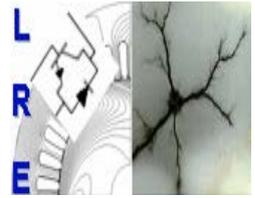




المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

École Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Électrotechnique

Présenté par :
BISKER Asma

Intitulé

Commande d'un Système Photovoltaïque en Mode Isolé et en Mode Connecté au Réseau

Directeurs du mémoire :

MO.MAHMOUDI
EM.BERKOUK

Professeur
Professeur

ENP
ENP

ENP 2012

ملخص :

إن قيمة الطاقة المستمدة من اللوح الشمسي تتأثر بعدة عوامل، منها شدة الحرارة، و الإنارة الشمسية. بهدف الحصول على أحسن خصائص الألواح الشمسية يجب تتبع نقطة الاستطاعة العظمى و ذلك باللجوء الى استعمال خوارزمية MPPT في إطار هذا العمل اهتمنا بدراسة مختلف نماذج مكونات النظام الكهروضوئي التي تشمل: اللوح الكهروضوئي، المحوّل مستمر- مستمر، محول التيار المستمر، المموج ذو الطورين بالإضافة الى نظام تخزين الطاقة من ثم، انتقلنا إلى دراسة سير النظام المكتفي طاقيًا، حيث عالجتنا نظام تسيير الطاقة بين مصدرها الكهروضوئي و البطارية. في النظام المتصل بالشبكة الكهربائية، حققنا التزامنية بين جهد السلسلة الكهروضوئية و جهد الشبكة. بفضل تقنية PLL و مختلف التنظيمات في التيارات و الجهود بهدف حسن سير النظام

الكلمات المفتاحية : الكهروضوئي، MPPT، نظام تخزين الطاقة، المحوّل مستمر- مستمر، محول التيار المستمر، المموج ذو الطورين، الشبكة الكهربائية، التزامنية، PLL، التنظيمات

Résumé :

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire et la température des cellules, mais aussi par la charge. Afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable il est nécessaire d'adopter un algorithme MPPT afin de poursuivre le point de puissance maximale de la source d'entrée. Dans ce travail, nous nous sommes intéressées à la modélisation des différents constituants de la chaîne photovoltaïque comportant, le panneau PV, le hacheur Buck-Boost, le bus continu, l'onduleur à deux niveaux et le système de stockage. Nous sommes passées ensuite, à l'étude des deux modes de fonctionnement du système; d'abord, le mode isolé, où on a abordé la gestion de l'énergie entre production PV et batterie. En mode connecté au réseau, on a assuré la synchronisation des tensions grâce à la PLL, et des régulations de courants et de tensions ont été établis afin de garantir un fonctionnement correct du système.

Mots clés : Photovoltaïque, MPPT, stockage, hacheur Buck-Boost, bus continu, onduleur à deux niveaux, réseau, synchronisation, PLL, régulation.

Abstract:

The output power induced by the photovoltaic modules is influenced by the intensity of solar cell radiation, temperature of the solar cells and moreover by the load. Therefore, to maximize the efficiency of the renewable energy system, it is necessary to use an MPPT algorithm, to track the maximum power point of the source.

In this work, we are interested by modeling the different components of the photovoltaic chain, which includes the PV panel, the buck-boost converter, the two levels inverter, and the energy storage system. After that, we passed to the study of the two PV modes operating, in which we approach the energy management between the PV production and the battery. In the connected mode, we ensure the synchronization of voltages using the PLL. The regulations of currents and voltages were established to guarantee a correct system working.

Key words: Photovoltaic, MPPT, storage, Buck-Boost converter, DC-Link , two level inverter, network, synchronization, PLL, regulation.

Remerciements

Au terme de ce travail,

Nous adressons nos remerciements à Monsieur Mohand Oualhadj MAHMOUDI et à Monsieur El Madjid BERKOUK, Professeurs à l'École Nationale Polytechnique, pour l'appuie scientifique et pour leur disponibilité durant la préparation de notre projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis durant ces trois années.

Nous tenons également à remercier Monsieur Lazhari NEZLI, enseignant à l'École Nationale Polytechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions aussi Monsieur Seddik Hadji, enseignant à l'École Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Nous tenons également à témoigner notre reconnaissance au Colonel MAÏZA ainsi qu'à l'ensemble du personnel de l'École Militaire Polytechnique pour leur accueil et pour leur aide.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électrotechnique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

On en profite pour remercier « ami Salah » ainsi que tous ceux qui nous ont soutenus et ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

À la mémoire de mon cher papa,

À la personne qui m'est la plus chère au monde : ma mère,

À mon frère,

À Nassim et à Asma

À toute ma famille et mes amis

À tous ceux que j'aime

A s m a

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Modélisation des composants d'une chaîne photovoltaïque	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les panneaux photovoltaïques	3
I.2.1. L'effet photovoltaïque	3
I.2.2. Différentes technologies des cellules photovoltaïques	4
I.2.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque	5
I.3. Convertisseur DC-DC	10
I.4. Convertisseur DC-AC	14
I.4.1. Commande du convertisseur	15
I.4.2. Modélisation du filtre LC.....	16
I.5. Conclusion	18
Chapitre II : Système Photovoltaïque en mode isolé	
II.1. Introduction.....	19
II.2. Configuration du système	19
II.3. Le stockage dans un système de production d'énergie photovoltaïque autonome	20
II.3.1. Caractéristique de la batterie	21
II.3.2. Modélisation de la batterie	21
II.3.3. Régulation de la batterie	22
II.3.4. Commande du régulateur de la batterie.....	22
II.3.5. Résultats de simulation	24
II.4. Conclusion	25
Chapitre III : Système photovoltaïque en mode connecté au réseau	
III.1. Introduction.....	26
III.2. Configuration du système	26
III.3. Stratégie de commande.....	27
III.3.1. Synchronisation avec le réseau	27
III.3.2. Régulation en courant	29
III.3.3. Régulation de la tension du bus continu.....	32
III.4. Résultats de simulation	37
III.5. Conclusion	39

Conclusion Générale40

Bibliographie

LISTE DES FIGURES :

Figure I. 1 : Structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque	3
Figure I. 2 : Principe de la conversion photovoltaïque	4
Figure I. 3 : Les différentes technologies photovoltaïques.	4
Figure I. 4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	5
Figure I. 5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle	7
Figure I.6 : Association en série (a) et en parallèle (b) de plusieurs cellules PV identiques	8
Figure I.7 : Influence de l'irradiation sur les caractéristique I-V et P-V	9
Figure I.8 : Influence de la température les caractéristiques I-V et P-V	9
Figure I.9 : Hacheur Buck-Boost	10
Figure I.10 : Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST.....	10
Figure I.11 : Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST.....	11
Figure I.12 : Algorithme P&O	12
Figure I.13 : (a) Tensions à l'entrée et à la sortie du hacheur (b) Puissance délivrée par le panneau avec et sans MPPT	13
Figure I.14 : Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux	14
Figure I.15 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux simplifiée.....	14
Figure I.16 : Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale	16
Figure I.17 : Schéma monophasé équivalent du filtre LC.....	16
Figure I.18 : Allures de la tension compisée à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage , $r = 0.8$, $m=21$, $f=50\text{Hz}$	17
Figure I.19 : Analyse spectrale de la tension composée à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage	18
Figure II.1 : Architecture du système SPAV étudié.....	19
Figure II.2 : Cellule électrochimique de base.	20
Figure II.3 : Modèle électrique de Thévenin de la batterie	22
Figure II.4 : Hacheur réversible en courant	22
Figure II.5 : Principe de la régulation du bus continu.....	23
Figure II.6 : boucle de régulation de la tension du bus continu	23
Figure II.7 : Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge).....	24
Figure II.8 : Tension du bus continu.....	25
Figure III.1 : Diagramme général d'un système PV connecté au réseau	26
Figure III.2 : Boucle de Contrôle de la PLL	27

Figure III.3 : Représentation du vecteur V dans le repère dq.....	28
Figure III.4 : Modèles de la PLL	28
Figure III.5 : Représentation de la connexion Onduleur- Réseau	29
Figure III.6 : Boucle de régulation du courant d'axe direct	30
Figure III.7 : Boucle de régulation réduite du courant.....	31
Figure III.8 : Boucle de régulation de la tension du bus continu	33
Figure III.9 : Système de contrôle du système connecté au réseau	36
Figure III.10 : Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau	37
Figure III.11 : Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau (pour une tension du réseau égale à 45Hz)	37
Figure III.12 : (a) Régulation du Courant d'axe d, (b) Régulation du Courant d'axe q, (c) Régulation de la tension du Bus Continu	38
Figure III.13 : Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 100W.....	39

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1: Fiche technique de panneau PV utilisé [8].....	8
---	---

Le dernier siècle a connu une consommation irrationnelle en matière d'énergie qui ne cesse de croître dans toutes les régions du monde. Nos besoins énergétiques auront tendance à augmenter encore plus dans les années à venir et donc une reconsidération de nos ressources s'avère incontournable pour envisager un réel développement durable et respectueux de l'environnement.

Les sources d'énergies renouvelables présentent à la fois une solution fiable et infinie. À ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer,... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. L'énergie solaire est vue comme étant la meilleure alternative, et représente l'avenir du monde en matière de ressources énergétiques. En effet, ce que reçoit la terre sous forme d'énergie solaire est l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans.

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie « AIE », une surface de 145.000km², soit 4% de la surface des déserts arides de panneaux photovoltaïques, suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1].

L'Algérie se situe dans l'une des régions les plus ensoleillées du monde, elle bénéficie d'une forte capacité d'exportation de l'énergie électrique solaire. La surface du désert seul est estimée à plus d'un million et demi de km² : un potentiel géant en énergie solaire, cette dernière, si elle est bien exploitée, peut facilement couvrir, à elle seule tout le besoin national en terme d'énergie électrique. Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparaît que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant électrique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et en parallèle forme un générateur photovoltaïque.

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant des

étages d'adaptation en entrée assurant la recherche du PPM. En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur.

Ainsi, des hacheurs réalisant la conversion DC-DC ont été utilisés pour maximiser l'énergie pouvant être soutirée des panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT, mais également pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus continu. Un onduleur est nécessaire pour réaliser la conversion DC-AC, commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) triangulo-sinusoidale.

Dans le début de ce manuscrit, nous modéliserons les différents composants d'une chaîne photovoltaïque afin de mieux comprendre les bases et avoir une vision globale des avancées technologiques. Nous exposerons alors les divers types des éléments constituant une chaîne PV et les architectures dédiées à cette production.

Ces différents modèles énergétiques seront ensuite utilisés afin de modéliser le système complet de production photovoltaïque en mode isolé. Dans cette partie, où l'élément de stockage est un composant vital dans une production répandue pour son aspect intermittent, une modélisation adéquate de la batterie sera présentée. Plus tard les différents résultats de simulations du fonctionnement du système vont être exposés.

Le chapitre III quant à lui sera consacré à la connexion au réseau de notre chaîne de production. Une modélisation de la PLL sera présentée afin d'assurer la synchronisation des tensions injectées dans le réseau, ainsi que les différentes régulations de courants et de tension du bus continu assurant le bon fonctionnement du système. Nous exposerons, ensuite, la

CHAPITRE I

Modélisation des composants d'une chaîne Photovoltaïque

I.1. Introduction.....	3
I.2. Les panneaux photovoltaïques	3
I.2.1. L'effet photovoltaïque	3
I.2.2. Différentes technologies des cellules photovoltaïques	4
I.2.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque	5
I.3. Convertisseur DC-DC	10
I.4. Convertisseur DC-AC	14
I.4.1. Commande du convertisseur	15
I.4.2. Modélisation du filtre LC.....	16
I.5. Conclusion	18

I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque (PV) est une technologie solaire qui utilise des cellules solaires pour convertir l'énergie du soleil en électricité. Seulement, cette énergie produite doit être adaptée aux besoins de la charge via un étage d'adaptation comme le montre la figure ci-dessous.

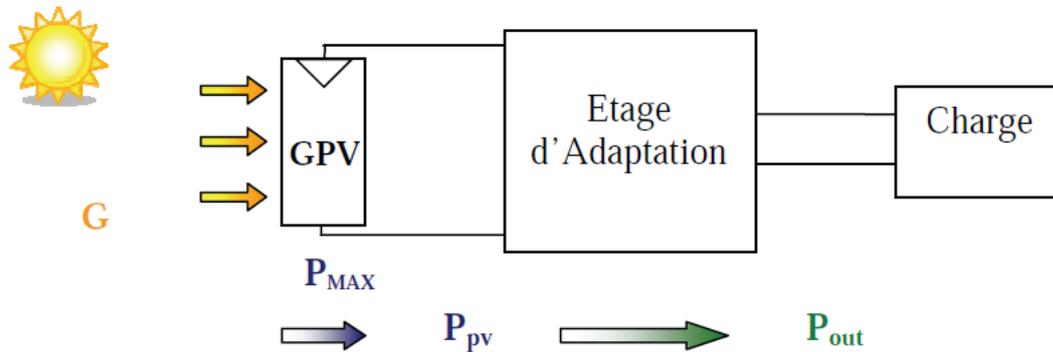


Figure I. 1 : Structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque

Dans ce chapitre, nous aborderons en premier lieu le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales ainsi que les limites du modèle théorique. Nous décrirons par la suite les différents constituants d'un système d'adaptation trouvés dans la littérature ; afin d'avoir des sorties continues ou alternatives, avec ou sans stockage.

I.2. Les panneaux photovoltaïques

I.2.1. L'effet photovoltaïque [2]

Sous l'effet du rayonnement solaire, les paires électrons-trous générés dans la barrière de potentiel sont séparés par le champ électrique qui y règne. Les trous (charge positive) se voient accélérés vers la zone dopée P, quant aux électrons (charge négative) se dirigent vers la zone dopée N. Les trous et les électrons deviennent alors majoritaires sur les faces extérieures des zones P et N.

