

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
ABDALLAH JELALI

INTERCONNEXION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE SUR LE RESEAU
ÉLECTRIQUE

AOÛT 2012

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables pour la production de l'énergie est une option énergétique prometteuse qui répond à la demande croissante en énergie dans le monde, avec des avantages comme l'absence de la pollution et la disponibilité partout au globe terrestre.

Ce travail consiste à l'étude de la connexion des panneaux solaires photovoltaïques sur le réseau électrique, cette étude est menée en parallèle avec une réalisation pratique du système photovoltaïque pour un chargement des batteries.

Le système complet a été implémenté dans le simulateur Matlab. Pour les composants passifs et les composants de puissance comme les IGBT et les diodes, nous avons utilisé les modèles comportementaux de la bibliothèque SimpowerSystems.

Le système conçu consiste à tirer le maximum de puissance des panneaux solaires en utilisant la technique de MPPT pour la commande du hacheur. Il consiste également à imposer l'onde du courant de sortie de l'onduleur dans une fourchette de courant autour du signal de référence imposé par un régulateur.

Les effets des différents paramètres du système sur la qualité des grandeurs électriques ont été étudiés. Des analyses spectrales des signaux de sortie permettent de choisir les valeurs optimales de ces paramètres.

Le système photovoltaïque réalisé permet de charger des batteries de 24 volts et plus. La technique de la commande MPPT a été implémentée dans un dsPIC33FJ128MC706. Pour cela nous avons utilisé l'environnement MPLAB pour programmer ce dsPIC.

Les résultats apportés par le mémoire démontrent le fonctionnement du système photovoltaïque à son point de puissance maximale (PPM). Ces résultats démontrent également l'amélioration de la qualité du courant de sortie en fonction des différents paramètres du tout le système.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de mes travaux de recherche.

Je remercie profondément mon directeur de recherche, Mr Ahmed Chériti, pour avoir accepté de diriger mes travaux et pour m'avoir guidé tout au long du mémoire pour ses conseils, ses critiques et son attitude exemplaire tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.

J'adresse également mes sincères remerciements au professeur M Taher Tafticht pour son aide et sa collaboration durant toute la période de mon projet.

Je remercie aussi tout le personnel du département du génie électrique de l'UQTR spécialement les professeurs : M. Mamadou Lamine Doumbia, M. Adel Omar Dahmane, M. Pierre Sicard et M. Adam Skorek.

Finalement, je tiens à remercier tous les membres de ma famille pour leur soutien et leur appui moral surtout ma mère, mon père et ma fiancée. Je leur serai reconnaissant toute ma vie.

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures	xi
Chapitre 1 - Introduction.....	1
Chapitre 2 - État de l'art.....	3
2.1 Introduction	3
2.2 Physique fondamentale des cellules PV.....	4
2.2.1 Principe général	4
2.2.2 Photovoltaïque	5
2.3 Avantages et inconvénients de la conversion PV.....	8
2.3.1 Avantages	9
2.3.2 Limites	9
2.4 Générateur PV et ses performances	10

2.4.1	Généralité sur les caractéristiques d'un module PV	10
2.4.2	Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique tension-courant	12
2.4.3	Effet de la variation de la température de la cellule sur la caractéristique tension-courant	14
2.4.4	Influence de l'angle d'incidence	16
2.4.5	Montage en série de cellules ou de modules.....	18
2.4.6	Montage en parallèle de modules ou de branches	22
2.5	Conclusion.....	25
Chapitre 3 - Convertisseurs photovoltaïques		26
3.1	Introduction	26
3.2	Différentes connexions possibles avec un module PV.....	27
3.2.1	Connexion directe d'un module photovoltaïque	27
3.2.2	Connexion avec les convertisseurs DC-DC.....	30
3.2.3	Connexion avec les convertisseurs DC-AC.....	37
3.3	Différentes approches d'interface de la conversion PV	42
3.3.1	Approches courantes.....	42
3.3.2	Mise en série des convertisseurs DC-DC, cascadié avec un onduleur simple	44
3.3.3	Avantages d'un convertisseur pour un module PV	44

3.3.4	Problèmes de mise en série ou en parallèle des modules	45
3.4	Conclusion.....	46
Chapitre 4 - Conception du convertisseur photovoltaïque.....		47
4.1	Introduction	47
4.2	Système photovoltaïque proposé.....	47
4.2.1	Choix du convertisseur DC/DC	49
4.2.2	Choix du convertisseur DC/AC	50
4.3	Conception de la commande du système photovoltaïque	52
4.3.1	Commande du convertisseur DC/DC	52
4.3.2	Commande du convertisseur DC/AC (Technique de l'hystérésis).....	53
4.4	Implémentation du système photovoltaïque dans MATLAB	56
4.4.1	Implémentation du convertisseur DC/DC dans le logiciel MATLAB	56
4.4.2	Implémentation du modèle du convertisseur DC/AC dans MATLAB	57
4.5	Choix de l'algorithme (Technique de l'hystérésis)	58
4.6	Résultats de simulation.....	61
4.6.1	Détermination de l'amplitude du courant de référence	63
4.6.2	Discretisation de l'amplitude du courant de référence	65

4.6.3	Résultats de simulation en fonction de la commande.....	68
4.7	L'effet des différents paramètres du système photovoltaïque proposé	72
4.7.1	Effet du filtrage du courant I_{ref}	73
4.7.2	Effet de la largeur de la bande de l'hystérésis	76
4.7.3	Effet de l'inductance de charge (Lch)	79
4.7.4	Effet du facteur de puissance ($\cos(\varphi)$)	82
4.7.5	Effet de l'amplitude de la tension d'alimentation de l'onduleur.....	85
4.8	Conclusion.....	87
Chapitre 5 - Réalisation d'un chargeur de batterie à partir du panneau solaire		89
5.1	Introduction	89
5.2	Panneau solaire choisi	90
5.2.1	Caractéristiques du panneau solaire.....	90
5.2.2	Caractéristiques électriques	92
5.3	Batterie	92
5.4	Convertisseur de puissance	93
5.4.1	Choix du convertisseur DC/DC	93
5.4.2	Hacheur à base d'un module IRAMY20UP60B	94
5.5	Commande	94
5.5.1	Acquisition des données	94

5.5.2 Choix du dsPIC	96
5.6 Programmation du dsPIC33FJ128MC706	97
5.7 Système photovoltaïque réalisé	101
5.8 Conclusion.....	102
Chapitre 6 - Conclusion	103
Bibliographie.....	106
Annexe A – Programme de commande pour la recherche de MPPT implémenté dans le dsPIC	109
Annexe B – Programme MPPT implémenté dans le dsPIC à rectifier	112
Annexe C – Fonction de la caractéristique du panneau solaire implémenté dans MATLAB.....	115
Annexe D – Fonction permettant le calcul de l’optimum du panneau solaire implémenté dans MATLAB	116

Liste des tableaux

Tableau 4. 1 Algorithme général de la technique d’hystérésis	60
Tableau 4. 2 Harmoniques les plus grands du courant de charge sans discrétisation.....	74
Tableau 4. 3 Harmoniques les plus grands du courant de charge avec discrétisation.....	76
Tableau 5. 1 Paramètres du panneau solaire.....	91
Tableau 5. 2 Paramètres du dsPIC33FJ128MC706	97

Liste des figures

Figure 2. 1 Principe de la conversion photovoltaïque.....	5
Figure 2. 2 Structure d'une cellule cristalline	7
Figure 2. 3 Structure d'une cellule en couche mince.....	7
Figure 2. 4 Configuration des cellules photovoltaïques.....	8
Figure 2. 5 Caractéristique U-I d'une cellule solaire en conditions d'éclairement et de température nominale	10
Figure 2. 6 Caractéristique tension-courant d'un module formé de 36 cellules.....	11
Figure 2. 7 Caractéristique tension-puissance d'un module PV	12
Figure 2. 8 Effet sur la caractéristique tension-courant d'une variation d'éclairement à température interne de 25°C	13
Figure 2. 9 Caractéristique tension-courant en fonction de la température des cellules.....	14
Figure 2. 10 Lieu des points à puissance optimum	16
Figure 2. 11 Influence de l'angle d'incidence.....	17
Figure 2. 12 Caractéristique tension-courant du montage en série de deux cellules identiques	18
Figure 2. 13 Mise en série de deux cellules non identiques.....	19
Figure 2. 14 Mise en série de 18 cellules dont une plus faible	20
Figure 2. 15 Montage en parallèle de deux cellules solaires identiques	22
Figure 2. 16 Mise en parallèle de deux cellules non identiques	23
Figure 2. 17 Organigramme du contrôle avec la méthode perturbation et observation	25

Figure 3. 1 Connexion directe d'un module PV sur un réseau DC.....	27
Figure 3. 2 Interface entre un module PV et un réseau DC	29
Figure 3. 3 Schéma de principe d'un convertisseur élévateur-abaisseur.....	33
Figure 3. 4 Schéma de principe d'un convertisseur abaisseur.....	34
Figure 3. 5 Schéma de principe d'un convertisseur élévateur.....	35
Figure 3. 6 Schéma de principe d'un convertisseur flyback (élévateur- abaisseur avec isolation).....	36
Figure 3. 7 Schéma de principe d'un convertisseur forward (abaisseur avec isolation).....	36
Figure 3. 8 Évolution de la puissance dans un circuit alternatif monophasé.....	38
Figure 3. 9 Principe de la génération de signaux sinusoïdaux	40
Figure 3. 10 Schéma de principe d'un onduleur de tension	41
Figure 3. 11 Schéma de principe d'un onduleur de courant monophasé.....	41
Figure 3. 12 Mise en cascade d'un onduleur et un convertisseur DC/DC pour plusieurs modules connectés en série.....	42
Figure 3. 13 Mise en cascade d'un onduleur et un convertisseur élévateur avec isolement pour chaque module	43
Figure 3. 14 Mise en cascade d'un onduleur avec la mise en série des convertisseurs DC-DC correspondants à un seul module chacun.....	44
Figure 4. 1 Circuit électrique du système photovoltaïque proposé pour la connexion avec le réseau.....	48
Figure 4. 2 Circuit et les formes d'ondes des grandeurs électriques d'un convertisseur élévateur en mode continue	49
Figure 4. 3 Convertisseur DC/AC utilisé pour la connexion avec le réseau électrique	51
Figure 4. 4 Schéma bloc pour la commande du convertisseur DC/DC	52
Figure 4. 5 Génération de la tension de référence	53
Figure 4. 6 Génération d'un signal PWM.....	53

Figure 4. 7 Bande d'hystérésis du courant dans la charge	54
Figure 4. 8 Allure du courant de sortie et des signaux de référence	55
Figure 4. 9 Logique de commande	55
Figure 4. 10 Représentation du convertisseur DC/DC implémenté dans MATLAB	56
Figure 4. 11 Représentation du convertisseur DC/AC de type circuit implémenté dans MATLAB	57
Figure 4. 12 Représentation graphique du modèle de simulation du système photovoltaïque	58
Figure 4. 13 Forme de la tension de charge en fonction des états de commandes de l'onduleur	59
Figure 4. 14 Implémentation de l'algorithme (technique d'hystérésis) sous MATLAB	61
Figure 4. 15 Tension de référence et tension aux bornes du panneau à éclairage variable	62
Figure 4. 16 Puissance réelle délivrée par le panneau à éclairage variable	62
Figure 4. 17 Détermination du courant de référence dans le simulateur MATLAB	63
Figure 4. 18 Évolution de la tension d'alimentation de l'onduleur suite à des perturbations sur l'amplitude de l'éclairage	64
Figure 4. 19 Courant de référence et courant dans la charge suite à une variation de l'éclairage	65
Figure 4. 20 Amplitude du courant de référence sans discrétisation	66
Figure 4. 21 Forme du courant de référence sans discrétisation de l'amplitude de ce signal	66
Figure 4. 22 Détermination du courant de référence avec discrétisation dans le simulateur MATLAB	67
Figure 4. 23 Amplitude du courant de référence avec discrétisation	67
Figure 4. 24 Forme du courant de référence après discrétisation pendant une période de fonctionnement	68
Figure 4. 25 Différentes commandes de l'onduleur	68

Figure 4. 26	Forme de la tension aux bornes de la charge de l'onduleur.	69
Figure 4. 27	Forme du courant de charge et du courant de référence.....	70
Figure 4. 28	Différents états de commande de l'onduleur pendant une période de 1/60s	70
Figure 4. 29	Forme de la tension aux bornes de la charge de l'onduleur	71
Figure 4. 30	Forme du courant de charge et du courant de référence.....	71
Figure 4. 31	Spectre du courant de charge sans discrétisation	74
Figure 4. 32	Spectre du courant de charge avec discrétisation	75
Figure 4. 33	Spectre du courant de charge avec un pas d'hystérésis de ± 0.15	77
Figure 4. 34	Spectre du courant de charge avec un pas d'hystérésis de ± 0.2	78
Figure 4. 35	Spectre du courant de charge avec un pas d'hystérésis de ± 0.3	79
Figure 4. 36	Spectre du courant de charge pour $L_{ch} = 1\text{mH}$	80
Figure 4. 37	Spectre du courant de charge pour $L_{ch} = 2\text{mH}$	81
Figure 4. 38	Spectre du courant de charge pour $L_{ch} = 4\text{mH}$	82
Figure 4. 39	Spectre du courant de charge avec un déphasage de 0 degrés	83
Figure 4. 40	Spectre du courant de charge avec un déphasage de 30 degrés	84
Figure 4. 41	Spectre du courant de charge avec un déphasage de 60 degrés	84
Figure 4. 42	Spectre du courant de charge avec une tension d'alimentation de l'onduleur de l'ordre 50V	86
Figure 4. 43	Spectre du courant de charge avec une tension d'alimentation de l'onduleur de l'ordre 70V	86
Figure 5. 1	Bloc de puissance	90
Figure 5. 2	Panneau solaire Kyocera model KD135GX-LPU	90
Figure 5. 3	Caractéristique courant-tension du module KD135GX-LPU en fonction de la température et d'irradiation	92
Figure 5. 4	Hacheur élévateur permettant le chargement de la batterie.....	93

Figure 5. 5 Filtre passe bas actif permettant de filtrer les oscillations apportées par le courant du panneau	95
Figure 5. 6 dsPIC33FJ128MC706	96
Figure 5. 7 PICkit2 avec câble USB	98
Figure 5. 8 Puissance du panneau en régime transitoire	98
Figure 5. 9 Puissance du panneau avant rectification du programme MPPT	99
Figure 5. 10 Variation du rapport cyclique après rectification	100
Figure 5. 11 Puissance du panneau après rectification du programme	100
Figure 5. 12 Système photovoltaïque réalisé	101

Chapitre 1 - Introduction

Chaque jour, la terre reçoit sous forme d'énergie solaire l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans. La technologie photovoltaïque permet de transformer une partie de cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans). D'autre part comme les sources d'énergie conventionnelle se réduisent vite et le coût de l'énergie augmente avec le développement industriel, le problème de la diminution d'énergie s'aggrave de plus en plus. La gravité des problèmes de l'environnement résultant fait que l'utilisation des systèmes à énergie renouvelable devient un objectif majeur pour l'humanité. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie propre et renouvelable, qui est un moyen intéressant de réduire les coûts de distribution de l'électricité dans certaines régions. Particulièrement disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et les 45° parallèles. C'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable. On peut utiliser cette énergie pour l'alimentation des régions isolées ou désertes soit pour l'éclairage, pour le pompage d'eau, pour la charge d'une batterie ou pour la connexion sur le réseau public électrique. Notre intérêt porte sur cette dernière utilisation qui nécessite le recours d'un convertisseur pour transférer l'énergie électrique

au réseau public. Toutefois, l'énergie solaire est caractérisée par sa fluctuation selon la saison et les heures de la journée. L'énergie fournie par les panneaux solaires dépend de l'intensité de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes du panneau, ce qui engendre une utilisation intermittente et irrégulière. Dans ce sens la puissance délivrée au réseau peut ne pas être maximale ce qui peut réduire l'efficacité du système photovoltaïque. Il est donc nécessaire de poursuivre la puissance maximale du panneau solaire (MPPT). Cette puissance est amenée à la batterie à travers un convertisseur DC/DC suivi d'un onduleur de tension à fin de connecter le réseau électrique. Dans la littérature, les techniques proposées pour les commandes de tout le système sont : la technique de MPPT pour la commande du convertisseur DC/DC et la technique de l'hystérésis pour la commande de l'onduleur.

Chapitre 2 - État de l'art

2.1 Introduction

Les énergies renouvelables connaissent depuis le milieu de l'année 1990 une vogue qui semble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu et du soleil. Les énergies renouvelables sont inépuisables et d'un usage immémorial. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale. Les sources d'énergie renouvelables sont celles qui produisent de l'électricité ou de l'énergie thermique sans épuiser nos ressources. En font partie les énergies solaire, éolienne, hydraulique et géothermique, et celles que l'on tire de la biomasse et des déchets. Tirées du vent, l'énergie éolienne permet la production d'électricité. Provenant du soleil, le solaire photovoltaïque permet la production d'électricité, de même que le solaire thermodynamique, tandis que le solaire thermique permet la production de chaleur ou de froid. Extrayant la chaleur de la terre, la géothermie conduit à l'obtention de chaleur, de froid ou d'électricité. [1]

Les énergies renouvelables sont ainsi multiples et fondamentalement diverses par leurs mécanismes physiques, chimiques ou biologiques. On parle de nos jours d'énergies renouvelables pour désigner en fait des sources anciennes dont la mise en œuvre est

optimisée avec des technologies modernes ou bien d'énergies dont le principe est entièrement nouveau, comme le photovoltaïque où la lumière du soleil produit directement de l'électricité.

Les cellules photovoltaïques transforment l'énergie solaire en électricité sans moyens mécaniques ou processus chimiques. Cette technologie évolue sans cesse, tout comme celles des autres composantes qui constituent les systèmes photovoltaïques, mais elle est déjà une option privilégiée pour assurer l'approvisionnement en électricité dans de nombreuses situations. Ce chapitre présente une introduction aux systèmes photovoltaïques, il a pour but d'expliquer le principe de fonctionnement de ces systèmes et de donner un aperçu d'un modèle de panneau solaire et d'une technique de commande utilisée.

2.2 Physique fondamentale des cellules PV

2.2.1 Principe général

L'effet photovoltaïque, c'est la transformation de l'énergie solaire (« photon ») en électricité (« Volt »). Il a été découvert en 1839, par le physicien français A. BECQUEREL.

Son utilisation industrielle n'est apparue qu'au début des années soixante, principalement pour les applications spatiales. Depuis, d'autres applications ont vu le jour pour répondre dans un premier temps aux besoins des professionnels et dans un second temps à ceux des particuliers.

À l'aube du 21^e siècle, les deux segments de marchés qui présentent le potentiel le plus important sont :

- la connexion au réseau public.
- la connexion au réseau DC (le chargement des batteries).

2.2.2 Photovoltaïque

2.2.2.1 Effet photovoltaïque et la jonction P-N

Une cellule photovoltaïque est principalement constituée à partir de silicium dopé (semi-conducteur : jonction P-N).

Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Cette énergie permet aux électrons de libérer des atomes, générant ainsi des électrons (charges N) et des trous (charges P) [5]. Ces charges sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une « barrière de potentiel ».

Une fois les charges P et N isolées, il suffit de fermer le circuit entre ces 2 zones (P et N) pour mettre en mouvement les électrons et créer ainsi un courant électrique.

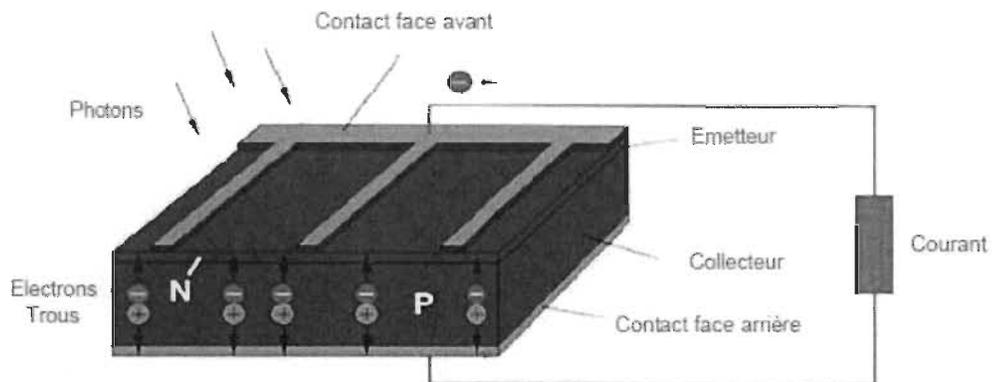


Figure 2. 1 Principe de la conversion photovoltaïque

2.2.2.2 Les différentes technologies des cellules solaires

Pratiquement toutes les cellules solaires disponibles aujourd'hui sont réalisées à base de silicium. Ce semi-conducteur est principalement employé dans la fabrication de puces informatiques.

Les cellules solaires sont construites avec la même matière première et les mêmes procédés de base. Elles existent en différentes formes et technologies:

- Cellules monocristallines:

Chaque cellule est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule présente le plus haut pouvoir de conversion.

- Cellules polycristallines:

Les cristaux de silicium qui les composent sont bien visibles. Leur rendement est légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur coût moindre.

- Cellules amorphes:

Ce type de cellule ne possède pas de structure cristalline. Leur coût de fabrication et leur efficacité sont légèrement inférieurs par rapport aux autres types cités précédemment. Elles sont généralement utilisées dans des appareils portables (calculatrices,...). Les techniques de production les plus récentes permettent de fabriquer des cellules à couches minces de grande surface, qui peuvent par exemple être utilisées dans les éléments de façade [2].

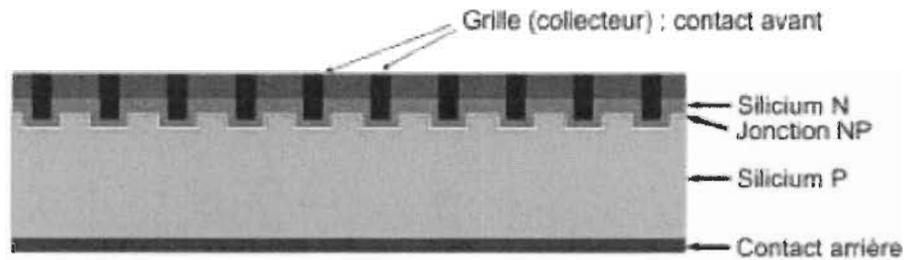
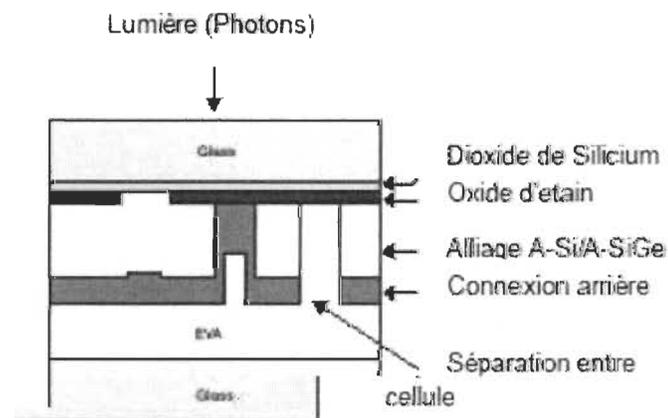


Figure 2. 2 Structure d'une cellule cristalline

- Cellules en couche mince :

La technologie « couche mince » désigne un type de cellule (ou module) obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre) [3].

Plusieurs technologies (fonction de l'alliage utilisé) sont industrialisées à ce jour.



Structure en coupe
Module couche mince
MST-43LV

Figure 2. 3 Structure d'une cellule en couche mince

2.2.2.3 Configuration des cellules photovoltaïques pour produire des quantités utilisables de puissance

Les cellules photovoltaïques sont reliées électriquement en série et/ou en parallèle pour produire des tensions et/ou des courants plus élevés. Les modules photovoltaïques se composent par des cellules photovoltaïques liées entre eux, ces modules peuvent former une unité d'un panneau photovoltaïque complet. Les panneaux photovoltaïques incluent plus d'un module de PV assemblé comme unité pré câblée et peut s'installer sur place, qui est l'unité génératrice de puissance complète [4].

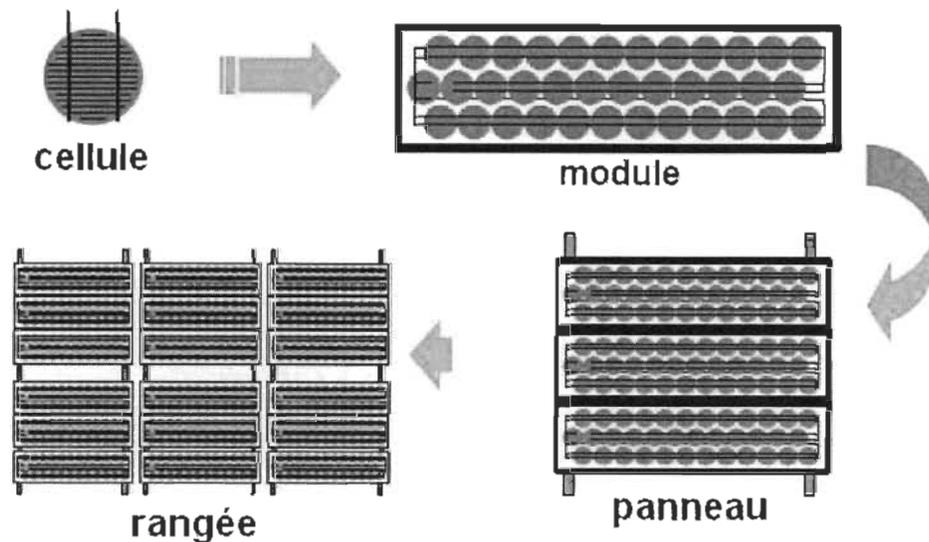


Figure 2. 4 Configuration des cellules photovoltaïques

2.3 Avantages et inconvénients de la conversion PV

La conversion photovoltaïque est maintenant une technologie qui a fait ses preuves et qui s'annonce très prometteuse pour les affaires. Cette conversion est en mesure d'apporter un changement réel dans les communautés rurales ne bénéficiant pas de

l'électricité et de créer une base commerciale pour les entrepreneurs dans des domaines à différentes échelles.

2.3.1 Avantages

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- Ils sont de fonctionnements sûrs, non polluants et silencieux.
- Ils sont très fiables.
- Ils n'exigent presque aucun entretien.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Ils vous donnent une autonomie accrue – fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité.

2.3.2 Limites

Vous devriez être également conscient des limites pratiques des systèmes PV :

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage. Si vous souhaitez utiliser l'énergie solaire à cette fin, considérez d'autres solutions de recharge comme un chauffe-eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement.
- Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle. Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux.

2.4 Générateur PV et ses performances

2.4.1 Généralité sur les caractéristiques d'un module PV

Une cellule solaire est caractérisée par une relation entre la tension u et le courant i à ses bornes. L'allure de cette relation est indiquée à la figure suivante [5].

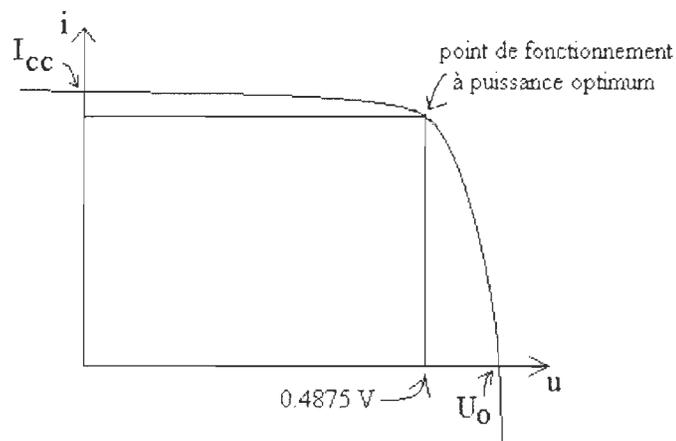


Figure 2.5 Caractéristique U-I d'une cellule solaire en conditions d'éclairement et de température nominale

La tension fournie par une cellule solaire est assez faible, un peu moins de $0,5\text{ V}$ au point de puissance optimale pour une cellule au silicium cristallin.

Cette tension est insuffisante pour la plupart des utilisations, pour cette raison, un module contient habituellement plusieurs cellules connectées en série.

Dans ces conditions, le courant que peut débiter le module n'est pas plus grand que celui que peut fournir une cellule. Par contre, la tension du module est la somme des tensions des cellules. Donc, si le module contient n cellules identiques éclairées de la même façon, sa tension est n fois plus grande que celle d'une cellule.

Autrement dit, la caractéristique tension-courant du module s'obtient en dilatant la caractéristique tension-courant d'une cellule d'un facteur n dans le sens horizontal. On peut encore, ce qui revient au même, garder le graphe inchangé, mais réduire l'échelle des tensions d'un facteur n [5].

