEUR SUNNY-BOY.	23
FIGURE 1.11 : CALCUL GRAPHIQUE DE L'ONDULEUR.	24
FIGURE 1.12 : SCHEMAS DE PRINCIPE DE DIFFERENTES TOPOLOGIES [4].	25
FIGURE 1.13 : ARCHITECTURE DE CONVERSION MULTI-STRING.	27
FIGURE 1.14 : NOUVELLE STRUCTURE DE CONVERSION MULTI-STRING.	27
FIGURE 2.1 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ONDULEUR EN PONT.	31
FIGURE 2.2 : SIGNAL DE COMMANDE POUR H_1 ET H_4	32
FIGURE 2.3 : SIGNAL DE COMMANDE POUR H_2 ET H_3	32
FIGURE 2.4 : INTERRUPTEURS H_1 ET H_3 EN CONDUCTION.	32
FIGURE 2.5 : TENSION ET COURANT EN REGIME PERMANENT [8].	34
FIGURE 2.6 : PREMIERE PHASE DE RECUPERATION	35
FIGURE 2.7 : PREMIERE PHASE D'ALIMENTATION.	36
FIGURE 2.8 : DEUXIEME PHASE DE RECUPERATION.	36
FIGURE 2.9 : DEUXIEME PHASE D'ALIMENTATION.	37
FIGURE 2.10 : FORMES DE $U(T)$ ET $I(T)$ A LA SORTIE DU PONT.	37
FIGURE 2.11 : SYSTEME LINEAIRE (CHARGE RL).	39
FIGURE 2.12 : SPECTRE DE FREQUENCE DE LA COMMANDE PLEINE ONDE.	40
FIGURE 2.13 : SCHEMA ELECTRIQUE DE LA COMMANDE MLI.	42
FIGURE 2.14 : SIGNAL DE MODULATION (V_1), SIGNAL TRIANGULAIRE « PORTEUSE » (V_2).	42
FIGURE 2.15 : LA PREMIERE COMMANDE.	43

FIGURE 2.16 : SCHEMA ELECTRIQUE DE LA DEUXIEME COMMANDE.	43
FIGURE 2.17 : COMMANDE INVERSE (COMMANDE 2).....	44
FIGURE 2.18 : SCHEMA D'UN PONT COMPLET COMMANDE PAR UNE COMMANDE MLI.	44
FIGURE 2.19 : ALLURES TENSION ET COURANT AUX BORNES DE LA CHARGE.	45
FIGURE 2.20: SPECTRE DE TENSION (FP=2 KHZ, VM= 4.5V).....	46
FIGURE 2.21 : TENSION ET COURANT DE SORTIE POUR UNE FP=6 KHZ ET VM=4.5V.....	47
FIGURE 2.22 : SPECTRE DE TENSION POUR UNE FREQUENCE PORTEUSE DE 6KHZ.....	47
FIGURE 2.23 : TENSION ET COURANT DE SORTIE POUR (FP=6 KHZ, VM=3V).....	48
FIGURE 2.24 : SPECTRE DE FREQUENCE POUR (FP=6 KHZ, VM=3V).....	49
FIGURE 2.25 : SCHEMA ELECTRIQUE D'UN FILTRE PASSE BAS RC.....	50
FIGURE 2.26 : GAIN ET PHASE DU FILTRE $F_c= 100$ HZ.	52
FIGURE 2.27 : FILTRE RC CHARGE PAR UNE CHARGE RESISTIVE RC.	52
FIGURE 2.28 : PHASE ET GAIN D'UN FILTRE CHARGE PAR UNE CHARGE RESISTIVE.	54
FIGURE 2.29 : ONDULEUR AVEC FILTRE RC CHARGE PAR UNE CHARGE RESISTIVE.	54
FIGURE 2.30 : SPECTRE DE TENSION DE SORTIE APRES FILTRAGE.	55
FIGURE 2.31 : TENSION ET COURANT QUASI-SINUSOÏDAUX DE FREQUENCE 50HZ.....	56
FIGURE 3.1 : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE [11].	58
FIGURE 3.2 : SCHEMA ELECTRIQUE DE BASE D'UN HACHEUR SURVOLTEUR.	59
FIGURE 3.3 : SIGNAL RAPPORT CYCLIQUE DE LA COMMANDE DE L'INTERRUPTEUR S ($\alpha =$ THT ETANT LE RAPPORT CYCLIQUE).	59
FIGURE 3.4 : CONFIGURATION D'UN CONVERTISSEUR DC-DC SUIVANT L'ETAT DE L'INTERRUPTEUR.	60
FIGURE 3.5 : PRINCIPE GENERAL D'UNE COMMANDE MPPT.	62
FIGURE 3.6 : ALGORITHME P&O DE RECHERCHE DU PPM.[2].....	63
FIGURE 3.7 : PROGRAMME C DE L'ALGORITHME DE LA RECHERCHE DE PPM [12].....	64
FIGURE 3.8 : SCHEMA ELECTRIQUE DU SYSTEME ETUDIE SOUS PSIM.	65
FIGURE 3.9: MODELE D'UN PANNEAU SOLAIRE DONNE PAR LE LOGICIEL PSIM.	65
FIGURE 3.10 : RESULTAT DE LA PREMIERE SIMULATION.	66
FIGURE 3.11 : TENSION D'ENTREE(EN ROUGE) ET DE SORTIE (EN BLEU) DU CONVERTISSEUR DC-DC.	67
FIGURE 3.12 : DEUXIEME SIMULATION ($800W/M^2, 30^\circ$).....	68
FIGURE 3.13 : RESULTAT DE LA DEUXIEME SIMULATION.....	68
FIGURE 3.14 : ALLURE DE TENSION D'ENTREE SORTIE DE LA DEUXIEME SIMULATION	69
FIGURE 3.15 : VARIATIONS DE LA TEMPERATURE (40, 60 ET 80 °C) POUR ENSOLEILLEMENT FIXE 800 W/M^2	70



FIGURE 3.16 : VARIATIONS DE L'ENSOLEILLEMENT (1000, 800 ET 600 W/M ²) POUR UNE TEMPERATURE FIXE 50°C.	71
FIGURE 3.17 : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE.	72
FIGURE 3.18 : SCHEMA ELECTRIQUE DU SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU.....	72
FIGURE 3.19 : PUISSANCE MAXIMALE AUX BORNES DU PANNEAU (EN ROUGE) ET PUISSANCE MOYENNE A LA SORTIE DU CONVERTISSEUR DC-DC (EN BLEU).	73
FIGURE 3.20 : ALLURES DE LA TENSION ET DU COURANT AUX BORNES DE LA CHARGE, VALEUR EFFICACE (RMS) ET FACTEUR DE PUISSANCE (FP).	74

SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS :

DC-DC	: continu-continu.
DC-AC	: continu-alternatif.
GPV	: Générateur photovoltaïque
I _{cc}	: courant en court-circuit.
MPP	: Maximum Power Point
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
PV	: Photovoltaïque.
P&O	: Perturbe & Observe.
V _{c0}	: tension en circuit ouvert.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour leur développement vu que les besoins énergétiques ne cesseront d'augmenter.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources traditionnelles comme le pétrole, le gaz ... etc. L'utilisation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution qui présente des dangers sur l'environnement. De plus cette consommation excessive réduit les réserves de ce type d'énergie d'une façon dangereuse pour les générations futures.

Vue la condamnation à la disparition des sources d'énergie fossiles, l'exploration des domaines des sources à énergies renouvelables est d'une importance majeure pour les années à venir. Les énergies renouvelables sont de plusieurs types à savoir : hydraulique, éolienne, photovoltaïque Notre projet s'inscrit dans la filière photovoltaïque.

Chaque jour le soleil fournit une énergie lumineuse importante à la terre. Le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons cette énergie n'est pas directement exploitable. C'est pourquoi nous devons recourir à des procédés de conversion de cette énergie électrique. La première étape est donc de convertir l'énergie lumineuse du soleil en une énergie électrique, cette conversion se fait à l'aide des cellules solaires photovoltaïques, ensuite vient l'étape de mise en forme et d'adaptation aux normes en vigueur afin de profiter au maximum de cette énergie.

Dans ce contexte général, notre projet s'intéresse plus particulièrement au rôle de l'onduleur dans un système photovoltaïque. Nous désignons par système photovoltaïque l'ensemble d'éléments constituant une application industrielle ou domestique tirant son énergie électrique d'un générateur photovoltaïque. Bien sûr, dans ce système l'onduleur est un élément important dans la conversion de l'énergie électrique continue produite par les panneaux photovoltaïques en une énergie alternative qui sera utilisée directement ou injectée dans le réseau.

Notre rapport se divise en trois chapitres. L'objectif du premier chapitre est de présenter le principe de fonctionnement, la classification et les caractéristiques des onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques. On y présentera aussi un état de l'art actuel des différentes architectures de gestion de l'énergie photovoltaïque afin de bien comprendre les enjeux et les perspectives de l'électronique de puissance dans ces applications.

Le second chapitre présente l'étude et la simulation d'un onduleur PV en pont sous le logiciel Power Sim (PSIM).

Le troisième chapitre, sera consacré à l'étude et simulation, sous PSIM, d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique via deux étages d'adaptation à savoir le convertisseur DC-DC et le convertisseur DC-AC de notre onduleur.

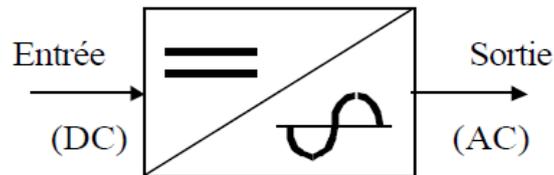
Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés.

CHAPITRE I : LES ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES

I- Généralités et principe de fonctionnement des onduleurs :

I-1- Définition :

Comme le montre la figure 1.1, les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatifs permettant de produire une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue



Convertisseur Continu (DC) - Alternatif (AC)

Figure 1.1 : Schéma symbolique de l'onduleur.

Les onduleurs sont utilisés pour :

- ✚ Fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquences et amplitudes variables. c'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif par exemple.
- ✚ Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. C'est le cas des alimentations de sécurité destinées à remplacer le réseau en cas de coupure. Dans ce cas, l'énergie est stockée dans les batteries sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue. Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatifs associés sont des onduleurs de courant. Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatifs associés sont des onduleurs de tension. De plus, la nature de la source continue impose la nature du récepteur alternatif. Puisque la plupart de nos applications électriques actuelles fonctionnent en courant alternatif, l'utilisation d'un onduleur de tension est alors nécessaire. La figure 1.2 représente les entrées sorties des onduleurs :

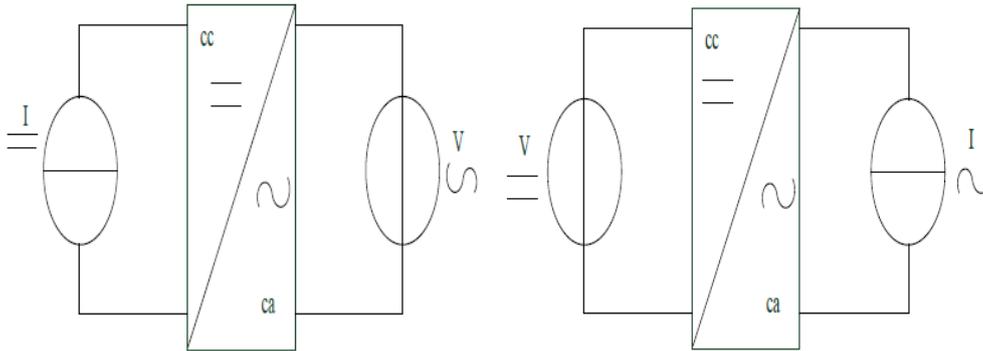


Figure 1.2 : onduleur de courant (entrée courant continue, sortie tension alternatif),
onduleur de tension (entrée tension continu, sortie courant alternatif).

I-2- Onduleur photovoltaïque :

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion continue/alternatif est le même.

En effet, le générateur photovoltaïque (GPV) a une courbe caractéristique $I(V)$ non linéaire (figure 1.3) :

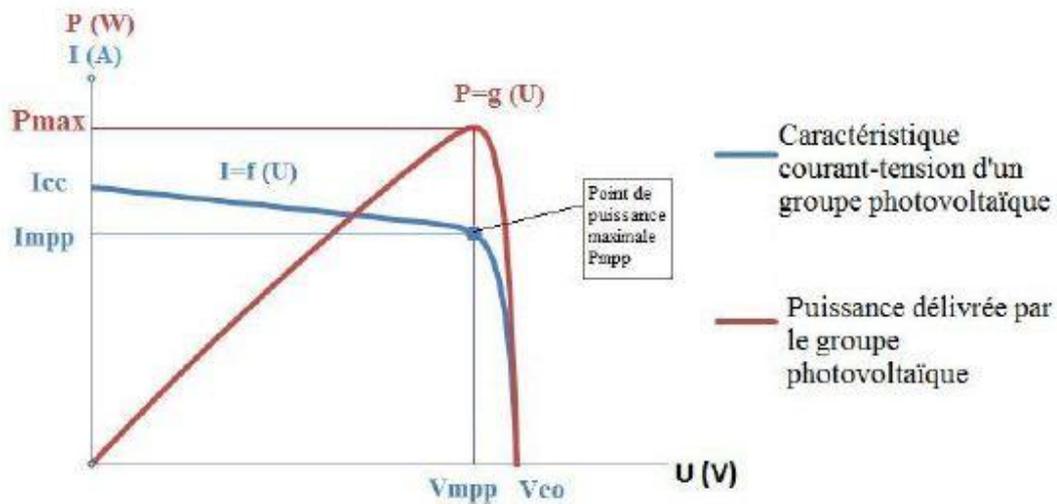


Figure 1.3 : courbe caractéristique d'un module photovoltaïque.

Pour un éclairement et une température donnés, le courant en court-circuit I_{cc} est pratiquement constant (le système étant assimilable à une source de courant), tandis qu'en circuit-ouvert la tension V_{co} est pratiquement constante (le système étant assimilable à une source de tension). On peut dire donc que le générateur photovoltaïque n'est ni vraiment une source de tension ni une

source de courant. Ce qui rend le choix de l'onduleur (de tension ou de courant) un peu difficile. D'après la caractéristique $P(V)$ ci-dessus, le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance est maximale PPM (ou MPP pour Maximum Power Point). En régime permanent, la tension et le courant sont considérés comme constants et donc l'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentielle. [1]

Donc une deuxième tâche ou fonctionnalité de l'onduleur photovoltaïque est la poursuite du PPM du système pour assurer l'extraction du maximum de puissance à chaque instant (cette partie sera traitée dans le troisième chapitre).

I-3- Classification des onduleurs photovoltaïques :

Les onduleurs PV sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques (transistors de puissance) comme le bipolaire, le MOSFET ou l'IGBT (transistor bipolaire à grille isolé) [2].

Par un jeu de commutation commandée le plus souvent, par une modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM en anglais), l'énergie électrique continue fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau.

En résumé, l'onduleur de tension impose à sa sortie une tension sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions. Cette tension ne pose aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais elle est incompatible avec la tension sinusoïdale du réseau. On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (ici on travaille avec le monophasé) un filtre qui permet à l'onduleur de fournir au réseau un courant et une tension sinusoïdaux.

Les onduleurs sont classés en trois catégories en fonction des choix techniques retenus par les fabricants [3]:

- ✚ Les onduleurs munis d'un transformateur basse fréquence 50 Hz.
- ✚ Les onduleurs munis d'un transformateur, haute fréquence.
- ✚ Les onduleurs sans transformateurs.

I-3-1- Onduleurs munis d'un transformateur basse fréquence :

Le schéma de principe d'un tel onduleur est le suivant :

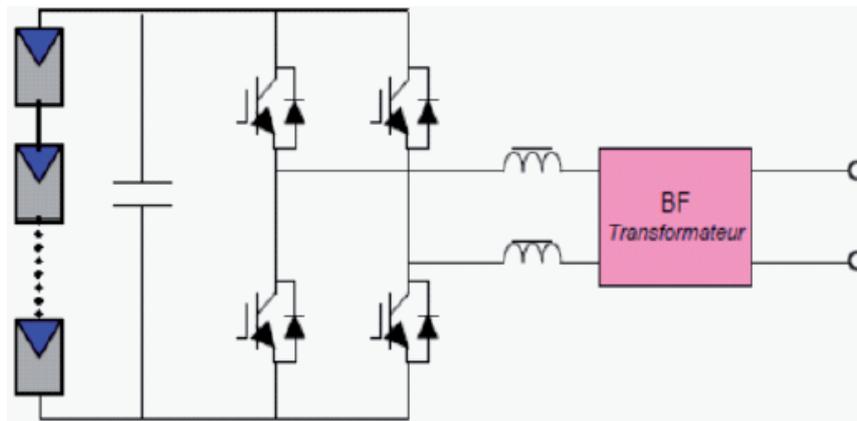


Figure 1.4 : onduleur en pont avec transformateur BF [3].

✚ Principe de fonctionnement :

Les modules photovoltaïques sont raccordés en entrée de l'onduleur pour constituer un générateur photovoltaïque. Ensuite, un pont de transistor de puissance qui convertit le courant et la tension continus fournis par le générateur PV, ou par le convertisseur DC/DC s'il existe en un courant et une tension alternatifs en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion comme commande dont le fondamental est à la fréquence de 50 Hz. Puis un filtre passe bas qui permet d'éliminer les harmoniques à hautes fréquences pour obtenir une onde sinusoïdale et finalement un transformateur, basse fréquence augmente la tension à la sortie de l'onduleur jusqu'au niveau de celle du réseau 220V. Ce transformateur assure une isolation galvanique entre le générateur photovoltaïque et le réseau. [3]

Cette structure est la plus utilisée dans les systèmes photovoltaïque vu sa simplicité et son rendement.

I-3-2- Onduleurs muni d'un transformateur, haute fréquence :

La figure 1.5 présente le schéma du principe de cet onduleur :

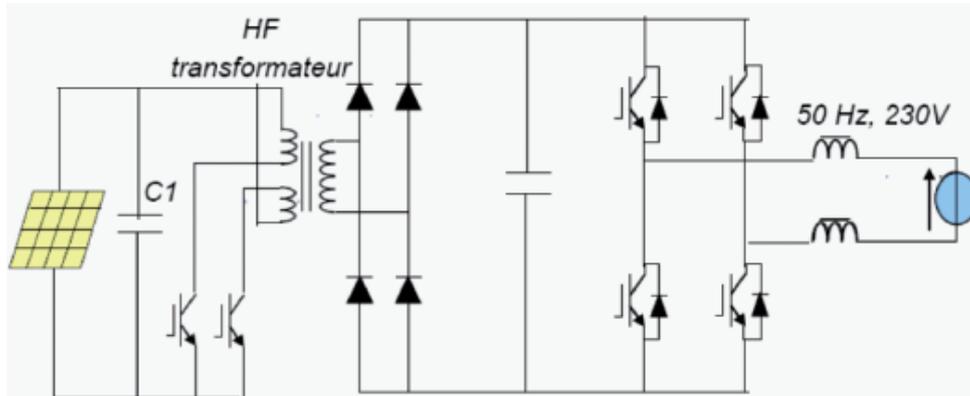


Figure 1.5 : onduleur avec transformateur HF.

✚ Principe de fonctionnement :

Pour cette structure on traite d'abord la tension du générateur PV, cette tension passe par un convertisseur DC/DC Fly-back qui:

- convertit le courant continu fourni par les panneaux en courant alternatif avec un niveau de tension désiré en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion avec une fréquence de découpage très élevée (entre 16 à 20Khz).
- Dispose d'un transformateur HF qui augmente la tension à un niveau nécessaire pour l'onduleur et assure une isolation galvanique.
- Dispose d'un pont redresseur pour transformer le courant alternatif en courant continue afin d'attaquer l'onduleur en pont.

Après ce convertisseur DC/DC, on trouve un pont de transistor de puissance qui convertit le courant continu fourni en courant alternatif en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion dont le fondamental est à la fréquence de 50 Hz.[3]. Cette structure est complexe à réaliser vu le nombre d'étages qui la constitue, de plus, elle présente des pertes importantes au niveau du transformateur HF.

I-3-3- Onduleurs sans transformateur :

Le schéma du principe de l'onduleur sans transformateur est le suivant :

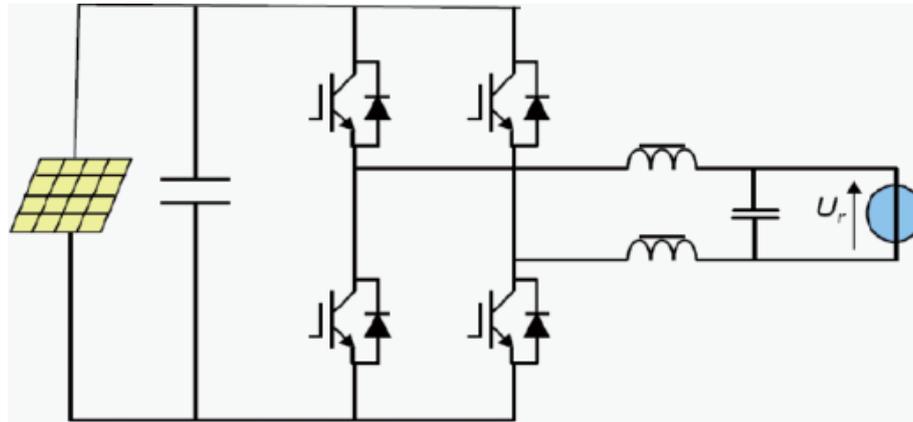


Figure 1.6 : onduleur sans transformateur.

✚ Principe de fonctionnement :

Le principe de ces onduleurs est simple, ici le pont convertit le courant continu fourni en un courant alternatif toujours en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion dont le fondamental est à la fréquence de 50 Hz. Ensuite un filtre élimine les harmoniques à hautes fréquences pour obtenir une onde sinusoïdale.

Remarque :

On remarque que tous les circuits présentés disposent en entrée d'un condensateur de forte capacité. Ce condensateur a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable. De plus, il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension à la sortie du générateur photovoltaïque. Dans la pratique on trouve les condensateurs électrolytiques qui présentent des valeurs de capacités importantes [1].

