

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

Université de JIJEL



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'électrotechnique

جامعة جيجل
مكتبة كلية العلوم والتكنولوجيا
رقم الجرد: M1645

Mémoire de Fin d'Etudes pour l'Obtention du Diplôme de Master
en Electrotechnique

Option : commande des systèmes électriques



Thème

Commande par mode de glissement d'un système photovoltaïque connecté au réseau à travers un onduleur à trois niveaux

Encadré par :

M^r : N. Lourci

Réalisé par :

M^r : Sabri Salah

M^r : Zait Hicham

Promotion Juin 2014

Remerciement

*Nous remercions dieu qui nous a donné le courage et la volonté
d'avoir réussit dans nos études.*

*Nous remercions nos parents, pour tout leur amour, leur
encouragement, et leur soutien.*

*Notre encadreur: M^r : NABIL LOURCI qui nous encadré et
soutenu par ces conseil, ces encouragements et ces
connaissances.*

*Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepter
d'examiner et juger ce modeste travail.*

*Nos vifs remerciements vont à tous les enseignants qui nous
ont suivis durant nos 5 ans d'études.*

À tous nos collègues de la promotion 2014.

*Enfin, nous adressons nos remerciement à toutes personnes
ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de
ce mémoire*

Dédicace

*A ceux qui nous ont donné la vie, l'espoir et l'amour,
A ceux qui nous ont encouragé le long de nos études :*

Nos très chers parents,

Que dieu les protège et les garde.

A nos frères

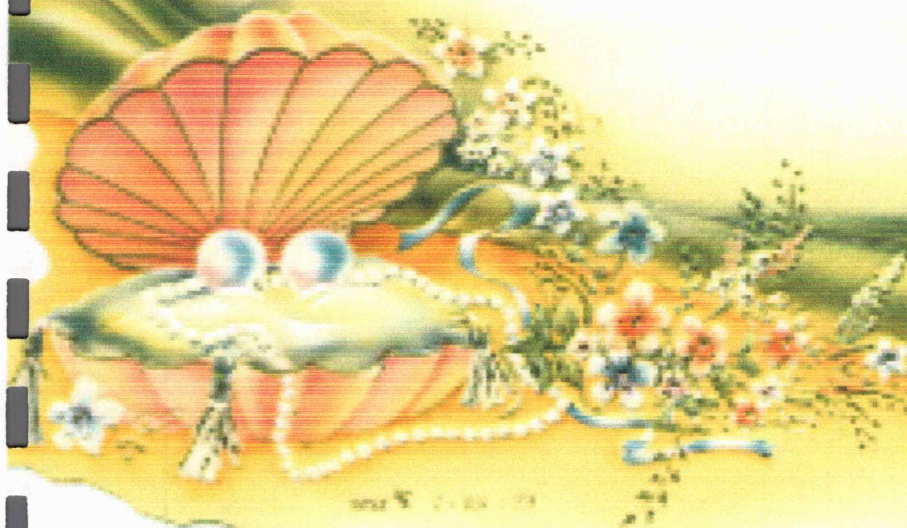
A nos sœurs

A toute nos familles et nos amis

A tous nos collègues

*A toutes les personnes qui nous ont aidé de proche
ou de loin.*

SALAH et HICHAM.



SOMMAIRE

Sommaire

Introduction Générale..... 1**Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Energie solaire.....	3
I.4 Conversion photovoltaïque	4
I.5 Rayonnement solaire	4
I.6 La cellule solaire	5
I.6.1 Principe de fonctionnement d'une cellule.....	5
I.6.2 Différents types des cellules	6
a- Cellule au silicium mono-cristallin	6
b- Cellule au silicium poly-cristallin.	6
c- Cellule au silicium amorphe	7
I.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	7
I.7.1 Modèle idéal	7
I.7.2 Modèle réel à une diode	8
I.7.3 Modèle réel simplifié à une diode.	9
I.7.4 Modèle réel simplifié à deux diodes	10
I.8 Paramètres des cellules photovoltaïques	10
I.8.1 Courant de court-circuit I_{CC}	11
I.8.2 Tension à circuit ouvert V_{OC}	11
I.8.3 Puissance maximale	11
I.8.4 Facteur de forme FF	11
I.8.5 Rendement de conversion η	12
I.9 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	12
I. 10 Module photovoltaïque	13
I.10.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque	13
I.10.2 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$	14
a- Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$	14

b- Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$	15
c- Influence du facteur de qualité (n).....	15
I.11 Types des systèmes photovoltaïques	16
I.11.1 Système indépendant	16
I.11.2 Système connecté au réseau	16
I.11.3 Système hybride	16
I.12 La commande MPPT	17
I.12.1 La poursuite du point de puissance maximale.....	17
I.12.2 Méthodes MPPT	17
a- Méthode de conductance incrémentale	18
b- Méthode Perturbation et Observation (P&O)	21
I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	23
I.13.1 Avantages	23
I.13.2 Inconvénients	24
I.14 Conclusion	24

Chapitre II : Modelisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

II.1 Introduction	25
II.2 Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau	25
II.2.1 Centrales de petite taille ($P = 1$ à 10 kW)	25
II.2.2 Centrales de taille moyenne ($P = 10$ à 100 kW).....	25
II.2.3 Centrales de grande taille ($P \geq 500$ kW).....	25
II.3 Types des onduleurs connectés au réseau	25
II.3.1 Onduleur central	26
II.3.2 Onduleur string ou de rangée	26
II.3.3 Onduleur intégré au panneau (modulaire)	26
II.4 Modélisation et description du système étudié	27
II.4.1 Modèle du générateur PV	28
II.4.2 Description de l'onduleur à trois niveaux	29
a- Fonctions de connexion	30
b- Etats d'un bras de l'onduleur	30
c- Etats de l'onduleur	32
d- Fonction de connexion des demi-bras.....	32

e- Les tensions de sortie de l'onduleur	32
II.4.3 Stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux	33
a- Les différentes stratégies de commande de l'onduleur	34
b- La commande triangulo-sinusoïdale	34
II.4.4 Transformation de Park	36
a- Choix du référentiel	36
b- Le modèle du réseau dans le repère de Park	37
II.5 Simulation de la cascade	38
II.5.1 Fonctionnement sous des conditions climatiques stables (à $T=25\text{ °C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$) ...	39
II.6 Modèle d'état de l'onduleur	43
II.7 CONCLUSION	45

CHAPITRE III: Commande par mode de glissement d'un système photovoltaïque connecté au réseau

III.1 Introduction	46
III.2 Principe de la commande par mode de glissement	46
III.3 Conception de la commande par mode de glissement	46
III.3.1 Choix des surfaces de glissement	46
III.3.2 Conditions d'existence et de convergence	47
a- La condition directe de commutation	47
b- La fonction de Lyapunov	47
III.3.3 Calcul de la commande	48
III.4 Différentes structures du contrôle par mode de glissement	48
III.4.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande	49
III.4.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état	49
III.4.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente	50
III.5 Application de la commande sur le système	50
III.5.1 Rappel du modèle d'état de l'onduleur associé au réseau	50
III.5.2 Détermination de la commande	52
a- Définition de la surface de la régulation du courant i_q	52
b- Définition de la surface de régulation de la tension $V_{dc} = U_{c1} + U_{c2}$	53
III.5.3 Simulation et résultats	54
III.6 Equilibrage des tensions des deux condensateurs	58

III.7 Etude de la robustesse	62
III.7.1 Test de variation de l'irradiation solaire.....	62
a-Variation brusque	62
b- Variation lente.....	63
III.7.2 Test de variation de la température	65
a-Variation brusque	66
b- Variation lente	67
III.7.3 Test de variation du courant de référence i_{qref}	69
III.8 Conclusion	71
Conclusion Générale	72
Annexe	74
Références bibliographiques	75
Nomenclature	77

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

Aujourd'hui, on distingue plusieurs sources d'énergie renouvelables l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire). L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [1].

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 la cellule photovoltaïque (*PV*) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice 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 (*PV*) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (*GPV*) [2].

La commande du facteur de puissance et le réglage de la puissance réactive sont connus comme la question la plus importante en reliant les systèmes photovoltaïques au réseau électrique à travers un convertisseur statique. L'onduleur reliant un système photovoltaïque à un réseau électrique doit être commandé de telle manière que non seulement il injecte un courant

avec la basse déformation harmonique totale (THD), mais laisse également commander la puissance réactive injectée dans le réseau [3].

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au problème de la recherche du point de puissance maximale, et le réglage du facteur de puissance du réseau électrique en utilisant la théorie des modes glissants, et aussi l'équilibrage des tensions d'entrée de l'onduleur.

Le travail réalisé dans ce mémoire, est structuré en trois chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre donne des généralités sur les systèmes photovoltaïques et les différents modèles électriques et mathématiques des cellules photovoltaïques, nous présenterons les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque ainsi que et le principe et les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale, La méthode utilisée pour la recherche du point de puissance maximale est de (P&O).

Dans le deuxième chapitre nous présenterons une modélisation et une description détaillée de la cascade champ photovoltaïque-onduleur à trois niveaux-réseau électrique triphasé. On présentera le modèle d'état de la cascade dans le repère de Park, et on simulera cette cascade.

Dans le troisième chapitre on va appliquer la théorie de la commande par mode glissant pour commander un onduleur triphasé à trois niveaux connecté du coté continu à un champ photovoltaïque à l'intermédiaire de deux capacités d'entrée et du coté alternatif au réseau électrique triphasé.

CHAPITRE

GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Le mot " photovoltaïque " vient du grec "photo" qui signifie "lumière" et de voltaïque qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la "lumière électricité" [4].

I.2 Historique

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque [5] :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque.

I.3 Énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil est captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante

solaire qui est égale à 1367W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000W/m^2 [5].

I.4 Conversion photovoltaïque

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1983 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [6].

I.5 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22\ \mu\text{m}$ à $10\ \mu\text{m}$. La (figure I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0,4\ \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visible ($0,4\ \text{à}\ 0,8\ \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0,8\ \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de $1,37\text{ kW/m}^2$, à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toute fois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [6].

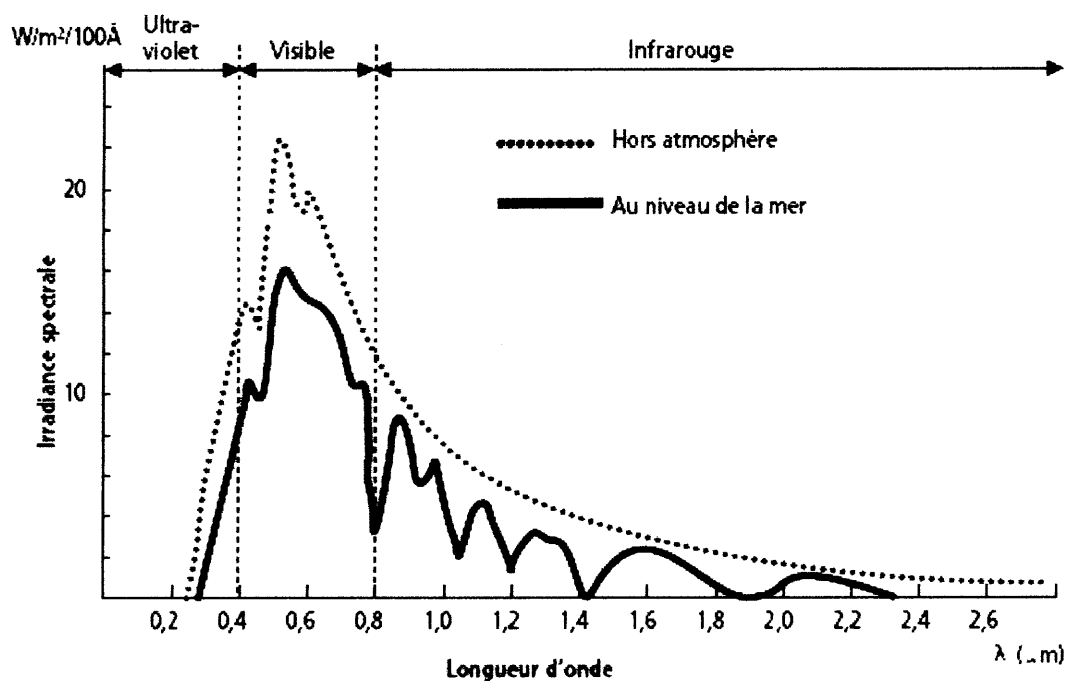


Figure I.1 Analyse spectrale du rayonnement solaire

I.6 La cellule solaire

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

I.6.1 Principe de fonctionnement d'une cellule

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule (figure I.2) [7].

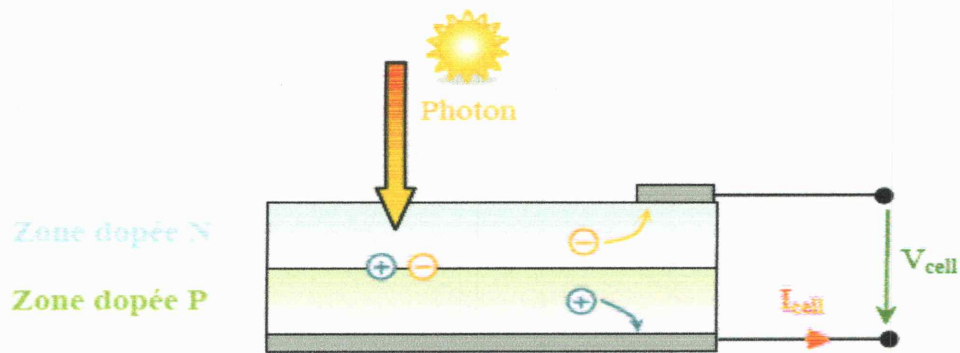


Figure I.2 principe de la conversion photoélectrique

I.6.2 Différents types des cellules [7]

Il existe trois grands types de silicium : mono-cristallin, poly-cristallin et amorphe.

a- Cellule au silicium mono-cristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.

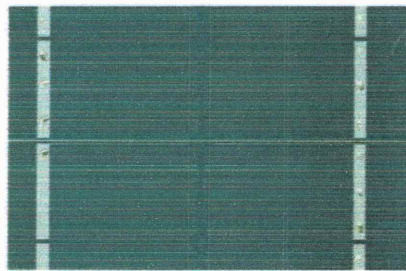


Figure I.3 Cellule au silicium mono-cristallin

b- Cellule au silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.

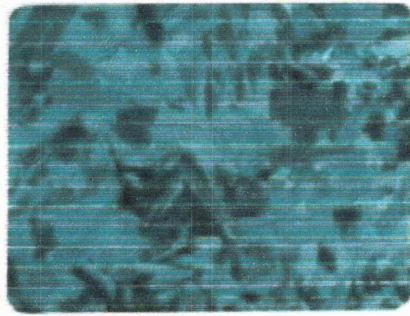


Figure I.4 Cellule au Silicium Poly cristalline

c- Cellule au silicium amorphe

Le silicium amorphe absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin. Les cellules sont constituées par des couches très minces.

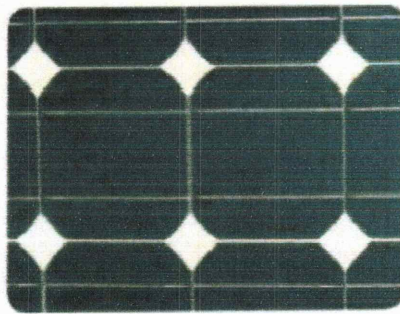


Figure I.5 plusieurs Cellules au Silicium amorphe

I.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque [8]

I.7.1 Modèle idéal

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir d'un circuit équivalent composé d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle (figure I.6).

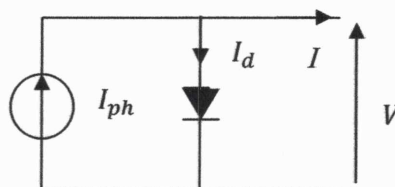


Figure I.6 Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Le courant aux bornes de la cellule est : $I = I_{ph} - I_d$ (I.1)

avec:

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n.V_T}\right) - 1 \right] \quad (I.2)$$

et $V_T = \frac{k.T}{e}$ (I.3)

I_{ph} : Photo courant en A

I_d : Courant de la diode en A

V : La tension aux bornes de la cellule en V

n : Facteur d'idéalité de la diode (ou facteur de qualité)

K : Constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ J/K)

e : Charge de l'électron ($1,602.10^{-19}$ C)

V_T : Tension thermique en V

T : Température de la cellule en K

I.7.2 Modèle réel à une diode

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la (figure I.7).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s)

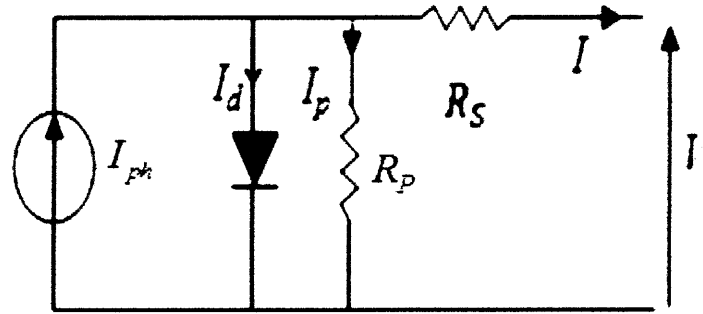


Fig. I.7 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode

R_p : résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû au non idéalité de la jonction (P-N) et des impuretés près de la jonction.

R_s : résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur.

En pratique, la résistance parallèle R_p est très importante (de l'ordre du méga-Ohm) et la résistance série R_s est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

Le courant de sortie fourni par la pile solaire est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff, dans le circuit équivalent ci-dessus :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.4)$$

On remplace I_d et I_p par leurs expressions :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

$$I_p = \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (I.6)$$

On trouve :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + IR_s)}{nV_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (I.7)$$

I.7.3 Modèle réel simplifié à une diode

Généralement, l'effet de la résistance parallèle du circuit électrique équivalent est négligé, car son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas. Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{n V_T}\right) - 1 \right] \quad (I.8)$$

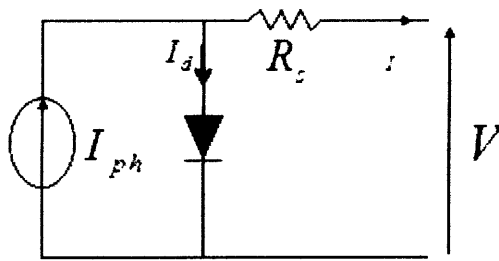


Figure I.8 Schéma du modèle réel à une diode d'une cellule photovoltaïque

I.7.4 Modèle réel simplifié à deux diodes

La (figure I.8) montre le circuit équivalent de la cellule à deux diodes : dans ce modèle, la diode supplémentaire modélise la génération/recombinaison des porteurs de charge dans la zone de la charge.

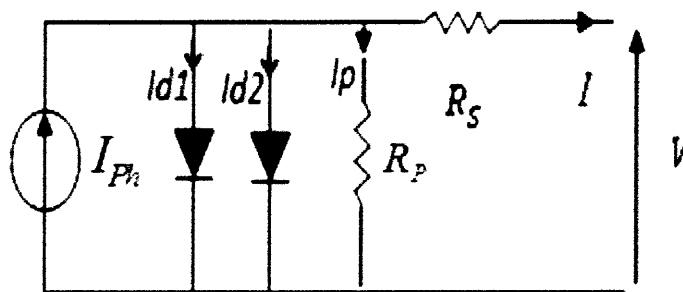


Figure I.9 Modèle à deux diodes d'une cellule solaire

À partir cette figure on a la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (I.9)$$

I.8 Paramètres des cellules photovoltaïques [9]

Ces paramètres sont spécifiés par le fabricant. Ces valeurs sont données pour un ensoleillement, une température de fonctionnement et un air masse donnés.

I.8.1 Courant de court-circuit I_{CC}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (I.10)$$

I.8.2 Tension à circuit ouvert V_{OC}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{oc} = n.V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (I.11)$$

I.8.3 Puissance maximale P_{mpp}

Il existe un point particulier sur la courbe caractéristique (I/V), pour lequel la puissance $P=I.V$ fournie par la cellule est maximale. Ce point est appelé, Point de Puissance Maximale (en anglais Maximum Power Point MPP).

Mathématiquement, on obtient ce point de la façon suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial (IV)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} = 0 \quad (I.12)$$

I.8.4 Facteur de forme FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{mpp}) pour un point de fonctionnement I_{mpp}, V_{mpp} de la courbe courant-tension. Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox, Oy et les droites $x = I_{mpp}$ et $y = V_{mpp}$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.13)$$

I.8.5 Rendement de conversion η

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.14)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert.

I.9 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est définie par ses courbes caractéristiques électriques (courant-tension) et (puissance-tension). Elles indiquent la variation du courant et de la puissance quelle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert, comme l'indique la (figure I.10).

Les caractéristiques électriques de la cellule peuvent être déterminées à partir des courbes (I-V), ces caractéristiques sont : courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, la puissance maximale, et le facteur de forme.

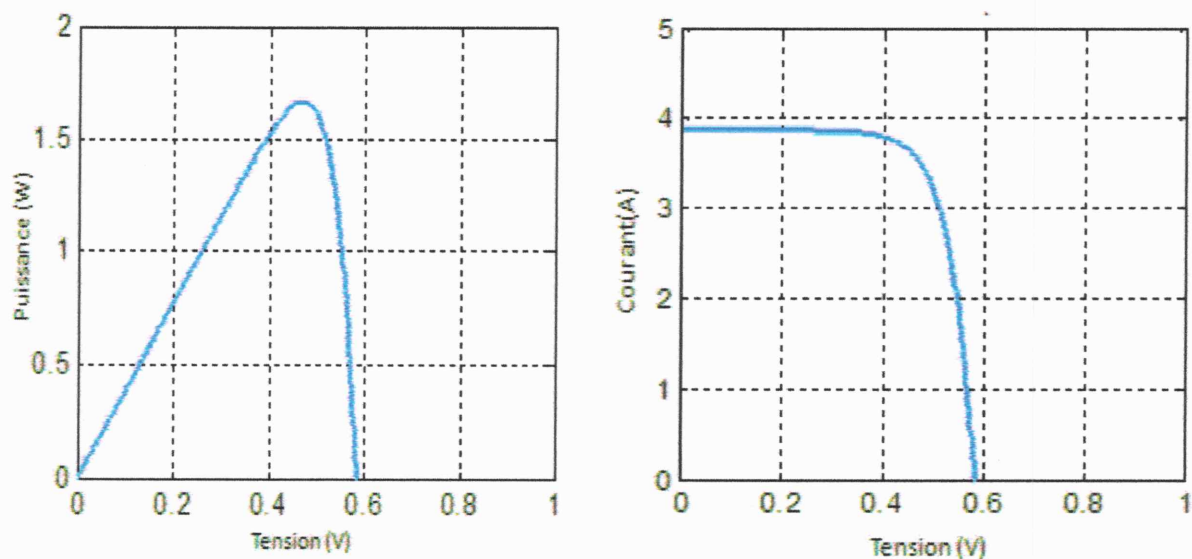


Figure I.10 Caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ d'une cellule PV à $G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$

I. 10 Module photovoltaïque

Un module est un convertisseur instantané d'énergie lumineuse en énergie électrique, fabriqué par la mise en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules PV afin de générer des tensions compatibles avec le matériel électrique utilisé.