Ainsi une tension électrique apparaît dans les deux cotés et le dispositif devient un générateur électrique. La collecte du courant se fait par contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule.

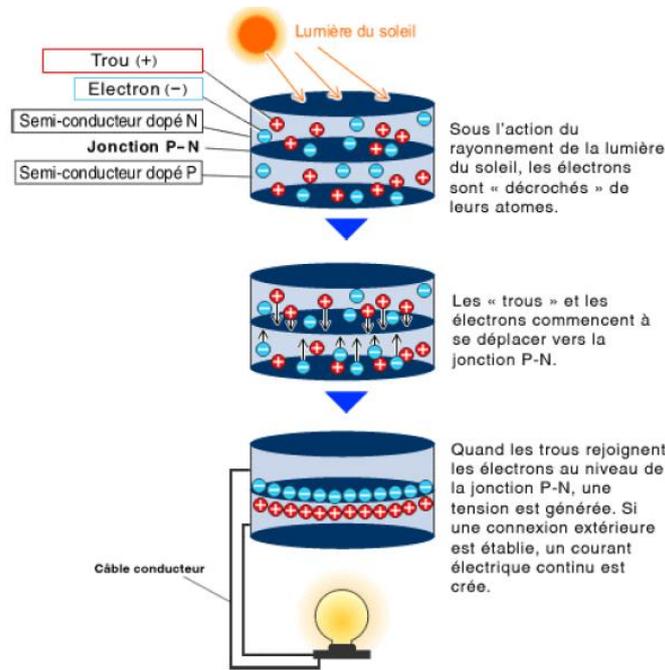


Figure I. 2 : Principe de la conversion photovoltaïque

I.2.2. Différentes technologies des cellules photovoltaïques

Les différentes technologies de cellules dépendent des matériaux semi-conducteurs utilisés. Les principaux types sont présentés dans le schéma ci-dessous. Beaucoup sont en phase de recherche et de développement.

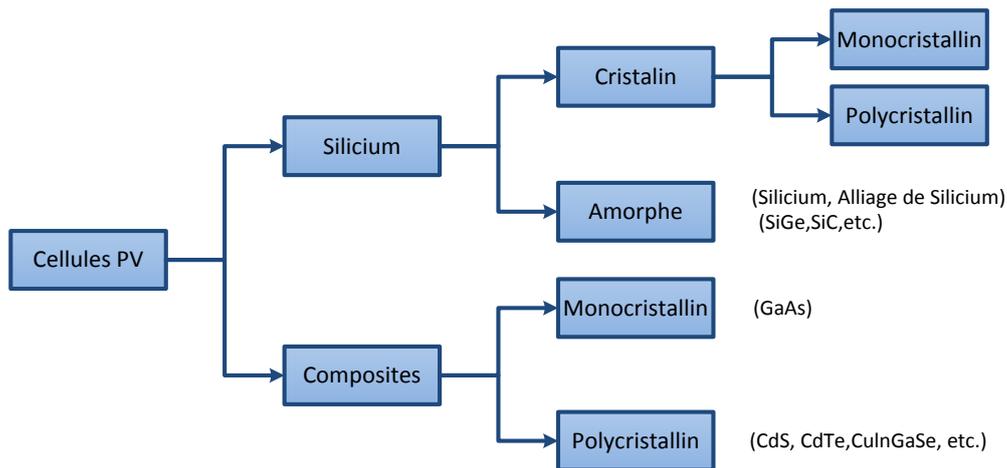


Figure I. 3 : Les différentes technologies photovoltaïques [3].

a. Filière du silicium

Cette filière représente aujourd'hui près de 99% de la production mondiale en termes de matériaux photovoltaïques et comporte [4]:

- Le silicium monocristallin : qui représente environ 29% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typiques (pour les produits commerciaux) autour de 17% pour les cellules et de 14,5% pour les modules.
- Le silicium polycristallin : qui représente environ 62% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 14,5% pour les cellules et de 12,5 pour les modules.
- Le silicium amorphe : Avec une épaisseur plus petite, et un coefficient d'absorption plus grand que les filières présentées ci-dessus, le coût du silicium amorphe est réduit mais avec un rendement (pour les produits commerciaux) de 8% ce qui le limite aux applications de très petites puissances.

b. Filière non silicium (composite)

Cette filière comporte deux catégories distinctes, à savoir les composites monocristallins (GaAs) et polycristallins. Mais deux technologies se sont imposées progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (noté CdTe) et l'autre sur les alliages Cu(In,Ga)Se₂, (cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelées filières CIS pour les rendements records qu'elles présentent de 16,5 % pour CdTe et de près de 20 % pour CIS (19,5 %) [4].

I.2.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

a. Cellule Photovoltaïque

Technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa construction, les matériaux utilisés et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Son schéma électrique équivalent est représenté par la figure ci-dessous :

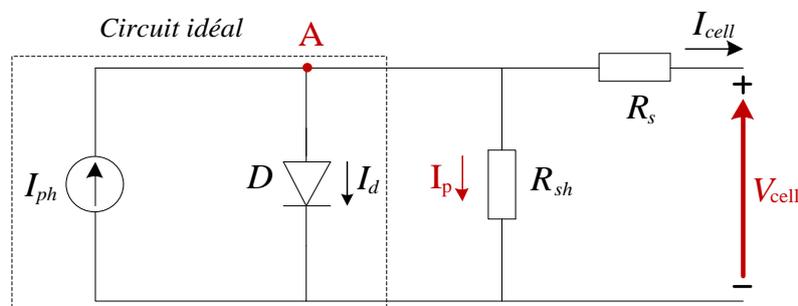


Figure I. 4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [4]

Il existe d'autres modèles plus sophistiqués qui représentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque. Cependant, ce modèle choisi offre un bon compromis entre simplicité et précision.

Les résistances représentées dans le schéma équivalent auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

- La résistance série : représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [5].
- La résistance shunt : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [5]

Et le courant délivré par la cellule est donné par l'expression suivante :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Où :

- I_{ph} Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.
- I_0 Courant de saturation de la jonction (dépend du matériau semi-conducteur).
- I_{cell} Courant fourni par la cellule
- R_s Résistance en série
- R_{sh} Résistance en parallèle
- V_{cell} Tension aux bornes de la cellule
- q Charge de l'électron.
- K Constante de Boltzmann.
- A Facteur d'idéalité de la jonction P-N il est compris entre 1 et 2.
- T Température ambiante [°C].
- N_s Nombre de cellules en série.

b. Caractéristique Courant-Tension

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit I_{CC} et dépend fortement du niveau d'éclairement.

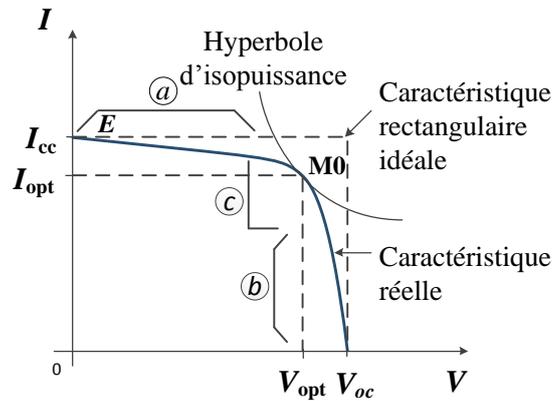


Figure I. 5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle [6]

Les générateurs électriques sont généralement classifiés en source de courant et en source de tension. Une cellule PV a un comportement hybride, elle peut fonctionner en source de tension ou en source de courant selon le point de fonctionnement. Ainsi, la caractéristique I-V se divise en trois zones :

- La zone « a » : où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.
- La zone « b » : où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} .
- La zone « c » : où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

Le point M_0 représente le point de puissance maximale.

c. Panneau photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque ne délivre que quelque Watt sous une tension très petite (0,6V pour le silicium monocristallin). Cette puissance délivrée est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Le module photovoltaïque est alors réalisé à partir de la mise en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules élémentaires.

- L'association en série de plusieurs cellules permet d'augmenter la tension du module photovoltaïque ($V_{co,ns}$) tout en conservant un courant électrique équivalent à celui d'une seule cellule (I_{cc}).
- L'association en parallèle de plusieurs cellules identiques quant à elle, permet d'augmenter le courant ($I_{cc,np}$) sous une même tension (V_{co}).

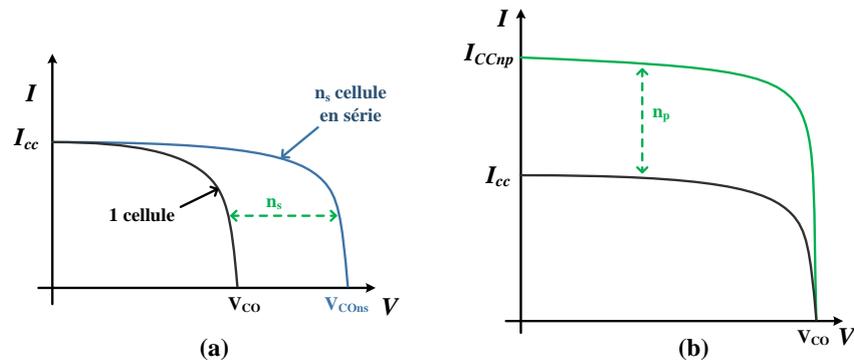


Figure I.6 : Association en série (a) et en parallèle (b) de plusieurs cellules PV identiques [7].

Ainsi le courant généré par un panneau constitué de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle est donné par :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (I.2)$$

Où N_p représente le nombre de cellules en parallèles.

C'est à partir de cette expression qu'on pourra modéliser le panneau photovoltaïque.

d. Influence de la température et de l'irradiation sur la caractéristique d'un panneau Photovoltaïque

Nous avons étudié l'influence de la température et de l'irradiation en utilisant un panneau KC2000GT. La fiche technique du constructeur est donnée dans le tableau I.

Tableau 1: Fiche technique de panneau PV utilisé [8]

I_{mp}	7.61 A
V_{mp}	26.3 V
P_{max}	200.143W
I_{sc}	8.21 A
V_{oc}	32.9 V
K_V	- 0.1230 V/K
K_I	0.0032 A/K
N_s	54
N_p	1

• Influence de l'irradiation

D'après la figure I.7, la caractéristique Courant-Tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'irradiation pour une température donnée : lorsque l'irradiation augmente, la courbe se translate vers le haut et vers la droite. De ce fait, le courant de court-circuit varie proportionnellement à l'irradiation tandis que la tension de circuit ouvert ne varie que très peu [9]. De plus, la puissance maximale augmente avec l'irradiation.

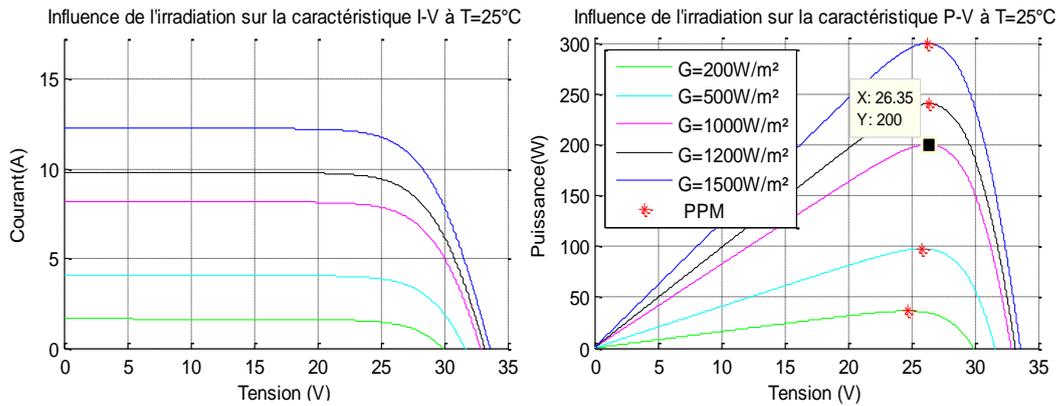


Figure I.7 : Influence de l'irradiation sur les caractéristiques I-V et P-V

- **Influence de la température**

D'après la figure I.8, lorsque la température augmente, la tension à vide diminue alors que le courant de court-circuit augmente légèrement, ceci engendre une diminution de la puissance maximale

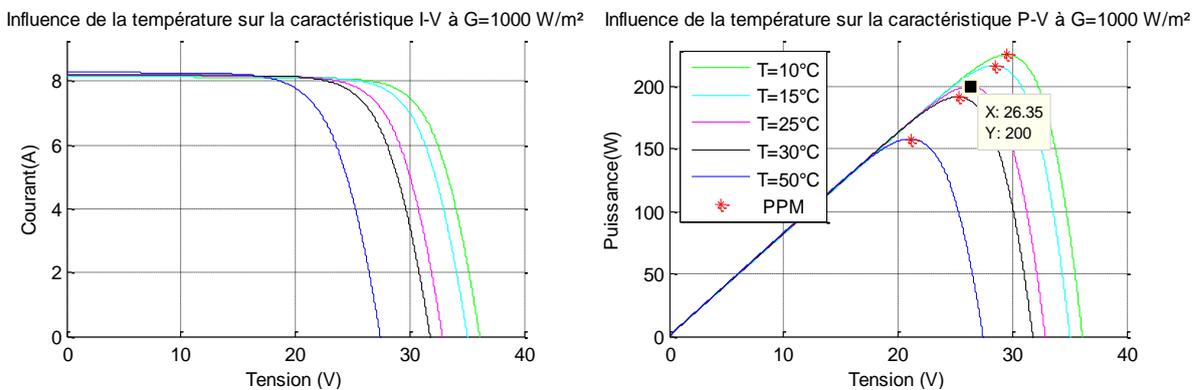


Figure I.8 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

On remarque à partir du tableau 1 et des courbes des figures I.7 et I.8 que le modèle développé concorde parfaitement avec les données expérimentales du constructeur dans les conditions standards (1000W/m^2 , 25°C), ainsi, la puissance maximale théorique correspond à la puissance maximale expérimentale.