I-4- Caractéristiques d'un onduleur photovoltaïque :

Dans une installation photovoltaïque, l'onduleur occupe une place centrale. On distingue la partie continue, notée DC (Direct Curent), et la partie alternative notée AC (Alternating Curent).

Au Maroc, les caractéristiques du réseau sont les suivantes : tension efficace de 220 V et Fréquence de 50 Hz.

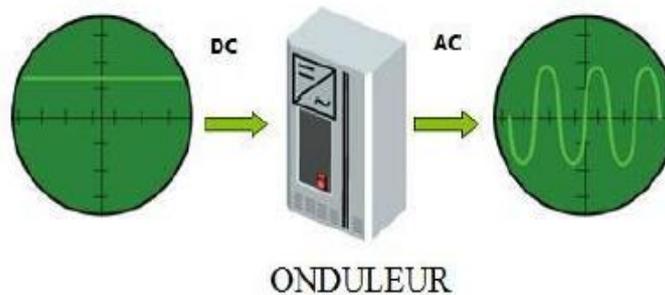


Figure 1.7 : partie DC et partie AC d'un onduleur.

I-4-1- Côté continu de l'onduleur :

I-4-1-1- Tension d'entrée maximale :

La tension DC maximale correspond à la tension maximale que peut supporter l'onduleur. Lorsque la tension délivrée par le groupe photovoltaïque dépasse la valeur de la tension maximale admissible par l'onduleur, ce dernier sera détruit.

I-4-1-2- Courant d'entrée maximale :

Le courant d'entrée maximale correspond au courant que peut supporter l'onduleur côté DC.

I-4-1-3- Puissance d'entrée maximale :

Cette puissance correspond à la puissance maximale que peut recevoir l'onduleur. Elle provient des modules photovoltaïques qui débitent un courant continu I et une tension continue U aux bornes d'entrée de l'onduleur.

Le produit de ces deux grandeurs correspond à la puissance maximale injectée côté DC dans l'onduleur.

Lors du dimensionnement, il faut tenir compte de toutes ces grandeurs au risque d'endommager l'onduleur.

I-4-2- Côté alternatif de l'onduleur :

I-4-2-1- Puissance AC nominale :

C'est la puissance que l'onduleur peut injecter en permanence.

I-4-2-2- Puissance AC maximale :

C'est la puissance que l'appareil peut injecter sur une courte période. (Par exemple 30 min, avant l'échauffement des composants). [2]

I-4-2-3- Courant de sortie minimale :

C'est l'intensité du courant que l'onduleur débite normalement dans le réseau.

I-4-2-4- Courant de sortie maximale :

C'est l'intensité maximale du courant que l'onduleur peut débiter dans le réseau. Le courant en sortie de l'onduleur est de fréquence 50 Hz.

I-4-2-5- Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est défini par le rapport entre la puissance active P (en watts) et la puissance apparente S (en voltampères). Sa valeur varie entre 0 et 1 et il n'a pas d'unité :

$$FP = \frac{\text{puissance active}}{\text{puissance apparente}}$$

Dans un circuit alternatif ce facteur représente la valeur du déphasage angulaire entre la tension et l'intensité du courant.

Puisque la puissance active est : $P = U \times I \times \cos(\varphi)$

Et la puissance apparente se calcule en faisant le produit en valeurs

$$\text{efficaces } S = U \times I$$

$$\text{Donc : } FP = \cos(\varphi)$$

Les figures suivantes montrent le déphasage entre un courant et une tension pour différents facteur de puissance :

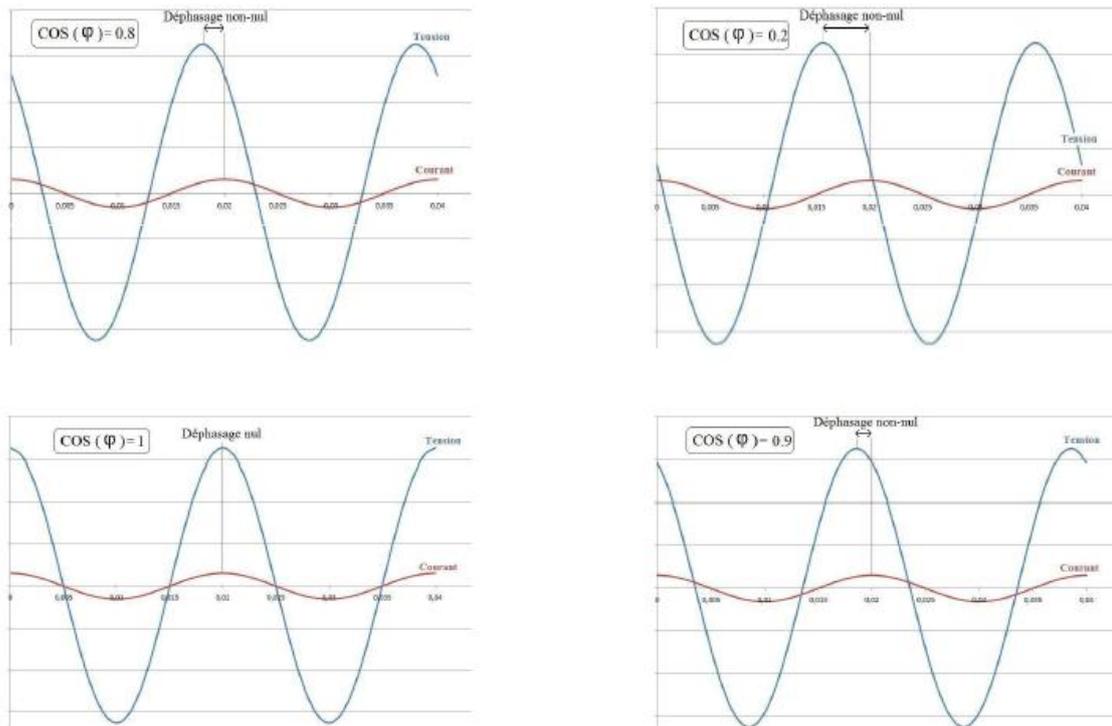


Figure 1.8 : déphasage entre courant et tension (facteur de puissance) [2].

I-4-3- Le rendement de l'onduleur :

Le rendement exprime l'efficacité de l'onduleur, il est compris entre 0 et 1. On peut l'exprimer en pourcentage avec des valeurs comprises entre 0% et 100%. A cause de l'échauffement des composants de l'onduleur, le rendement n'atteint jamais 100%. Généralement un onduleur présente un rendement de l'ordre de 95-98%.

Le rendement s'exprime selon la formule suivante :

$$\mu = \frac{\text{puissance en sortie}}{\text{puissance en entrée}} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$$

Avec :

$$\begin{cases} \text{puissance d'entrée} = P_{DC} = U_{DC} \times I_{DC} \\ \text{puissance de sortie} = P_{AC} = U_{AC,eff} \times I_{AC,eff} \times \cos(\varphi) \end{cases}$$

Le rendement maximal d'un onduleur n'exprime pas réellement la qualité de l'onduleur, car il est lié à une puissance de sortie donnée. Or, l'onduleur ne fonctionne pas toujours à cette puissance, du fait qu'à cause de la variation de l'éclairement et de la température, le groupe photovoltaïque ne délivre jamais la même puissance. Donc, l'onduleur ne fonctionne pas tout le temps à son rendement maximal. Pour cela le rendement européen a été introduit pour pouvoir calculer un rendement global de l'onduleur [2].

I-4-3-1- Méthode de calcul du rendement européen :

Dans cette méthode on considère que :

- L'onduleur fonctionne à 5% de sa puissance nominale, pendant 3% du temps de fonctionnement par jour (24h).
- L'onduleur fonctionne à 10% de sa puissance, pendant 6% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 20% de sa puissance, pendant 13% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 30% de sa puissance, pendant 10% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 50% de sa puissance, pendant 48% du temps.
- L'onduleur fonctionne à 100% de sa puissance, pendant 20% du temps.

On calcule alors le rendement euro de l'onduleur par la formule suivante :

$$\mu = 0.03 \times \mu_{5\%} + 0.06 \times \mu_{10\%} + 0.13 \times \mu_{20\%} + 0.10 \times \mu_{30\%} + 0.48 \times \mu_{50\%} + 0.20 \mu_{100\%}$$

Pour calculer ce rendement, on prend par exemple la courbe du rendement de l'onduleur SUNNY-BOY 4000TL [2] :

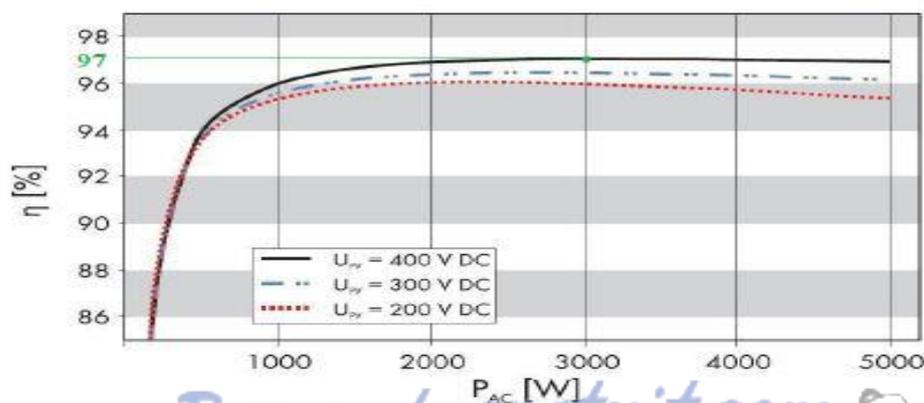


Figure 1.9 : courbe de rendement pour trois tensions d'entrée.



Cette figure présente le rendement de l'onduleur pour trois tensions d'entrée (200V, 300V et 400V). On remarque que plus la tension d'entrée côté DC baisse, plus le rendement diminue.

D'après la fiche caractéristique de l'onduleur SUNNY-BOY 4000TL (figure 1.10), la puissance nominale est de 4000W.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES Sunny Boy

Puissance nominale:	Courant d'entrée
Puissance maximale:	n/a
Plage de tension MPP:	4300 [W]
Tension maximale:	125 [V] - 440 [V]
Courant d'entrée maximale:	550 [V]
Entrée DC:	30 [A]
Nombre de MPP trackers:	n/a
	2
	Courant de sortie
Tension:	230 [V]
Puissance nominale:	4000 [W]
Puissance maximale:	4000 [W]
Rendement européen:	96.2 [%]
Rendement max. :	97 [%]

Figure 1.10 : fiche technique de l'onduleur SUNNY-BOY.

Dans un premier temps on détermine les valeurs de la puissance lorsque l'onduleur fonctionne à 5%, 10%, 20%, 30%, 50% et 100% de sa puissance nominale soit :

$$\begin{aligned}5\% \times P_{nominale} &= 200W \\10\% \times P_{nominale} &= 400W \\20\% \times P_{nominale} &= 800W \\30\% \times P_{nominale} &= 1200W \\50\% \times P_{nominale} &= 2000W \\100\% \times P_{nominale} &= 4000W\end{aligned}$$

Graphiquement on trouve :

- $\mu_{5\%} = 86.8\%$
- $\mu_{10\%} = 92.43\%$
- $\mu_{20\%} = 95.48\%$
- $\mu_{30\%} = 96.34\%$
- $\mu_{50\%} = 96.95\%$
- $\mu_{100\%} = 97.05\%$

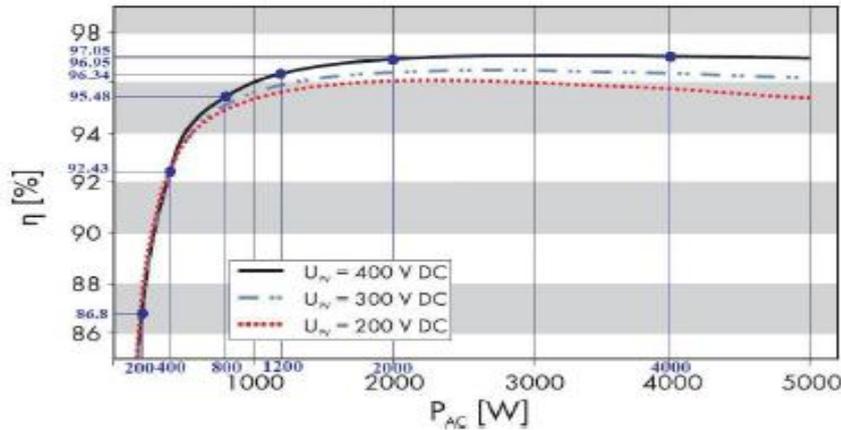


Figure 1.11: calcul graphique de rendement.

Donc le rendement européen vaut :

$$\mu = 0.03 \times \mu_{5\%} + 0.06 \times \mu_{10\%} + 0.13 \times \mu_{20\%} + 0.10 \times \mu_{30\%} + 0.48 \times \mu_{50\%} + 0.20 \times \mu_{100\%}$$

$$\mu = 0.03 \times 86.8 + 0.06 \times 92.43 + 0.13 \times 95.48 + 0.10 \times 96.34 + 0.48 \times 96.95 + 0.20 \times 97.05$$

$$\mu = 96.14\%$$

D'après la fiche technique, l'onduleur SUNNY-BOY présente un rendement de 96.20%, et d'après le calcul, le rendement vaut 96.14%, l'écart entre les deux est minime et peut s'expliquer par le fait que les valeurs du rendement sont déterminées graphiquement.

II- Topologies des onduleurs :

Actuellement, les applications photovoltaïques les plus valorisantes sont les installations PV destinées à alimenter le réseau électrique public. Il existe différentes topologies de gestion de ces installations qui reposent sur le même principe : un générateur photovoltaïque (GPV) raccordé au réseau via un onduleur. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme sinusoïdale de fréquence 50 Hz, mais ils exploitent de plus la puissance maximale délivrée par le GPV. Cette fonction est assurée par le biais

d'un étage d'adaptation (convertisseur DC-DC) placé avant l'onduleur. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. [4][5].

II-1- L'onduleur central :

Dans le cas d'onduleur central comme le montre la figure 1.12 (a), le générateur PV est constitué par des panneaux solaires reliés entre eux pour former une chaîne (String en anglais), chaque chaîne ainsi construite est couplée en parallèle avec d'autres chaînes via des diodes anti-retours. Le générateur ainsi constitué, généralement de forte puissance (>10kW) est relié du côté continu à un seul onduleur. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue mais de plus l'onduleur central possède au moins un système de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracker) permettant au GPV de fonctionner à son point de puissance maximale PPM.

L'inconvénient de cette topologie est que toute l'installation dépend d'un seul onduleur. Une panne de l'onduleur central entraîne l'arrêt de l'installation et donc de la production en général. [4]

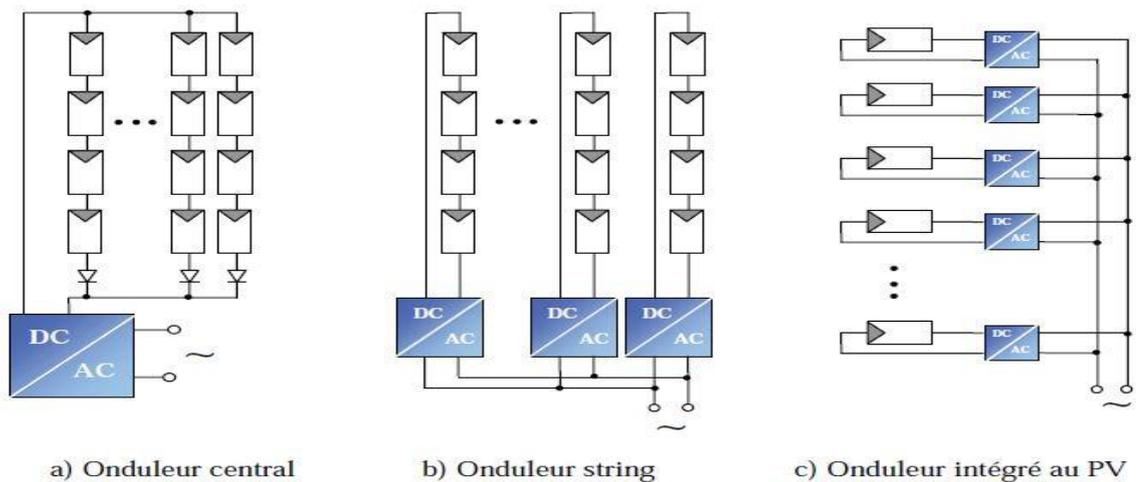


Figure 1.12 : schémas de principe de différentes topologies [4].

II-2- Les onduleurs strings :

L'onduleur string comme son nom l'indique est aussi constitué d'un ensemble de panneaux solaires reliés entre eux pour former une chaîne. La seule différence entre l'onduleur central et l'onduleur string est que dans l'architecture string, chaque string est relié à son propre onduleur (Figure 1.12(b)), et donc chaque string fonctionne à son propre point de puissance maximale. L'avantage ajouté par cette architecture est qu'une panne d'un onduleur strings n'affecte pas la production générale de l'installation. Afin d'améliorer le rendement de cette architecture la solution est d'aller vers une architecture individuelle en intégrant par exemple un étage d'adaptation par panneau et non pas par string.

II-3- Les onduleurs intégrés aux panneaux :

Dans ce cas de figure, chaque panneau dispose de son propre onduleur (Figure 1.12(c)), donc les pertes dues à l'adaptation sont écartées, chaque panneau fonctionne donc à son propre PPM. Le problème de cette architecture est que les onduleurs intégrés aux panneaux nécessitent plus de câblage côté alternatif, parce que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau. Un tel onduleur ne s'applique que dans des installations d'une puissance allant de 50W à 400W.

II-4- La conversion multi-string :

Actuellement, cette architecture est la plus utilisée dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique. Cette structure est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par l'onduleur string afin de profiter des avantages des deux. La figure 1.13 illustre le principe de la conversion multi-string. La conversion est basée sur des convertisseurs DC-DC connectés à un onduleur. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque chaîne (string) de fonctionner à son PPM. Avec cette structure le fonctionnement de l'ensemble du champ ne

sera pas affecté par le disfonctionnement d'un seul GPV et grâce aux convertisseurs DC-DC, on peut travailler sur une plus large gamme de tension d'entrée en optimisant la production photovoltaïque.

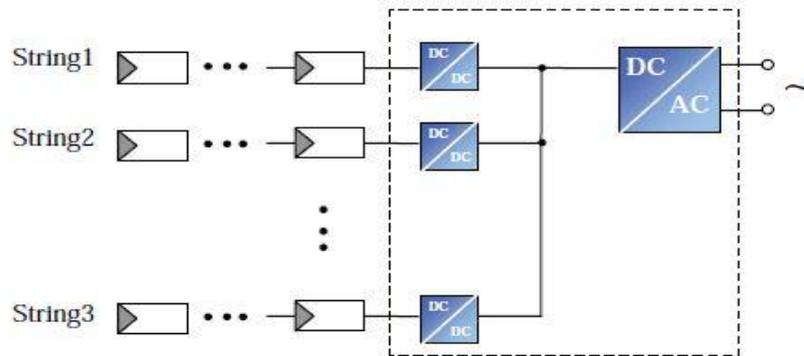


Figure 1.13 : architecture de conversion multi-string.

la figure suivante présente une nouvelle architecture basée sur les convertisseurs multi-string :

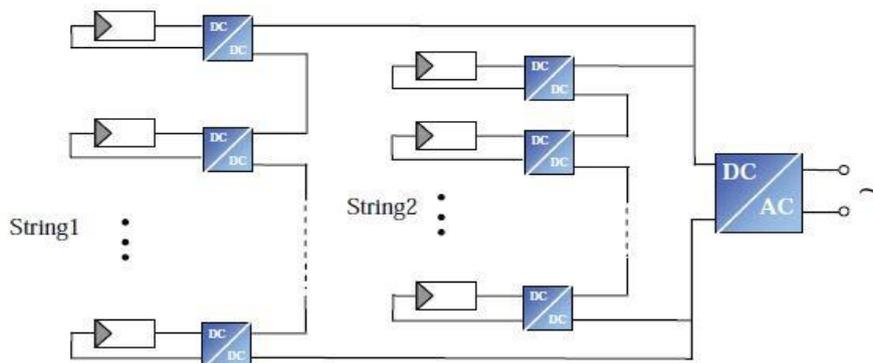


Figure 1.14 : nouvelle structure de conversion multi-string.

le principe comme illustré sur la figure est que chaque panneau dispose d'un convertisseur DC-DC avec sa propre commande MPPT afin de profiter du maximum de puissance de chaque panneau est donc augmenter le rendement de toute l'installation. Ensuite les panneaux sont associés en série afin d'alimenter l'onduleur avec une tension convenable (la somme des tensions de chaque panneau [6]) et finalement les strings ainsi constitués sont connectés en parallèle afin d'obtenir la puissance désirée.

Cette dernière structure n'est encore qu'à ses débuts. Plusieurs études théoriques ont été faites afin de démontrer l'importance de l'utilisation de cette structure [4].

II-5- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement, la classification et les caractéristiques d'un onduleur photovoltaïque. Nous avons vu l'utilité d'ajouter un étage d'adaptation afin d'optimiser la puissance produite par les GPV. Nous avons aussi rappelé les principales architectures des onduleurs pour les installations photovoltaïques (central, string et multi-string).

L'objectif du chapitre suivant (chapitre II) sera l'étude et la simulation d'un onduleur en pont pour vérifier la conversion DC-AC.



CHAPITRE II : ETUDE ET SIMULATION D'UN ONDULEUR EN PONT

I- Introduction :

Les onduleurs photovoltaïques sont des structures en pont constituées, le plus souvent, d'interrupteurs électroniques réalisés à l'aide des transistors de puissance. Par un jeu de commutation commandée, le plus souvent par MLI (Modulation à largeur d'impulsion), le signal électrique continu fourni est modulé afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau de distribution (pour notre pays 50 Hz).

Puisque les interrupteurs électroniques travaillent en commutation, la tension de sortie est toujours constituée de « morceaux » de tension continue et donc la tension en sortie du convertisseur (DC/AC) n'est pas parfaitement sinusoïdale.

