

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

École Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
CHIRI Meriem

Intitulé

Commande d'un système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau

Directeur(s) du mémoire :

MO. MAHMOUDI
EM. BERKOUK

Professeur
Professeur

ENP
ENP

ENP 2012

Remerciements

Au terme de ce travail,

Nous adressons nos remerciements à Monsieur Mohand Oualhadj MAHMOUDI et à Monsieur Abdelmadjid BERKOUK, Professeurs à l'École Nationale Polytechnique, pour l'appui 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.

*A mes parents, dont l'amour est l'essence de ma réussite,
A la mémoire de mes grands-parents, qui avaient tant voulu
être présents ce-jour,
A Barhouma sans qui je n'aurais pas été là aujourd'hui,
A Mamou que j'adore,
A Minou et Gavroche,
A ma famille,
A mes amis.*

Maryam

Table des Matières

Introduction

Générale.....	7
Chapitre I : Les constituants d'une chaîne photovoltaïque.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les panneaux photovoltaïques :.....	3
I.2.1. L'effet photovoltaïque.....	3
I.2.2. Les différentes technologies des cellules :.....	4
I.2.3. Schéma équivalent d'une cellule solaire :.....	5
I.2.4. Caractéristique Courant-Tension.....	6
I.2.5. Modélisation.....	8
I.2.6. Résultats de la simulation.....	10
I.3. Étage d'adaptation.....	11
I.3.1. Hacheur Buck-Boost :.....	12
I.3.2. Commande du hacheur.....	12
I.3.3. Résultats de simulation.....	14
I.4. Modélisation de l'onduleur :.....	16
I.4.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	17
I.4.2. Modélisation du filtre LC :.....	17
I.4.3. Résultats de simulation :.....	18
I.5. Conclusion.....	21
Chapitre II : Système Photovoltaïque en Mode Isolé.....	22
II.1. Introduction :.....	22
II.2. Présentation de la chaîne étudiée:.....	22
II.3. Le stockage dans un système de production d'énergie photovoltaïque autonome:..22	
II.3.1. Stabilisation du bus continu :.....	23
II.3.2. Résultats de simulation :.....	23
II.4. Conclusion :.....	26
Chapitre III : Système Photovoltaïque en Mode Connecté au Réseau.....	26
III.1.	
Introduction.....	Er

reur ! Signet non défini.

III.2. Configuration du système.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Stratégie de commande.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3.1. Synchronisation avec le réseau :.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3.2. Régulation en courant :.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3.3. Régulation de la tension du bus continu.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Résultats de simulation.....	39
III. Conclusion.....	42
Conclusion Générale.....	43

LISTE DES FIGURES :

Figure I. 1 : Structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque.....	3
Figure I. 2 : Principe de la conversion photovoltaïque [1].....	4
Figure I. 3 : Les différentes technologies photovoltaïques [2].	5
Figure I. 4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [4].....	5
Figure I. 5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle [5]	6
Figure I. 6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ [7]......	7
Figure I. 7 : Influence de la chaleur sur la caractéristique $I=f(V)$ [6]......	7
Figure I. 8 : Modélisation du panneau PV.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I. 9 : Influence de l'irradiation sur les caractéristique I-V et P-V	10
Figure I. 10 : Influence de la température les caractéristiques I-V et P-V.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I. 11: Hacheur Buck-Boost [10].....	12
Figure I. 12: Algorithme P&O [26]	13
Figure I. 13: Variations du rapport cyclique et de la tension aux bornes de la bobine (pour une fréquence de la porteuse égale à 104 Hz)	14
Figure I. 14: Puissance obtenue avec et sans MPPT pour différentes irradiations	15
Figure I. 15: Variations du courant, de la tension et de la puissance à l'entrée et à la sortie du hacheur en fonction de l'irradiation	16
Figure I. 16: Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux	17
Figure I. 17: Schéma monophasé équivalent du filtre LC	18
Figure I. 18: Allures de la tension compensée à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre	19
Figure I. 19: Analyse spectrale d'une tension compensée à la sortie de l'onduleur	20
Figure I. 20: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie du filtre LC.	20
Figure II. 1: Architecture du système SPAV étudié	22
Figure II. 2: Principe de la régulation du bus continu	23
Figure II. 3: Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge)	24
Figure II. 4: Tension du bus continu	24
Figure II. 5: Variation des puissances du panneau, de la batterie et de la charge pour différentes irradiations	25
Figure II. 6: Tension du Bus Continu pour différentes irradiations	26
Figure III. 1: Diagramme général d'un système PV connecté au réseau [48].	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 2: Structure générale d'une PLL	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 3: Boucle de Contrôle de la PLL [50].	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 4: Représentation du vecteur V dans le repère dq	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 6: Représentation de la connexion Onduleur- Réseau	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 7: Schéma équivalent du réseau électrique dans le repère dq.	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 8: Boucle de régulation du courant d'axe direct.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 9: Boucle de régulation réduite du courant	Erreur ! Signet non défini.

Figure III. 10: Boucle de régulation de la tension du bus continu Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 11: Système de contrôle du système connecté au réseau Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 12: Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau.. Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 13: Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau (pour une tension du réseau égale à 45Hz) Erreur ! Signet non défini.
Figure III.14: Régulation du courant d'axe direct Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 15: Régulation du courant d'axe en quadrature..... Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 16: Régulation de la tension du bus continu Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 17: Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 1000W..... Erreur ! Signet non défini.
Figure III. 18: Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 100W..... Erreur ! Signet non défini.

INTRODUCTION GENERALE

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. A 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'Energie « 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.

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 sera 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, parallèle et série-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 premiers 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-sinusoïdale.

Nous commencerons par la présentation de la chaîne photovoltaïque en donnant, les différentes modélisations énergétiques des divers éléments composant le système seront présentées. La complexité des modèles utilisés doit rester acceptable de façon à ne pas rallonger de manière excessive le temps de résolution du problème et réaliser un bon compromis entre simplicité et performance.

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. 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 chaîne entière connectée au réseau ainsi que les divers résultats obtenus.

Chapitre I : Les constituants d'une chaîne photovoltaïque

I.1. Introduction

La figure ci-dessous présente le schéma générale d'une chaîne photovoltaïque.

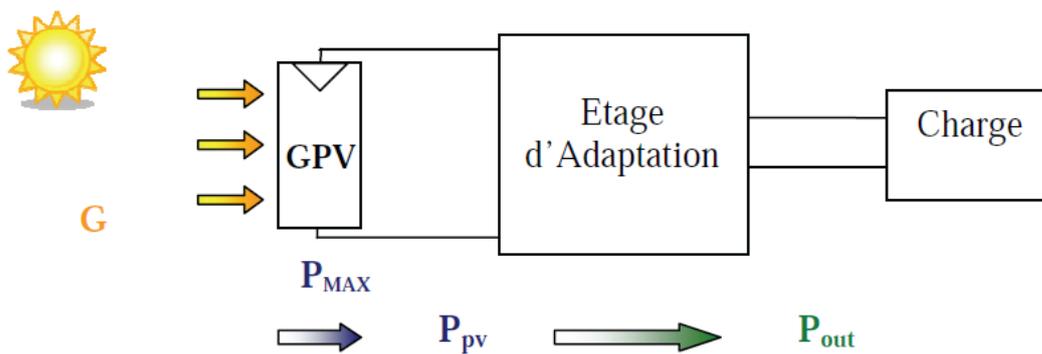


Figure I. 1 : Structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque

Comme la figure le montre elle est composée d'un générateur PV relié à un étage d'adaptation qui va permettre d'alimenter une charge soit en l'associant à un système de stockage, soit en évacuant la puissance produite sur le réseau. Ces deux modes de fonctionnement seront abordés dans les chapitres à venir.

I.2. Les panneaux photovoltaïques :

Le générateur PV est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique, et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible grâce à l'effet photovoltaïque.

I.2.1. L'effet photovoltaïque

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant.

L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique. Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants.

Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule. [1]

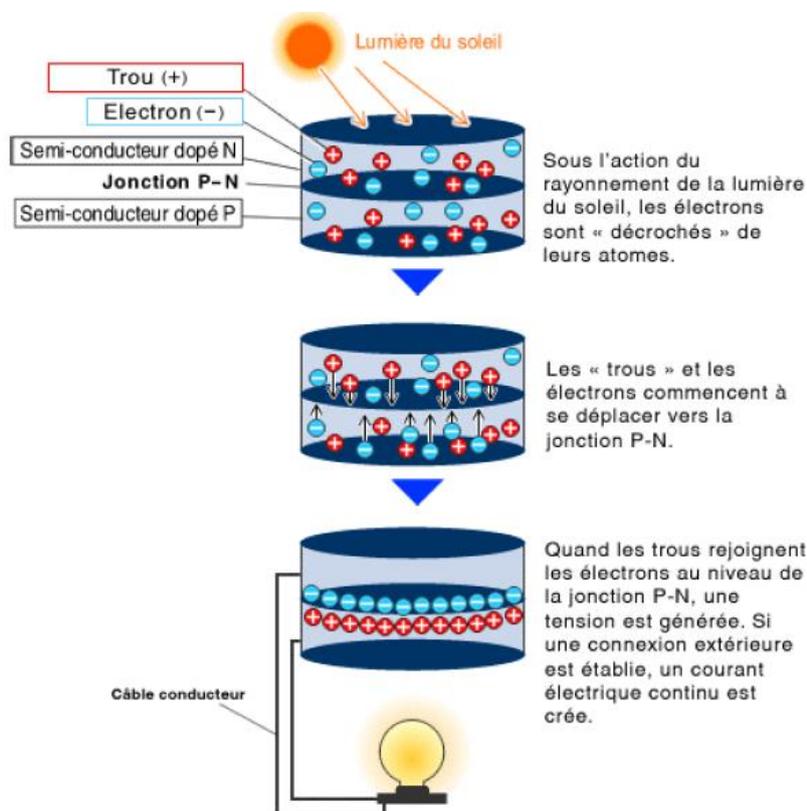


Figure I. 2 : Principe de la conversion photovoltaïque [1]

I.2.2. Les différentes technologies des cellules :

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. Le choix de la cellule se base sur le rendement de cette dernière.

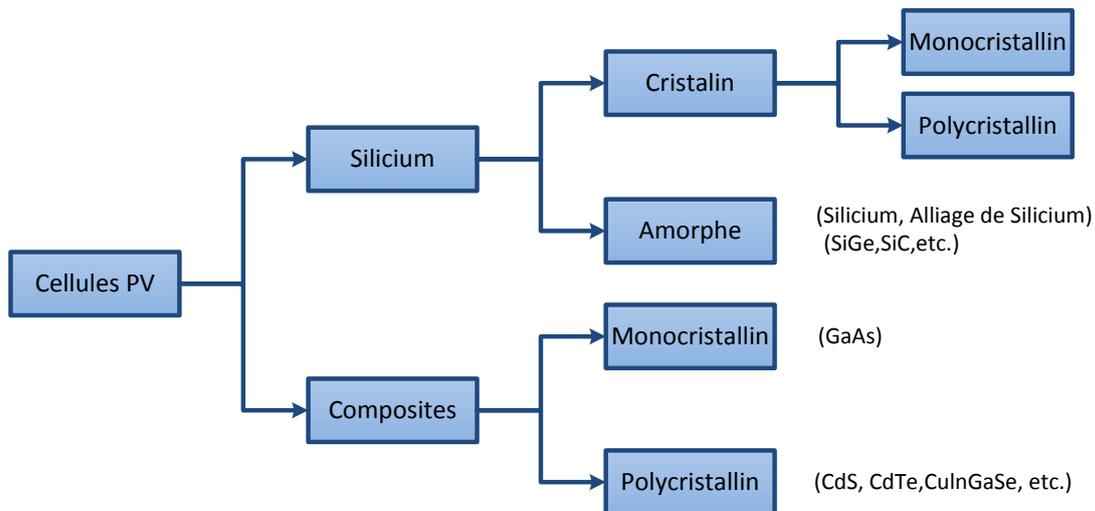


Figure I. 3 : Les différentes technologies photovoltaïques [2].

I.2.3. Schéma équivalent d'une cellule solaire :

Les paramètres du circuit équivalent d'un module PV sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique I-V.

Dans notre étude, on utilisera le modèle illustré par la figure II.1. Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes [25].

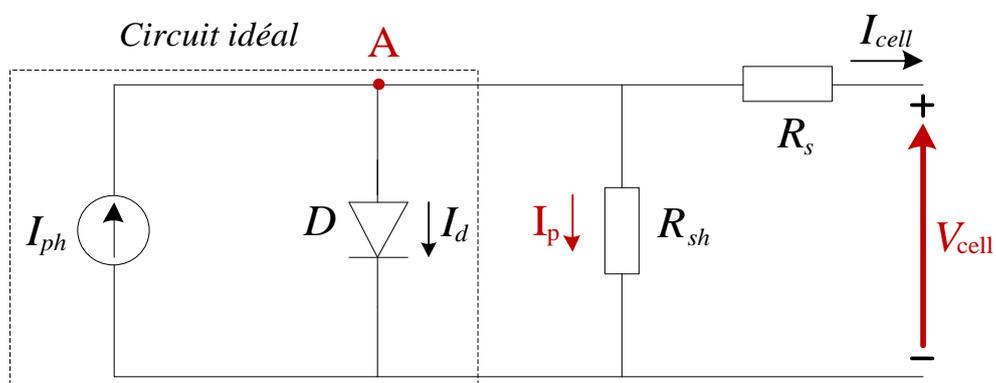


Figure I. 4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [3]

Ce modèle n'est pas universel, de nombreux auteurs ont proposé des modèles plus sophistiqués qui représentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque. En effet,

ces prototypes tiennent compte de certains phénomènes tels que la recombinaison des électrons et les courants de fuite liés aux diodes. Cependant, le modèle présenté offre un bon compromis entre simplicité et précision.