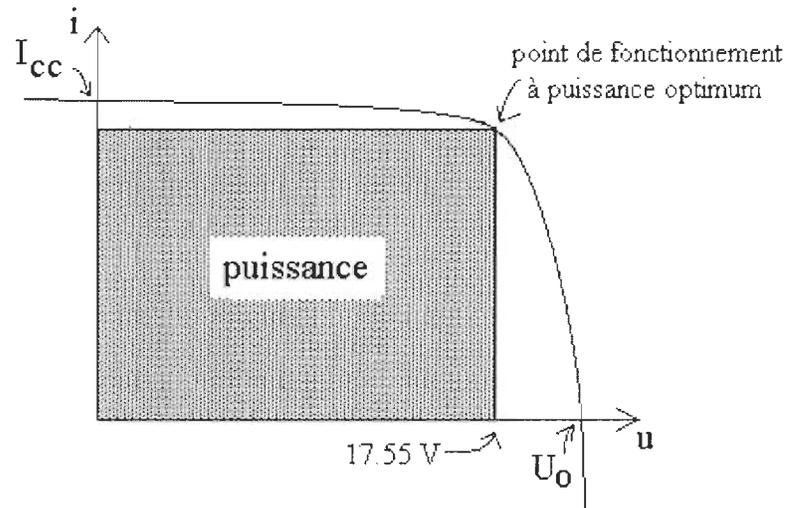


Figure 2. 6 Caractéristique tension-courant d'un module formé de 36 cellules

Dans notre cas, il s'agit de la puissance débitée par la cellule ou le module solaire. Cette puissance dépend fortement de la charge à laquelle la cellule est connectée, car c'est cette charge qui fixe le point de fonctionnement. Si le point de fonctionnement correspond à un courant nul (fonctionnement à vide) ou à tension nulle (fonctionnement en court-circuit), il est clair que la puissance débitée $p = u \cdot i$ est nulle. Entre ces deux cas particuliers, la puissance fournie est positive. La puissance correspond à l'aire du rectangle dont les axes forment deux côtés et le point de fonctionnement un angle comme la montre la figure 2.7.

Il existe un point particulier pour lequel la puissance fournie est maximum.

La façon dont la puissance évolue lorsque l'on s'éloigne de la tension optimum est indiquée à la figure suivante :

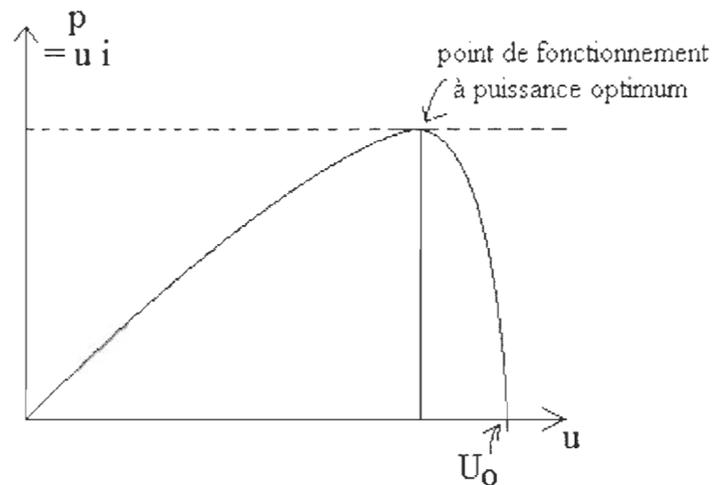


Figure 2.7 Caractéristique tension-puissance d'un module PV

Propriété intéressante du point à puissance maximum : $\frac{du}{di} = \frac{u}{i}$.

2.4.2 Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique tension-courant

La caractéristique tension-courant examinée à la figure 2.7 correspond à un éclairement donné (par exemple l'éclairement nominal, de 1000 W/m^2). Pour un éclairement différent, on obtient une courbe présentant la même allure, mais située au-dessus (si l'éclairement est supérieur à 1000 W/m^2) ou en dessous (si l'éclairement est inférieur à 1000 W/m^2).

Si l'éclairement est nul, la caractéristique tension-courant passe par l'origine des axes. En effet, dans le cas contraire, certains points de la caractéristique correspondraient à une production d'énergie, ce qui est impossible dans l'obscurité. Cette caractéristique porte le

nom de caractéristique d'obscurité. Tous ses points correspondent à des situations où la cellule absorbe de l'énergie électrique.

On observe que les différentes caractéristiques tension-courant correspondant à des éclairagements différents ont pratiquement la même forme. Elles sont décalées par rapport à la caractéristique d'obscurité d'une distance proportionnelle au rayonnement solaire incident. Ce décalage s'effectue dans une direction presque verticale du diagramme (voir droite en pointillés sur le diagramme de la figure 2.8).

La tension à vide, nulle dans l'obscurité, croît d'abord rapidement avec le rayonnement, mais prend bientôt une valeur presque constante. Le courant de court-circuit, par contre, reste à peu près proportionnel à l'éclairage jusqu'à des valeurs très élevées de celui-ci.

La tension et le courant correspondant à la puissance optimale croissent aussi avec le rayonnement incident. La figure 2.8 indique quelle est l'allure du lieu des points à puissance optimale [5].

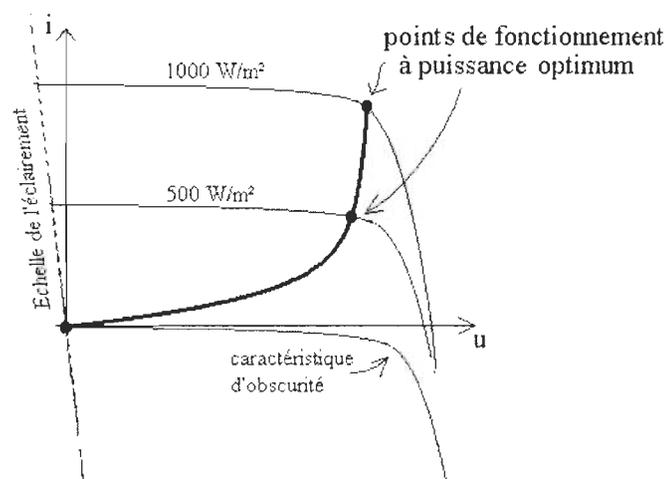


Figure 2. 8 Effet sur la caractéristique tension-courant d'une variation d'éclairage à température interne de 25°C

La puissance optimale augmente avec l'éclairement, mais l'augmentation devient moins rapide aux forts niveaux d'éclairement.

2.4.3 Effet de la variation de la température de la cellule sur la caractéristique tension-courant

L'expérience montre que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec la température de la cellule. Un ordre de grandeur courant est de $2.3 \text{ mV} / ^\circ\text{C} / \text{cellule}$.

Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05% par degré Celsius). L'influence de la température sur la caractéristique tension-courant est indiquée à la figure 2.9 [5].

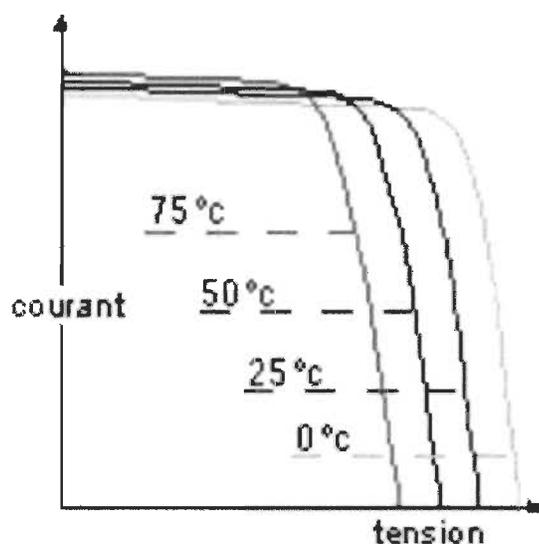


Figure 2. 9 Caractéristique tension-courant en fonction de la température des cellules

Comme la tension diminue plus vite avec la température et que le courant augmente, la puissance optimale diminue avec la température de la cellule.

En fait, la température des cellules est supérieure à la température ambiante, car, bien que la plus grande partie du rayonnement incident soit absorbée, la puissance électrique fournie par un module n'est qu'une petite partie de la puissance absorbée. La différence entre la puissance absorbée et la puissance fournie sous forme électrique correspond à un dégagement de chaleur.

La chaleur dégagée est évacuée par conduction jusqu'à la surface du module, puis par convection et rayonnement. On notera que l'efficacité de la convection dépend fortement de la vitesse du vent.

Les cellules solaires sont donc portées à une température supérieure à la température ambiante, la différence entre les deux températures dépend essentiellement du rayonnement incident. Cette différence diminue lorsque la puissance électrique produite ou la vitesse du vent augmente.

Ainsi, si l'on veut étudier sur un diagramme courant-tension le lieu des points à puissance optimale correspondant à une variation du rayonnement, les autres conditions ambiantes étant constantes, il faut considérer une température interne différente pour chaque valeur différente du rayonnement. On obtient ainsi un graphique tel que celui de la figure suivante :

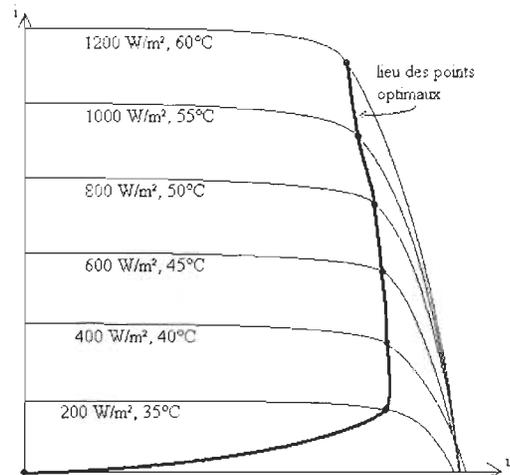


Figure 2. 10 Lieu des points à puissance optimum

2.4.4 Influence de l'angle d'incidence

Lorsque le rayonnement incident provient d'une direction inclinée par rapport à la normale au module, le rayonnement absorbé de façon utile diminue.

La plus grande partie de cette diminution s'explique de façon purement géométrique : la surface effective "vue par le rayonnement" varie comme le cosinus de l'angle d'incidence.

La diminution de la puissance absorbée est encore accentuée par des raisons optiques: les réflexions sur la paroi extérieure, ainsi que sur la surface des cellules, augmente avec l'angle d'incidence. La figure 2.11 donne l'allure de la variation du rayonnement reçu à la surface du module et du rayonnement absorbé de façon utile en fonction de l'angle d'incidence.

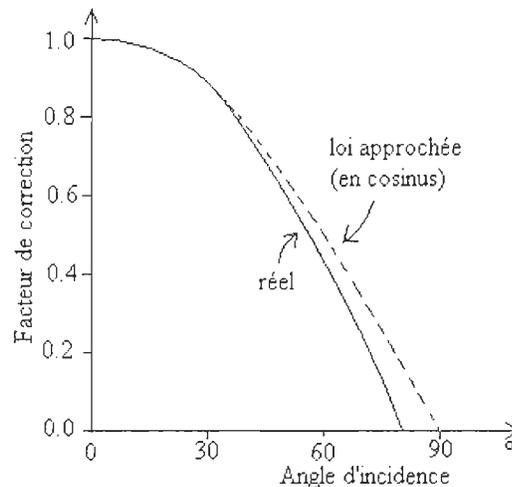


Figure 2. 11 Influence de l'angle d'incidence

Compte tenu de cette dépendance angulaire, la puissance fournie par un module dépend beaucoup de son inclinaison et de son orientation. Il est rare que les modules soient équipés d'un système qui les oriente en permanence dans la direction optimum en tenant compte du mouvement du soleil. L'orientation est en général fixée, l'inclinaison peut parfois être modifiée manuellement pour tenir compte de la saison. Le plus souvent, l'orientation et l'inclinaison sont toutes les deux fixes [5].

Le choix optimum de l'orientation est alors la direction nord-sud, en direction de l'équateur. Le choix optimum de l'inclinaison dépend du critère d'optimisation. Si le but est de maintenir une production intéressante d'énergie même pendant la mauvaise saison, l'inclinaison optimum doit être supérieure (d'environ 15°) à la latitude du lieu. Si le but est d'obtenir une production annuelle élevée, l'inclinaison optimale doit être inférieure à la latitude du lieu.

Un écart d'une dizaine de degrés par rapport à l'optimum n'a qu'une influence de quelques pour cent sur les performances du module.

2.4.5 Montage en série de cellules ou de modules

2.4.5.1 Mise en série de cellules identiques

Comme nous l'avons déjà mentionné à propos de la constitution des modules, la courbe courant-tension du montage en série de plusieurs cellules est obtenue en additionnant les tensions de chacune des cellules pour chacune de même valeur de courant.

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en série de deux cellules est représentée à la figure 2.12. Dans ce cas, la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule. Pour le montage en série, le courant optimal est le même que pour une seule cellule et la tension optimale est le double de la tension optimale d'une cellule.

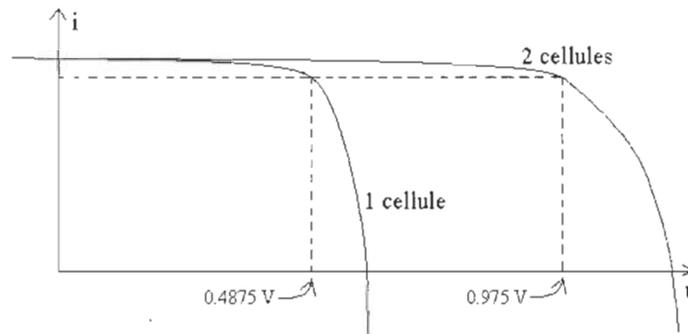


Figure 2.12 Caractéristique tension-courant du montage en série de deux cellules identiques

2.4.5.2 Mise en série de cellules non identiques

En pratique, les cellules ne sont jamais tout à fait identiques. Une différence de courant de court-circuit peut provenir d'une différence au niveau de la fabrication des

cellules, mais elle peut également être causée par une différence dans le rayonnement solaire reçu (ombres).

La mise en série de cellules non identiques peut gravement handicaper les performances de l'ensemble, comme le montre la figure 2.13, qui correspond à la mise en série de deux cellules non identiques.

Lorsque le courant débité tend à devenir plus grand que le courant de court-circuit le plus faible des deux, la cellule la plus faible devient le siège d'une tension négative et s'oppose à la croissance du courant. Il apparaît que le courant de court-circuit de l'ensemble des deux cellules est pratiquement égal au plus faible des deux courants de court-circuit. La puissance totale générée est inférieure à la somme des puissances que chaque cellule pourrait générer individuellement.

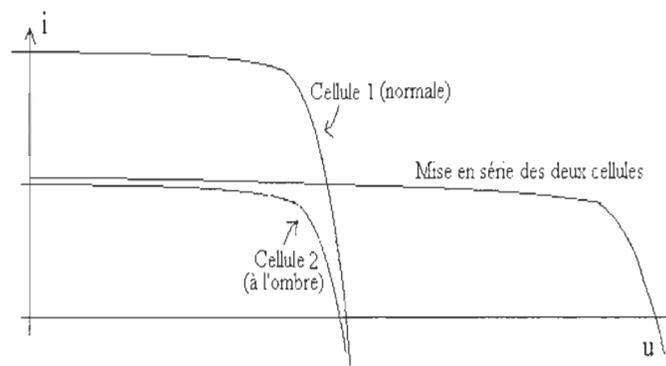


Figure 2. 13 Mise en série de deux cellules non identiques

La conclusion ci-dessus se généralise au cas de nombreuses cellules interconnectées. Les problèmes relatifs à la mise en série de cellules différentes sont plus graves encore lorsque le nombre de cellules en série augmente, ce qui est malheureusement nécessaire pour obtenir une tension suffisante. C'est ce qui est représenté à la figure 2.14 dans le cas

d'un groupe de cellules connectées en série comportant 17 cellules identiques et une cellule (partiellement à l'ombre) dont le courant de court-circuit n'est que de 50% du courant de court-circuit des autres. On obtient la courbe courant-tension totale en additionnant pour chaque valeur du courant la tension d'une cellule normale, multipliée par 17, avec la tension de la cellule plus faible.

Lorsque le courant débité est supérieur au courant de court-circuit de la cellule faible, la tension de celle-ci devient négative, ce qui détériore fortement les caractéristiques de l'ensemble (la puissance optimum de l'ensemble est inférieure à la puissance optimum des 17 cellules normales).

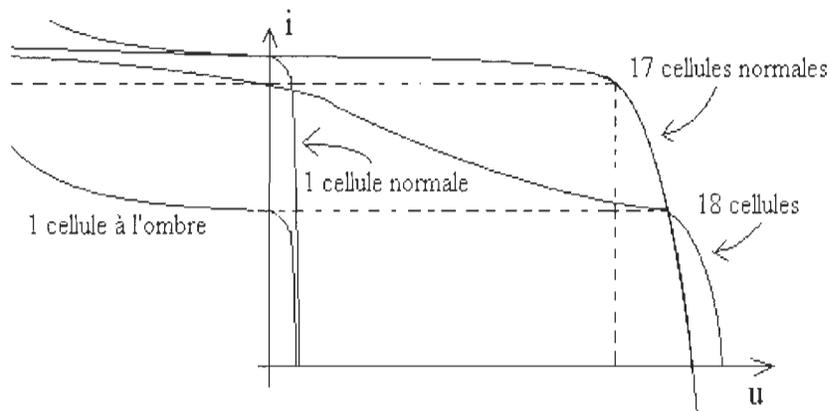


Figure 2. 14 Mise en série de 18 cellules dont une plus faible

On notera que les modules constitués de cellules de haute qualité sont plus sensibles à ce phénomène. En effet, si le module est constitué de cellules ayant un courant de fuite important, la tension négative qui apparaît aux bornes d'une cellule mal éclairée sera moins grande, et donc la tension de sortie sera moins affectée par la mise à l'ombre partielle d'une cellule.

Une autre façon de réduire l'impact d'un désappariement serait de munir chaque cellule d'une diode en antiparallèle. Lorsqu'une cellule est plus faible, sa diode en antiparallèle devient conductrice, ce qui permet aux autres cellules de fonctionner à leur courant optimal. Dans ce cas, les cellules plus faibles sont toujours non exploitées, mais elles n'ont qu'une influence limitée sur la tension de l'ensemble (en fait, on perd une tension égale à la tension des diodes en antiparallèle qui sont devenues conductrices).

2.4.5.3 Protection contre les points chauds

Lorsqu'une "mauvaise" cellule, ou une cellule mal éclairée, fait partie d'un ensemble de cellules montées en série, et que ces cellules ne sont pas munies de diodes en antiparallèle, la tension sur la cellule défectueuse peut devenir grande (jonction polarisée en sens bloquant) sans pour autant que le courant qui circule dans l'ensemble devienne négligeable (les cellules solaires ont un courant inverse relativement grand). La "mauvaise" cellule est donc le siège d'une dissipation importante d'énergie sous forme de chaleur, ce qui est dangereux pour l'encapsulation, pour elle-même et pour ses voisines.

La formation d'un point chaud est particulièrement à craindre dans le cas où une branche est court-circuitée, ce qui n'est nullement une situation exceptionnelle (en fait, on court-circuite parfois une branche intentionnellement pour annuler sa tension).

Pour éviter le phénomène du point chaud, on utilise des diodes en antiparallèle, mais il n'est pas nécessaire d'en prévoir une pour chaque cellule. En pratique, il suffit de prévoir une diode en antiparallèle par groupe de 18 ou 36 cellules pour que la tension inverse susceptible de se développer sur une diode "mauvaise" soit limitée à une valeur

acceptable. Ces diodes en nombre réduit jouent un rôle de protection, mais ne permettent pas une utilisation correcte d'un branchement comportant une "mauvaise" cellule.

2.4.6 Montage en parallèle de modules ou de branches

2.4.6.1 Montage en parallèle de cellules identiques

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en parallèle de deux cellules identiques est représentée à la figure 2.15. Comme dans le cas du montage en série, la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule. Mais cette fois, la tension optimale de l'ensemble est la même que pour une seule cellule, alors que le courant optimal de l'ensemble est égal au double du courant optimal d'une seule cellule.

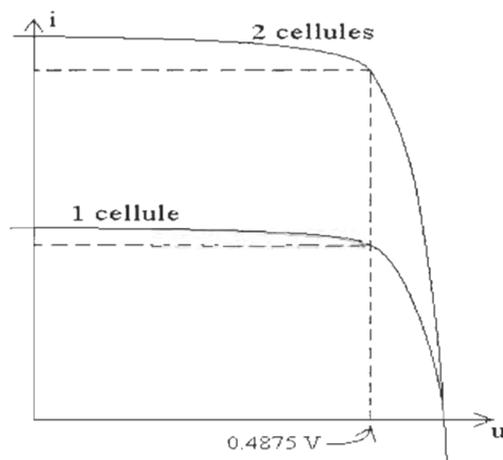


Figure 2. 15 Montage en parallèle de deux cellules solaires identiques

Ce résultat se généralise sans difficulté au cas de n cellules identiques montées en parallèle : il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur n dans la direction de l'axe des courants.

2.4.6.2 Montage en parallèle de cellules différentes

En pratique, les cellules ne sont jamais tout à fait identiques. Une différence de courant de court-circuit peut provenir d'une différence au niveau de la fabrication des cellules, mais elle peut également être causée par une différence dans le rayonnement solaire reçu (ombres).

La figure 2.16 illustre la mise en parallèle de cellules non identiques. Dans ce cas, aucun problème ne se pose. Pour chaque valeur de la tension, le courant généré est la somme des courants de chaque cellule. Comme la tension dépend peu de l'intensité lumineuse, la cellule faible a pratiquement la même tension à vide et la même tension optimale que la cellule normale. La puissance totale générée est donc pratiquement égale à la somme des puissances que chaque cellule pourrait générer individuellement.

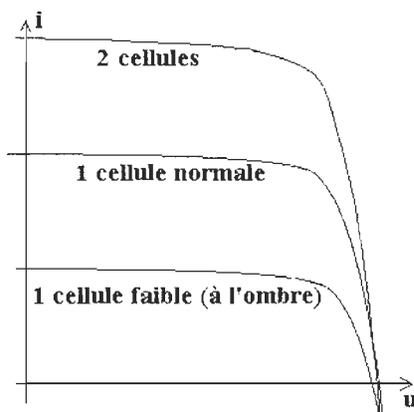


Figure 2. 16 Mise en parallèle de deux cellules non identiques

Le montage en parallèle de cellules non identiques ne pose pas de grands problèmes : les "bonnes" cellules fournissent la puissance dont elles sont capables. Seules les "mauvaises" cellules sont sous-utilisées.

Lorsque le champ photovoltaïque comporte plusieurs branches, connectées en parallèle, chaque branche étant formée de la mise en série de plusieurs cellules, la conclusion ci-dessus reste applicable : seules les "mauvaises" branches sont sous-utilisées.

Malheureusement, comme on l'a vu, il suffit d'une "mauvaise" cellule dans une branche pour que les caractéristiques de toute la branche soient fortement détériorées. En pratique, les branches "saines" maintiendront la tension de l'ensemble à un niveau tel que la branche qui comporte une "mauvaise" cellule n'arrivera pas à débiter de courant.

Ainsi, selon la prise en compte des principaux phénomènes physiques, les régulateurs solaires du commerce disposent de systèmes de contrôle supplémentaires plus ou moins élaborés. Un grand nombre est ainsi doté de commandes permettant d'effectuer une recherche du point de puissance maximale PPM plus ou moins élaborée. Ces régulateurs sont souvent appelés régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking).

L'algorithme suivant permet la recherche du point de fonctionnement optimum. Il s'agit de perturber le système avec une consigne dV et voir sa réaction. En fonction des grandeurs électriques mesurées du panneau, on calcule la variation de la puissance et de la tension, selon lesquelles on varie périodiquement le système afin de le ramener au tour du point de fonctionnement optimum.

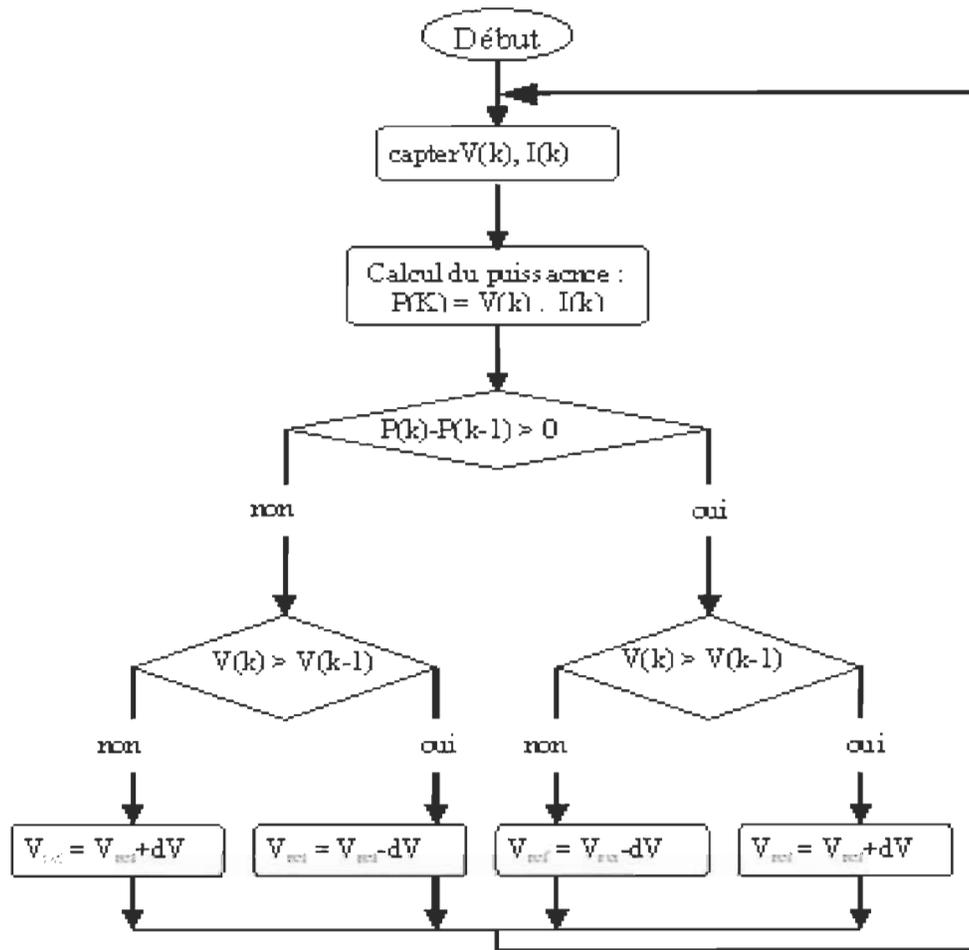


Figure 2. 17 Organigramme du contrôle avec la méthode perturbation et observation

2.5 Conclusion

L'insuffisance des ressources exploitées actuellement fait que le problème de l'énergie sera certainement un défi majeur des années à venir. Les ressources dites "renouvelables" présentent le choix stratégique des années à venir. L'une des solutions qui se présente est l'énergie photovoltaïque.

Chapitre 3 - Convertisseurs photovoltaïques

3.1 Introduction

Nous désignons par système photovoltaïque l'ensemble des éléments constituant une application industrielle ou domestique tirant tout ou partie de son énergie électrique d'un générateur photovoltaïque. Le transfert de cette énergie se fait à travers des convertisseurs statiques. Les convertisseurs statiques, adaptés à l'énergie solaire photovoltaïque, sont souvent appelés dans le commerce « convertisseurs solaires ». Ils ont comme objectif d'adapter l'énergie électrique qui provient des panneaux photovoltaïques, pour pouvoir alimenter des charges alternatives compatibles avec un réseau électrique ou bien alors charger les batteries.

La structure générale des systèmes photovoltaïques découle à la fois du caractère aléatoire de la production de la puissance électrique disponible par le panneau et les propriétés particulières des convertisseurs photovoltaïques en fonction de nos besoins. À partir de la commande des convertisseurs, on peut appliquer différentes techniques permettant de contrôler et d'optimiser le flux de la puissance délivrée par les panneaux.

Dans la suite nous allons présenter les différentes connexions possibles pour les installations photovoltaïques couplées aux réseaux DC et AC et déterminer les avantages et les inconvénients de ces connexions. Nous allons aussi déterminer les différentes approches d'interface possibles pour la conversion photovoltaïque.

3.2 Différentes connexions possibles avec un module PV

3.2.1 Connexion directe d'un module photovoltaïque

Examinons, tout d'abord, le cas où un module (ou une branche comportant plusieurs modules en série) est connecté directement à un réseau DC (ou une batterie).

Si ce réseau DC reste sous tension même lorsque le module ne fournit pas d'énergie, la connexion ne peut pas être tout à fait directe. Il faut en effet empêcher que le module n'absorbe de l'énergie du système lorsqu'il est dans l'obscurité, c'est-à-dire durant la nuit.

La figure 3.1 donne le schéma le plus simple possible de la connexion directe. Ce schéma comporte en fait une interface rudimentaire (diode antiretour) entre le module PV et le réseau DC [13].

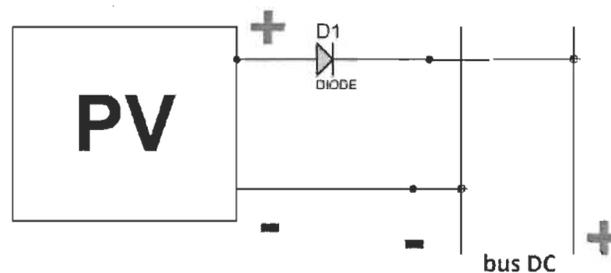


Figure 3. 1 Connexion directe d'un module PV sur un réseau DC

Dans un tel système, il y a un risque de voir les modules transmettre de l'énergie au système même lorsque celui-ci n'est pas prêt à la recevoir. La conséquence normale est alors une augmentation de la tension du réseau DC, ce qui peut avoir des effets fâcheux.

Un exemple de cette situation est celui où le réseau DC est connecté à une batterie.

Lorsque la batterie est complètement chargée, l'augmentation de sa tension ne suffit pas pour empêcher les modules de surcharger : la tension de la batterie peut augmenter jusqu'à un niveau où l'électrolyse de l'eau se produit. On a alors un dégagement d'hydrogène et d'oxygène dans la batterie, donc une perte d'eau (que l'on peut compenser par un entretien plus fréquent).

Pour éviter cette situation, la solution la plus courante consiste à rendre l'interface commandée. Cela peut s'effectuer en ajoutant au schéma de la figure 3.1, un transistor de puissance utilisé en tout ou rien (afin de ne pas dissiper trop d'énergie). Ce transistor est habituellement placé en parallèle sur le module de sorte qu'il n'occasionne aucune perte d'énergie lorsqu'il est en état bloqué. Lorsque ce transistor est à l'état passant, il fait court-circuiter le module et annule donc la puissance fournie par ce module.