Cette tension non sinusoïdale peut être décomposée en la somme d'une fondamentale désirable et d'harmoniques (tensions de fréquences multiples de celle de la fréquence fondamentale) indésirables. Le choix de la commande devra, donc, permettre d'obtenir uniquement la sinusoïde fondamentale autant que possible.

Dans le présent chapitre, on présentera l'étude de deux commandes : la commande pleine onde (commande symétrique) et la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

II- Etude du fonctionnement d'un onduleur PV en pont monophasé :

L'onduleur PV en pont monophasé (figure 2.1) est un montage constitué de 4 interrupteurs électroniques schématisés par les 4 interrupteurs H_1 , H_2 , H_3 et H_4 , avec leurs diodes de roue libre. La charge est de type inductif (assimilable à un moteur à courant alternatif), afin de visualiser la tension et le courant aux bornes de la charge [7].

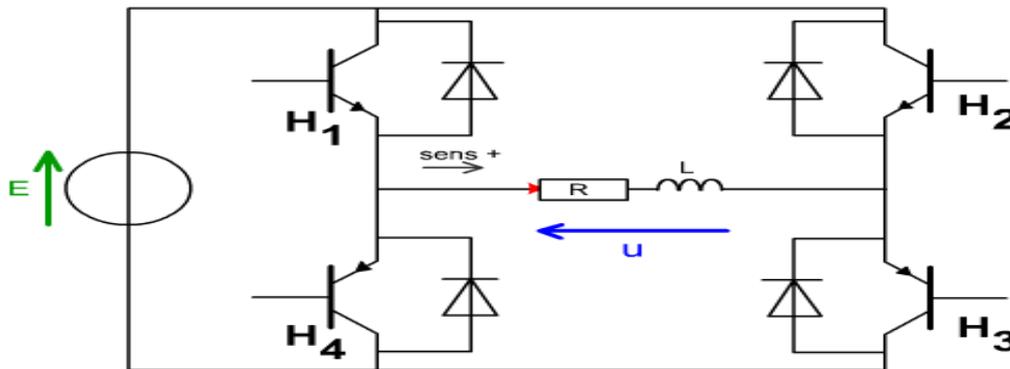


Figure 2.1 : Schéma du principe de l'onduleur en Pont.

II-1- Commande pleine onde :

Pour cette commande, H_1 - H_2 et H_3 - H_4 sont commandés deux à deux simultanément. Pendant la première demi-période, H_1 et H_3 sont saturés alors que H_2 et H_4 sont bloqués, et pendant la deuxième demi-période, c'est les premiers qui sont bloqués et les seconds sont saturés. La forme de la commande est donnée sur les figures 2.2 et 2.3 :

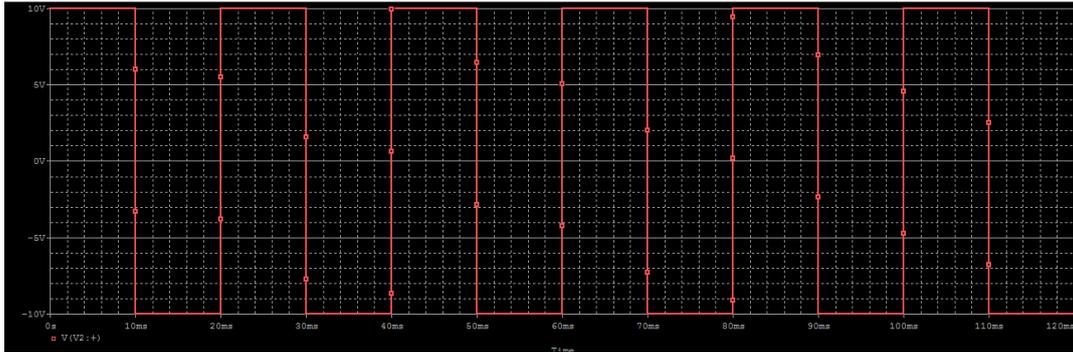


Figure 2.2 : signal de commande pour H₁ et H₄.

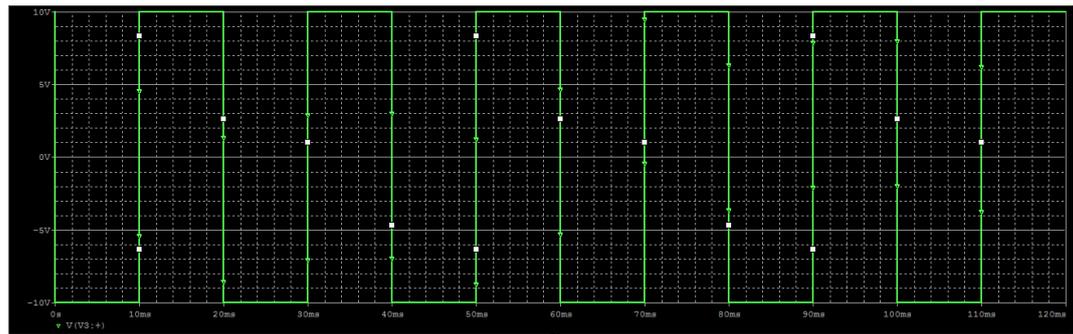


Figure 2.3 : signal de commande pour H₂ et H₃.

La charge est constituée par une résistance R en série avec une inductance L. On a alors à tout instant :

$$u(t) = R \times i(t) + L \times \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

II-1-1- Etude du régime transitoire :

On considère que le système est initialement au repos, $i(0)=0$.

✚ Pour $0 < t < \frac{T}{2}$:

Les interrupteurs H₁ et H₃ sont commandés à la fermeture et ils conduisent.
H₂ et H₄ sont ouverts.

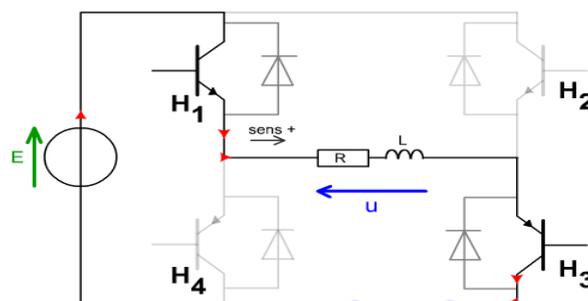


Figure 2.4 : interrupteurs H₁ et H₃ en conduction.

Donc, en appliquant la loi de maille, on aura :

$$u_1(t) = R \times i_1(t) + L \times \frac{di_1}{dt} = +E \quad (2.2)$$

Remarque : Ici l'indice 1 correspond à la première demi-période.

La solution de cette équation est composée d'une solution sans second membre (SSM) et d'une solution particulière:

✚ Solution SSM :

$$\text{On a: } R \times i(t) + L \times \frac{di}{dt} = 0 \rightarrow \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i \rightarrow \frac{di}{i} = -\frac{R}{L}dt$$

En intégrant cette dernière équation on trouve : $i = \exp\left(-\left(\frac{R}{L}\right)t + C\right)$

La solution SSM peut alors s'écrire : $i = K \times e^{-\frac{t}{\tau}}$, avec $\tau = \frac{L}{R}$

✚ Solution particulière (i_p):

Une solution particulière de l'équation (2.2) peut s'écrire : $i_p = At + B$

Donc :

$$i_p + \frac{L}{R} \cdot \frac{di_p}{dt} = \frac{E}{R}$$

En remplaçant i_p par son expression on trouve :

$$A \cdot t + B + \frac{L}{R} \cdot A = \frac{E}{R}$$

Par identification des termes on aura :

$$\begin{cases} A \cdot t = 0 \\ B + \frac{L}{R} \cdot A = \frac{E}{R} \end{cases} \quad \text{Donc : } A = 0 \text{ et } B = E/R, \text{ d'où : } i_p = \frac{E}{R}$$

La solution de l'équation (2.2) est donc la somme $i_1(t) = i + i_p$, d'où :

$$i_1(t) = K \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad , \quad (2.3)$$

À $t=0$, on a $i_1(0) = K + \frac{E}{R}$ donc $K = i_1(0) - \frac{E}{R}$

Or les conditions initiales sont nulles (à $t = 0, i_1(0) = 0$), donc : $K = -\frac{E}{R}$

Ce qui donne :

$$i_1(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2.4)$$

avec $\tau = \frac{L}{R}$ est la constant de temps du circuit RL

On remarque que le courant $i_1(t)$ tend vers la valeur asymptotique finale $\frac{E}{R}$ de façon exponentielle.

✚ A $t = T/2$:

Les interrupteurs H_2 et H_4 sont commandés à la fermeture, mais ils ne peuvent pas conduire car le courant est positif à $t = T/2$. Ce sont donc les diodes D_2 et D_4 qui conduisent.

Le courant $i_2(t)$ (le courant dans la deuxième demi-période) tend vers la valeur asymptotique finale $-\frac{E}{R}$ de façon exponentielle, ce courant s'annulera pour un temps : $t_1 < T$.

✚ Pour $t_1 < t < T$:

Le courant devient négatif, les interrupteurs H_2 et H_4 entrent en conduction et les diodes D_2 et D_4 se bloquent.

II-1-2- Régime permanent :

En régime permanent, le courant oscille entre $+I_M$ et $-I_M$. La figure 2.5 représente la tension et le courant en régime permanent :

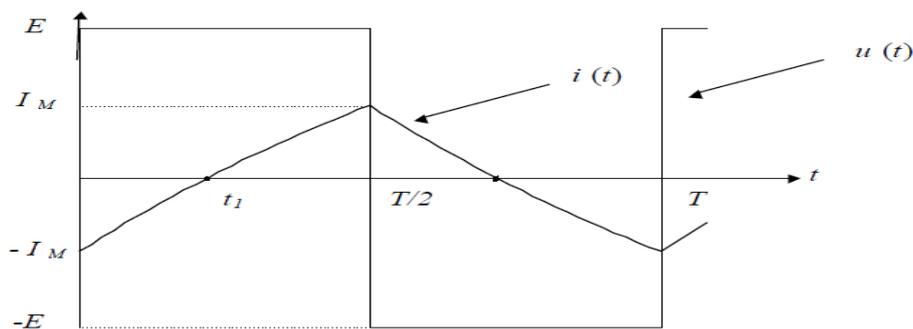


Figure 2.5 : tension et courant en régime permanent [8].

On remarque ici que $i(t)$ est forcément périodique de période T . Aussi, en régime permanent, le courant $i(t)$ passe d'une valeur négative à une valeur positive à $t = t_1$, et puisque le montage fonctionne de façon symétrique, le

courant passera une autre fois d'une valeur positive à une valeur négative

à : $t = \frac{T}{2} + t_1$.

D'après la figure 2.5, au cours d'une période, on distingue quatre séquences :

✚ pour $0 < t < t_1$:

H_1 et H_3 sont commandés à la fermeture, or le courant est négatif à $t=0$, égale à $-I_M$. Les transistors ne peuvent pas conduire, ce sont donc les diodes D_1 et D_3 qui conduisent, ici on parle d'une « **phase de récupération** » (la charge fournit de la puissance à l'alimentation).

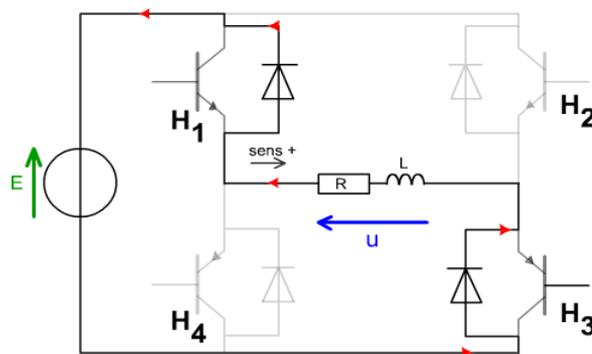


Figure 2.6 : première phase de récupération

$$\text{On a donc : } u(t) = E = R \times i(t) + L \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

$$\text{D'où : } i(t) = \frac{E}{R} + \left(-I_M - \frac{E}{R}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad , \quad (2.6)$$

À $t = t_1$, $i(t)$ s'annule.

✚ Pour $t_1 < t < \frac{T}{2}$:

H_1 et H_3 se mettent à conduire (courant $i(t)$ positif), tandis que D_1 et D_3 se bloquent et toujours H_2 et H_4 sont ouverts.

Donc les équations $i(t)$ et $u(t)$ restent les mêmes que précédemment (2.5 et 2.6) (on n'a pas changé de maille). C'est une phase d'alimentation (la charge reçoit de l'énergie).

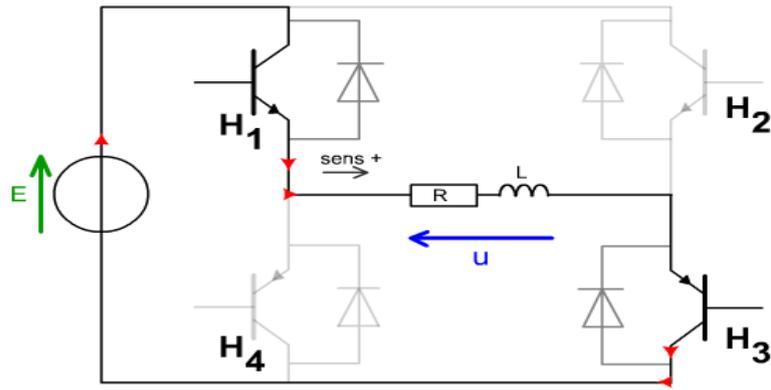


Figure 2.7 : première phase d'alimentation.

✚ pour $\frac{T}{2} < t < t_1 + \frac{T}{2}$:

Ici H_1 et H_3 sont commandés à l'ouverture et se bloquent, H_2 et H_4 sont commandés à la fermeture.

Le courant $i(t)$ étant positif à $t=T/2$, égale à $+I_M$, H_2 et H_4 ne peuvent pas conduire. Ce sont donc D_2 et D_4 qui conduisent le courant.

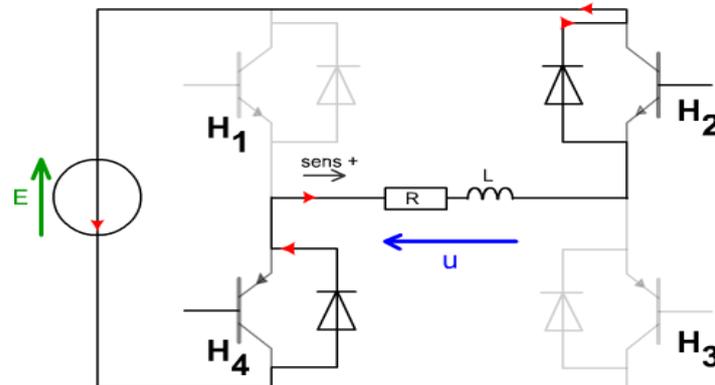


Figure 2.8 : deuxième phase de récupération.

$$\text{Donc : } u(t) = -E = R \times i(t) + L \frac{di}{dt} \quad (2.7)$$

$$\text{D'où : } i(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_M + \frac{E}{R} \right) \exp\left(-\frac{t - \frac{T}{2}}{\tau} \right) \quad (2.8)$$

A $t = \frac{T}{2} + t_1$: $i(t)$ s'annule.

✚ Pour $\frac{T}{2} + t_1 < t < T$:

Le courant devient négatif, donc H₂ et H₄ conduisent, D₂ et D₄ sont bloquées.

Les équations restent les mêmes que (2.7) et (2.8).

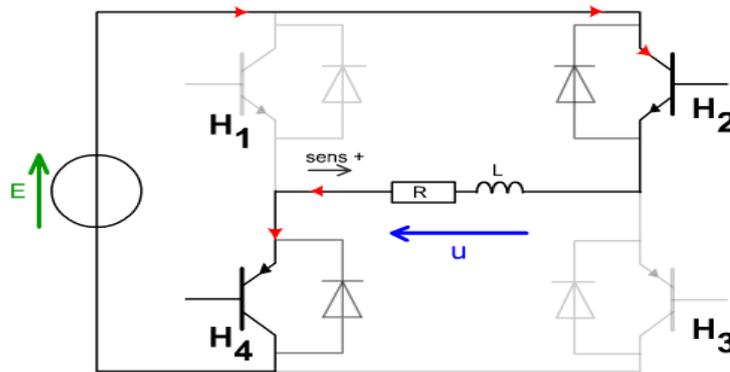


Figure 2.9 : deuxième phase d'alimentation.

D'après cette étude théorique, on déduit la forme de u(t) et i(t) comme suit :

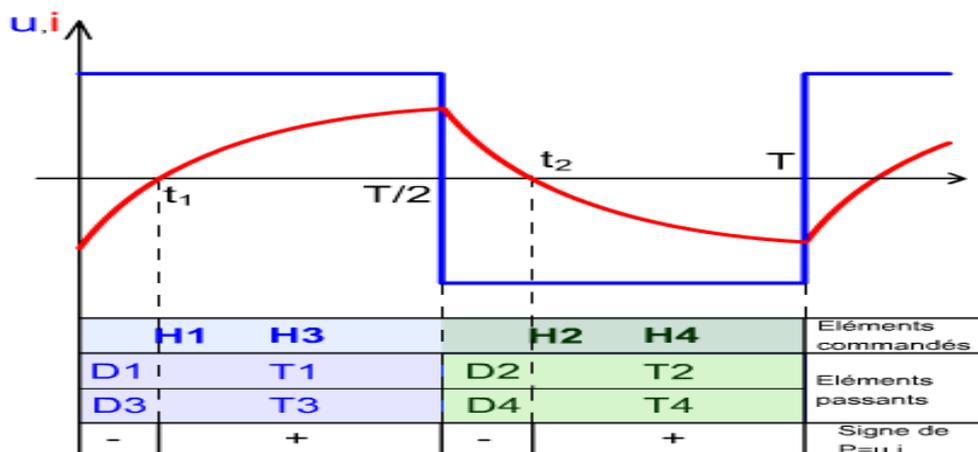


Figure 2.10 : formes de u(t) et i(t) à la sortie du pont.

II-1-3- Problématique :

D'après la figure 2.10, on remarque clairement que la sortie du convertisseur DC/AC n'est pas parfaitement sinusoïdale. Cela est dû au fait que les

interrupteurs électroniques travaillent en commutation. La tension de sortie sera donc toujours constituée de « morceaux » de tension continue, ce qui provoque des tensions harmoniques.

Donc c'est le choix de la commande qui permet d'obtenir une sinusoïde avec de faibles harmoniques.

II-1-4- Etude harmonique de la commande pleine onde :

Généralement, la décomposition en séries de Fourier (DSF) d'une fonction périodique $u(t)$ peut s'écrire sous la forme suivant : [9]

$$DSF(u(t)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0}^{+\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (2.9)$$

Puisque la tension $u(t)$ est un signal carré symétrique impair (figure 2.10), donc :

- ✚ La valeur moyenne : $a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot dt = 0$, car $u(t)$ est symétrique.
- ✚ Coefficient pair : $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \times \sin(n\omega_0 t) \cdot dt = 0$, car le signal est impair.
- ✚ Coefficient impair : $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \times \sin(n\omega_0 t) \cdot dt$

D'où :

$$DSF(u(t)) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad , \quad \text{avec } \omega_0 = \frac{2 \times \pi}{T} \quad (2.10)$$

Le calcul de b_n donne :

$$b_n = \frac{2 \times E}{\pi \times n} (1 - \cos(n\pi)) = \frac{2 \times E}{\pi \times n} [1 - (-1)^n] \quad (2.11)$$

Donc:

$$u(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) = \frac{2 \times E}{\pi} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{[1 - (-1)^n]}{n} \sin(n\omega_0 t) \quad (2.12)$$

Or :

$$[1 - (-1)^n] = \begin{cases} 0 & , \quad \text{si } n = 2k \\ 2 & , \quad \text{si } n = 2k + 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

Alors d'après (2.12) et (2.13) on aura :

$$u(t) = \frac{2 \times E}{\pi} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{[1 - (-1)^{(2k+1)}]}{2k + 1} \sin((2k + 1)\omega_0 t)$$

Donc :

$$u(t) = \frac{4 \times E}{\pi} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{1}{2k + 1} \sin((2k + 1)\omega_0 t) \quad (2.14)$$

Après la décomposition en série de Fourier de l'entrée $u(t)$, il reste à calculer le déphasage et l'atténuation introduits par le système linéaire. Pour cela on calcule tout simplement le module et la phase de la fonction de transfert en régime harmonique, soit : $\overline{H(j\omega)} = \frac{\overline{Y(j\omega)}}{\overline{X(j\omega)}}$

Dans notre cas, le système linéaire est le suivant :

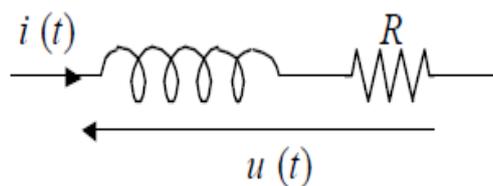


Figure 2.11 : système linéaire (charge RL).

En régime harmonique on aura :

$$\overline{U(j\omega)} = (R + jL\omega) \times \overline{I(j\omega)}$$

$$\overline{H(j\omega)} = \frac{1}{(R + jL\omega)}$$

Après calcul on trouve que :

$$\begin{cases} M(\omega) = \frac{1}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} = \frac{1}{Z(\omega)} & , \text{ avec } Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} & (2.15) \\ \varphi(\omega) = -\text{Arctg}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) & , \text{ avec } \omega_0 = \frac{R}{L} & (2.16) \end{cases}$$

On peut donc calculer les termes $i_k(t)$ de la façon suivante :

D'abord la moyenne de $i(t)$ est nulle, car la moyenne de $u(t)$ est nulle.