Une cellule élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique avec une tension de moins 2 volt et un point de puissance maximale à environ 0.45 volt pour une cellule au silicium cristallin (ex :Une cellule PV au silicium de 10 cm^2 produit une puissance de l'ordre de 1.25 W). La connexion des cellules en série permet d'augmenter la tension pour un même courant tandis que leur assemblage en parallèle permet d'obtenir des intensités du courant élevées pour la même tension [10].

I.10.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les figures (I.11) et (I.12) représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module photovoltaïque de type BP SX 120 qui est constitué de $N_s= 72$ cellule en série.

On constate qu'elle est similaire à celles d'une cellule sauf l'ordre de grandeur des tensions et des courants.

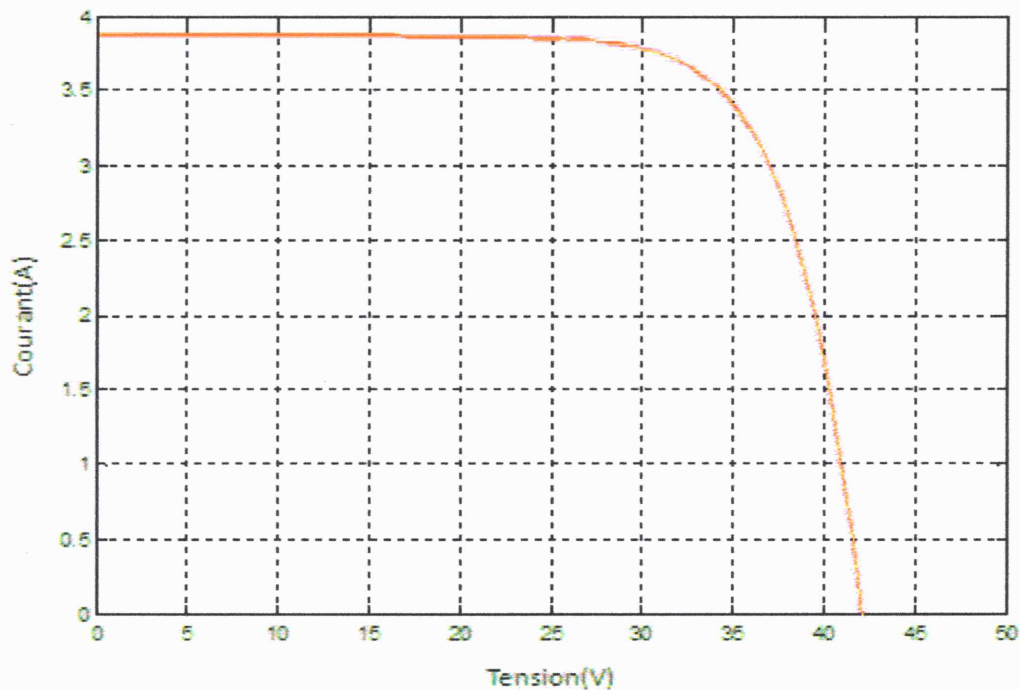


Figure I.11 Caractéristique $I(V)$ d'un module PV (BP SX 120) à $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$

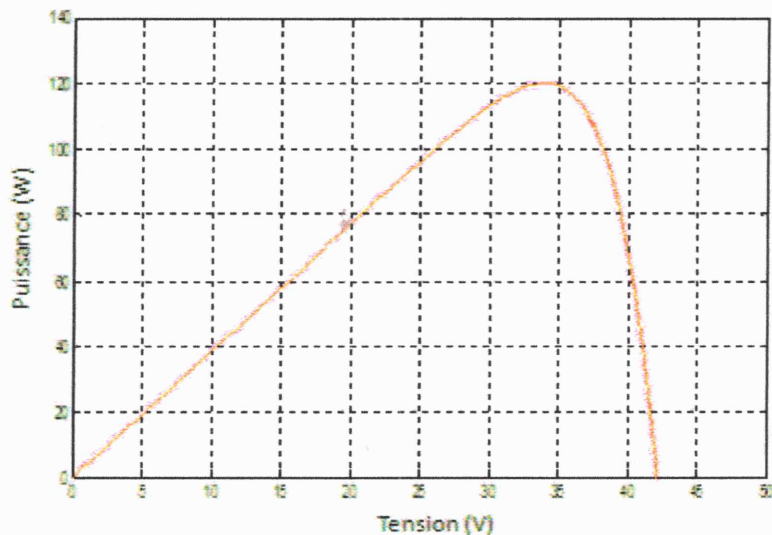


Figure I.12 Caractéristique $P(V)$ d'un module PV (BP SX 120) à $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$

I.10.2 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$

a- Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$

La figure suivante représente les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

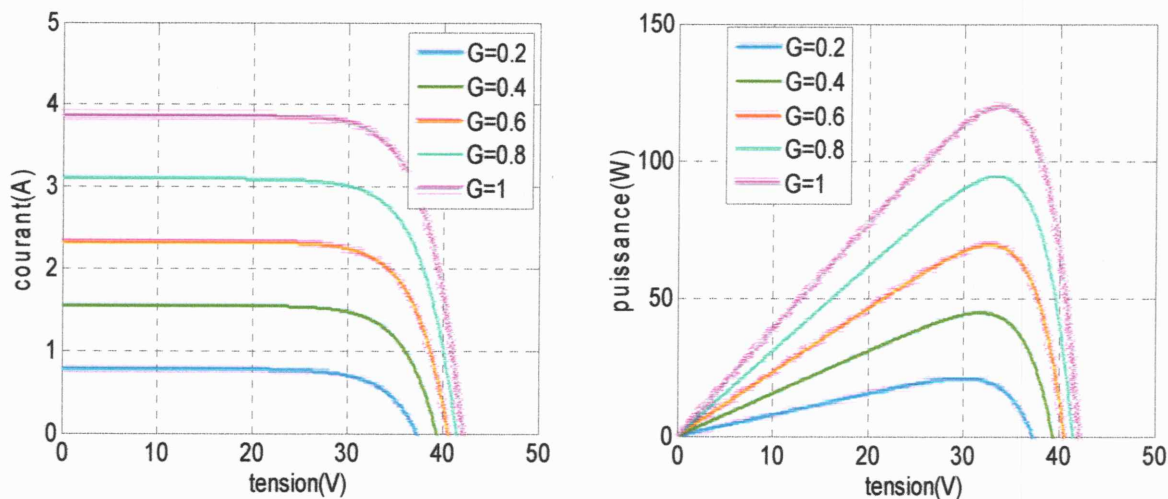


Figure I.13 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$

Nous remarquons que :

- le courant de court-circuit I_{CC} varie proportionnellement avec l'éclairement G .
- la tension à vide V_{CO} varie peu avec l'éclairement.
- La puissance maximale du module PV est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

b- Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P(V)

La figure (I.14) représente les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module PV en fonction de la température, à un éclairement constant de 1000 W/m^2 .

Nous remarquons que :

- la tension à vide V_{CO} décroît avec la température. Plus la température est élevée Plus V_{CO} est faible.
- le courant de court-circuit I_{CC} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{CC} peut être négligée dans la majorité des cas.

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance

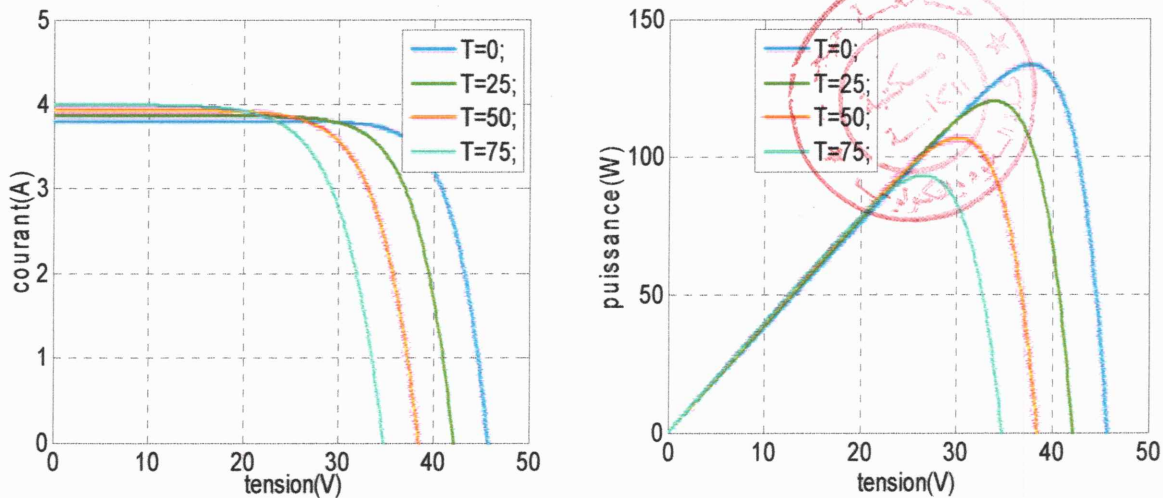


Figure I.14 Influences de la température sur la caractéristique I (V) et P (V)

c- Influence du facteur de qualité (n)

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

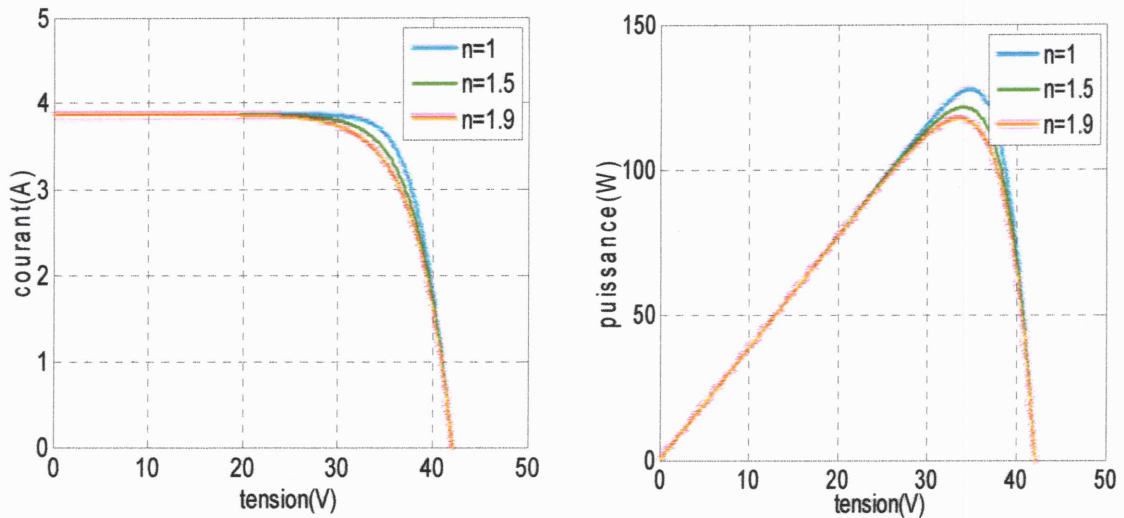


Figure I.15 Influence du facteur de qualité (n) sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$

I.11 Types des systèmes photovoltaïques [11]

I.11.1 Système indépendant

C'est un système photovoltaïque qui alimente l'utilisateur en électricité (sans être connecté au réseau électrique). En effet, ces systèmes appelés aussi " autonomes " sont des systèmes qui ne dépendent pas de l'existence d'un réseau d'électricité classique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible : les maisons en site isolé, sur des îles.

I.11.2 Système connecté au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur statique (continu-alternatif).

Le convertisseur ou onduleur remplit les fonctions suivantes :

- Conversion du courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.

I.11.3 Système hybride

En raison de la fluctuation annuelle du rayonnement solaire aux majeures parties du monde, un système d'alimentation d'énergie exclusivement photovoltaïque exigerait un grand générateur solaire et/ou un grand système de stockage. Un tel système photovoltaïque est très cher.

Par conséquent, des types habituellement différents des générateurs d'électricité sont combinés entre elles pour former un système hybride. Une combinaison des générateurs photovoltaïques et générateurs classiques garantit la même fiabilité d'approvisionnement que le réseau public.

Dans des conditions atmosphériques favorables, toute la demande énergétique est satisfaite à partir du générateur solaire. De l'énergie en surplus est stockée dans des batteries. Par la nuit ou le temps défavorable, la demande énergétique est au commencement satisfaite par les batteries. S'il y a danger de décharge profonde, un générateur diesel ou à gaz fournit l'électricité et charge simultanément la batterie.

I.12 La commande MPPT

I.12.1 La poursuite du point de puissance maximale

Le générateur PV transforme directement l'énergie solaire en énergie électrique. Cette énergie varie en fonction de l'éclairement et de la température.

La fonction caractéristique du courant fournie par le générateur en fonction de sa tension autrement dit la caractéristique (I-V) du générateur passe par un point appelée Point de Puissance Maximale ou MPP (Maximum Power Point) qui est le point optimum où la puissance du générateur est maximum (I_{mpp} et V_{mpp}). La caractéristique courant-tension (I-V) du générateur PV étant non linéaire et variant avec l'éclairement solaire et la température de fonctionnement des modules PV, pour que la puissance fournie par le générateur à la charge soit maximale, il faut que l'impédance interne du générateur soit bien adaptée à l'impédance de la charge .Il est donc nécessaire de placer entre le générateur PV et la charge, un convertisseur continu-continu.

Le contrôle du rapport cyclique du convertisseur DC/DC permettra de maintenir ce point au point de puissance maximale, quelque soit les variations de l'éclairement et de la température. Les performances de ce convertisseur dépendent essentiellement de sa topologie et de la loi de commande.

Selon la théorie de transfert optimal de puissance, la puissance fournie à la charge est maximale quand l'impédance interne du générateur est bien adaptée à la charge [12].

I.12.2 Méthodes MPPT

Il existe plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale. Dans ce mémoire, on s'est intéressé à deux méthodes en particulier : la méthode perturbation et observation (P&O) et la méthode de la conductance incrémental. Ces deux méthodes utilisent le

principe de la contre réaction de puissance. Nous allons expliquer dans ce qui suit le principe de chacune d'elles [13].

a- Méthode de conductance incrémentale

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance est positive à gauche du PPM, nulle au PPM et négative à droite du PPM.

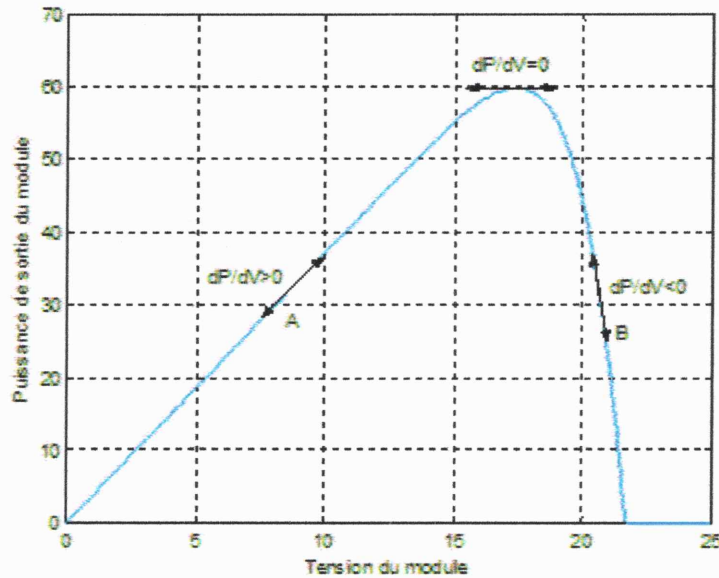


Figure I.16 Caractéristique $P(V)$ du module PV et variation de dP/dV

On peut résumer ces états comme suit:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ à gauche du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ au MPP} \quad (\text{I.15})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ à droite du MPP}$$

La puissance de sortie du panneau est égale au produit de la tension et du courant:

$$P = I \times V \quad (\text{I.16})$$

La dérivée de la puissance par rapport à la tension V est donnée par la relation suivante:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{I.17})$$

Si on approxime les dérivées de la puissance, du courant et de la tension par des différences des instants actuel et précédant la relation (I.17) se réécrit de la manière suivante:

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{I.18})$$

On peut réécrire l'équation (I.18) sous la forme suivante:

$$\frac{1}{V} \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{I.19})$$

Ainsi l'équation (I. 15) prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta V} &> -\frac{I}{V} && \text{à gauche du MPP} && (\text{a}) \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &= -\frac{I}{V} && \text{au MPP} && (\text{b}) \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &< -\frac{I}{V} && \text{à droite du MPP} && (\text{c}) \end{aligned} \quad (\text{I.20})$$

En introduisant la notion de la conductance instantanée $G = \frac{I}{V}$ et de la conductance incrémentale

$\Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta V}$, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \Delta G > -G &&& \text{A gauche du MPP} && (\text{a}) \\ \Delta G = -G &&& \text{Au MPP} && (\text{b}) \\ \Delta G < -G &&& \text{A droite du MPP} && (\text{c}) \end{aligned} \quad (\text{I. 21})$$

Le point de puissance maximale peut être traqué en comparant la conductance incrémentale avec la négation de la conductance instantanée.

La relation (I.21) montre que le point de puissance maximale PPM est atteint si la conductance de la source photovoltaïque est égale à la conductance incrémentale ΔG avec un signe moins (-).

Les équations (I.20.a) et (I.20.c) sont utilisées pour déterminer la direction de la perturbation de la tension de fonctionnement du panneau PV pour atteindre le point de puissance maximale. L'action de perturbation est répétée jusqu'à satisfaction de l'équation (II.20.b).

Une fois que le PPM est atteint l'algorithme de poursuite continue à fonctionner à ce point jusqu'à ce qu'un changement du courant ou de la tension est détecté, indiquant qu'une variation d'irradiation ou de température est survenue.

L'organigramme correspondant à l'algorithme de poursuite du PPM « conductance incrémentale » est représenté sur la (figure I.17) les valeurs de la tension et du courant mesurées à deux instants successifs d'échantillonnage sont utilisées pour calculer les variations du courant ΔI et de la tension ΔV .

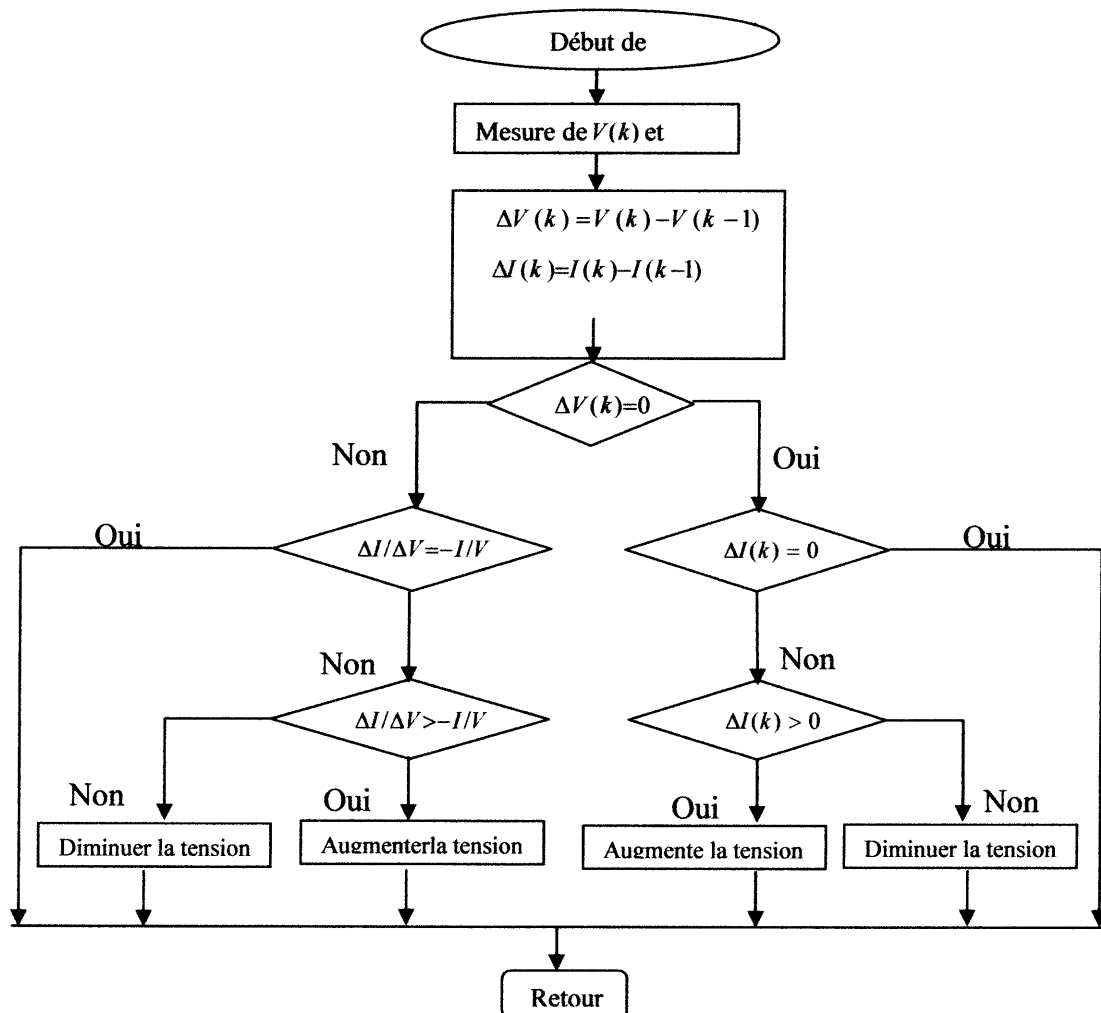


Figure I.17 Organigramme de la méthode « conductance incrémentale »

L'organigramme de la (figure I.17) est constitué de deux branches : la première consiste à faire un test sur ΔV et ΔI et la deuxième consiste à faire un test sur ΔV et $\Delta I/\Delta V$.

Si ΔV est nul; le PPM est atteint, il fait un deuxième test sur ΔI qui donne une image de la variation d'irradiation qui implique un changement de la position du point de puissance maximale (MPP) et par conséquent sa tension:

- ✓ Si $\Delta I = 0$, les conditions atmosphériques n'avaient pas changé et le MPPT fonctionne encore au point de puissance maximale MPP.
- ✓ Si $\Delta I > 0$, l'irradiation a augmenté ce qui implique une augmentation de la tension correspondante au point de puissance maximale. Ceci implique que le MPPT augmente la tension de fonctionnement du panneau solaire pour traquer le point de puissance maximale.
- ✓ Si $\Delta I < 0$, l'irradiation a diminué, diminuant ainsi la tension correspondante au PPM. Le MPPT réagit pour diminuer la tension de sortie.

Si les changements du courant et de la tension ne sont pas nuls, les équations (I.20.a) et (I.20.c) sont utilisées pour déterminer la direction de perturbation de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque pour atteindre le point de puissance maximale:

- Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ le point de fonctionnement du panneau solaire est à gauche du PPM.

Le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement du panneau pour atteindre le point de fonctionnement optimal.

- Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ le point de fonctionnement du panneau solaire est situé à droite du MPP par conséquent la tension doit être abaissée pour atteindre le MPP.

L'action de perturbation est répétée jusqu'à satisfaction de l'équation (II.21.b). Une fois que le MPP est atteint le MPPT continue à fonctionner à ce point jusqu'à ce qu'un changement de courant est détecté; indiquant qu'une variation d'irradiation est survenue.