Ceci est possible du fait que :

- les modules photovoltaïques ne se conduisent pas comme des sources de tension (leur courant de court-circuit est suffisamment faible pour ne pas mettre en danger les modules, et un transistor de taille moyenne peut supporter ce courant).
- La diode antiretour empêche le réseau local d'être mis en court-circuit par le transistor.

Ce type de commande par tout ou rien peut être rendu plus progressif en appliquant au transistor un signal de commande alternant à un rythme rapide les phases de conduction et celles de blocage. Au lieu d'être annulée, la puissance moyenne fournie par les modules est alors multipliée par le rapport cyclique du signal de commande appliqué au transistor (figure 3.2).

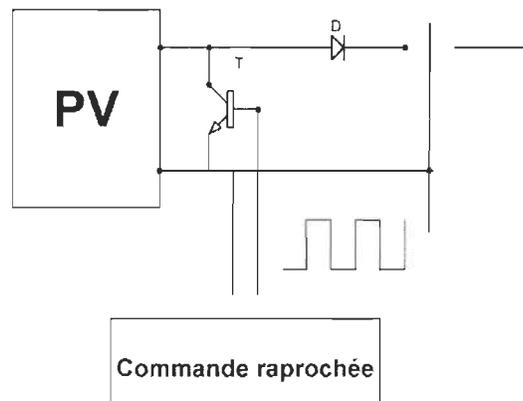


Figure 3. 2 Interface entre un module PV et un réseau DC

Lors de la commutation du transistor, le circuit génère des perturbations électromagnétiques d'autant plus intenses que la vitesse de commutation est plus rapide. Il faut donc que les transitions du signal de commande ne soient pas trop rapides. Par contre, la puissance perdue dans le transistor lors de la commutation augmente avec la durée de celle-ci, ce qui est en soit dommageable, mais peut aussi augmenter le coût du radiateur qui assure le refroidissement du transistor. Ces pertes de commutation augmentent aussi avec la fréquence du hachage, mais une fréquence trop faible rendrait plus gênante les fluctuations de puissance inhérentes à ce mode de contrôle [13,20]. Le choix de la fréquence de hachage et de la vitesse des transitions résulte donc d'un compromis entre ces différentes contraintes.

Contrairement au transistor, la diode représentée dans le schéma de la figure 3.2 provoque une perte de puissance même lorsque l'on souhaite extraire du module un maximum de puissance. Ceci est dû à la chute de tension dont toutes les diodes sont affectées dans le sens passant. Cette chute de tension est particulièrement pénalisante dans les applications où la tension DC est petite, notamment pour les systèmes 12 V. On

a donc intérêt lorsque c'est possible à utiliser une diode à faible tension directe (diodes Schottky).

3.2.2 Connexion avec les convertisseurs DC-DC

La connexion directe examinée précédemment ne permet pas de faire fonctionner les modules à leur tension optimale.

En outre, lorsque les caractéristiques d'un module sont dégradées (cellule ombrée, éclairage faible), il se peut que le module ne fournisse plus d'énergie alors qu'il pourrait le faire à une tension plus faible.

Nous allons donc nous intéresser aux modes de connexion qui permettent d'adapter la tension de fonctionnement des modules aux circonstances [13].

3.2.2.1 Adaptation par modification des connexions électriques des modules

Dans le cas d'une installation comportant un grand nombre de modules, et pour une tension d'utilisation très supérieure à la tension d'un module, il est possible de regrouper ceux-ci de plusieurs façons par mise en série et en parallèle (le nombre de modules doit pour cela comporter un grand nombre de diviseurs).

En principe, on pourrait modifier ces connexions de façon automatique au cours de fonctionnement de façon à garder en permanence un régime de fonctionnement proche de l'optimum.

3.2.2.2 Généralités sur les convertisseurs électroniques

Une méthode d'adaptation des tensions plus souple que les précédentes consiste à faire suivre le champ photovoltaïque d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC.

Le convertisseur DC/DC, étant plus simple, convient mieux pour une modularisation, ce qui permet de tenir compte de différences d'éclairement entre les panneaux, d'une différence entre les caractéristiques des panneaux (qui s'accroît avec le vieillissement de ceux-ci).

À noter que, à puissance et taille comparable, un convertisseur DC/DC a moins de pertes qu'un convertisseur DC/AC.

Les circuits à résonance permettent de réduire les pertes de commutation des semi-conducteurs, mais offrent moins de possibilités de réglage. Nous n'examinerons que quelques circuits à découpage (plus simples).

Pour obtenir un rendement élevé, les convertisseurs statiques utilisent des éléments de commande (transistors...) en tout ou rien, c'est-à-dire comme des interrupteurs. Soit T la période du cycle interne de fonctionnement (habituellement beaucoup plus courte que les périodes de variation des grandeurs électriques du convertisseur). L'interrupteur est fermé (courant non nul) pendant une partie αT de la période T . Il est ouvert (courant nul) pendant le reste de la période c'est-à-dire pendant $(1-\alpha)T$. Le nombre α , compris entre 0 et 1, porte le nom de rapport cyclique.

Comme, à chaque instant, le courant est nul ou la tension est nulle, la puissance dissipée dans l'interrupteur, qui est le produit de la tension par le courant, est nulle. En pratique, la tension n'est pas tout à fait nulle pendant le temps de conduction, et la commutation d'un état à l'autre n'est pas instantanée, de telle sorte que l'on a malgré tout une perte d'énergie dans les interrupteurs.

Les convertisseurs DC/DC se comportent extérieurement comme des transformateurs à courant continu, en ce sens que les tensions et courants d'entrée et de sortie sont reliés (approximativement) par les équations :

$$\frac{u_2}{u_1} = k \quad (3.1) \quad \text{et} \quad \frac{i_1}{i_2} = k \quad (3.2)$$

Où k est le rapport de transformation, habituellement réglable.

L'utilisation des équations (3.1) et (3.2) suppose que l'on néglige les pertes de puissance puisque l'on peut en déduire la conservation de la puissance.

$$u_1 i_1 = u_2 i_2 \quad (3.3)$$

On remarquera que, lorsque le convertisseur abaisse le niveau de tension, il augmente le niveau de courant. Inversement, s'il élève le niveau de tension, il diminue le niveau de courant.

3.2.2.3 Convertisseurs sans isolation galvanique

Le convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost), dont le schéma de principe est donné à la figure 3.3 présente un rapport de transformation k (défini par la formule (3.4)) qui dépend du rapport cyclique α défini par l'expression suivante :

$$k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.4)$$

Ce rapport peut donc aller de 0 à l'infini, de telle sorte que la tension d'entrée peut aussi bien être plus grande ou plus petite que la tension de sortie. Le rendement optimum du convertisseur n'est cependant obtenu que pour un rapport proche de 1. On doit donc

associer les modules en série ou en parallèle de façon à fonctionner souvent à un rapport proche de 1 (ou choisir la tension de la charge pour arriver à ce résultat).

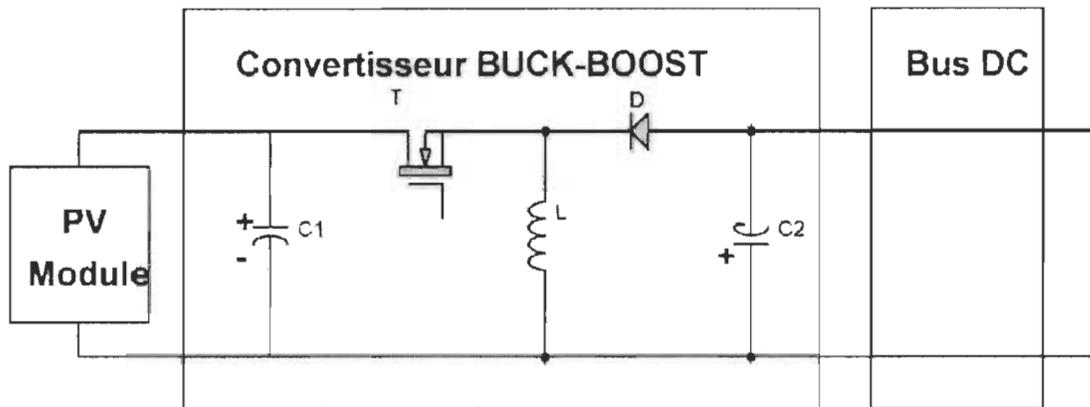


Figure 3. 3 Schéma de principe d'un convertisseur élévateur-abaisseur

Le convertisseur élévateur-abaisseur (buck-boost) nécessite un filtrage énergétique aussi bien à l'entrée qu'à la sortie pour lisser les courants d'entrée et de sortie et éviter les CEM. Ces convertisseurs ne sont pas favorisés à cause du rendement faible pour les basses tensions des modules PV du maximum 21V, et aux puissances de moins de 100W. Il signifiera que ces convertisseurs sont peu susceptibles de réaliser la même efficacité qu'un convertisseur abaisseur ou élévateur de tension.

Le convertisseur abaisseur (Buck), dont le schéma de principe est donné à la figure suivante, permet d'effectuer la conversion avec moins de pertes (transmission directe de l'énergie des panneaux pendant une partie du cycle).

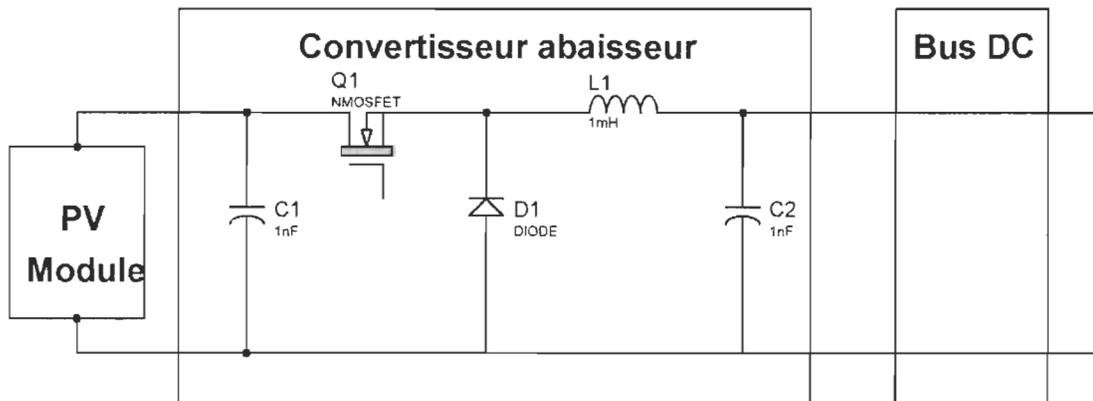


Figure 3.4 Schéma de principe d'un convertisseur abaisseur

Le rapport de transformation est donné par la formule :

$$k = \alpha \quad (3.5)$$

La tension de sortie est donc toujours plus faible que la tension d'entrée. Le rendement optimum est atteint au voisinage de $k = 1$. On est donc amené à accepter le non-fonctionnement du système à faible éclairement pour obtenir un bon rendement à fort éclairement.

Le convertisseur abaisseur nécessite un filtrage énergétique à l'entrée pour éviter les CEM. Le filtrage de sortie peut être plus sommaire puisque la plus grande partie de ce filtrage est déjà assuré par l'inductance de stockage elle-même.

Le convertisseur élévateur (boost), dont le schéma de principe est donné à la figure 3.5 permet lui aussi d'effectuer la conversion avec moins de pertes que le convertisseur élévateur-abaisseur (transmission directe de l'énergie des panneaux pendant une partie du cycle).

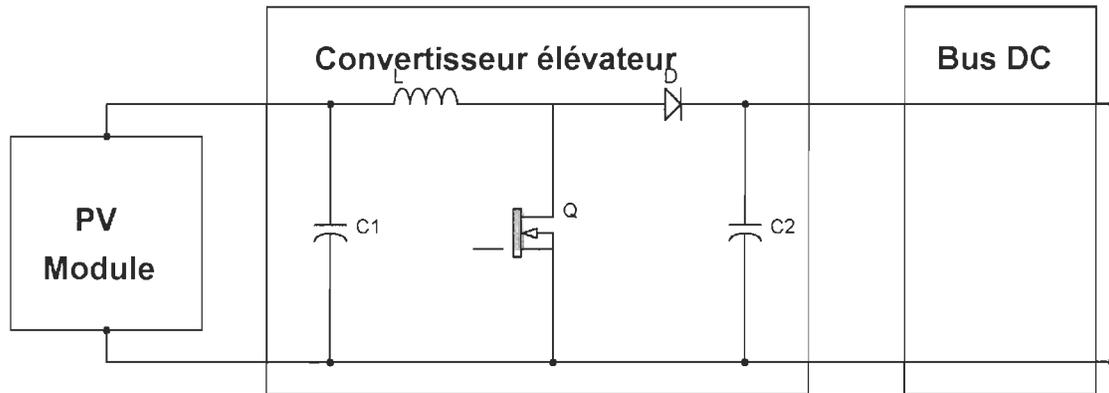


Figure 3. 5 Schéma de principe d'un convertisseur élévateur

Le rapport de transformation est cette fois déterminé par la formule

$$k = \frac{1}{\alpha} \quad (3-6)$$

Ainsi la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. Il faut donc choisir une tension de batterie supérieure à la tension la plus élevée que les panneaux peuvent atteindre (en fonctionnement à puissance optimum). Comme le rendement est à nouveau le meilleur au voisinage de la limite, on évitera de prendre une tension de batterie beaucoup plus élevée que nécessaire [16].

Pour atteindre cet objectif, le recours à des modules "autorégulants" peut être utile, contrairement à ce que l'appellation de ces modules pourrait laisser croire, du fait que la tension de ces modules est plus faible que la tension des modules courants.

On remarque que le convertisseur élévateur est le dual du buck. En particulier, il nécessite un filtrage énergétique à la sortie, mais le filtrage à l'entrée est assuré essentiellement par l'inductance de stockage.

3.2.2.4 Convertisseurs avec isolation galvanique

Les trois circuits décrits précédemment existent sous une forme qui assure l'isolation galvanique. Ceci permet de résoudre des problèmes de sécurité ou de différences de potentiel entre différentes parties d'une installation.

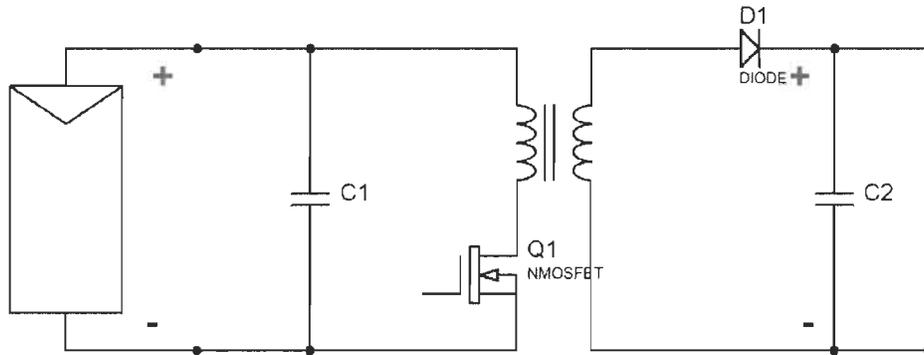


Figure 3. 6 Schéma de principe d'un convertisseur flyback (élévateur-abaisseur avec isolation)

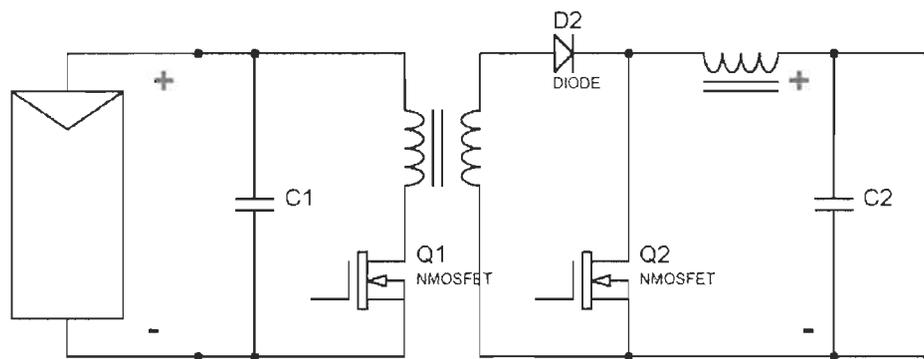


Figure 3. 7 Schéma de principe d'un convertisseur forward (abaisseur avec isolation)

Ces convertisseurs comportent un transformateur d'isolation, ce qui augmente les pertes du convertisseur.

Par contre, nous pouvons choisir le rapport des spires de ce transformateur de façon à faire correspondre la zone de fonctionnement optimum du convertisseur au rapport de tension que l'on souhaite. Il n'est plus nécessaire de modifier la connexion des cellules (série ou parallèle) pour se rapprocher du fonctionnement optimum.

Le convertisseur élévateur-abaisseur est d'utilisation plus souple, mais de rendement moins bon, que le convertisseur abaisseur ou le convertisseur élévateur, et que le convertisseur abaisseur ne permet pas le fonctionnement à faible niveau de rayonnement.

3.2.3 Connexion avec les convertisseurs DC-AC

Le premier rôle des convertisseurs DC/AC est le passage d'un courant continu à un courant alternatif. Ils permettent aussi une adaptation des niveaux de tension et peuvent donc être utilisés pour amener les modules à leur point de fonctionnement optimum si leur entrée est connectée directement aux modules.

Un problème général qui se pose lors de la conversion DC/AC vient du fait qu'un circuit alternatif monophasé ne peut transmettre qu'une puissance fluctuante, puisque la puissance transmise s'annule chaque fois lorsque la tension ou le courant s'annule, donc au moins deux fois par période (figure 3.8).

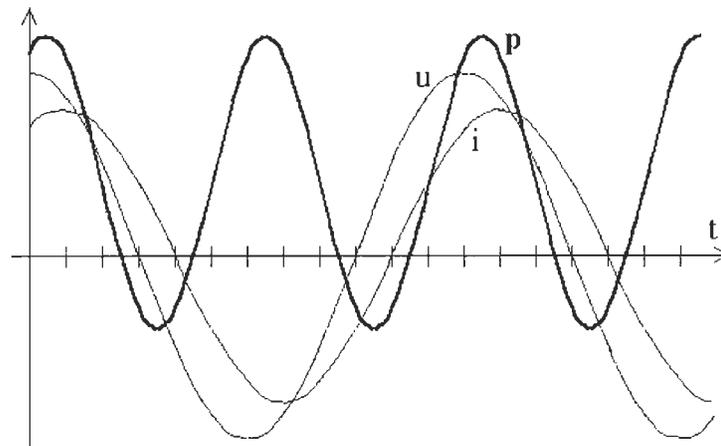


Figure 3. 8 Évolution de la puissance dans un circuit alternatif monophasé

Or, les panneaux photovoltaïques doivent fonctionner à une puissance constante, égale à la puissance optimale, pour fournir toute l'énergie dont ils sont capables. Lorsque le convertisseur ne fournit pas une puissance constante, il doit donc y avoir accumulation d'énergie à l'intérieur du convertisseur. Ceci nécessite le placement à l'entrée du convertisseur d'une inductance ou d'un condensateur de grande taille. Par exemple, pour un courant débité de 4A et une ondulation de tension de 0.5 V sur une demi-période de 0.01 seconde, la valeur de la capacité est approximativement de $C = 4 \times 0.01 / 0.5 = 0.08$ F = 80000 μ F, ce qui est une valeur élevée, même sous une tension de l'ordre de 25 V.

Pour éviter ce problème, il faut utiliser un onduleur triphasé fournissant un courant équilibré, ce qui est possible si l'énergie est fournie à un moteur (pompage, réfrigération...) ou au réseau public, mais beaucoup plus difficile dans le cas d'un réseau local sur lequel sont connectés des appareils commerciaux courants (TV, réfrigérateur...), presque toujours monophasés. Le passage au triphasé augmente aussi la complexité et le coût de l'onduleur.

La fréquence interne de fonctionnement de l'onduleur a une forte influence sur ses performances et son prix.

Si la fréquence interne est celle du réseau alternatif, on peut utiliser des interrupteurs électroniques qui ne peuvent revenir à l'état bloqué que si le courant qui les traverse s'annule spontanément. Ces onduleurs ne peuvent fonctionner qu'en liaison avec un réseau AC. Ils génèrent des courants de forme non sinusoïdale qu'il est pratiquement impossible de rendre sinusoïdaux par filtrage compte tenu de la basse fréquence des harmoniques.

Si la fréquence interne est élevée, nous devons utiliser des interrupteurs électroniques plus coûteux, qui peuvent être rendus par commandes aussi bien bloquées que conductrices (transistors, IGBT, thyristors avec circuit d'extinction...). Les grandeurs électriques à la sortie du convertisseur ne sont pas plus sinusoïdales que dans le cas précédent, mais, il est possible par une commande appropriée des semi-conducteurs de rendre tous les harmoniques générés (inévitables) de fréquence élevée, ce qui facilite leur élimination par filtrage. La figure ci-dessous montre comment un signal formé de créneaux de largeur variable peut ne différer d'une sinusoïde que par des harmoniques de fréquence élevée.

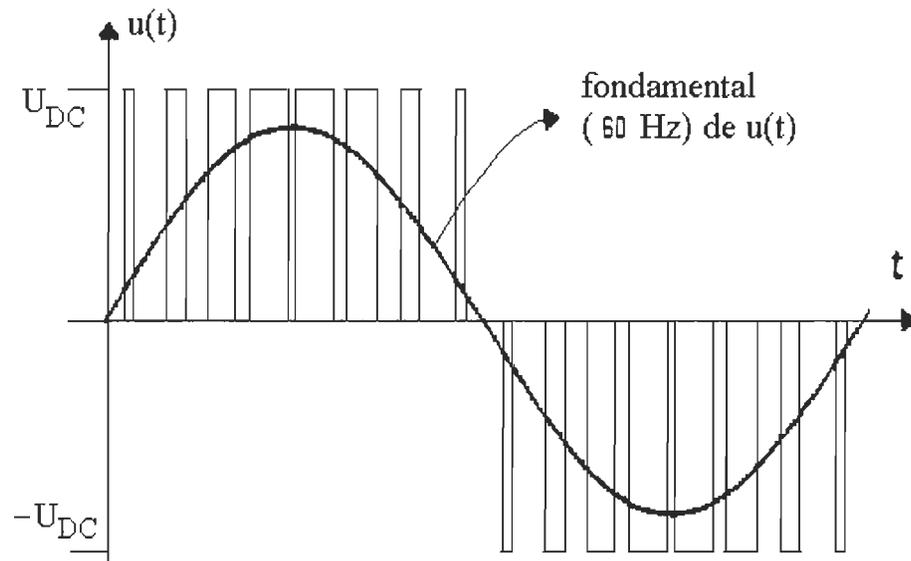


Figure 3.9 Principe de la génération de signaux sinusoïdaux

Indépendamment de ces considérations, on peut encore classer les onduleurs en plusieurs catégories.

Les onduleurs de tension fonctionnent avec une tension d'entrée maintenue constante à l'échelle de leur cycle de fonctionnement interne. Ceci peut être garanti par la présence en parallèle sur leur entrée d'un condensateur de valeur suffisante. Par contre, leur sortie doit être connectée à une charge à caractère inductif à courte échelle de temps (ce qui est bien le cas pour les moteurs, et aussi pour les réseaux de distribution). C'est le type le plus utilisé en pratique. Leur schéma de principe est indiqué à la figure suivante :

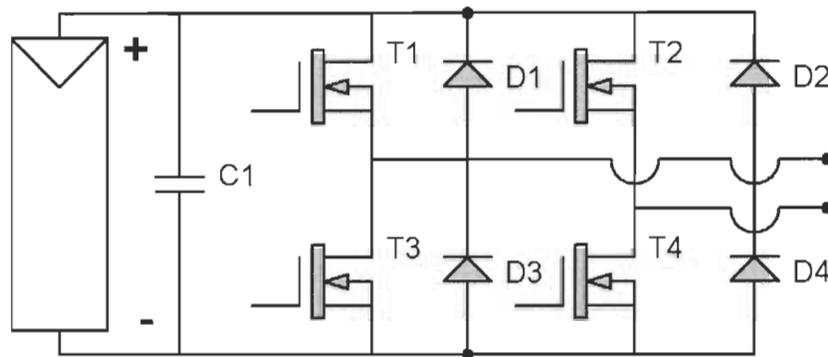


Figure 3. 10 Schéma de principe d'un onduleur de tension

Les onduleurs de courant (ou commutateurs de courant) fonctionnent au contraire avec un courant d'entrée constant à l'échelle de leur cycle de fonctionnement interne. Ceci peut être garanti par la présence en série avec leur entrée d'une self de valeur suffisante. Par contre, leur sortie doit présenter à courte échelle de temps un caractère capacitif, ce qui nécessite souvent l'ajout de condensateurs. Ce type d'onduleur n'est pas employé que dans des cas particuliers. Leur schéma de principe est indiqué à la figure suivante :

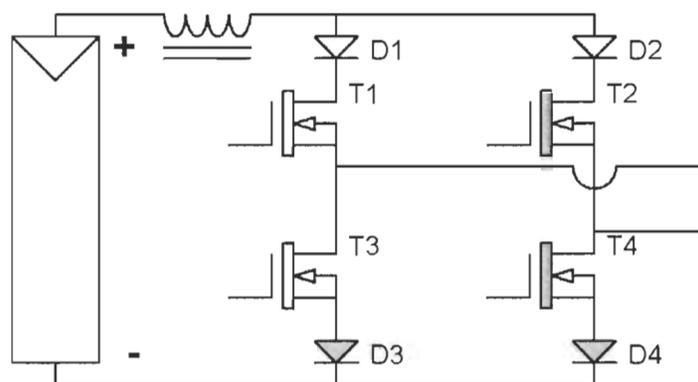


Figure 3. 11 Schéma de principe d'un onduleur de courant monophasé

Il existe aussi d'autres types d'onduleurs, notamment les onduleurs à résonance, mais ils sont moins adaptés à une utilisation à des niveaux de puissance très variables, et ne sont pas utilisés dans le cadre d'installations solaires.

3.3 Différentes approches d'interface de la conversion PV

3.3.1 Approches courantes

Dans les onduleurs reliés à un réseau électrique pour les applications PV, des différentes approches ont été développées et employées au cours des deux dernières décennies [12]. Seulement les deux approches [10] les plus utilisées dans des petites installations de puissance de l'ordre de 1kW à 3kW sont comparées par la suite.

3.3.1.1 Mise en série d'un convertisseur DC-DC avec un onduleur simple

Dans un système de 2kW ou moins, tous les panneaux PV peuvent être reliés électriquement en série, pour créer une source de plus haute tension. Cette source est reliée à un onduleur monophasé à travers un convertisseur DC-DC élévateur.

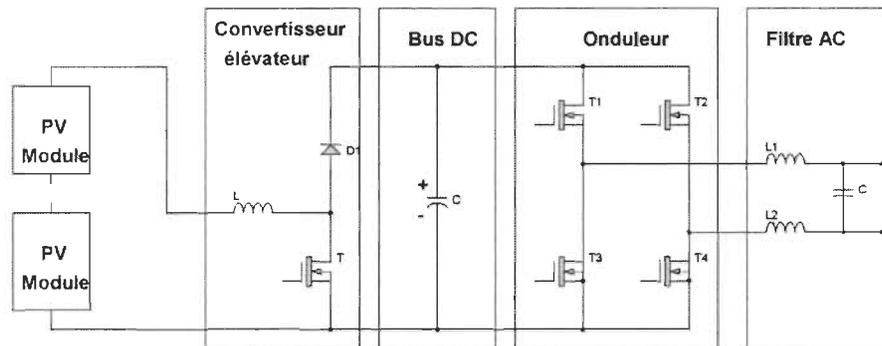


Figure 3. 12 Mise en cascade d'un onduleur et un convertisseur DC/DC pour plusieurs modules connectés en série

3.3.1.2 Onduleur appliqué par module

Dans cette approche, chaque panneau PV a son propre onduleur. Un raccordement de 220V AC avec un panneau PV fonctionne en passant par l'intermédiaire d'un onduleur. Chaque panneau est maintenant placé en parallèle, avec son propre onduleur consacré.

Pour être petit, léger et à prix réduit, les convertisseurs intégrés par module emploient généralement des techniques à haute fréquence d'un mode commutateur. Ils exigent plusieurs étapes de conversion de la basse tension DC du module à fin de connecter le réseau électrique 240V AC. Une étape d'élévation de la tension comprenant un transformateur d'isolement, une étape d'élévation de la tension du bus DC et une étape pour l'ondulation des grandeurs électriques DC.

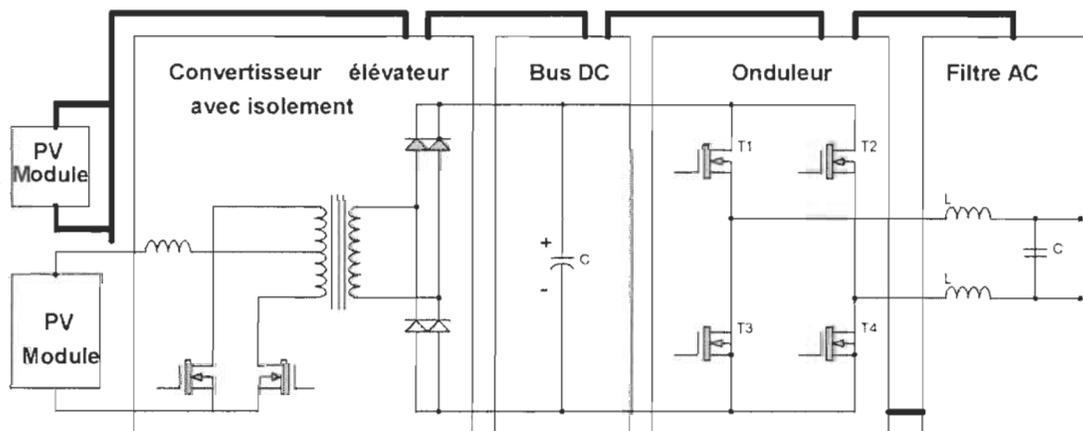


Figure 3. 13 Mise en cascade d'un onduleur et un convertisseur élévateur avec isolement pour chaque module

3.3.2 Mise en série des convertisseurs DC-DC, cascadé avec un onduleur simple

Le circuit proposé ici combine des aspects de ces deux dernières approches. En effet, chaque module a son propre convertisseur DC-DC, et les modules avec leurs convertisseurs associés sont encore placés en série pour former une source de courant DC de forte puissance. Un convertisseur DC-AC (onduleur de tension) est alors exigé pour se relier au réseau [10]. Cette solution intermédiaire est discutée pour combiner les meilleurs dispositifs des deux solutions présentées ci-dessus.