✚ $k=0$ (terme fondamental) :

$$\text{On a : } u_0(t) = \frac{4E}{\pi} \times \sin(\omega_0 t) \rightarrow i_0(t) = \frac{4E}{\pi} M(\omega) \sin(\omega t + \varphi(\omega))$$

✚ $k=1$ (harmonique 1) :

$$u_1(t) = \frac{4E}{3\pi} \times \sin(3\omega_0 t) \rightarrow i_1(t) = \frac{4E}{3\pi} M(3\omega) \sin(3\omega t + \varphi(3\omega))$$

Finalement, en appliquant le théorème de superposition, on aura :

$$DSF(i(t)) = i_0(t) + i_1(t) + \dots$$

Le spectre de $i(t)$ est illustré sur la figure suivante :

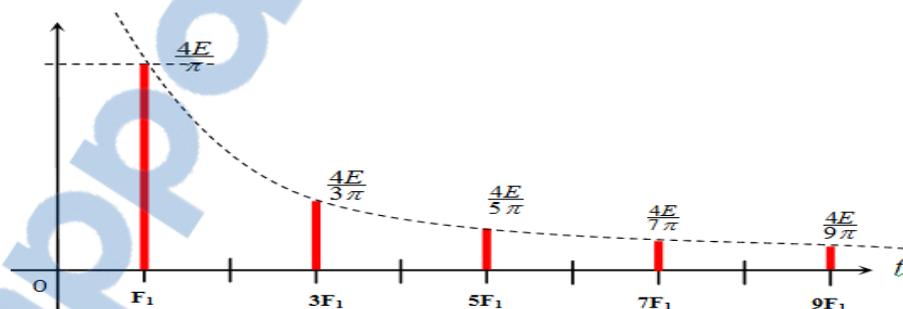


Figure 2.12 : spectre de fréquence de la commande pleine onde.

On voit que le spectre de $i(t)$ sera composé de plusieurs harmoniques impaires (de fréquence $F_1, 3F_1, 5F_1, \dots$). L'enveloppe spectrale varie en $\frac{4E}{n\pi}$ où n est le rang de l'harmonique considérée.

II-1-5- Conclusion

La commande pleine onde est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre, mais la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse, ce qui rend le filtrage du courant peu aisé.

Dans la suite, on va étudier la commande MLI.

II-2- Commande MLI :

Dans cette partie, on va traiter cette commande qui est la commande la plus utilisée dans les onduleurs photovoltaïques.

II-2-1- Etude de la commande des interrupteurs :

II-2-1-1- Stratégie de commande :

On crée deux signaux :

- ✚ Un signal sinusoïdal d'amplitude et de fréquence variables, appelé signal de modulation.
- ✚ Un signal triangulaire de fréquence très élevée appelé « porteuse ».

Ces deux signaux sont comparés et le résultat de la comparaison est utilisé pour commander l'ouverture ou la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

II-2-1-2- Réalisation de la commande :

Le circuit de commande comprend :

- ✚ un générateur sinusoïdal fournissant le signal de modulation, de fréquence 50 Hz (amplitude : 4.5V). [10]
- ✚ un générateur triangulaire fournissant la porteuse de fréquence $f_p=2000$ Hz (Valeur crête à crête = 10V).
- ✚ un comparateur qui génère les signaux de commande.

La figure 2.13 représente le schéma électrique de la commande MLI sur PSIM :

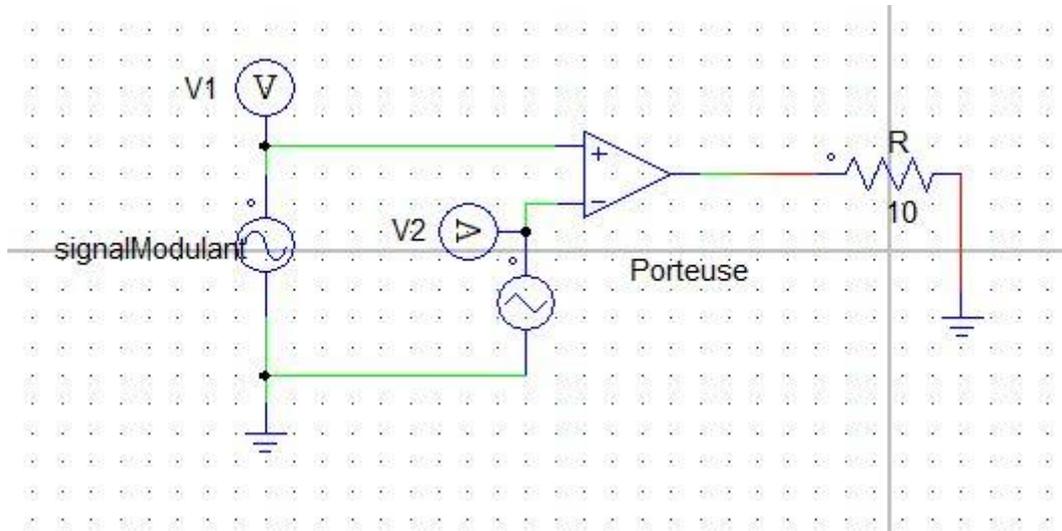


Figure 2.13 : schéma électrique de la commande MLI.

Afin de visualiser les deux entrées on utilise deux sondes de tensions V1 et V2, la simulation nous donne les signaux suivants :

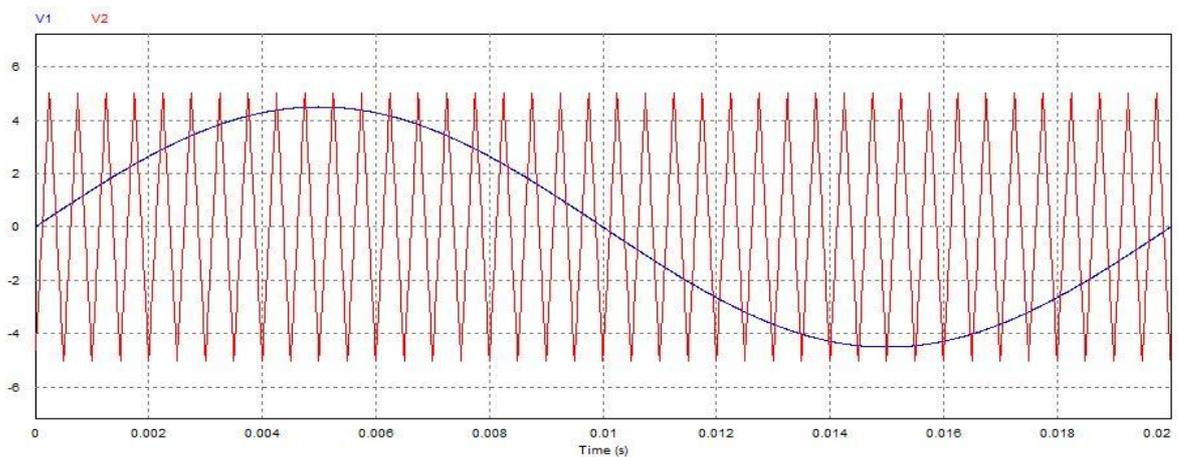


Figure 2.14 : signal de modulation (V1), signal triangulaire « porteuse »(V2).

La comparaison est basée sur le principe suivant :

- ✚ quand l'amplitude de V1 est supérieure à celle de V2, la sortie du comparateur vaut 1V,
- ✚ Quand l'amplitude de V1 est inférieure à celle de V2, la sortie vaut -0V.

La figure 2.15 illustre ce principe de fonctionnement :

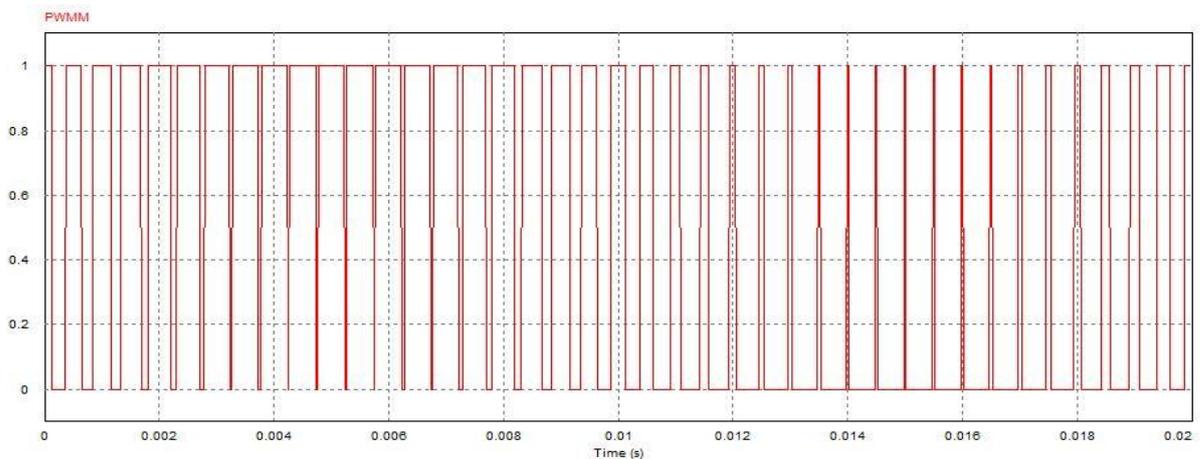


Figure 2.15 : la première commande.

Dans cette commande, les interrupteurs doivent être commandés deux à deux simultanément (deux interrupteurs de même bras ne peuvent pas conduire en même temps). Pour cela il faut ajouter un inverseur à la sortie du schéma présenté dans la figure 2.13. La figure suivante présente le schéma de la deuxième commande :

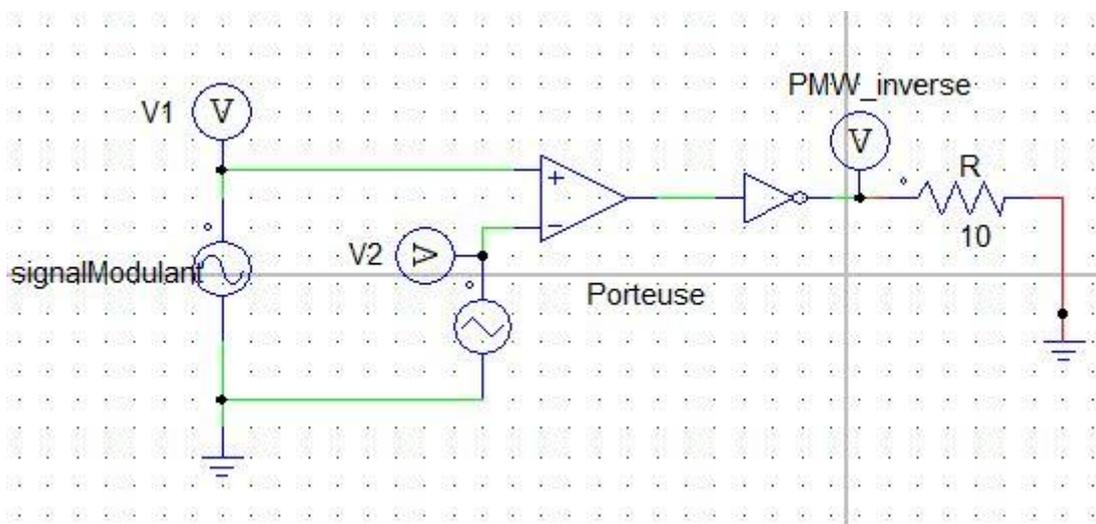


Figure 2.16 : schéma électrique de la deuxième commande.

Si on visualise la tension à la sortie de l'inverseur, on trouve un signal complémentaire de la première commande (voir Figure 2.15).

La figure 2.17 présente la deuxième commande :

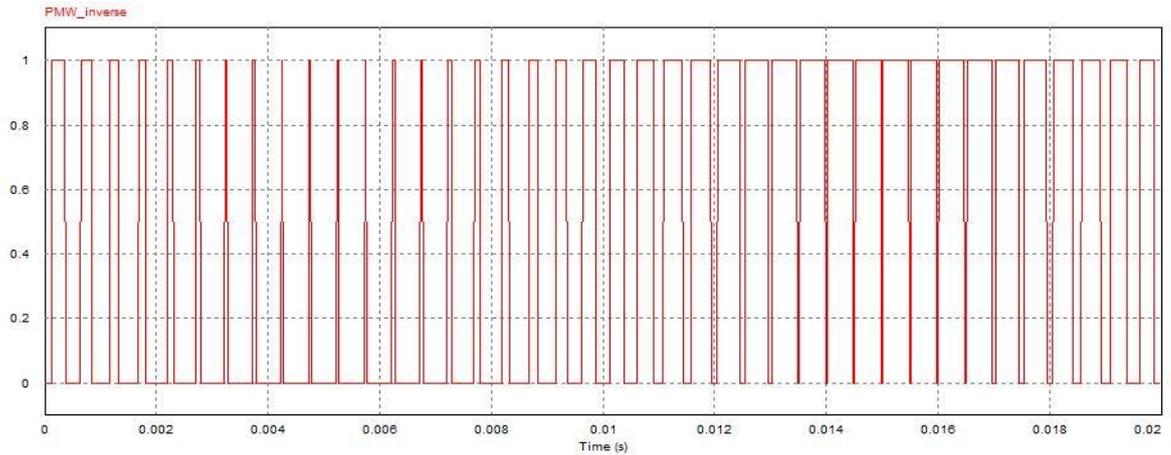


Figure 2.17 : commande inverse (commande 2).

II-2-2- Etude du fonctionnement :

II-2-2-1- Commande MLI :

Dans cette commande, H_1 - H_3 et H_2 - H_4 (voir figure 1.11) sont commandés deux à deux simultanément. Pendant toute une période et suivant la commande appliquée sur les interrupteurs, les couples (H_1 - H_3) et (H_2 - H_4) sont commandés soit à la fermeture soit à l'ouverture. La forme du signal de commande est présentée sur les figures 2.15 et 2.17.

II-2-2-2- Simulation :

La figure suivante présente le schéma électrique sous PSIM, d'un pont complet commandé par MLI :

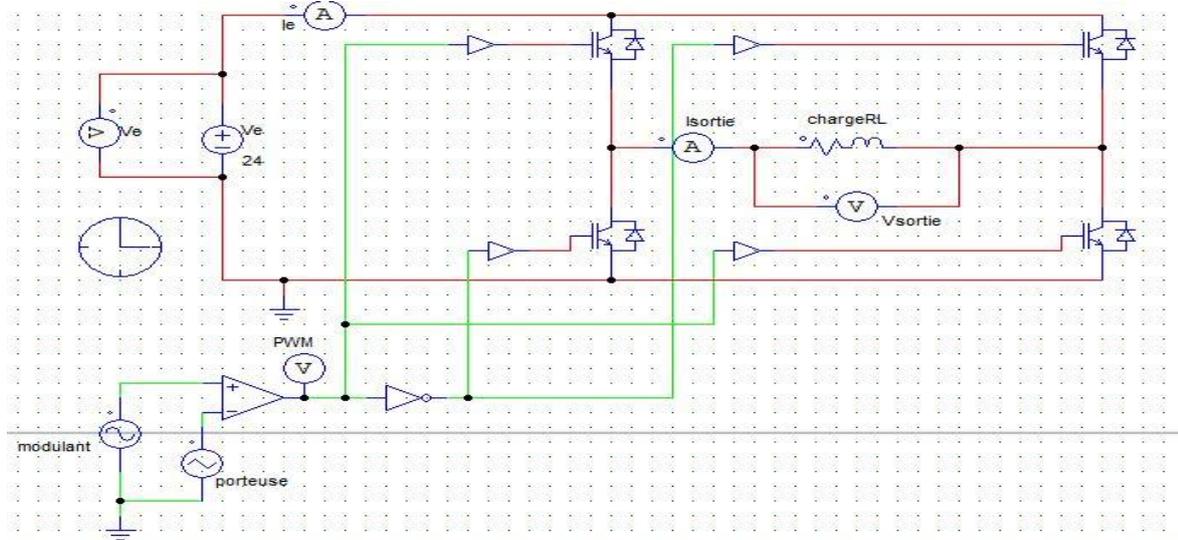


Figure 2.18 : schéma d'un pont complet commandé par MLI.

Afin de visualiser la tension et le courant aux bornes de la charge, on utilise un voltmètre et un Ampèremètre aux bornes de celle-ci. La simulation a donné les allures suivantes :

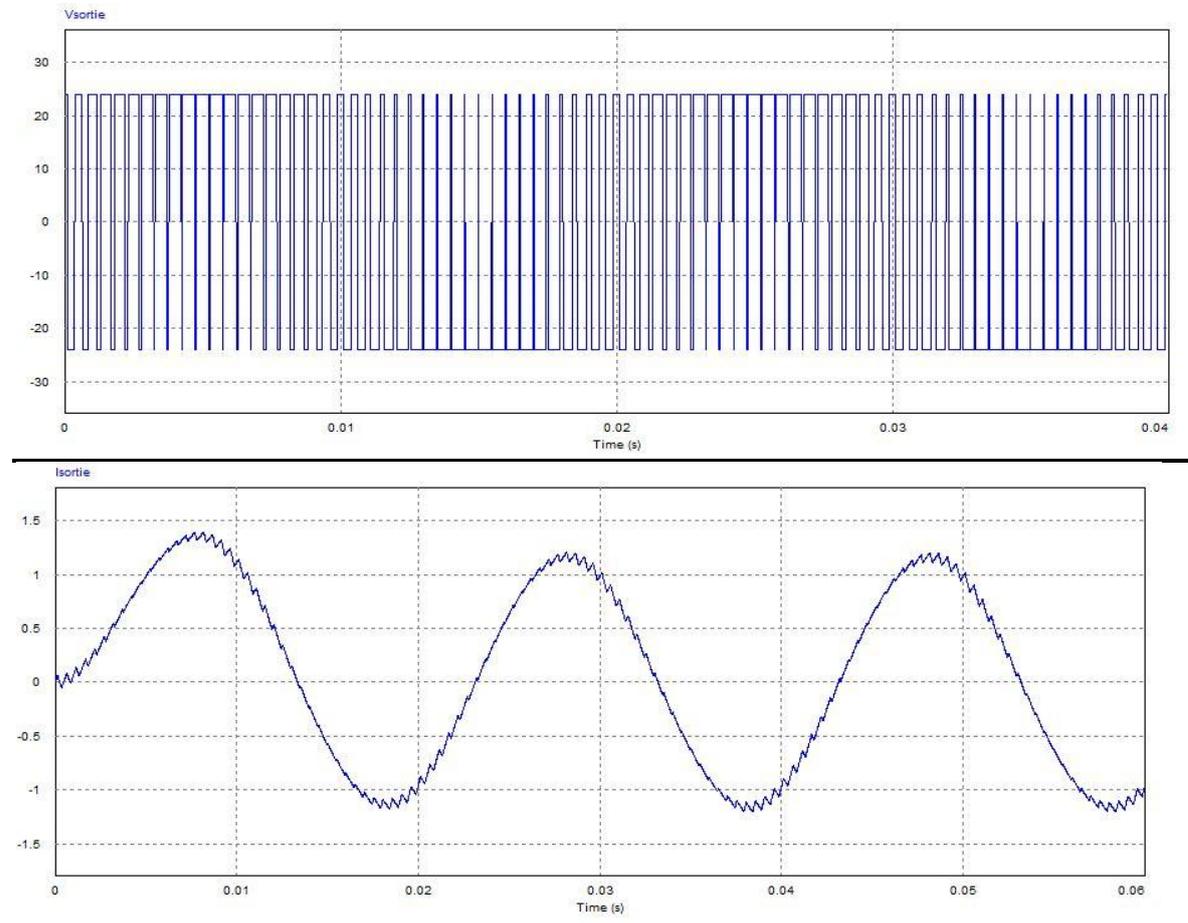


Figure 2.19 : allures tension et courant aux bornes de la charge.

D'après les deux graphes de la figure 2.19, on remarque clairement que :

- ✚ La tension est découpée à la fréquence de la porteuse. Elle comporte 2 niveaux : + 24V / - 24V
- ✚ Le courant est quasi sinusoïdal et comporte des ondulations à la fréquence de la porteuse (2 kHz).

Remarque :

On remarque que la commande MLI donne une tension alternative de (deux niveaux : +24V/ -24V) et un courant quasi sinusoïdal à l'encontre de la

commande pleine onde (commande symétrique) qui a donné une tension non alternative et un courant de forme exponentielle. Toutefois, de petites ondulations de fréquence 2 kHz sont observables sur la courbe.

II-2-2-3- Etude spectrale :

Le spectre de fréquence est présenté sur les figures suivantes :

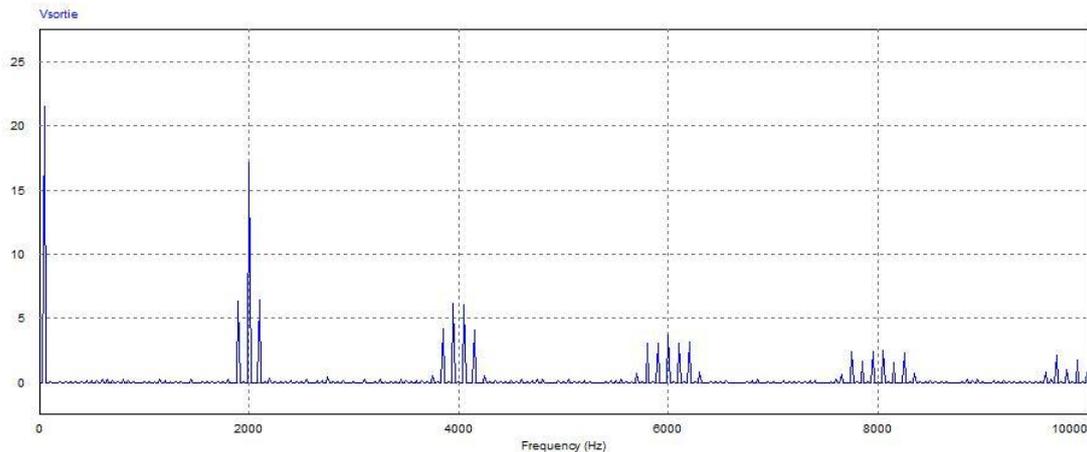


Figure 2.20: spectre de tension ($f_p=2$ kHz, $V_m= 4.5V$).

On remarque que l'on obtient un pic fondamental dont la fréquence (50 Hz) correspond à la fréquence de référence choisie (signal de modulation) et des harmoniques de fréquences multiples de celle de la porteuse, donc très élevées. Le filtrage de la fréquence souhaitée (50 Hz) est donc possible.

II-2-3- Etude des paramètres de la MLI :

La commande MLI est une commande qui dépend de deux paramètres très importants à savoir : la fréquence de découpage de la porteuse et l'amplitude du signal de modulation. Dans ce paragraphe, on va s'intéresser à l'influence de ces deux paramètres sur la tension et le courant de sortie.