Pour résumer, le point de fonctionnement d'un module PV se déplace en faisant varier la température, l'ensoleillement ou la charge. L'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant du générateur que sa tension, alors que la température affecte beaucoup plus la tension que le courant.

À partir des courbes de puissance on remarque que l'ensoleillement augmente la puissance alors que la température l'abaisse. Ainsi, on peut déduire qu'un générateur PV fonctionne mieux à basse température et à flux lumineux important [9].

I.3. Convertisseur DC-DC

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV pour générer les courants et les tensions souhaités sont :

- Les convertisseurs de type BUCK (abaisseurs) dans lesquels $V_o < V_i$
- Les convertisseurs de type BOOST (élevateurs) dans lesquels $V_o > V_i$
- Les convertisseurs de type BUCK-BOOST qui peuvent fonctionner en BUCK ou en BOOST en fonction du rapport cyclique α .

Le hacheur que nous avons utilisé dans notre étude est de type BUCK-BOOST, il est représenté par la figure suivante :

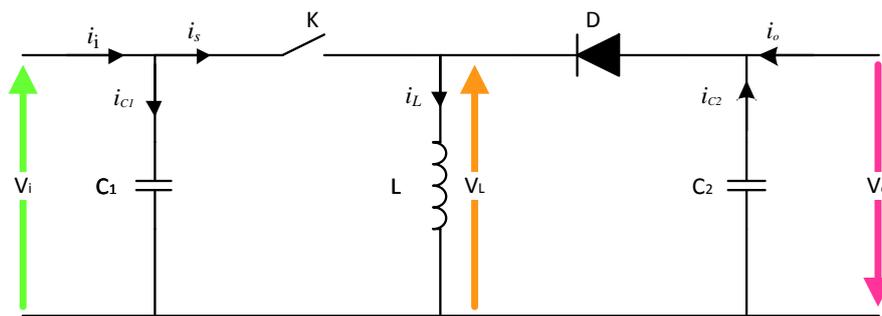


Figure I.9 : Hacheur Buck-Boost [10]

En commandant l'interrupteur K , ce hacheur peut fonctionner en élévateur ou en abaisseur en fonction de la valeur du rapport cyclique α .

On distingue deux intervalles de fonctionnement du hacheur :

- Intervalle $[0, \alpha T_s]$: Cet intervalle est caractérisé par la conduction de l'élément de commande : la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement avec une pente égale à V_i/L ce qui lui permet de stocker de l'énergie durant toute la durée de la fermeture, et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge [10][11]. Le circuit est le suivant :

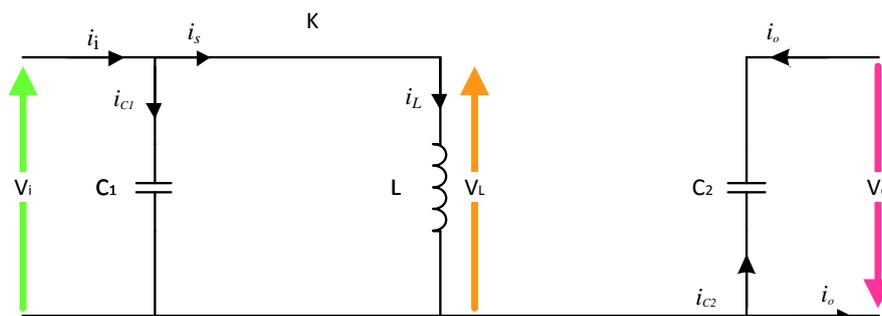


Figure I.10 : Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST [10]

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (I.3)$$

- Intervalle $[\alpha T_s, T_s]$: l'élément de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, le courant de la bobine décroît linéairement avec une pente de $-V_o/L$ ce qui permet d'alimenter la charge et de recharger la capacité. Le circuit est représenté par la figure ci-dessous.

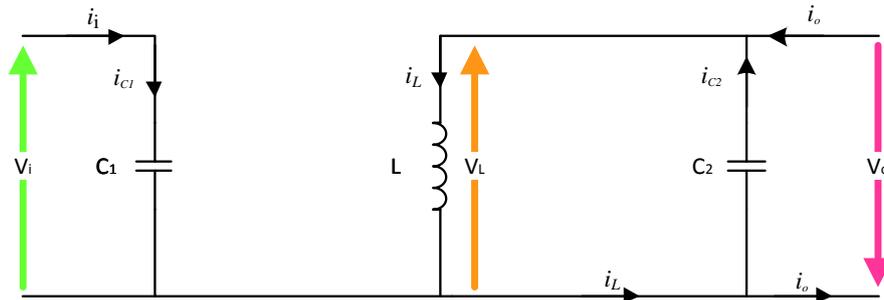


Figure I.11 : Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (I.4)$$

En combinant les deux systèmes d'équations (I.3) et (I.4), on trouve le modèle approximé du hacheur Buck-Boost [10]

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = \alpha T_s (i_i(t) - i_L(t)) + (1 - \alpha) T_s i_i(t) \\ C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} T_s = -\alpha T_s i_o(t) + (1 - \alpha) T_s (i_L(t) - i_o(t)) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = \alpha T_s V_i(t) - (1 - \alpha) T_s V_o(t) \end{cases} \quad (I.5)$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système devient :

$$\begin{cases} I_i - \alpha I_L = 0 \\ (1 - \alpha)I_L - I_o = 0 \\ \alpha V_i - (1 - \alpha)V_o = 0 \end{cases} \quad (I.6)$$

On peut ainsi tirer le rapport de conversion, qui représente le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (I.7)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut déterminer les modes de fonctionnement du hacheur BUCK-BOOST

Seulement, le hacheur dans un système photovoltaïque a pour rôle d'optimiser le transfert d'énergie du générateur PV vers la charge. Ceci se fait via la commande de l'interrupteur en utilisant un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le point de puissance maximale et de faire fonctionner le système en ce point.

L'algorithme MPPT choisi est Perturb & Observe (P&O). C'est l'un des algorithmes les plus utilisés pour sa simplicité et sa rapidité. Son principe est décrit dans la figure suivante :

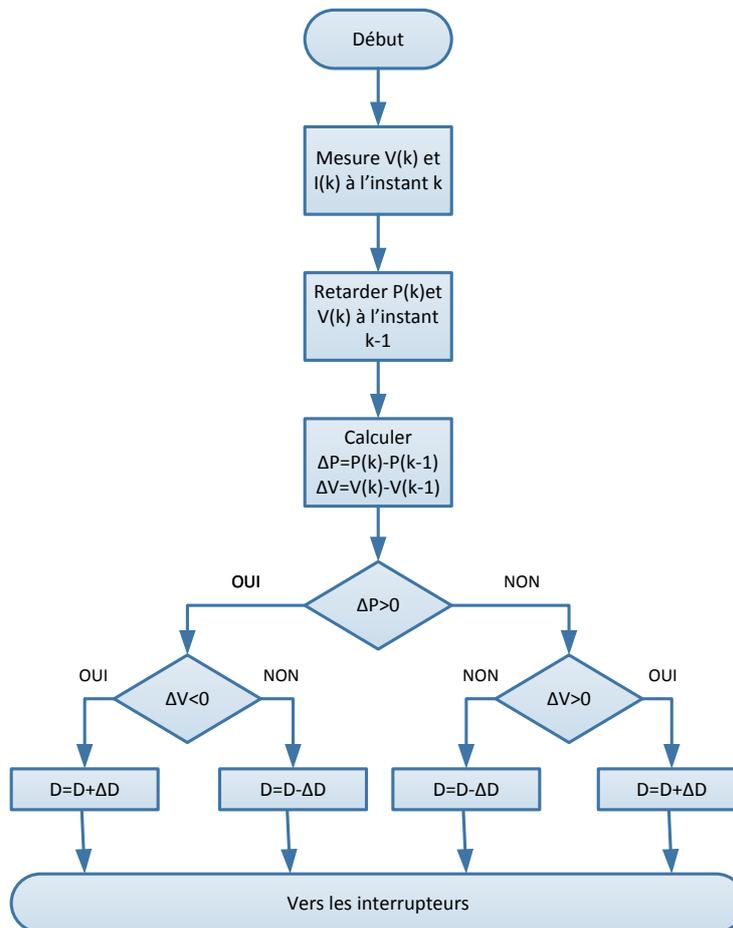


Figure I.12 : Algorithme P&O [12].

Cet algorithme consiste à perturber le fonctionnement du système en modifiant la tension aux bornes du champ de modules PV et à analyser la variation de puissance qui en résulte. Ainsi on peut déduire qu'une incrémentation positive de la tension peut engendrer :

- Un accroissement de la puissance : cela signifierait que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.
- Une décroissance de la puissance : cela signifierait que le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique $P=f(V)$, il devient facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le faire converger vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

Nous avons testé notre système Panneau-Hacheur suivant un certain profil d'irradiation, nous avons obtenu les résultats suivants :

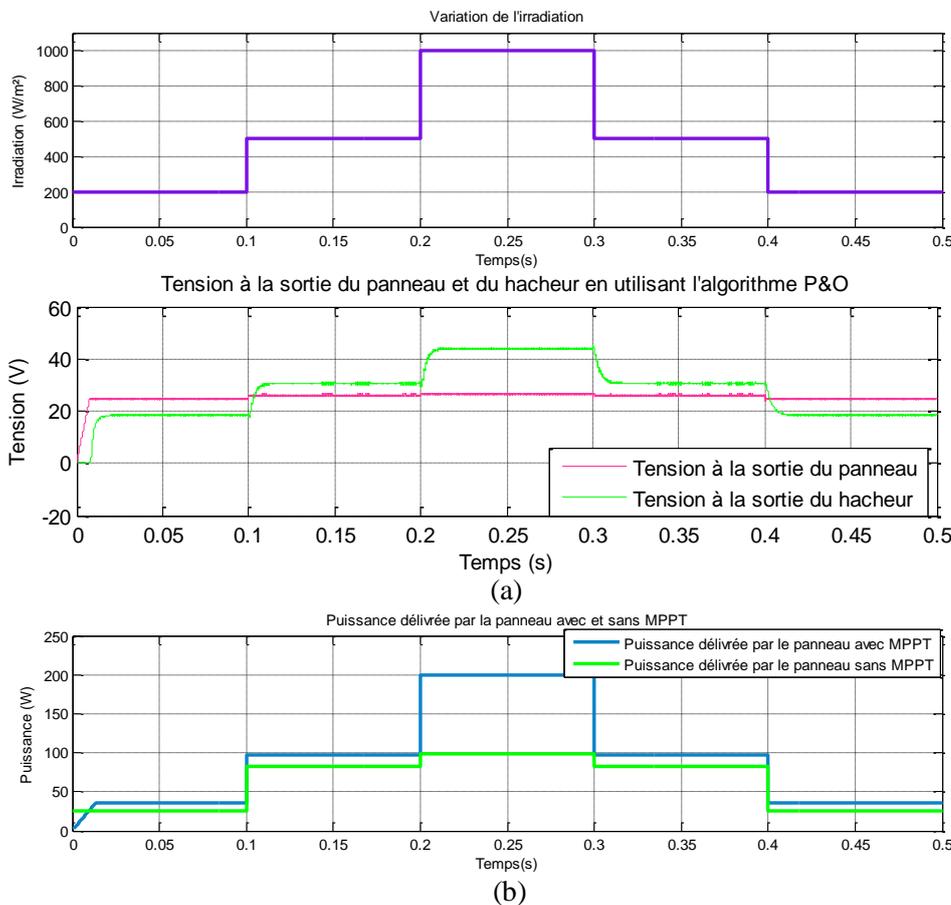


Figure I.13 : (a) Tensions à l'entrée et à la sortie du hacheur (b) Puissance délivrée par le panneau avec et sans MPPT

Tout d'abord, on remarque dans figure (a) que notre hacheur peut fonctionner en élévateur ou en abaisseur en fonction de la tension aux bornes du panneau.

Pour ce qui est de la figure (b), elle met en évidence la différence de puissances entre un système sans MPPT (en vert) et un système avec MPPT (en bleu). Cet écart est important ce qui montre la nécessité d'utiliser un algorithme MPPT afin de minimiser les pertes et optimiser le fonctionnement du système.

I.4. Convertisseur DC-AC

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est composé de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur, les interrupteurs T1 et T1', T2 et T2', T3 et T'3 doivent être contrôlés de manière complémentaire. Chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération montée en tête-bêche avec le semi-conducteur.

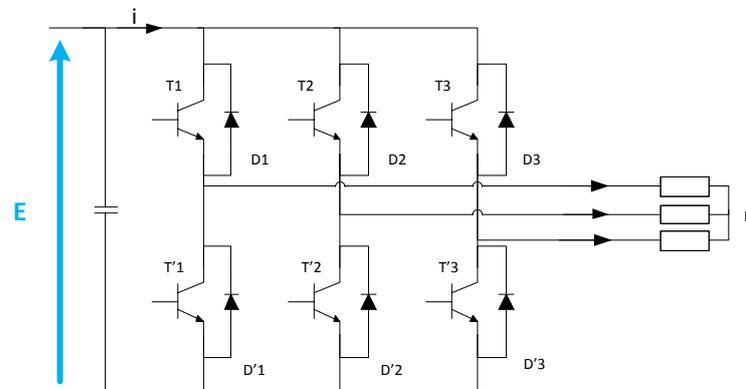


Figure I.14 : Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

En considérant que chaque paire (transistor, diode) constitue un seul interrupteur on a le schéma simplifié suivant:

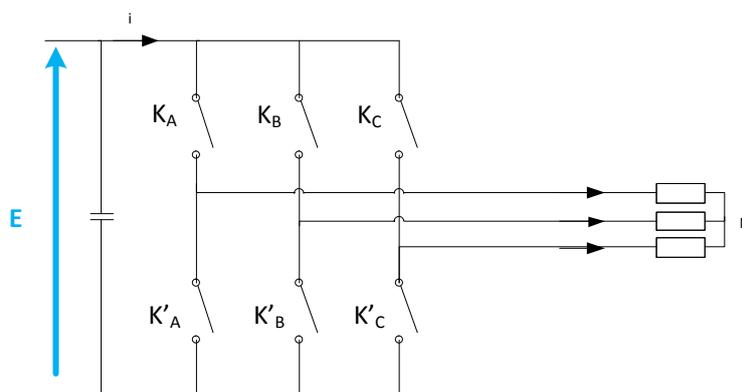


Figure I.15 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux simplifiée

Les états des interrupteurs, supposés parfaits, sont représentés en théorie par trois fonctions logiques K_k ($k= A, B, C$) telles que :

- $K_k = 1$: l'interrupteur du haut est fermé et par conséquent celui du bas est ouvert.
- $K_k = 0$: l'interrupteur du haut est ouvert et par conséquent celui du bas est fermé.