En pratique, la condition $\frac{dP}{dV} = 0$ apparaît rarement à cause de l'approximation précédente faite sur dI et dV et l'utilisation d'un pas constant ce qui engendre des ondulations autour du PPM avec une marge d'erreur. Le choix de la valeur de cette erreur est un compromis entre la précision de poursuite du PPM et la fréquence de variation de la tension de sortie [13].

b-Méthode Perturbation et Observation (P&O)

C'est une méthode à contre réaction de puissance, et c'est la méthode MPPT la plus utilisée vu la simplicité de son principe et la facilité de son implémentation. Elle est basée, comme son nom l'indique, sur l'introduction d'une perturbation sur le système et l'observation de son effet sur la puissance. La perturbation du système est introduite par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence (V_{ref}) en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'observation de la puissance permet ensuite de prendre une décision sur la prochaine

perturbation à introduire, s'il y'a eu une augmentation de la puissance, la perturbation continuera dans le même sens, sinon elle est inversée.

L'algorithme de cette méthode est donné dans la (figure I.18) On explique dans ce qui suit son fonctionnement brièvement :

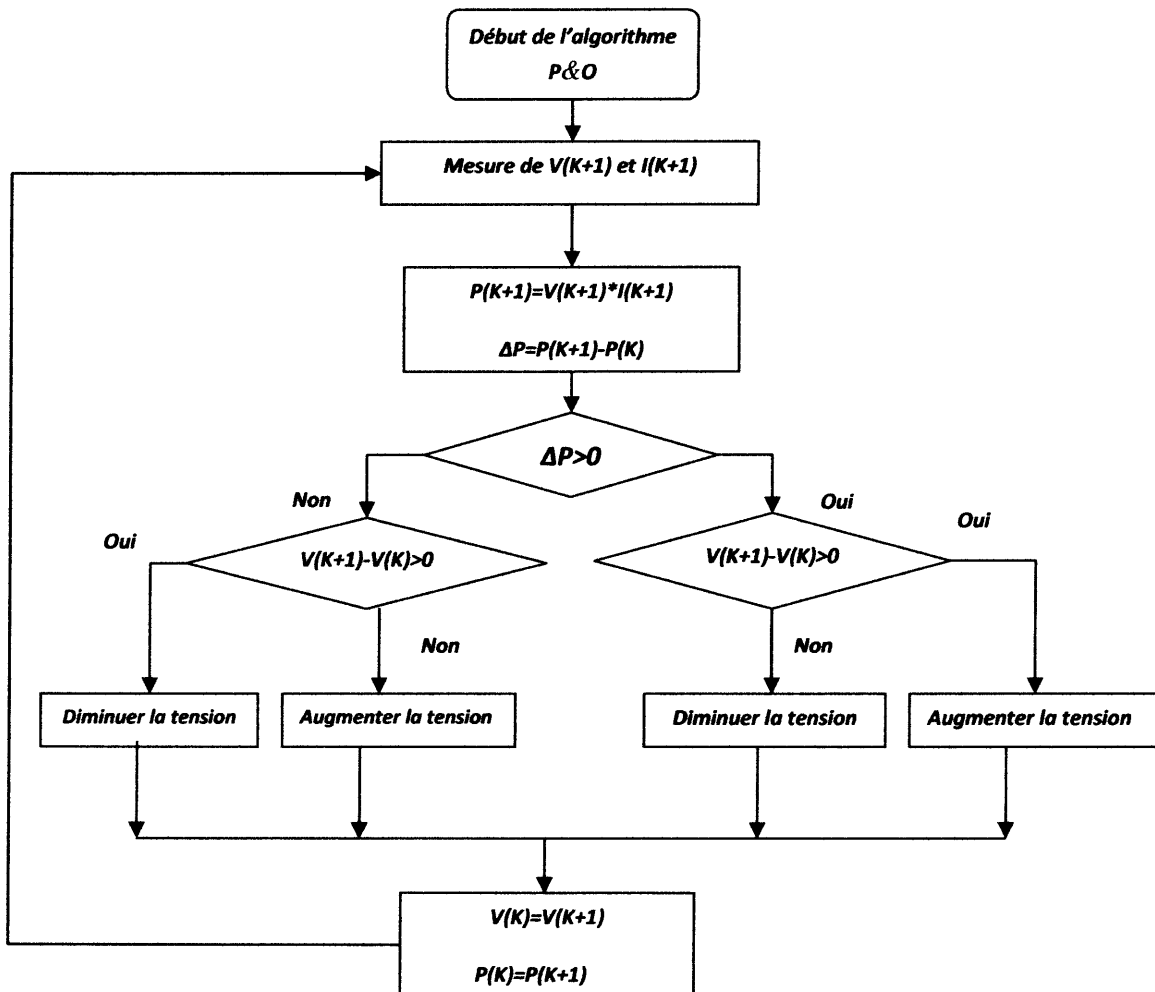


Figure I.18 Organigramme de la méthode (P&O)

D'une manière générale le fonctionnement de cet algorithme peut être résumé comme suit:

- Si le panneau fonctionne à gauche du MPP donc incrémenter (décrémenter) la tension de fonctionnement du panneau augmente (diminue) sa puissance de sortie (figure I.19) et (figure I.20).
- Si le panneau fonctionne à droite du MPP donc ; incrémenter (décrémenter) la tension de fonctionnement du panneau aura pour effet de diminuer (augmenter) sa puissance de sortie (figure I.19 et figure I.20) [14].

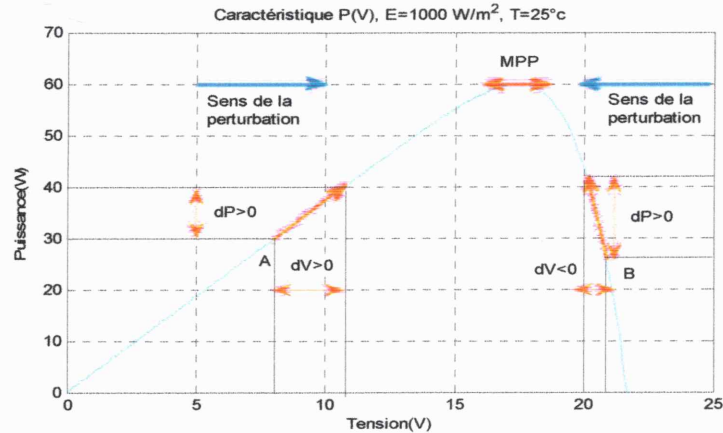


Figure I.19 principe de fonctionnement du P&O: vers le MPP

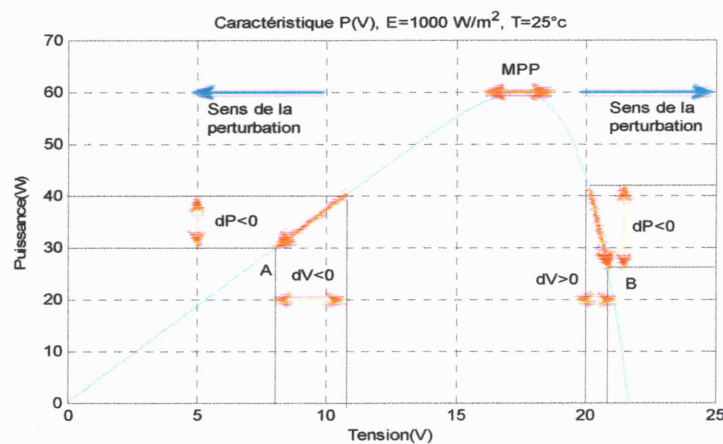


Figure I.20 Principe de fonctionnement du P&O loin du MPP

I.13 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [15]

I.13.1 Avantages

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.

I.13.2 Inconvénients

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %.
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< 30 V) donc, elle doit être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

I.14 Conclusion

L'électricité solaire photovoltaïque est l'une des disciplines mondiales les plus importantes dans le développement durable. Actuellement, malgré la maîtrise de la technologie de fabrication de cellules solaires et de leur encapsulation, les installations photovoltaïques sont encore chères. Pour cela la maîtrise de la technologie seule, ne suffit plus à la diminution des coûts des installations PV ; mais encore les techniques de dimensionnement des installations peuvent minimiser le coût du Watt-crête vendu.

Dans ce chapitre on a vu les différents éléments de base d'un système photovoltaïque (cellule et module photovoltaïque) ainsi que les paramètres qui influent sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du module.



CHAPITRE

MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PV CONNECTÉ AU RÉSEAU

II.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique deviennent aujourd'hui plus intéressants que les systèmes photovoltaïques autonomes traditionnels, qui souffrent de plusieurs inconvénients, tels que les batteries coûteuses et encombrantes inévitables et leur entretien régulier.

Dans ce chapitre on présentera les différents composants constituant ce type des systèmes photovoltaïques et la structure de l'onduleur à trois niveaux et on élaborera son modèle en se basant sur les fonctions de connexion, les interrupteurs de l'onduleur seront pilotés par la stratégie triangulo-sinusoïdal à deux porteuses.

II.2 Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau

Une première classification de centrales photovoltaïques connectées au réseau de la manière suivante [2] :

II.2.1 Centrales de petite taille ($P = 1$ à 10 kW)

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension.

II.2.2 Centrales de taille moyenne ($P = 10$ à 100 kW)

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

II.2.3 Centrales de grande taille ($P \geq 500$ kW)

Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

II.3 Types des onduleurs connectés au réseau [16]

Les types des onduleurs connectés au réseau sont : l'onduleur central, l'onduleur string, et l'onduleur intégré aux panneaux.

II.3.1 Onduleur central

Un onduleur central (figure II.1.a) de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif.

Le champ de cellules photovoltaïques est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle.

Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules photovoltaïques connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

II.3.2 Onduleur string ou de rangée

L'onduleur string (figure II.1.b) est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules photovoltaïques sont connectés en série.

Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules photovoltaïques, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes anti retour est fortement recommandé.

Les installations jusqu'à 3 kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur string. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs string en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production de la rangée concernée est défailante.

II.3.3 Onduleur intégré au panneau (modulaire)

Suivant ce concept (figure II.1.c), chaque module photovoltaïque dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module photovoltaïque correspondant.

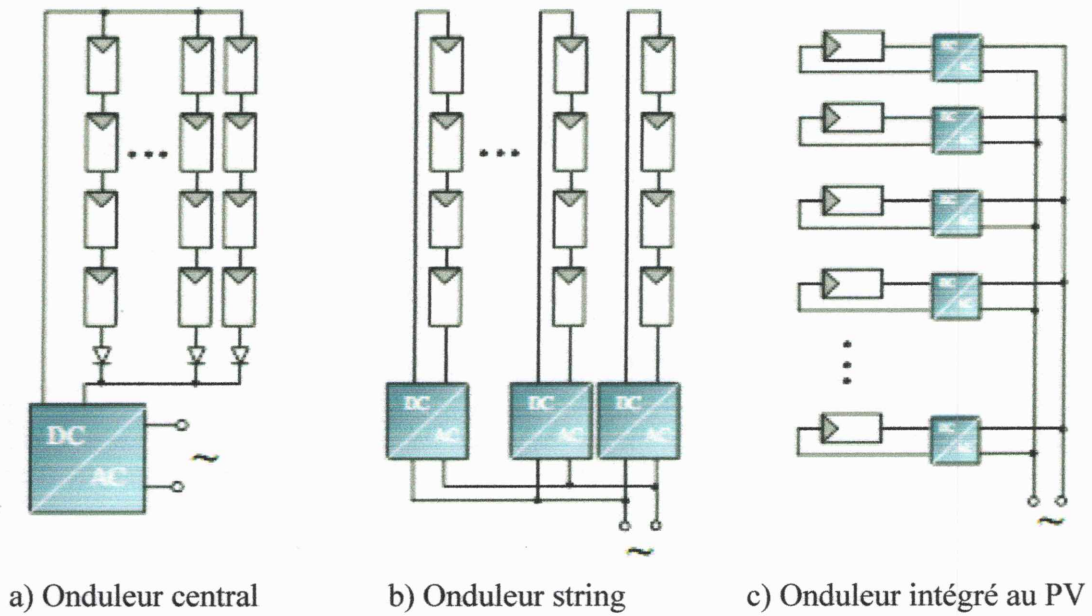


Figure II.1 Schéma de principe des différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique

II.4 Modélisation et description du système étudié

Le modèle générale de la structure du système photovoltaïque qu'on va étudier est présenté par la figure (II.2). Il est constitué d'un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs modules, deux capacités à l'entrée du convertisseur, un onduleur triphasé à trois niveaux, et le réseau triphasé.

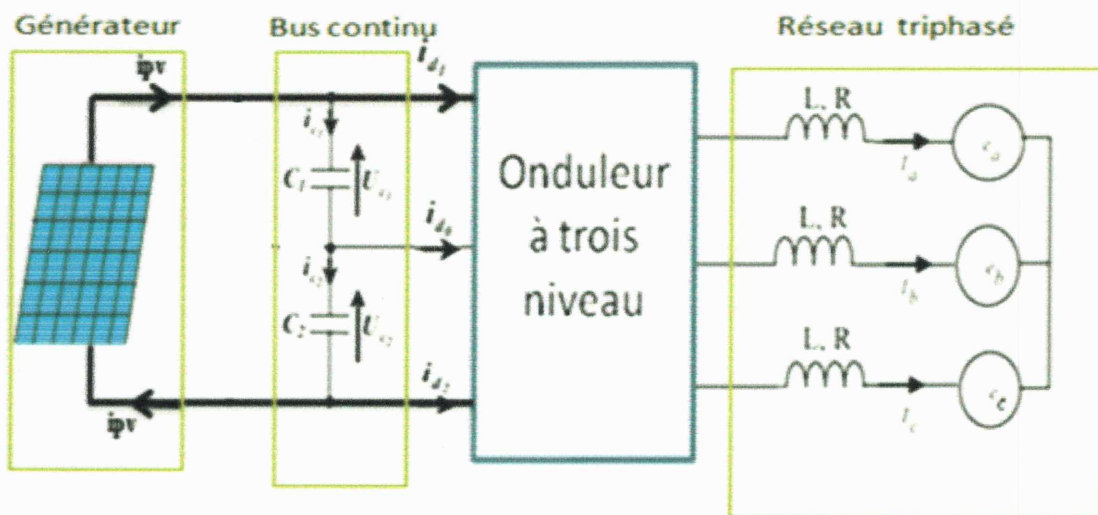
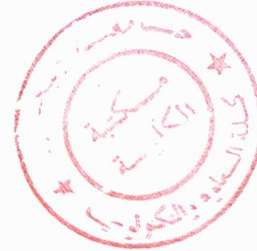


Figure II.2 Schéma d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique

En présence du circuit d'équilibrage résistif, les tensions aux bornes des condensateurs sont exprimées par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{pv} - i_{d1} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{pv} - i_{d0} \end{cases} \quad (II.1)$$



II.4.1 Modèle du générateur PV

Comme cela a été vu au chapitre 1, le module à étudier est le BP SX120 et le modèle que nous allons utiliser pour simuler le comportement du module PV est basé sur le modèle électrique réel à 1 diode (figure. I.7).

Pour augmenter la puissance délivrée par le générateur PV, on choisit un groupement mixte formé de $N_s=22$ modules en série et $N_p=10$ en parallèle.

Rappelons l'équation de la caractéristique I (V) de la cellule de base :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (II.2)$$

L'expression du courant délivré par le module PV est donnée par :

$$I_{\text{module}} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{\text{module}} + N_s \cdot R_s \cdot I}{N_s \cdot n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{\text{module}} + N_s \cdot R_s \cdot I}{N_s \cdot R_p} \quad (II.3)$$

Le courant et la tension de sortie de ce champ photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{pv} = n_s \cdot V_{\text{module}} \quad (II.4)$$

$$I_{pv} = n_p \cdot I_{\text{module}} \quad (II.5)$$

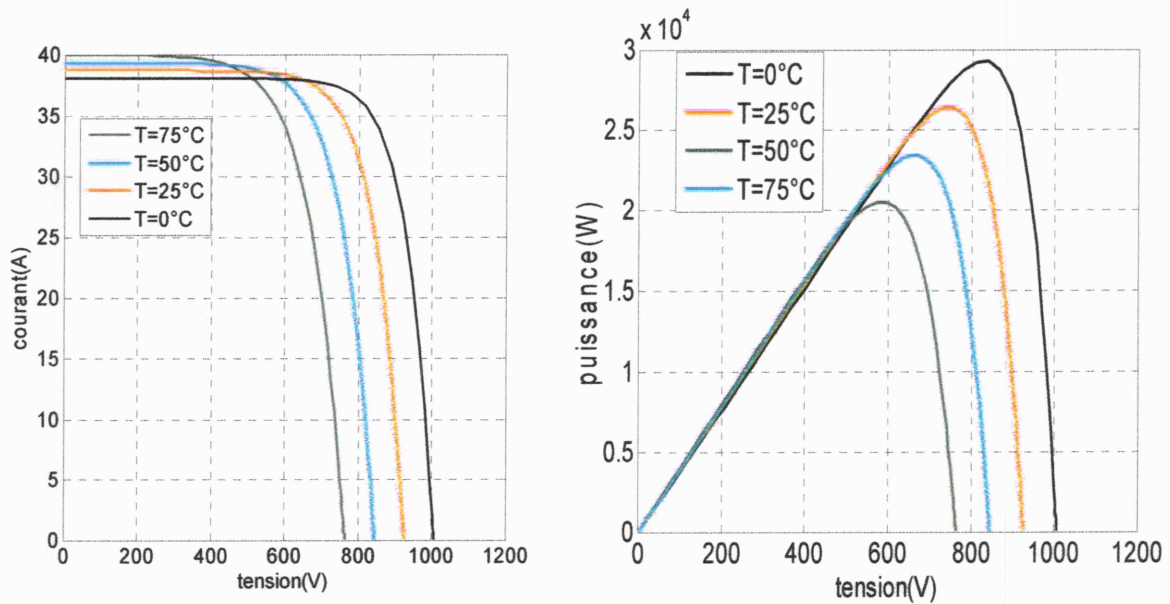


Figure II.3 Caractéristique courant tension et puissance tension du champ PV à $G=1000 \text{ W/m}^2$

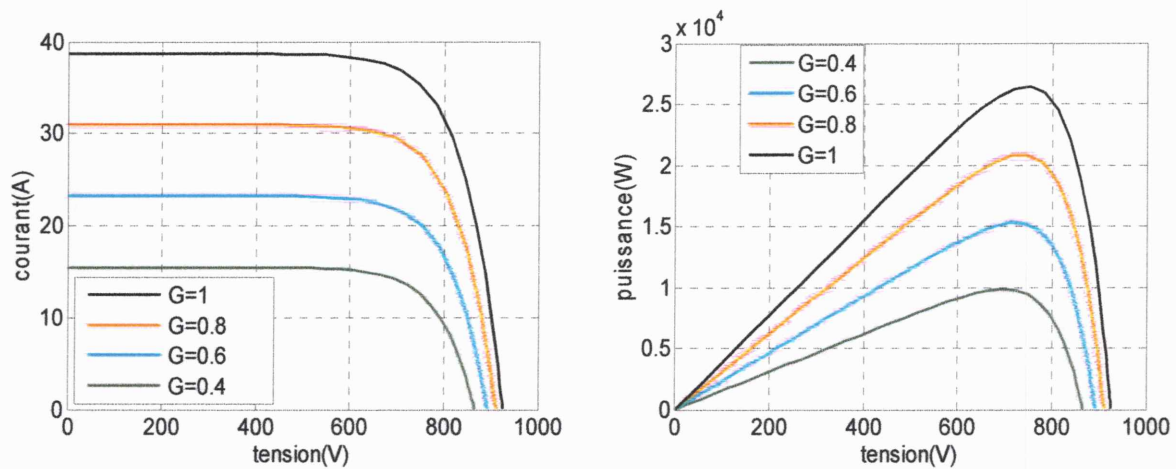


Figure II.4 Caractéristiques puissance-tension et courant-tension du champ PV à $T=25^\circ\text{C}$

II.4.2 Description de l'onduleur à trois niveaux [3]

La structure de ce type d'onduleurs est présentée à la figure (II.5). L'onduleur est composé de trois bras, on associe à chaque bras deux diodes appelées diodes flottantes, qui sert à appliquer le niveau zéro de tension de la source continue, chaque bras ayant quatre interrupteurs bidirectionnels, réalisés par la mise en antiparallèle d'un transistor et une diode. Pour éviter le court-circuit de la source continue à l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture de la charge alternative à la sortie, on doit éviter de fermer ou d'ouvrir simultanément les quatre interrupteurs d'un bras. On suppose que la tension V_{dc} est divisée en égalité entre les deux capacités:

$$u_{c1} = u_{c2} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.6})$$

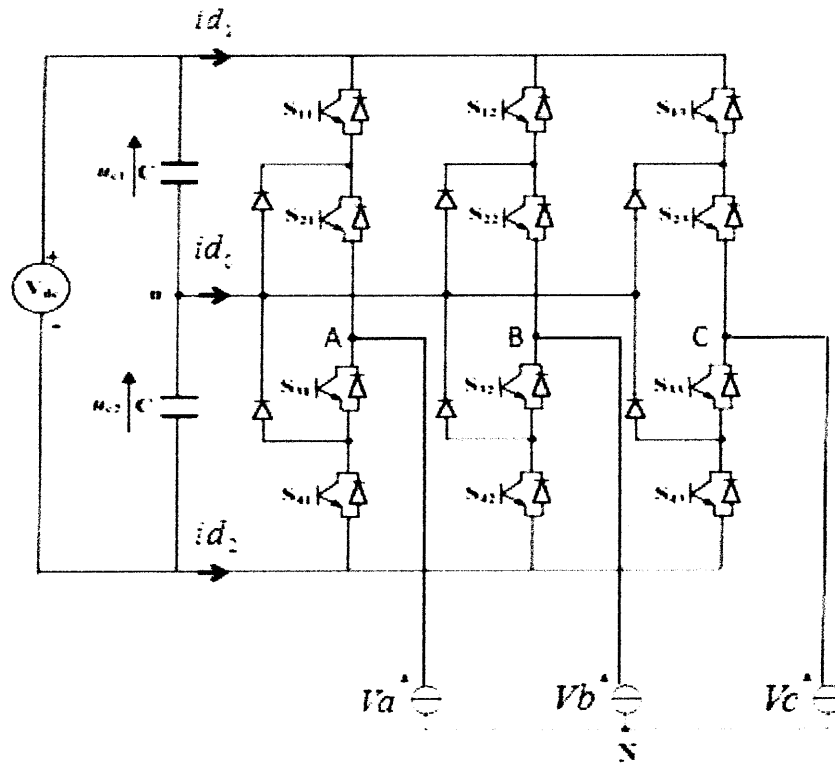


Figure II.5 Onduleur à trois niveaux

a- Fonctions de connexion

Pour chaque interrupteur S_{ij} ($i=1,2,3,4$ $j=1,2,3$), on définit une fonction de connexion F_{ij}

de la manière suivante:
$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{ij} \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } S_{ij} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (II.7)$$

Les interrupteurs de chaque bras sont complémentaires deux à deux:

$$F_{ij} = 1 - F_{(i-2)j} \quad i=3,4 \quad j=1,2,3 \quad (II.8)$$

b- Etats d'un bras de l'onduleur

En mode commandable, chaque bras de l'onduleur a trois états possibles (Figure II.6):

Etat P: Les deux interrupteurs du haut S_{1j} et S_{2j} ($j=1,2$ ou 3) sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du bas S_{3j} et S_{4j} ($j=1,2$ ou 3) sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est $\frac{V_{dc}}{2}$

Etat O: Les deux interrupteurs du milieu S_{2j} et S_{3j} ($j=1,2$ ou 3) sont fermés, tandis que les deux interrupteurs des extrémités S_{1j} et S_{4j} ($j=1,2$ ou 3) sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est 0.