II-2-3-1- Influence de la fréquence de découpage :

En utilisant une porteuse de fréquence 6 kHz, on obtient les résultats suivants :

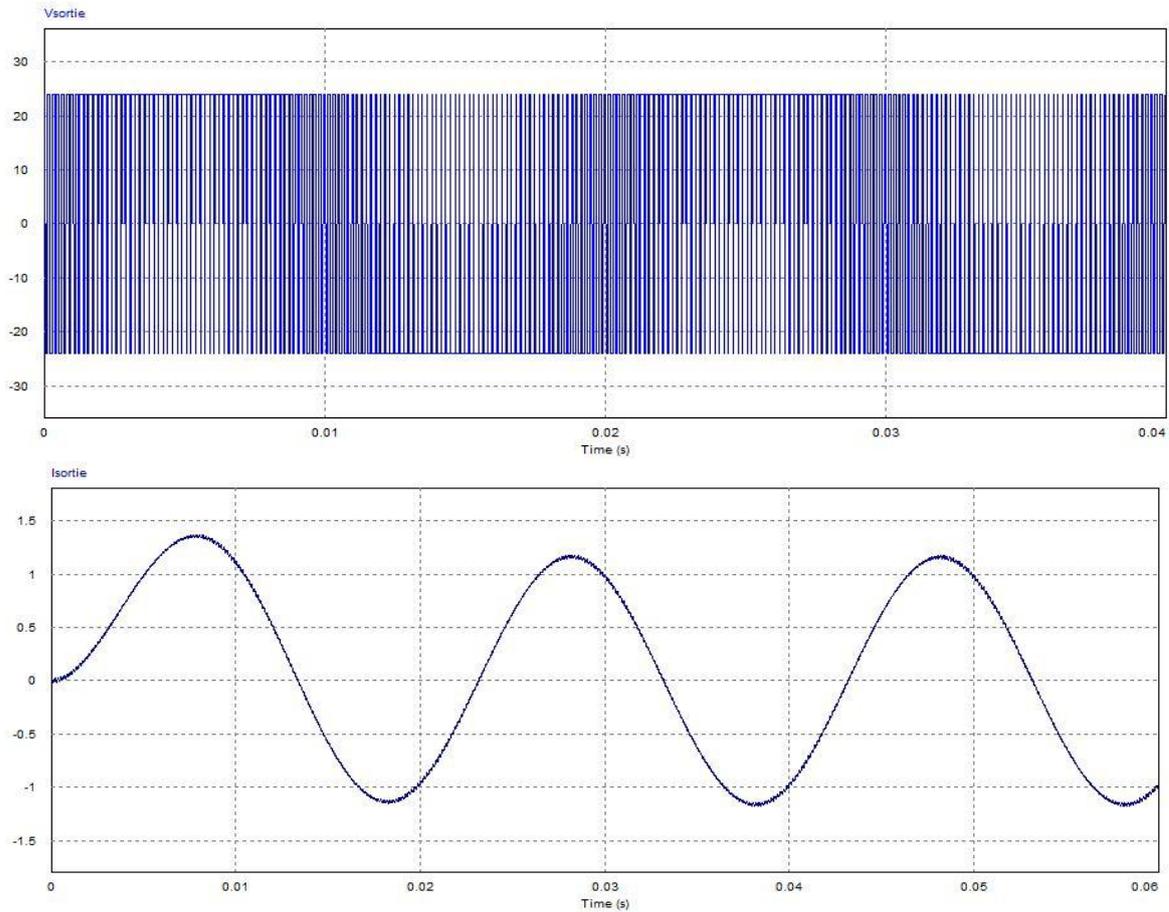


Figure 2.21 : tension et courant de sortie pour une $f_p=6$ kHz et $V_m=4.5V$.

On remarque ici que le courant de sortie est quasi-sinusoidal et ne présente pas d'ondulations accentuées comme celles dans l'allure de la figure 2.19 ($f_p=2$ kHz). Donc, lorsque la fréquence de la porteuse augmente, l'ondulation sur le courant est très atténuée. La figure suivante présente une analyse spectrale de la tension avec une porteuse 6 kHz :

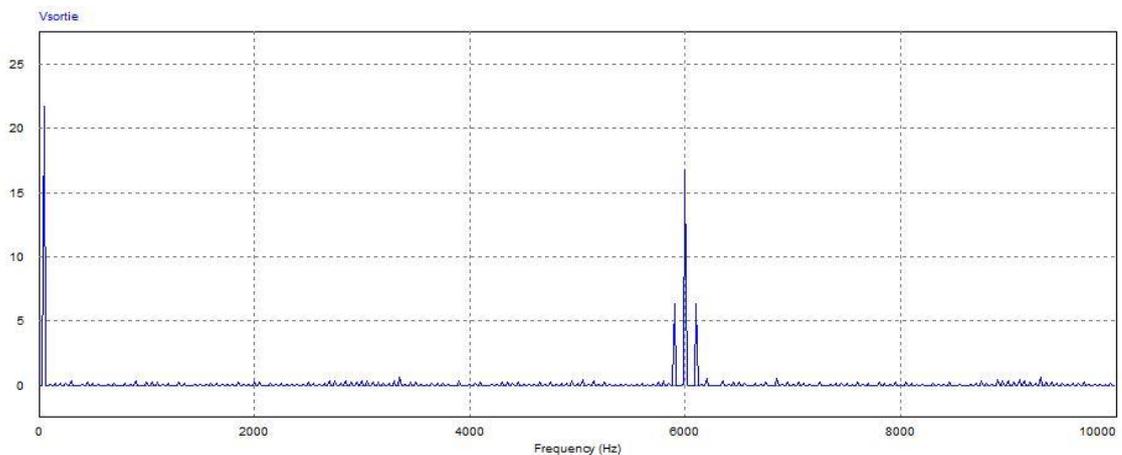


Figure 2.22 : spectre de tension pour une fréquence porteuse de 6kHz.

II-2-3-2- Influence de l'amplitude de modulation :

Avec une fréquence de 6 kHz (qui nous a donné moins d'ondulations de courant), on fixe l'amplitude du signal de modulation à 3V (au lieu de 4.5V).

La simulation donne les résultats suivants :

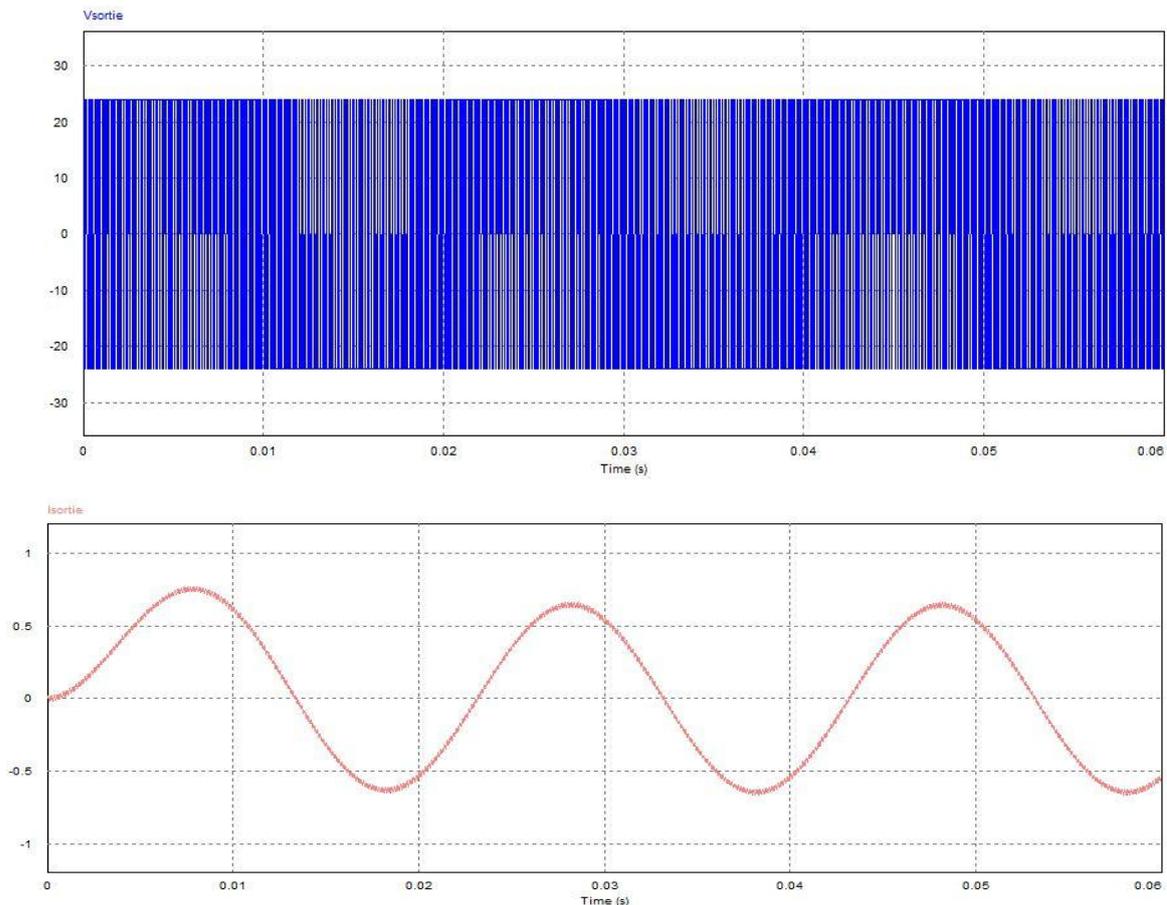


Figure 2.23 : tension et courant de sortie pour ($f_p=6$ kHz, $V_m=3$ V).

On remarque ici que la tension de sortie est alternative (entre +24V et -24V), le courant est quasi-sinusoidal et présente des ondulations légèrement plus accentuées que le courant de la figure 2.21.

La figure suivante montre l'influence de l'amplitude du signal de modulation sur le spectre de fréquence de la tension de sortie :

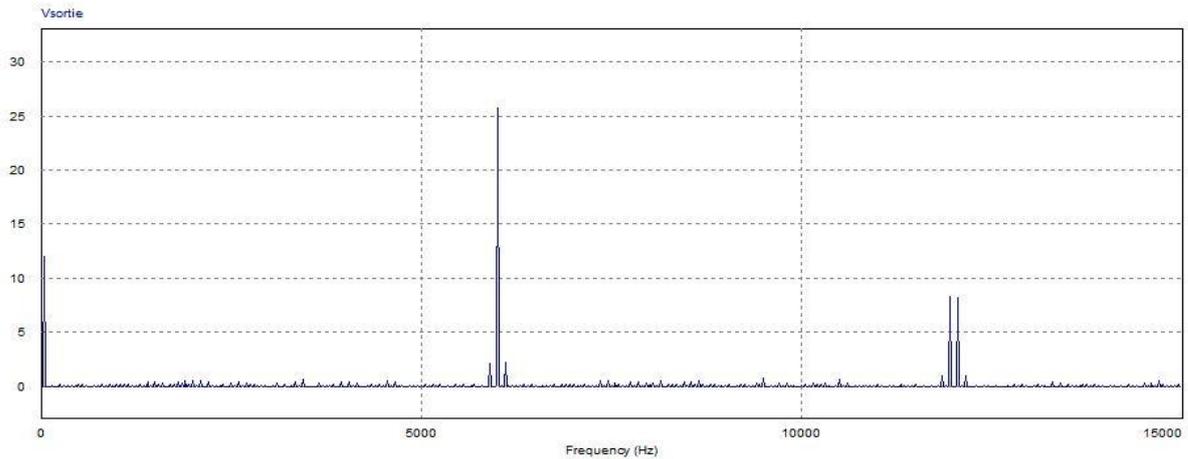


Figure 2.24 : spectre de fréquence pour ($f_p=6$ kHz, $V_m=3V$).

L'amplitude de la fondamentale est :

$$\color{red}{\oplus} \color{blue}{\ominus} V_{s,\text{fondamentale}} = 12.5 \text{ V} \quad \text{pour} \quad V_{\text{Modulation}} = 3 \text{ V.}$$

$$\color{red}{\oplus} \color{blue}{\ominus} V_{s,\text{fondamentale}} = 22 \text{ V} \quad \text{pour} \quad V_{\text{Modulation}} = 4.5 \text{ V.}$$

On remarque clairement que lorsque l'amplitude du signal de modulation diminue, l'amplitude du pic correspondant à la fréquence fondamentale diminue alors que celui de la porteuse (6 kHz) augmente. Ceci entraîne une augmentation des ondulations dans l'allure de la courbe du courant.

Dans la suite, on choisira les paramètres de la commande MLI qui donne les moins d'ondulation possible ($f_p=6$ kHz, $V_m=4.5V$)

II-3- Filtrage :

L'étude spectrale ci-dessus montre que la fréquence fondamentale (50 Hz) est isolée des autres harmoniques qui se trouvent autour des fréquences multiples de la porteuse.

Afin d'isoler la fréquence fondamentale, on va utiliser un filtre passe-bas qui va éliminer les fréquences supérieures à 50 Hz.

II-3-1- Etude du filtre passe-bas RC :

Un filtre passe-bas RC est formé par une résistance R et une capacité C montées comme le montre le schéma électrique suivant :

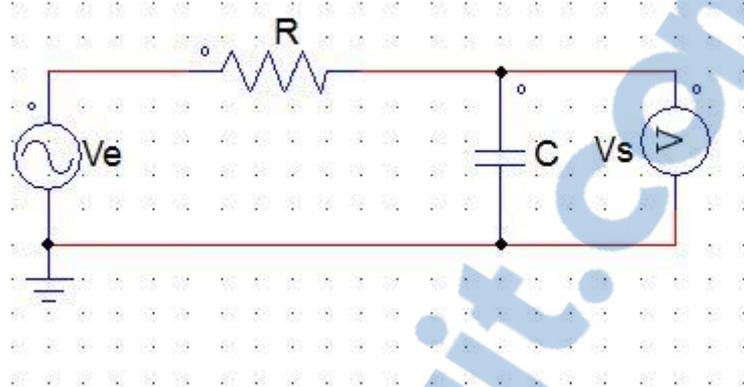


Figure 2.25 : schéma électrique d'un filtre passe bas RC.

La tension de sortie V_s peut s'écrire sous la forme :

$$V_s = V_e \times \frac{Z_c}{Z_r + Z_c} \quad (2.17)$$

Où V_e est la tension d'entrée, $Z_c = \frac{1}{jC\omega}$ et $Z_r = R$.

La transmittance ou la fonction de transfert du filtre est donnée par la relation :

$$H(j\omega) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{V_e \times \frac{Z_c}{Z_r + Z_c}}{V_e} = \frac{Z_c}{Z_r + Z_c} \quad (2.18)$$

En remplaçant les impédances par leurs expressions, on obtient :

$$H(j\omega) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + jRC\omega} \quad (2.19)$$

Cette expression représente la fonction de transfert d'un filtre passe bas premier ordre. Elle peut se mettre sous la forme suivante :

$$H(j\omega) = \frac{H_0}{1 + j \frac{f}{f_0}} \quad (2.20)$$

Où :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \times R \times C} \quad (2.21)$$

Le module et l'argument de cette fonction de transfert sont donnés par les relations :

✚ le module :

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

✚ l'argument : $Arg(H(j\omega)) = -Actan\left(\frac{f}{f_0}\right)$

Le gain du filtre est défini par : $G = 20 \times \log (|H(j\omega)|)$

Le tableau suivant résume le fonctionnement de notre filtre en fonction de la fréquence :

		f→0	f=f0	f→+∞
Module	$ H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$	1	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	→ 0
Argument	$Arg(H(j\omega)) = -Actan\left(\frac{f}{f_0}\right)$	0	$-\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{2}$
Gain	$G = 20 \times \log (H(j\omega))$	0dB	-3dB	→ -∞

Tableau 2.1 : Module, argument et gain en fonction de la fréquence.

La caractéristique la plus importante d'un filtre passe bas est sa fréquence de coupure. C'est la fréquence pour laquelle on a :

$$G = G_{max} - 3dB$$

Pour un filtre passe bas RC on a :

$$f_c = f_0 = \frac{1}{2\pi \times R \times C}$$

La fréquence de coupure de notre filtre dépend du choix de la résistance et de la capacité. Dans notre cas, on prend une fréquence de coupure de 100 Hz. Pour cela, on prend $R= 100 \text{ Ohm}$ et on trouve $C= 15.9 \mu\text{F}$.

La réponse du filtre ainsi défini est la suivante :

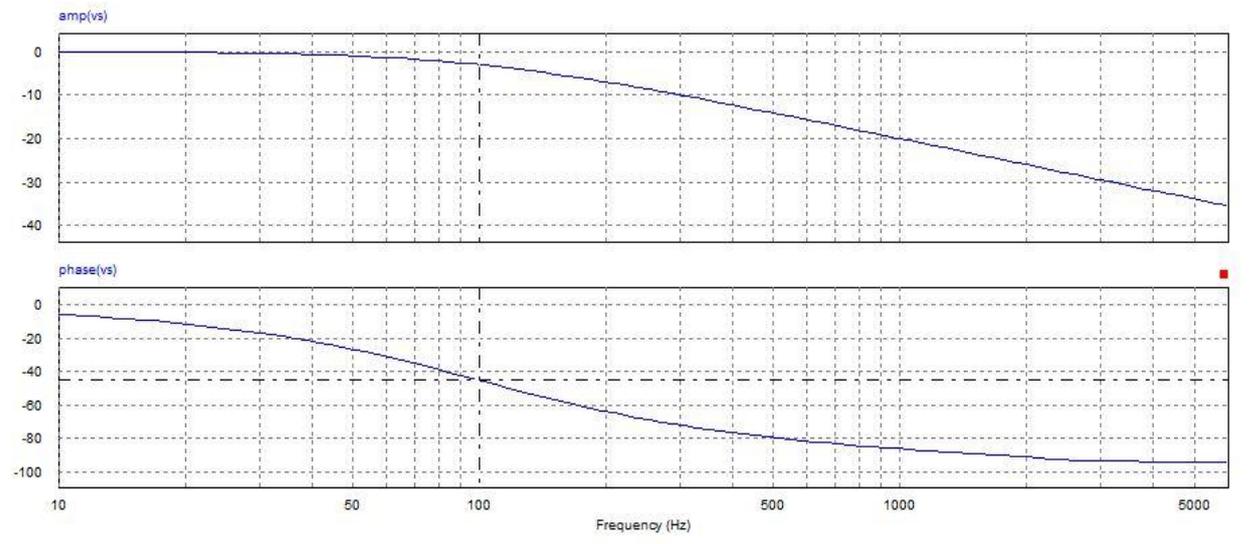


Figure 2.26 : gain et phase du filtre $f_c= 100 \text{ Hz}$.

II-3-2- Influence d'une charge sur le filtre RC :

Afin de visualiser la tension et le courant après le filtre, on a utilisé une charge résistive. On étudiera, dans ce paragraphe, l'influence de cette charge sur le fonctionnement normal du filtre.

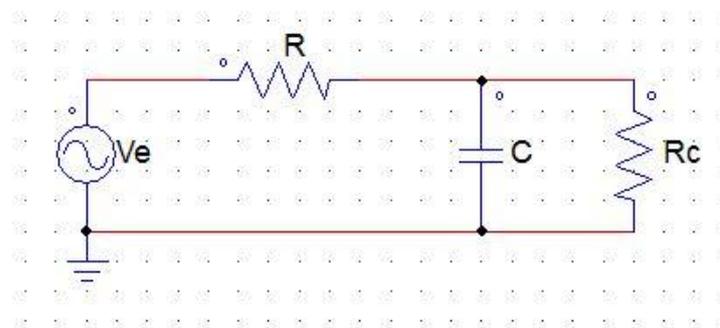


Figure 2.27 : filtre RC chargé par une charge résistive R_c .

Si on refait le calcul de la transmittance et de la fréquence de coupure en présence de la charge, on trouve :



➤ Pour la transmittance on a :

$$H(j\omega)_{charge} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{Z_{eq}}{Z_R + Z_{eq}} \quad , \text{avec } Z_{eq} = Z_{Rc} // Z_c$$

$$H(j\omega)_{charge} = \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_R}{Z_{eq}}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_c} (1 + j\omega R_c)}$$

Pour simplifier le calcul on prend le cas ou $R=R_c$, on aura :

$$H(j\omega)_{charge} = \frac{1}{2 + j\omega R} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{2} j\omega R}$$

$$H(j\omega)_{charge} = \frac{H(j\omega)}{2}$$

➤ Pour la fréquence de coupure :

$$H(j\omega)_{charge} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

Est donc :

$$f_c = \frac{1}{\pi RC}$$

En résumé :

- ✓ La transmittance diminue si le filtre est chargé.
- ✓ La fréquence de coupure augmente et est égale à : $f_c = \frac{1}{\pi RC}$.

La simulation suivante vérifie cette remarque :

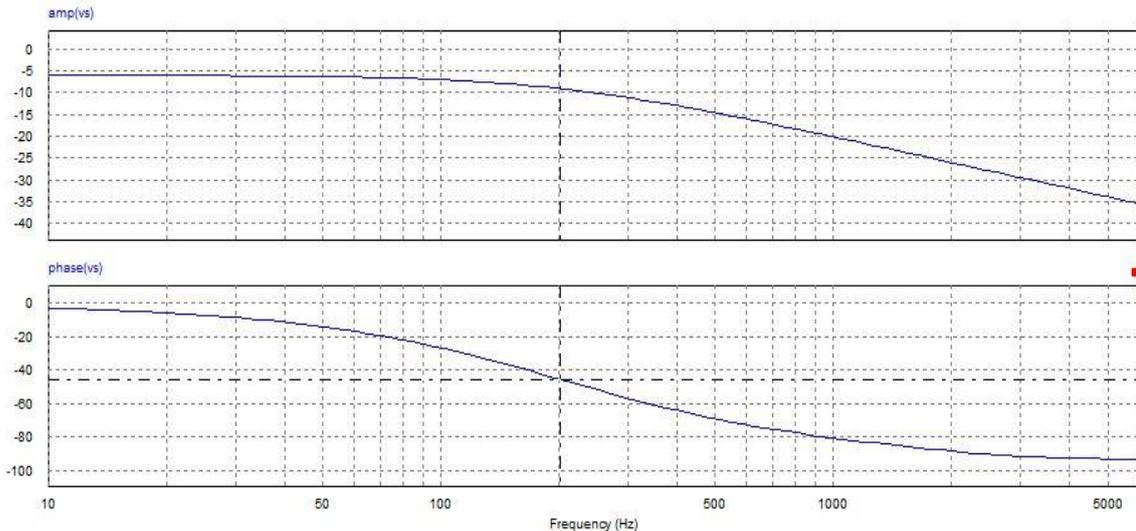


Figure 2.28 : phase et gain d'un filtre chargé par une charge résistive.