I.2.4. Caractéristique Courant-Tension

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.

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.

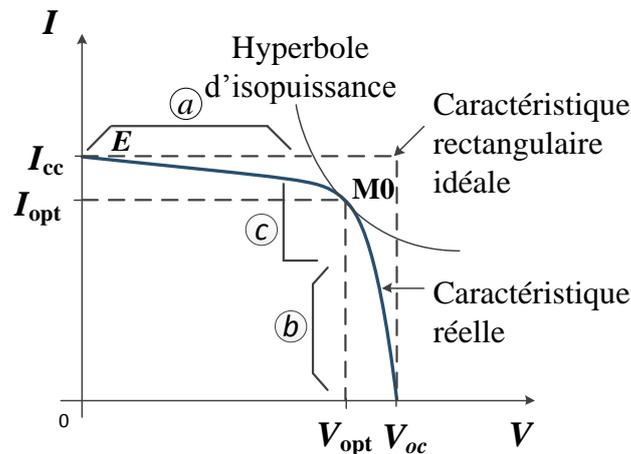


Figure I. 5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle [4]

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.

a. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

L'énergie lumineuse permet la séparation des paires électron-trou, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraîne une augmentation de paires électron-trou séparées. Le courant I_{ph} produit reste proportionnel à l'ensoleillement avec un courant d'obscurité inchangée et une légère augmentation de la tension en circuit ouvert. Au final, le point de puissance maximum du panneau se décale vers les puissances supérieures [5].

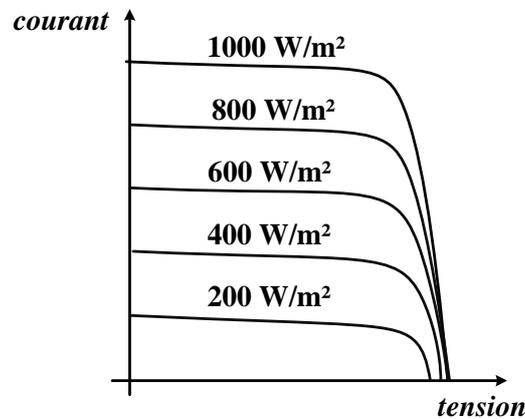


Figure I. 6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ [6].

b. Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

Bien qu'importante dans le comportement des cellules photovoltaïques, la température est souvent négligée, à savoir que sur 100% d'énergie incidente, une très faible proportion est réfléchi sur la surface du capteur, 10 à 15% en est extraite sous forme d'énergie électrique mais le reste de l'énergie incidente (soit plus de 80%) sera dissipé sous forme de chaleur, d'où l'augmentation de la température de la cellule dégradera ses performances si celle-ci n'est pas correctement ventilée.

Quand la température augmente, la tension en circuit ouvert de la cellule diminue alors que le courant de court-circuit n'augmente que légèrement, ce qui provoquera une baisse de puissance maximale de la cellule [5].

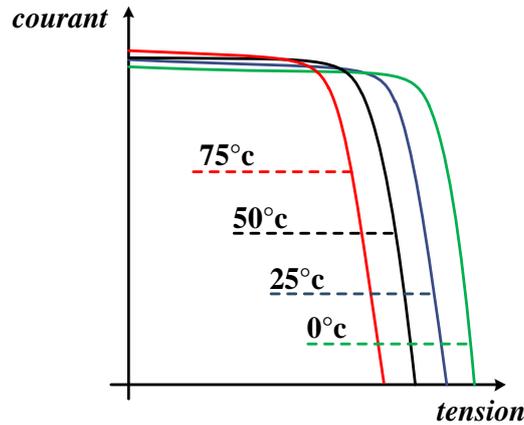


Figure I. 7 : Influence de la chaleur sur la caractéristique $I=f(V)$ [5].

I.2.5. Modélisation

Pour pouvoir élaborer le modèle du panneau PV, on utilise des équations de base tirées de la théorie des semi-conducteurs et du photovoltaïque. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [7]:

a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (I. 1)$$

Avec :

I_{cc} [A]	Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur)
K_i [A/K]	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau
T [K]	Température ambiante
G [W/m ²]	Irradiation sur la surface de la cellule
T_{ref} [K]	Température de référence (298 K)
G_{ref} [W/m ²]	Irradiation de référence (1000 W/m ²)

b. Le courant de saturation I_0

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.2)$$

Avec :

E_g [eV] Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium polycristallin à 25°C)

c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation:

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp \left(\frac{qV_{oc}}{N_s AKT} \right) - 1} \quad (I.3)$$

Où :

V_{oc} [V] Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur)

q [C] Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

N_s Nombre de cellules connectées en série

A Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$)

K [J/K] Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K)

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s AKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

d. Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s AKT} \right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

Où :

N_s Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

On peut faire la simulation du panneau PV en utilisant l'équation I.8 (figure), pour une température et une irradiation données à l'entrée on retrouve la tension et le courant à la sortie du panneau

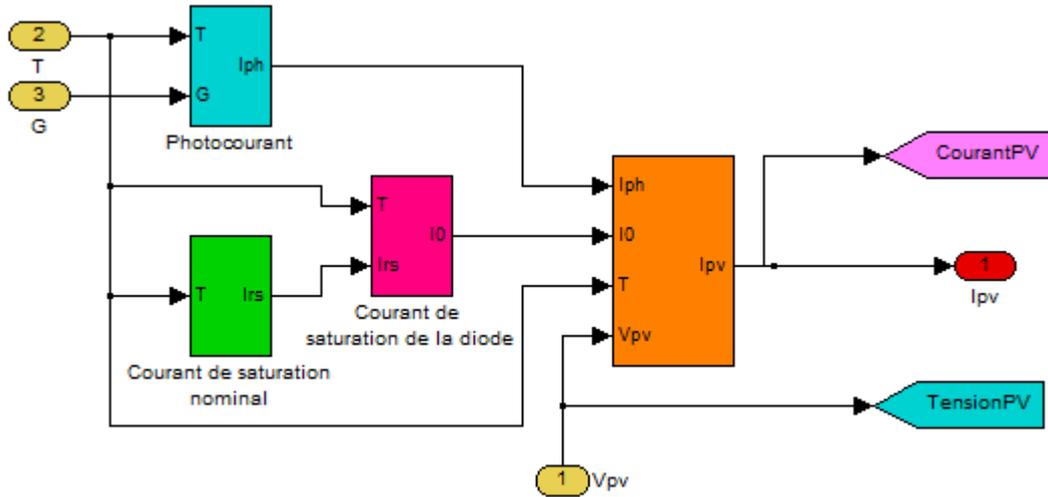


Figure I. 8 : Modélisation du panneau PV

Le panneau utilisé pour la modélisation est le KC2000GT, ses paramètres dans les conditions standards (25°C, 1000 W/m²) sont donnés par le constructeur :

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

Certaines informations nécessaires à la modélisation ne figurent pas sur cette fiche technique, il faut donc les tirer par les méthodes suivantes :

I.2.6. Résultats de la simulation

a. Influence de l'irradiation

D'après la figure II.4, 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 [25]. De plus, la puissance maximale augmente avec l'irradiation.

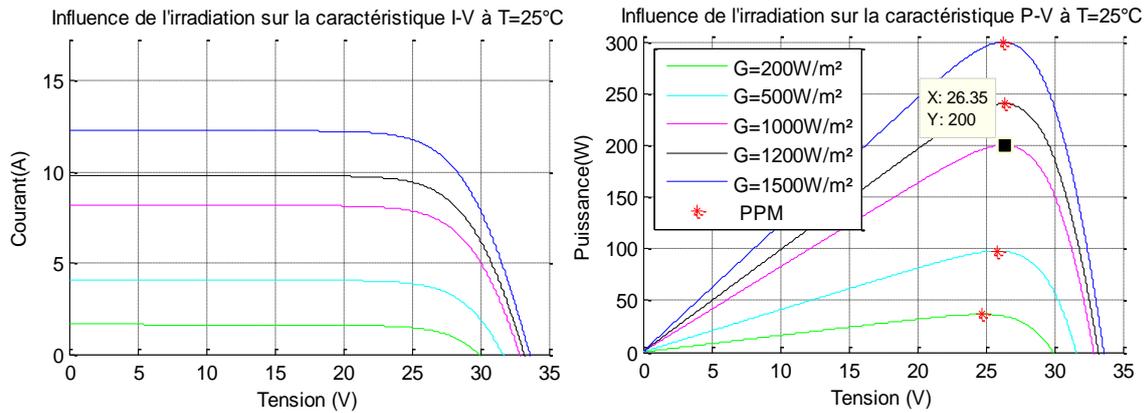


Figure I.9 : Influence de l'irradiation sur les caractéristique I-V et P-V

b. Influence de la température

D'après la figure II.5, 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

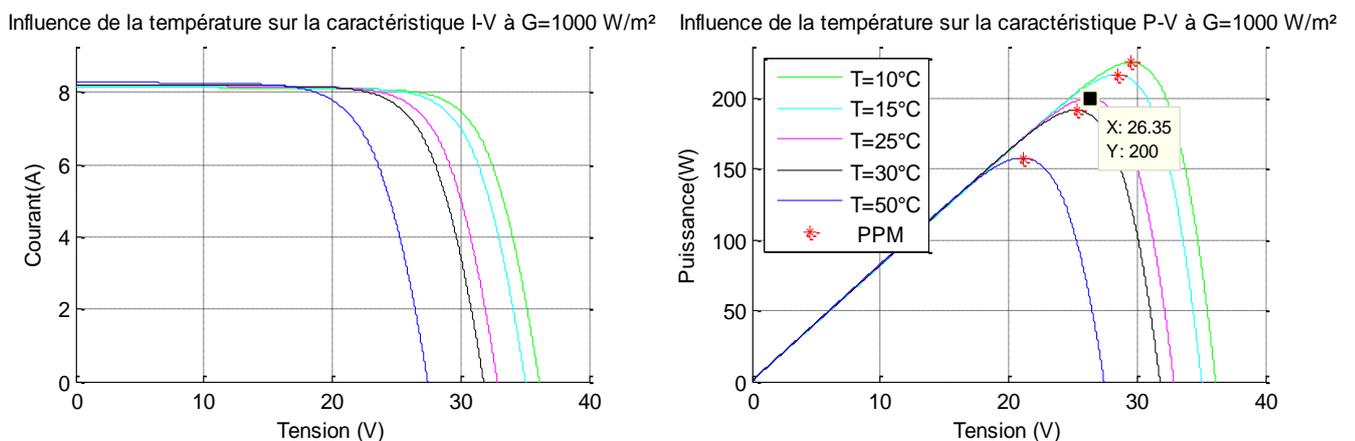


Figure I.10 : Influence de la température les caractéristiques I-V et P-V

On remarque à partir du tableau 1 et des courbes des figures II.5 et II.6 que le modèle développé concorde parfaitement avec les données expérimentales du constructeur dans les conditions standards (1000W/m², 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. Étage d'adaptation

L'alimentation de la charge par panneaux photovoltaïques peut se faire par couplage direct, mais cela impliquerait un fonctionnement au fil du soleil, à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Ce couplage implique donc l'acceptation d'une adaptation forcément non parfaite sur toute la plage de fonctionnement.

Il devient nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation afin d'adapter la puissance aux nécessités de l'installation, cet étage peut comprendre des convertisseurs (DC-DC, DC-AC) et/ou un système de stockage

I.3.1. Hacheur Buck-Boost :

Également appelé hacheur abaisseur- élévateur ou dévolteur-survolteur, il a la capacité de fournir une tension plus faible ou plus élevée que celle appliquée à son entrée et permet ainsi d'adapter la tension du générateur PV aux besoins de la charge. Cette adaptation est réalisée par variation du rapport cyclique α . Il est représenté par la figure I.11.

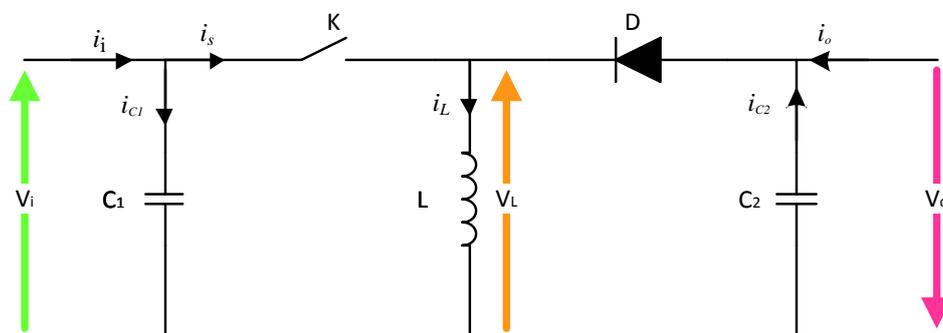


Figure I.11: Hacheur Buck-Boost [10]

I.3.2. Commande du hacheur

Un générateur PV possède une caractéristique I-V fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge.