Etat N: Les deux interrupteurs du bas S_{3j} et S_{4j} ($j=1,2$ ou 3) sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du haut S_{1j} et S_{2j} ($j = 1,2$ ou 3) sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est $-\frac{V_{dc}}{2}$

La correspondance entre les états du bras, les états des interrupteurs et la tension de sortie est résumée au tableau (II.1).

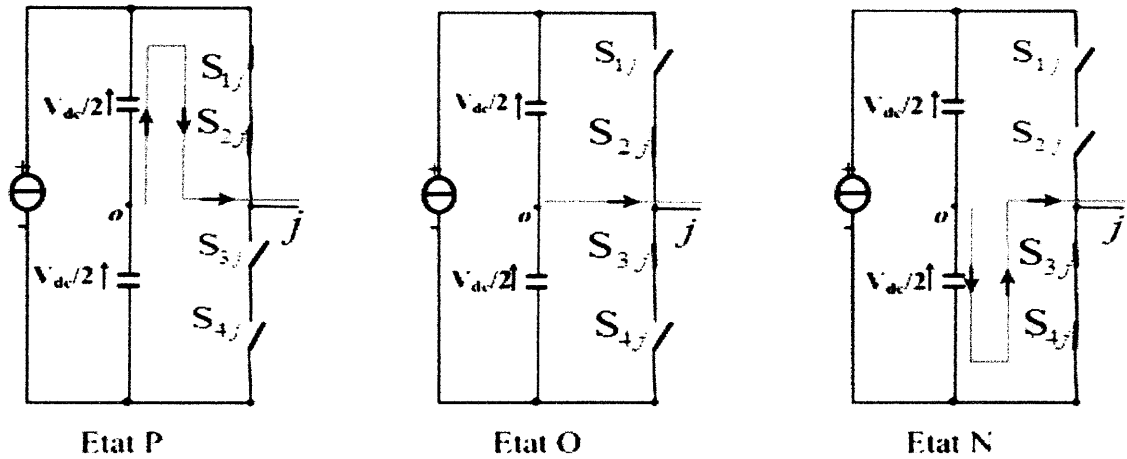


Figure II.6 Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

État du Bras	États des interrupteurs				Tension de Sortie V_{ko} ($k=a, b,$ ou c)
	S_{1j}	S_{2j}	S_{3j}	S_{4j}	
P	1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$

Tableau II.1 Correspondance entre les états du bras, les états des interrupteurs et la tension de Sortie

c- Etats de l'onduleur

Chaque bras de l'onduleur peut prendre trois états. Ainsi l'onduleur triphasé a $3^3 = 27$ états possibles. Ces états sont identifiés en indiquant les états des trois bras. Par exemple, l'état *PON* indique que le premier bras est à l'état *P*, le deuxième est à l'état *O*, et le troisième est à l'état *N*.

d- Fonction de connexion des demi-bras

La Fonction de connexion d'un demi-bras est notée F_{jm}^b

- pour le demi-bras de haut :

$$m = 1 \quad \text{et} \quad F_{j1}^b = F_{1j} \cdot F_{2j} \quad (\text{II.9})$$

- pour le demi-bras de bas :

$$m = 0 \quad \text{et} \quad F_{j0}^b = F_{3j} \cdot F_{4j} \quad (\text{II.10})$$

e- Les tensions de sortie de l'onduleur [17]

Les tensions de sortie de l'onduleur triphasé par rapport au point milieu (*o*) de la source continue sont données par :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}F_{21}U_{C1} - F_{31}F_{41}U_{C2} \\ V_{bo} = F_{12}F_{22}U_{C1} - F_{32}F_{42}U_{C2} \\ V_{co} = F_{13}F_{23}U_{C1} - F_{33}F_{43}U_{C2} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les fonctions de connexion des demi-bras sont :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{21} & F_{21}^b = F_{12}F_{22} & F_{31}^b = F_{13}F_{23} \\ F_{10}^b = F_{31}F_{41} & F_{20}^b = F_{32}F_{42} & F_{30}^b = F_{33}F_{43} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, les tensions polaires deviennent :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}^b.U_{C1} - F_{10}^b.U_{C2} \\ V_{bo} = F_{21}^b.U_{C1} - F_{20}^b.U_{C2} \\ V_{co} = F_{31}^b.U_{C1} - F_{30}^b.U_{C2} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Les tensions composées de sortie de l'onduleur peuvent être exprimées par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = (F_{11}^b - F_{10}^b).U_{C1} - (F_{21}^b - F_{20}^b).U_{C2} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} = (F_{21}^b - F_{20}^b).U_{C1} - (F_{31}^b - F_{30}^b).U_{C2} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = (F_{31}^b - F_{30}^b).U_{C1} - (F_{11}^b - F_{10}^b).U_{C2} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

On suppose une charge équilibrée et couplée en étoile et soit (n) le neutre de la charge. Les tensions simples de sortie de l'onduleur peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} - V_{no} \\ V_{bn} = V_{bo} - V_{no} \\ V_{cn} = V_{co} - V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

En supposant que $u_{c1} = u_{c2} = u_c = \frac{V_{dc}}{2}$, on en déduit l'expression des tensions simples sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_c \quad (\text{II.16})$$

II.4.3 Stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux

a- Les différentes stratégies de commande de l'onduleur

Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux peuvent être classées comme suit [17] :

- commande à pleine onde
- commande à modulation de largeurs d'impulsions (MLI).
- La modulation vectorielle.

Dans notre cas on a choisi la commande à modulation de largeur d'impulsions MLI sinusoïdale.

Les caractéristiques de la modulation sinusoïdale sont :

- L'indice de modulation m égale au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence : $m = f_p / f_r$
- Le coefficient de réglage en tension r égale au rapport de l'amplitude V_M de la référence à la tension crête U_{PM} de la porteuse : $r = V_M / U_{PM}$

b- La commande triangulo-sinusoïdale

Elle consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence (ou modulante), généralement sinusoïdale, avec une ou plusieurs porteuses (ondes de modulation ou porteuses), généralement triangulaire ou en dents de scie, unipolaires ou bipolaires, cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur [17].

Cette stratégie exploite l'équivalence de l'onduleur à trois niveaux à deux onduleurs à deux niveaux. On utilise deux porteuses identiques triangulaires bipolaires, déphasées, dans le temps, d'une demi-période de hachage ($1/2.f_p$).

Les tensions de référence sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \cdot \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} = V_m \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.17)$$

L'algorithme de commande de stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses pour l'onduleur à trois niveaux pour un bras K ($K=1, 2$ ou 3), peut être résumé en deux étapes [13] :

- **Etape 1** : la détermination des signaux intermédiaire V_{K1} et V_{K0} .

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_{P1} \Rightarrow V_{K1} = +U_C \\ V_{refK} < U_{P1} \Rightarrow V_{K1} = 0 \\ V_{refK} \geq U_{P2} \Rightarrow V_{K0} = 0 \\ V_{refK} < U_{P2} \Rightarrow V_{K0} = -U_C \end{cases} \quad (II.18)$$

Etape 2 : détermination du signal V_{k2} et des signaux de commande F_{ij} des interrupteur

$$\begin{cases} V_{K2} = +U_C \Rightarrow F_{1j} = 1, F_{2j} = 1 \\ V_{K2} = -U_C \Rightarrow F_{1j} = 0, F_{2j} = 0 \\ V_{K2} = 0 \Rightarrow F_{1j} = 0, F_{2j} = 1 \end{cases} \quad (II.19)$$

avec

$$\begin{cases} V_{K2} = V_{K0} + V_{K1} \\ F_{3j} = \bar{F}_{1j} \\ F_{4j} = \bar{F}_{2j} \end{cases}$$

On simule la commande en MLI de l'onduleur triphasé à trois niveaux, avec les paramètres $m = 9$ et $r = 0.8$ (figures II.7, et II.8).

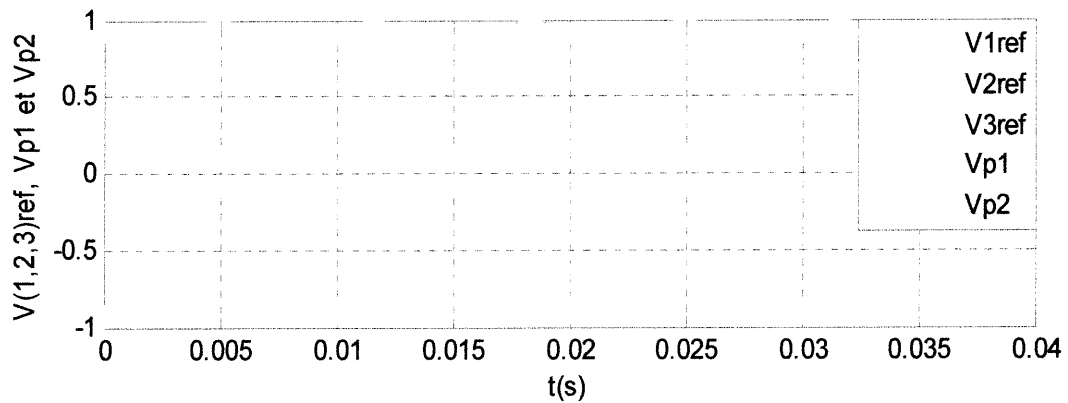


Figure II.7 Les porteuses et les tensions de référence

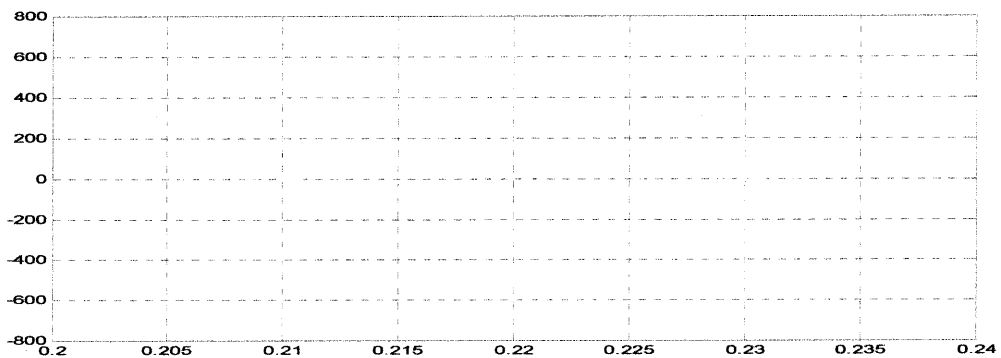


Figure II.8 La tension de sortie de l'onduleur

II.4.4 Transformation de Park [18]

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-biphasé suivie d'une rotation, elle permet de passer du repère abc vers le repère dq .

Les matrices de passage direct $[p(\theta)]$ et inverse $[p(\theta)]^{-1}$ sont données par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Transformation directe : $[X_d; X_q] = [p(\theta)][X_a; X_b; X_c]$.

Transformation inverse : $[X_a; X_b; X_c] = [p(\theta)]^{-1}[X_d; X_q]$.

a- Choix du référentiel

Le référentiel est le système d'axe (d, q) associé à la vitesse de rotation choisie pour lui, c'est-à-dire à ω . Dans l'application de la transformation sur le réseau électrique il y'a deux types de référentiels intéressants :

- Référentiel tournant à la pulsation ω_s

Dans ce cas :

$\theta = \omega * t$ (ω : La pulsation des tensions du réseau)

- Référentiel fixe (stationnaire)

C'est le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il se traduit par la condition :

$\theta = 0$

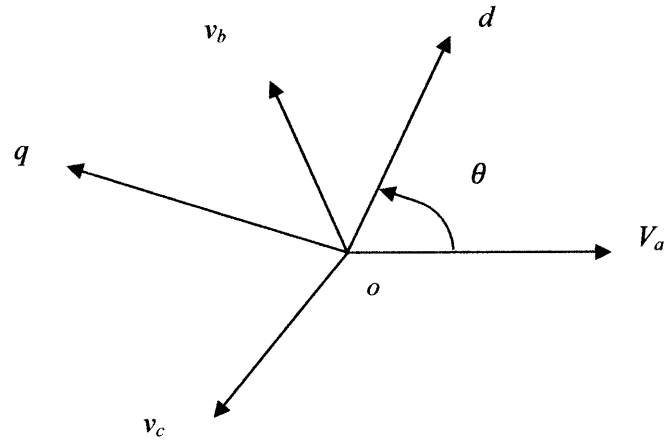


Figure II.9 Transformation de Park

Sur la figure (II.9) :

θ : angle entre l'axe 'a' et l'axe 'd'

$w = d\theta/dt$: vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport aux axes (a, b, c)

b- Le modèle du réseau dans le repère de Park

Les équations triphasés du réseau électrique lié au coté alternatif de l'onduleur à trois niveaux :

$$\begin{cases} V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

On applique la transformation de Park l'équation (II.11) sur l'équation (II.13) :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = P[(\theta)] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

On obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + wL \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

V_d, V_q : Les tensions biphasés a la sortie de l'onduleur.

e_d, e_q : Les tensions biphasées de lignes de réseau.

i_d, i_q : Les courants biphasés du réseau.

II.5 Simulation de la cascade

La figure (II.10) montre la cascade que nous allons simuler dans ce travail :

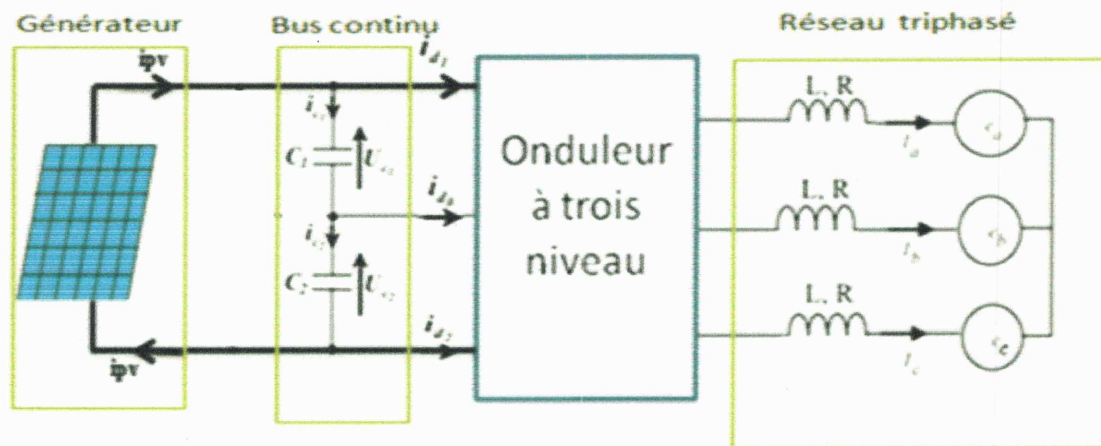


Figure II.10 Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau

Dans le but de montrer la nécessité d'application de la commande, on utilise le logiciel Matlab/Simulink pour simuler la cascade (générateur PV- bus continu- onduleur- réseau). On présente : les deux composantes du courant de réseau i_d, i_q , la tension au côté continu de l'onduleur V_{dc} , le courant fourni par le générateur PV i_{pv} , le courant de phase i_a avec la tension de phase e_a du réseau, la tension de phase à la sortie de l'onduleur et la puissance fournit par le générateur PV.

➤ Les paramètres du circuit de puissance simulé sont les suivants :

La tension de ligne : $E = 220\sqrt{2}$

La fréquence du réseau : $f = 50$ Hz.

L'inductance de phase du réseau : $L = 5$ mH.

La résistance de phase du réseau : $R = 0.5\Omega$.

La capacité d'entrée de l'onduleur : $C = 6$ mF.

➤ Les paramètres de la commande MLI :

L'indice de modulation : $m = 9$.

Le taux de modulation : $r = 0.8$.

➤ Les paramètres du générateur PV :

Le module PV : BP SX120 ($N_s=72$, $N_p=1$).

Le générateur PV : $n_s = 22$, $n_p = 10$.

II.5.1 Fonctionnement sous des conditions climatiques stables (à $T=25\text{ °C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)

Le schéma Simulink de la cascade sans commande est indiqué à la figure (II.11) :

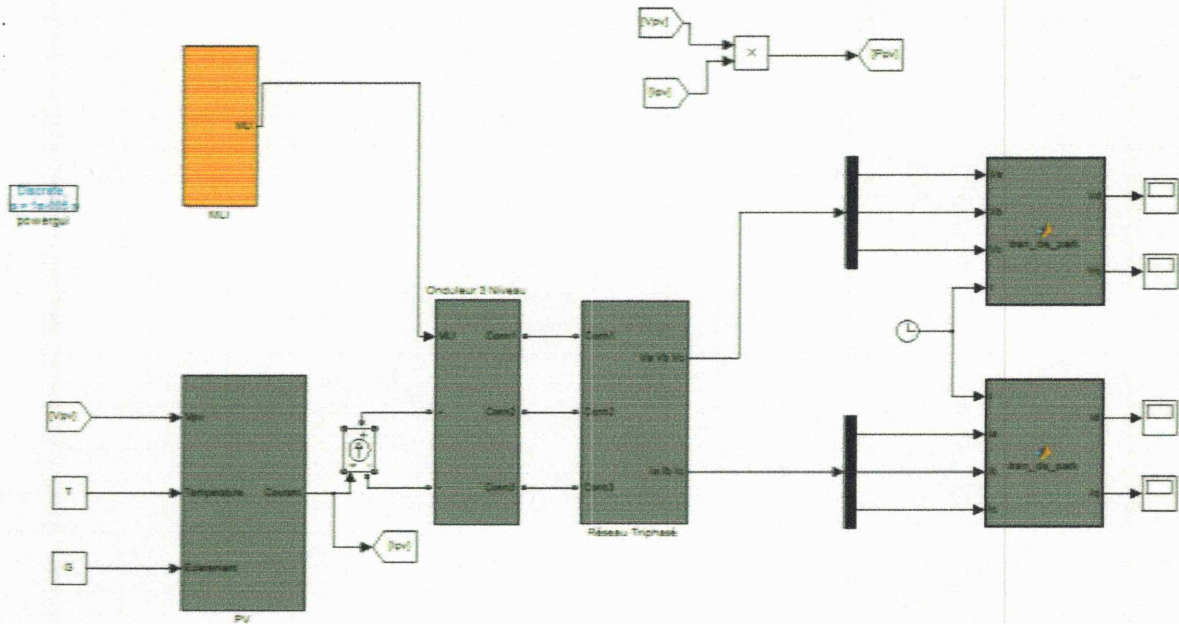


Figure II.11 Schéma Simulink de la cascade sans commande

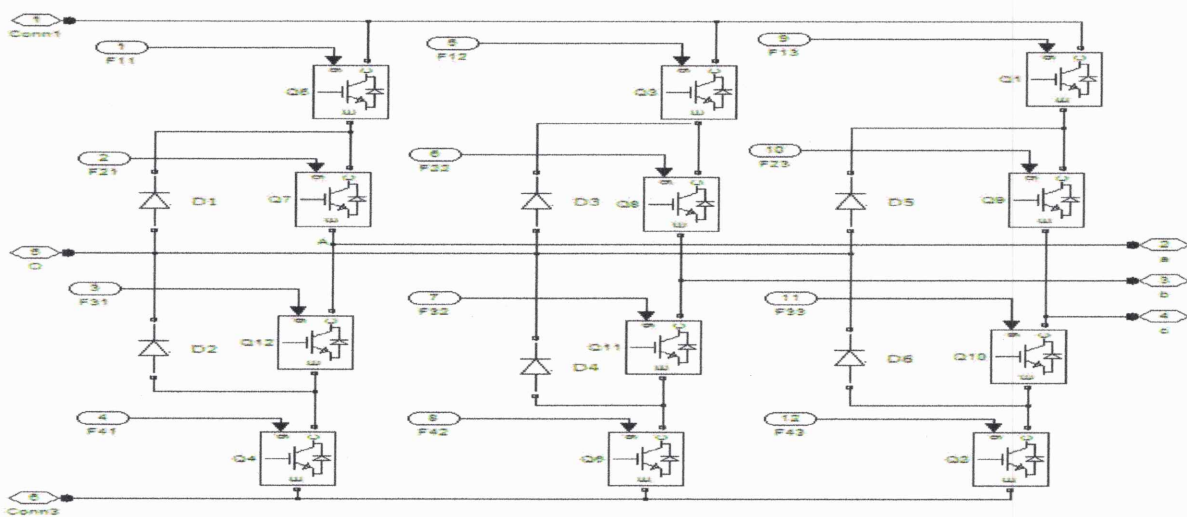


Figure II.12 Schéma bloc de l'onduleur triphasé

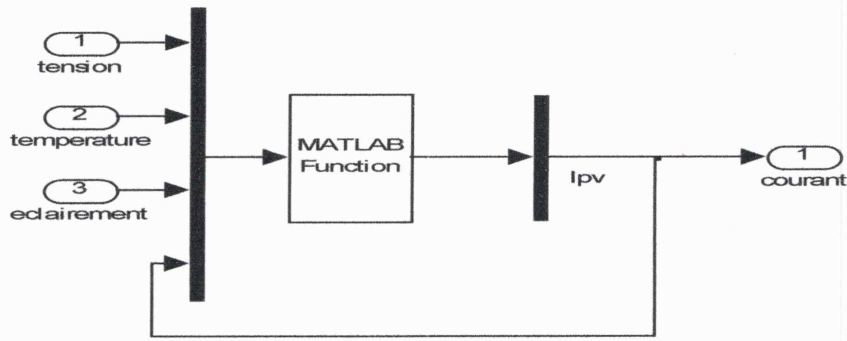


Figure II.13 Schéma bloc du champ photovoltaïque

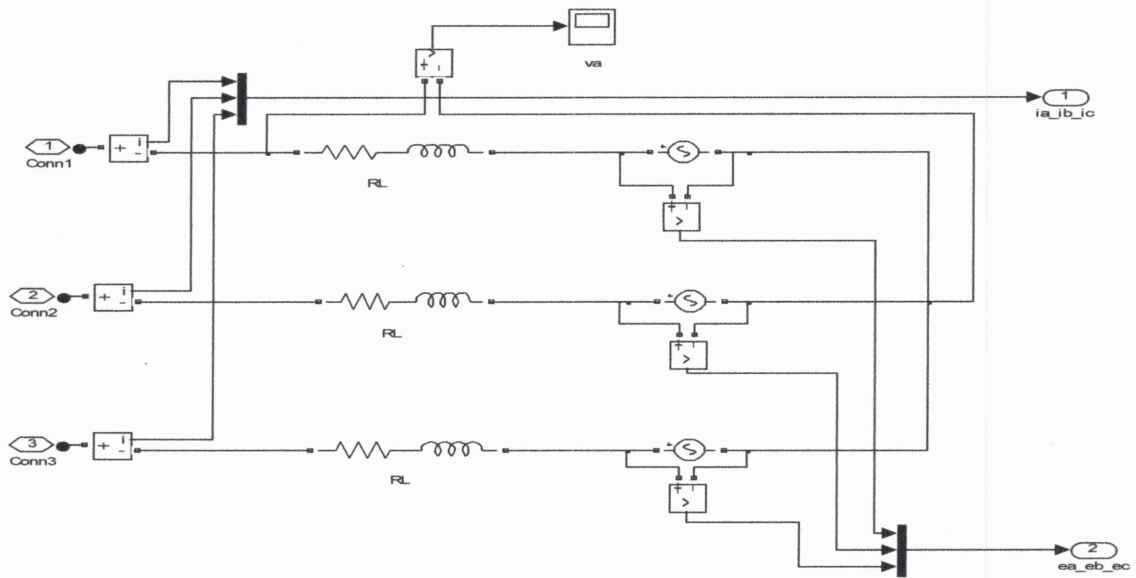


Figure II.14 Schéma bloc du réseau triphasé

Les résultats de la simulation sont indiqués sur les figures suivantes :