On remarque que le gain maximal est diminué de 0dB (sans charge) à -6dB et la fréquence de coupure à -3dB est passée de 100 Hz à 200 Hz. Or d'après le spectre de tension figure 2.22, les harmoniques de tension sont à des fréquences élevées à savoir 6 kHz, 12 kHz..., le filtrage de la fondamentale est alors possible.

Finalement, le circuit complet de notre onduleur en pont commandé par une MLI et muni d'un filtre passe-bas chargé par une charge résistive est donné sur la figure suivante :

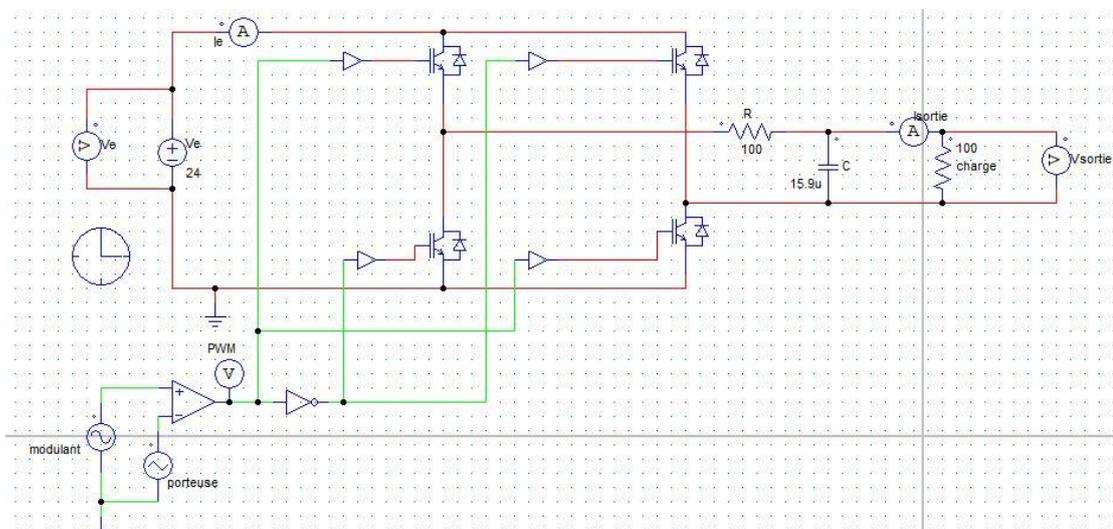


Figure 2.29 : onduleur avec filtre RC chargé par une charge résistive.

En faisant une analyse spectrale de la tension aux bornes de la charge à la sortie du filtre passe-bas, on obtient le spectre suivant :

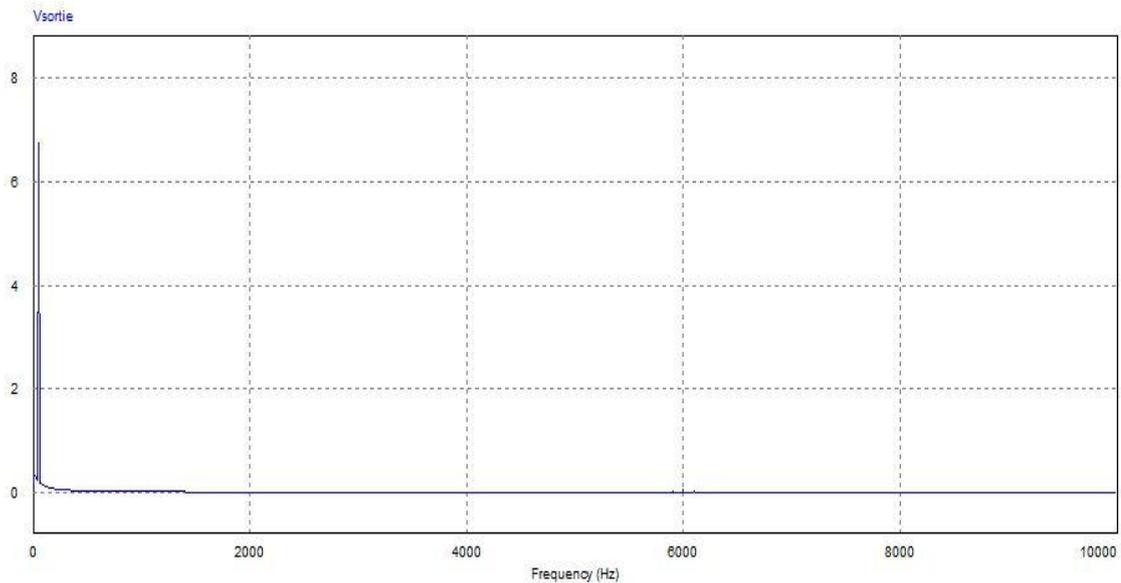


Figure 2.30 : spectre de tension de sortie après filtrage.

On remarque que le filtre passe-bas a éliminé toutes les harmoniques de fréquences supérieures à 50Hz.

Finalement, à partir d'une source de tension continue et à l'aide d'un onduleur commandé par MLI et muni d'un filtre passe-bas, nous avons réalisé un convertisseur DC-AC qui nous a donné une tension et un courant quasi sinusoïdaux de fréquence 50 Hz. les allures de tension et de courant obtenues sont représentées sur les figures suivantes :

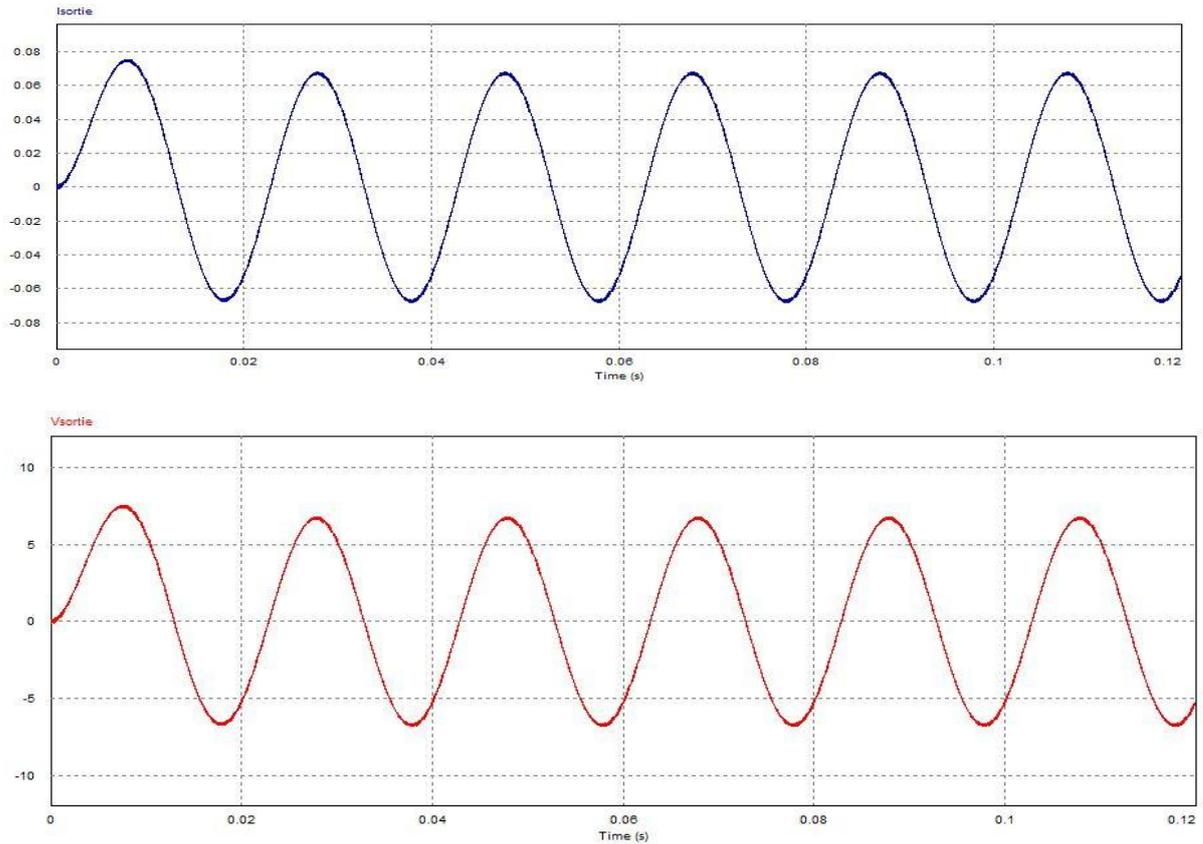


Figure 2.31 : tension et courant quasi-sinusoidaux de fréquence 50Hz.

II-4- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons traité la fonction principale d'un onduleur à savoir la conversion DC-AC. D'abord on a commencé par une étude théorique et des simulations pour deux commandes (pleine onde et MLI), ensuite on a entamé la partie filtrage qui nous a permis d'obtenir aux bornes de la charge une tension et un courant de fréquence 50 Hz.

CHAPITRE III :

SIMULATION D'UN SYSTÈME PV CONNECTÉ AU RÉSEAU

I- Introduction :

La figure 3.1 présente un exemple de système photovoltaïque connecté au réseau électrique à travers un convertisseur DC-DC et d'un onduleur DC-AC.

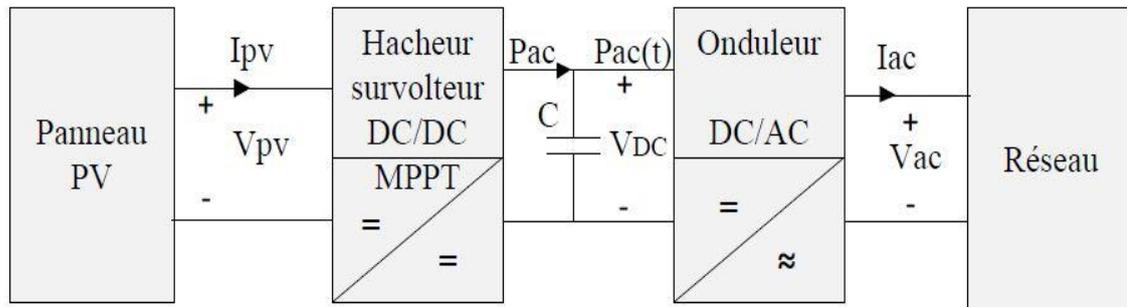


Figure 3.1 : système photovoltaïque connecté au réseau électrique [11].

Etant donné que, la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque (GPV) dépend fortement du niveau d'ensoleillement et de sa température, la courbe caractéristique de puissance du GPV est une courbe non linéaire qui présente un point de puissance maximale PPM (ou MPP pour Maximum Power Point) de coordonnées V_{PPM} pour la tension et I_{PPM} pour le courant.

La position de ce point maximal varie dans le temps. Un régulateur ou un suiveur de ce PPM qu'on appelle MPPT (Maximum Power Point Tracker) est souvent utilisé afin de forcer le GPV à fournir le maximum de sa puissance à la charge quelles que soient les conditions d'ensoleillement et de température.

En général, les convertisseurs de puissance DC-DC et DC-AC sont implantés pour assurer les tâches suivantes :

- ✚ Forcer le GPV à fonctionner au PPM. Cette commande est souvent intégrée dans les onduleurs même si leur fonction principale reste la conversion DC/AC.
- ✚ Produire un courant de sortie sinusoïdale à la fréquence du réseau (50 Hz).
- ✚ Conversion de la puissance avec un rendement proche de 100%.

Dans le chapitre précédent on a traité la partie onduleur dans laquelle à partir d'une source de tension continue, on a obtenu un courant sinusoïdal de fréquence 50 Hz. Dans ce chapitre on va étudier l'étage d'adaptation convertisseur DC-DC et la commande MPPT qui permet la poursuite du point de puissance maximale.

II- convertisseur DC-DC type hacheur survolteur (BOOST) :

Pour la conversion de puissance, l'essentiel est d'avoir un rendement élevé. Alors pour éviter la dissipation de la puissance et éviter les échauffements dans les composants électroniques, la conversion de puissance doit être réalisée à l'aide de composants de stockage (inductance et condensateur) et de commutateurs (interrupteur de puissance).

Le schéma électrique de base du convertisseur DC-DC (survolteur) est présenté sur la figure 3.2 :

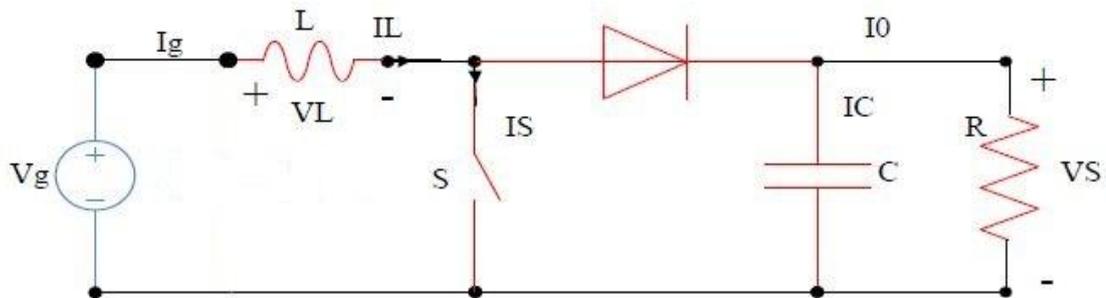


Figure 3.2 : schéma électrique de base d'un hacheur survolteur.

II-1- principe de fonctionnement :

L'interrupteur S est commandé par le signal donné sur la figure suivante :

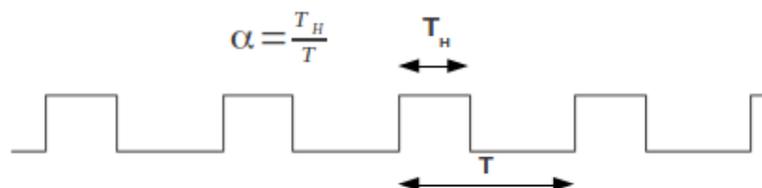


Figure 3.3 :signal rapport cyclique de la commande de l'interrupteur S ($\alpha = \frac{T_H}{T}$ étant le rapport cyclique).

Selon l'état de l'interrupteur S, le fonctionnement d'un convertisseur DC-DC peut être divisé en deux phases distinctes :

✚ Phase d'accumulation :

Au premier temps (αT), l'interrupteur S est fermé, donc le courant dans l'inductance croît progressivement. L'inductance stocke une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. Durant cette phase la diode est bloquée, la charge est alors déconnectée de l'alimentation

✚ Phase de restitution (transfert d'énergie) :

Pendant $(1-\alpha)T$, l'interrupteur S s'ouvre et l'inductance s'oppose à la diminution de courant, cette diminution génère une tension qui s'ajoute à la tension d'alimentation qui s'applique sur la charge à travers la diode.

La figure 3.4 présente la configuration du convertisseur suivant l'état de l'interrupteur S :

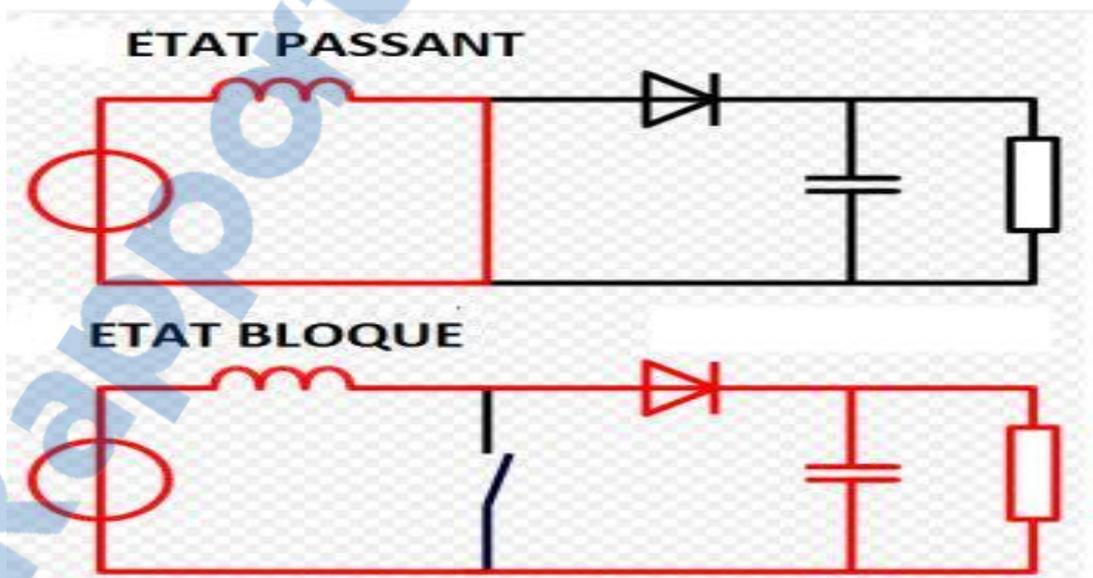


Figure 3.4 : configuration d'un convertisseur DC-DC suivant l'état de l'interrupteur.

II-2- équation d'entrée/ sortie d'un convertisseur survolteur :

Afin de décrire l'équation qui lie la tension d'entrée à celle de sortie, on considère que les composants sont parfaits et que le convertisseur travaille en mode de conduction continue ; donc le courant de l'inductance I_L ne s'annule jamais.

✚ Pour $t \in [0, \alpha T]$:

$$\text{On a: } V_g = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \rightarrow dI_L = \frac{V_g}{L} \cdot dt \quad (3.1)$$

La variation de I_L durant l'état passant est donc :

$$\int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_g}{L} \cdot dt = \frac{V_g}{L} \cdot \alpha T \quad (3.2)$$

✚ Pour $t \in [\alpha T, T]$:

$$\text{On a: } V_g - V_L - V_s = 0 \rightarrow L \cdot \frac{dI_L}{dt} = V_g - V_s \quad (3.3)$$

La variation de I_L durant l'état bloqué est :

$$\int_{\alpha T}^T dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{V_g - V_s}{L} \cdot dt = \frac{(V_g - V_s)}{L} \cdot (1 - \alpha)T \quad (3.4)$$

Or le courant qui traverse l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation donc d'après les équations (3.2) et (3.4) on aura :

$$\int_0^{\alpha T} dI_L + \int_{\alpha T}^T dI_L = 0 \rightarrow \frac{V_g}{L} \cdot \alpha T + \frac{(V_g - V_s)}{L} \cdot (1 - \alpha)T = 0$$

$$\text{Donc : } V_g = (1 - \alpha) \cdot V_s \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{V_g}{(1 - \alpha)} \quad (3.5)$$

d'après cette expression, on peut dire que la tension de sortie ne dépend pas de la charge, elle est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique. De plus la tension de sortie sera toujours supérieure à celle d'entrée puisque le rapport cyclique est compris entre 0 et 1, d'où vient le nom survolteur.

III- suiveur du point maximum de puissance(MPPT) :

Dans cette partie on s'intéresse à la commande qui permet de régler le rapport cyclique afin de forcer le GPV à fonctionner autour de son PPM.

La figure 3.5 présente le principe général de cette commande :

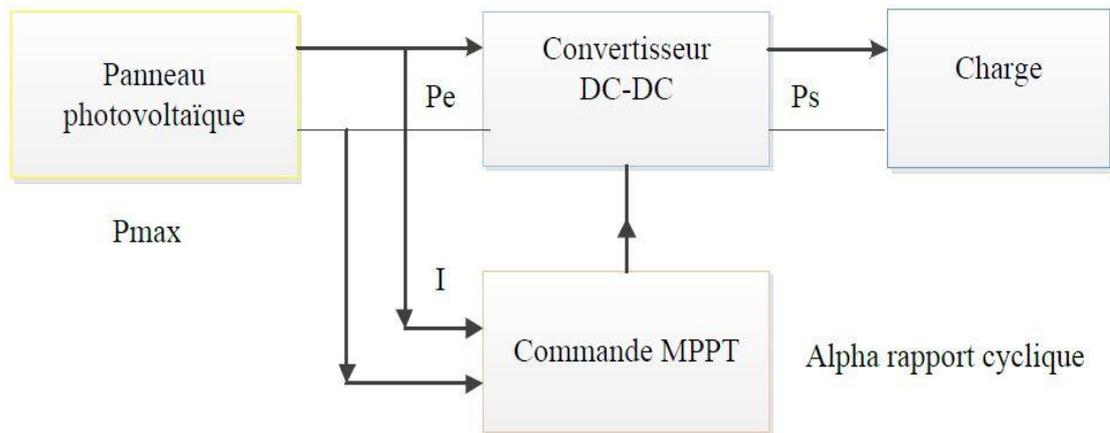


Figure 3.5 : principe général d'une commande MPPT.

Aujourd'hui, on trouve dans la littérature plusieurs types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. A titre d'exemples : la méthode Perturbe and Observe (P&O), la commande par logique floue, la modulation par détection synchrone... [3].

Pour les simulations qu'on va voir par la suite, on va utiliser un algorithme de recherche de PPM basé sur la méthode P&O [13].

III-1- Principe de l'algorithme de recherche de PPM :

L'algorithme P&O que nous avons choisi est relativement simple ; il est basé sur le principe suivant :

- ✚ A partir des mesures instantanées du courant et de la tension délivrés par le GPV, on calcule la puissance à l'instant t « $P_{actuelle}$ » que nous comparons à celle calculée à $t-1$ « $P_{ancienne}$ ».



- ✚ Si $P_{actuelle}$ est supérieure à $P_{ancienne}$, c'est que nous nous rapprochons du PPM. Alors, on ajoute un offset positif.
- ✚ Si $P_{actuelle}$ est inférieure à $P_{ancienne}$, on a dépassé le PPM, alors il faut inverser le sens de parcours (ajouter un offset négatif).