Un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de piloter le hacheur, reliant le panneau PV à la charge de manière à fournir en temps réel le maximum de puissance.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à l'algorithme P&O pour sa simplicité et sa rapidité. Son principe est représenté dans la figure ci-dessous.

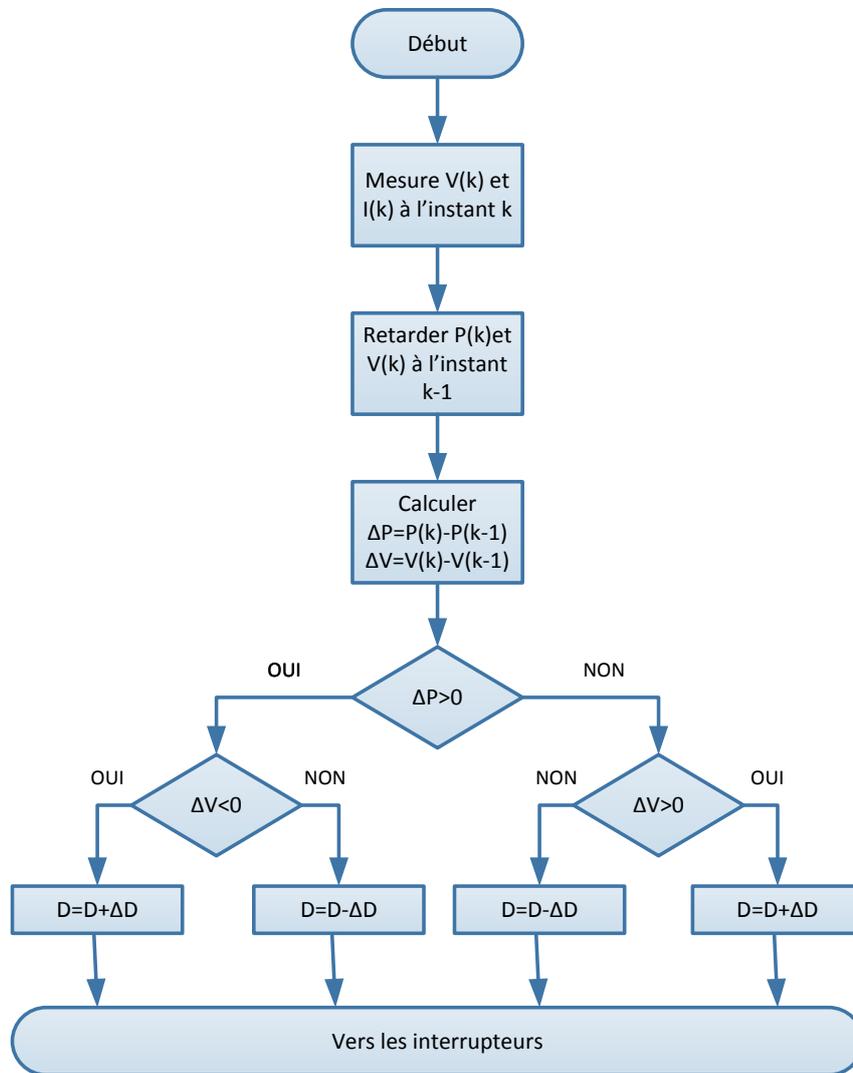


Figure I.12: Algorithme P&O [7]

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.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

I.3.3. Résultats de simulation

Pour valider l'algorithme MPPT choisi, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l'irradiation et sous une température constante égale à 25°C. On a pris une charge résistive de 10Ω

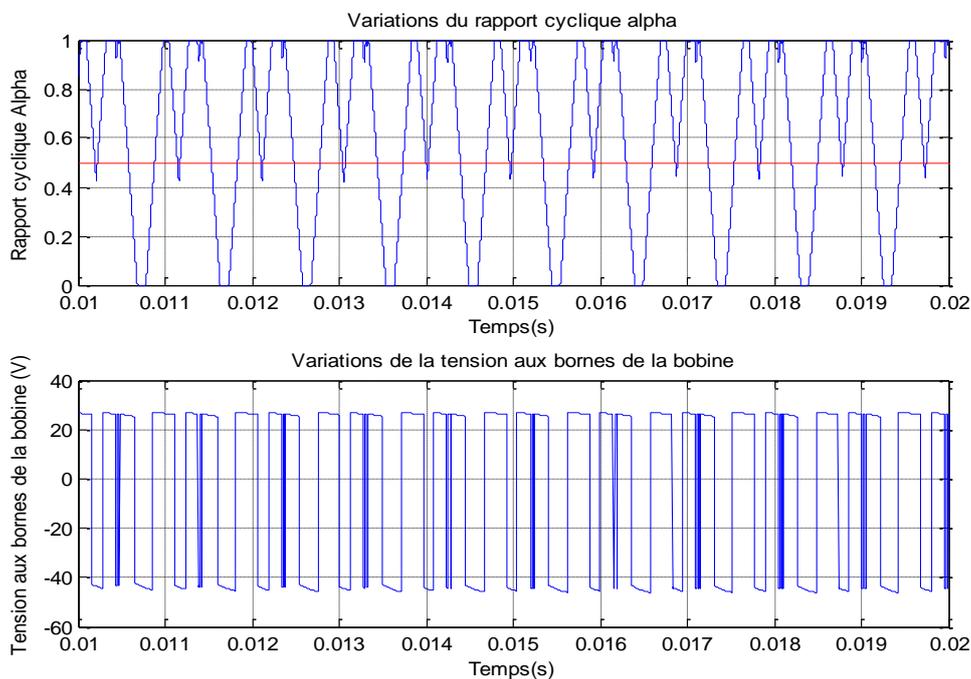


Figure I.13: Variations du rapport cyclique et de la tension aux bornes de la bobine (pour une fréquence de la porteuse égale à 10^4 Hz)

La valeur de α oscille beaucoup c'est l'un des inconvénients de l'algorithme P&O. quant à la tension aux bornes de la bobine, elle varie entre deux valeurs. Pour l'alternance positive (intervalle de 0 à αT) la tension est égale à la tension d'entrée du hacheur, soit 26 V et ceci confirme le bon fonctionnement du hacheur. Pour ce qui est de l'alternance négative

(intervalle αT à T), l'amplitude de la tension est égale à l'amplitude de la tension de sortie du hacheur, soit 44 V.

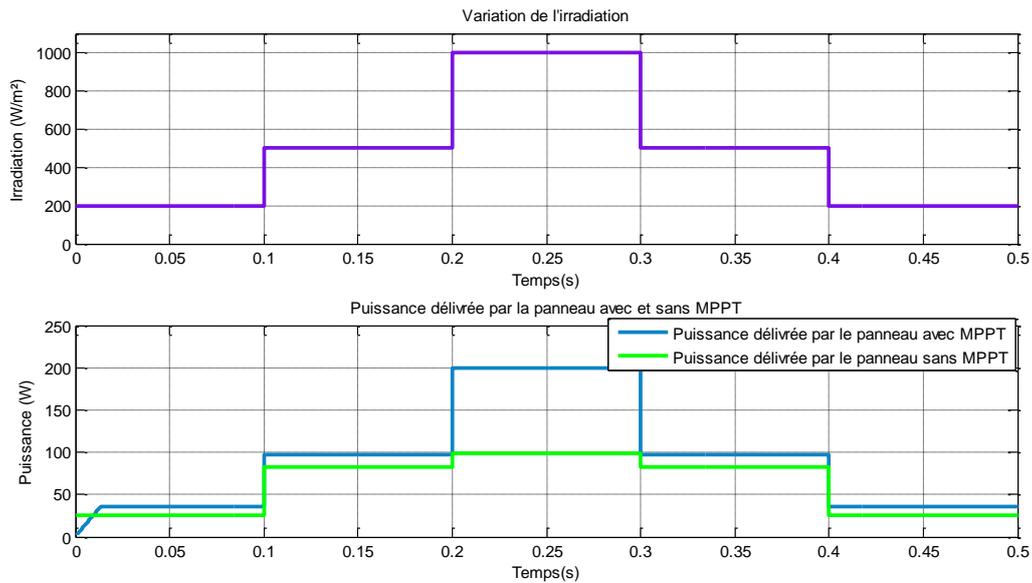


Figure II.14: Puissance obtenue avec et sans MPPT pour différentes irradiations

Les résultats ci-dessus montrent la différence de puissance entre un système avec MPPT et un système sans MPPT. Ainsi, l'intérêt de l'utilisation d'un algorithme MPPT est mis en évidence. On voit bien que l'écart entre les puissances est important, ce qui prouve la nécessité de l'utilisation d'un algorithme MPPT pour optimiser le fonctionnement du système et diminuer les pertes.

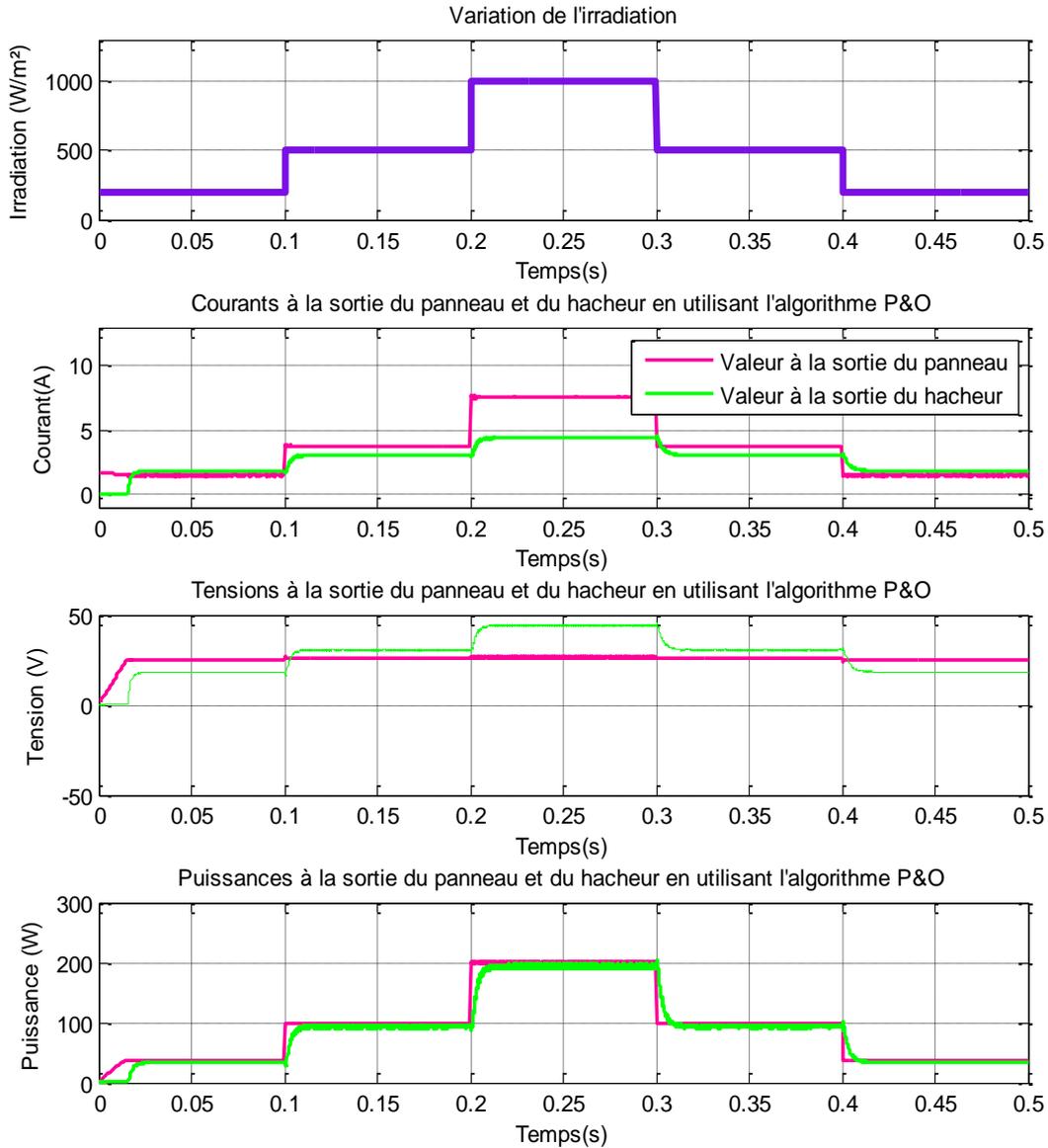


Figure I.15: Variations du courant, de la tension et de la puissance à l'entrée et à la sortie du hacheur en fonction de l'irradiation

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale. On remarque que son utilisation entraîne des oscillations, néanmoins, on voit que son temps de réponse est très rapide ce qui est l'une des qualités les plus importantes de cet algorithme.