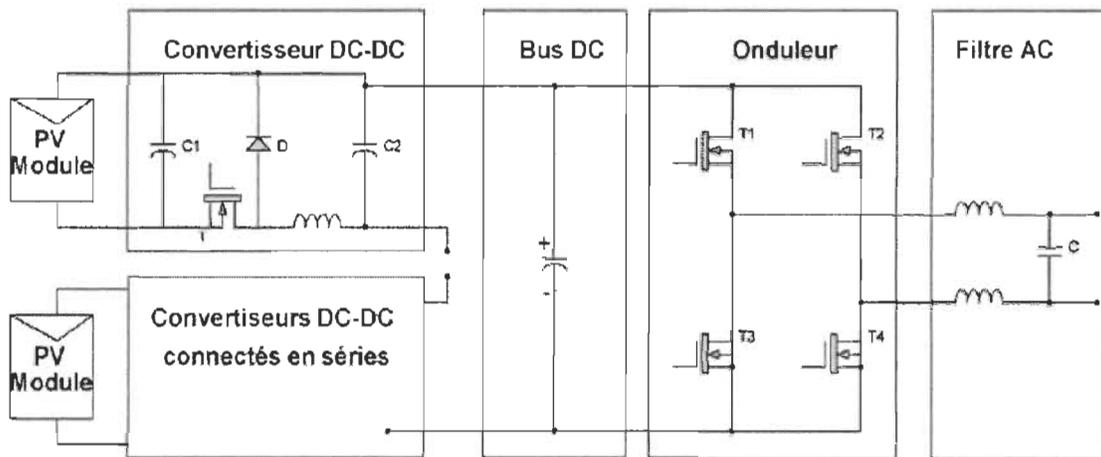


Figure 3. 14 Mise en cascade d'un onduleur avec la mise en série des convertisseurs DC-DC correspondants à un seul module chacun

3.3.3 Avantages d'un convertisseur pour un module PV

Les convertisseurs DC-DC et DC-AC ont beaucoup d'avantages. Des exemples d'application pour une mise en série des batteries aussi bien que des applications de PV sont donnés.

3.3.3.1 Utilisation (MPPT) pour chaque module

Chaque module peut indépendamment contrôler et optimiser le flux de sa puissance. Pour la charge de la batterie, chaque module peut aussi charger sa batterie reliée avec une puissance optimale, réduisant le temps de charge et augmentant l'efficacité de cette charge. Chaque module peut indépendamment exécuter la recherche du point de fonctionnement optimum de puissance (MPPT) pour son panneau PV [11]. Ces raisons prises ensemble sont l'avantage le plus important des modules distribués par panneau.

3.3.3.2 Protection des sources d'énergie PV

La protection intelligente peut être appliquée sur la source. Par exemple, une batterie faible peut être protégée contre des dommages permanents pendant la décharge profonde. Un module PV peut fournir sa puissance plutôt que d'être dévié par la charge, ceci est la cause de la diode de protection (diode d'anti-retour).

3.3.4 *Problèmes de mise en série ou en parallèle des modules*

Le réseau relié avec les convertisseurs intégrés par module qui convertissent directement en 220 V AC peut étendre la réclamation à ces avantages. Cependant, cette approche du raccordement direct sur le réseau a l'inconvénient d'une grande différence entre la tension à l'entrée qui est basse et la tension à la sortie qui est haute [10]. Ceci exige un convertisseur basé d'un transformateur, qui exige plus de masse et de volume, qui est plus cher, et qui est moins efficace qu'un convertisseur DC-DC.

Au lieu du raccordement en parallèle, la mise en série des modules permet aux convertisseurs d'avoir un rapport de la tension d'entrée par rapport à la tension de la

sortie près de l'unité, qui mène à l'utilisation la plus élevée, et enlève le besoin de transformateur.

3.4 Conclusion

Dans la plupart des applications dans le domaine d'énergie solaire photovoltaïque, les convertisseurs photovoltaïques ont un rôle fondamental permettant l'adaptation de l'énergie électrique aux différentes applications. Dans ce chapitre consacré à l'étude des différentes configurations des convertisseurs statiques utilisées dans les installations photovoltaïques, nous sommes intéressés aux installations photovoltaïques couplées aux réseaux DC et aux réseaux AC. L'objectif de cette étude étant de fournir les éléments de base à considérer par le concepteur de ces installations et l'utilisateur de ce type de systèmes électriques et énergétiques. Dans la première partie, nous avons présenté les différentes connexions possibles avec un module PV, et l'effet d'une connexion directe avec un module PV. Ainsi l'intérêt des convertisseurs photovoltaïques dans un système PV pour la connexion avec le réseau DC ou avec le réseau AC.

Chapitre 4 - Conception du convertisseur photovoltaïque

4.1 Introduction

Dans cette partie nous allons concevoir un système photovoltaïque permettant d'alimenter le réseau basse tension (110V / 60Hz) à partir des panneaux solaires. Le système choisi passe par un bus de tension continue. Les convertisseurs utilisés assureront une utilisation optimisée des panneaux solaires avec des commandes appropriées. Le modèle de la connexion du réseau à partir du panneau photovoltaïque sera implémenté sous l'environnement MATLAB et simulé à l'aide de SIMULINK. Une technique de type hystérésis est utilisée pour imposer l'onde du courant de sortie. Cette technique consiste à mettre le signal de sortie dans une fourchette de courant autour du signal de référence imposé par le régulateur. Les effets des différents paramètres du système, sur la qualité des grandeurs électriques, ont été étudiés.

4.2 Système photovoltaïque proposé

Le système photovoltaïque proposé, présenté sur le schéma de la figure 4.1, permet de fournir une puissance vers le réseau électrique à partir du panneau solaire. Différentes structures de conversion électrique pour l'interfaçage avec le réseau sont possibles. La

structure choisie est composée d'un hacheur élévateur associé à un onduleur monophasé. Ce système utilise deux différents types de commande, la première commande pour le convertisseur DC/DC qui sert à fournir un maximum de puissance à partir du panneau et la deuxième pour le convertisseur DC/AC qui sert à déterminer une forme de courant bien adaptée au réseau électrique.

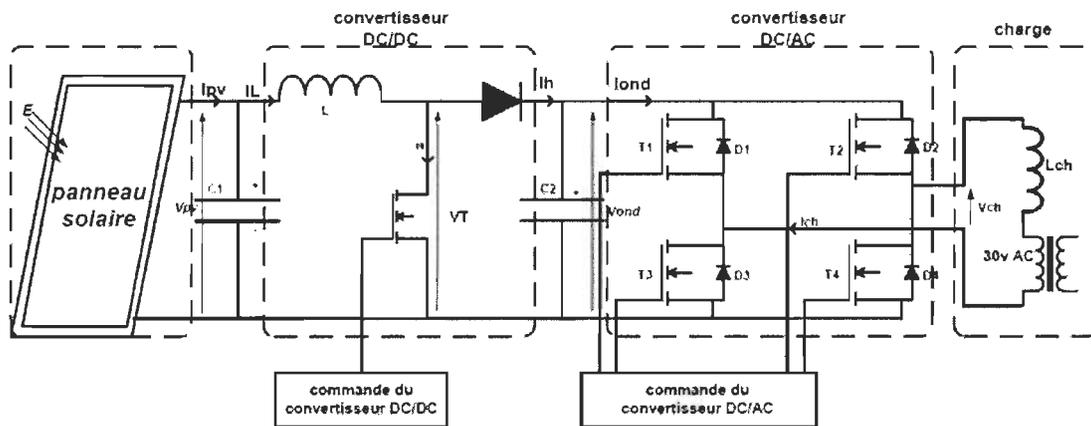


Figure 4. 1 Circuit électrique du système photovoltaïque proposé pour la connexion avec le réseau

Les équations qui décrivent le comportement électrique du système sont données par :

$$C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \quad \text{décrit la tension } V_{pv} \text{ aux bornes du panneau}$$

Tel que la tension V_{ond} aux bornes de l'onduleur est donnée par :

$$C_2 \frac{dV_{ond}}{dt} = I_h - I_{ond}$$

Le courant I_L dans l'inductance de stockage L est donné par $L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_T$

L'équation de la charge est donnée par $V_{ch} = L_{ch} \frac{dI_{ch}}{dt} + V_{AC_{Max}} \cdot \sin(2 \cdot \Pi \cdot f \cdot t)$

I_{pv} : courant délivré par le panneau ;

V_{ACMax} : tension

V_T : tension aux bornes ;

I_h : courant de sortie du convertisseur DC/DC ;

I_{ch} : courant de charge.

Selon les quatre états de commande pour l'onduleur, V_{ch} peut prendre trois valeurs qui sont : $+V_{ond}$, 0 , $-V_{ond}$.

4.2.1 Choix du convertisseur DC/DC

Le circuit de puissance proposé pour le transfert d'énergie solaire vers un convertisseur DC/AC est un hacheur élévateur à stockage inductif. Lorsque l'interrupteur T (voir figure 4.2) est fermé, l'inductance L stocke de l'énergie et la charge est déconnectée de la source. Lorsque l'interrupteur T est ouvert, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée vers la charge.

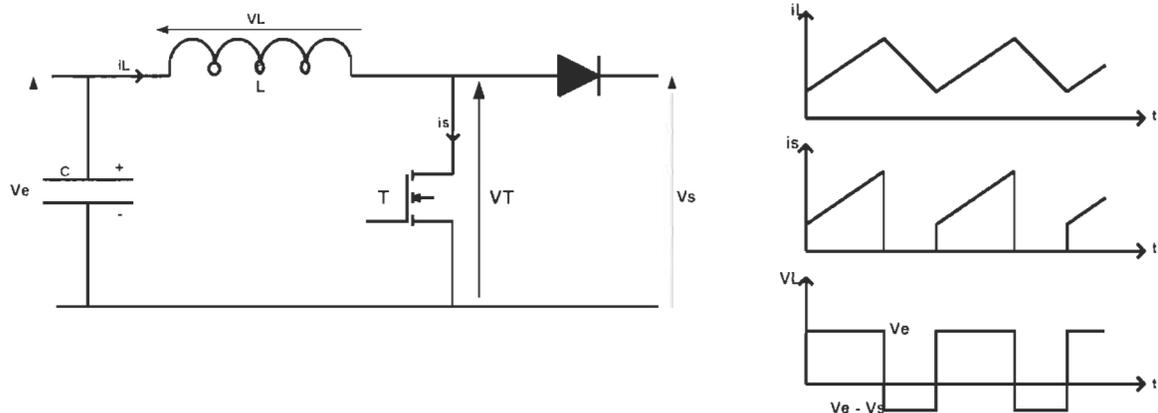


Figure 4. 2 Circuit et les formes d'ondes des grandeurs électriques d'un convertisseur élévateur en mode continue

Cette topologie garantit un courant continu à travers le panneau et propose une solution avec une tension de sortie (tension à l'entrée de l'onduleur) plus grande que la tension d'entrée (tension délivrée par le panneau).

Ce convertisseur de puissance a pour fonction de transférer l'énergie vers l'onduleur en donnant à cette énergie la forme adéquate au moment nécessaire. La topologie du circuit du convertisseur doit être compatible avec celle de l'onduleur afin de réaliser le transfert du maximum de la puissance à partir du panneau solaire. Le choix de la nature du convertisseur est fortement lié à la valeur de la tension d'entrée de l'onduleur ainsi qu'à la nature de la connexion (en parallèle ou en série) entre les panneaux solaires. Dans notre cas, le fonctionnement optimal des panneaux permet d'avoir une tension à l'entrée du convertisseur. En effet dans notre système nous réglons la tension de sortie de ce convertisseur pour la rendre oscillatoire au tour d'une valeur bien déterminée. Il faut noter que cette tension doit être de faible ondulation.

4.2.2 Choix du convertisseur DC/AC

Dans le système d'alimentation photovoltaïque sur le réseau électrique, le courant continu fourni par le panneau solaire devrait être converti en courant alternatif afin de connecter le réseau. Dans cette condition, un onduleur monophasé de tension est exigé, l'onduleur utilisé est représenté par le schéma de la figure 4.3.

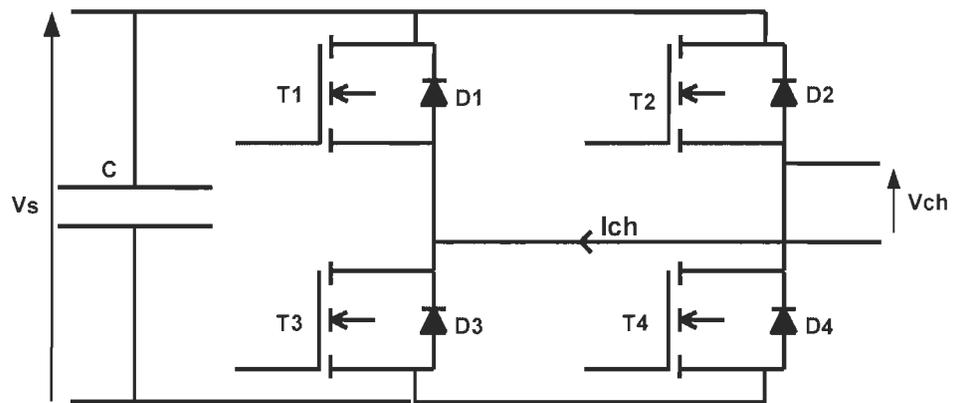


Figure 4. 3 Convertisseur DC/AC utilisé pour la connexion avec le réseau électrique

L'onduleur de tension utilisé est un convertisseur direct « tension-courant » alimenté par une source de tension continue, il est réversible en courant, et permet à son tour d'alimenter en tension alternative des charges ayant un comportement de « source de courant ». La synthèse d'un onduleur de tension montre que chaque cellule de commutation qui le constitue comprend une paire d'interrupteurs réversibles en courant et non réversibles en tension.

Les mécanismes de commutation de ces interrupteurs dépendent principalement des caractéristiques de la charge, de son facteur de puissance (courant en avance ou en retard de phase par rapport à la tension aux bornes du réseau) et du type de commande de l'onduleur (commande non modulée ou modulée).

Ce convertisseur de puissance a pour fonction de fournir de l'énergie au réseau public en donnant à cette énergie la forme adéquate au moment nécessaire. La topologie du circuit de l'onduleur doit être compatible avec celle du réseau électrique afin de réaliser le transfert d'un courant sinusoïdal vers ce réseau. Le choix de la valeur de la tension

d'entrée (V_s) de l'onduleur est fortement lié à la valeur de la tension aux bornes du primaire du transformateur (dont le secondaire est connecté au réseau électrique. Dans notre cas la valeur de la tension à la sortie est égale à $V_{acmax} * \sin(2.\pi.f.t)$.

4.3 Conception de la commande du système photovoltaïque

4.3.1 Commande du convertisseur DC/DC

La commande du convertisseur DC/DC nécessite une génération d'une tension de référence. La génération du signal PWM pour la commande du convertisseur DC/DC est effectuée à l'aide d'un régulateur de tension suivi d'un générateur PWM. Le principe de la logique de commande est déterminé par le schéma de la figure 4.4.

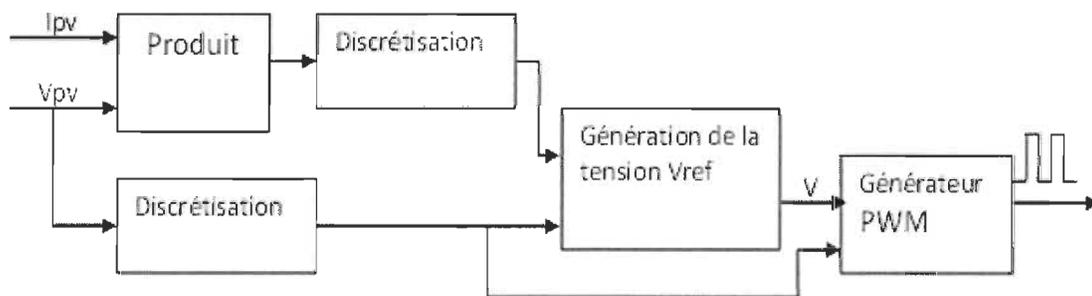


Figure 4. 4 Schéma bloc pour la commande du convertisseur DC/DC

Pour extraire le maximum de courant, la tension aux bornes du panneau doit être ajustée selon l'éclairement de manière à obtenir une extraction maximale de la puissance (commande MPPT). Cet ajustement est possible en faisant varier le rapport cyclique du transistor (du hacheur) et en réalisant une régulation de la tension aux bornes du panneau et du courant sortant du panneau. Ceci est possible avec la création d'une tension de référence, un régulateur PI agit sur l'erreur entre la tension de référence et la tension aux bornes du panneau. Le signal résultant va être attaqué par un générateur PWM afin de

commander le hacheur. Avec une variation de la tension du panneau (ΔV) de 0.01V et un calcul toutes les 0.5 milliseconde, une convergence vers le maximum de puissance en quelques dizaines de millisecondes a été obtenu. Le schéma de la figure 4.5 montre le principe de la génération de la tension de référence (V_{ref}).

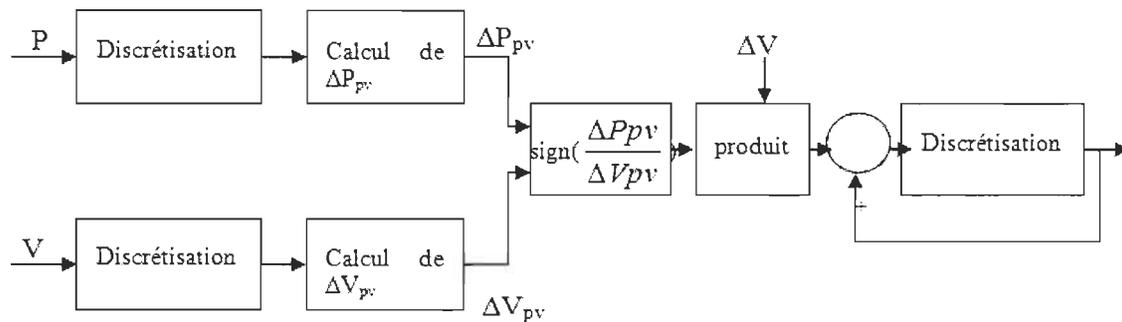


Figure 4. 5 Génération de la tension de référence

Le schéma de la figure 4.6 montre le principe de la génération du signal PWM pour la commande du transistor MOSFET du convertisseur DC/DC.

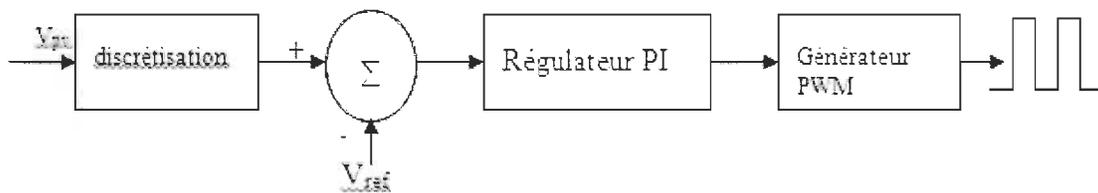


Figure 4. 6 Génération d'un signal PWM

4.3.2 Commande du convertisseur DC/AC (Technique de l'hystérésis)

Le principe de la commande utilisée consiste à imposer une onde de courant de sortie d'amplitude donnée.

Le courant instantané de sortie est imposé dans une fourchette de courant autour du courant de référence sinusoïdal.

Si l'intensité du courant de charge est sous la limite inférieure, la technique appliquée pour la commande de l'onduleur commute l'onduleur pour augmenter ce courant de charge. Par contre si cette intensité est au-dessus de la limite supérieure, cette même technique commute l'onduleur de façon à diminuer ce même courant. Comme le montre le schéma de la figure 4.8, pour un courant de référence calculé, les limites inférieure et supérieure sont fixées approximativement par $\pm \Delta I$ par rapport à ce courant de référence. La création de ce courant de référence est déterminée par la génération d'un signal sinusoïdal de fréquence 60 Hz et de déphasage φ , ceci en imposant une tension d'alimentation de l'onduleur (V_{ond}) constante.

Pendant la même variation du courant et après un changement d'état des interrupteurs formant l'onduleur, comme le montre le schéma de la figure 4.7, le calcul de la valeur prévue (limite inférieure ou limite supérieure du courant de charge) soit sauté à un dépassement. Cela est dû au temps de réponse des changements d'état des interrupteurs.

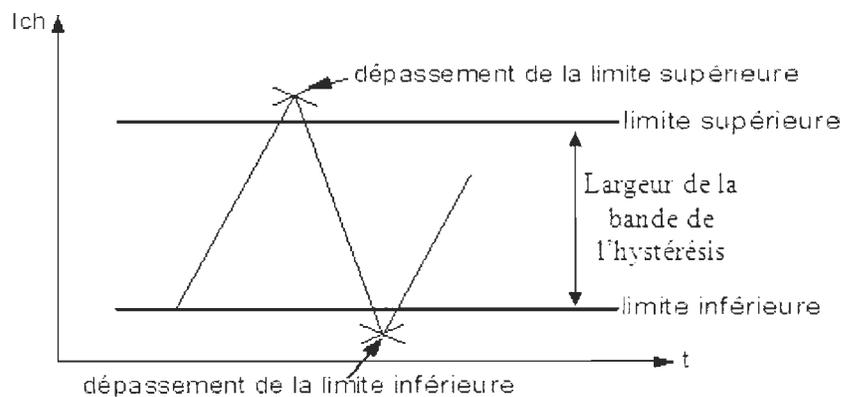


Figure 4. 7 Bande d'hystérésis du courant dans la charge

La figure suivante montre l'évolution du courant injecté vers le réseau autour du courant de référence, ainsi que les limites choisies.

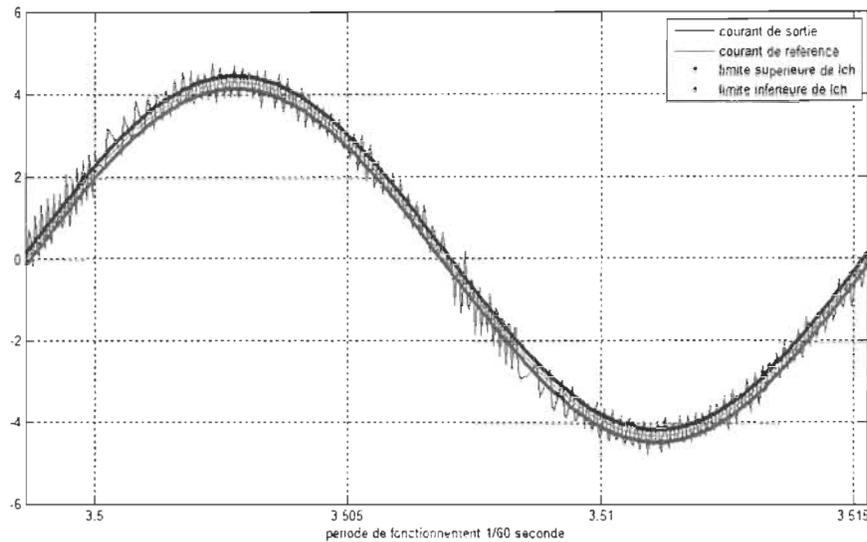


Figure 4.8 Allure du courant de sortie et des signaux de référence

La régulation de la tension d'alimentation de l'onduleur doit se faire autour d'une valeur supérieure à l'amplitude de la tension sinusoïdale aux bornes du primaire du transformateur (dont le secondaire est connecté au réseau). Cette régulation est faite à l'aide d'un régulateur PI, le signal résultant détermine l'amplitude du courant de référence. Cette amplitude est alors multipliée par le signal sinusoïdal d'amplitude unitaire afin de déterminer le courant de référence.

Le principe de la logique de commande est déterminé par le schéma de la figure 4.9.

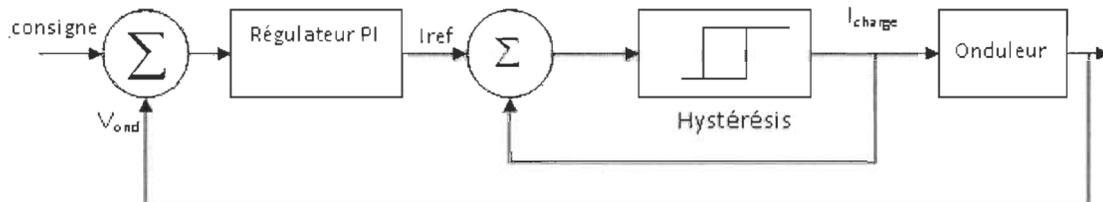


Figure 4.9 Logique de commande

4.4 Implémentation du système photovoltaïque dans MATLAB

Nous avons commencé ce travail par la modélisation d'un ensemble de panneaux solaires soumis à différents éclairagements. La structure choisie est composée d'un hacheur élévateur associé à un onduleur monophasé.

L'étude du comportement électrique du système complet nécessite l'implémentation de son modèle dans un simulateur. Nous avons choisi d'utiliser MATLAB comme support informatique pour l'implémentation de ce modèle. Le choix de ce simulateur est justifié pour sa simplicité d'utilisation d'une part et parce que plusieurs types de phénomènes physiques (électrique, thermique..) peuvent y être implémentés.

4.4.1 Implémentation du convertisseur DC/DC dans le logiciel MATLAB

L'approche utilisée pour la modélisation du convertisseur consiste à le décrire à partir des composants actifs et passifs depuis la bibliothèque SIMPOWER du simulateur MATLAB. En effet, des composants semi-conducteurs sont proposés par ce logiciel. La représentation du convertisseur statique dans MATLAB est donnée par le schéma de la figure 4.10.

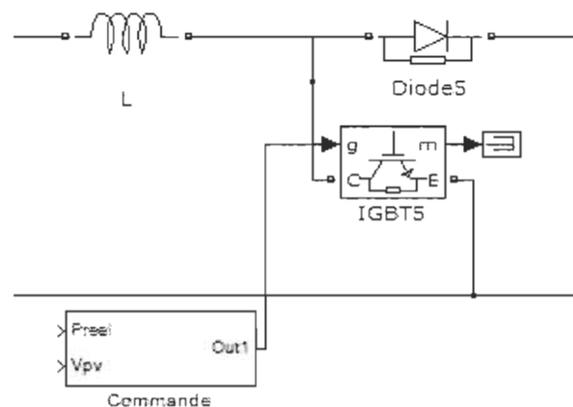


Figure 4. 10 Représentation du convertisseur DC/DC implémenté dans MATLAB

4.4.2 Implémentation du modèle du convertisseur DC/AC dans MATLAB

Comme pour le convertisseur DC/DC, la modélisation du convertisseur DC/AC consiste à le décrire à partir des composants actifs et passifs depuis la bibliothèque SIMPOWER du simulateur MATLAB. La représentation du convertisseur statique dans MATLAB est donnée par le schéma de la figure 4.11.

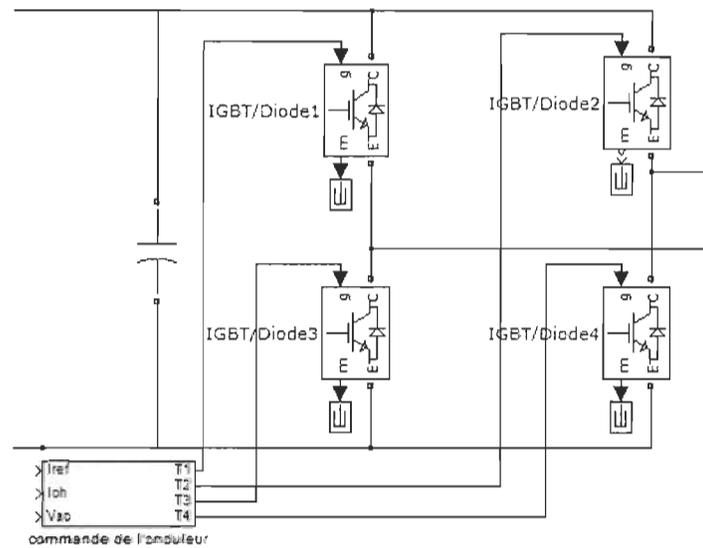


Figure 4. 11 Représentation du convertisseur DC/AC de type circuit implémenté dans MATLAB

Le schéma de la figure 4.12 montre la représentation graphique du modèle de simulation du système photovoltaïque.