La relation entre le vecteur $[K_A K_B K_C]^t$ et le vecteur des tensions $[U_{AB} U_{BC} U_{CA}]^t$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées, on peut déduire les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_C = \frac{U_{AC} - U_{BA}}{3} \end{cases} \quad (I.9)$$

À partir des relations (I.8) et (I.9), on obtient l'expression des tensions simples en fonction de l'état des interrupteurs comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 1/3 E \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

I.4.1. Commande du convertisseur

La modulation de largeur d'impulsions est une méthode qui permet à la fois la variation de l'amplitude du fondamental de la tension et le contrôle de son contenu harmonique. Cette méthode consiste à comparer l'amplitude de la modulante (tension de référence de l'onduleur) avec un signal en dent de scie appelé porteuse [13] [14].

La tension de sortie est une suite de créneaux d'amplitude fixe et de largeur variable.

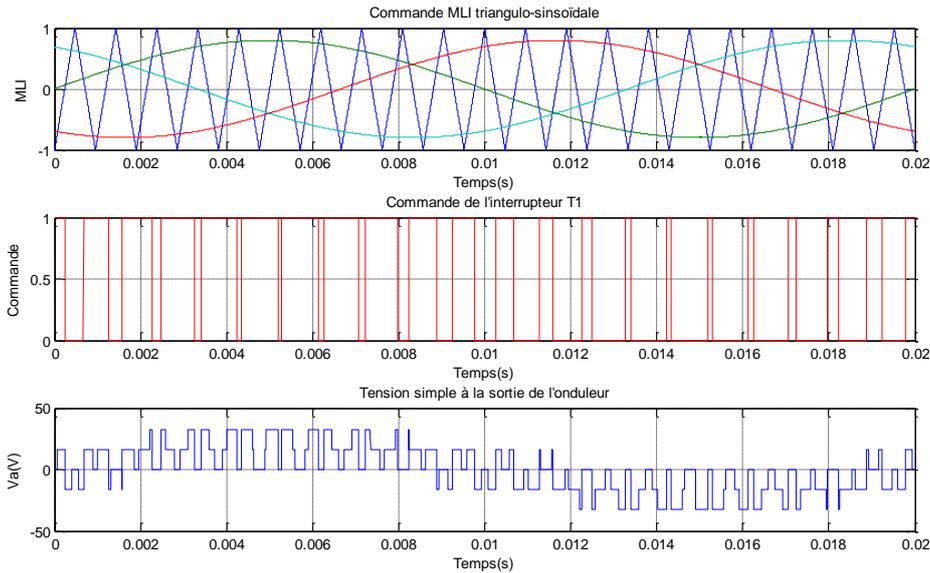


Figure I.16 : Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale

La MLI présente deux avantages importants :

- Repousser vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- Faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

I.4.2. Modélisation du filtre LC

Afin de déterminer plus facilement la transmittance du filtre, on utilise le schéma monophasé suivant

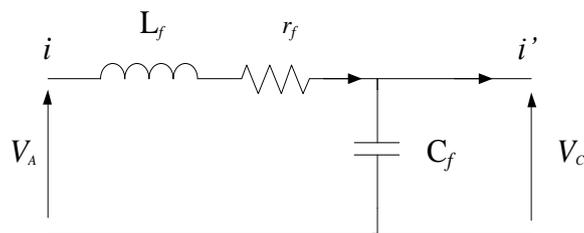


Figure I.17 : Schéma monophasé équivalent du filtre LC

Où r_f est la résistance de fuite de l'inductance L_f

La fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante :

$$H(p) = \frac{V_C}{V_A} = \frac{1}{1 + C_f r_f \cdot p + L_f C_f \cdot p^2} \tag{II. 19}$$

Elle est de la forme :

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\xi\omega_n} \cdot p + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot p^2} \tag{II. 20}$$

Par identification on trouve :

$$\begin{cases} \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \cdot r_f \cdot \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

En choisissant une bonne fréquence de coupure qui va nous permettre d'éliminer les fréquences non désirées et en considérant le coefficient d'amortissement ξ adéquat, on attribue un dimensionnement correct à l'inductance et à la capacité du filtre utilisé.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité de notre filtre.

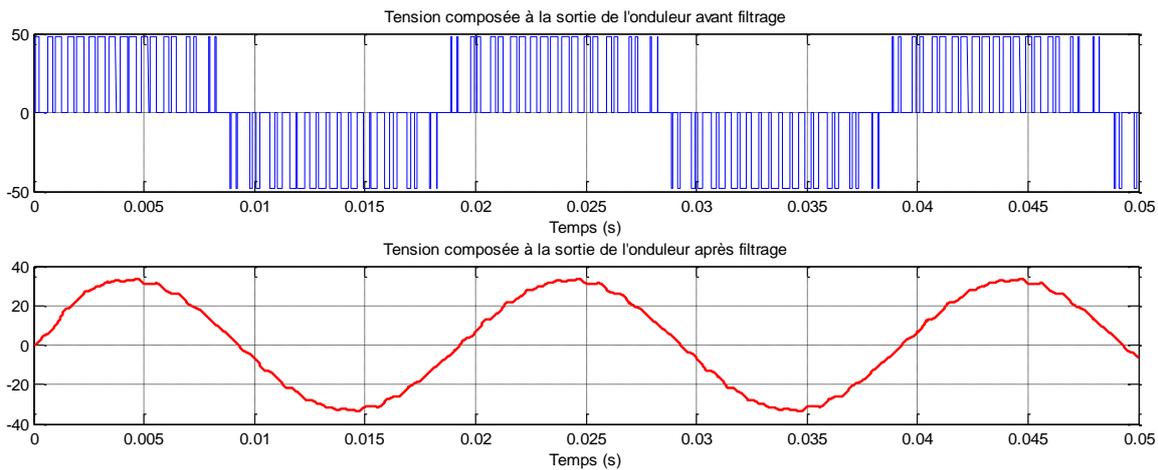


Figure I.18 : Allures de la tension composée à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage ,
 $r = 0.8, m=21, f=50\text{Hz}$

La figure ci-dessus représente la tension composée à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage. On voit que la tension avant filtrage est complètement déformée et n'a rien d'une sinusoïde puisqu'elle est sous forme de créneaux. Cependant, le filtrage nous a permis d'éliminer les harmoniques et donc de garder seulement le fondamental d'où la nécessité d'utiliser un filtre. Nous pouvons mieux voir l'effet du filtre à partir d'une analyse spectrale avant et après filtrage.

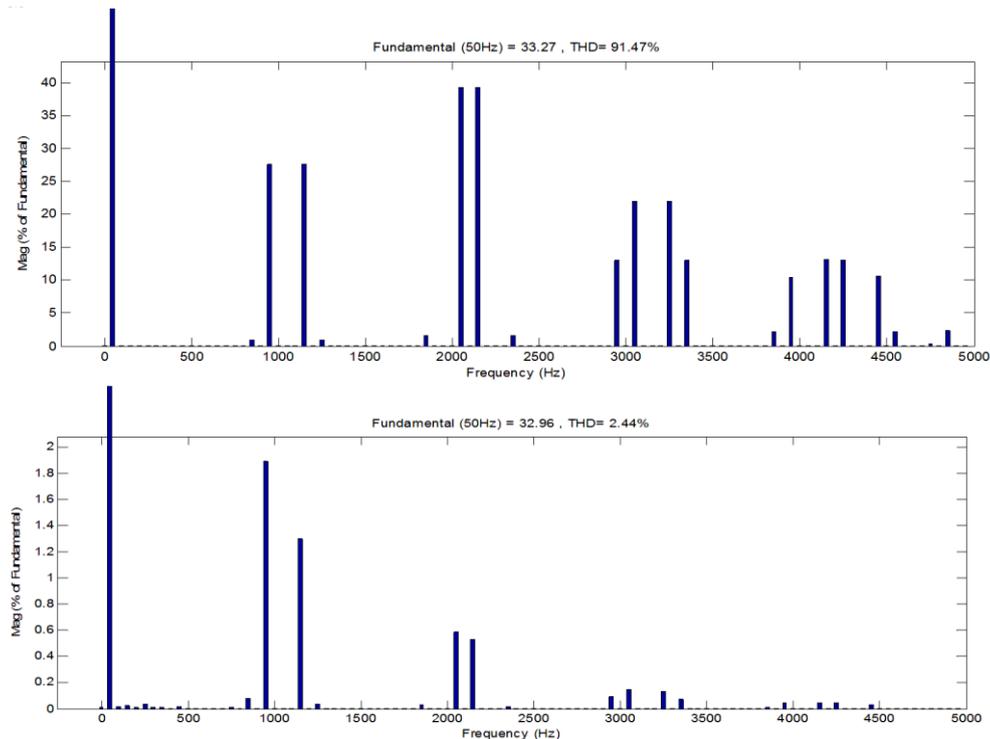


Figure I.19 : Analyse spectrale de la tension composée à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage

On remarque, d'après la figure, la présence d'harmoniques de tension et des pics non négligeables à certaines fréquences avant le filtrage. De plus, le taux de distorsion de tension est très important puisqu'il est de l'ordre de 91.47%.

L'analyse spectrale faite après filtrage montre une nette amélioration par rapport à la présence des tensions harmoniques confirmée par un THD de 2.44%.

On peut déduire que le filtrage est essentiel lors de la connexion au réseau d'un système à cause de la déformation des tensions qui pourrait engendrer la pollution du réseau.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des différents constituants de la chaîne de production photovoltaïque, qui ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux.

Les résultats de simulations obtenus par SimPowerSystems/MATLAB, nous ont permis d'approcher au mieux le fonctionnement réel de notre système. Ainsi, on a pu étudier l'influence de la température et de l'irradiation sur un panneau PV, la nécessité d'utiliser un algorithme MPPT afin d'optimiser la production et l'importance du filtre de sortie de l'onduleur.

CHAPITRE II

Systeme Photovoltaïque en mode Isolé

II.1. Introduction.....	19
II.2. Configuration du système.....	19
II.3. Le stockage dans un système de production d'énergie photovoltaïque autonome	20
II.3.1. Caractéristique de la batterie	21
II.3.2. Modélisation de la batterie	21
II.3.3. Régulation de la batterie	22
II.3.4. Commande du régulateur de la batterie.....	22
II.3.5. Résultats de simulation	24
II.4. Conclusion	25

II.1. Introduction

L'exploitation des potentiels énergétiques photovoltaïques pour la production de l'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées, là où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreuse [15].

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque dans un site isolé avec stockage, nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink.

II.2. Configuration du système

L'architecture générale du système est présentée à la figure.II.1.

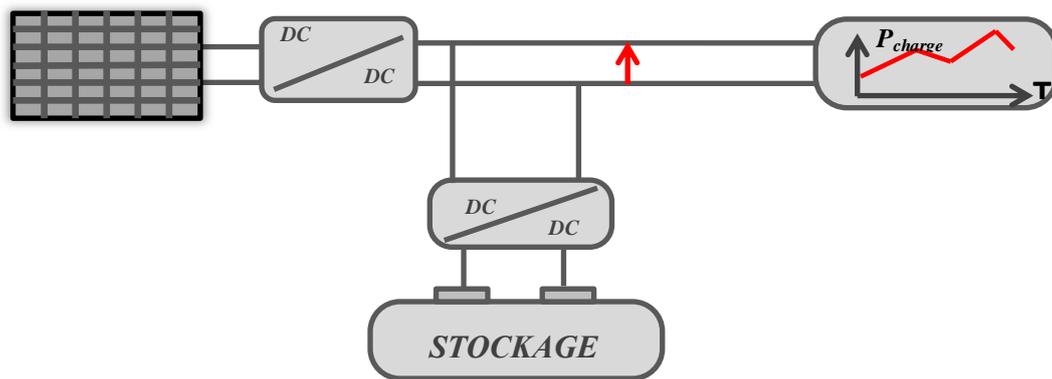


Figure II.1 : Architecture du système SPAV étudié

Il est possible d'y distinguer :

- Générateurs PV : La production PV est destinée à être consommée sur place ou stockée.
- Accumulateurs : Les accumulateurs électrochimiques Plomb-Acide sont utilisés en source d'appui pour fournir les consommateurs en situation de sous-production PV
- Convertisseurs :
 - Convertisseur DC/DC : Pour l'adaptation et la commande MPPT
 - Convertisseur batterie : Ce convertisseur a pour rôle de réguler les transferts d'énergie entre l'accumulateur et le reste du système. Il doit faire en sorte de protéger l'accumulateur en maintenant la tension à ses bornes dans une plage de variation prédéfinie et de réguler le bus continu.

Ainsi, on peut dire que le stockage représente un élément important dans une chaîne isolée.