I.4. Modélisation de l'onduleur :

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés. La forte évolution de ces convertisseurs s'est appuyée d'une part, sur le développement des composants à semi-

conducteurs (entièrement commandables, puissants, robustes et rapides) et d'autre part sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques de largeur d'impulsion [15].

I.4.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux [11] [12][13][14] :

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

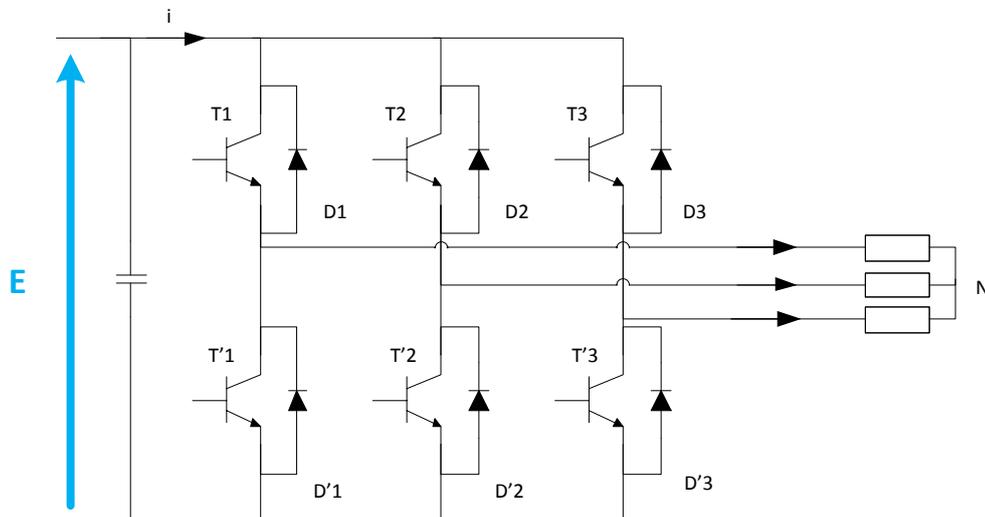


Figure I.16: Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable;
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Dans ce projet, on utilisera la modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoïdale pour la commande de l'onduleur à deux niveaux.

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

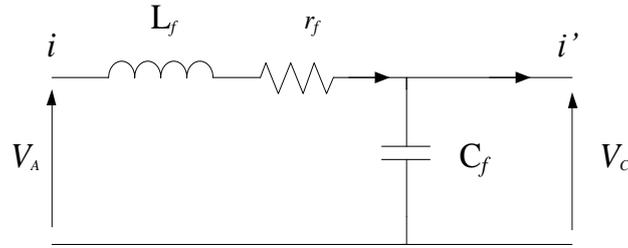


Figure I.17: Schéma monphasé équivalent du filtre LC

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 :

$$H(p) = \frac{V_C}{V_A} = \frac{1}{1 + C_f r_f \cdot p + L_f C_f \cdot p^2} \quad (I.6)$$

Elle est de la forme :

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\xi\omega_n} \cdot p + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot p^2} \quad (I.7)$$

Par identification on trouve :

$$\begin{cases} \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \cdot r_f \cdot \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \end{cases} \quad (I.8)$$

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.

I.4.3. Résultats de simulation :

En considérant un éclairage de 1000W/m^2 et une température de 25°C pour un panneau délivrant une puissance de 200Watt crêtes.

L'onduleur utilisé est un onduleur à deux niveaux commandé par une MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse avec un coefficient de réglage $r=0.8$ et un indice de modulation $m=21$ (Cette valeur de m permet d'annuler les harmoniques pairs et les harmoniques de rangs multiples de 3, elle permet aussi d'éloigner suffisamment les harmoniques vers les HF pour simplifier le filtrage).

La valeur de référence de la tension du bus continu est fixée à 48V. Le montage bus continu-onduleur est dédié à l'alimentation un charge RL ($R=1\Omega$, $L=10\text{mH}$)

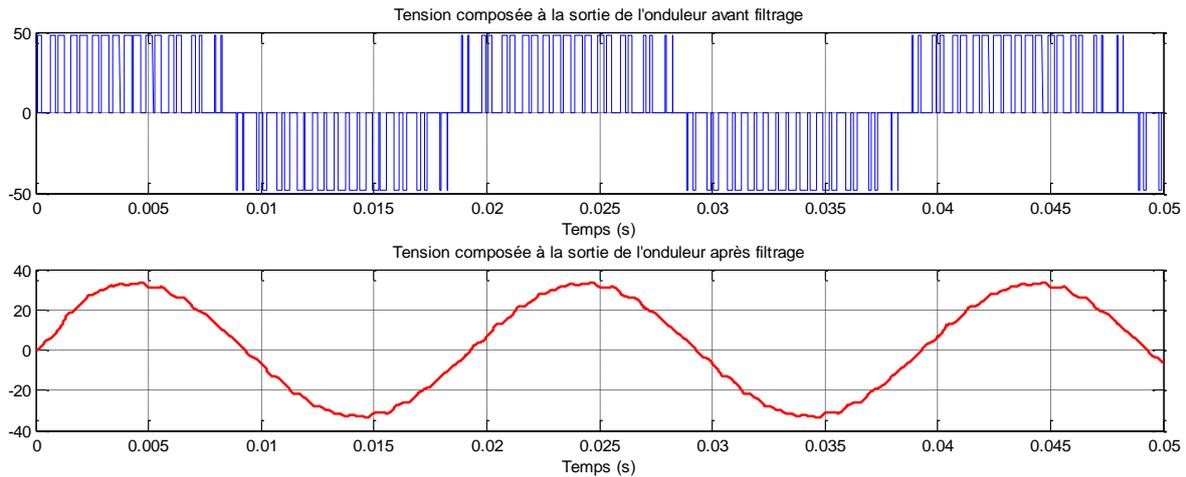


Figure I.18: Allures de la tension composée à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre

La Figure II.22 représente une tension composée avant et après filtrage. Les résultats obtenus après filtrage sont nettement meilleurs, et les courbes se rapprochent vraiment de la forme d'une sinusoïde. Cependant on remarque une diminution non négligeable de l'amplitude de la tension après filtrage et cela est dû à la présence des harmoniques, dont les valeurs s'ajoutent à celle du fondamental. Après filtrage, cette valeur baisse considérablement et devient égale à celle du fondamental.

Les résultats des analyses spectrales ci-dessous valideront ces conclusions en montrant les différents rangs d'harmonique avant et après filtrages et les THD obtenus respectivement.

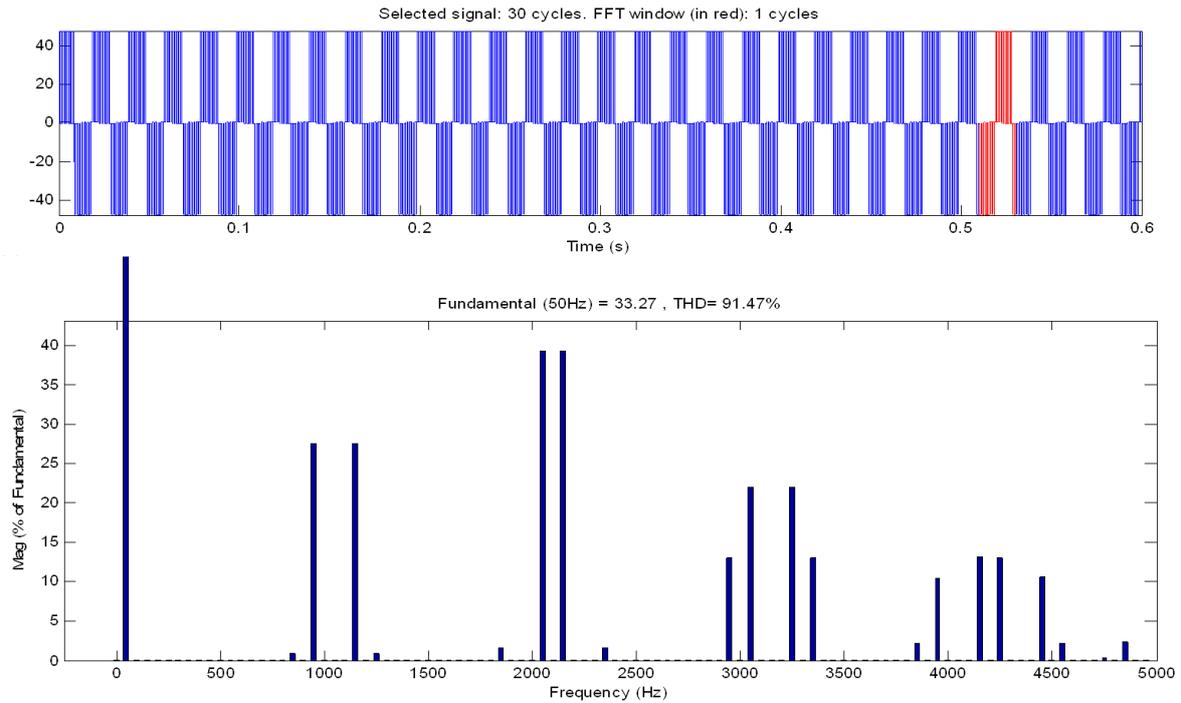


Figure I.19: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie de l'onduleur .

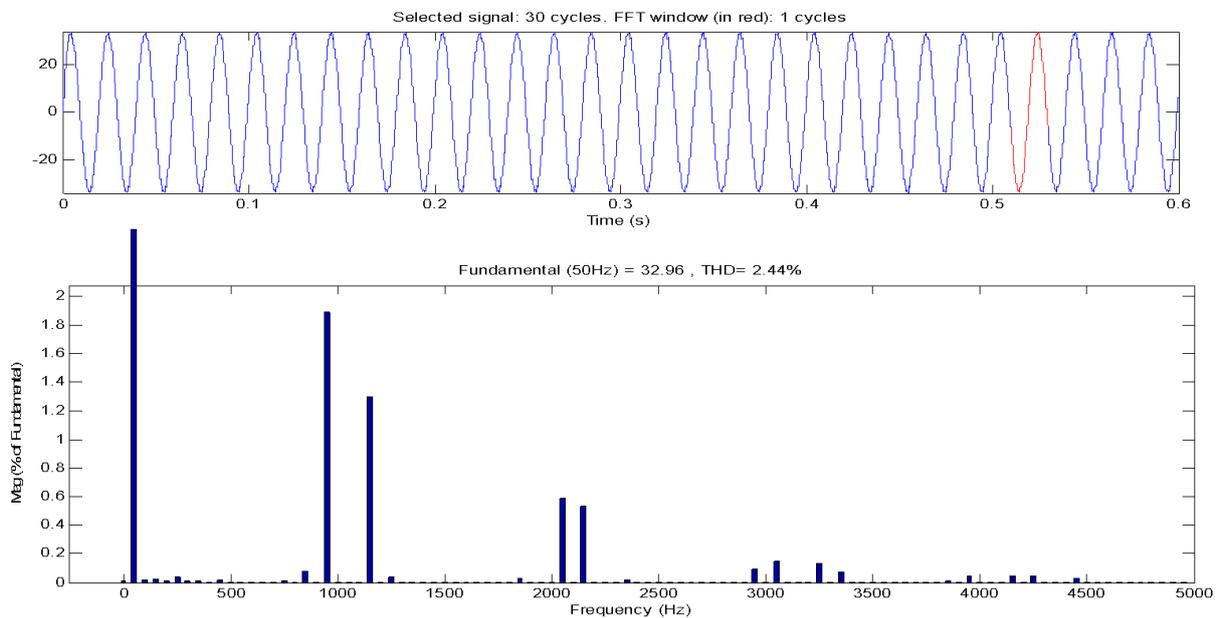


Figure II.20: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie du filtre LC.

La Figure II.24 présente l'analyse spectrale de la tension obtenue à la sortie de l'onduleur (avant qu'elle soit filtrée). On voit clairement une grande présence des harmoniques de tensions et des pics non négligeables à certaines fréquences. Le taux de distorsion en tension est très important, il est de l'ordre de 91.47%, ce qui explique l'importante diminution d'amplitude de la tension après filtrage, qui représente

l'amplitude du fondamental, obtenue dans les résultats précédents. L'analyse spectrale faite après filtrage présente une nette amélioration par rapport à la présence des tensions harmoniques, confirmée par un THD de 2.44%, soit alors une diminution de plus de 89% du THD avant filtrage.

On peut déduire à partir de ces résultats que le filtrage n'est pas nécessaire pour un mode isolé puisque le courant est filtré par les charges inductive. Cependant, pour un mode connecté au réseau, le filtrage est primordial afin de ne pas polluer le réseau et pour respecter les normes imposées par ce dernier.

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.

On a opté pour un modèle mathématique des panneaux PV, qui tient compte de la variation d'ensoleillement ainsi que de celle de la température.

Nous avons ensuite modélisé les convertisseurs en développant des modèles régissant leurs fonctionnements et cela sous certaines hypothèses simplificatrices justifiées.