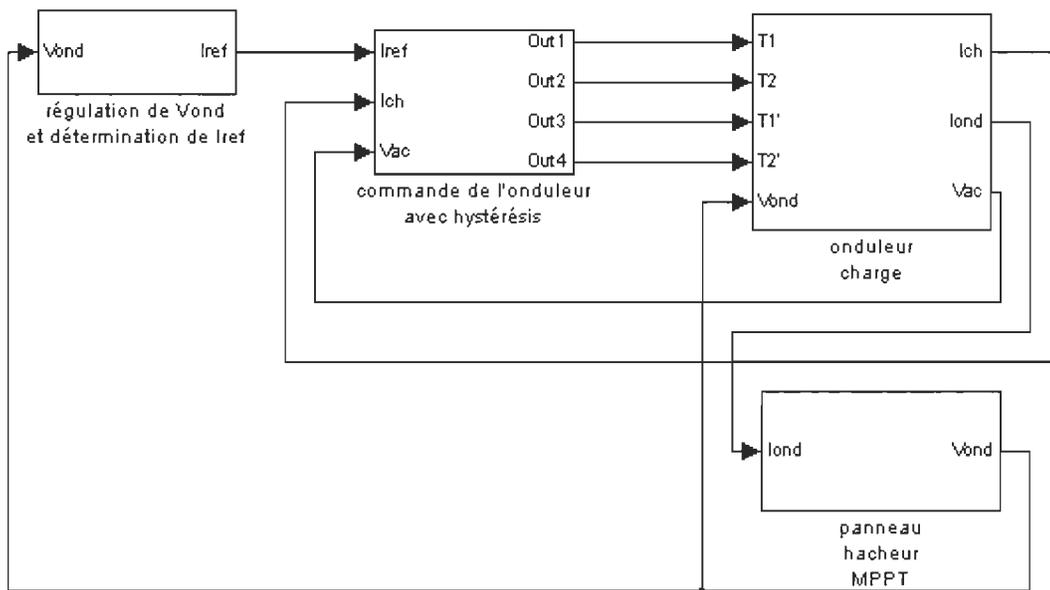


Figure 4.12 Représentation graphique du modèle de simulation du système photovoltaïque

4.5 Choix de l'algorithme (Technique de l'hystérésis)

Dans le cas où le courant dans la charge et la tension aux bornes du réseau électrique sont en phases (déphasage nul), nous proposons un algorithme définissant la commande des interrupteurs de l'onduleur comme suit :

- Si $(I_{ch} \leq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \geq 0)$ on a :

$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
0	1	1	0

- Si $(I_{ch} \geq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \geq 0)$ on a :

$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
0	1	0	0

- Si $(I_{ch} \leq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \leq 0)$ on a :

$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
0	0	0	1

- Si $(I_{ch} \geq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \leq 0)$ on a :

$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
1	0	0	1

D'après l'algorithme proposé, on obtient la forme de la tension de charge pour les différents états de commandes de l'onduleur choisis, montrée par le schéma de la figure 4.13.

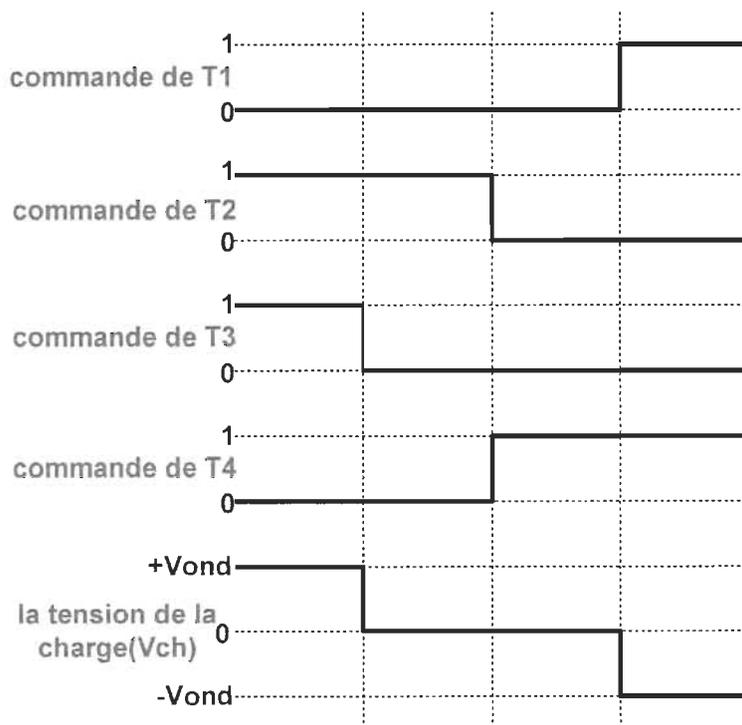


Figure 4. 13 Forme de la tension de charge en fonction des états de commandes de l'onduleur

Dans le cas où le courant de charge est déphasé par rapport à la tension aux bornes du réseau, la dérivée et le signe de ce courant changent pendant une période de fonctionnement. Par conséquent, lorsque nous aurons les signes de la dérivée du courant de charge et de la tension aux bornes du réseau sont les mêmes (la tension aux bornes de l'inductance de charge est de même signe que la tension aux bornes du réseau) et dans le cas d'une roue libre (la tension aux bornes de la charge est nulle), nous obtenons une augmentation du courant de charge en valeur absolue pour rendre la tension aux bornes de l'inductance de valeur opposée que la tension aux bornes du réseau électrique. Pour remédier à ce problème, des différentes sorties sont appliquées selon différentes régions du cycle 60-Hertz.

Le tableau suivant résume l'algorithme général de la technique d'hystérésis :

Tableau 4. 1 Algorithme général de la technique d'hystérésis

	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>Vch</i>	<i>Iond</i>	<i>Variation de Ich</i>
$(I_{ch} \leq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \geq 0)$	0	1	1	0	+Vond	+Ich	Croissante
$(I_{ch} \geq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \geq 0)$ et $sign(I_{ch}) = sign(V_{réseau})$	0	1	0	0	0	0	Décroissante
$(I_{ch} \geq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \geq 0)$ et $sign(I_{ch}) = -sign(V_{réseau})$	0	0	0	0	-Vond	-Ich	Décroissante
$(I_{ch} \leq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \leq 0)$ et $sign(I_{ch}) = sign(V_{réseau})$	0	0	0	1	0	0	Croissante
$(I_{ch} \leq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \leq 0)$ et $sign(I_{ch}) = -sign(V_{réseau})$	0	0	0	0	+Vond	+Ich	Croissante
$(I_{ch} \geq I_{ref} - K)$ et $(I_{ref} \leq 0)$	1	0	0	1	-Vond	-Ich	Décroissante

En effet le bloc « hystérésis » calcule, à partir des grandeurs électriques à savoir : le courant de charge I_{ch} , le courant de référence I_{ref} et la tension du réseau électrique, les différents états de commandes de l'onduleur. Ce choix de calcul permet d'imposer le courant de charge I_{ch} dans une fourchette autour du courant de référence I_{ref} . Le bloc « hystérésis » est un bloc de type « S-Function » de MATLAB. Le schéma de la figure 4.14 montre l'implémentation de l'algorithme (technique d'hystérésis) sous MATLAB.

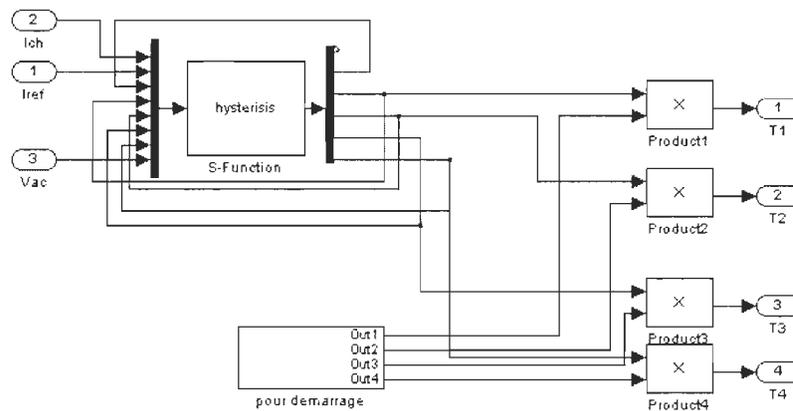


Figure 4. 14 Implémentation de l'algorithme (technique d'hystérésis) sous MATLAB

4.6 Résultats de simulation

Pour extraire le maximum de courant, la tension aux bornes du panneau doit être ajustée selon l'éclairement de manière à obtenir une extraction maximale de la puissance (commande MPPT). Cet ajustement est rendu possible en faisant varier le rapport cyclique du transistor (du hacheur) et en réalisant une régulation de la tension aux bornes du panneau. Avec une variation de la tension de référence (ΔV) de 0.01V et un calcul toutes les 0.5 milliseconde, la tension aux bornes du panneau doit être régulée autour de la tension de référence. Cette procédure est illustrée par la figure 4.15.

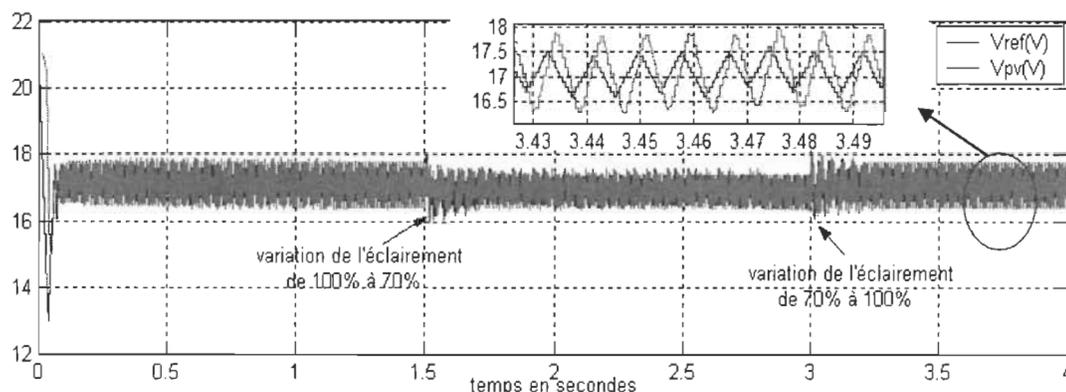


Figure 4. 15 Tension de référence et tension aux bornes du panneau à éclairement variable

Pour la recherche du point à puissance maximale, nous avons utilisé la méthode numérique « perturbation et observation ». Nous avons vérifié cette méthode en introduisant une perturbation sur l'éclairage, nous avons remarqué que, pour un changement de l'éclairage, la puissance délivrée par les panneaux évolue pour atteindre l'optimum. Comme le montre le schéma de la figure 4.16, une convergence vers le maximum de puissance en quelques dizaines de millisecondes a été obtenue.

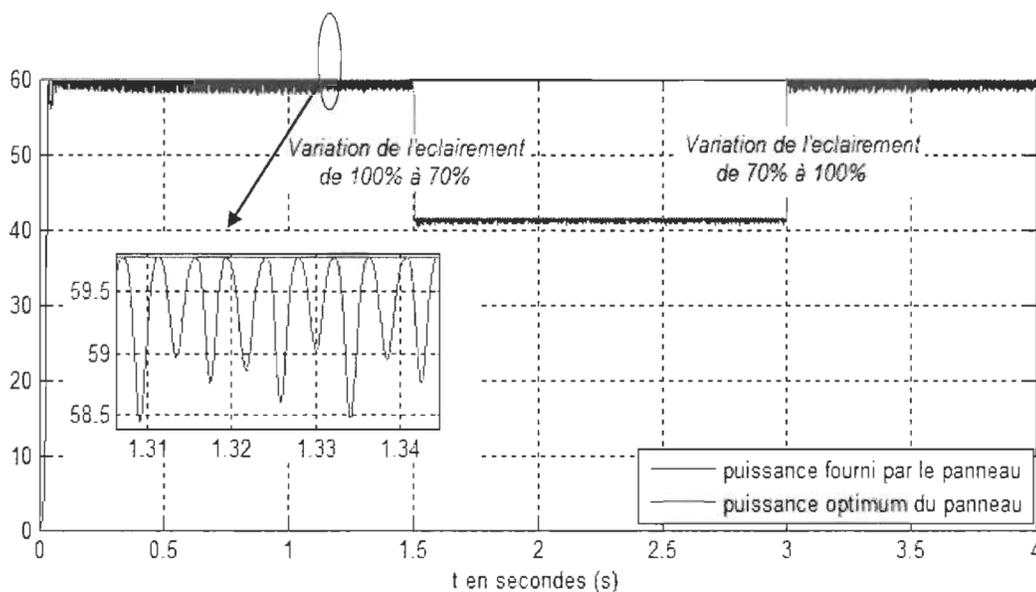


Figure 4. 16 Puissance réelle délivrée par le panneau à éclairement variable

4.6.1 Détermination de l'amplitude du courant de référence

La régulation de la tension permettant d'alimenter l'onduleur, doit se faire autour d'une valeur supérieure à la valeur maximale de la tension sinusoïdale dans la charge (comme le montre le schéma de la figure 4.17). Nous avons choisi de réguler cette tension autour de 50V. Cette régulation est faite à l'aide d'un régulateur PI, le signal résultant détermine l'amplitude du courant de référence. Ceci est alors multiplié par un signal sinusoïdal d'amplitude unité afin de déterminer le courant de référence.

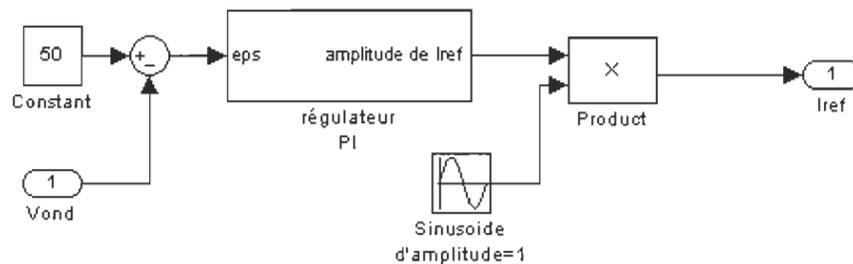


Figure 4. 17 Détermination du courant de référence dans le simulateur MATLAB

Quelles que soient les conditions d'éclairage, la tension d'alimentation doit être régulée à la consigne choisie. Pour une puissance plus faible, l'ondulation de la tension d'alimentation de l'onduleur (V_{ond}) diminue. Dans le cas de la figure 4.18, la consigne est de valeur 50 V.

La capacité permettant le lien entre le hacheur et l'onduleur fournit à l'onduleur une tension stable autour d'une valeur bien déterminée.

Les variations de l'amplitude de la tension d'alimentation de l'onduleur sont à la fréquence double de celles des grandeurs électriques de sortie. Ces variations doivent être

de valeurs raisonnables pour ne pas déformer la forme des grandeurs de sortie. Une capacité de valeur $1000 \mu\text{F}$ donne une ondulation de 3 % dans le pire des cas.

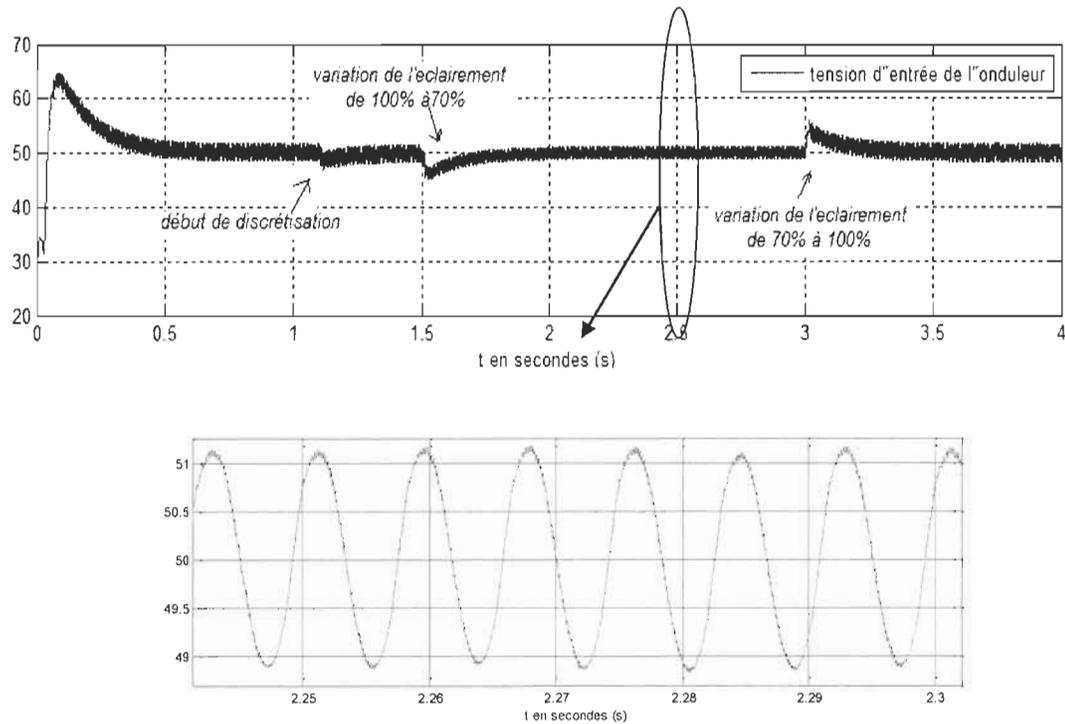


Figure 4.18 Évolution de la tension d'alimentation de l'onduleur suite à des perturbations sur l'amplitude de l'éclairage

Nous observons d'après le schéma de la figure 4.19, la proportionnalité entre le courant dans la charge et la puissance délivrée par le panneau solaire. Ceci justifie le principe de la conservation de la puissance.

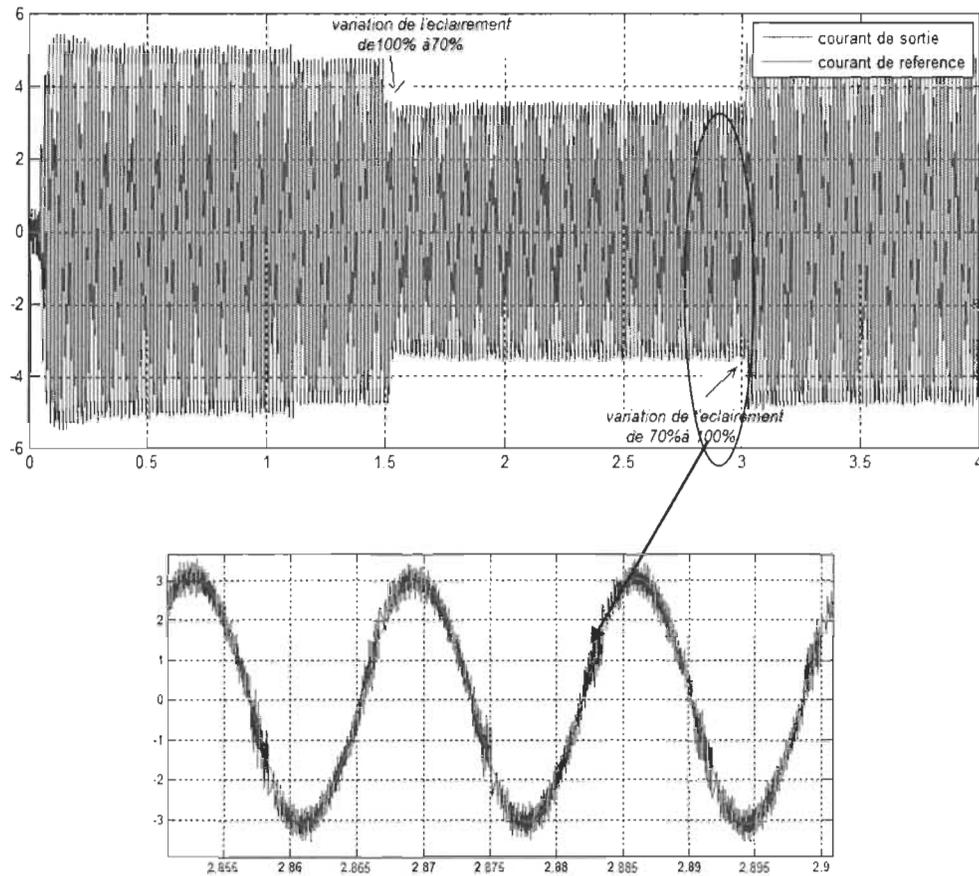


Figure 4. 19 Courant de référence et courant dans la charge suite à une variation de l'éclairage

4.6.2 Discretisation de l'amplitude du courant de référence

Puisque la tension d'alimentation de l'onduleur présente des ondulations de fréquence 120 Hz, l'amplitude du courant de référence présente aussi des ondulations à la même fréquence. Comme la montre la figure 4.20, ces ondulations ont un grand effet sur la forme du courant de référence, ils déforment la forme du signal prévu.

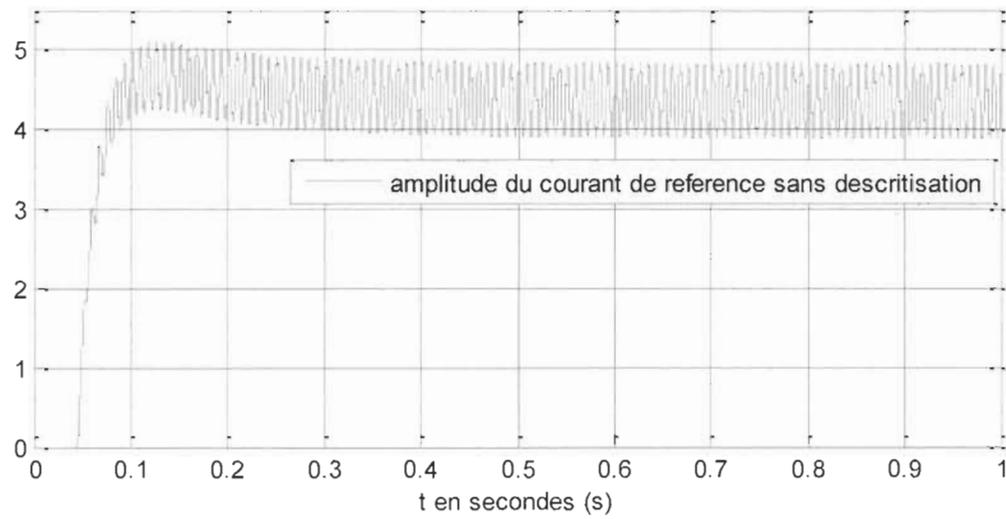


Figure 4. 20 Amplitude du courant de référence sans discrétisation

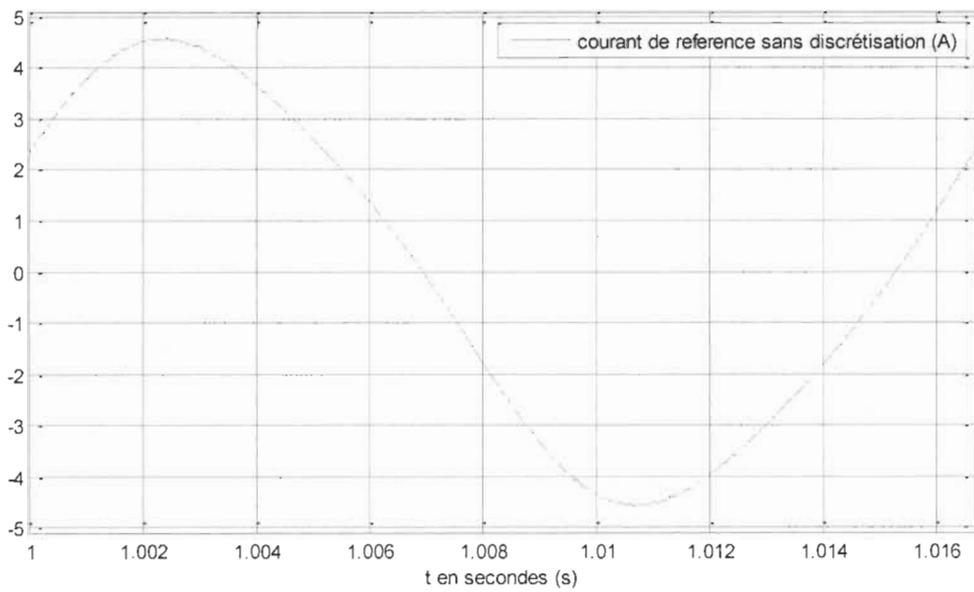


Figure 4. 21 Forme du courant de référence sans discrétisation de l'amplitude de ce signal

Pour éviter la déformation de l'allure du courant de référence, on ajoute à notre modèle un bloc de discrétisation. L'intégration du bloc de discrétisation est présentée par la figure 4.22.

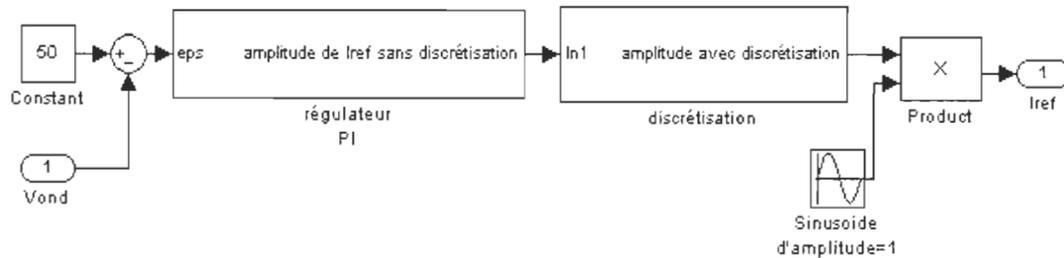


Figure 4. 22 Détermination du courant de référence avec discrétisation dans le simulateur MATLAB

Ce bloc permet de bloquer la valeur de l'amplitude du courant de référence pendant chaque période (1/60 seconde), l'intérêt de ce bloc est d'éviter les ondulations de l'amplitude du courant de référence pour améliorer la forme du courant de référence, comme l'indique la figure suivante.

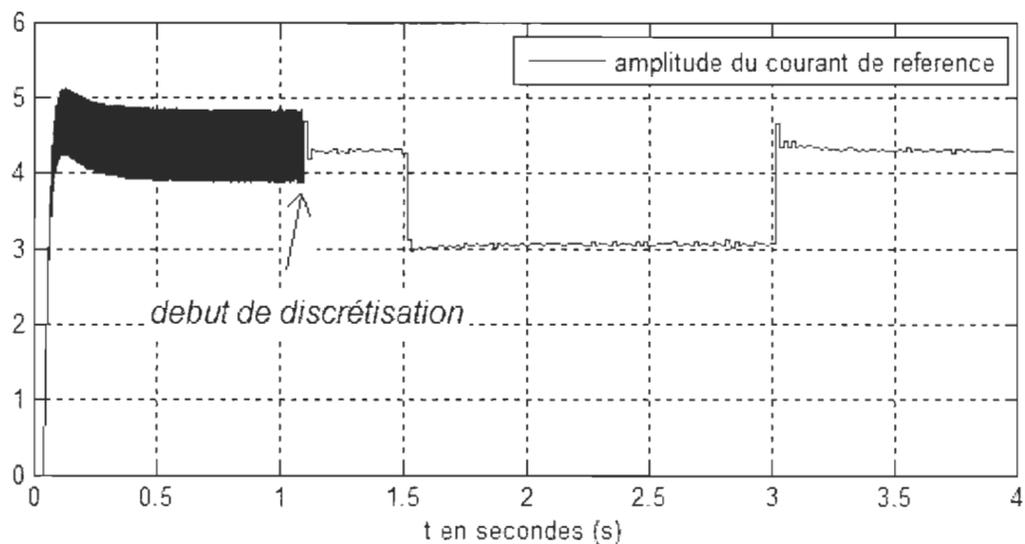


Figure 4. 23 Amplitude du courant de référence avec discrétisation

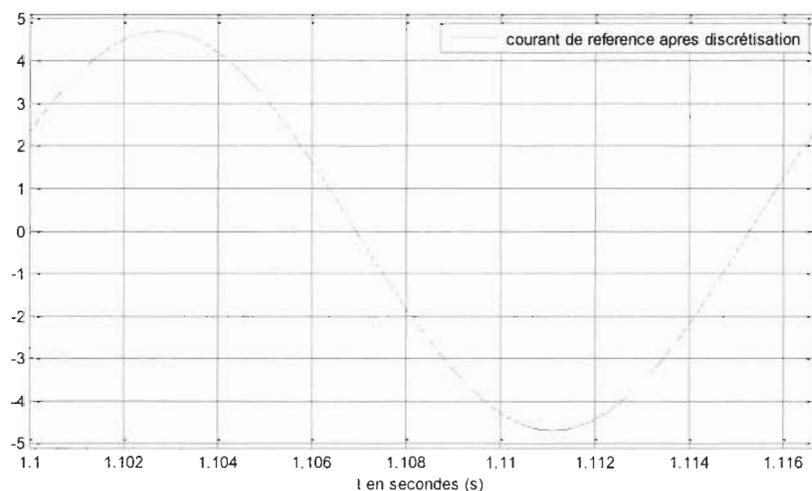


Figure 4. 24 Forme du courant de référence après discrétisation pendant une période de fonctionnement

4.6.3 Résultats de simulation en fonction de la commande

Les résultats de simulation du système sont représentés sur les trois figures suivantes. Dans un premier lieu, nous avons présenté l'évolution des différents états de commandes de l'onduleur, dans le cas où le courant de charge est en avance par rapport à la tension du réseau d'un angle ($\pi/6$) et avec une inductance de charge de 2mH.

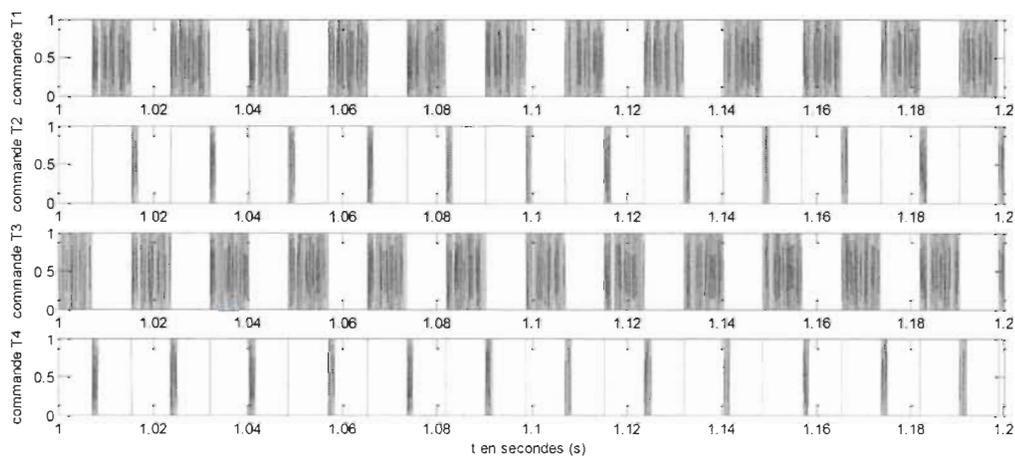


Figure 4. 25 Différentes commandes de l'onduleur

En fonction de ces différents états de commandes, l'évolution de la tension et du courant aux bornes de la charge est représentée par les deux figures suivantes.