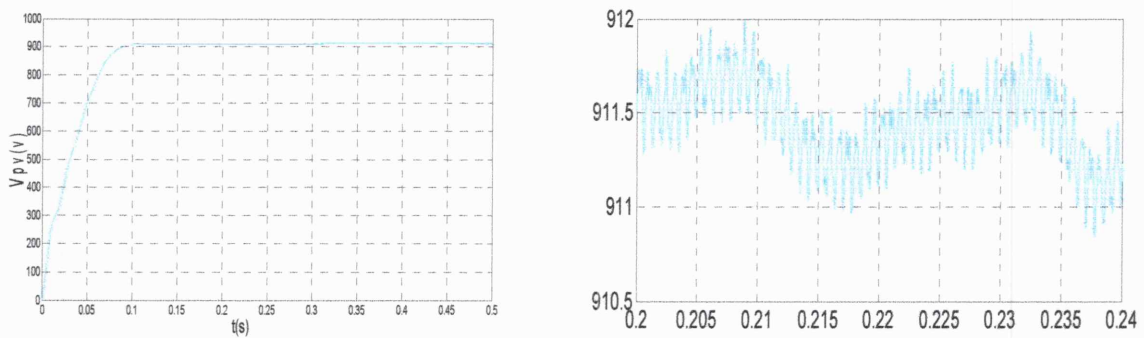


Figure II.15 La tension fournie par le générateur PV

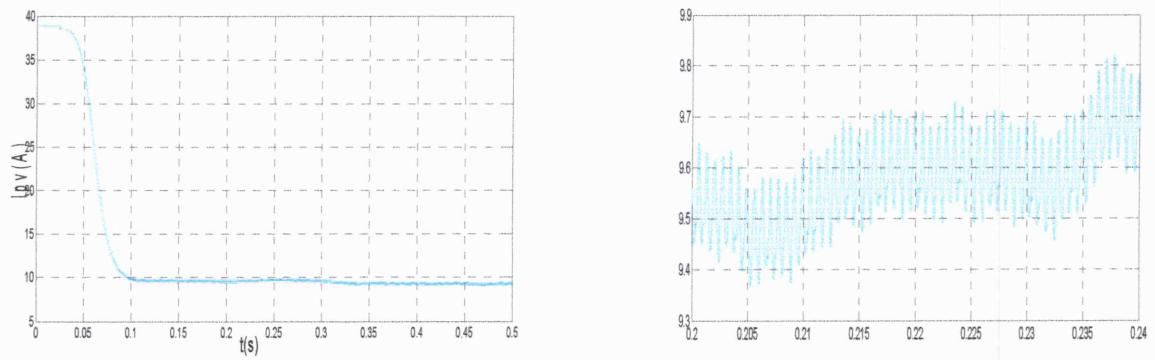


Figure II.16 Le courant fourni par le générateur PV

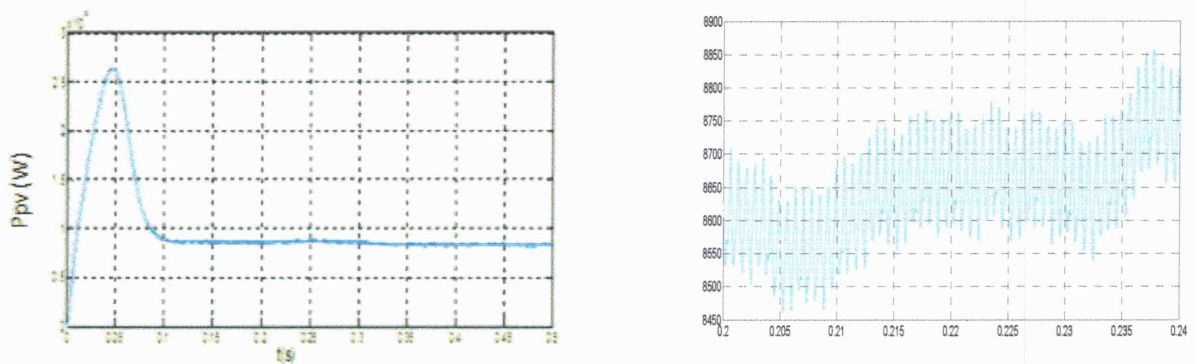


Figure II.17 La puissance fournit par le générateur PV

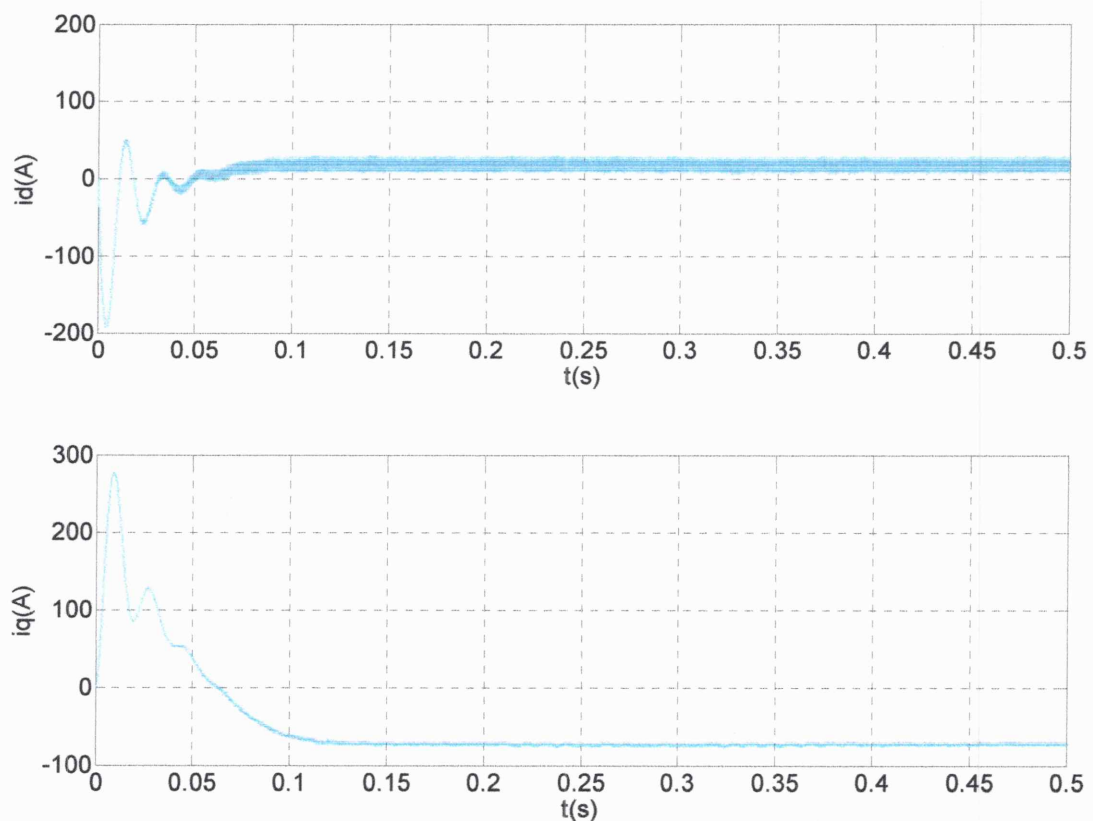


Figure II.18 Les composantes i_d, i_q du courant du réseau

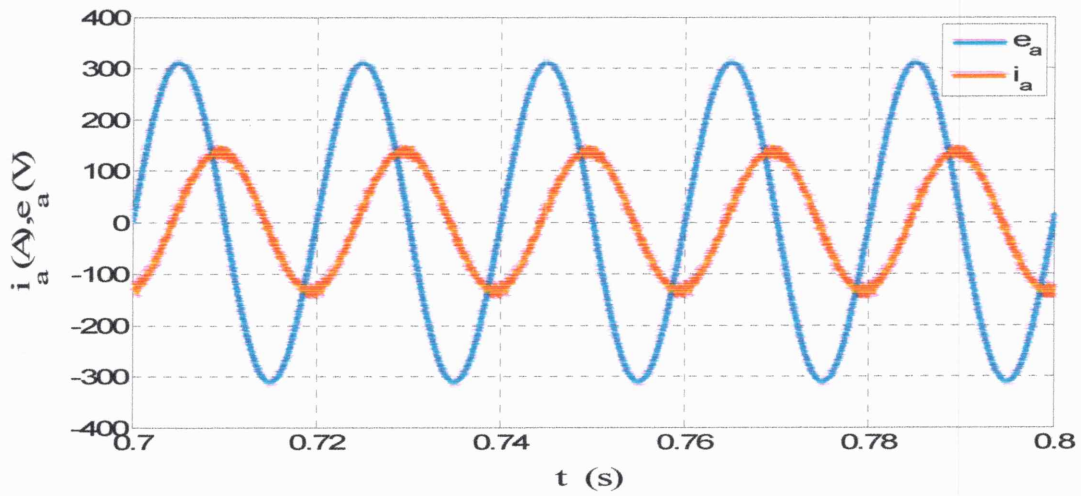


Figure II.19 Tension et courant de la phase (a) du réseau

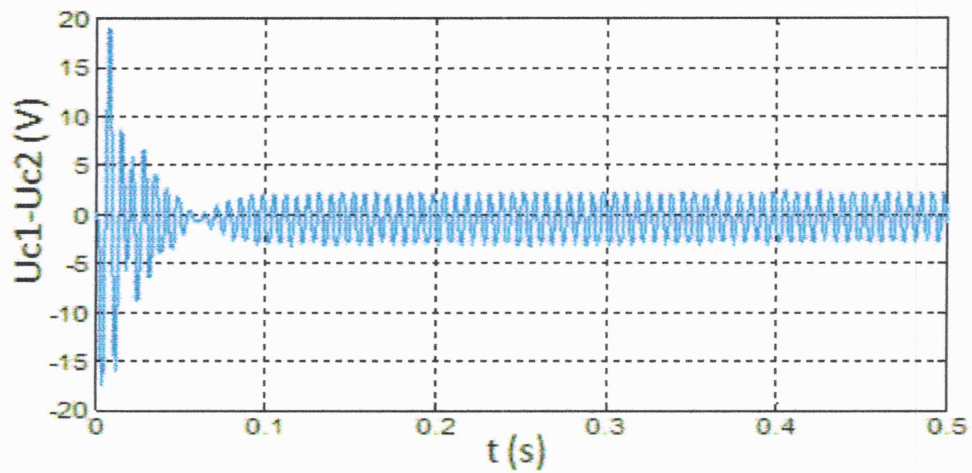


Figure II.20 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

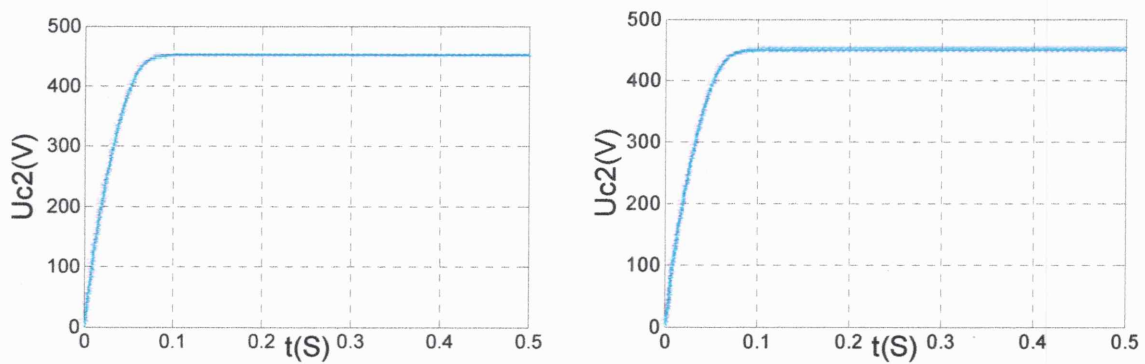


Figure II.21 tensions des condensateurs (U_{c1}) et (U_{c2})

Les figures (II.15) et (II.16) et (II.17) montrent que la tension de sortie de l'onduleur n'est pas stable, et prouvent que pour des conditions initiales arbitraires, la puissance de sortie, la tension et le courant du panneau photovoltaïque ne convergent pas vers le point de puissance maximale, qui est caractérisée par une puissance de 26420 W, une tension continue $V_{dc} = 911.6$ V et un courant $I_{pv} = 38.7$ A, qui peuvent être déduites des caractéristiques du champ photovoltaïque.

Les figures (II.18) et (II.19) montrent que la composante i_q n'est pas nulle, et qu'il existe un déphasage entre le courant et la tension de phase du réseau.

Dans la figure (II.21), on remarque que l'allure de la différence de potentiel entre les tensions des deux condensateurs d'entrées de l'onduleur oscille toujours autour de zéro.

II.6 Modèle d'état de l'onduleur

A partir de la loi des nœuds appliquée au côté continu de l'onduleur (figure II.7), on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1} = i_{pv} - i_1 \\ i_{c2} = i_{pv} + i_2 \\ i_{c1} - i_{c2} = i_{d0} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\begin{cases} i_{c1} = C \frac{dU_{c1}}{dt} \\ i_{c2} = C \frac{dU_{c2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Donc :

$$\begin{cases} C \frac{dU_{c1}}{dt} = i_{pv} - i_{d1} \\ C \frac{dU_{c2}}{dt} = i_{pv} + i_{d2} \\ C \frac{dU_{c1}}{dt} - C \frac{dU_{c2}}{dt} = i_0 + i_{d0} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

A partir des équations (II.28), on déduit

$$\begin{cases} C.U_{c1} \frac{dU_{c1}}{dt} = i_{pv}U_{c1} - i_{d1}U_{c1} \\ C.U_{c2} \frac{dU_{c2}}{dt} = i_{pv}U_{c2} + i_{d2}U_{c2} \\ C.U_{c1} \frac{dU_{c1}}{dt} - C.U_{c1} \frac{dU_{c2}}{dt} = i_0U_{c1} + i_{d0}U_{c1} \\ C.U_{c2} \frac{dU_{c1}}{dt} - C.U_{c2} \frac{dU_{c2}}{dt} = i_0U_{c2} + i_{d0}U_{c2} \end{cases} \quad (II.29)$$

En négligeant les pertes de puissance dans les interrupteurs de l'onduleur le principe d'égalité de puissance entre l'entrée et la sortie de l'onduleur donnent :

$$e_d i_d + e_q i_q = U_{c1} i_1 - U_{c2} i_2 \quad (II.30)$$

A partir des équations (II.29), et (II.30), on déduit les équations différentielles de fonctionnement au coté continu de l'association :

$$\begin{cases} \frac{dU_{c1}}{dt} = \frac{1}{C} i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} (U_{c2}(i_0 + i_{d0}) - (e_d i_d + e_q i_q)) \\ \frac{dU_{c2}}{dt} = \frac{1}{C} i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} (-U_{c1}(i_0 + i_{d0}) - (e_d i_d + e_q i_q)) \end{cases} \quad (II.31)$$

Les équations (II.25), (II.31) permettent d'obtenir le modèle d'état globale de l'association, composé de cinq équations différentielle

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + w i_q - \frac{e_d}{L} + \frac{V_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - w i_d + \frac{e_q}{L} + \frac{V_q}{L} \\ \frac{dU_{c1}}{dt} = \frac{1}{C} i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} (U_{c2}(i_0 + i_{d0}) - (e_d i_d + e_q i_q)) \\ \frac{dU_{c2}}{dt} = \frac{1}{C} i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} (-U_{c1}(i_0 + i_{d0}) - (e_d i_d + e_q i_q)) \end{cases} \quad (II.32)$$

Pour réduire la non linéarité du système, il faut d'utiliser $(U_{c1} - U_{c2})$ et $(U_{c1} + U_{c2})$ comme variables d'état au lieu de U_{c1} et U_{c2} .

$$\left\{ \frac{d(U_{c1} - U_{c2})}{dt} = \frac{1}{C} (i_0 + i_{d0}) \right. \quad (\text{II.33})$$

$$\left\{ \frac{d(U_{c1} + U_{c2})}{dt} = \frac{2}{C} i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} (-(U_{c1} - U_{c2})(i_0 + i_{d0}) - 2(e_d i_d + e_q i_q)) \right. \quad (\text{II.34})$$

Ainsi, le modèle d'état final est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \omega i_q - \frac{e_d}{L} + \frac{V_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - \omega i_d - \frac{e_q}{L} + \frac{V_q}{L} \\ \frac{d(U_{c1} - U_{c2})}{dt} = \frac{1}{C} (i_0 + i_{d0}) \\ \frac{d(U_{c1} + U_{c2})}{dt} = \frac{2}{C} i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} (-(U_{c1} - U_{c2})(i_0 + i_{d0}) - 2(e_d i_d + e_q i_q)) \end{array} \right. \quad (\text{II.35})$$

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique ; on a commencé par les différentes tailles des centrales photovoltaïques connectées au réseau.

Ensuite, on a présenté le fonctionnement des onduleurs triphasés à trois niveaux, en vue d'une alimentation de tension par une source continue. On a présenté les différents états d'un bras de ces onduleurs, et on s'est intéressé à la commande en MLI des onduleurs triphasés à trois niveaux, plus particulièrement la stratégie triangulo-sinusoïdale.

Par suite, nous avons vu la modélisation et la simulation de chaque composant du système proposé.

CHAPITRE

COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT D'UN SYSTÈME PV CONNECTÉ AU RÉSEAU

III.1 Introduction

Le réglage par mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. La théorie donc des systèmes à structure variable et les modes glissants associés (en anglais :sliding mode) , est une technique de commande non linéaire, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement [19].

La technique des modes glissants consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'à au point d'équilibre, d'ou le phénomène de glissement.

Le but dans ce chapitre est de régler la tension des deux condensateurs à l'entrée de l'onduleur, de garder le facteur de puissance unitaire côté réseau et d'extraire la puissance maximale possible du panneau photovoltaïque.

III.2 principe de la commande par mode de glissement

La commande par mode glissement consiste à ramener la trajectoire d'état du système bouclé vers un surface de glissement et la faire commuter autour de cette surface jusqu'au point d'équilibre [20].En résumé, La conception de la commande par mode glissant revient principalement à déterminer trois étapes :

- 1- Choix de la surface de commutation.
- 2- Condition de convergence.
- 3- Calcul de la commande [21].

III.3 Conception de la commande par mode de glissement [22]

III.3.1 Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre nécessaire ainsi que la forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u \quad (\text{III.1})$$

Il faut choisir " m " surfaces de glissement, pour un vecteur u de dimension " m ".

Pour ce qui est de la forme générale, nous proposons une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état X vers sa valeur de consigne X_{ref} .

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- x : Variable à réguler,
- $e(x)$: L'écart de la variable à réguler,
- λ_x : Constante positive,
- r : degré relatif ,

Pour :

- $r = 1$: $S(x) = e(x)$.
- $r = 2$: $S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$.
- $r = 3$: $S(x) = \lambda_x^2 e(x) + \lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$.

$S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correcte du gain λ_x .

III.3.2 Conditions d'existence et de convergence

Les conditions de convergence permettent à la dynamique du système, de converger vers la surface de glissement, nous citons deux conditions :

a- La condition directe de commutation

C'est la première condition de convergence (*condition d'attractivité*), elle est sous la forme :

$$s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (\text{III.3})$$

b- La fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V} < 0$.

En définissant la fonction de Lyapunov :

$$v(x) = \frac{S^2(x)}{2} \quad (\text{III.4})$$

Sa dérivée sera :

$$\dot{v}(x) = s(x) \cdot \dot{s}(x) \quad (\text{III.6})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroît, il suffit d'assurer que :

$$\dot{v}(x) = s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (\text{III.7})$$

Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de robustesse et garantit la stabilité du système non linéaire.

III.3.3 Calcul de la commande

La commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface choisie en respectant les conditions d'existence et d'attractivité est déterminée en fonction de la commande équivalente u_{eq} et la commande attractive u_a :

$$u = u_{eq} + u_a \quad (\text{III.8})$$

La commande équivalente u_{eq} est une fonction continue qui assure la convergence de la trajectoire vers le point d'équilibre.

La commande attractive u_a est déterminée pour garantir la condition d'attractivité (III.7). Cette grandeur de commande détermine alors le comportement dynamique du système durant le mode de convergence de la trajectoire vers la surface de glissement. Elle est nulle lorsque le mode de glissement est atteint ($S(x) = 0$). Pour déterminer la valeur que doit prendre cette commande attractive, et on détermine la valeur de u_a qui satisfait la condition d'attractivité (III.8)

III.4 Différentes structures du contrôle par mode de glissement [19]

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Et enfin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente".

III.4.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Un système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande peut être représenté par la figure (III.1).

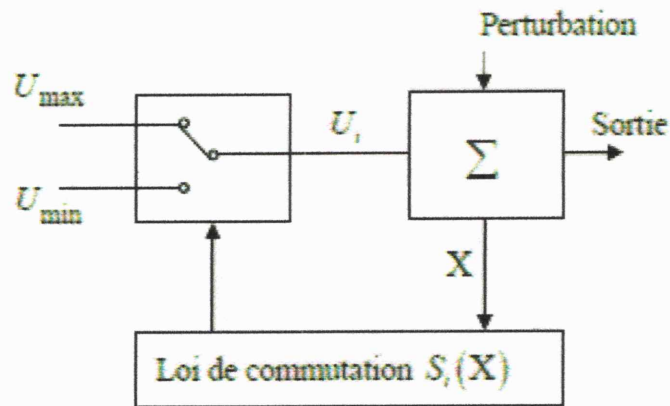


Figure III.1 Régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

L'application du réglage par mode de glissement selon la configuration représentée nécessite, un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation très rapide d'une position à une autre.

Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas-à-pas.

III.4.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Le principe d'une telle commande est illustré dans la figure (III.2), K_1 et K_2 représentent les gains de commutation, U_i la commande du système pour chaque gain et S_i la surface de commutation, $i=1,2$.

Cette structure est la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande des moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande des machines à induction. Le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

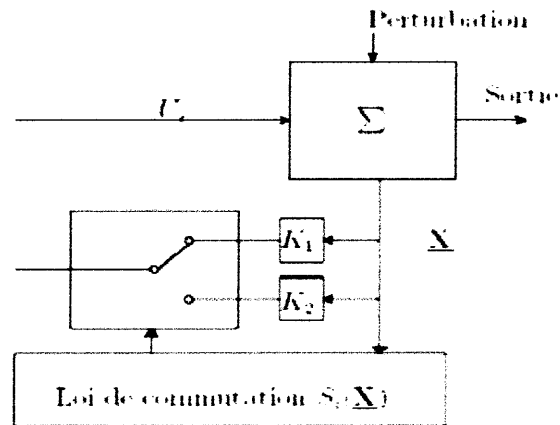


Figure III.2 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

III.4.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure (III.3), présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent.

L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.