En outre, en considérant la tension des panneaux constante et égale à la tension optimale, nous avons supposé qu'ils fonctionnaient dans des conditions idéales grâce à un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT pour Maximum Power Point Tracking) appliqué au fonctionnement d'un hacheur Buck-Boost qui permet d'avoir différents niveaux de tension à la sortie de l'étage d'adaptation.

Une étude sur l'onduleur de tension à deux niveaux commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale à une porteuse en considérant une tension fixe à son entrée, donne des résultats de simulations qui montrent que grâce à une commande robuste, le convertisseur permet de faire face aux forts appels de courant, garantissant une tension proche de la sinusoïde à la sortie.

Chapitre II : Système Photovoltaïque en Mode Isolé

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.

Dans le chapitre précédent, nous avons énuméré les différents composants d'un tel système, les modèles dédiés à ces composants ainsi que les résultats de simulations. Nous présentons donc ici, grâce à des choix adaptés, le modèle de la chaîne photovoltaïque avec un élément de stockage énergétique.

II.2. Présentation de la chaîne étudiée:

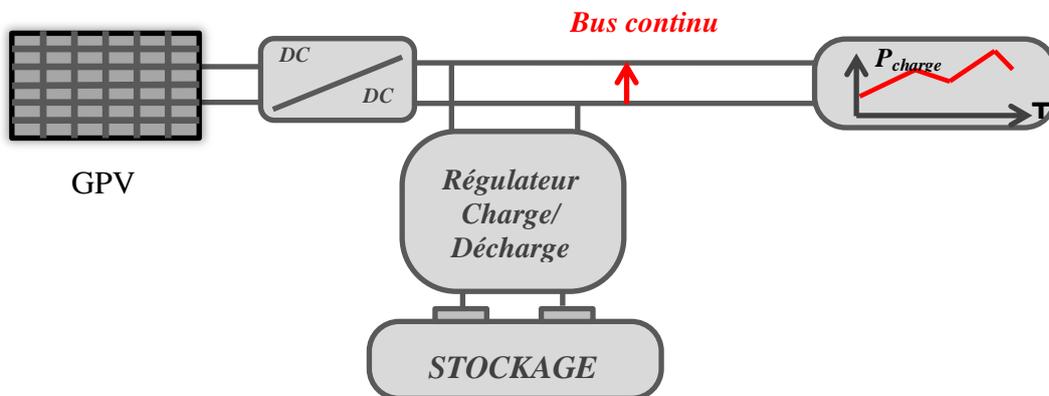


Figure II. 1: Architecture du système SPAV étudié

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

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, Été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques). Ce qui nécessite un stockage.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit deux fonctions importantes [16] : **l'Autonomie et la Stabilisation de la tension.**

Notre choix s'est porté sur la batterie plomb acide car elle offre le meilleur rapport performances/ Coût.

II.3.1. Stabilisation du bus continu :

La batterie est connectée au bus continu via un hacheur Buck/Boost, comme indiqué à la figure II.2, Le banc de batteries sert à alimenter en puissance les besoins de la charge pendant une courte durée lors des fluctuations des irradiances 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 $V_{dc_{ref}}$.

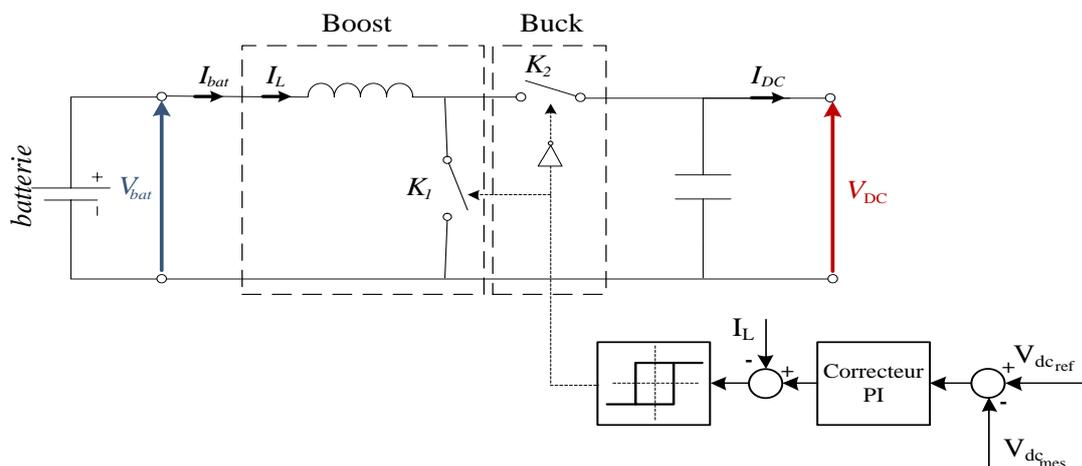


Figure II. 1: Principe de la régulation du bus continu

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.

II.3.2. Résultats de simulation :

- Variation des puissances du panneau, de la charge et de la batterie pour les deux modes de fonctionnement : Charge/Décharge :

On présente les résultats de simulation d'une installation PV autonome constituée d'un générateur PV et d'un étage d'adaptation (Hacheur DC/DC+MPPT, Batterie plomb-acide, un régulateur de charge/décharge, et le bus continu) dans des conditions de 25°C et 1000 W/m^2 pour une charge variable.

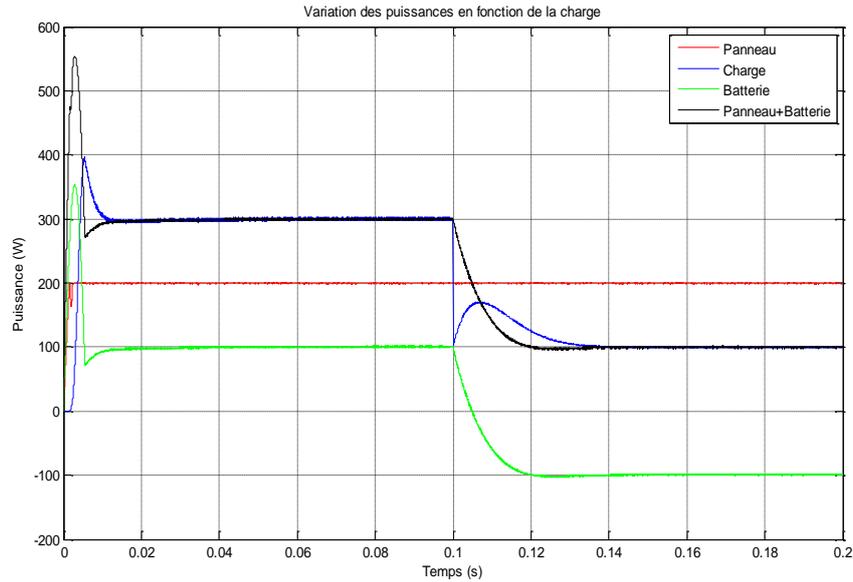


Figure II. 3: Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge)

Entre [0,0.1]s la production PV à la sortie du générateur est de l'ordre de 200 W, pour une charge consommant 300W. L'intervention de la batterie (mode: décharge) est immédiate afin d'assurer la puissance demandée par la charge et donc le système de supervision a assuré son rôle de contrôle d'écoulement de puissance entre les différents constituants de la chaîne avec rapidité (soit en moins de de 0.01s).

Dans l'intervalle de temps [0.1, 0.2] s, la demande de la charge baisse à 100W, imposant ainsi un régime de charge à la batterie car le générateur à lui seul assure son alimentation. Le surplus quant à lui est évacué dans l'accumulateur.

- Tension du bus continu :

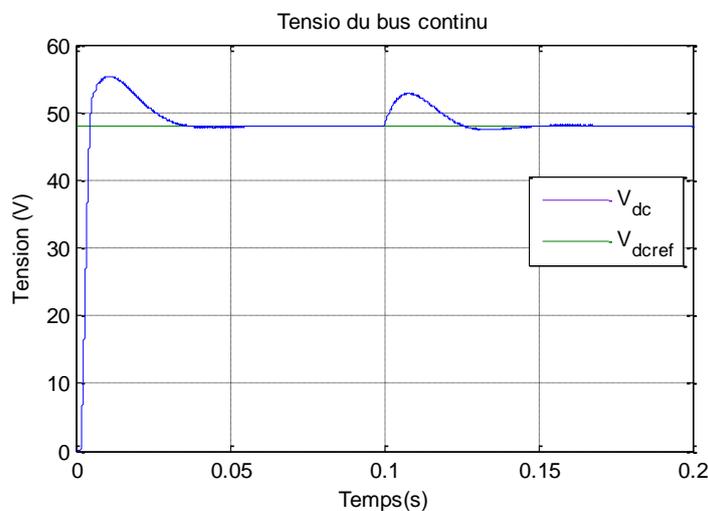


Figure II. 4: Tension du bus continu

La Figure III.16 représente la tension du bus continu de la chaîne de production photovoltaïque précédente dans les mêmes conditions de température et d'irradiation (25°C, 1000 W/m²). On voit bien que le temps de régulation de la tension est assez rapide au début de la production et que la tension du bus suit la tension de référence imposée. Une légère fluctuation survient lors du changement de mode de la décharge de la batterie vers la charge mais elle est rapidement régulée. La régulation du bus continu est donc assurée par le système et les résultats obtenus sont validés.

- Variation des puissances du panneau, de la charge et de la batterie pour différentes irradiances à température constante de 25°C :

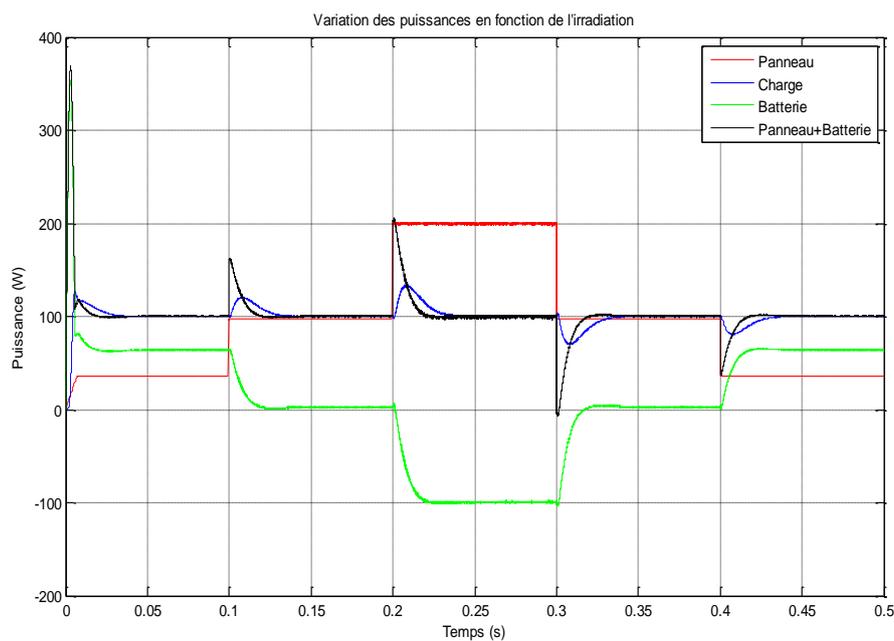


Figure II. 5: Variation des puissances du panneau, de la batterie et de la charge pour différentes irradiances

La figure ci-dessus présente les résultats de simulation de la même installation PV autonome dans une température ambiante de 25°C, et pour différentes irradiances dans le but d'alimenter une charge constante de 100W

La puissance délivrée par le panneau photovoltaïque varie en fonction de l'irradiation et lui est proportionnelle. La puissance donnée par la batterie change en fonction de la puissance produite par le panneau de façon à subvenir à la demande de la charge et la puissance totale délivrée est constante et égale 100W.

Le temps de réponse du régulateur de charge/décharge est assez court. On remarque qu'à chaque changement d'irradiation l'apparition d'une légère fluctuation de la puissance totale délivrée à la charge mais elle est rapidement régulée.

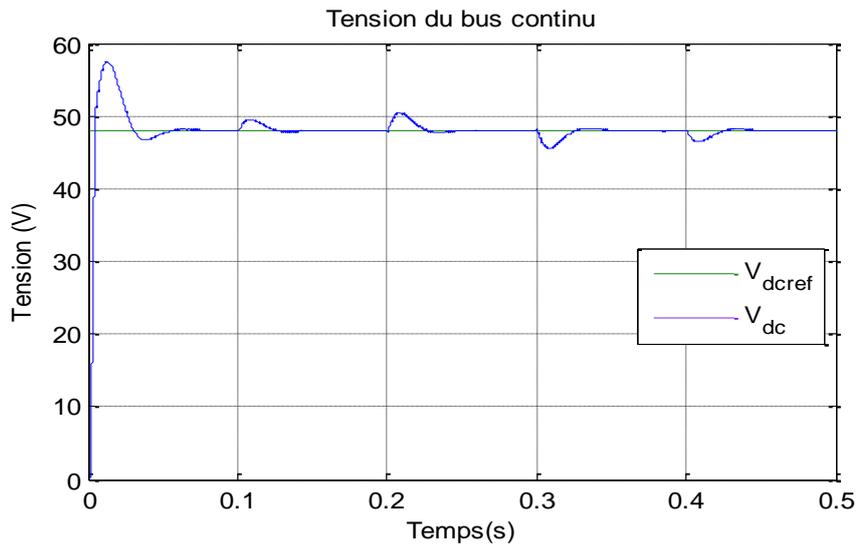


Figure II. 6: Tension du Bus Continu pour différentes irradiances

La figure ci-dessus représente la tension du bus continu correspondante au fonctionnement de la chaîne PV pour les différentes irradiances présentée auparavant. On remarque une petite fluctuation de la tension du bus continu à chaque changement d'irradiation mais elle est rapidement prise en charge et stabilisée afin de revenir à la tension de référence imposée.