Le principe de fonctionnement d'un tel algorithme est illustré sur le schéma figure 3.6 :

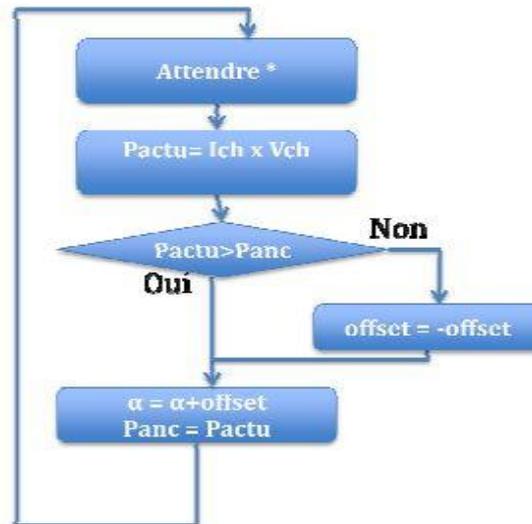


Figure 3.6 : algorithme P&O de recherche du PPM.[2]

III-2- Code C de l'algorithme de recherche :

Le code C de l'algorithme P&O utilisé est donné sur la figure suivante :

```

#define NB_POINTS 100          // nombre de point par période.
static int cpt =0;
static int alpha =60, offset =1;    // alpha est fixé à 0.6 et l'offset à 0.01.
static float Panc =0, P=0, pmoyenne=0;
static double pacc =0;
static cpt_periode =0;           // compteur pour le nombre de période.
if(cpt<=alpha)
y1=1;                            // génération de la commande.
else
y1=0;
if(cpt == NB_POINTS)            // premier test (calcul de Pmoyenne)
{
    cpt =0;
    cpt_periode ++;
    pmoyenne = pacc/NB_POINTS;
    pacc =0;
    if(cpt_periode%100==0) // 2éme test (modification de aplha)
    {
        if(pmoyenne<Panc)
        offset=-offset;
        alpha=alpha+offset;
        Panc=pmoyenne;
    }
    }
cpt++;
P=x1*x2;                        // puissance instantané (x1 : courant, x2 : tension)
pacc=pacc+P;
y2=pmoyenne;

```

Figure 3.7 : programme C de l'algorithme de la recherche de PPM [12].

Dans ce code, il existe trois paramètres qu'il faut bien fixer à savoir : l'offset, le nombre de points par période et le nombre de périodes après lesquelles le rapport cyclique sera modifié.

Après plusieurs tests, on a adopté les valeurs suivantes : 0.01 pour l'offset, 100 points par période et la modification du rapport cyclique après 100 périodes.

Dans le paragraphe suivant, nous procédons aux simulations pour vérifier le fonctionnement d'un GPV connecté à une charge via notre système MPPT.

IV- Simulations et résultats :

La figure 3.8 représente le schéma électrique du système étudié sous PSIM :

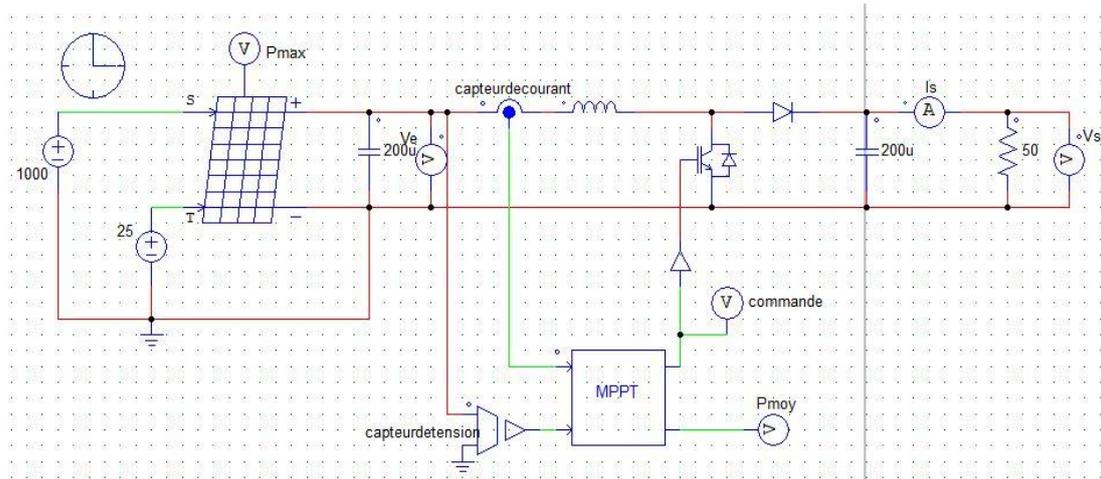


Figure 3.8 : schéma électrique du système étudié sous PSIM.

Le GPV utilisé est un modèle physique d'un panneau solaire qui délivre une puissance maximale de 60.53 (W) pour une tension $V_{PPM} = 17.04$ V et un courant $I_{PPM} = 3.55$ A sous les conditions standards d'ensoleillement et de température idéale (1000 W/m^2 , 25°C). Le logiciel PSIM donne l'affiche technique du GPV comme le montre la figure 3.9 :

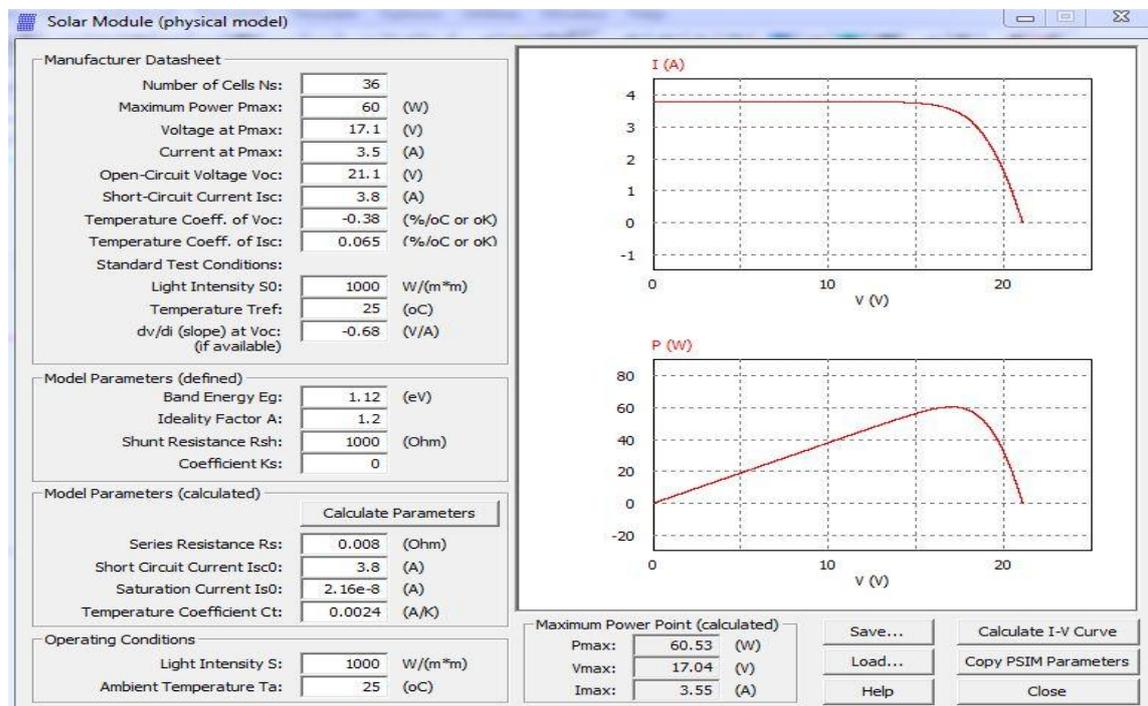


Figure 3.9: modèle d'un panneau solaire donné par le logiciel PSIM.

Après avoir configuré le block C ainsi que notre GPV, on passe à la simulation pour vérifier le suivi du PPM.

IV-1- Première simulation :

La première simulation consiste à simuler le schéma de la figure 3.9. Sous les conditions standards (1000W/m^2 , 25°C) on obtient l'allure de puissance suivante :

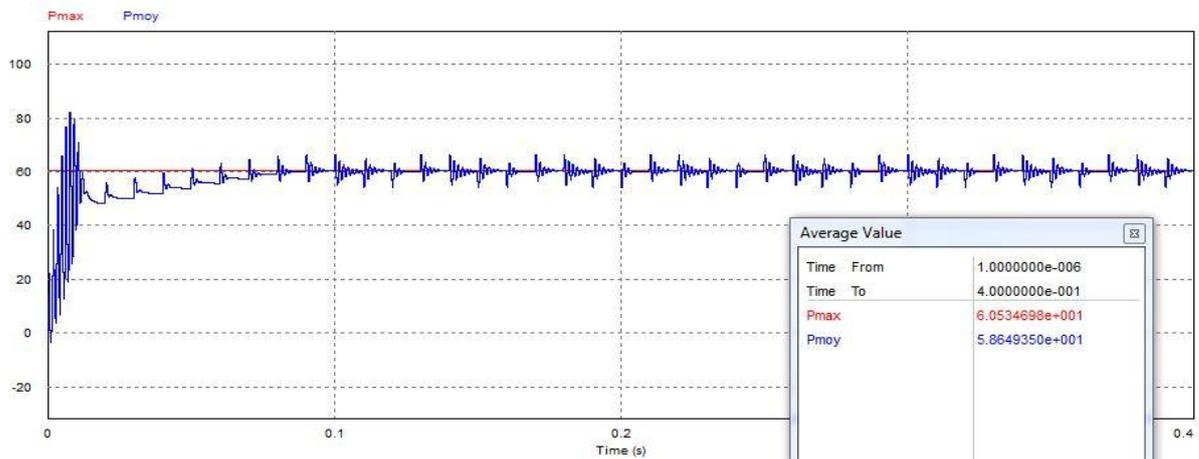


Figure 3.10 : résultat de la première simulation.

On remarque que la courbe de puissance extraite par la charge (en bleu) rejoint très rapidement le PPM de notre panneau (60.5 W courbe en rouge) et un régime de petites oscillations s'établit e moins d'un dixième de seconde autour de ce point. La puissance moyenne extraite par la charge est de 58.5 W , donc le rendement de notre convertisseur DC-DC survolteur est de :

$$\eta_{DC-DC} = \frac{P_{moy}}{P_{max}} = \frac{58.5}{60.5} = 96\%$$

Au début, le rapport cyclique est initialisé à 0.6 , pour calculer le rapport cyclique optimal (on a dit qu'on le changeait après chaque 100 période) qui permet au convertisseur DC-DC de suivre le PPM, on se base sur l'équation d'entrée/sortie du convertisseur et sur les allures de tension d'entrée sortie :

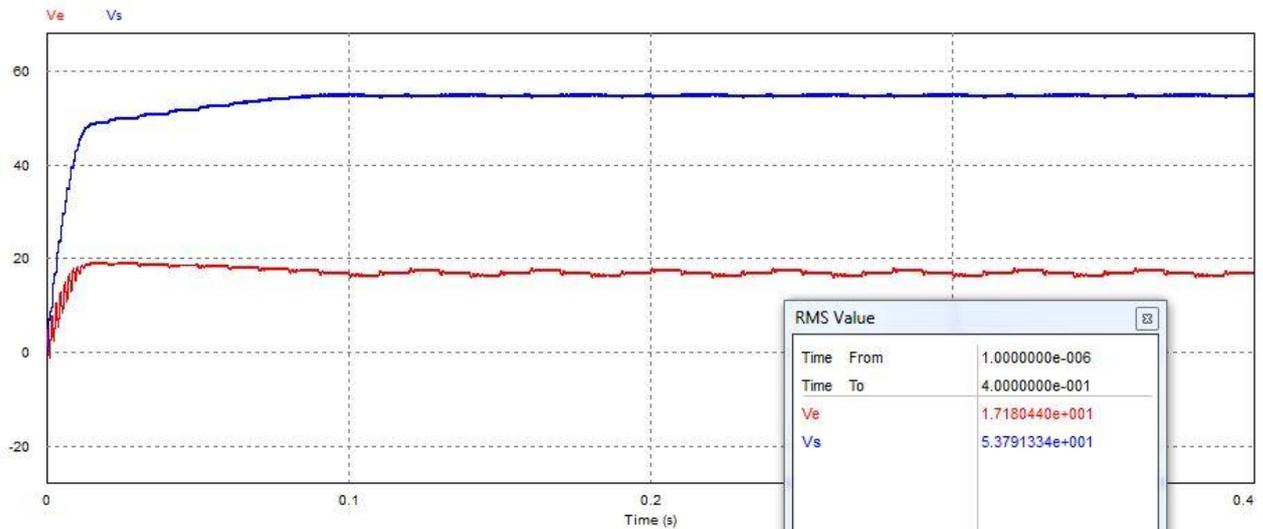


Figure 3.11 : tension d'entrée(en rouge) et de sortie (en bleu) du convertisseur DC-DC.

L'équation qui lie les deux tensions est :

$$V_s = \frac{V_g}{(1-\alpha)} \rightarrow \alpha = \frac{V_s - V_g}{V_s}$$

D'après la figure 3.12 : $V_g = 17.1$ V et $V_s = 53.7$ V donc :

$$\alpha_{opt} = \frac{V_s - V_g}{V_s} = \frac{53.7 - 17.1}{53.7} = 0.68$$

Afin de valider complètement notre algorithme MPPT, on va changer les conditions d'ensoleillement et de température qui font changer le PPM du panneau.

IV-2- Effet de l'ensoleillement et de la température:

La deuxième simulation consiste à simuler le schéma suivant sous les conditions (800W/m^2 , 30°C) :

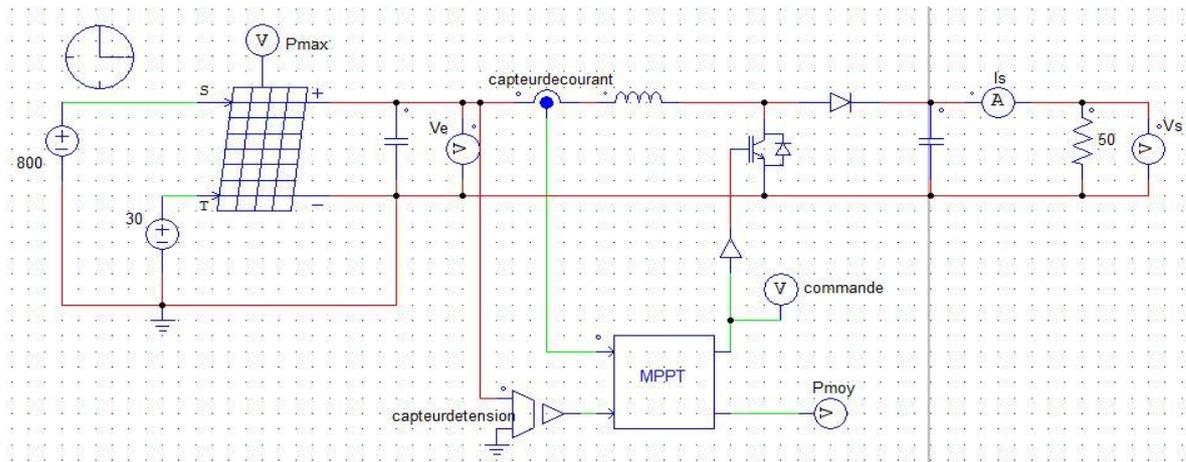


Figure 3.12 : deuxième simulation (800W/m², 30°)

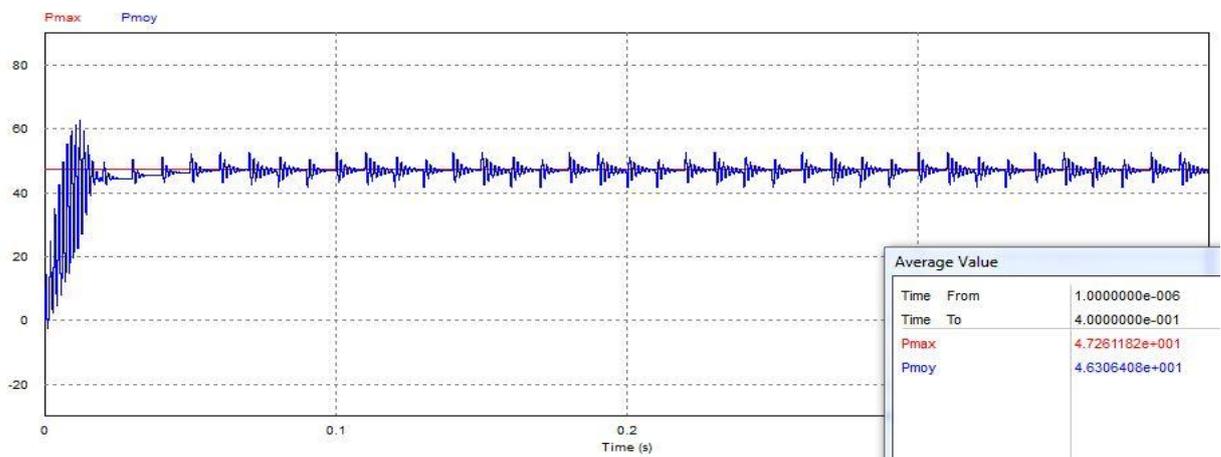


Figure 3.13 : résultat de la deuxième simulation

De même ici, on remarque clairement que la puissance extraite par la charge (en bleu) rejoint rapidement le PPM du panneau (47.2 W courbe en rouge). On note ici aussi la présence de petites oscillations autour du PPM. La puissance moyenne extraite par la charge dans le présent cas est de 46.3 W, donc le rendement de notre convertisseur DC-DC survolteur est de :

$$DC-DC = \frac{P_{moy}}{P_{max}} = \frac{46.3}{47.2} = 98\%$$

Pour le rapport cyclique optimal dans ces conditions on se base sur l'allure de la tension suivant :

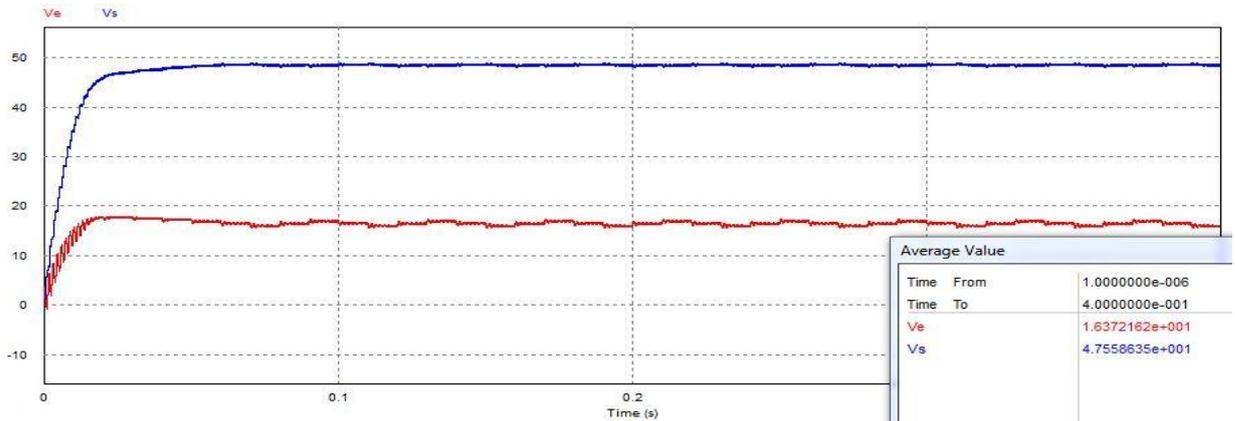


Figure 3.14 : allure de tension d'entrée sortie de la deuxième simulation

$$\alpha_{opt} = \frac{V_s - V_g}{V_s} = \frac{47.5 - 16.3}{47.5} = 0.65$$

D'après la première et la deuxième simulation on peut dire que notre algorithme permet le suivi du MPP quelles que soient les conditions d'ensoleillements et de la température.

Afin de valider notre algorithme, on l'a testé sur un ensemble de couples (ensoleillement, température). En premier lieu on a fixé l'ensoleillement à 800 W/m^2 et on a donné à la température les valeurs 40, 60 et $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (figure 3.15). Ensuite on a fixé la température à $50 \text{ }^\circ\text{C}$ et on a donné à l'ensoleillement les valeurs 1000, 800 et 600 W/m^2 (voir figure 3.16).