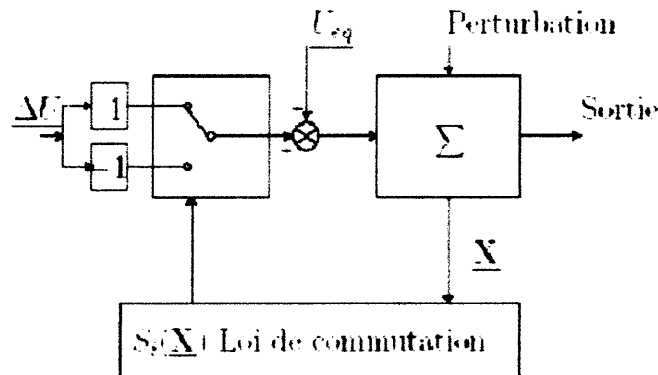


Figure III.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

III.5 Application de la commande sur le système

III.5.1 Rappel du modèle d'état de l'onduleur associé au réseau

On rappelle le modèle d'état de l'onduleur associé au réseau dans le repère de Park, obtenue dans le deuxième chapitre relation (II.32).

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q - \frac{e_d}{L} + \frac{V_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d - \frac{e_q}{L} + \frac{V_q}{L} \\ \frac{d(U_{c1} - U_{c2})}{dt} = \frac{1}{C}(i_0 + i_{d0}) \\ \frac{d(U_{c1} + U_{c2})}{dt} = \frac{2}{C}i_{pv} + \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} \left(-(U_{c1} - U_{c2})(i_0 + i_{d0}) - 2(e_d i_d + e_q i_q) \right) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

L'équation (III.9) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\dot{X} = f(x) + g(x)U \quad (\text{III.10})$$

Avec:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ U_{c1} - U_{c2} \\ U_{c1} + U_{c2} \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'état.}$$

$$F(X) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q - \frac{1}{L}e_d \\ -\frac{R}{L}i_q + \omega i_d - \frac{1}{L}e_q \\ \frac{1}{C}(i_{d0} + i_0) \\ \frac{2}{C}i_{pv} - \frac{1}{C(U_{c1} + U_{c2})} \left((U_{c1} - U_{c2})(i_{d0} + i_0) + 2(e_d i_d + e_q i_q) \right) \end{bmatrix} : \text{Vecteur non linéaire}$$

$$G = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{Matrice d'entrée.}$$

$$U = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'entrée.}$$

Les entrées du modèle sont V_d et V_q .

Les sorties du système sont la composante i_q du courant dans le réseau, la somme des tensions d'entrée continue ($U_{c1} + U_{c2}$), et la différence des tensions d'entrée continue ($U_{c1} - U_{c2}$).

Ces sorties sont choisies suivant l'objectif de la commande, qui est le réglage de la tension continue à la sortie du panneau pour la poursuite du point de puissance maximale, et le réglage de l'énergie réactive dans le réseau pour donner un facteur de puissance unitaire.

III.5.2 Détermination de la commande

a- Définition de la surface de la régulation du courant i_q

La surface du courant i_q est définie par :

$$S_1 = i_{q_{réf}} - i_q \quad (III.11)$$

La dérivée de S_1 est :

$$\dot{S}_1 = \dot{i}_{q_{réf}} - \dot{i}_q \quad (III.12)$$

A partir de l'équation (III.9) on trouve :

$$\dot{i}_q = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d - \frac{e_q}{L} + \frac{V_q}{L} \quad (III.13)$$

La condition $S_1\dot{S}_1 < 0$ assure l'attractivité de la trajectoire vers la surface de glissement. Pour ce faire, il suffit de choisir :

$$\dot{S}_1 = -\alpha_1 S_1 - \alpha_2 \text{sign}(S_1) \quad (III.14)$$

Avec :

α_1 et α_2 sont des constantes positives

Il en résulte :

$$V_q = L\dot{i}_{q_{réf}} + Ri_q + L\omega i_d + e_q + L(\alpha_1 S_1 + \alpha_2 \text{sign}(S_1)) = V_{q_{éq}} + V_{q_a} \quad (III.15)$$

On constate que la commande est constituée d'un :

- Une partie attractive V_{q_a} dépendante de la surface et qui assure la convergence de la trajectoire vers cette dernière et s'annule quand celle-ci est atteinte :

$$V_{q_a} = L(\alpha_1 S_1 + \alpha_2 \text{sign}(S_1)) \quad (III.16)$$

- Une partie équivalente s'activant sur la surface et qui permet la convergence vers le point d'équilibre sur cette surface :

$$V_{q_{éq}} = L\dot{i}_{q_{réf}} + Ri_q + L\omega i_d + e_q \quad (III.17)$$

b- Définition de la surface de régulation de la tension $V_{dc} = U_{c1} + U_{c2}$

La surface de la tension V_{dc} est définie par :

$$S_2 = V_{dc\text{réf}} - V_{dc} \quad (\text{III.18})$$

La dérivée de S_2 est :

$$\dot{S}_2 = \dot{V}_{dc\text{réf}} - \dot{V}_{dc} \quad (\text{III.19})$$

A partir de l'équation (III.9), en combinant la deuxième et la troisième équation du modèle d'état, on trouve :

$$\dot{V}_{dc} = \frac{2i_{pv}}{c} - \frac{2 \left(\frac{e_d}{R} \left(V_d - L \frac{di_d}{dt} + Lwi_q - e_d \right) + e_q i_q \right) + (U_{c1} - U_{c2})(i_{d0} + i_0)}{cV_{dc}} \quad (\text{III.20})$$

La condition $S_2 \dot{S}_2 < 0$ assure l'attractivité de la trajectoire vers la surface de glissement.

Pour ce faire, il suffit de choisir :

$$\dot{S}_2 = -\beta_1 S_2 - \beta_2 \text{sign}(S_2) \quad (\text{III.21})$$

Avec :

β_1 et β_2 sont des constantes positives

Il en résulte :

$$V_d = \frac{R}{e_d} \left(V_{dc} i_{pv} - e_q i_q - (U_{c1} - U_{c2})(i_{d0} + i_0) - cV_{dc} \dot{V}_{dc\text{réf}} - cV_{dc} (\beta_1 S_2 + \beta_2 \text{sign}(S_2)) \right) + L \frac{di_d}{dt} - Lwi_q + e_d \quad (\text{III.22})$$

On constate que la commande est constituée d' :

- Une partie attractive V_{d_a} dépendante de la surface et qui assure la convergence de la trajectoire vers cette dernière et s'annule quand celle-ci est atteinte :

$$V_{d_a} = -\frac{R}{e_d} cV_{dc} (\beta_1 S_2 + \beta_2 \text{sign}(S_2)) \quad (\text{III.23})$$

- Une partie équivalente s'activant sur la surface et qui permet la convergence vers le point d'équilibre sur cette surface :

$$V_{d_{\dot{e}q}} = \frac{R}{e_d} \left(V_{dc} i_{pv} - cV_{dc} \dot{V}_{dc\text{réf}} - e_q i_q - (U_{c1} - U_{c2})(i_{d0} + i_0) \right) + L \frac{di_d}{dt} - Lw + e_d \quad (\text{III.24})$$

III.5.3 Simulation et résultats

Le système et sa commande sont indiqués à la figure (III.4), l'onduleur est commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses. Le bloc de commande du point de puissance maximale (MPPT) fournit la tension de référence $(U_{c1}+U_{c2})_{ref}$ au régulateur à structure variable à mode de glissement. Le régulateur à mode glissant fournit les signaux de commande V_{qref} et V_{dref} . Ces deux signaux de commande sont employés pour produire les tensions de référence de phase, en appliquant la transformation de Park. Les tensions de référence de phase sont employées pour la commande en MLI de l'onduleur.

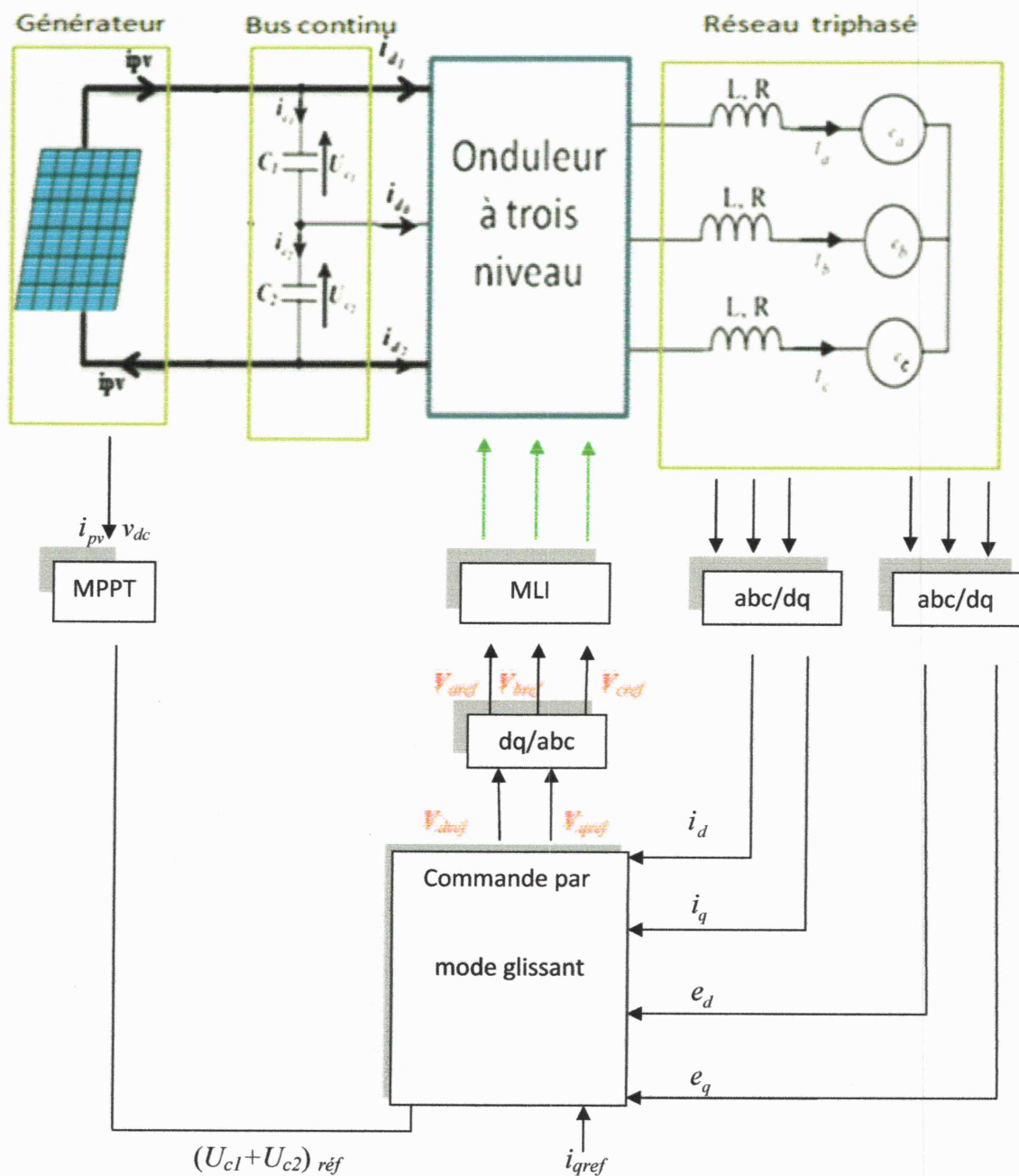


Figure III.4 Schéma fonctionnel du système étudié

On simule le système avec application de la commande qui combine le réglage par mode glissant et la commande MPPT par la méthode (P&O). Le schéma Simulink de la cascade avec sa commande est indiqué à la figure (III.5).

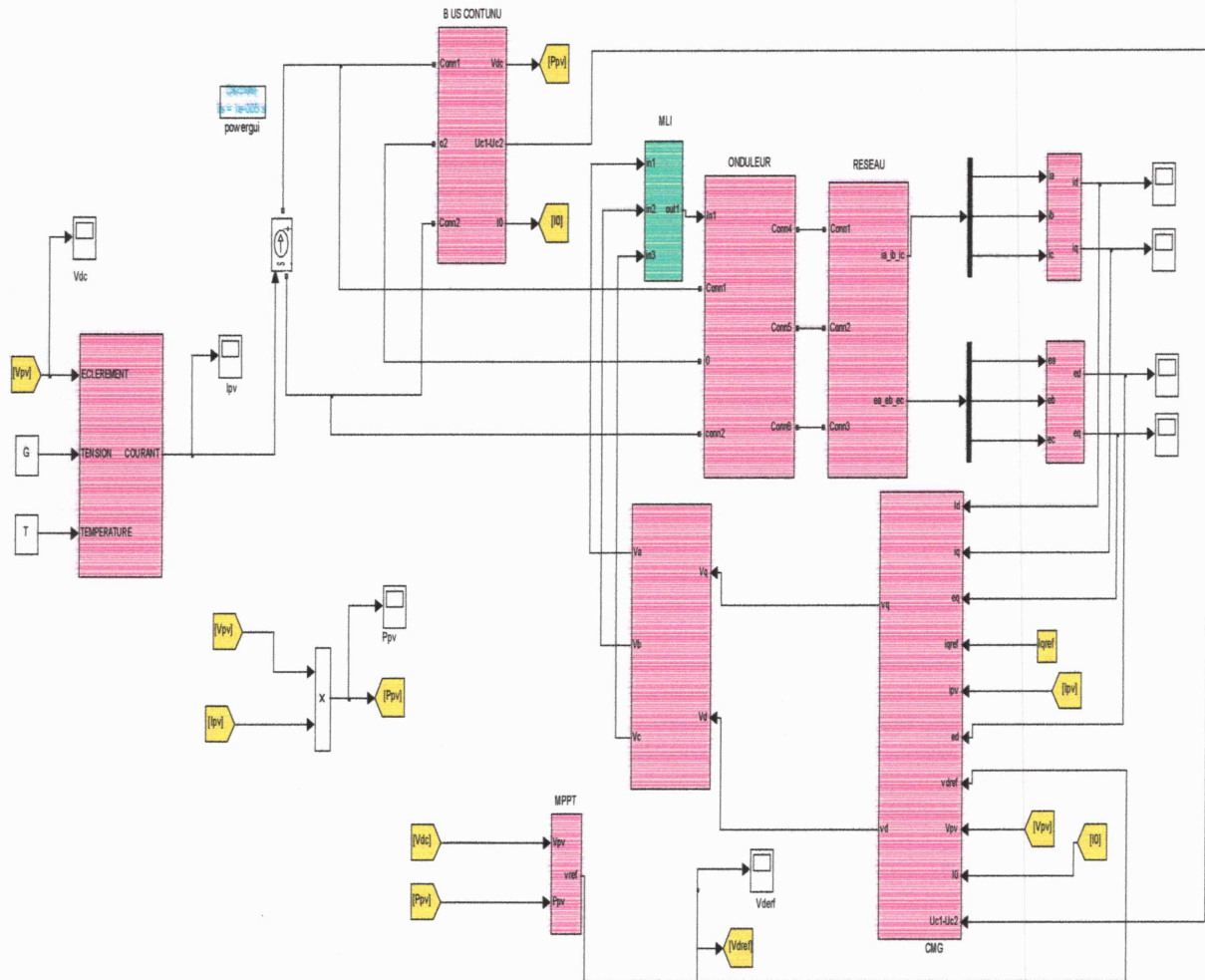


Figure III.5 Schéma Simulink de la cascade avec commande

On simule la cascade dans les conditions standards ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25\text{ }^\circ\text{C}$) avec les paramètres du circuit de puissance précédents, les paramètres du régulateur à mode glissant :

$$\alpha_1=5.10^3, \alpha_2=5, \beta_1=1,5.10^5, \beta_2=5$$

Les résultats de simulation sont indiqués aux figures suivantes :

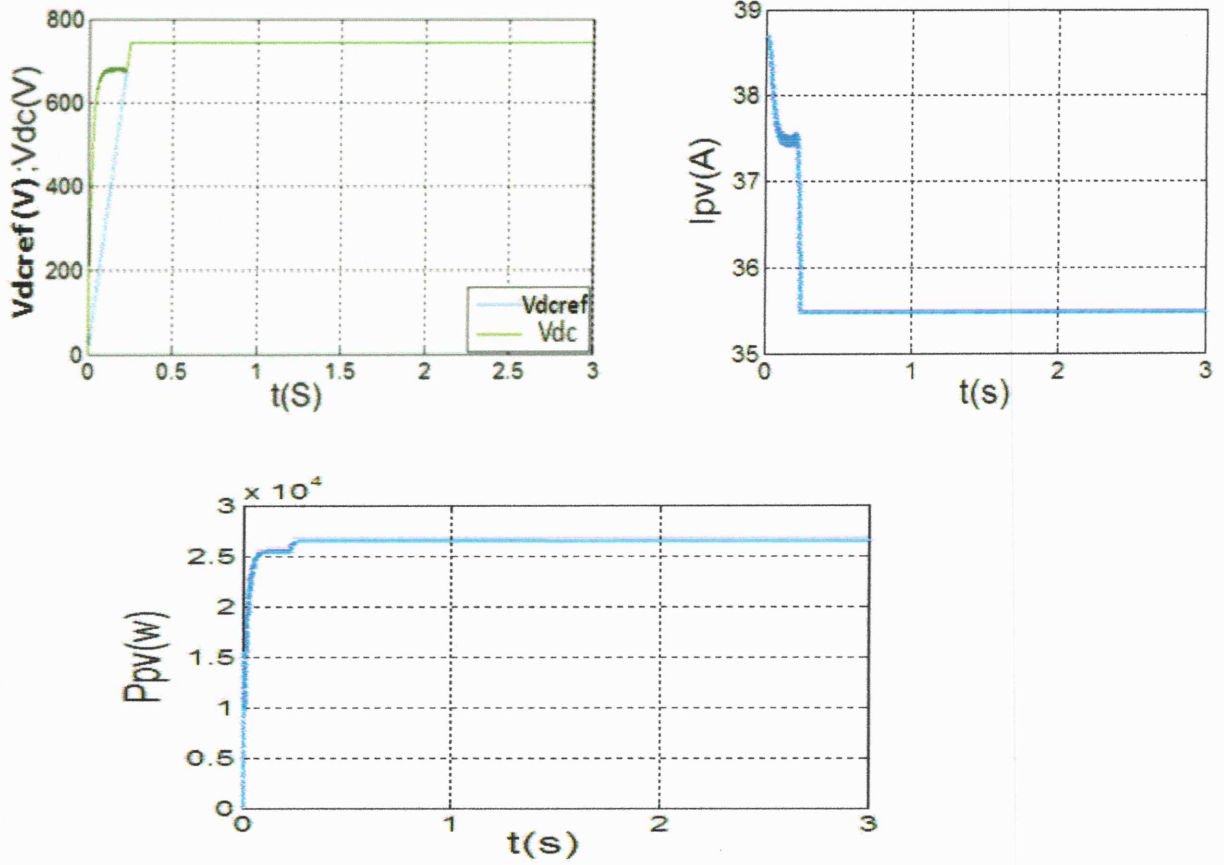


Figure III.6 La tension et sa référence, le courant et la puissance à la sortie du champ photovoltaïque

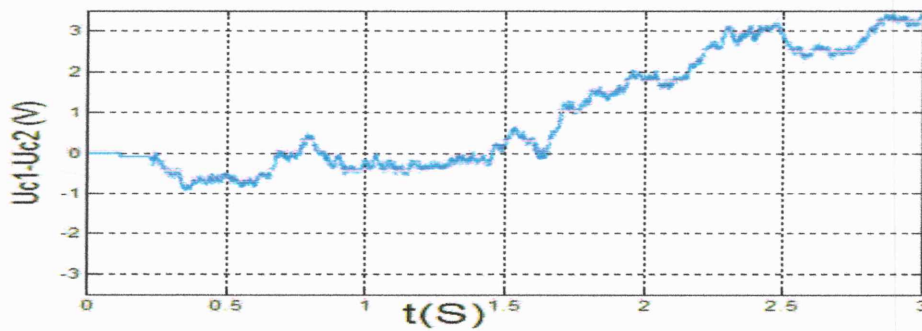


Figure III.7 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

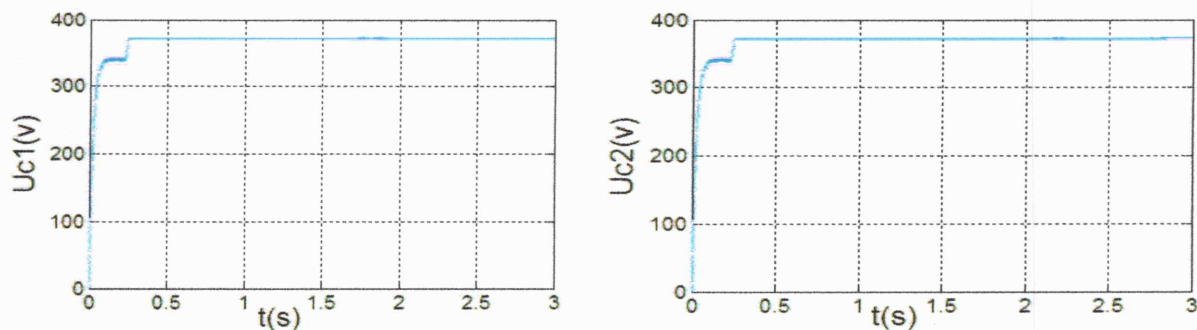


Figure III.8 Tension des condensateurs (U_{c1}) et (U_{c2})

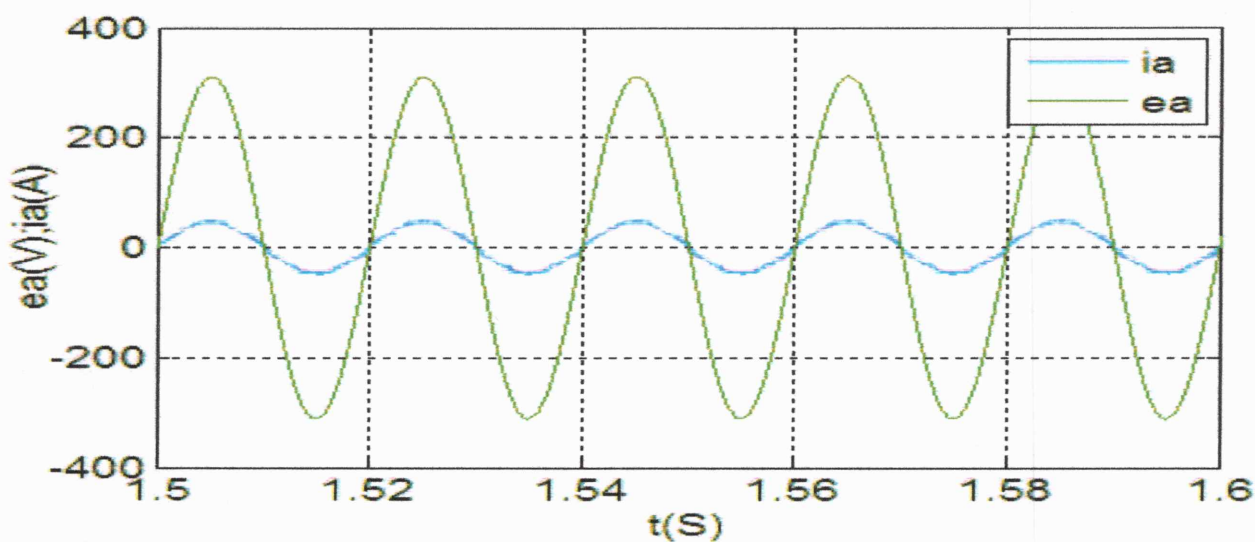


Figure III.9 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

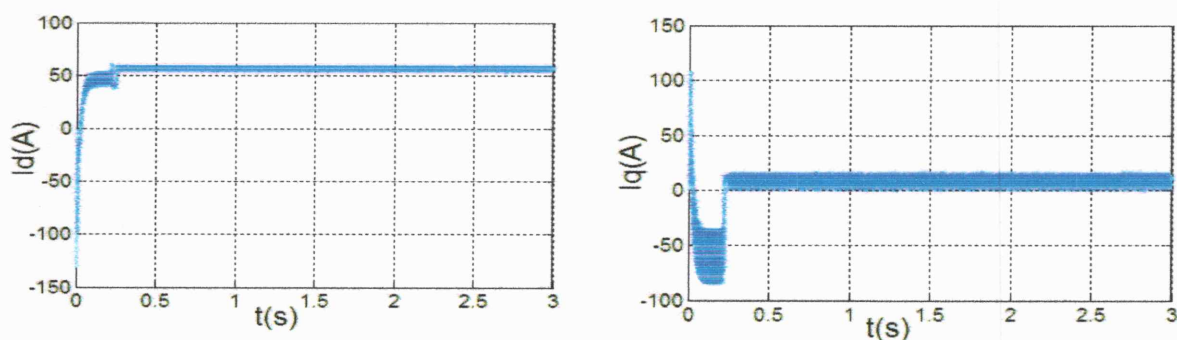


Figure III.10 Les composantes i_q et i_d du courant du réseau

La figure (III.6) prouve que pour des conditions initiales arbitraires, la tension, le courant et la puissance de sortie du panneau photovoltaïque convergent vers le point de puissance maximal, caractérisé par une puissance de 26420 W, une tension continue $V_{dc}=744.75$ V et un courant $I_{pv}=35.48$ A, comme peut être déduit des caractéristiques du champ photovoltaïque (figure III.6).