Le changement d'irradiation n'affecte pas la régulation du bus continu ce qui veut dire que le système est robuste face aux variations de l'ensoleillement.

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.

Chapitre III : Système Photovoltaïque en Mode Connecté au Réseau

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 [17].

Plusieurs critères doivent être remplis pour satisfaire les exigences du réseau comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie [48].

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 [17].

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. [18].

III.2. Configuration du système

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

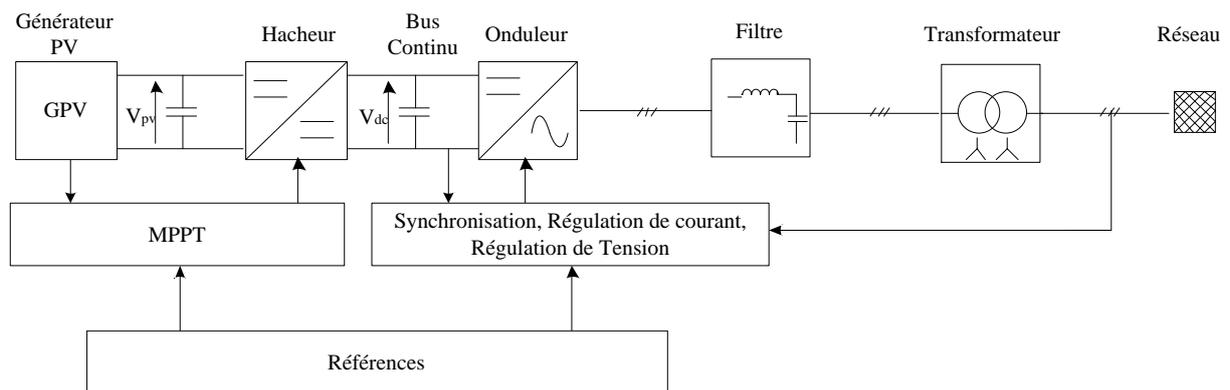


Figure III. 1: Diagramme général d'un système PV connecté au réseau [18].

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 [18].

L'objectif de cette commande est de pouvoir contrôler les puissances active et réactive fournies au réseau par une régulation du courant [20]. 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

La commande utilise des contrôleurs PI standards pour réguler les courants à la sortie de l'onduleur dans une boucle interne et le bus continu dans une boucle externe. Une synchronisation doit être effectuée entre les tensions de sortie de l'onduleur et celles du réseau [18].

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 [19].

Cependant, les tensions réseau au point de raccordement peuvent comporter divers défauts et ils risquent de subsister dans le courant de sortie de l'onduleur. Il est donc important que le système de synchronisation puisse gérer ces distorsions. [19].

Parmi les méthodes envisageables, il en existe deux fréquemment utilisées. La première consiste à filtrer la tension mesurée. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle génère un déphasage non négligeable, qui est d'autant plus important que la fréquence de coupure du filtre passe bas est faible. La seconde est basée sur la détection du passage par zéro de la tension, ce qui permet d'en déduire la période et de reconstruire un signal sinusoïdal unitaire. Ce procédé est plus performant que le précédent, cependant il n'est pas optimum lors d'un saut de phase par exemple [22].

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 [21]. Le processus de synchronisation se fait en temps réel ce qui amène la boucle à fonctionner constamment [19].

a. Structure générale de la PLL

Un circuit PLL de base est généralement constitué de trois éléments : un détecteur de phase, un filtre de boucle et un oscillateur contrôlé en tension. On peut le représenter comme suit :

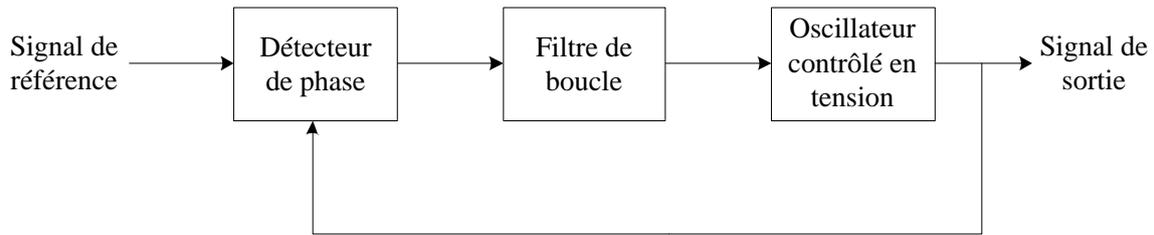


Figure III. 2: Structure générale d'une PLL

- Le détecteur de phase est mis en œuvre en transformant les tensions dans le système dq. La différence de phase entre le signal de référence et le signal de sortie peut être extraite en appliquant une fonction arctangente. Ceci donne la différence de phase exacte. Mais cette différence de phase peut être trouvée indirectement en supposant qu'elle est nulle lorsque $V_q=0$.
- Le filtre de boucle est un régulateur qui annule l'erreur de phase. C'est généralement un régulateur PI, mais on peut utiliser des régulateurs avec un ordre supérieur. Un ordre élevé augmente la dynamique du système ainsi que ses capacités de filtrage mais ça augmente également la complexité du système. Ainsi, l'utilisation d'un régulateur PI nous donne un système du second ordre ce qui permet de régler la bande passante de la PLL et le facteur d'amortissement en utilisant la théorie des systèmes linéaires.
- L'oscillateur contrôlé en tension se trouve après le filtre de boucle (dont la sortie est une fréquence), c'est généralement un simple intégrateur qui nous donne la phase à la sortie.

b. Principe de base 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 :

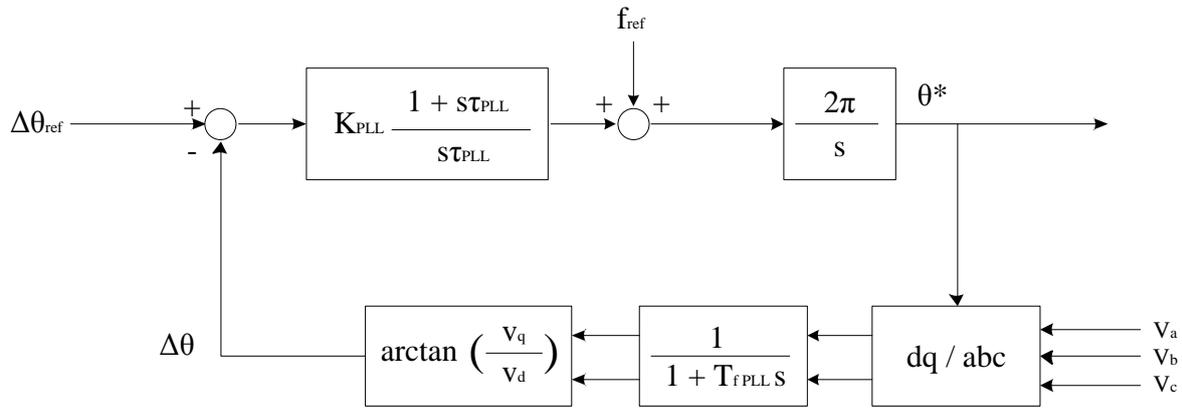


Figure III. 3: Boucle de Contrôle de la PLL [20].

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 IV.4 représente les différentes variables.

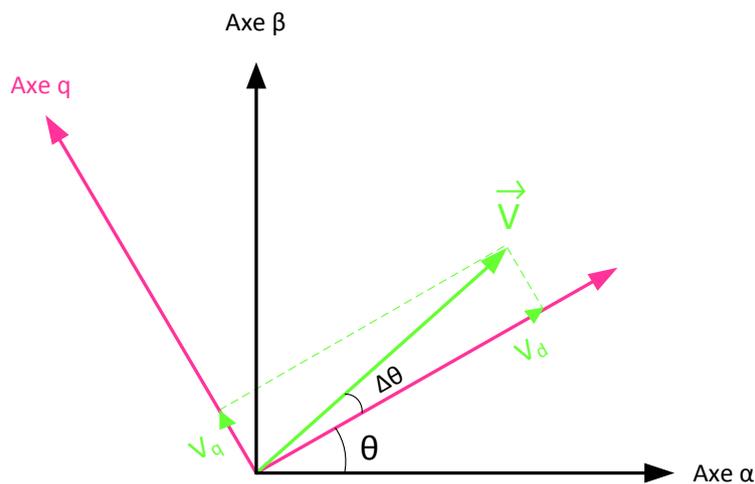


Figure III. 4: Représentation du vecteur V dans le repère dq

Une fréquence d'anticipation f_{ref} (feed forward frequency) de 50Hz est utilisée pour réduire le temps de réponse de la PLL [20].

c. Dimensionnement du régulateur

Un régulateur PI peut être appliqué dans chacun des repères stationnaire $\alpha\beta$ et synchrone dq.

Dans un système dq nous avons des grandeurs fixes, ainsi, l'application du contrôleur PI permet de réduire l'erreur du fondamental à zéro. Ceci n'est pas le cas avec les régulateurs PI dans le repère $\alpha\beta$ où il y a une erreur de suivi de phase et d'amplitude. C'est pour ça que la commande dans le repère synchrone, en utilisant des contrôleurs PI, est la solution idéale pour les onduleurs triphasés connectés au réseau.

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

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

La boucle de régulation est alors donnée par la figure IV.5

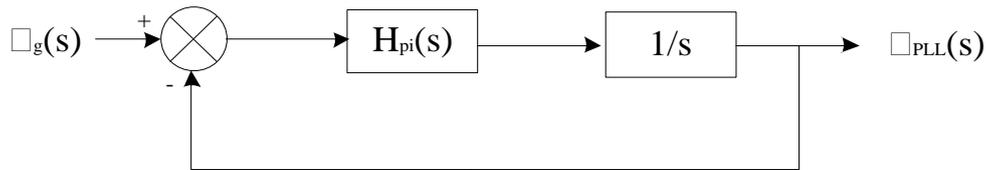


Figure III. 5: Modèles de la PLL

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 :

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

Par identification :

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

Les paramètres de la boucle du second ordre doivent satisfaire :

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

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 actives et réactives injectées au réseau.

Soit la figure de la connexion au réseau

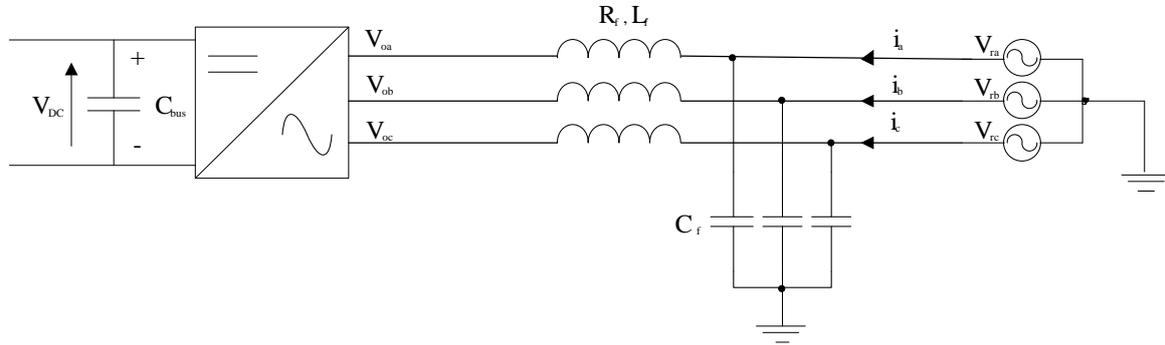


Figure III. 6: Représentation de la connexion Onduleur- Réseau

En négligeant les courants qui passent dans les capacités du filtre

$$V_{r,k} = R_f i_k + L_f \frac{di_k}{dt} + V_{o,k}, \quad k = a, b, c \quad (\text{III. 5})$$

Avec

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

$V_{r,k}$: Tension du réseau

i_k : Courant de la ligne

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

On peut représenter cette équation sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f + L_f s & 0 & 0 \\ 0 & R_f + L_f s & 0 \\ 0 & 0 & R_f + L_f s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o3} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 6})$$

On utilise la transformation de Park pour passer au repère synchrone dq :

$$P(\theta) \begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{pmatrix} P(\theta) \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \left(P(\theta) \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \right) + P(\theta) \begin{pmatrix} V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o3} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 7})$$

Où $P(\theta)$ représente la matrice de Park

L'utilisation des propriétés matricielles classiques permet d'obtenir le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{do} \\ V_{qo} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f & -L_f\omega \\ L_f\omega & R_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 \\ 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{do} \\ V_{qo} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f + L_f s & -L_f\omega \\ L_f\omega & R_f + L_f s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

On a donc le système suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - L_f \omega i_q + V_{do} \\ V_{qr} = R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + L_f \omega i_d + V_{qo} \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

En utilisant ces équations électriques, on obtient le schéma équivalent du réseau :

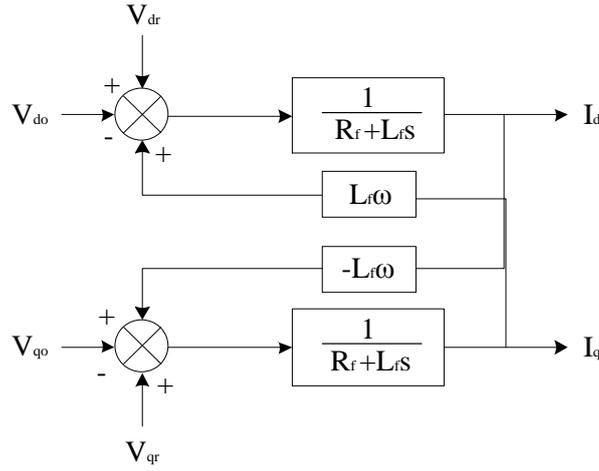


Figure III. 7: Schéma équivalent du réseau électrique dans le repère dq

Où 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 [23].