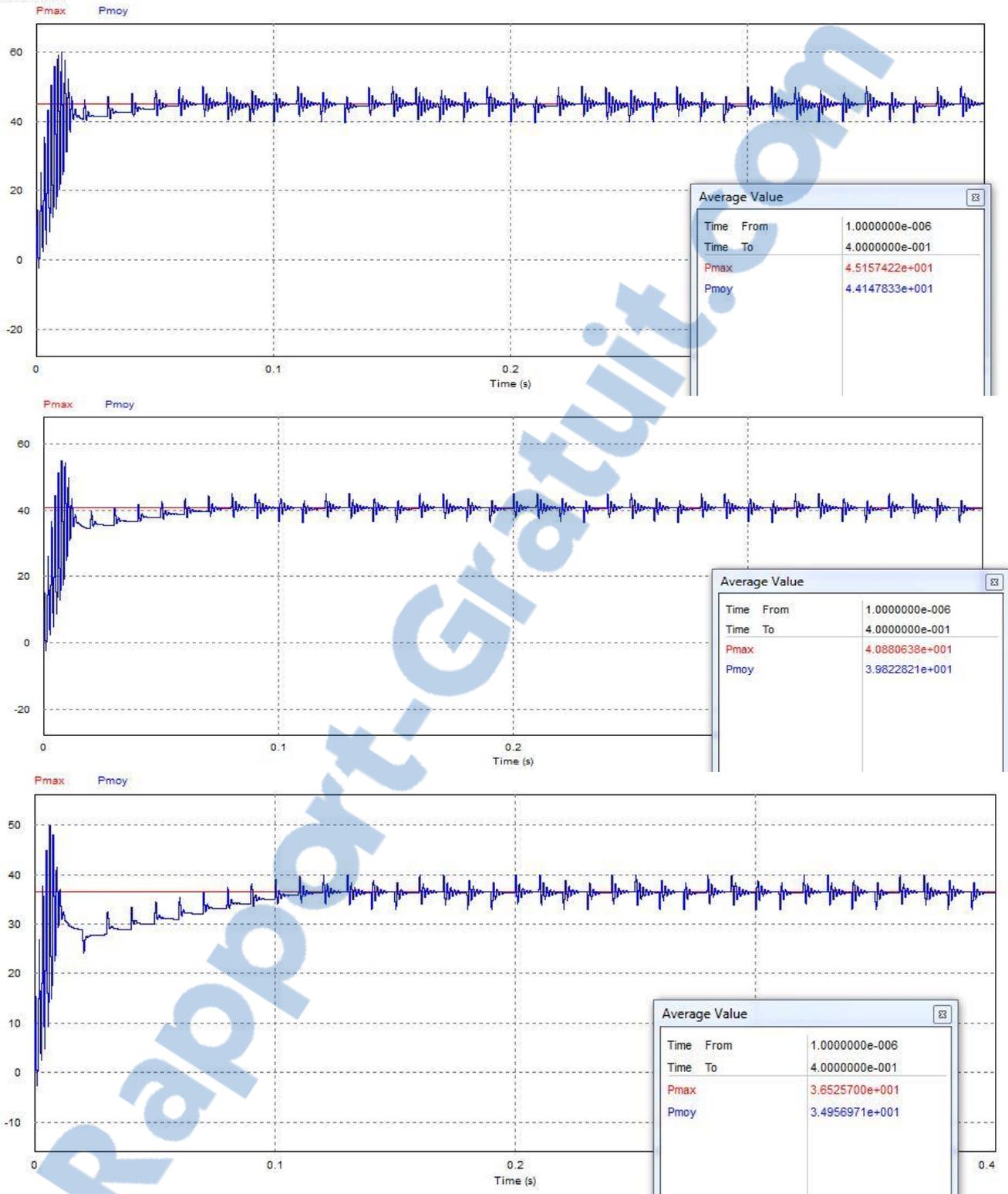


Figure 3.15 : performances de poursuite du MPP pour un ensoleillement de 800 W/m^2 et des températures de 40, 60 et 80 °C (du haut en bas respectivement).

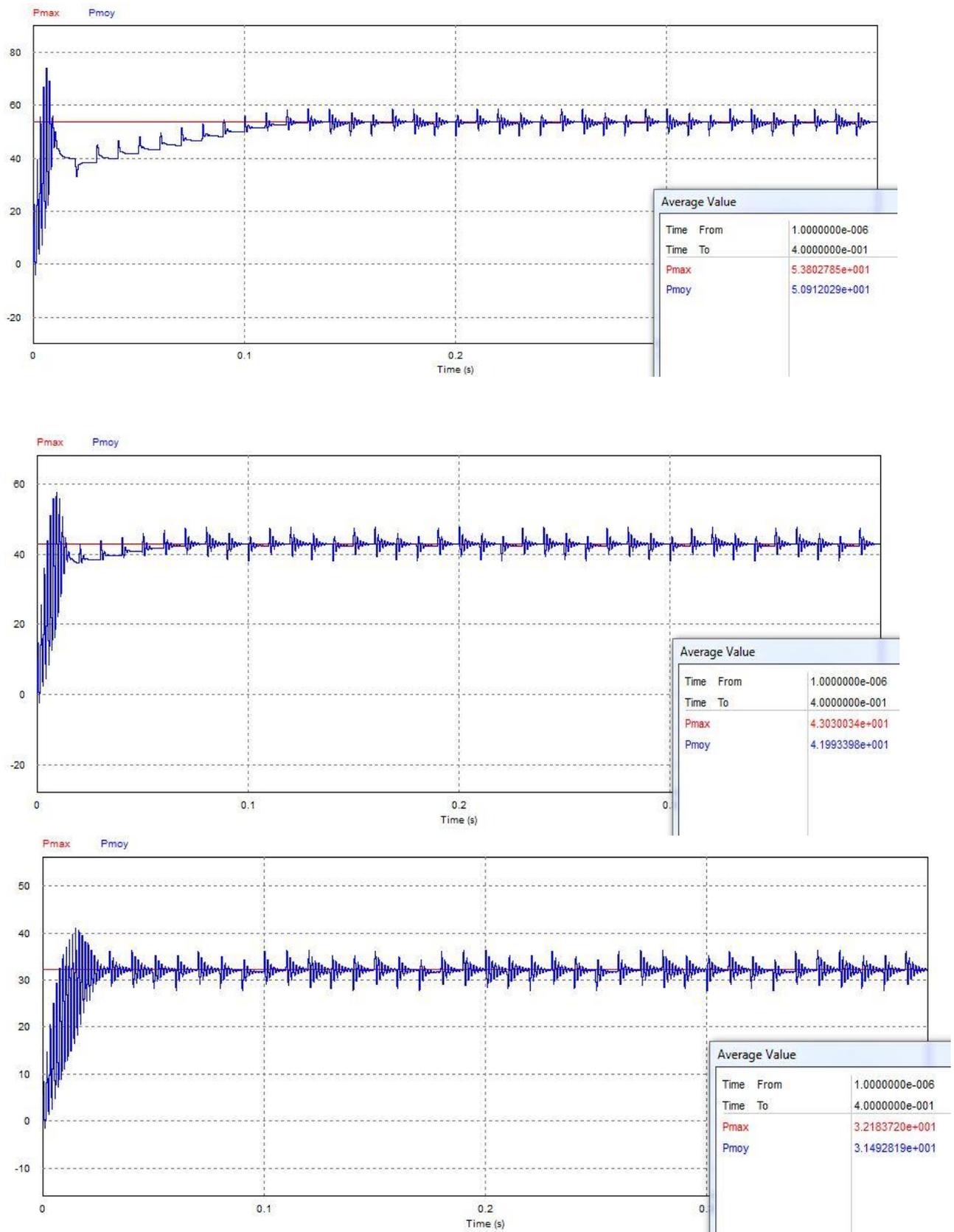


Figure 3.16 : performances de poursuite du MPP pour une température de 50°C et un ensoleillement de 1000, 800 et 600 W/m²(du haut en bas respectivement).

IV-3- Simulation du système PV entier:

La troisième simulation consiste à simuler le système PV complet qui est connecté au réseau à travers un convertisseur DC-DC avec sa commande MPPT et d'un onduleur DC-AC avec sa commande MLI. Le système complet est illustré sur la figure 3.17 suivante :

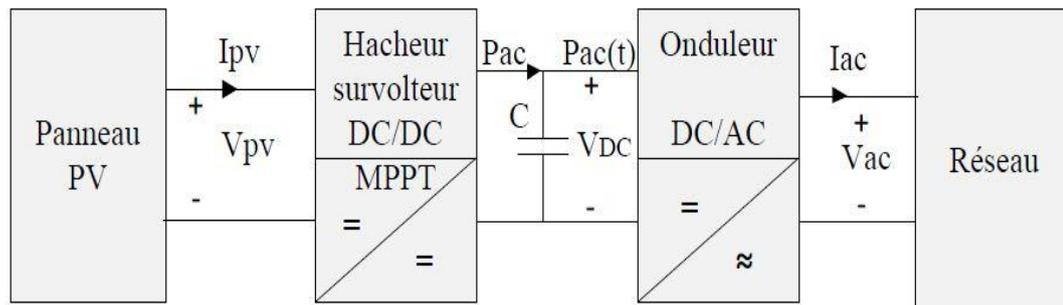


Figure 3.17 : système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Le schéma électrique de notre système sous le logiciel PSIM est le suivant :

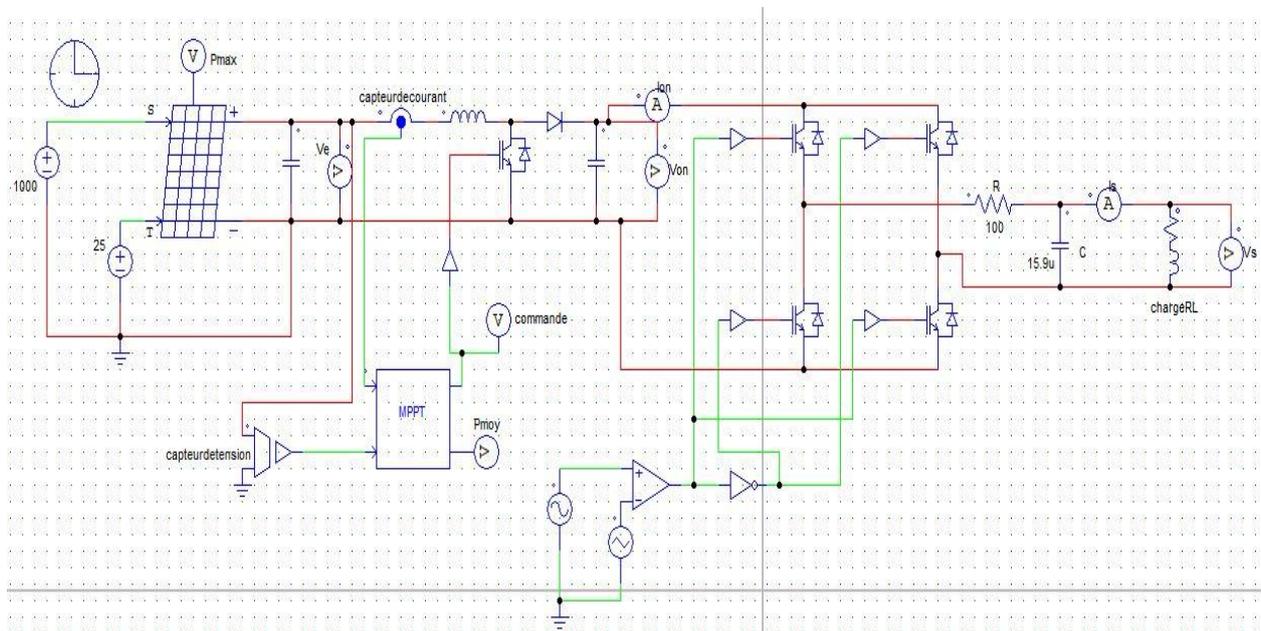


Figure 3.18 : schéma électrique du système PV connecté au réseau.

Dans cette partie on regroupera les résultats des chapitres 2 et 3 pour simuler un système PV entier. Dans un premier temps on va visualiser la puissance maximale aux bornes de notre GPV et la puissance moyenne à la sortie du convertisseur DC-DC pour pouvoir calculer le rendement (η_{DC-DC}). Ensuite on



visualise la tension et le courant aux bornes de la charge à la sortie de l'onduleur DC-AC, on calcule la puissance et on déduit le rendement (η_{DC-AC}). Finalement on calcule le rendement total de notre installation connectée au réseau.

✚ Côté DC :

La figure suivante présente les allures de puissance côté continu :

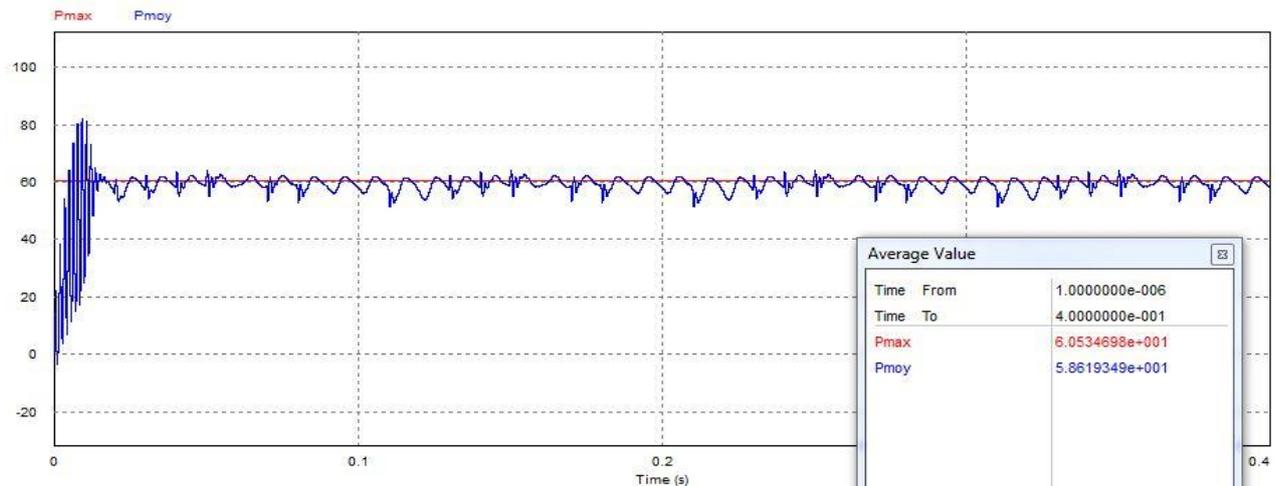


Figure 3.19 : puissance maximale aux bornes du panneau (en rouge) et puissance moyenne à la sortie du convertisseur DC-DC (en bleu).

D'après les allures de puissance, le rendement côté DC vaut :

$$DC-DC = \frac{P_{moy}}{P_{max}} = \frac{58.6}{60.5} = 96.7\% \quad (3.6)$$

✚ Côté AC :

La puissance à la sortie du convertisseur DC-DC est égale à la puissance d'entrée du convertisseur DC-AC soit : $P_{onduleur} = 58.6$ (W).

Pour calculer la puissance de sortie de l'onduleur on se base sur les allures de la tension de sortie (aux bornes de la charge) :

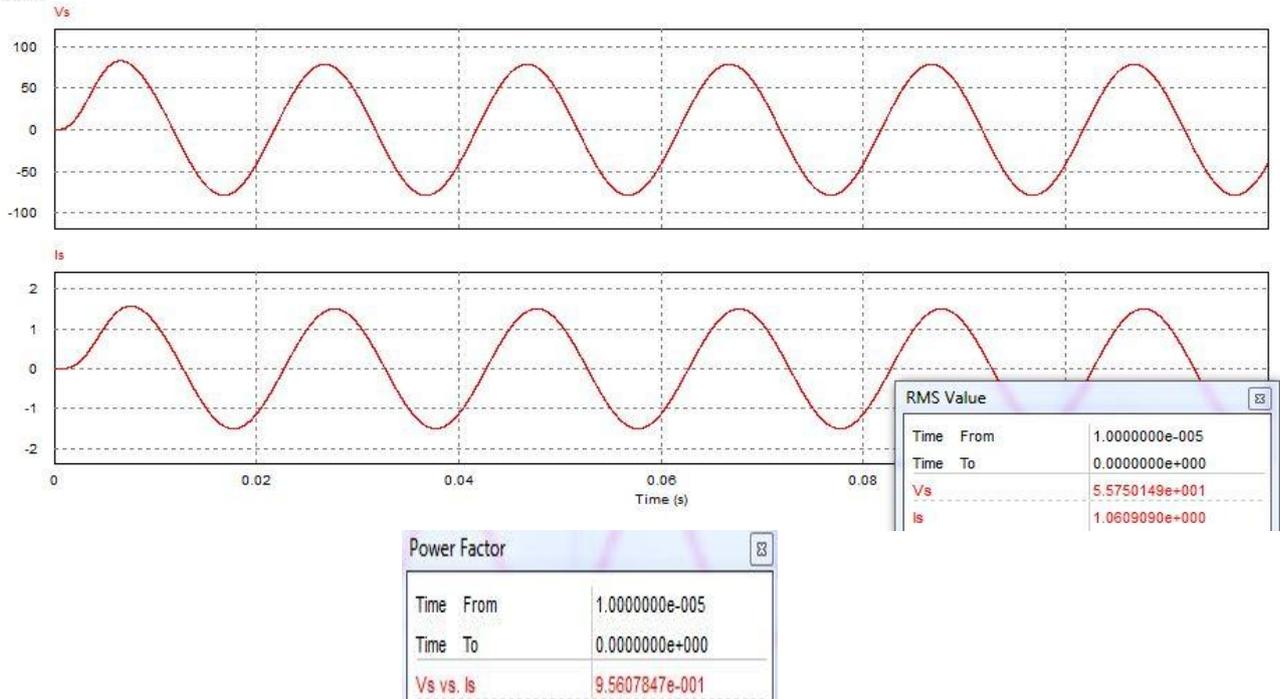


Figure 3.20 : allures de la tension et du courant aux bornes de la charge, valeur efficace (RMS) et facteur de puissance (FP).

Donc la puissance à la sortie du convertisseur DC-AC vaut :

$$P_s = V_{RMS} \times I_{RMS} \times FP \quad (3.7)$$

$$P_s = 55.7 \times 1.06 \times 0.9 = 53.13 (W)$$

Et donc le rendement de notre onduleur est de :

$$DC-AC = \frac{P_s}{P_{\text{onduleur}}} \quad (3.8)$$

$$DC-AC = \frac{53.13}{58.6} = 0.90 = 90 \% \quad (3.9)$$

✚ Rendement total de l'installation :

Le rendement total de l'installation est égal à la puissance aux bornes de la charge (P_s) divisée par la puissance maximale disponible aux bornes du GPV (P_{max}) :

$$\text{total} = \frac{P_s}{P_{\text{max}}} \quad (3.10)$$

D'après les équations (3.6) et (3.8) on aura :

$$\text{total} = \frac{DC-DC}{P_{\text{moy}}} \times DC-AC \times P_{\text{onduleur}}$$

Or $P_{\text{onduleur}} = P_{\text{moy}}$, Donc le rendement total sera :

$$total = DC-DC \times DC-AC \quad (3.11)$$

D'après (3.6) et (3.9) on trouve :

$$total = 96\% \times 90\% = 86\%$$

Est donc le rendement total de notre installation est de 86 %.

IV-4- Conclusion :

Ce dernier chapitre avait pour objet de simuler une installation photovoltaïque connectée au réseau électrique via deux étages d'adaptation à savoir, le convertisseur DC-DC et le convertisseur DC-AC afin de profiter du maximum de puissance délivré par le GPV. D'après les résultats de simulation on a vérifié que le convertisseur DC-DC muni de la commande MPPT permet de suivre le PPM du GPV quelles que soient les conditions d'éclairement et de température avec un rendement de 96 % voir 98%. En intégrant l'onduleur, étudié au chapitre 2 qui nous a donné un courant alternatif à la fréquence de réseau (50 Hz) avec un rendement de 90 %, le rendement de notre installation est de 86%. On peut l'augmenter jusqu'à 90 % et plus si on utilise des systèmes de refroidissement au niveau des convertisseurs de puissance parce que la totalité des pertes sont dues à l'échauffement des composantes utilisés dans ces convertisseurs [14].

Conclusion générale

L'électronique de puissance joue un rôle très important dans les applications photovoltaïques, à savoir la conversion et l'adaptation de la production photovoltaïque. En effet, beaucoup de systèmes de conversion et d'adaptation ont été dédiés aux applications PV notamment les onduleurs ayant des premiers étages d'adaptation (convertisseur DC-DC) en entrée assurant la recherche de point de puissance maximale (PPM).

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés aux onduleurs photovoltaïques en pont constitués d'interrupteurs électroniques commandés (par un jeu de commutation) pour obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau de distribution. Deux types de commandes ont été étudiés : la commande pleine onde (commande symétrique) et la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les résultats ont montré que la commande MLI munie d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure adéquate, permet d'obtenir, à la sortie de l'onduleur, une tension et un courant quasi-sinusoïdaux de fréquence 50 Hz.

Une étude de l'étage DC-DC de notre onduleur a été, ensuite, réalisée. Un algorithme de poursuite du PPM a alors été implémenté et testé pour différentes valeurs d'ensoleillement et de températures des modules PV. Les simulations ont montré que notre algorithme suit correctement les variations du PPM.

L'étude du rendement de notre installation a donné les résultats suivants:

- Le rendement côté DC vaut : 96.7%
- Le rendement côté AC vaut : 90%
- Le rendement total de l'installation vaut : 86%.

Ce dernier rendement peut être augmenté jusqu'à 90 % et plus si on utilise des systèmes de refroidissement au niveau des convertisseurs de puissance parce que la totalité des pertes sont dues à l'échauffement des composants utilisés dans ces convertisseurs.

Cette période de projet de fin d'étude a considérablement enrichi mes connaissances dans le domaine des énergies renouvelables et plus particulièrement dans le domaine photovoltaïque qui est en plein essor ces derniers temps.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Mr. Violaine Didier, « Rôles des onduleurs pour systèmes photovoltaïques, fonctionnement, état de l'art et étude des performances ». HESPUL –Aout 2007-. WWW.hespul.org.
- [2] Dr. Mustapha Ayaita, Professeur-chercheur Expert en Energies Renouvelables. Cours photovoltaïque 2011/2012. – ENIM-.
- [3] Mr. KHERCHI Mohamed, « Types d'onduleurs dans une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique ». Attaché de recherche, Division énergie solaire photovoltaïque -CDER-. La journée nationale du solaire photovoltaïque, Alger 2014.
- [4] Thèse doctorat de l'université de Toulouse janvier 2009. Titre « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques »
- [5] Systèmes photovoltaïques : Niveau de développement actuel et tendances des systèmes photovoltaïques. Thème abordé sur le site WWW.SMA.de.
- [6] M.SLAMA Fateh, Thème « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF-. Mémoire de Magister 2011.
- [7] cour sur les onduleurs, , lycée Newton-ENREA Clichy.
- [8] Mr. Philippe Missirliu, cour onduleur, département électrique et informatique Industrielle. Ref : S3_ET3_CM3_onduleurs.
- [9] J.B.J.Fourier: "Théorie analytique de la chaleur". Chez Firmin Didot, père et fils, 1822
- [10] Travaux pratiques « Etude de la structure de puissance d'un onduleur ». Gérard Ollé - L.T. Déodat de Séverac – TOULOUSE.
- [11] M.SLAMA Fateh, Thème « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF-. Mémoire de Magister 2011.



[12] : Projet génie électrique « commande rapprochée d'un panneau photovoltaïque ». POLYTECH CLERMONT-FERRRAND. 2012/2013.

[13] : Mlle. El Himer Sarah, « Etude comparative des techniques de commande MPPT d'un générateur photovoltaïque ». Projet de fin d'étude. 2012/2013

[14] : Portail solaire, Annuaire de l'énergie solaire en France. Partie système de refroidissement. <http://www.portail-solaire.com/onduleurs.html>