II.3. Le stockage dans un système de production d'énergie photovoltaïque autonome

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en faibles quantités. Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance.

Avant de passer à la description "modélisation de la batterie", il est utile de définir certaines notions sur les batteries.

Pour les systèmes isolés les batteries les plus couramment utilisées sont les batteries au plomb puisque leur rapport qualité-prix est satisfaisant et ont une capacité de stockage de longue durée (autodécharge faible).

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts, connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance. Ces dernières sont recouvertes de matières actives : dioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative [16].

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

La capacité énergétique de la batterie, exprimée en wattheures « Wh » dépend de la quantité et de la nature des éléments chimiques présents dans la cellule [16].

La figure II.2 représente une cellule électrochimique de base.

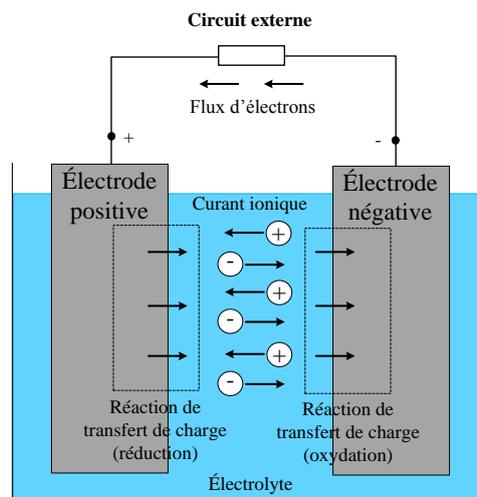
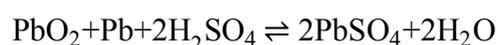
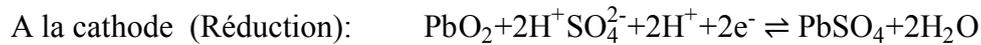


Figure II.2 : Cellule électrochimique de base.

La réaction qui se produit dans la cellule électrochimique et qui permet la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique est la suivante [17] :



Si cette réaction est décomposée en deux réactions partielles, simultanées, distinctes dans l'espace, dont l'une donne lieu à une capture et l'autre à une libération d'électrons, l'échange de ces électrons s'effectue alors par un courant extérieur et fournit de l'énergie électrique.



II.3.1. Caractéristique de la batterie [16]

Les paramètres électriques suivants sont généralement employés pour caractériser une batterie :

- La capacité nominale Q_{\max} : Le nombre maximal d'ampères-heures (Ah) qui peut être extrait de la batterie dans des conditions de décharge prédéterminées.
- L'état de charge SOC (State Of Charge) : C'est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominale.

$$\text{SOC} = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad 0 \leq \text{SOC} \leq 1 \quad (\text{II.1})$$

Si $\text{SOC}=1$ cela veut dire que la batterie est entièrement chargée

Si par contre $\text{SOC}=0$ la batterie est totalement déchargée.

- Le régime de charge (ou de décharge) : Le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée), est exprimé en heures. Par exemple, une batterie de 150 Ah peut décharger jusqu'à 5A, le régime de décharge est égale à 30h.
- La durée de vie : Le nombre de cycle charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale.

II.3.2. Modélisation de la batterie [18]

Il existe dans la littérature une large variété de modèles de batterie. Le plus souvent, ces modèles représentent la batterie par un circuit électrique équivalent, composé de résistances, de capacités et autres éléments de valeur fixe ou variant avec des paramètres tels que l'état de charge ou la température.

Nous utiliserons le modèle électrique suivant (figure II.3) pour la modélisation de la batterie au plomb.

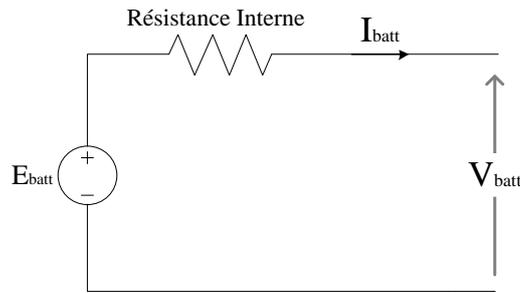


Figure II.3 : Modèle électrique de Thévenin de la batterie [18]

Par convention, la batterie est assimilée à un générateur. Le courant de charge est négatif et celui de décharge positif. La tension E_{batt} est une tension variable, selon la valeur du courant I_{batt} à tout moment, selon que la batterie se charge ou se décharge et selon le type de batterie.

II.3.3. Régulation de la batterie [2]

Il existe plusieurs méthodes de contrôle de charge, les régulateurs de type série qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur, les régulateurs de type shunt où le courant de charge des batteries est dévié vers une résistance.

Pour la gestion de la charge/décharge de la batterie, nous allons utiliser un hacheur réversible en courant électrique pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, il est le résultat de l'association entre un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur.

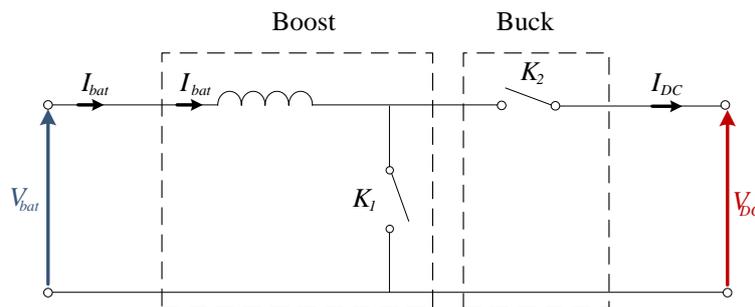


Figure II.4 : Hacheur réversible en courant

La commande des interrupteurs K_1 et K_2 est simultanée avec des rapports cycliques α_{bat} et $1 - \alpha_{bat}$ complémentaires. Son fonctionnement est décrit par :

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L_{bat}} (\alpha_{bat} V_{dc} - V_{bat}) \quad (\text{II. 2})$$

II.3.4. Commande du régulateur de la batterie

Le système de stockage est composé d'un banc de batteries relié à un convertisseur réversible en courant (Buck/Boost) ainsi que du système de contrôle. Le système doit pouvoir

permettre aux batteries soit de se charger lorsqu'il y a un excès d'énergie, ou bien de se déchargé lorsque l'énergie produite est insuffisante pour alimenter la charge.

La batterie est connectée au bus continu via un hacheur Buck/Boost, comme indiqué à la figure II.5, Le banc de batteries sert à alimenter en puissance les besoins de la charge pendant une courte durée lors des fluctuations des irradianations ou encore les périodes de transitions.

L'objectif principal du convertisseur de la batterie est de maintenir la tension V_{dc} aux bornes du bus continu égale à une valeur de référence $V_{dc_{ref}}$. Cette tension de référence est fixée à la tension nominale de fonctionnement des batteries.

On peut assurer la régulation du bus continu et de la batterie, en utilisant un régulateur PI. Le signal à la sortie de ce correcteur est un courant de référence qu'on va comparer avec le courant de la batterie, et grâce à un régulateur par hystérésis, on va contrôler le rapport cyclique du hacheur réversible en courant.

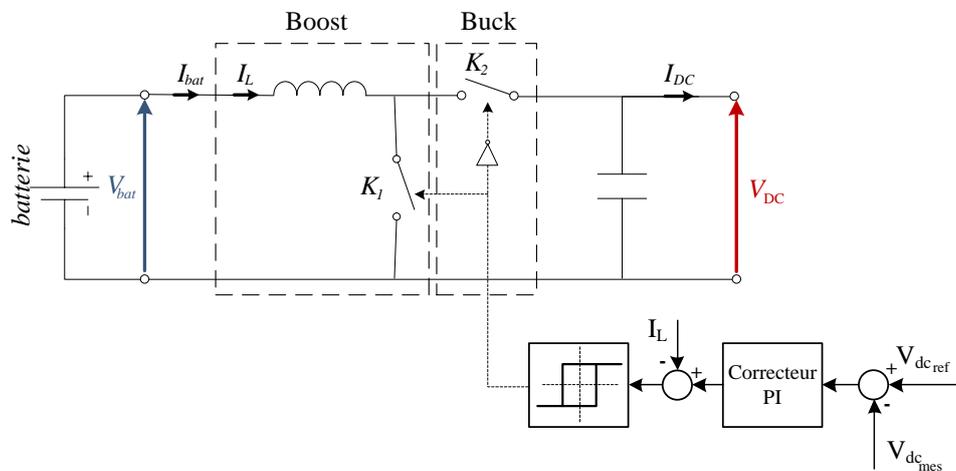


Figure II.5 : Principe de la régulation du bus continu

Pour la synthèse du régulateur PI, nous utiliseront la boucle de régulation suivante :

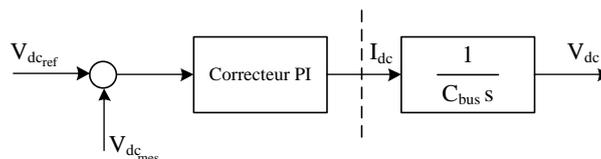


Figure II.6 : boucle de régulation de la tension du bus continu

Le régulateur étant de la forme suivante :

$$C(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \tag{III. 7}$$

Le système fonctionne comme suit :

Lorsque la tension aux bornes du bus continu est inférieure à la tension de référence, alors le courant de référence généré par le régulateur PI est positif, ce qui impose une décharge de la batterie en actionnant l'interrupteur K2.

Si maintenant la tension V_{dc} est plus grande que $V_{dc_{ref}}$, on a un courant de référence négatif, on va alors actionner l'interrupteur K1 ce qui va permettre à la batterie de se charger.

II.3.5. Résultats de simulation

- Variation des puissances en fonction du mode Charge/Décharge :

Les résultats de simulation d'une installation PV autonome dans des conditions de 25°C et 1000 W/m² pour une charge variable sont donnés par la figure suivante :

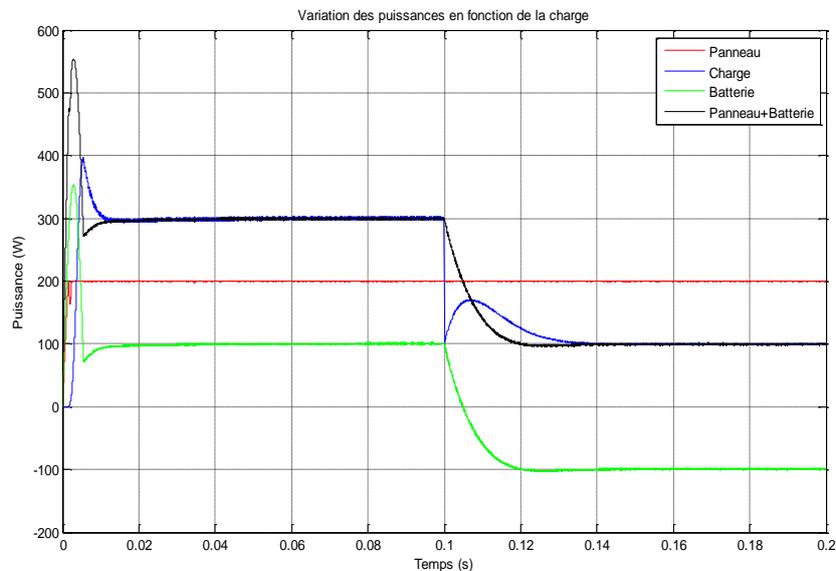


Figure II.7 : Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge)

On remarque que dans la première partie, la charge consomme 300W, or le panneau ne peut délivrer que 200W, le reste va être fourni par les batteries (soit 100W)

Dans la deuxième partie, la charge consomme que les 100W fournis par le panneau, les 100W restant vont alors servir à charger les batteries.

La tension aux bornes du bus continu est donnée par la figure suivante :

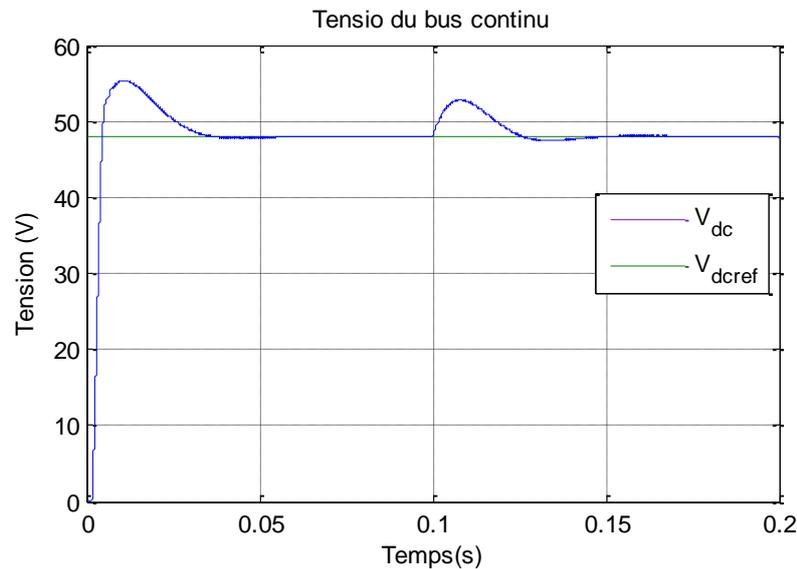


Figure II.8 : Tension du bus continu

On remarque que la tension aux bornes du bus continu est maintenue à sa valeur de référence quelle que soit les appels de courant de la charge.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre un système photovoltaïque autonome avec stockage plomb-acide. En considérant la tension des panneaux constante et égale à la tension optimale, nous avons supposé qu'ils fonctionnaient dans des conditions optimales grâce à un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT ; Maximum Power Point Tracking).

Les modèles des différents composants ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux :

- Le modèle des panneaux PV est précis et tient compte de la variation d'ensoleillement ainsi que de celle de la température,
- Les convertisseurs, grâce à leur commande robuste permettent de faire face aux forts appels de courant, de travailler dans les conditions optimales (Convertisseur PV) et d'assurer la charge et décharge (Convertisseur batterie), garantissant ainsi la sûreté de fonctionnement du système,
- La gestion du flux d'énergie est correctement assurée par le module de supervision.