La figure (III.9) montre que le courant et la tension de ligne du réseau sont en phase ce qui nous donne un facteur de puissance unitaire dans le réseau.

La figure (III.10) montre les deux composantes i_d , et i_q du courant de réseau, on constate qu'après un régime transitoire de 0.23 seconde, la composante directe du courant dans le réseau i_d prend une valeur constante dépendante du niveau de puissance du champ photovoltaïque, et la composante en quadrature i_q tend à sa référence qui est zéro dans ce cas.

Dans la figure (III.7) on remarque que la courbe de $(U_{c1}-U_{c2})$ ne tend pas vers zéros, ainsi les tensions des deux condensateurs C_1 et C_2 ne sont équilibrées.

III.6 Equilibrage des tensions des deux condensateurs

Afin de régler le problème du déséquilibre des tensions U_{c1} et U_{c2} , on ajoute un circuit d'équilibrage résistif constitué de deux transistors et deux résistances (Figure III.11).

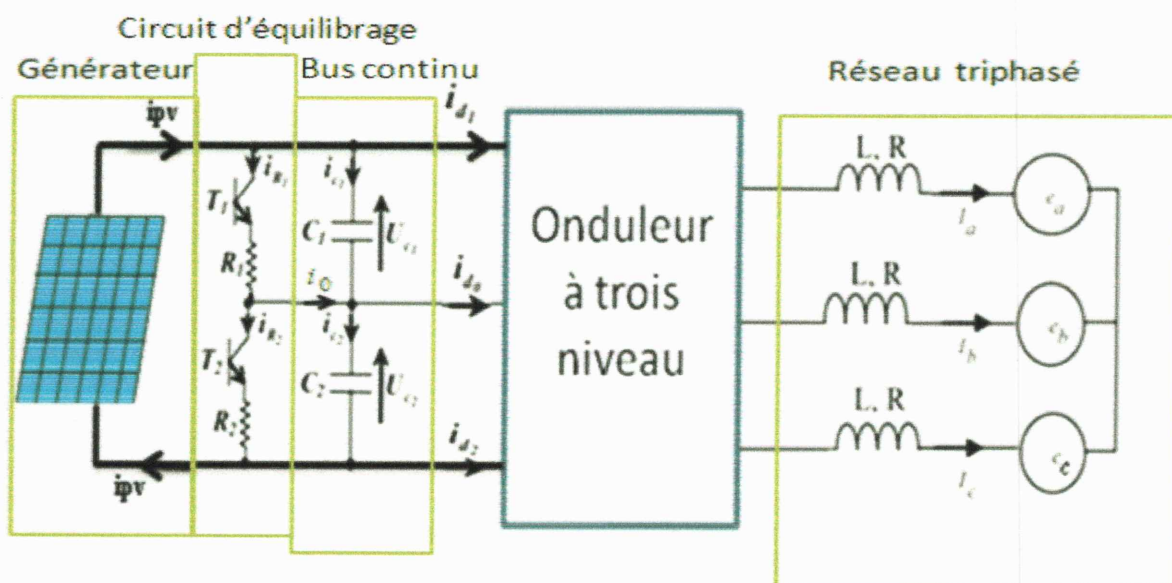


Figure III.11 Circuit d'équilibrage des tensions des deux condensateurs

Le modèle de ce circuit d'équilibrage peut être exprimé par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{PV} - i_{d1} - F_1 \frac{U_{c1}}{R_1} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{PV} - i_{d0} - F_2 \frac{U_{c2}}{R_2} \end{cases} \quad (III. 25)$$

Tel que F_1 et F_2 sont donnés par l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} \text{si } U_{c1} > U_{c2} = F_1 = 1 & \text{sinon } F_1 = 0 \\ F_2 = 1 - F_1 \end{cases} \quad (III. 26)$$

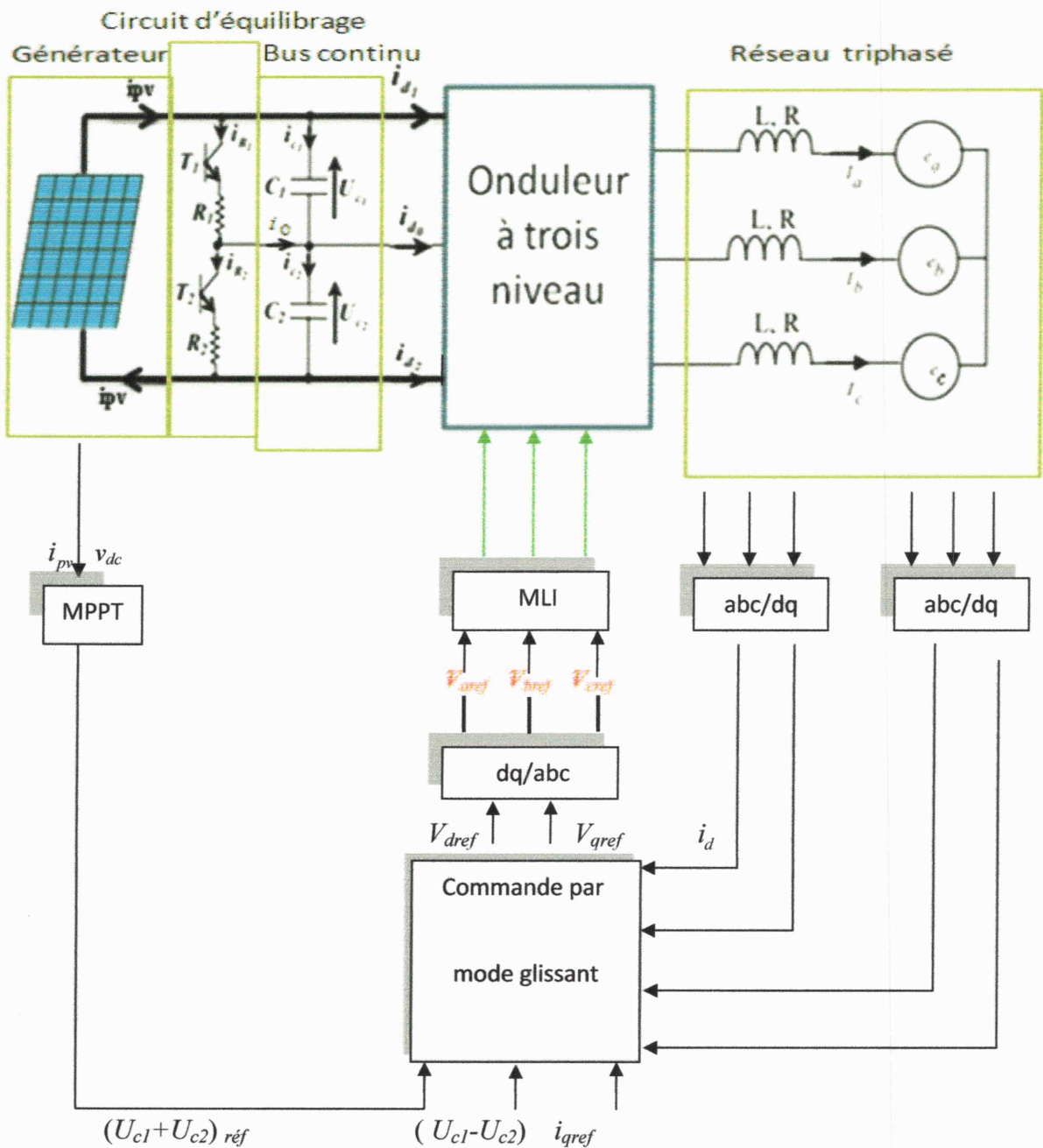


Figure III.12 Schéma fonctionnel du système étudié avec équilibrage

Les résultats de simulation sont indiqués aux figures suivantes :

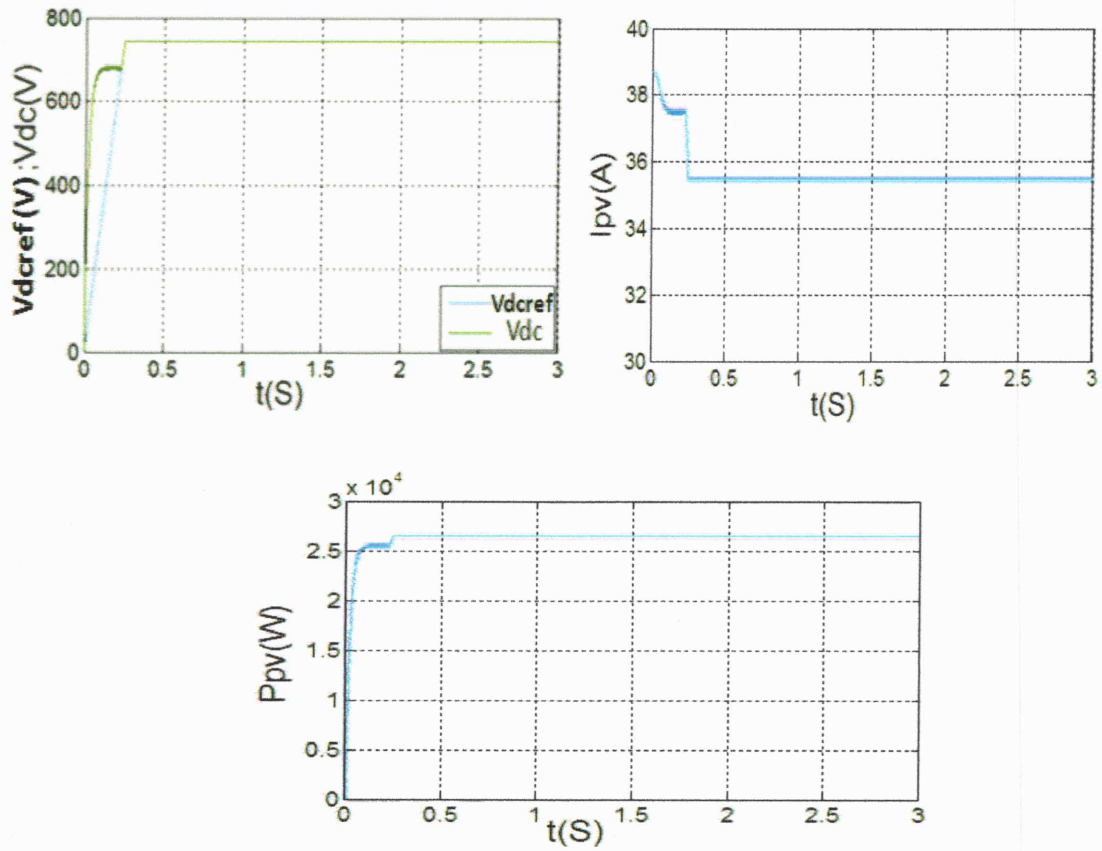


Figure III.13 La tension V_{dc} et sa référence, la puissance et le courant du champ PV

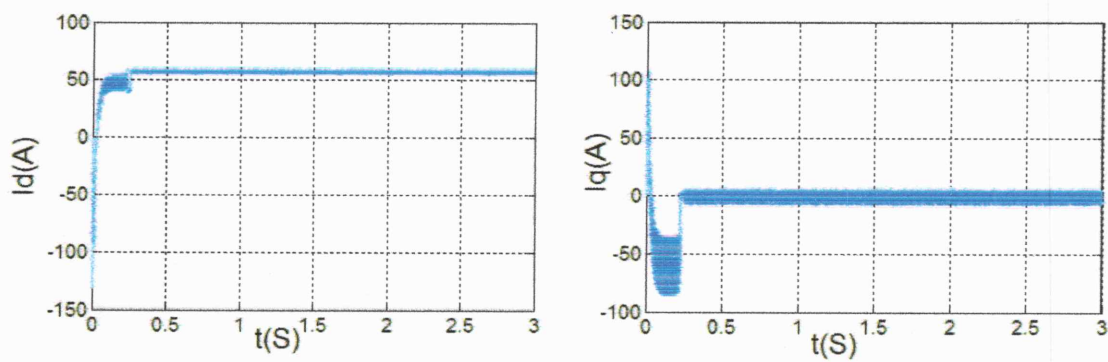


Figure III.14 Les composantes i_q et i_d du courant du réseau

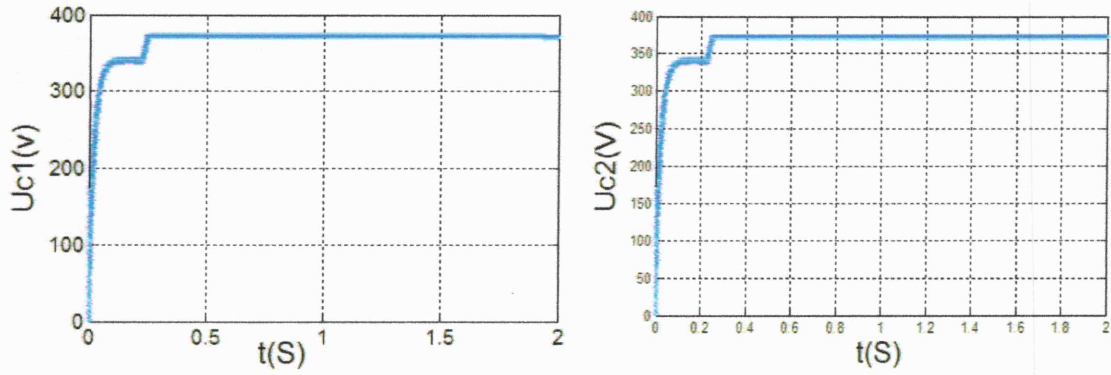


Figure III.15 Tensions des condensateurs (U_{c1}) et (U_{c2})

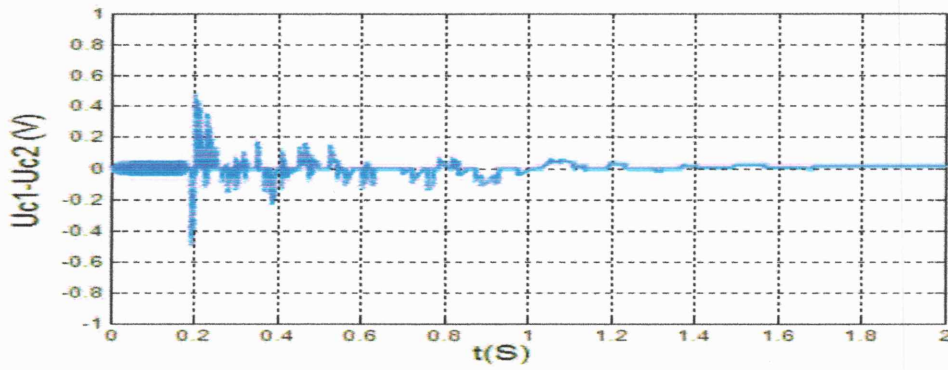


Figure III.16 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

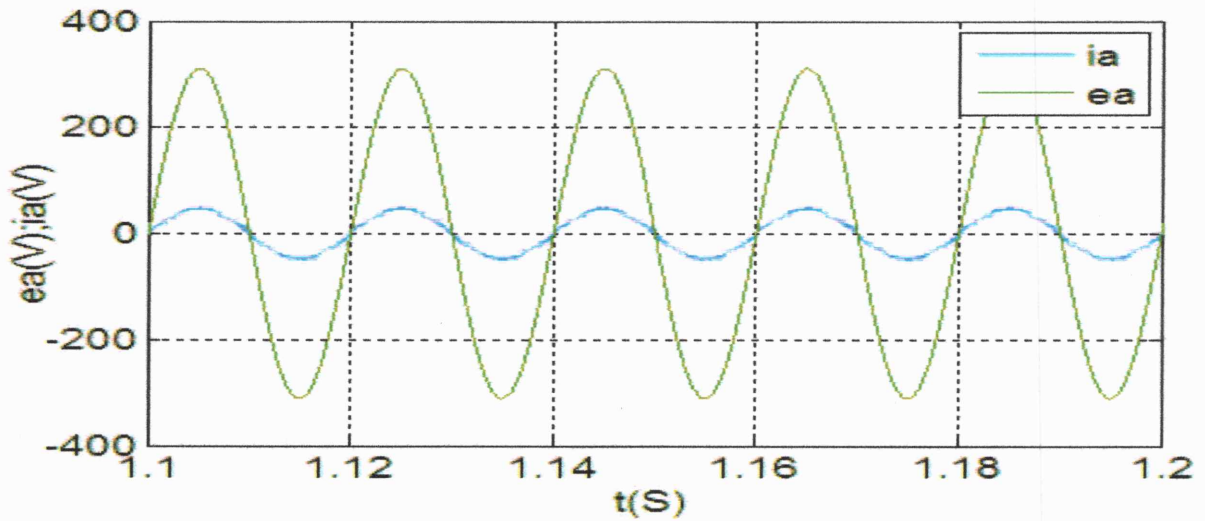


Figure III.17 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

Dans la figure III.16 on remarque que la courbe de ($U_{c1}-U_{c2}$) tend vers zéros, ainsi les tensions des deux condensateurs C_1 et C_2 sont équilibrées.

III.7 Etude de la robustesse

III.7.1 Test de variation de l'irradiation solaire

Afin d'évaluer la performance du régulateur par mode glissant de la tension V_{dc} , ce dernier est soumis sous test pour deux types de données d'irradiation solaire : le premier type d'irradiation varie rapidement (variation brusque) et l'autre varie graduellement (variation lente).

a- Variation brusque

On fait une variation de l'irradiation solaire à l'instant 1 secondes de 1000 W/m^2 à 600 W/m^2 et à 2 secondes de 600 W/m^2 à 400 W/m^2 . On présente la tension V_{dc} et sa référence, le courant et la puissance du champ PV, les composantes i_q et i_d du réseau et la tension et le courant de la phase (a).

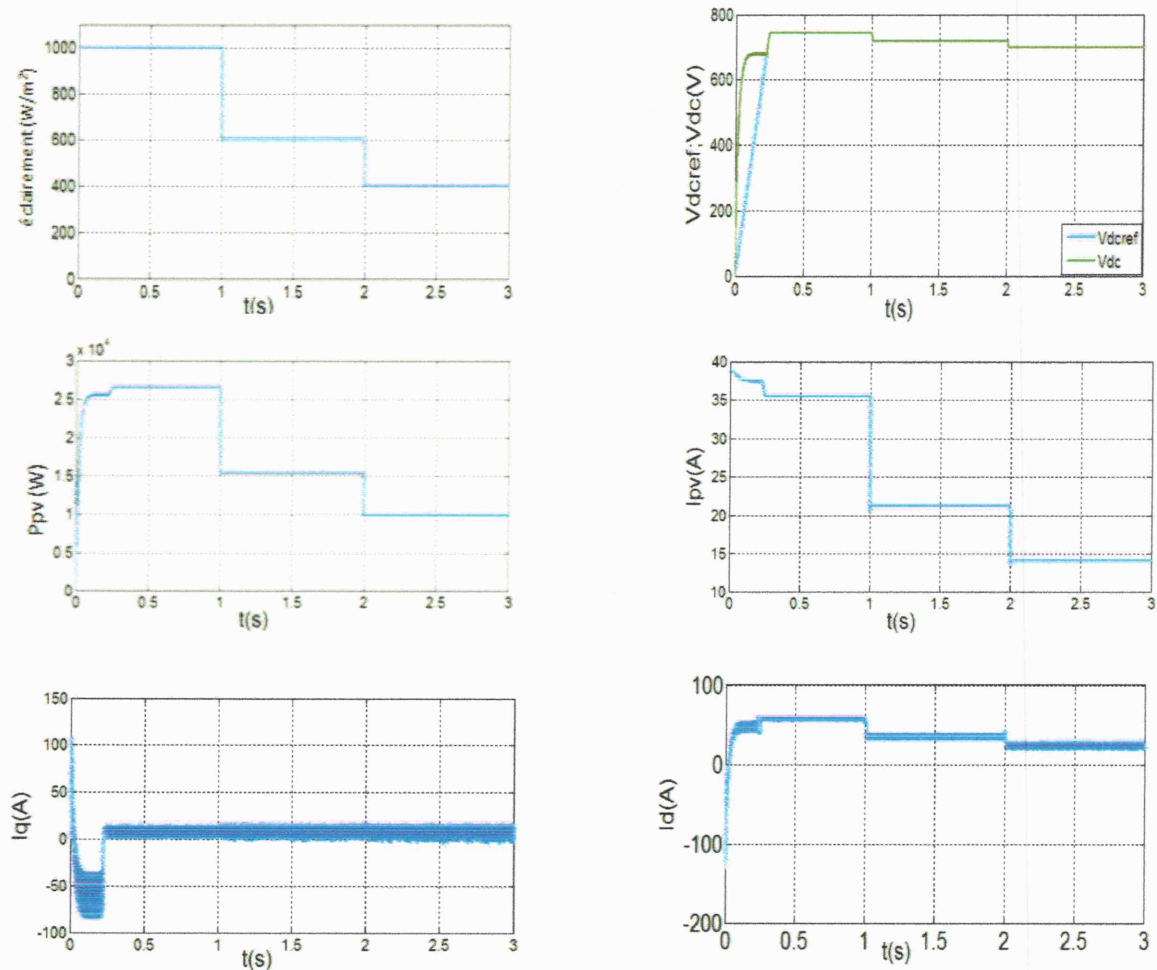


Figure III.18 La tension V_{dc} et sa référence, la puissance et le courant du champ PV, les composantes i_d et i_q du réseau