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

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{dref} + V_{rq} i_{qref}) \\ Q_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{dref} - V_{rd} i_{qref}) \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

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

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} = \frac{3}{2} (V_{\text{rd}} i_{\text{dref}}) \\ Q_{\text{ref}} = -\frac{3}{2} (V_{\text{rd}} i_{\text{qref}}) \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

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.12) 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 [18].

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 :

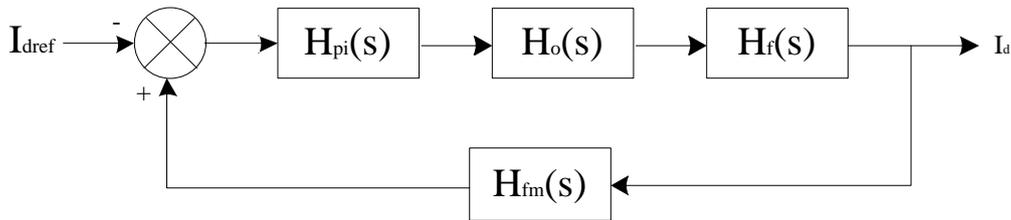


Figure III. 8: Boucle de régulation du courant d'axe direct

La boucle suivant l'axe q est similaire.

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.8 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

$$H_o(s) = \frac{1}{1 + sT_o} \quad (\text{III. 13})$$

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.

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (\text{III. 14})$$

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.

$$H_f(s) = \frac{1/R_f}{1 + sT_f} \quad (\text{III. 15})$$

Avec

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (\text{III. 16})$$

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 :

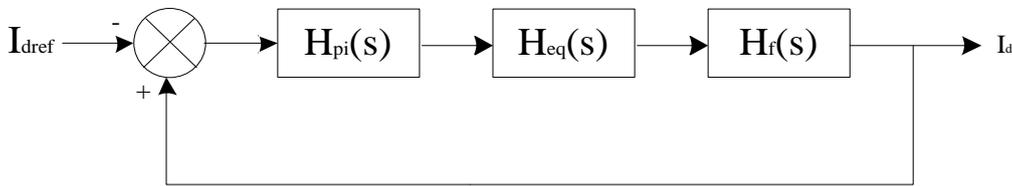


Figure III. 9: Boucle de régulation réduite du courant

Avec :

$$H_{eq}(s) = \frac{1}{1 + T_{eq}s} \quad (\text{III. 17})$$

Et le temps de retard équivalent :

$$T_{eq} = T_o + T_{fm} \quad (\text{III. 18})$$

Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$H_{BO}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \frac{1}{1 + T_{eq} s} \frac{1/R_f}{1 + T_f s} \quad (\text{III. 19})$$

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

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = \frac{\frac{K_p}{R_f}}{T_i s(1 + sT_{eq}) + \frac{K_p}{R_f}} \quad (\text{III. 20})$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{T_{eq}} s + \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \quad (\text{III. 21})$$

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

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

Par identification :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_i R_f}{K_p T_{eq}}} \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

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 :

$$\begin{cases} T_i = T_f \\ K_p = \frac{T_i R_f}{2T_{eq}} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

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 [23] :

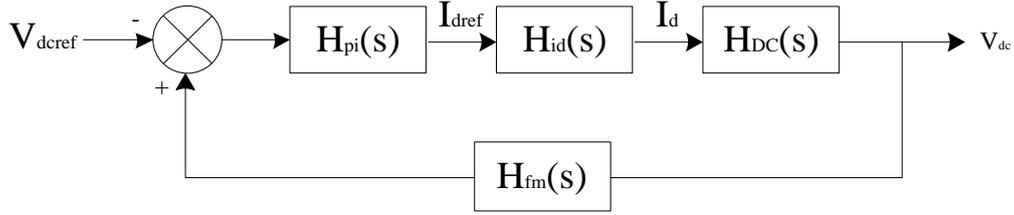


Figure III. 10: Boucle de régulation de la tension du bus continu

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} .

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (\text{III. 25})$$

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 :

$$M(s) = K \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0} s + 1} \quad (\text{III. 26})$$

Pour des fréquences inférieures à ω_0 :

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 \ll 1 \quad (\text{III. 27})$$

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

$$H_{id}(s) = \frac{1}{\frac{2\xi}{\omega_0} s + 1} = \frac{1}{4\xi^2 T_{eq} s + 1} \quad (\text{III. 28})$$

$$H_{id}(s) = \frac{1}{1 + 2T_{eq} s} \quad (\text{III. 29})$$

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

$$H_{DC}(s) = K_{DC} \frac{1}{C_{DC}s} \quad (\text{III. 30})$$

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 :

$$V_{DC}I_{DC} = \frac{2}{3}V_d I_d \quad (\text{III. 31})$$

Et la tension à la sortie de l'onduleur :

$$V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}V_{DC}r \quad (\text{III. 32})$$

$$V_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}V_{ab} = \frac{1}{2}V_{DC}r \quad (\text{III. 33})$$

En combinant les relations (IV.31) et (IV.33) on trouve K_{DC}

$$K_{DC} = \frac{I_{DC}}{I_d} = \frac{3V_d}{2V_{DC}} = \frac{3}{4}r \quad (\text{III. 34})$$

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 :

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + (2T_{eq} + T_{fm})s} \quad (\text{III. 35})$$

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + Ts} \quad (\text{III. 36})$$

Avec

$$T = 2T_{eq} + T_{fm} \quad (\text{III. 37})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i T s^3 + C_{DC} T_i s^2 + K_p K_{DC} T_i s + K_p K_{DC}} \quad (\text{III. 38})$$

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

$$\begin{cases} T_i = 4T \\ K_p = \frac{1}{2} \frac{C_{DC}}{K_{DC}T} \end{cases} \quad (\text{III. 39})$$

La structure de la commande totale de la connexion au réseau est représentée dans la figure (III.11) ci-dessous.

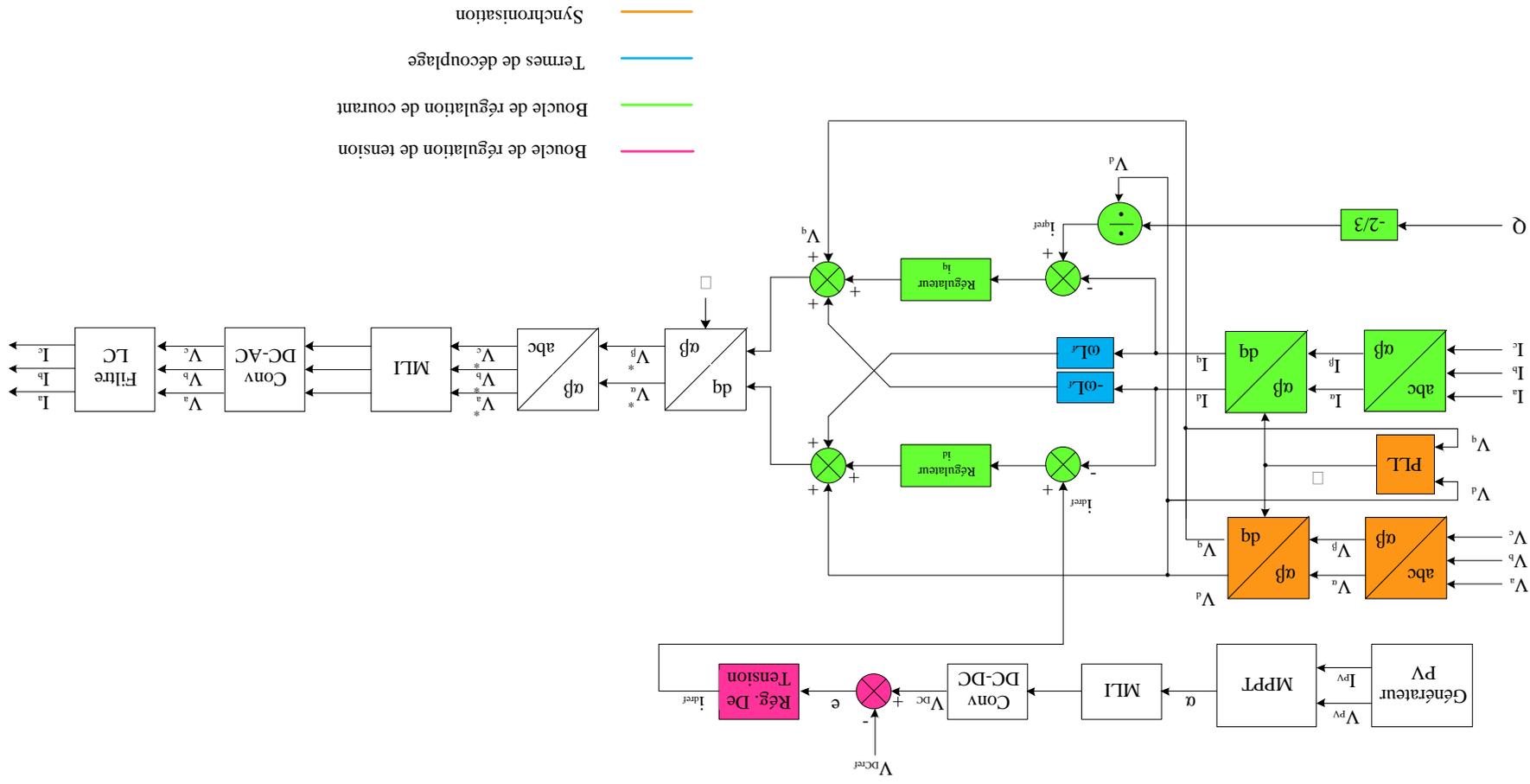


Figure III. 11: Système de contrôle du système connecté au réseau

III.4. Résultats de simulation

a- Synchronisation avec le réseau :

Afin d'effectuer la synchronisation, on utilise la boucle illustrée par la figure III.3 en prenant $\Delta\theta_{ref} = 0$ et $f_{ref} = 50\text{Hz}$ (fréquence du réseau). Les résultats obtenus sont illustrés par la figure ci-dessous

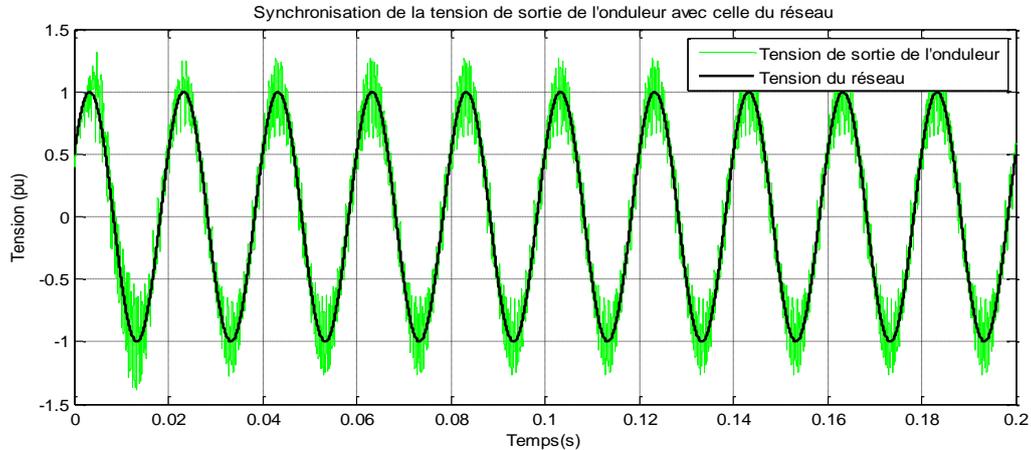


Figure III. 12: Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau

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 $f_{ref} = 50\text{Hz}$. on obtient les résultats suivants :