Il est apparu que même avec les technologies actuelles qui disposent encore d'un potentiel de progrès, un système photovoltaïque autonome couplé à un système de stockage électrochimique consomme moins d'énergie primaire sur cycle de vie que lorsque l'utilisateur est connecté au réseau de distribution actuel.

CHAPITRE III

Systeme Photovoltaïque en mode Connecté au Réseau

III.1. Introduction.....	26
III.2. Configuration du système.....	26
III.3. Stratégie de commande.....	27
III.3.1. Synchronisation avec le réseau	27
III.3.2. Régulation en courant	29
III.3.3. Régulation de la tension du bus continu.....	32
III.4. Résultats de simulation	37
III.5. Conclusion	39

III.1. Introduction

Les systèmes électriques connaissent une importante révolution depuis l'introduction de la production décentralisée et les sources d'énergie renouvelables au réseau électrique. L'intégration de différentes technologies conduit à une diversité croissante du réseau et engendre ainsi des normes plus restrictives [19].

Plusieurs critères doivent être remplis pour satisfaire les exigences du réseau comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie [20].

La plupart de ces besoins peuvent être satisfaits avec une commande adéquate du convertisseur raccordé au réseau. Par conséquent, les sources d'énergie renouvelables utilisent des convertisseurs d'électronique de puissance pour adapter les paramètres de la puissance générée à ceux exigés par le réseau [19].

L'une des stratégies de commande les plus utilisées pour la production décentralisée de l'énergie est basée sur la commande par orientation de la tension en utilisant un régulateur pour le bus continu ainsi qu'un régulateur pour l'injection des courants dans le réseau [20].

III.2. Configuration du système

La structure de l'étage d'adaptation pour la connexion du générateur PV au réseau est représentée par la figure III.1.

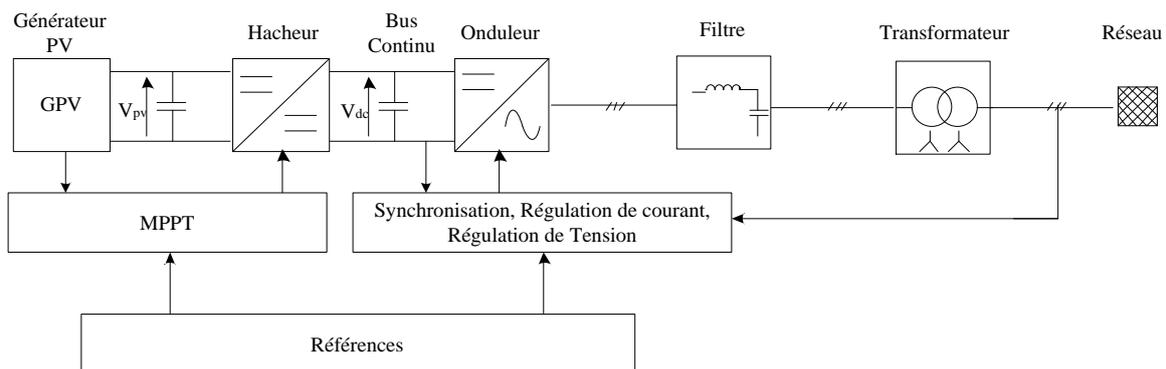


Figure III.1 : Diagramme général d'un système PV connecté au réseau [20].

Toute la puissance produite par le panneau est transférée au réseau électrique. Le hacheur est relié directement au générateur PV, il permet d'élever la tension pour arriver à la valeur imposée au bus continu. Ce dernier est relié à un onduleur commandé en courant afin d'injecter celui-ci avec un facteur de puissance unitaire dans le réseau. Un filtre est utilisé à la sortie de l'onduleur afin de réduire les distorsions de courant et de tension [20].

L'objectif de cette commande est de pouvoir contrôler les puissances active et réactive fournies au réseau par une régulation du courant [22]. La commande nécessite également la régulation de la tension du bus continu et une synchronisation des tensions de sortie de l'onduleur avec celles du réseau.

III.3. Stratégie de commande

III.3.1. Synchronisation avec le réseau

Pour pouvoir connecter un système au réseau, la tension de sortie de l'onduleur doit avoir la même fréquence que celle du réseau pour chacune des trois phases. Ceci peut se faire en déterminant l'angle de phase de la tension à partir d'une mesure directe du réseau [21].

La méthode choisie est à base de PLL (Phase Locked Loop), elle produit un signal de sortie qui synchronise en phase et en fréquence le signal d'entrée en utilisant une boucle de régulation [23]. Le processus de synchronisation se fait en temps réel ce qui amène la boucle à fonctionner constamment [21].

a. Principe de la PLL :

Le principe de la PLL est basé sur l'orientation de la tension du réseau suivant l'axe d, ceci revient à annuler l'angle entre la composante de la tension d'axe direct et la tension mesurée ce qui entraîne l'annulation de la composante en quadrature. Ce principe est représenté dans la figure ci-dessous :

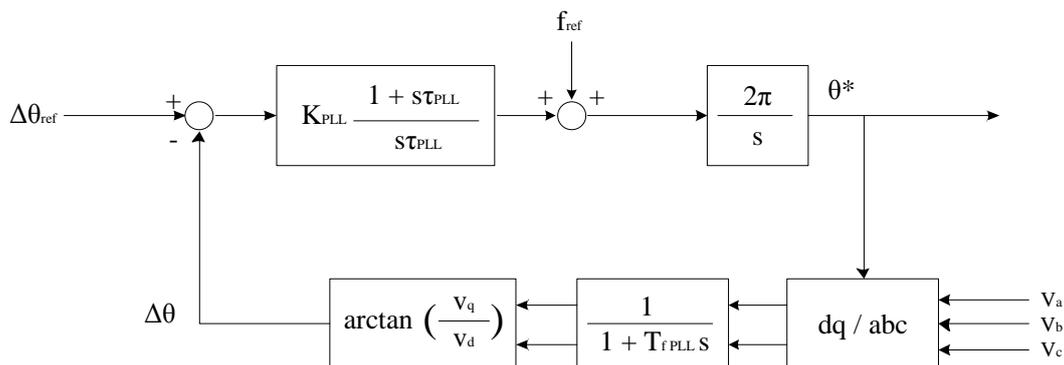


Figure III.2 : Boucle de Contrôle de la PLL [22].

Puisque la valeur de V_q est faible, le terme $\arctan\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \approx \frac{V_q}{V_d}$ se comporte linéairement et $\frac{V_q}{V_d} \approx \Delta\theta$. Ainsi, la PLL peut être considérée comme une commande linéaire pour des fins de modélisation.

Pour avoir le vecteur de la tension aligné sur l'axe direct on pose $\Delta\theta_{ref}=0$. Si l'angle de la tension est supérieur à l'angle de l'axe d, la vitesse angulaire du repère d-q doit être augmentée. La figure III.3 représente les différentes variables.

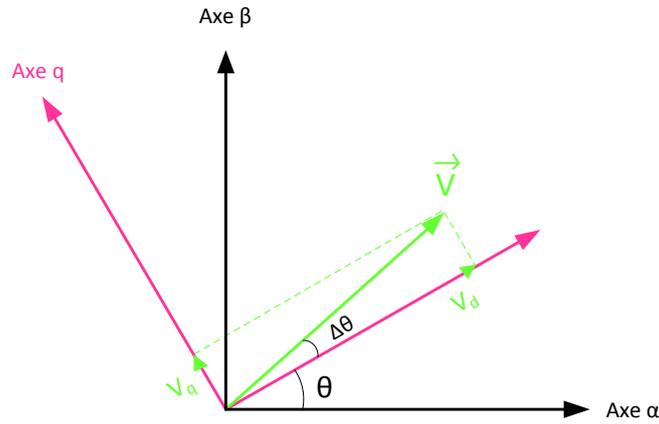


Figure III.3 : Représentation du vecteur V dans le repère dq

Une fréquence d'anticipation f_{ref} (feed forward frequency) de 50Hz est utilisée pour réduire le temps de réponse de la PLL [22].

b. Dimensionnement du régulateur

Dans la forme générale, le régulateur PI est défini comme suit :

$$H_{PI}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \tag{III. 1}$$

La boucle de régulation est donnée par la figure III.4

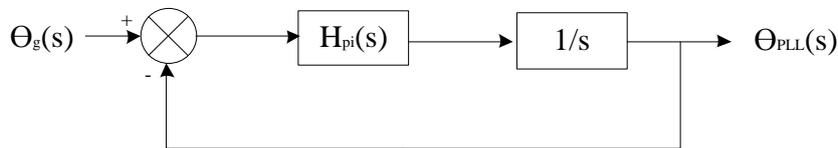


Figure III.4 : Modèles de la PLL

La fonction de transfert en boucle fermée avec l'angle du réseau en entrée et l'angle de la PLL en sortie est donnée par :

$$M(s) = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_i}}{s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{III. 2}$$

Par identification :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}} \\ \xi = \frac{K_p}{2\omega_n} = \frac{\sqrt{K_p T_i}}{2} \end{cases} \quad (III.3)$$

Les paramètres de la boucle du second ordre doivent satisfaire :

$$\begin{cases} \omega_0 \geq 2\pi f_0 \\ \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (III.4)$$

Le choix d'une basse fréquence assure un bon filtrage mais une valeur élevée permet de trouver rapidement la phase et d'assurer le suivi.

III.3.2. Régulation en courant

Le but de cette commande est d'imposer les valeurs des puissances active et réactive injectées au réseau.

Soit la figure de la connexion au réseau

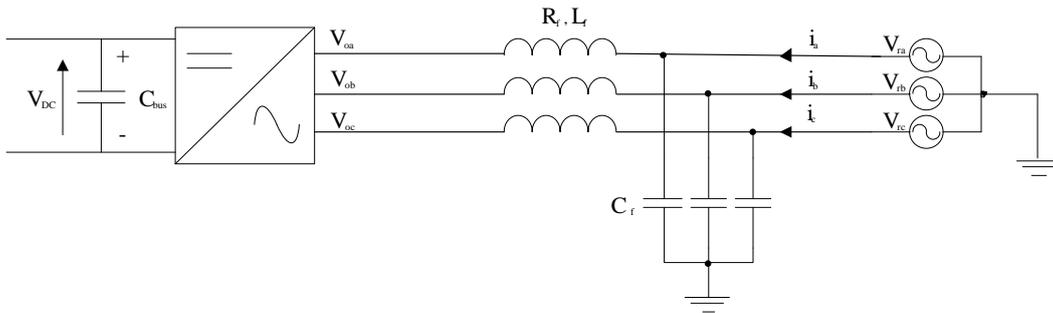


Figure III.5 : Représentation de la connexion Onduleur- Réseau

Dans le repère de Park nous avons:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - L_f \omega i_q + V_{do} \\ V_{qr} = R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + L_f \omega i_d + V_{qo} \end{cases} \quad (III.5)$$

Avec :

$V_{o,k}$: Tension à la sortie de l'onduleur dans le repère de Park

$V_{r,k}$: Tension du réseau dans le repère de Park

i_k : Courant de la ligne dans le repère de Park

R_f, L_f : Valeur de l'impédance de la partie inductive du filtre

Les termes $L_f \omega i_{dq}$ représentent les termes de couplage entre les axes d et q, ceci rend la régulation très complexe. Ainsi, on procède à une méthode de découplage par compensation qui consiste à ajouter une précommande à la boucle de régulation interne [25].

Le contrôle des courants suivant les axes d et q permet de contrôler les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rd}i_{dref} + V_{rq}i_{qref}) \\ Q_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rq}i_{dref} - V_{rd}i_{qref}) \end{cases} \quad (III. 7)$$

Puisqu'on utilise une PLL, la composante en quadrature de la tension du réseau sera nulle ($V_{rq} = 0$), le système devient :

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rd}i_{dref}) \\ Q_{ref} = -\frac{3}{2} (V_{rd}i_{qref}) \end{cases} \quad (III. 8)$$

Où Q_{ref} représente la puissance réactive de référence qui permet d'avoir i_{qref} . Elle est égale à la puissance réactive requise par la charge. Tandis que i_{dref} est donnée par la boucle de régulation de la tension du bus continu.

On peut déduire du système (III.8) que le courant i_{dr} est une image directe de la puissance active alors que le courant i_{qr} est une image de la puissance réactive [26].

Pour ce qui est de la boucle de régulation des courants, il y a deux régulateurs : un pour le courant suivant l'axe d et l'autre pour le courant suivant l'axe q. Ces deux régulateurs fonctionnent pour le même modèle et sont identiques, il n'est donc nécessaire d'estimer les paramètres que d'un seul régulateur.

La boucle de commande du courant, suivant l'axe d, peut être modélisée comme suit :

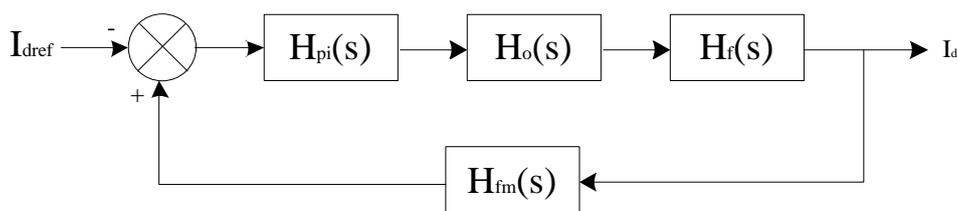


Figure III.6 : Boucle de régulation du courant d'axe direct

Dans ce modèle, toutes les non linéarités ainsi que le bruit de la tension de sortie sont ignorés pour des fins de simplification. Les blocs de la figure III.6 sont décrits comme suit :

H_o : Cette fonction de transfert représente le temps de retard provoqué par l'onduleur (T_o), ce retard est égale à 1.5 fois le temps d'échantillonnage

$$H_o(s) = \frac{1}{1 + sT_o} \tag{III. 9}$$

H_{fm} : Représente la fonction de transfert du filtre de mesure qui engendre un temps de retard T_{fm} . Il est utilisé dans un système pratique pour réduire les bruits indésirables dus à la mesure. C'est un filtre digital du premier ordre.