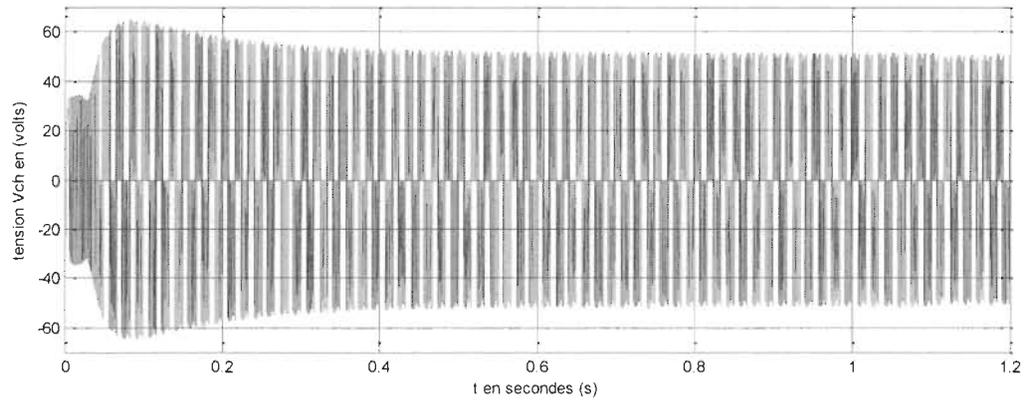
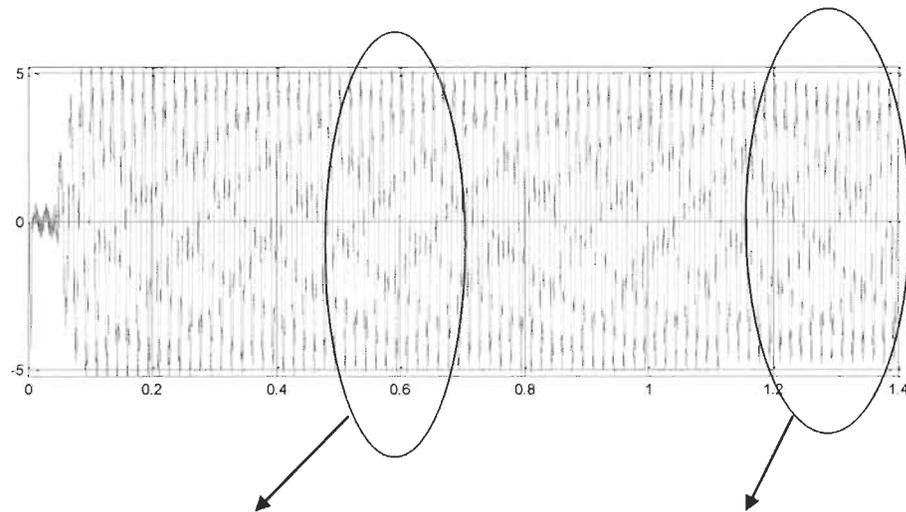


Figure 4. 26 Forme de la tension aux bornes de la charge de l'onduleur



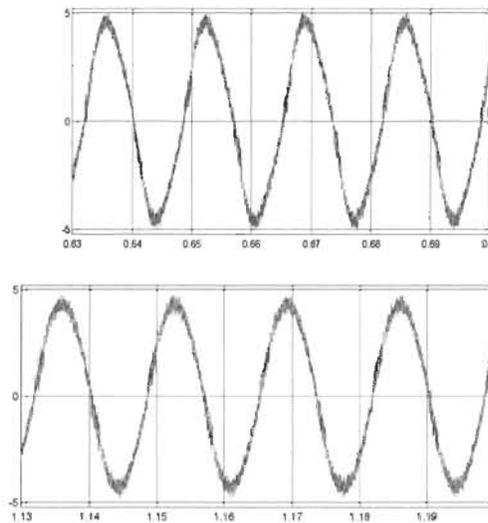


Figure 4.27 Forme du courant de charge et du courant de référence

En régime permanent, ces grandeurs vues dans les trois figures précédentes deviennent périodiques de période $1/60$ secondes. Les trois figures suivantes montrent l'évolution de ces grandeurs pendant une période de fonctionnement.

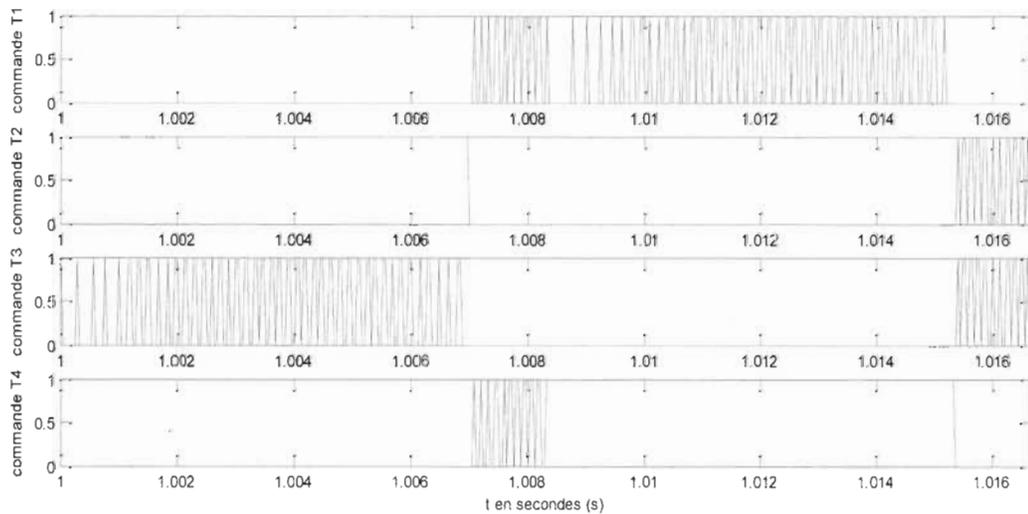


Figure 4.28 Différents états de commande de l'onduleur pendant une période de $1/60$ s

En fonction de ces différents états de commandes, l'évolution de la tension et du courant aux bornes de la charge de l'onduleur pendant une période de fonctionnement pour le modèle de type circuit est représentée par les figures suivantes.

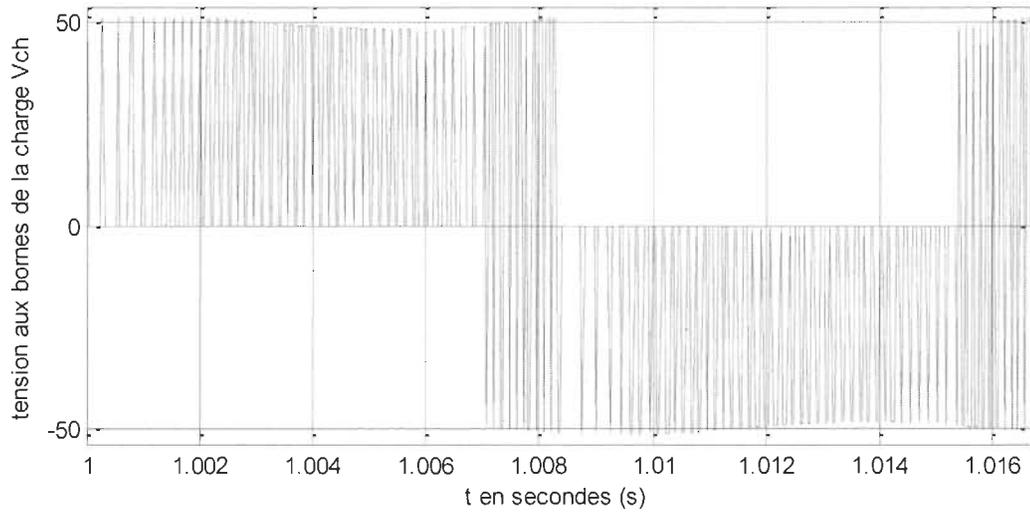


Figure 4. 29 Forme de la tension aux bornes de la charge de l'onduleur

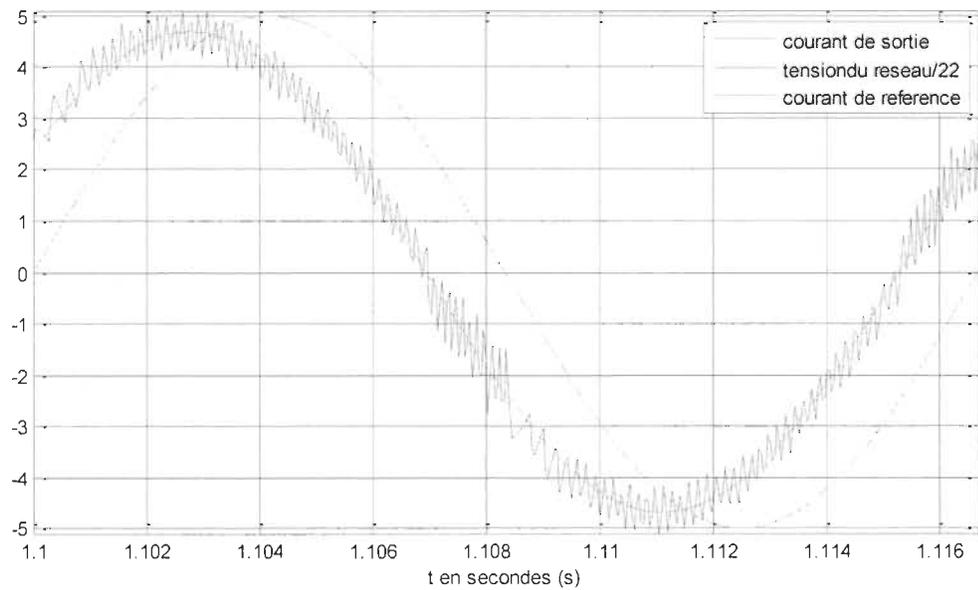


Figure 4. 30 Forme du courant de charge et du courant de référence

Il faut préciser que les commandes des deux interrupteurs de chaque bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour ne pas court-circuiter la tension d'alimentation de l'onduleur.

4.7 L'effet des différents paramètres du système photovoltaïque proposé

Le but de notre système est de transférer à partir des panneaux solaires photovoltaïques le maximum de puissance vers le réseau électrique. La puissance maximale délivrée par le panneau est de 60W pour une irradiation E de valeur 1000 $W.m^{-2}$. Nous avons aussi comme objectif d'assurer une bonne qualité du courant injecté au réseau électrique, c'est-à-dire déterminer la forme la plus proche d'un signal sinusoïdal.

Une étude spectrale a été menée en fonction des différents paramètres de notre système afin d'améliorer le courant de charge (courant injecté dans le réseau).

Cette étude spectrale est faite avec des fonctions particulières sous l'éditeur de MATLAB. Avec le modèle de type interrupteur parfait et pour les mêmes paramètres, nous déterminons l'effet de l'un de ces paramètres. Les paramètres sont définis comme suit :

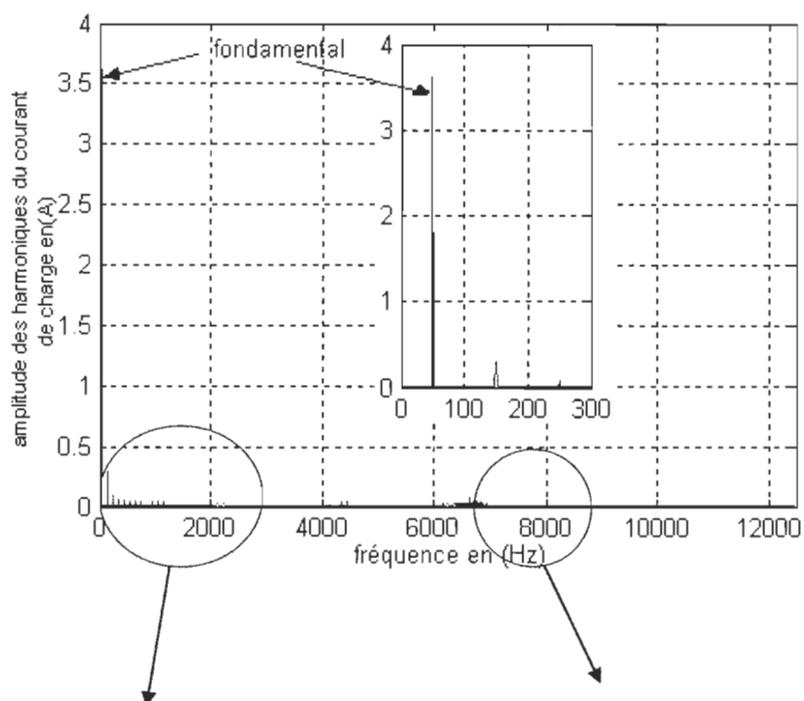
- Le filtrage de l'amplitude du courant de référence ;
- La largeur de la bande de l'hystérésis ;
- La valeur moyenne de la tension d'alimentation de l'onduleur ;
- L'inductance de charge ;
- Le déphasage du courant dans la charge par rapport à la tension aux bornes du réseau.

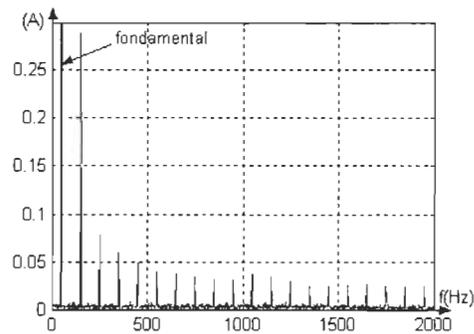
4.7.1 Effet du filtrage du courant I_{ref}

Une étude spectrale est faite sur le courant injecté dans le réseau afin de déterminer l'effet de filtrage du courant de référence pour les basses et les hautes fréquences (fréquences de commutations). Cette étude spectrale est effectuée avec les paramètres suivants :

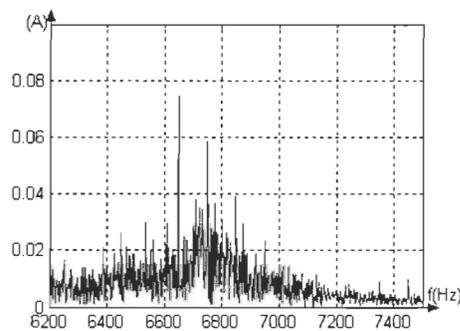
- Une largeur de la bande de l'hystérésis de ± 0.15 ;
- Une valeur moyenne de la tension d'alimentation de l'onduleur de 50V ;
- Une inductance de charge de valeur 2mH ;
- Un déphasage du courant injecté au réseau par rapport à la tension aux bornes du réseau nul.

Le schéma de la figure 4.31 représente le spectre du courant de sortie de l'onduleur sans le bloc discrétisation à la sortie du régulateur.





a- Spectre du courant de charge pour les basses fréquences



b- Spectre du courant de charge pour les fréquences de commutation

Figure 4. 31 Spectre du courant de charge sans discrétisation

À partir de ces figures, nous avons déterminé les amplitudes des harmoniques secondaires. Les plus importantes harmoniques et leurs amplitudes figurent sur le tableau suivant. Nous précisons aussi le pourcentage correspondant à chacune par rapport à l'harmonique fondamentale.

Tableau 4. 2 Harmoniques les plus grands du courant de charge sans discrétisation

I_{dc}	$I_{(1)}$	$I_{(3)}$	$I_{(5)}$	$I_{(7)}$	$I_{(133)}$	$I_{(135)}$
1.85 e-4	3.620	0.290	0.079	0.059	0.074	0.058
0.0051%	100%	8.01%	2.18%	1.6%	2%	1.6%

$I_{(i)}$: c'est la $i^{\text{ème}}$ harmonique du courant de charge.

I_{dc} : c'est la composante continue du courant de charge c'est-à-dire l'harmonique d'ordre 0.

Avec le bloc discrétisation, on détermine le spectre du courant dans la charge, représenté par la figure 4.32. D'après ces spectres, on détermine les amplitudes des harmoniques secondaires les plus importantes du courant dans la charge indiquée dans le tableau 4.3, en précisant à chacune le pourcentage correspondant par rapport à l'harmonique fondamentale.

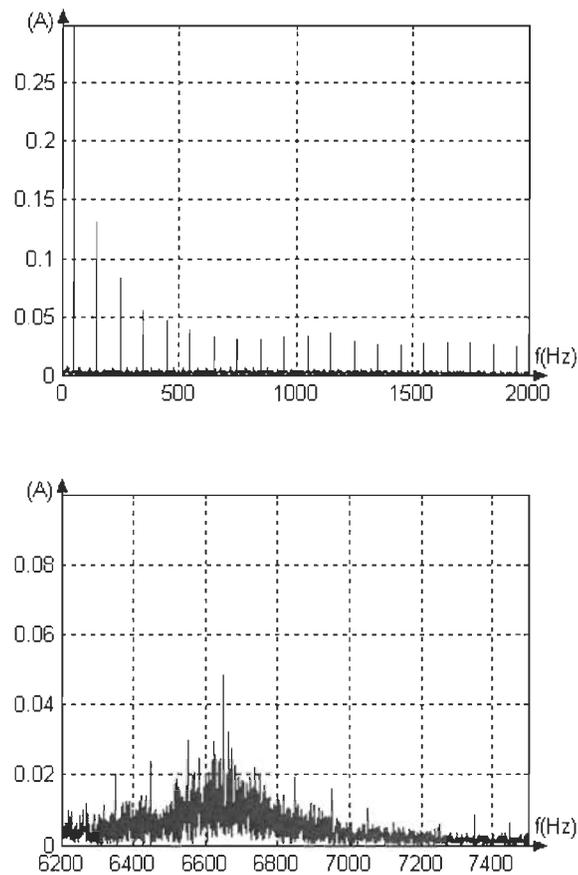


Figure 4. 32 Spectre du courant de charge avec discrétisation

Tableau 4. 3 Harmoniques les plus grands du courant de charge avec discrétisation

I_{dc}	$I_{(1)}$	$I_{(3)}$	$I_{(5)}$	$I_{(7)}$	$I_{(13)}$
2.21e-3	3.610	0.131	0.082	0.054	0.048
0.061%	100%	3.62%	2.27%	1.49%	1.32%

Ces deux tableaux montrent les harmoniques les plus importants pour un échantillon particulier. D'après le premier tableau (sans bloc de discrétisation), les amplitudes des harmoniques secondaires du courant de charge ne dépassent pas 8.01% de l'amplitude de l'harmonique fondamentale. Par contre d'après le deuxième tableau (avec bloc de discrétisation), les amplitudes des harmoniques secondaires du courant de charge ne dépassent pas 3.62% de l'amplitude de l'harmonique fondamentale. Ceci met l'accent sur l'importance de la présence du bloc de discrétisation dans le système.

4.7.2 Effet de la largeur de la bande de l'hystérésis

Une autre étude spectrale est faite sur le courant à la sortie de l'onduleur pour déterminer l'effet de la largeur de la bande de l'hystérésis pour les basses et les hautes fréquences. Cette étude spectrale est effectuée avec les paramètres suivants :

- Une amplitude du courant de référence filtrée ;
- Une valeur moyenne de la tension d'alimentation de l'onduleur de 50V ;
- Une inductance de charge de valeur 2mH ;
- Un déphasage du courant injecté au réseau par rapport à la tension aux bornes du réseau nul.

Pour déterminer l'effet de la largeur de la bande d'hystérésis, nous présentons différentes figures pour le spectre du courant injecté au réseau avec des valeurs du pas de l'hystérésis de ± 0.15 , ± 0.2 et ± 0.3 afin de comparer les spectres vus sur ces différentes figures.

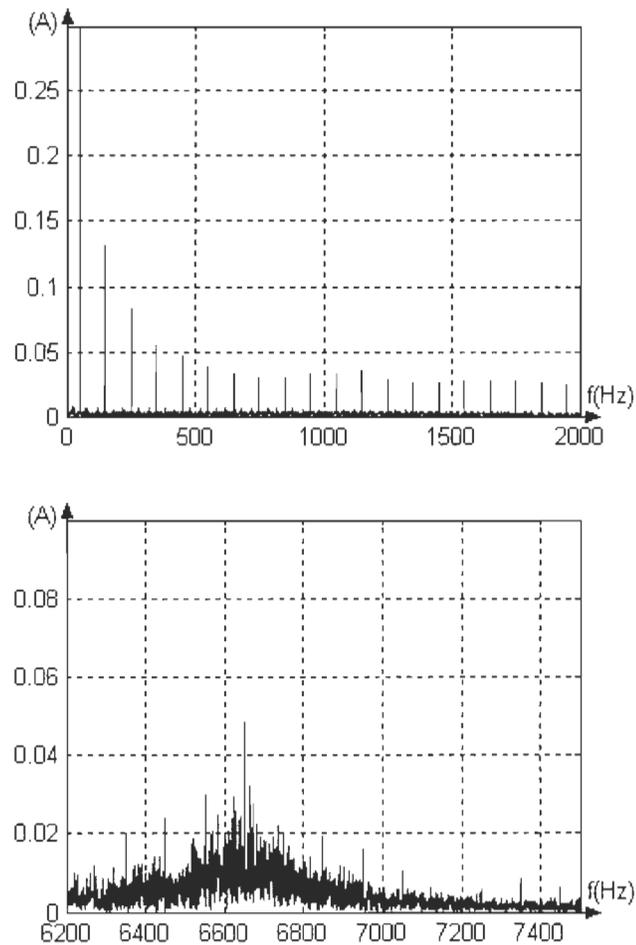


Figure 4. 33 Spectre du courant de charge avec un pas d'hystérésis de ± 0.15

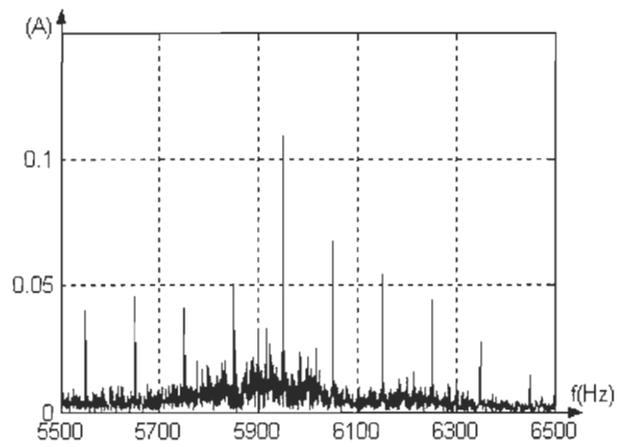
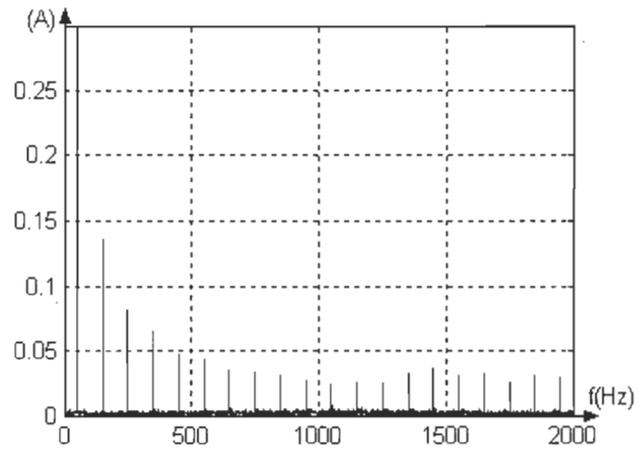
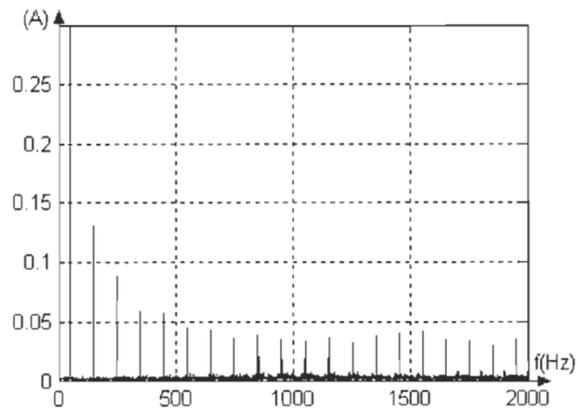


Figure 4. 34 Spectre du courant de charge avec un pas d'hystérésis de ± 0.2



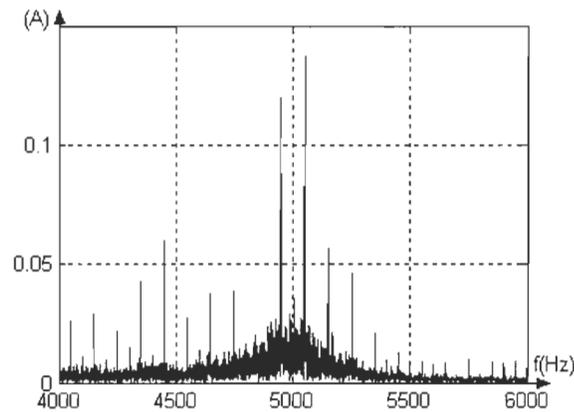


Figure 4.35 Spectre du courant de charge avec un pas d'hystérésis de ± 0.3

D'après ces différentes figures, nous remarquons qu'une augmentation de la largeur de la bande de l'hystérésis n'influe pas trop sur les harmoniques secondaires, mais elle influe sur les fréquences de commutation. En effet, une augmentation de largeur de cette bande diminuera les fréquences de commutation des composants semi-conducteurs.

4.7.3 Effet de l'inductance de charge (Lch)

Une troisième étude spectrale est faite sur le courant injecté dans le réseau afin de déterminer l'effet de l'inductance de charge (Lch) pour les basses et les hautes fréquences. Cette étude spectrale est effectuée avec les paramètres suivants :

- Une amplitude du courant de référence filtrée ;
- Une valeur du pas de l'hystérésis de ± 0.15 ;
- Une valeur moyenne de la tension d'alimentation de l'onduleur de 50V ;
- Un déphasage du courant injecté au réseau par rapport à la tension aux bornes du réseau nul.

D'après les résultats de simulation, nous avons remarqué qu'une variation de l'inductance de charge peut modifier la forme du courant de charge. Pour déterminer l'effet de cette inductance de charge, nous présentons différentes figures pour le spectre du courant dans la charge avec des valeurs de l'inductance de charge de 1mH, 2mH et 4mH.

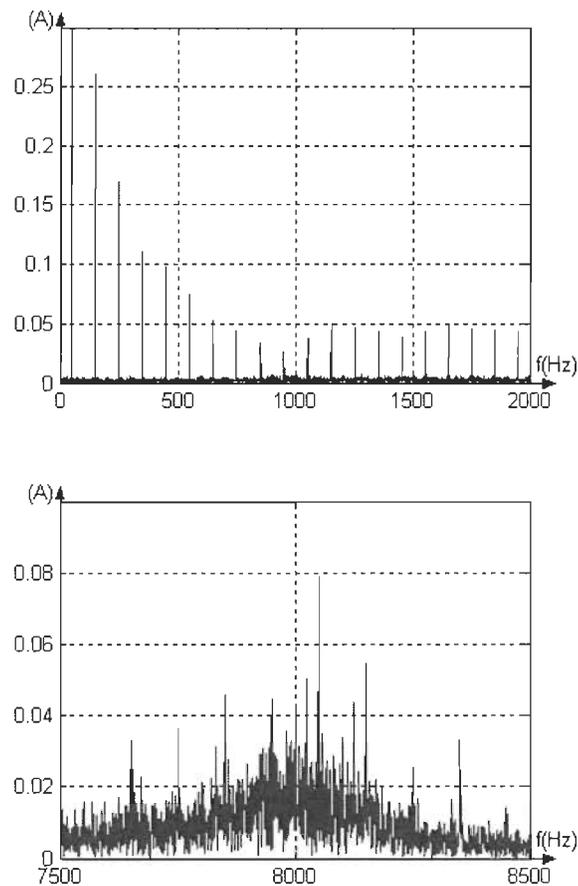


Figure 4. 36 Spectre du courant de charge pour $L_{ch} = 1\text{mH}$

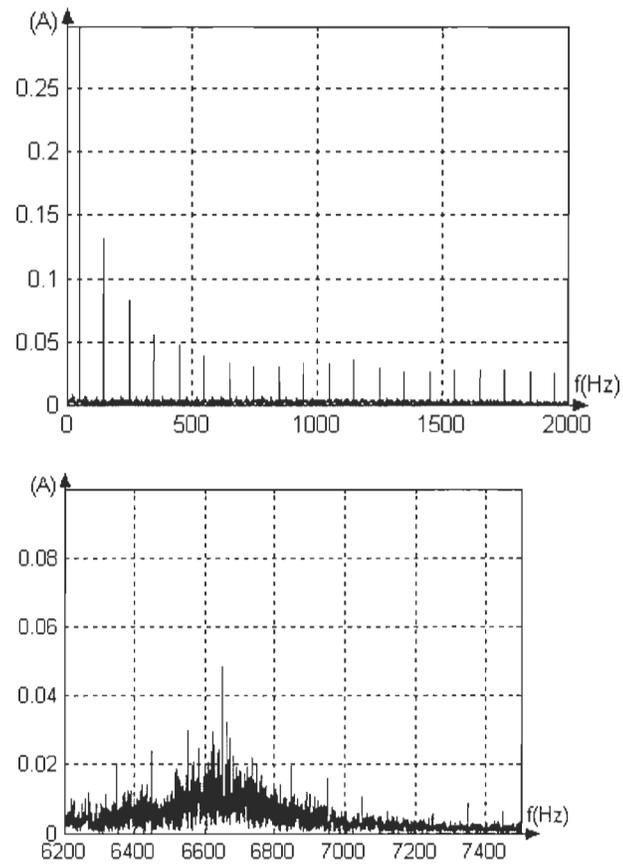
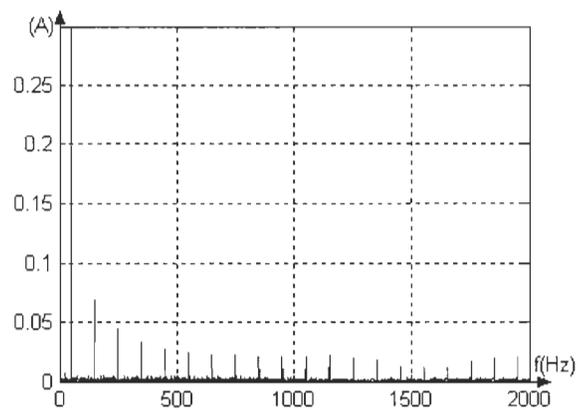


Figure 4. 37 Spectre du courant de charge pour $L_{ch} = 2\text{mH}$



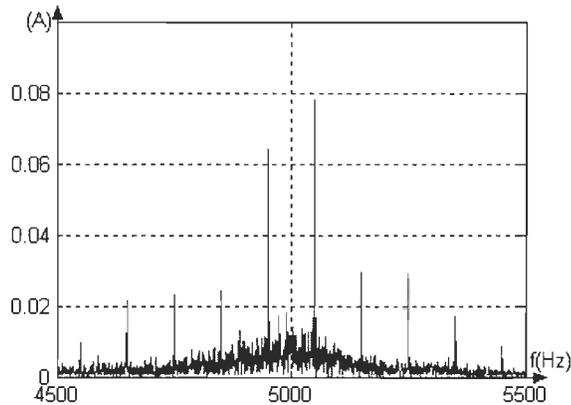


Figure 4.38 Spectre du courant de charge pour $L_{ch} = 4\text{mH}$

D'après ces différentes figures, nous remarquons qu'une augmentation de la valeur de l'inductance en série avec le primaire du transformateur (dont le secondaire est connecté au réseau) réduira les amplitudes des harmoniques secondaires, ce qui implique la diminution des pertes d'ondulation. Ainsi qu'elle réduira les fréquences de commutation, ce qui fait diminuer les pertes par commutation dans les composants de puissance de l'onduleur. Mais, d'autre part, elle augmentera les pertes par conduction. Aussi une augmentation de l'inductance permet d'augmenter son poids et son coût.