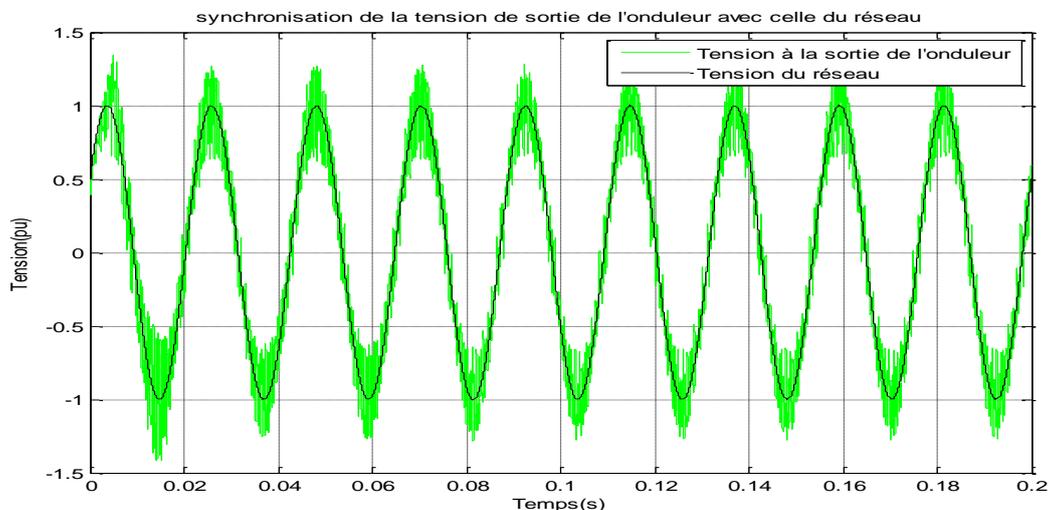


Figure III. 13: Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau (pour une tension du réseau égale à 45Hz)

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- Régulation des courants

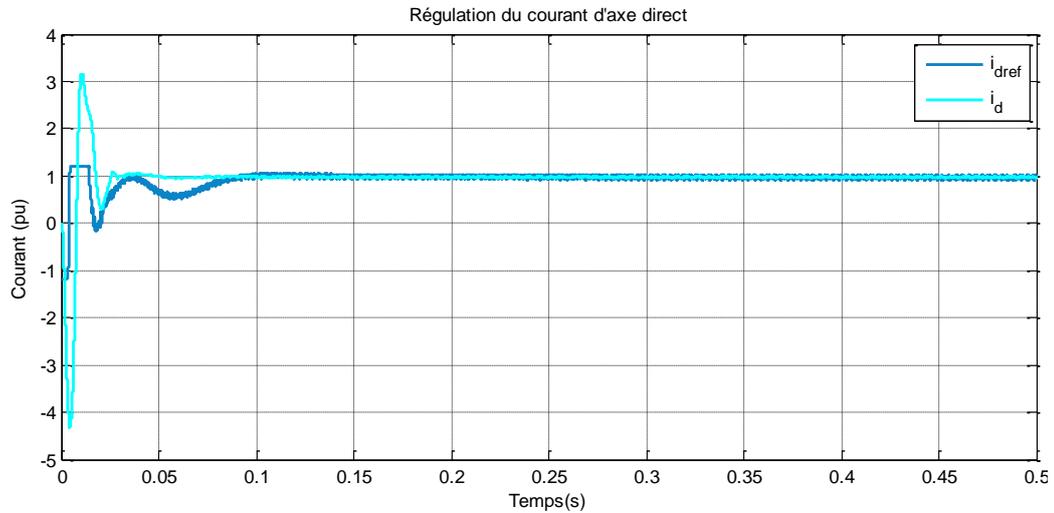


Figure III. 14: Régulation du courant d'axe direct

Le courant de référence d'axe direct est donné par le régulateur de la boucle externe, on voit bien que le courant i_d suit la valeur de référence ce qui prouve l'efficacité et la robustesse du régulateur PI utilisé.

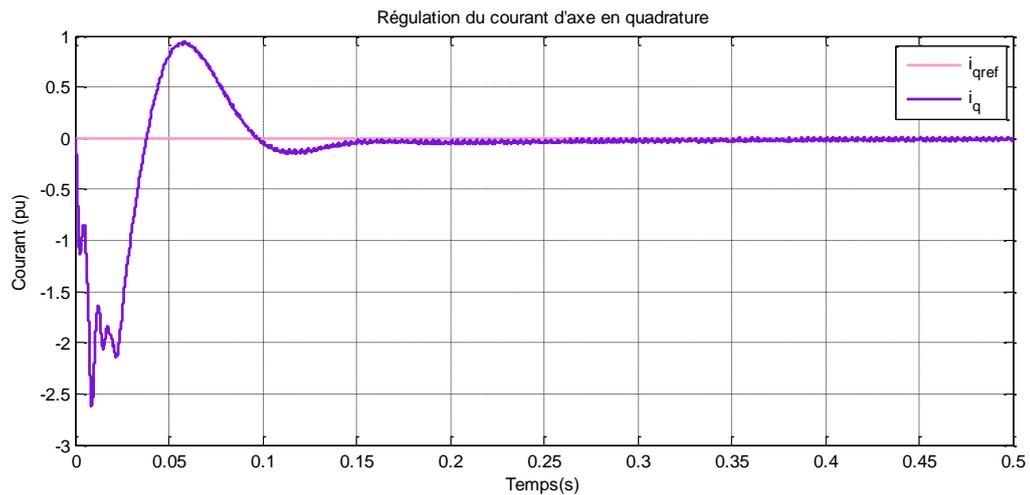


Figure III. 15: Régulation du courant d'axe en quadrature.

Nous avons imposé un courant de référence pour l'axe en quadrature égal à zéro afin d'avoir un facteur de puissance unitaire au réseau. On voit que ce courant suit la valeur de référence ce qui prouve, encore une fois, l'efficacité du régulateur PI utilisé.

c- Régulation de la tension du bus continu

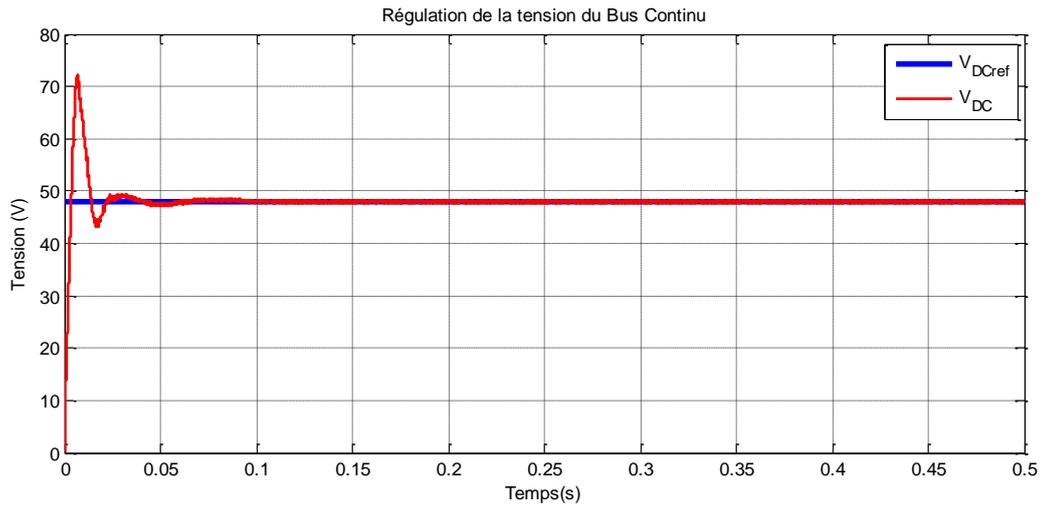


Figure III. 16: Régulation de la tension du bus continu

La tension de référence du bus continu a été fixée à 48 V, on voit bien l'efficacité du régulateur PI, utilisé dans la boucle externe, dans l'annulation de l'erreur puisque la tension de sortie est égale à la tension de référence.

d- Écoulement de puissance

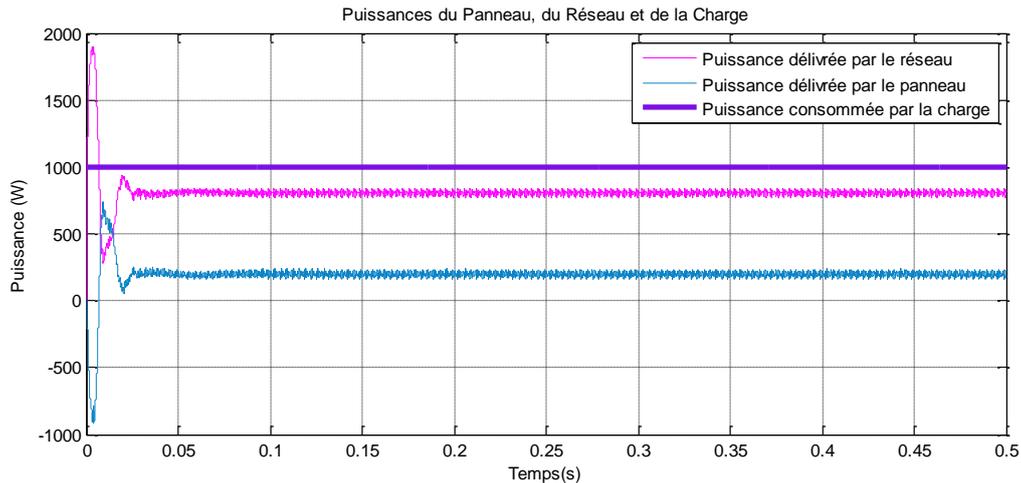


Figure III. 17: Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 1000W.

Nous avons connecté au réseau une charge qui consomme 1000 W, on voit bien que le générateur PV fournit la totalité de sa puissance, soit 200W, à cette charge et c'est le réseau qui va compléter la suite de la puissance nécessaire, soit 800 W

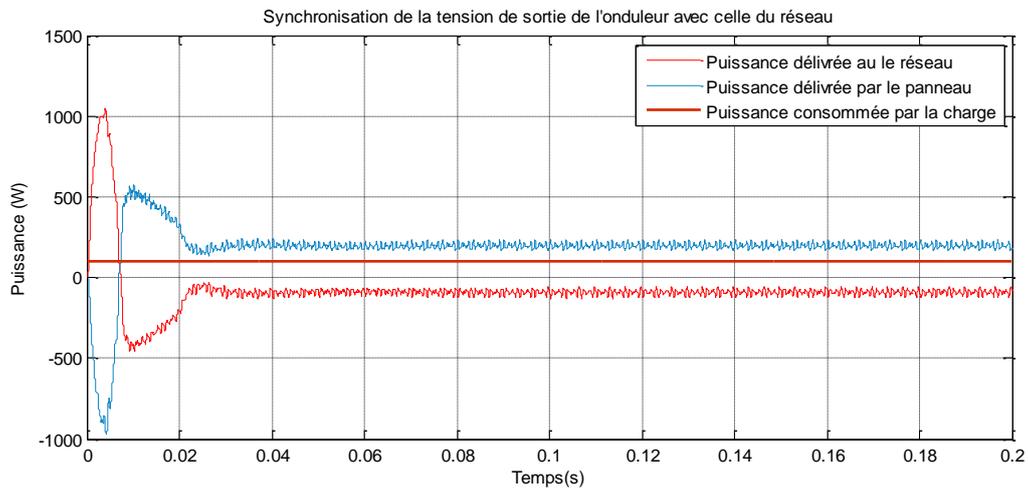


Figure III. 18: Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 100W.

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.

II.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 ce master nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome puis connecté au réseau.

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 garantis 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 intéressée principalement à la puissance injectée dans le réseau, la synchronisation nous a permis de ne pas déformer les tension du réseau, la régulation des courants a servis au contrôle des puissance 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 85%, 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] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Ionel Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Université du Havre, Décembre 2005.
- [14] N.Achaïbou, « Introduction à l'Étude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque », Revue des Énergies Renouvelables, Valorisation Tome 1, Décembre 1999.

- [15] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, « Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. », Stavanger, Norway, May 2009.
- [16] 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.
- [17] N. Hamrouni, A.Chérif, “Modelling and control of a grid connected photovoltaic system”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°3, Tunis, 2007
- [18] Jim Ögren, “PLL design for inverter grid connection”, UPPSALA Universitet, 2011
- [19] 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.
- [20] 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
- [21] Yann PANKOW, « Étude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, 2004
- [22] 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
- [23] M. Claude LISHOU, « Étude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes photovoltaïques à stockage d’énergie. Application à la sûreté de fonctionnement de centrales solaires hybrides », Thèse de doctorat, Université CHEIKH ANTA DIOP, Dakar, 1998.

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 في إطار هذا العمل اهتمنا بدراسة مختلف نماذج مكوثات النظام الكهروضوئي التي تشمل: اللوح الكهروضوئي، المحوّل مستمر- مستمر، الحافلة المستمرة، المموج ذو الطورين بالإضافة الى نظام تخزين الطاقة من ثمّ، انتقلنا إلى دراسة سير النظام المكتفي طاقياً، 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 و مختلف التنظيمات في التيارات و الجهود بهدف حسن سير النظام

الكلمات المفتاحية

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 injectées 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 level 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 the injected tensions 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, continue bus, two level inverter, network, synchronization, PLL, regulation.