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \tag{III. 10}$$

H_f : Représente la fonction de transfert du filtre de sortie (partie inductive), elle décrit les changements du courant de sortie à une variation de la tension d'entrée de l'onduleur.

$$H_f(s) = \frac{1/R_f}{1 + sT_f} \tag{III. 11}$$

Avec

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} \tag{III. 12}$$

La constante de temps T_f caractéristique de la partie inductive du filtre de sortie de l'onduleur, est dominante par rapport aux autres constantes de temps (du filtre de mesure et de l'onduleur). Ainsi, on peut réduire le modèle en additionnant les constantes de temps petites.

On obtient le modèle suivant :

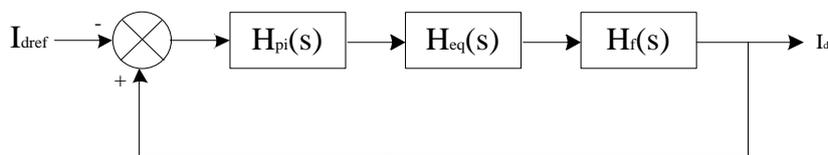


Figure III.7 : Boucle de régulation réduite du courant

Avec :

$$H_{eq}(s) = \frac{1}{1 + T_{eq}s} \tag{III. 13}$$

Et le temps de retard équivalent :

$$T_{eq} = T_o + T_{fm} \tag{III. 14}$$

Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$H_{BO}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \frac{1}{1 + T_{eq} s} \frac{1/R_f}{1 + T_f s} \quad (III. 15)$$

Afin de compenser le pôle de temporisation élevée, le régulateur PI est utilisé. Ceci conduit à un temps d'intégration qui est égal à la grande constante de temps. Ce qui donne la fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = \frac{\frac{K_p}{R_f}}{T_i s(1 + sT_{eq}) + \frac{K_p}{R_f}} \quad (III. 16)$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{T_{eq}} s + \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \quad (III. 17)$$

C'est une fonction du second ordre de la forme :

$$M(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (III. 18)$$

Par identification :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_i R_f}{K_p T_{eq}}} \end{cases} \quad (III. 19)$$

Le facteur d'amortissement ξ est pris égal à $1/\sqrt{2}$ pour avoir le meilleur temps de réponse avec un dépassement minimal.

Ainsi, on obtient :

$$\begin{cases} T_i = T_f \\ K_p = \frac{T_i R_f}{2T_{eq}} \end{cases} \quad (III. 20)$$

III.3.3. Régulation de la tension du bus continu

La régulation de cette tension s'effectue en absorbant ou en fournissant de la puissance active au le réseau.

Suite à un écart entre $V_{dc_ref}^2$ et V_{dc}^2 , la puissance P_{ref} s'ajoute à la puissance active fluctuante et donne lieu à un courant fondamental actif (i_{dref}) corrigeant ainsi la tension V_{dc} .

Le contrôleur de la tension se trouve dans la boucle externe. La sortie de ce régulateur donne une référence pour le contrôleur du courant suivant l'axe d dans la boucle interne.

La boucle de commande de la tension peut être modélisée comme suit :

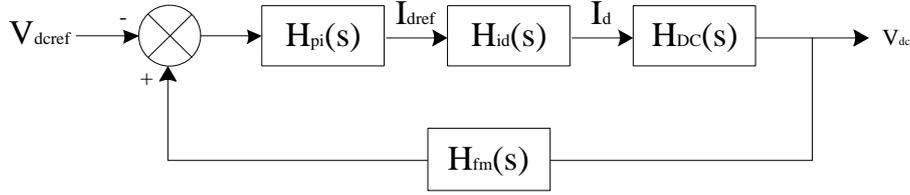


Figure III.8 : Boucle de régulation de la tension du bus continu

Les blocs de la figure sont décrits comme suit :

H_{fm} : Représente la fonction de transfert du filtre de mesure

Afin de réduire les bruits indésirables dus à la mesure on utilise un filtre digital du premier ordre ce qui engendre un retard T_{fm} .

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (\text{III. 21})$$

H_{id} : Représente la fonction de transfert du contrôleur du courant suivant l'axe d.

Afin de pouvoir utiliser le critère du symétrique optimum, le système doit être approximé par un système du premier ordre. Ceci peut être justifié en sachant que la boucle de contrôle externe doit être plus lente que la boucle de contrôle interne.

On rappelle la forme de la fonction de transfert de la boucle interne :

$$M(s) = K \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0} s + 1} \quad (\text{III. 22})$$

Pour des fréquences inférieures à ω_0 :

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 \ll 1 \quad (\text{III. 23})$$

Et le système peut être approximé par un système du premier ordre :

$$H_{id}(s) = \frac{1}{\frac{2\xi}{\omega_0} s + 1} = \frac{1}{4\xi^2 T_{eq} s + 1} \quad (\text{III. 24})$$

$$H_{id}(s) = \frac{1}{1 + 2T_{eq} s} \quad (\text{III. 25})$$

H_{DC} : Représente la fonction de transfert entre le courant d'axe d et la tension du bus continu. Elle est donnée par :

$$H_{DC}(s) = K_{DC} \frac{1}{C_{DC}s} \quad (\text{III. 26})$$

La constante K_{DC} relie le courant d'axe d au courant continu. Cette relation peut être retrouvée en considérant la conservation de la puissance et la relation entre la tension du bus continu et la tension suivant l'axe d.

Conservation de la puissance :

$$V_{DC}I_{DC} = \frac{2}{3}V_dI_d \quad (\text{III. 27})$$

Et la tension à la sortie de l'onduleur :

$$V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}V_{DC}r \quad (\text{III. 28})$$

$$V_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}V_{ab} = \frac{1}{2}V_{DC}r \quad (\text{III. 29})$$

En combinant les relations (IV.27) et (IV.29) on trouve K_{DC}

$$K_{DC} = \frac{I_{DC}}{I_d} = \frac{3V_d}{2V_{DC}} = \frac{3}{4}r \quad (\text{III. 30})$$

Où r représente le rapport de modulation.

Le système de contrôle de la tension contient deux retards qui sont du même ordre de grandeur, on peut donc les additionner pour avoir une seule constante de temps. Ainsi, le système va satisfaire le critère de l'optimum symétrique où il y a un intégrateur, plusieurs constantes de temps de retard et un régulateur PI. La fonction de transfert en boucle ouverte du système de commande de la tension est donnée par :

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + (2T_{eq} + T_{fm})s} \quad (\text{III. 31})$$

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + Ts} \quad (\text{III. 32})$$

qAvec

$$T = 2T_{eq} + T_{fm} \quad (\text{III. 33})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i T s^3 + C_{DC} T_i s^2 + K_p K_{DC} T_i s + K_p K_{DC}} \quad (\text{III. 34})$$

Cette fonction de transfert satisfait le critère de l'optimum symétrique, ainsi selon ce critère on a :

$$\begin{cases} T_i = 4T \\ K_p = \frac{1}{2} \frac{C_{DC}}{K_{DC} T} \end{cases} \quad (\text{III. 35})$$

La structure de la commande totale de la connexion au réseau est représentée dans la figure (III.9) ci-dessous.

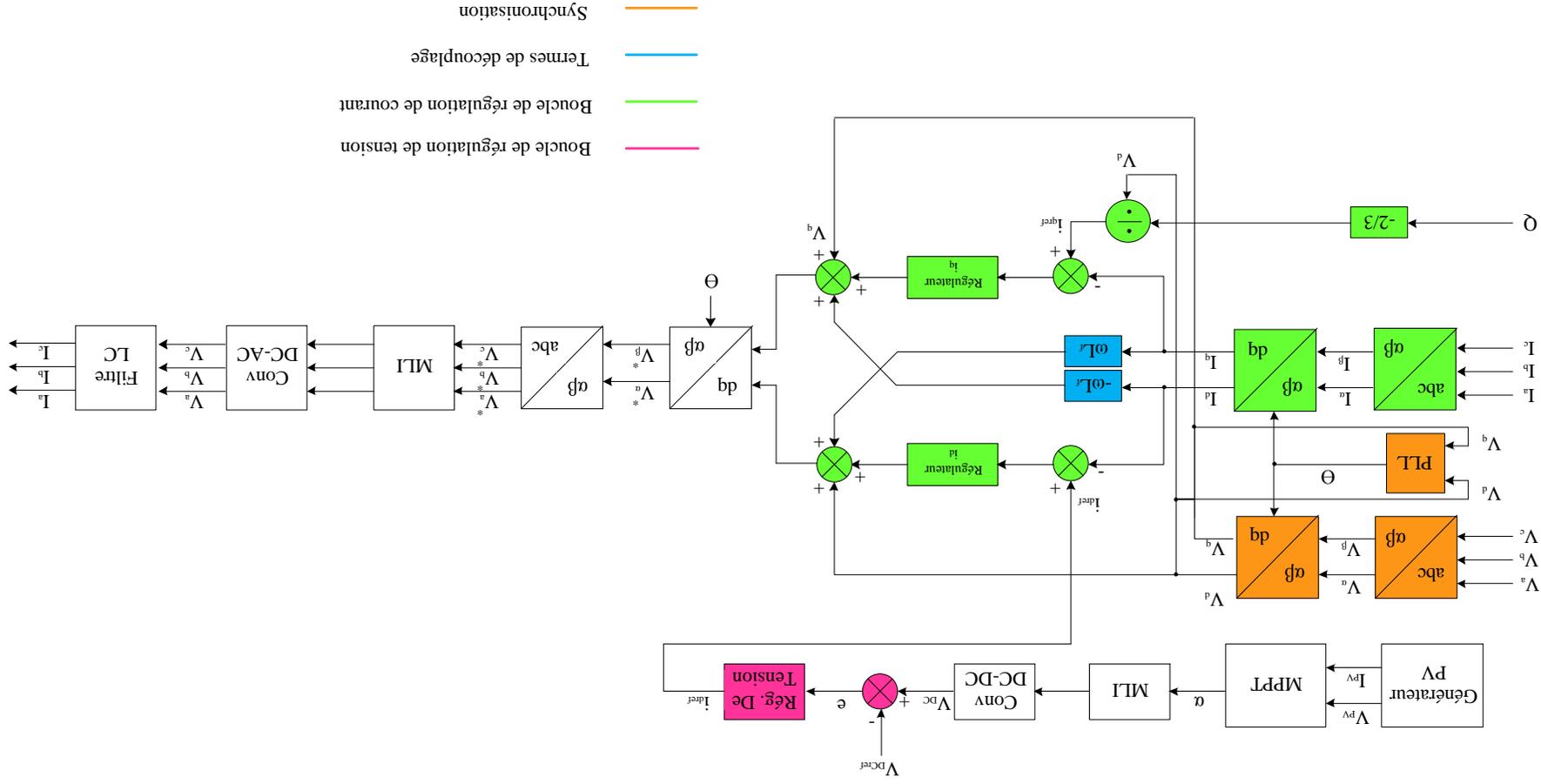


Figure III.9 : Système de contrôle du système connecté au réseau

III.4. Résultats de simulation

a- Synchronisation avec le réseau

Afin d'effectuer la synchronisation, on utilise la boucle illustrée par la figure III.2 en prenant $\Delta\theta_{\text{ref}} = 0$ et $f_{\text{ref}} = 50\text{Hz}$ (fréquence du réseau). Les résultats obtenus sont illustrés par la figure ci-dessous

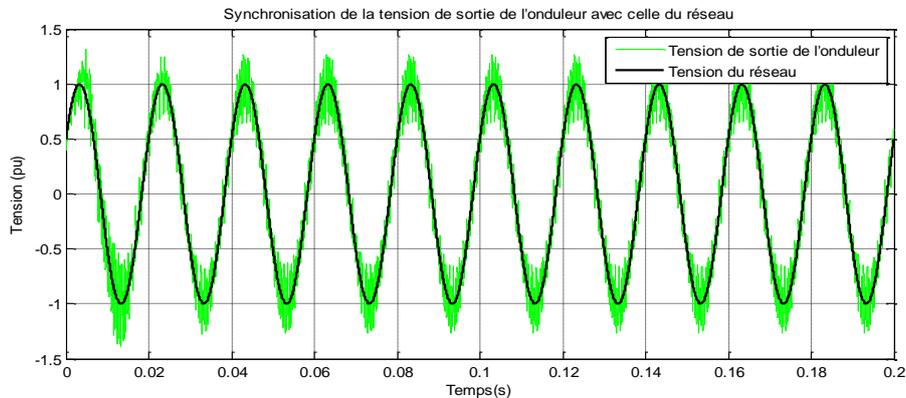


Figure III.10 : Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau

On voit bien que la tension délivrée par l'onduleur est synchronisée avec celle du réseau, ce qui montre l'efficacité de notre boucle PLL.