4.7.4 Effet du facteur de puissance ($\cos(\varphi)$)

Dans le système photovoltaïque proposé, une variation du déphasage entre le courant et la tension de sortie fait varier l'amplitude du fondamental du courant de charge, puisque la puissance délivrée par le panneau est une puissance active.

Une étude spectrale est faite sur le courant à la sortie de l'onduleur afin de déterminer l'effet du facteur de puissance pour les basses et les hautes fréquences. Cette étude spectrale est effectuée avec les paramètres suivants :

- Une amplitude du courant de référence filtrée ;

- Une valeur du pas de l'hystérésis de ± 0.15 ;
- Une valeur moyenne de la tension d'alimentation de l'onduleur de 50V ;
- Une inductance de charge de valeur 2mH.

Pour déterminer l'effet du facteur de puissance, nous présentons différentes figures pour le spectre du courant dans la charge avec des valeurs de déphasage entre le courant de charge et la tension aux bornes du réseau de : 0 degré, 30 degrés, 60 degrés afin de comparer les spectres vus sur ces différentes figures.

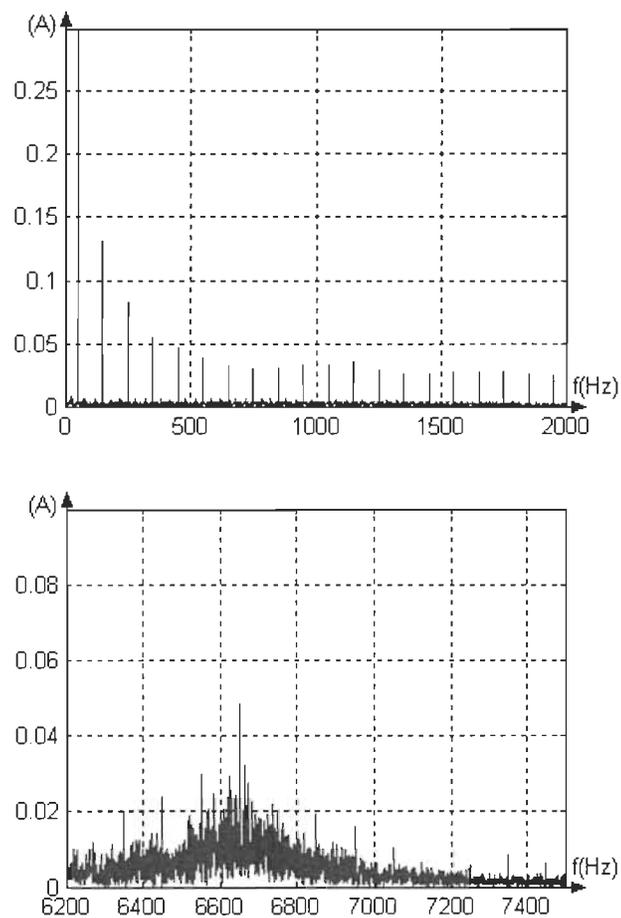


Figure 4. 39 Spectre du courant de charge avec un déphasage de 0 degré

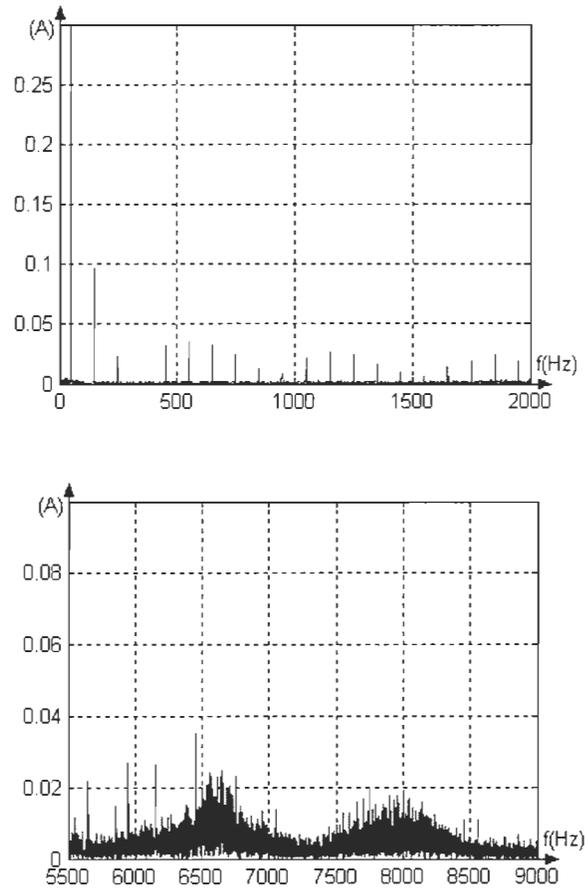


Figure 4. 40 Spectre du courant de charge avec un déphasage de 30 degrés

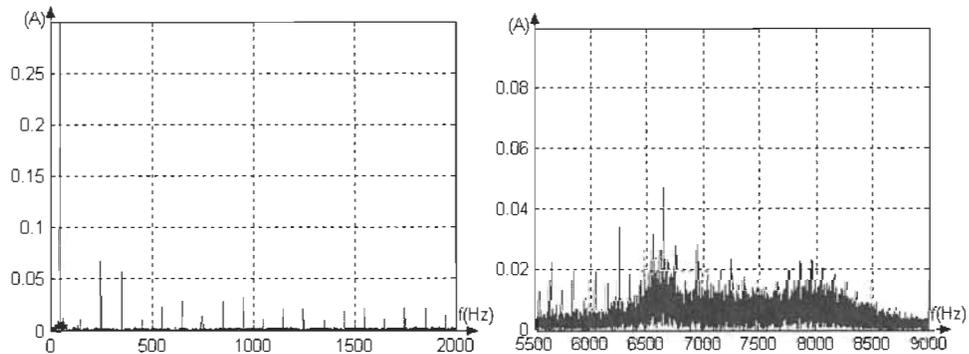


Figure 4. 41 Spectre du courant de charge avec un déphasage de 60 degrés

D'après ces différentes figures, une augmentation du déphasage du courant de charge par rapport à la tension du réseau n'influe pas trop sur les harmoniques secondaires de

même pour les fréquences de commutation, mais elle augmentera l'amplitude de l'harmonique fondamentale, ce qui diminuera les pourcentages des harmoniques secondaires. Ceci justifie la conservation de la puissance active, puisque la puissance délivrée par le panneau est une puissance active.

Exemple ; on a : $P_{active} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{2} \cdot \cos(\varphi)$: la puissance active renvoyée vers le

réseau électrique. Il faut noter ici que les composantes sont les suivantes :

- V_{max} : l'amplitude de la tension aux bornes du réseau.
- I_{max} : l'amplitude du courant injecté dans le réseau électrique.
- $\cos(\varphi)$: facteur de puissance.

Pour un déphasage nul, une amplitude du fondamental du courant dans la charge est $I(1) = 3.62A$. On a : $P_{active} = 30 \cdot 3.62 / 2 = 54.3 W$.

Pour un déphasage de 30 degrés, une amplitude du fondamental du courant dans la charge est $I(1) = 4.35A$. On a : $P_{active} = 30 \cdot 4.35 \cdot \cos(\pi/6) / 2 = 54.16W$.

4.7.5 Effet de l'amplitude de la tension d'alimentation de l'onduleur

D'après le système photovoltaïque proposé, la tension d'alimentation de l'onduleur doit être supérieure à la valeur maximale de la tension AC de la charge.

Une étude spectrale du courant dans la charge a été faite afin de déterminer l'effet de l'amplitude de la tension d'alimentation de l'onduleur sur les basses et les hautes fréquences. Cette étude spectrale est faite avec les paramètres suivants :

- Une amplitude du courant de référence filtrée ;

- Une valeur du pas de l'hystérésis de ± 0.15 ;
- Une inductance de charge de valeur 2mH ;
- Un déphasage du courant dans la charge par rapport à la tension aux bornes du réseau nul.

Pour déterminer l'effet de la tension d'alimentation de l'onduleur, nous présentons différentes figures pour le spectre du courant dans la charge avec des valeurs de l'amplitude de cette tension de 50V et 70V, afin de comparer les spectres vus sur ces différentes figures.

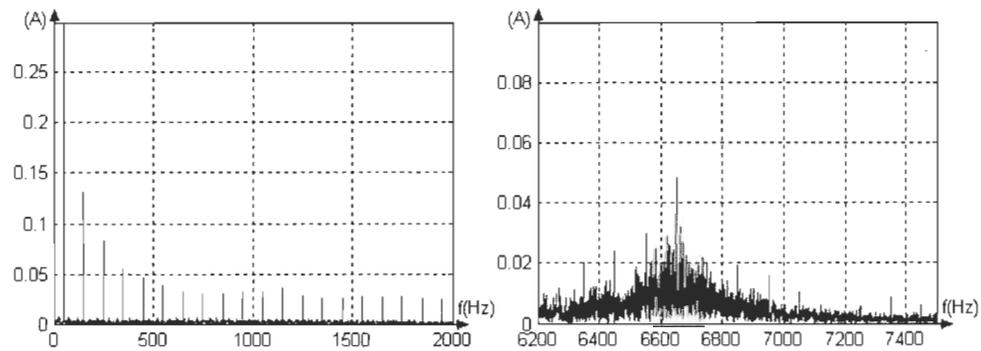


Figure 4. 42 Spectre du courant de charge avec une tension d'alimentation de l'onduleur de l'ordre 50V

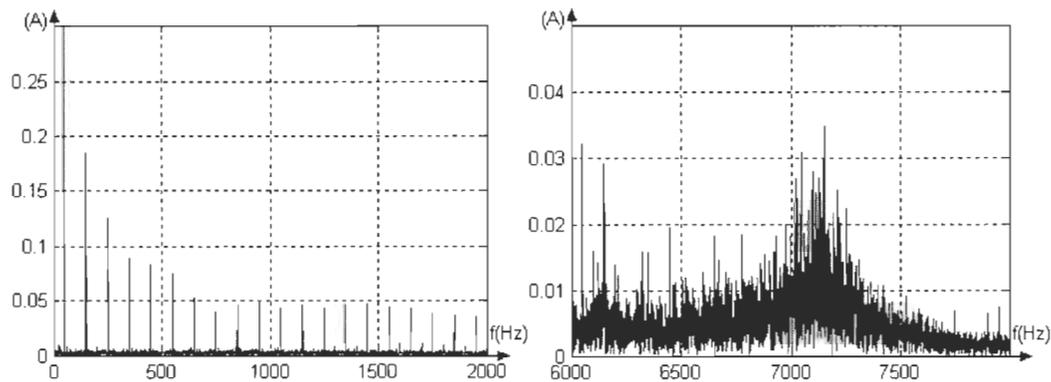


Figure 4. 43 Spectre du courant de charge avec une tension d'alimentation de l'onduleur de l'ordre 70V

Les résultats d'études spectrales montrent que les amplitudes des harmoniques secondaires augmentent avec la valeur moyenne de la tension d'alimentation, et que cette tension n'intervient pas trop pour les fréquences de commutation.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la conception d'un système photovoltaïque permettant à partir d'un site de panneaux solaires, d'alimenter un réseau électrique alternatif basse tension. La configuration choisie consiste à générer un réseau de tension continue intermédiaire. La première partie du système conçu consiste donc à tirer le maximum de puissance depuis les panneaux solaires en utilisant la technique MPPT. Le convertisseur utilisé est un hacheur élévateur de tension à base d'une cellule de commutation. La commande de ce convertisseur s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur. Vu entre les deux points de sortie, le hacheur se comporte comme une source de tension continue. La deuxième partie du système photovoltaïque consiste à utiliser la tension continue à la sortie du hacheur pour transférer l'énergie électrique vers un réseau électrique alternatif. Cette procédure a été effectuée par l'utilisation d'un onduleur de tension monophasé.

Un système de régulation a été prévu pour contrôler la constance de l'amplitude de la tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur. Ce contrôle est rendu possible en agissant sur l'amplitude du courant de sortie du convertisseur. La technique de l'hystérésis a été utilisée pour imposer l'onde du courant de sortie de l'onduleur. Cette technique consiste à mettre le signal de sortie dans une fourchette de courant autour du signal de référence imposé par le régulateur.

Le système complet a été implémenté dans le simulateur Matlab. Les effets des différents paramètres du système, sur la qualité des grandeurs électriques, ont été étudiés. Des analyses spectrales des signaux de sortie ont permis de choisir les valeurs optimales de ces paramètres.

Le système photovoltaïque conçu permet de fournir aussi bien de la puissance active que réactive au réseau électrique. La variation du $\cos(\varphi)$ s'effectue par la modification d'une consigne correspondante au déphasage entre le courant de sortie et la tension aux bornes du réseau alternatif.

Chapitre 5 - Réalisation d'un chargeur de batterie à partir du panneau solaire

5.1 Introduction

Après avoir optimisé les paramètres du système photovoltaïque, une réalisation pratique du système complet pour le chargement de la batterie a été effectuée. Ce système représente la première partie de la conversion du système globale pour connecter des panneaux solaires sur le réseau électrique.

Le chargeur solaire 24 Volts à haut rendement, il est utilisé dans différents milieux. Pour alimenter les batteries des systèmes de communications, d'un système de pompage, de même pour charger tout un réseau de batteries pour alimenter un campement, pour créer votre propre installation énergétique indépendante. De nos jours il y a d'autres applications avec ces panneaux solaires.

1. Fixer les panneaux solaires sur la façade ou sur le toit, du côté sud le plus exposé au soleil.
2. Raccorder les fils du panneau solaire sur le régulateur de charge (Respecter la polarité + et -).
3. Relier ensuite les bornes de la batterie 24 Volts, avec le fil au régulateur de charge (Respecter la polarité + et -). Pour alimenter directement les appareils 24 Volts à partir de la batterie.

4. Selon nos besoins, on peut raccorder la batterie 24 Volts, à un onduleur 110 Volts pour alimenter directement nos appareils électriques du campement, ou de la maison.

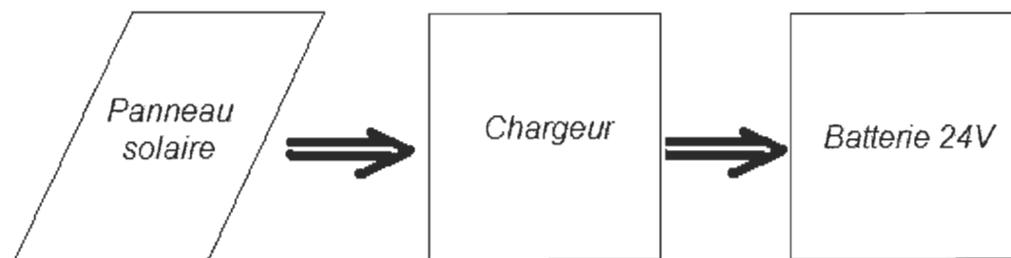


Figure 5.1 Bloc de puissance

5.2 Panneau solaire choisi

5.2.1 Caractéristiques du panneau solaire

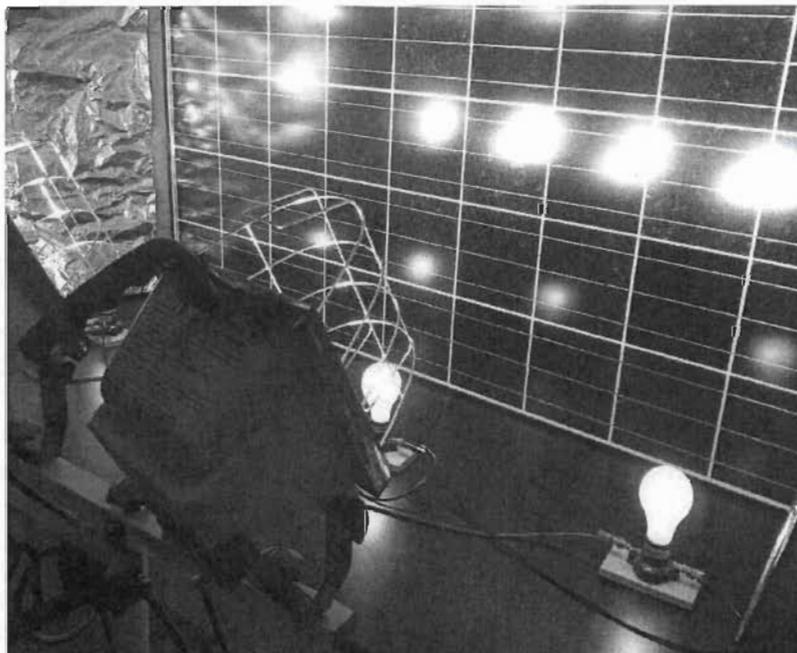


Figure 5.2 Panneau solaire Kyocera modèle KD135GX-LPU

Durant la partie réalisation, le panneau était éclairé avec 4 lampes et 4 projecteurs halogènes afin de fournir une puissance optimum de l'ordre de 21W. Le 2012-02-03, des mesures étaient prises avec ce même panneau sous le soleil nous donnent une puissance optimum de l'ordre de 100W.

Tableau 5. 1 Paramètres du panneau solaire

Irradiation et température de la cellule	1000w.m ⁻² AM 1.5 25°C	800w.m ⁻² AM 1.5 45°C
Pmax	135W	97W
Vpmax	17.7V	16V
Ipmax	7.63A	6.1A
Voc	22.1V	--
Isc	8.37A	--
Tension maximale du système	600V	
Masse	12.5Kg	
Fusible en série	15A	
Prix	360 CAD	

5.2.2 Caractéristiques électriques

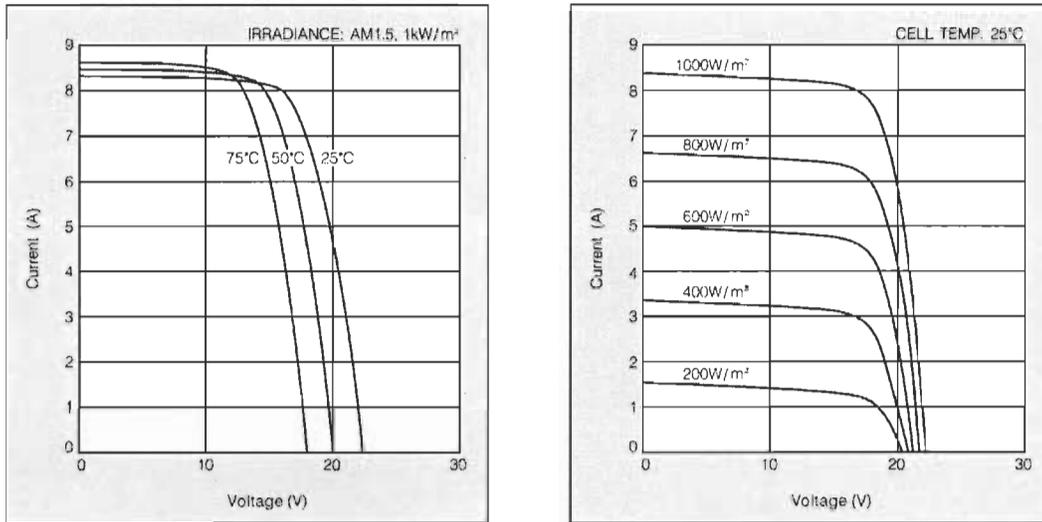


Figure 5.3 Caractéristique courant-tension du module KD135GX-LPU en fonction de la température et d'irradiation

5.3 Batterie

La batterie choisie est une batterie en Plomb-acide, le couple $\{PbO_2/Pb\}$ présente une force électromotrice qui détermine l'une des caractéristiques de la batterie.

Le terme accumulateur est employé pour un élément rechargeable, le terme pile est employé pour un élément non rechargeable. Un accumulateur est donc un générateur réversible : il peut stocker de l'énergie, en convertissant l'énergie électrique en forme chimique, puis la restituer à tout moment sur demande.

Un accumulateur au plomb de tension nominale d'environ 2 Volts est rarement utilisé seul. En général, une mise en série et/ou en parallèle est effectuée pour obtenir les tensions et capacités d'utilisation désirées, ce qui constitue une batterie d'accumulateurs. Par exemple, notre batterie est de 24V ce qui signifie qu'elle comprend 12 accumulateurs.

5.4 Convertisseur de puissance

5.4.1 Choix du convertisseur DC/DC

Le circuit de puissance proposé pour le transfert d'énergie solaire vers la batterie 24 volts est un hacheur élévateur à stockage inductif. Lorsque l'interrupteur T (voir figure 5.4) est fermé, l'inductance L stocke de l'énergie et la charge est déconnectée de la source. Lorsque l'interrupteur T est ouvert, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée vers la batterie. Cette topologie garantit un courant continu à travers le panneau et propose une solution avec une tension de sortie (tension de la batterie) plus grande que la tension d'entrée (tension délivrée par le panneau).

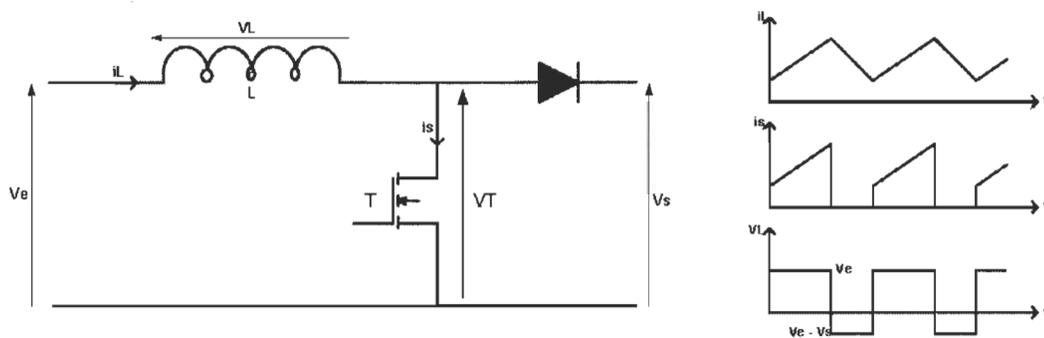


Figure 5. 4 Hacheur élévateur permettant le chargement de la batterie

Ce convertisseur de puissance a pour fonction de transférer l'énergie vers la batterie en donnant à cette énergie la forme adéquate au moment nécessaire. La topologie du circuit du convertisseur doit être compatible avec celle de la batterie afin de réaliser le transfert du maximum de la puissance à partir du panneau solaire. Le choix de la nature du convertisseur est fortement lié à la valeur de la tension d'entrée de la batterie ainsi qu'à la nature de la connexion (en parallèle ou en série) entre les panneaux solaires. Dans

notre cas, le fonctionnement optimal des panneaux permet d'avoir une tension à l'entrée du convertisseur.

5.4.2 Hacheur à base d'un module IRAMY20UP60B

L'IRAMY20UP60B est un module d'IGBT intégré (boîtier de type SiP3) ayant une tenue en courant de 20A et une tenue en tension de 600V. Il est particulièrement adapté pour différentes applications industrielles et particulièrement pour les applications d'entraînements des moteurs d'appareils telles que les dispositifs de climatisation et les compresseurs.

C'est un module compact (utilisant un minimum d'espace) et très performant qui simplifie la conception de hacheurs, car il intègre tous les circuits d'isolation nécessaires à la commande des interrupteurs IGBT.

5.5 Commande

5.5.1 Acquisition des données

Une carte d'acquisition a été réalisée en vue d'effectuer l'acquisition des grandeurs électriques nécessaires à la commande du système photovoltaïque. Après mise en forme de ces signaux, ces derniers attaqueront les entrées analogiques du DSPIC.

Nous rappelons que les signaux analogiques nécessaires à la fonction du programme implémenté dans le DSPIC sont les suivants :

- L'image de la tension aux bornes des panneaux solaires ;
- L'image du courant dans les panneaux.

Il faut noter que tous ces signaux doivent être ramenés à des tensions analogiques comprises entre 0V et 3.3V pour qu'ils soient lus par le DSPIC.

Les signaux analogiques nécessaires à la fonction du programme implémenté dans le DSPIC sont oscillatoires, ce qui nous donne une variation aléatoire de notre système. Pour avoir la bonne commande pour le chargeur, on a appliqué des filtres actifs passe-bas afin d'éliminer les oscillations sur les signaux.

Un capteur de courant était placé en série avec le panneau permet de nous donner une tension image du courant dans le panneau (0.2V/A). Le filtre présenté à la figure 4.6 permet de filtrer la tension image du courant du panneau solaire afin d'éliminer les oscillations et de la rendre en même temps comprise entre 0 Volt et 3.3 Volts.

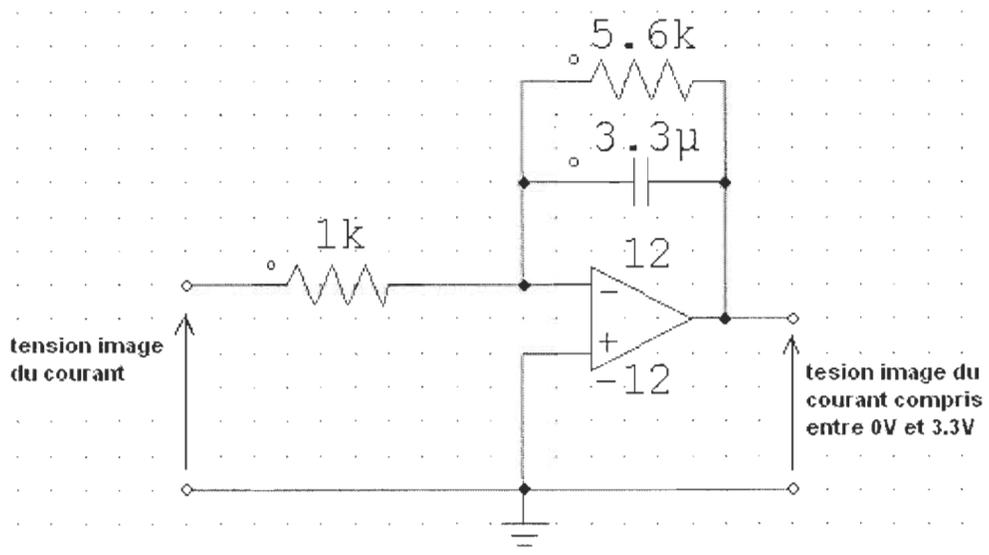


Figure 5.5 Filtre passe bas actif permettant de filtrer les oscillations apportées par le courant du panneau

Deux diodes ZENER 3.3 volts étant ajoutées au niveau de chaque port d'entrée du DSPIC pour protéger ce dernier contre les surtensions.

5.5.2 Choix du dsPIC

Le DSPIC choisi, pour notre application, est le dsPIC du MICROSHIP, présenté à la figure 5.6. Nous pouvons affirmer qu'aujourd'hui ces circuits sont devenus des véritables références dans le monde des microcontrôleurs grâce à leur coût particulièrement bas, leurs performances remarquables, leur jeu d'instruction réduit, plus connu sous l'acronyme RISC (Reduced Instruction Set Computer) pour assurer la rapidité et la facilité en décodage, et leur architecture interne de type HARVARD.