Dans la pratique, la fréquence du réseau n'est pas exactement égale à 50Hz, on admet une marge de variation de $\pm 2\text{Hz}$ (entre 48 et 52 Hz). On va tester notre PLL en prenant une fréquence du réseau égale à 45 Hz et en gardant la valeur $f_{\text{ref}} = 50\text{Hz}$. on obtient les résultats suivants :

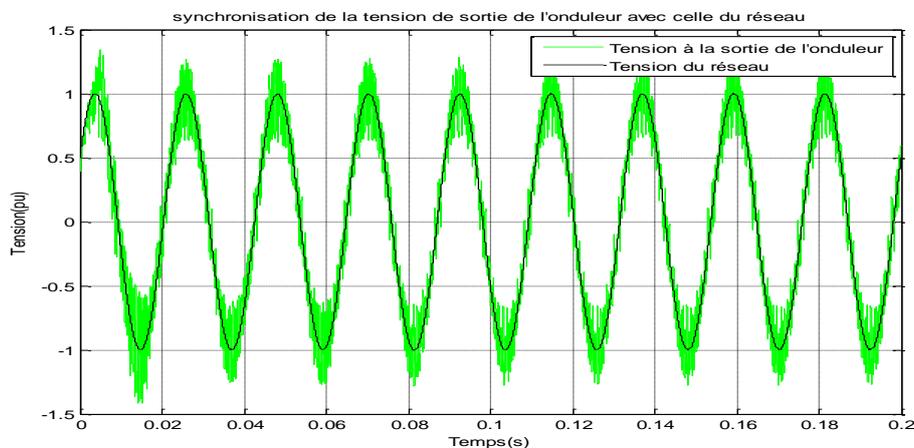


Figure III.11 : Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau
(pour une tension du réseau égale à 45Hz)

Ces résultats montrent la robustesse de notre PLL dans la poursuite de l'angle de phase puisque malgré le changement de la fréquence, les tensions sont synchronisées.

b- Régulations

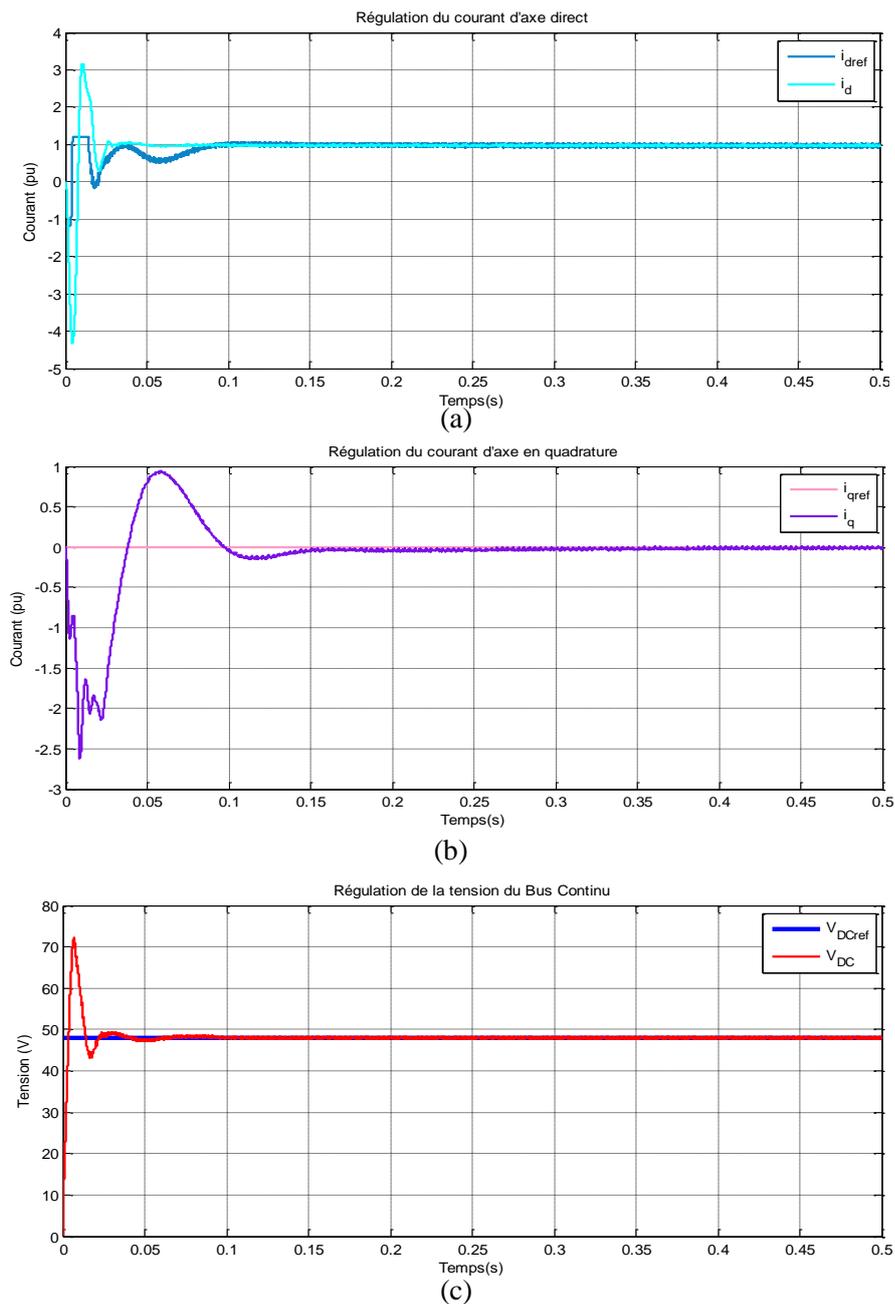


Figure III.12 : (a) Régulation du Courant d'axe d, (b) Régulation du Courant d'axe q,
(c) Régulation de la tension du Bus Continu

On voit bien que les grandeurs (Courants et Tension) suivent les valeurs de référence imposées ce qui prouve l'efficacité des régulateur PI utilisés dans l'annulation de l'erreur.

c- Écoulement de puissance

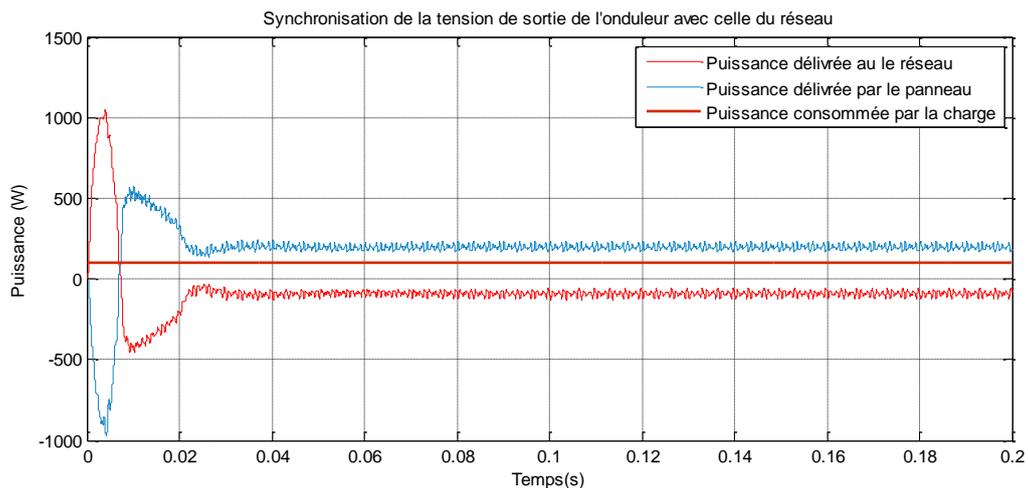


Figure III.13 : Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 100W.

Pour ce cas, nous avons connecté au réseau une charge qui consomme du 100 W, on voit que le générateur PV fournit toujours les 200 W. Comme la charge ne consomme pas la totalité de la puissance, c'est le réseau qui reçoit le reste, soit 100 W.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé la chaîne photovoltaïque et nous avons étudié la stratégie de commande nécessaire à la connexion au réseau. Cette commande est assurée par :

- La synchronisation par rapport à l'évolution des tensions du réseau qui a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.
- La régulation des courants de référence afin de pouvoir contrôler l'injection des puissances active et réactive en fonction des besoins de la charge.
- La régulation de la tension du bus continu

La validation des résultats est obtenue par les réponses des tensions, courants et puissances obtenus par simulation.

Conclusions Générales et Perspectives

Le monde de l'énergie photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de l'industrie connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour cette source d'énergie. Une industrie majeure est en cours de constitution comme le montre l'analyse de la situation et des évolutions. De façon intéressante et exemplaire, les possibilités d'innovation sont très grandes, portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières et les technologies de convertisseurs existantes, et d'en consolider de nouvelles.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome puis connecté au réseau. On a donc, commencé par une présentation de l'état de l'art des multiples technologies associées aux constituants d'une chaîne photovoltaïque dans le but d'étudier le fonctionnement de ces systèmes.

Pour le faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des différents modèles des composants constituant le système. Les modélisations considérées ont été choisies de manière à régir le fonctionnement de chaque équipement, en optant pour des modèles à la fois simples et performants.

Dans le chapitre II, nous avons présenté, en appréhendant de façon complète les problèmes de fonctionnement à un point optimal, l'association d'une source de stockage efficace pour le fonctionnement en mode isolé. Les modèles des différents composants déjà présentés en détail dans le chapitre I, ont été repris pour l'élaboration du modèle entier de la chaîne. Nous avons garanti l'autonomie du système grâce à une batterie d'appoint, et un régulateur qui lui est associé, afin d'assurer l'alimentation de la charge, en manque ou en absence de production PV. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité du système de gestion d'énergie utilisé, qui a assuré l'harmonisation de l'écoulement de puissance entre générateur photovoltaïque, charge, et système de stockage dans différentes conditions d'éclairement. La mise en place d'une boucle de régulation de tension moyennant

un convertisseur DC/DC entre la batterie et le bus continu nous a permis de stabiliser ce dernier et éviter les fluctuations.

Quant au chapitre III, Il a été consacré à la connexion au réseau de notre chaîne de production PV. On a pu constater que la commande de la connexion au réseau est complètement différente de la commande en mode isolé. En effet, pour ce mode on s'est intéressé principalement à la puissance injectée dans le réseau, la synchronisation nous a permis de ne pas déformer les tensions du réseau, la régulation des courants a servi au contrôle des puissances actives et réactives et enfin la régulation de la tension du bus continu a maintenu la tension constante à l'entrée de notre onduleur.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives que nous présentons ci-dessous :

- Le rendement maximal théorique des cellules de troisième génération obtenu en laboratoire tourne autour de 45%, ce qui fait rêver les industriels autant que les chercheurs. Les filières : multi-jonctions, organiques, et à concentration... représentent une importante piste à explorer afin de rentabiliser le photovoltaïque.
- Un travail approfondi pourra être consacré à l'étage de conversion entre les panneaux PV et le bus continu afin d'explorer de nouvelles structures de convertisseurs présentant des pertes moins importantes et donc des rendements plus élevés.
- Au niveau du stockage, la technologie lithium-ion est à l'heure actuelle prometteuse en raison d'une meilleure tenue en cyclage ainsi que de meilleurs rendements annoncés en charge comme en décharge. Cette piste est intéressante à explorer notamment, pour les systèmes autonomes.
- Pour la production photovoltaïque connectée au réseau, les études actuelles prouvent que la rentabilité de cette dernière sera atteinte lors de l'association d'un système de stockage approprié et une bonne gestion de puissance qui assurera la constance de la puissance fournie.

- [1] Daniel LINCOT, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte N° 344-345, Janvier-Février 2007, France.
- [2] Ziadi Zakaria, « Commande hybride d'une maison à énergie positive », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.
- [3] Cédric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [4] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [5] Ludovic PROTIN, Stéphan ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [6] Anne LABOURET, « Cellules Solaires, Les bases de l'énergie photovoltaïque », Éditions techniques et scientifiques françaises, Paris, 2010.
- [7] Anne Labouret, Michel Villos : « énergie solaire photovoltaïque », Dunod, Paris, 2005
- [8] Ahmed-Mahmoud Ashraf, « Power conditioning unit for small scale hybrid PV-Wind generation system », thesis of doctor of philosophy, School of Engineering and Computing Sciences Durham University, 2010.
- [9] Snehasish Pal, Suvarun Dalapati, « Digital simulation of two level inverter based on space vector pulse width modulation », Indian Journal Of Science and Technology, Vol. 5 No.4, India, April 2012
- [10] Arjav Harjai, Abhishek Bhardwaj, Mrutyunjaya Sandhibigraha, « Study of maximum power point tracking (MPPT) techniques in a solar photovoltaic array», Bachelor of Technology, National Institute of Technology, India, 2009
- [11] Caisheng Wang et al « Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System», IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 23, NO. 3, September 2008.
- [12] A.TSAMDA, K.MAHMOUD., « Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques », Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Juin 2007
- [13] Rafika DRARENI, Zahra OUAHRANI, « Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC », Projet de fin d'études, ENP, 2009.

- [14] Yaël Thiaux, « Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides. Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion », Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de CACHAN, Juillet 2010.
- [15] Stéphane PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [16] Ionel Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Université du Havre, Décembre 2005.
- [17] N.Achaïbou, « Introduction à l'Étude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque », Revue des Énergies Renouvelables, Valorisation Tome 1, Décembre 1999.
- [18] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, « Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. », Stavanger, Norway, May 2009.
- [19] M. BOBROWSKA-RAFAL, K.RAFAL, M. JASINSKI, M.P. KAZMIERKOWSKI, « Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters», Bulletin of the polish academy of sciences Vol, 59, No 4, Warsaw, 2011.
- [20] N. Hamrouni, A.Chérif, « Modelling and control of a grid connected photovoltaic system», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°3, Tunis, 2007
- [21] Jim Ögren, «PLL design for inverter grid connection», UPPSALA Universitet, 2011.
- [22] Tarjei Midtsund, «Control of Power Electronic Converters in Distributed Power Generation Systems», Master Of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [23] Svein Erik Evju, « Fundamentals of Grid Connected Photo-Voltaic Power Electronic Converter Design », Master Of Science In Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2007.
- [24] Yann PANKOW, « Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2004.

[25] Farid BOUCHAFAA, « Étude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC, Application à la conduite d'une MSAP », Thèse de Doctorat, ENP, 2006.

[26] Lyes ABBASSEN, « Étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Thèse de magister, UMMTO, 2011