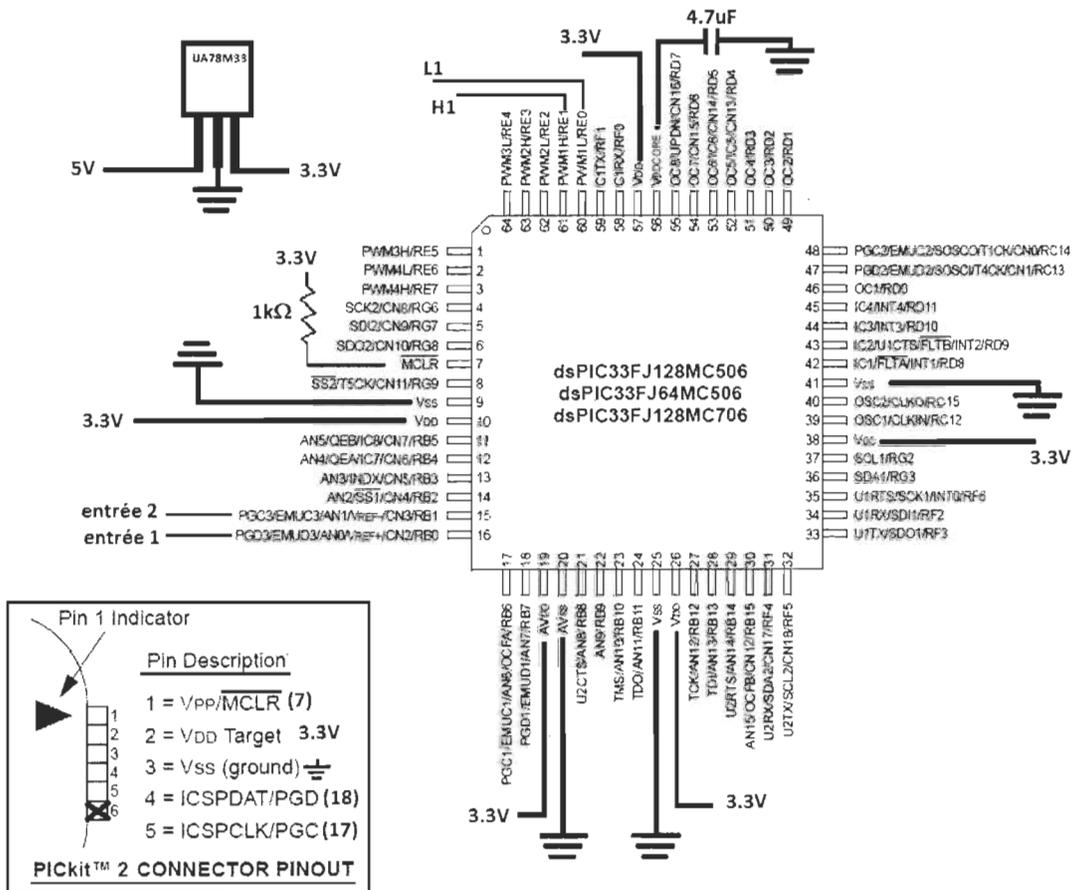


Figure 5.6 dsPIC33FJ128MC706

Tableau 5. 2 Paramètres du dsPIC33FJ128MC706

Device	Pins	Program Flash Memory (Kbyte)	RAM (Kbyte) ⁽¹⁾	Timer 16-bit	Input Capture	Output Compare Std. PWM	Motor Control PWM	Quadrature Encoder Interface	Codec Interface	ADC	UART	SPI	I ² C™	Enhanced CAN I/O Pins (Max) ⁽²⁾	Packages	
dsPIC33FJ128MC706	64	128	16	9	8	8	8 ch	1	0	2 ADC, 16 ch	2	2	2	1	53	PT

5.6 Programmation du dsPIC33FJ128MC706

Pour la simulation et la programmation du système, les outils suivants ont été utilisés: MPLAB, PICKit2 et C30.

Le MPLAB est un éditeur, compilateur assembleur et simulateur, il permet d'écrire le programme, le transformer du code assembleur en une suite de nombre compréhensible par le microcontrôleur et permet aussi de simuler son état. Nous avons utilisé le compilateur C30 pour transformer le code C en code assembleur, il est compatible avec MPLAB.

Le PICKit2 est un programmeur USB. Il possède beaucoup plus de possibilités et est un outil de développement. Il sépare la partie programmation de la partie débogage sur la carte d'évaluation. Ceci élimine le besoin d'insérer le microcontrôleur à programmer dans une carte de démonstration à chaque fois. Le PICKit2 utilise à l'intérieur un PIC18F2550 qui possède un bus USB FullSpeed. Le dernier firmware du PICKit2 permet à l'utilisateur de programmer et de déboguer la plupart des PIC et des dsPIC 8 et 16 bits du Microchip.



Figure 5. 7 PICkit2 avec câble USB

Après avoir capté les images des signaux de la tension aux bornes du panneau photovoltaïque et du courant dans ce panneau, on calcule la puissance après chaque pas de variation et voir on même temps la variation de la puissance et de la tension du panneau pour savoir dans quel sens varie la puissance, afin de la pousser vers le point de fonctionnement optimum suite à une variation du rapport cyclique.

La figure 5.8 représente la puissance fournie par le panneau en régime transitoire, on remarque qu'une convergence vers le point optimum est obtenue en 8 secondes.

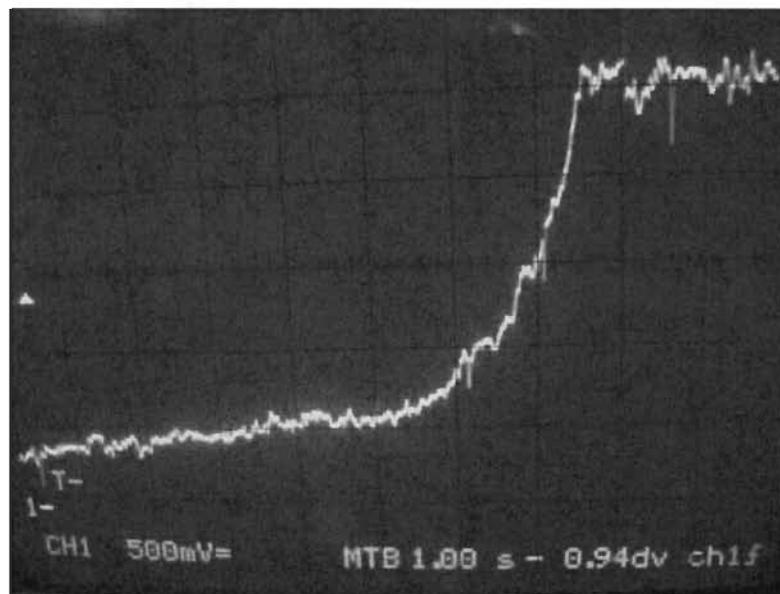


Figure 5. 8 Puissance du panneau en régime transitoire

Le temps que prend la commande pour converger au point de puissance maximale est d'environ 8 s, ce qui représente une durée relativement élevée. Cette limitation est bien sûr due au pas de variation qui est faible pour éviter les problèmes d'oscillation une fois l'atteinte du point maximale ($\Delta RC=5$ voir annexe A). Après rectification apportée sur l'algorithme en y implantant un pas variable qui diminue au fur et à mesure qu'on s'approche du point de puissance maximale ceci permettra d'une part d'accélérer la réponse du système et d'autre part de réduire les oscillations en régime permanent.

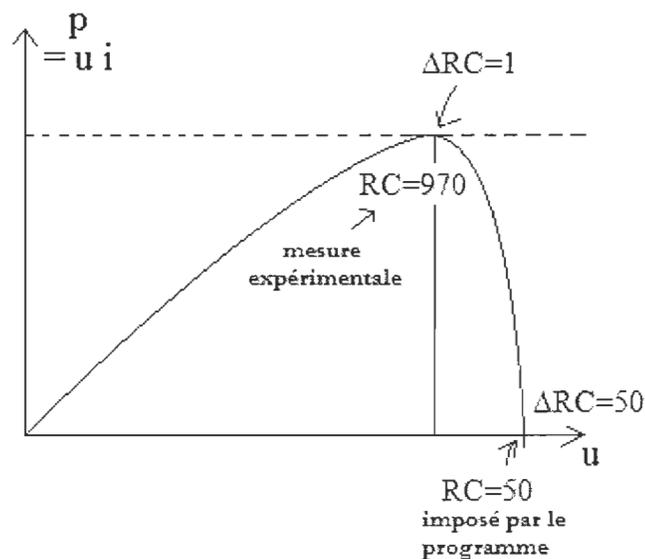


Figure 5.9 Puissance du panneau avant rectification du programme MPPT

Pour rectifier l'algorithme pour la recherche du point de fonctionnement optimum, à l'aide des valeurs citées sur la figure précédente, on fait varier le pas de variation du rapport cyclique ΔRC selon la caractéristique suivante.

$$\Delta RC = -0.05326 * RC + 52.66$$

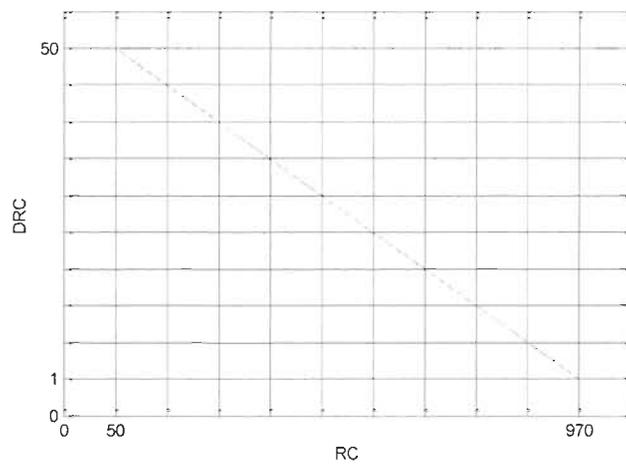


Figure 5.10 Variation du rapport cyclique après rectification

Après rectification apportée sur l'algorithme, une convergence vers le point de fonctionnement optimum est obtenue dans 1.5 seconde.

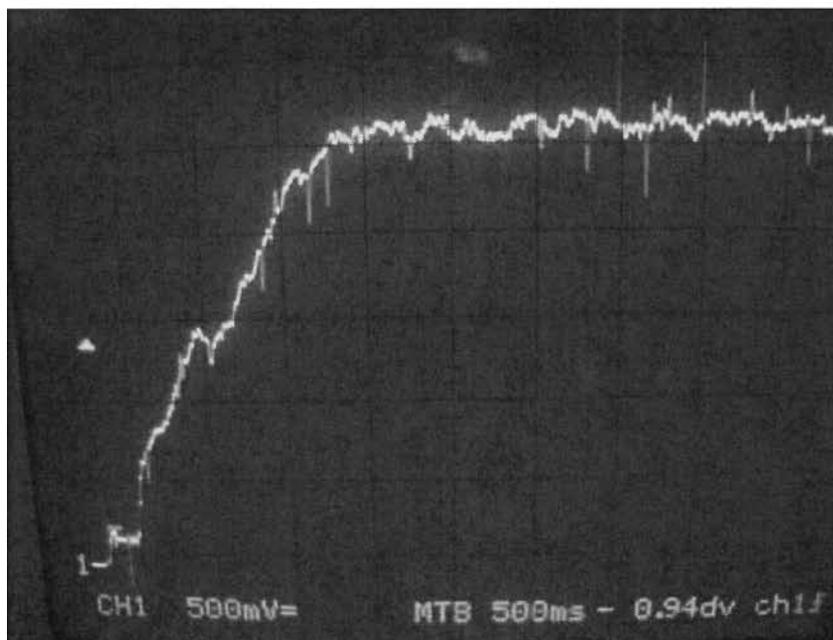


Figure 5.11 Puissance du panneau après rectification du programme

5.7 Système photovoltaïque réalisé

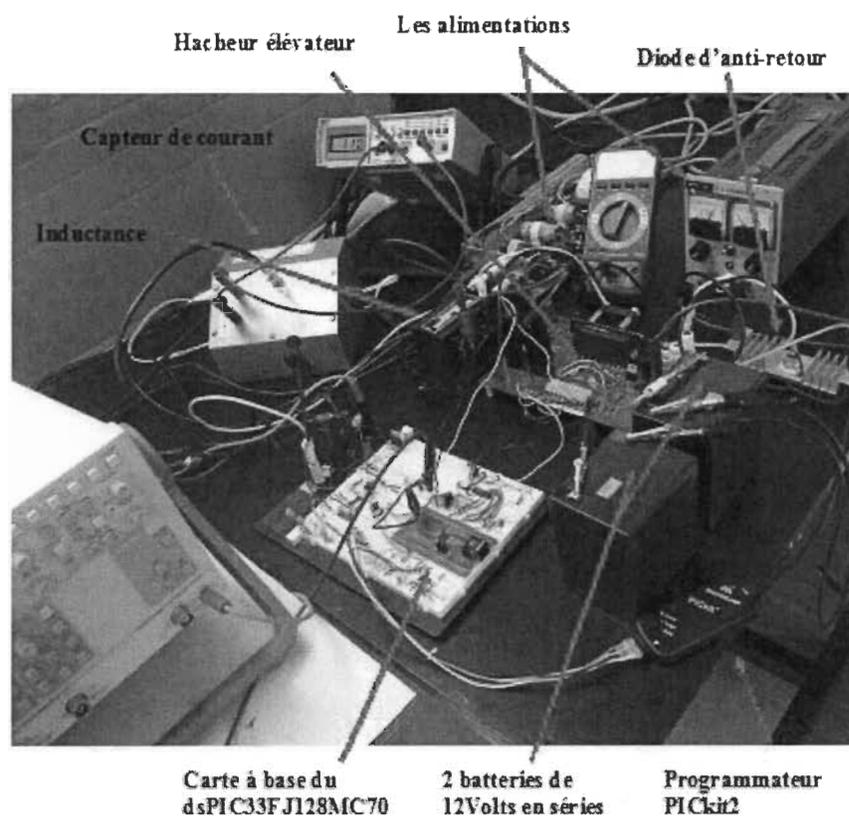


Figure 5. 12 Système photovoltaïque réalisé

La carte à base du dsPIC contient :

Deux diviseurs de tension l'un est appliqué sur la tension du panneau et l'autre sur la tension image du courant du panneau.

Des filtres actifs passe-bas permettant le filtrage du courant et de la tension du panneau solaire.

Un convertisseur numérique analogique pour convertir le signal de sortie (rapport cyclique) en un signal analogique.

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la partie expérimentale d'un système photovoltaïque permettant à partir d'un site de panneaux solaires, d'alimenter une batterie 24 volts et plus. Le convertisseur utilisé est un hacheur élévateur de tension à base d'une cellule de commutation. La commande de ce convertisseur s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur à commander. La technique de commande permet la recherche du point de fonctionnement optimum, qu'on l'a implémenté dans un dsPIC.

Chapitre 6 - Conclusion

Ce mémoire développe l'interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique. Une réalisation expérimentale est faite, permettant le chargement des batteries à partir des panneaux solaires photovoltaïques.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la spécification de l'énergie solaire par rapport à l'énergie renouvelable et la production mondiale d'énergie primaire. Ensuite, nous avons montré le principe de fonctionnement et les différentes technologies des cellules photovoltaïques. Le modèle simplifié des panneaux solaires ainsi que l'algorithme général de la recherche du point de fonctionnement optimum (MPPT) ont été développés.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude des différentes configurations des convertisseurs statiques utilisées dans les installations photovoltaïques couplées à un réseau continu ou alternatif. L'objectif de cette étude étant de fournir les éléments de base à considérer par le concepteur de ces installations. Pour cela, nous avons présenté les différentes connexions possibles avec un module PV et l'effet d'une connexion directe avec un module PV. Aussi nous avons présenté l'intérêt des convertisseurs photovoltaïques dans un système PV pour la connexion avec le réseau DC ou avec le réseau AC et les avantages de ces convertisseurs photovoltaïques.

Dans le quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à la conception d'un système photovoltaïque permettant, à partir d'un site de panneaux solaires, d'alimenter un réseau électrique alternatif basse tension. La configuration choisie consiste à passer par un réseau de tension continue intermédiaire. La première partie du système conçu consiste donc à tirer le maximum de puissance depuis les panneaux solaires en utilisant la technique MPPT. Le convertisseur utilisé est un hacheur élévateur de tension à base d'une cellule de commutation. La commande de ce convertisseur s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur. Vu entre les deux points de sortie, le hacheur se comporte comme une source de tension continue. La deuxième partie du système photovoltaïque consiste à utiliser la tension continue à la sortie du hacheur pour transférer l'énergie électrique vers un réseau électrique alternatif. Cette procédure a été effectuée par l'utilisation d'un onduleur de tension monophasé.

Un système de régulation a été prévu pour contrôler l'amplitude de la tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur. Ce contrôle est rendu possible en agissant sur l'amplitude du courant de sortie du convertisseur. La technique de l'hystérésis a été utilisée pour imposer l'onde du courant de sortie de l'onduleur. Cette technique consiste à mettre le signal de sortie dans une fourchette de courant autour du signal de référence imposé par le régulateur.

Le système photovoltaïque conçu permet de fournir aussi bien de la puissance active que réactive au réseau électrique. La variation du $\cos(\varphi)$ s'effectue par la modification d'une consigne correspondante au déphasage entre le courant de sortie et la tension aux bornes du réseau alternatif.

Dans la dernière partie du mémoire, nous avons conçu et réalisé un système photovoltaïque permettant le chargement des batteries 24 volts et plus, à partir d'un site des panneaux solaires. Pour cela, nous avons appliqué la technique de commande MPPT.

Le convertisseur utilisé est un hacheur élévateur de tension à base d'une cellule de commutation. Le circuit de commande à base d'un dsPIC permet de fournir un rapport cyclique variable afin de pousser le point de fonctionnement du système vers le point de fonctionnement optimum. Une convergence rapide du système vers le point de fonctionnement optimum était effectuée en quelques secondes.

Bibliographie

- [1] Manuel des professionnels en finance et développement, "Chapitre 1-Introduction aux technologies d'Énergie Durables", E&Co, UNEP, AREED 2001, pp 83-95.
- [2] Installing Photovoltaic Systems, "A Question and Answer Guide for Solar Electric Systems", Florida Solar Energy Center, May 1999.
- [3] T.Shimizu, M. Hirakata et T. Kamezawa, "Generation control circuit for photovoltaic modules", IEEE Trans.on Power Electronics, vol. 16 (2001), no. 3, p. 293
- [4] Björn Lindgren, "A 110 W Inverter for Photovoltaic Applications", submitted to IEEE transactions on Energy Conversion, Energy Development and Power Generation Committee, pp 31-35, 2001.
- [5] Informations générales sur le photovoltaïque, "Informations Techniques", pp 73-107 Décembre 2000.
- [6] T. Hiyama, S. Kouzuma, T. Imakubo, T. H. Ortmeyer, "Evaluation of neural network based real time maximum power tracking controller for PV system", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 10, pp. 543-548, Sept. 1995.
- [7] R. Leyva, I. Queinnec, C. Alonso, A. Cid-Pastor, D. Lagrange and L. Martinez-Salamero, "MPPT of photovoltaic systems using extremum seeking control", IEEE

- Transactions On Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 249-258, Jan. 2006.
- [8] H. Koizumi, K. Kurokawa, "Plane division maximum power point tracking method for PV module integrated converter", Industrial Electronics 2006, IEEE International Symposium On, Vol. 2, pp. 1265-1270, Jul. 2006.
- [9] C. Cabal, C. Alonso, A. Cid-Pastor, L. Seguier, G. Schweitz and J. Alzieu, "Adaptive digital MPPT control for photovoltaic applications", Industrial Electronics, 2007, ISIE07, International Symposium On. pp. 2414-2419, Jun. 2007.
- [10] J. U. Duncombe, « Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility (Periodical style) », IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-11, pp. 34–39, Jan. 1959.
- [11] S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, « A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks », IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, pp. 570–578, July 1993.
- [12] R. W. Lucky, « Automatic equalization for digital communication », Bell Syst. Tech. J., vol. 44, no 4, pp. 547–588, Apr. 1965.
- [13] S. P. Bingulac, « On the compatibility of adaptive controllers (Published Conference Proceedings style) », in Proc. 4th Annu. Allerton Conf. Circuits and Systems Theory, New York, 1994, pp. 8–16.
- [14] M. Ponjavic and R. Djuric, "Current sharing for synchronised dc-dc converters operating in discontinuous conduction mode", IEE Electric Power Applications, Vol. 152, no 1, pp. 119-127, Janv. 2005.

- [15] S. C. Babu, M. Veerachary, "Predictive controller for interleaved boost converter", IEEE International Symposium On, Vol 2, pp. 577-581, Jun. 2005.
- [16] G. W. Juette and L. E. Zeffanella, « Radio noise currents n short sections on bundle conductors (Presented Conference Paper style) », presented at the IEEE Summer power Meeting, Dallas, TX, June 22–27, 1990, Paper 90 SM 690-0 PWRS.
- [17] A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, C. Alonso, B. Estibals, J. Alzieu, G. Schweitz and D. Shmilovitz, "Analysis and design of power gyrators in sliding-mode operation," IEE Proceeding Electric Power Applications, vol. 152, pp. 821-826, Jul.2005.
- [18] A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, C. Alonso, G. Schweitz, J. Calvente and S. Singer, "Classification and synthesis of power gyrators" IEE Proceeding Electric Power Applications, vol. 153, pp. 802-808, Nov. 2006.
- [19] S. Baekhoej Kjaer, J.K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase gridconnected inverters for photovoltaic modules" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 1292-1306, Oct. 2005.
- [20] J. P. Wilkinson, « Nonlinear resonant circuit devices (Patent style) », U.S. Patent 3 624 12, July 16, 1990.
- [21] www.microchip.com.
- [22] data sheet dsPIC33FJ128MC706

Annexe A – Programme de commande pour la recherche de MPPT implémenté dans le dsPIC

```
#include "p33FJ128MC706.h"
//void ProcessADCSamples(unsigned int *AdcBuffer);
#define      SIZE  1 // Également défini dans le fichier DMA.h
// Rapport cyclique maximun =1089
#define      DRC   5
#define      RCMIN  50
#define      RCMAX  1080 // was 1160
#define      REP   8000
#define      MAX   1
#define      INIT  10
signed int RC=50;
unsigned int Puiss,Puissprec=0,Vprec=0,V;
unsigned int i=0,j=0;
char Flag1=0, Flag2=0;
struct
{ unsigned int courant[SIZE];//PIN16
  unsigned int tension[SIZE];//PIN15
}BufferA __attribute__((space(dma)));
void __attribute__((__interrupt__)) _DMA0Interrupt(void)
{
  _DMA0IF = 0;
  i++;
  if ((i%REP)==0)
  { Flag1=1;
    Puiss=(BufferA.courant[0]>>2)*(BufferA.tension[0]>>2);
    V=BufferA.tension[0];
```

```

PORTD=((BufferA.courant[0]>>2)*(BufferA.tension[0]>>2))>>8;
if (Flag2==1)
{
Flag1=0;
if (Puiss>=Puissprec)
{
if (V>Vprec)
RC=RC-DRC;
else
RC=RC+DRC;
}
else
{
if (V>Vprec)
RC=RC+DRC;
else
RC=RC-DRC;
}
if (RC<RCMIN) RC=RCMIN;
if (RC>RCMAX) RC=RCMAX;
PDC1=RC;
Puissprec=Puiss;
Vprec=V;
}
}
}
void __attribute__((__interrupt__)) _ADC1Interrupt(void)
{
_AD1IF=0;//bit 13
}

main()
{

```

```
VisualInitialization();
Ade_Init();
DMA_Init();
TRISD=0;
RC=50;// was 850
PDC1=RC;
while(1)
{
if (Flag1==1)
{
Flag1=0;
Puissprec=Puiss;
Vprec=V;
RC=RC+DRC;
j++;
if(j==INIT)
Flag2=1;
}
}
}
```

Annexe B – Programme MPPT implémenté dans le dsPIC à rectifier

```
#include "p33FJ128MC706.h"
//void ProcessADCSamples(unsigned int *AdcBuffer);
#define      SIZE  1 // Également défini dans le fichier DMA.h
// Rapport cyclique maximum =1089
#define      RCMIN    50.0
#define      RCMAX    1180.0 // was 1180
#define      REP    2000
#define      INIT    10
#define      REP    2000 // was 2000
//signed int RC=50;
float RC=50.0,DRC;
unsigned int Puiss,Puissprec=0,Vprec=0,V;
unsigned int i=0,j=0;
char Flag1=0;
unsigned long int sortie;
struct
{ unsigned int courant[SIZE];//PIN16
  unsigned int tension[SIZE];//PIN15
}BufferA __attribute__((space(dma)));
void __attribute__((__interrupt__)) _DMA0Interrupt(void)
{
  _DMA0IF = 0;
  i++;
  if ((i%REP)==0)
  {
    Puiss=(BufferA.courant[0]>>2)*(BufferA.tension[0]>>2);
```

```

V=BufferA.tension[0];
PORTD=((BufferA.courant[0]>>2)*(BufferA.tension[0]>>2))>>8;
if (Flag1==1)
    Initial();
else
    MPPT();
}
}
void Initial(void)
{ Puissprec=Puiss;
  Vprec=V;
  RC=RC+DRC;
  j++;
  if(j==INIT)
    Flag1=0;
}
void MPPT(void)
{
  if (Puiss>=Puissprec)
  {
    if (V>Vprec)
      RC= RC-DRC;//RC=RC-DRC;RC= RC-(( RC- pas*RC_prec)/ RC);
    else
      RC= RC+DRC;//RC=RC+DRC;RC= RC+(( RC+ pas*RC_prec)/ RC);
  }
  else
  {
    if (V>Vprec)
      RC= RC+DRC;//RC=RC+DRC;
    else
      RC= RC-DRC;//RC=RC-DRC;
  }
  if (RC<RCMIN) RC=RCMIN;
}

```

```
if(RC>RCMAX) RC=RCMAX;
PDC1=(int)RC;
DRC=-0.05326*RC+52.66 ; // 49/920=0.05326
Puissprec=Puiss;
Vprec=V;
}
void __attribute__((__interrupt__)) _ADC1Interrupt(void)
{
    _AD1IF=0;//bit 13
}
main()
{
    VisualInitialization();
    Adc_Init();
    DMA_Init();
    TRISD=0;
    RC=50;// was 50
    PDC1=RC;
    Flag1=1;
    DRC=-49.0/920.0*RC+52.66;
while(1)
    {
    }
}
```

Annexe C – Fonction de la caractéristique du panneau solaire implémenté dans MATLAB

```
function Ipv= pv( Vpv,E,T)
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
A=1.2; % facteur de qualite de la diode (facteur d'idealite) de la
diode (=2 pour les diodes cristallines et <2 pour les diodes amorphes)
Vg=1.12;%bande de gap ,1.12 pour le xtal Si ,1.75 pour le Si amorphe
Ns =36;% nombres de cellules connectees en series

T1=273+25; %temperature de reference
Voc_T1=21.1/Ns;% tension a vide de la cellule
Isc_T1=3.74; % courant de court circuit de la cellule

T2=273+75;
Voc_T2=17.05/Ns;% tension a vide de la cellule
Isc_T2=3.92; %

K0=(Isc_T2-Isc_T1)/(T2-T1);

a_T1=A*k*T1/q;
I0_T1=Isc_T1/(exp(Voc_T1/a_T1));

Vc=Vpv/Ns;

a_T=A*k*T/q;
Iph_T1=Isc_T1*E/1000;%1 suns=1000W/m^2=E(T=25+273 K)
Iph=Iph_T1*(1+K0*(T-T1));

I0=I0_T1*((T/T1)^(3/A))*exp(Vg*(1-T1/T)/a_T1); %courant de saturation
xv=I0_T1/a_T1 *exp(Voc_T1/a_T1);
dvdi_Voc=-1.15/Ns/2;
Rs=-dvdi_Voc-1/xv;

Ipv=0;

for j=1:10
    Ipv=Iph-(I0*(exp((Vc+Ipv*Rs)/a_T)-1));
    if Vpv > 21.1;
        Ipv=0;
    end
end
end
```

Annexe D – Fonction permettant le calcul de l'optimum du panneau solaire implémenté dans MATLAB

```

function Pop= op(E,T)
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
A=1.2; % facteur de qualité de la diode (facteur d'idéalité) de la
diode (=2 pour les diodes cristallines et <2 pour les diodes amorphes)
Vg=1.12;%bande de gap ,1.12 pour le xtal Si ,1.75 pour le Si amorphe
Ns =36;% nombres de cellules connectes en séries

T1=273+25; %température de référence
Voc_T1=21.1/Ns;% tension a vide de la cellule
Isc_T1=3.74; % courant de court-circuit de la cellule

T2=273+75;
Voc_T2=17.05/Ns;% tension a vide de la cellule
Isc_T2=3.92; %

K0=(Isc_T2-Isc_T1)/(T2-T1);

a_T1=A*k*T1/q;
I0_T1=Isc_T1/(exp(Voc_T1/a_T1));

a_T=A*k*T/q;
Iph_T1=Isc_T1*E/1000;%1 suns=1000W/m^2=E(T=25+273 K)
Iph=Iph_T1*(1+K0*(T-T1));

I0=I0_T1*((T/T1)^(3/A))*exp(Vg*(1-T1/T)/a_T1); %courant de saturation
xv=I0_T1/a_T1 *exp(Voc_T1/a_T1);
dvdi_Voc=-1.15/Ns/2;
Rs=-dvdi_Voc-1/xv;

Iop=0;
for j=1:10
    Iop=I0+Iph-(((Iph-Iop+I0)-(((Iph-Iop+I0)^2*2*(Rs/a_T)+(Iph-
Iop+I0)+Iph+I0)-(Iph-Iop+I0)*log((Iph-Iop+I0)/I0)))/(4*(Iph-
Iop+I0)*(Rs/a_T)-1-log((Iph-Iop+I0)/I0)-I0));
end

Vop =Ns*(a_T*log((Iph-Iop +I0)/I0)-Rs*Iop );
Pop =Vop *Iop ;

```