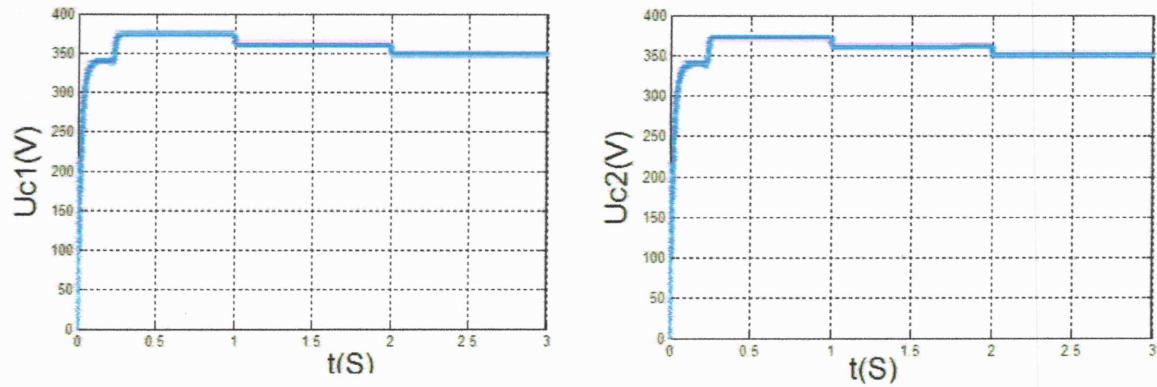


Figure III.19 Les tensions (U_{c1}) et (U_{c2})

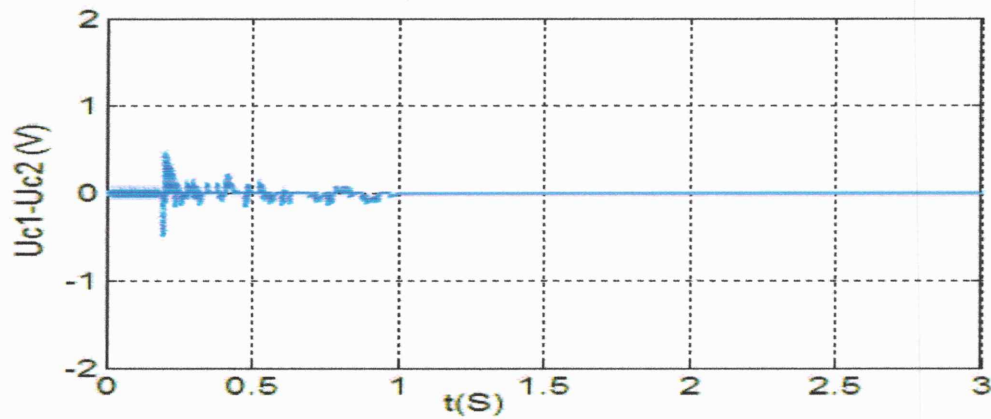


Figure III.20 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

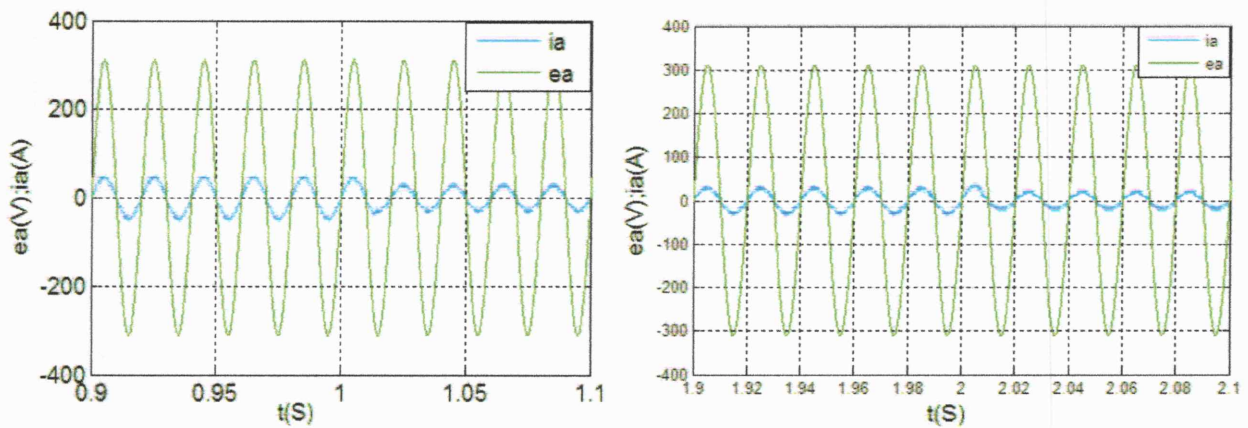


Figure III.21 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

La composante i_q du courant de réseau n'est pas affecté par les changements d'irradiations solaires, et par conséquent le facteur de puissance du réseau n'est pas affecté.

Dans la figure III.20 on remarque que la courbe de ($U_{c1}-U_{c2}$) tend vers zéros, ainsi les tensions des deux condensateurs C_1 et C_2 sont équilibrées.

b- Variation lente

On fait une variation lente de l'irradiation solaire : de $t = 0.5s$ à $t = 1.4s$ l'irradiation augmente progressivement de 700 W/m^2 jusqu'à 1000 W/m^2 , de $t = 1.9s$ à $t=2.6s$ l'irradiation diminue progressivement de 1000 W/m^2 jusqu'à 700 W/m^2 .

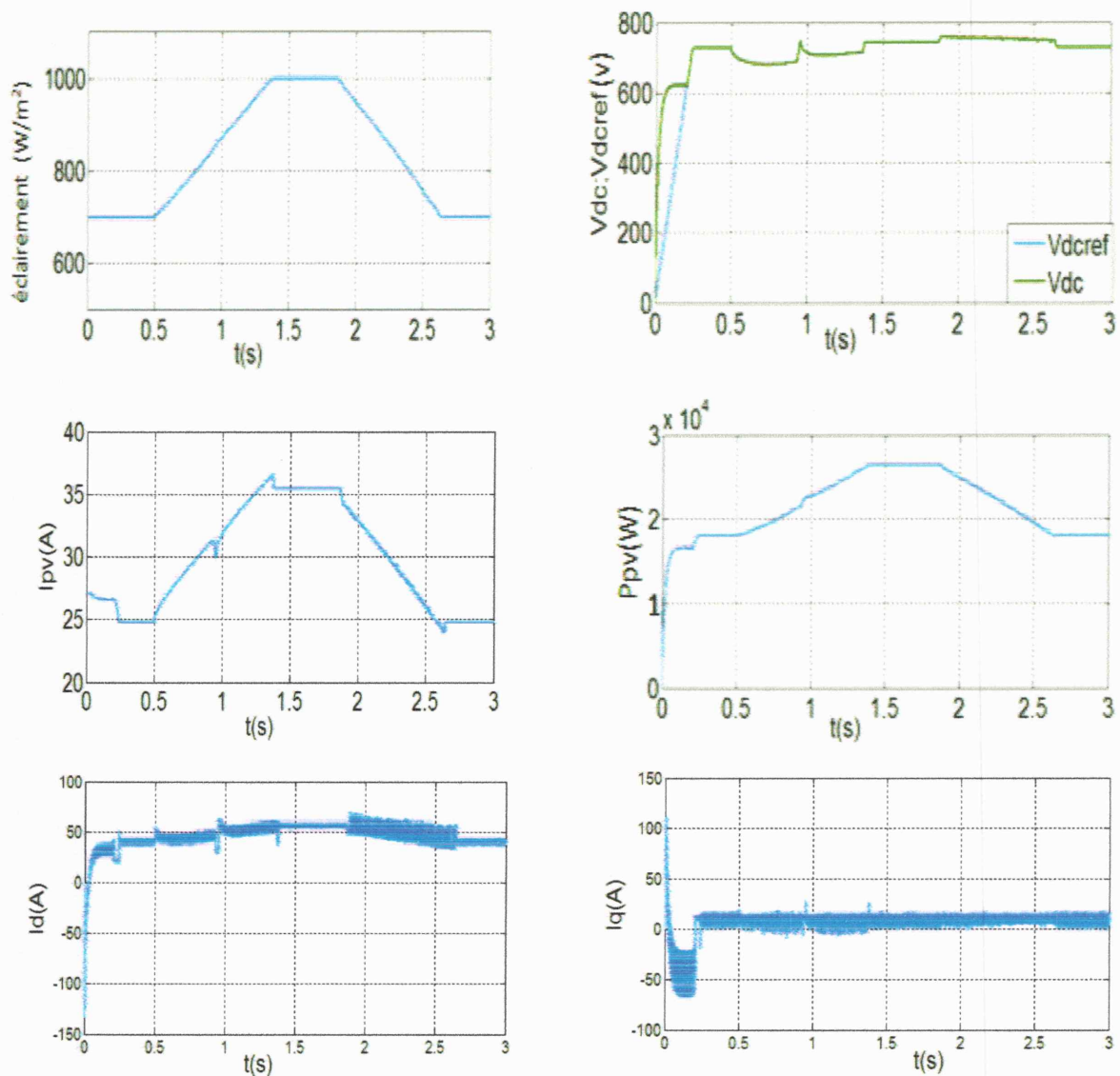


Figure III.22 La tension V_{dc} et sa référence, la puissance et le courant du champ PV, les composantes i_d et i_q du réseau

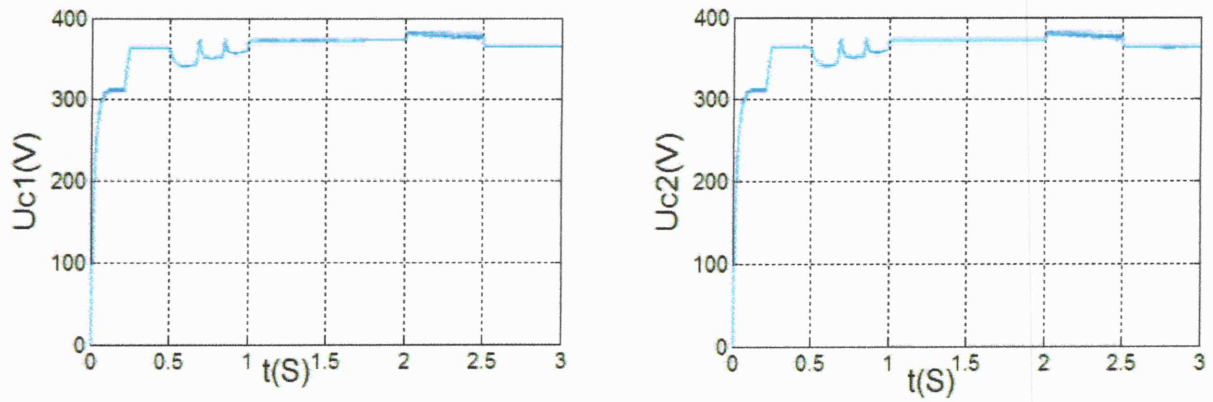


Figure III.23 Les tensions (U_{c1}) et (U_{c2})

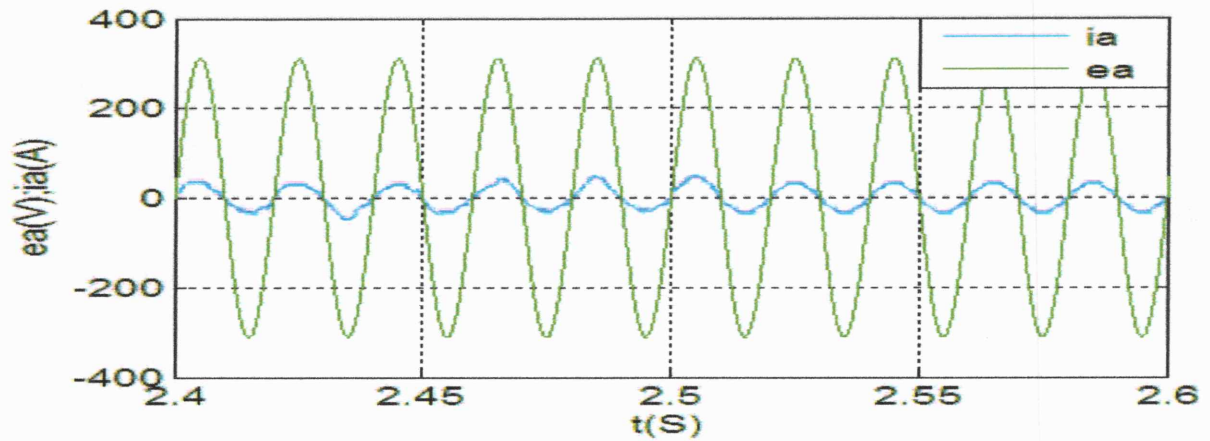


Figure III.24 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

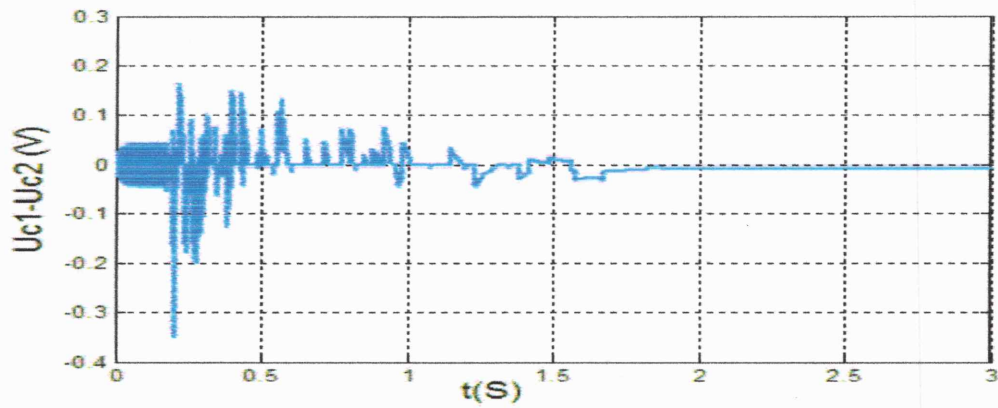


Figure III.25 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

La composante i_q du courant de réseau n'est pas affecté par les changements d'irradiations solaires, et par conséquent le facteur de puissance du réseau n'est pas affecté.

III.7.2 Test de variation de la température

On fait encore un test de variation de la température afin d'évaluer la performance du régulateur par mode glissant de la tension V_{dc} . Pour cela, on va faire deux types de données de température : le premier type de température varie rapidement (variation brusque) et l'autre varie graduellement (variation lente).

a-Variation brusque

On fait une variation de la température à l'instant 1 seconde de 25 °C à 35 °C et à 2 secondes de 35°C à 50 °C.

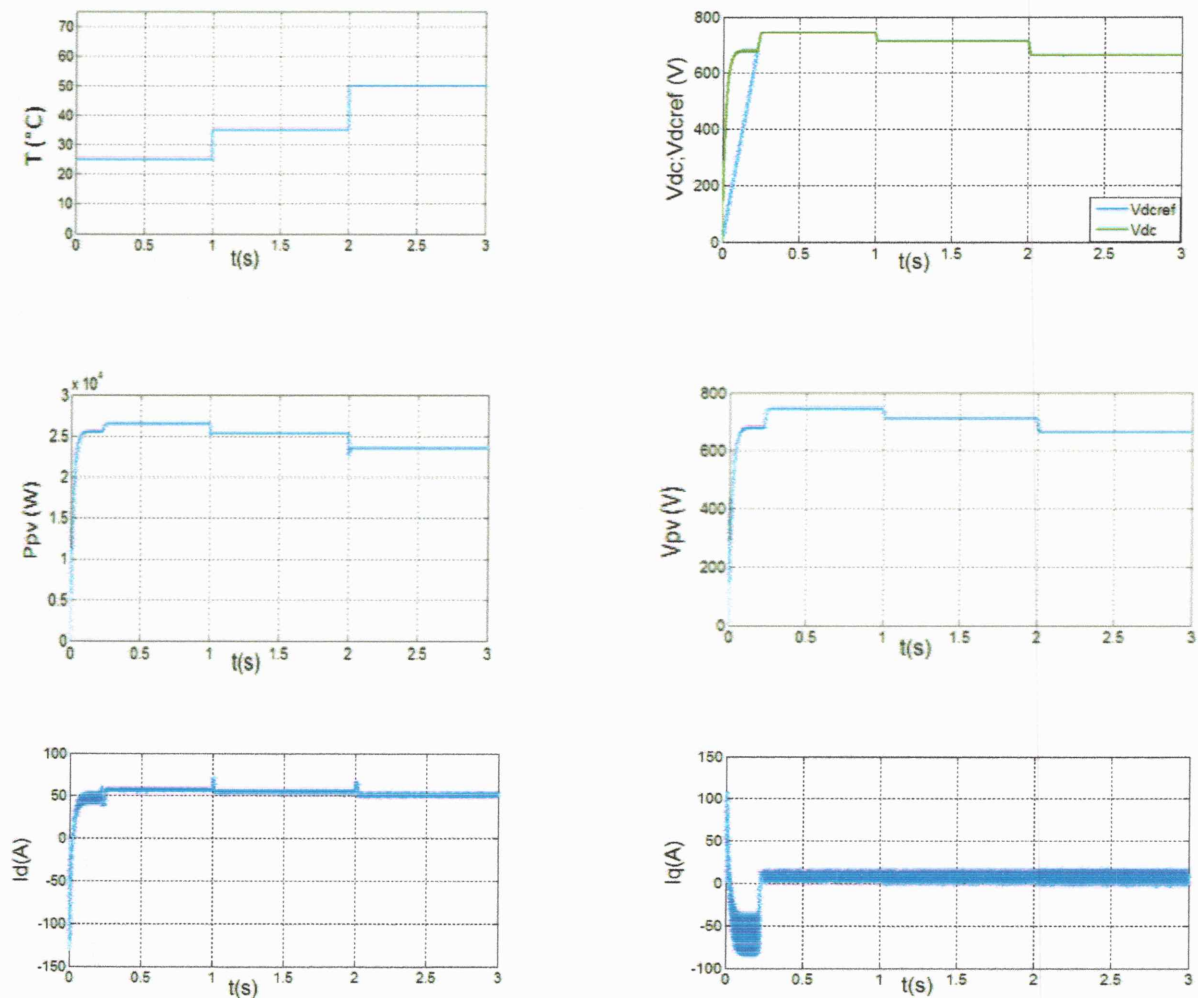


Figure III.26 La tension V_{dc} et sa référence, la puissance et le courant du champ PV, les composantes i_d et i_q du réseau

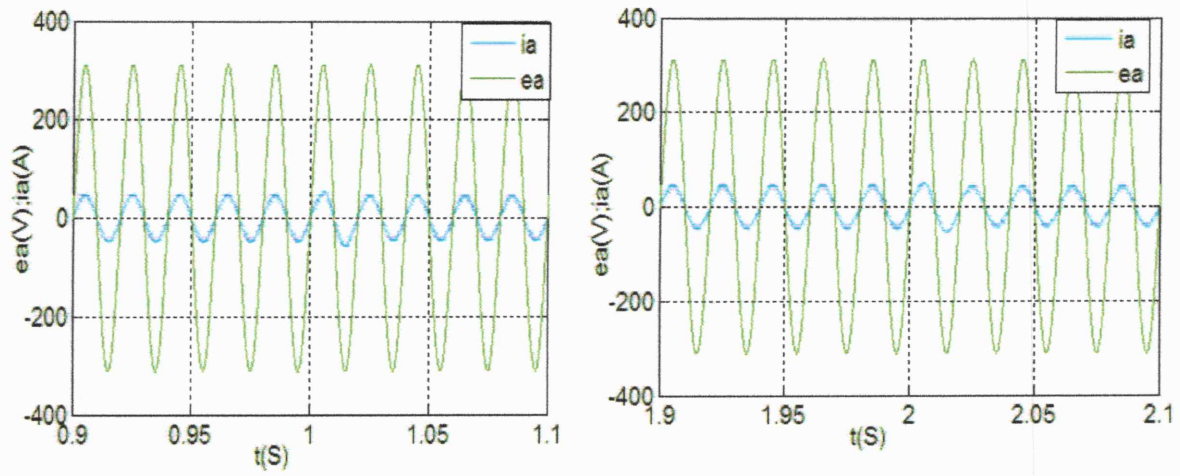


Figure III.27 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

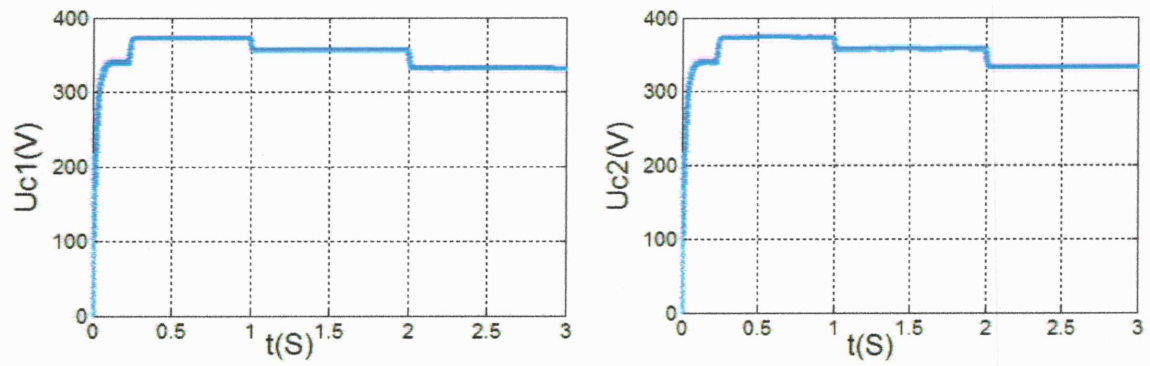


Figure III.28 Les tensions (U_{c1}) et (U_{c2})

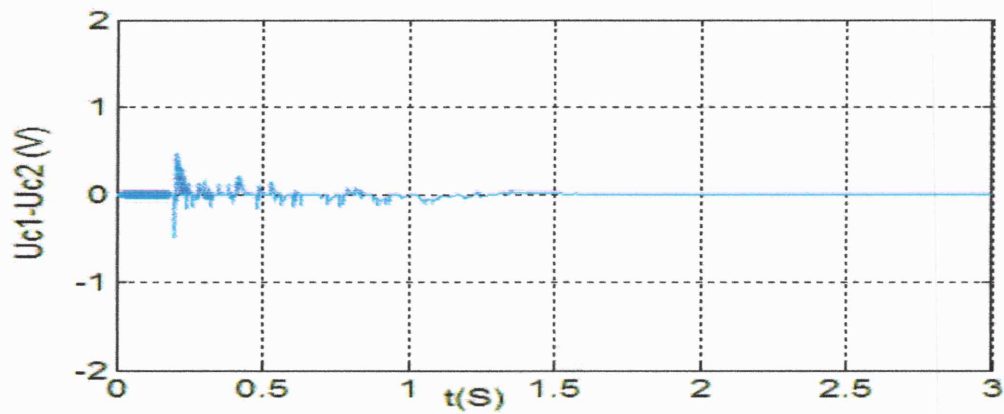


Figure III.29 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

b- Variation lente

On fait une variation lente de la température : de $t = 0.5$ s à $t = 1.2$ s la température augmente progressivement de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, de $t = 1.7$ s à $t = 2.5$ s la température diminue progressivement de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

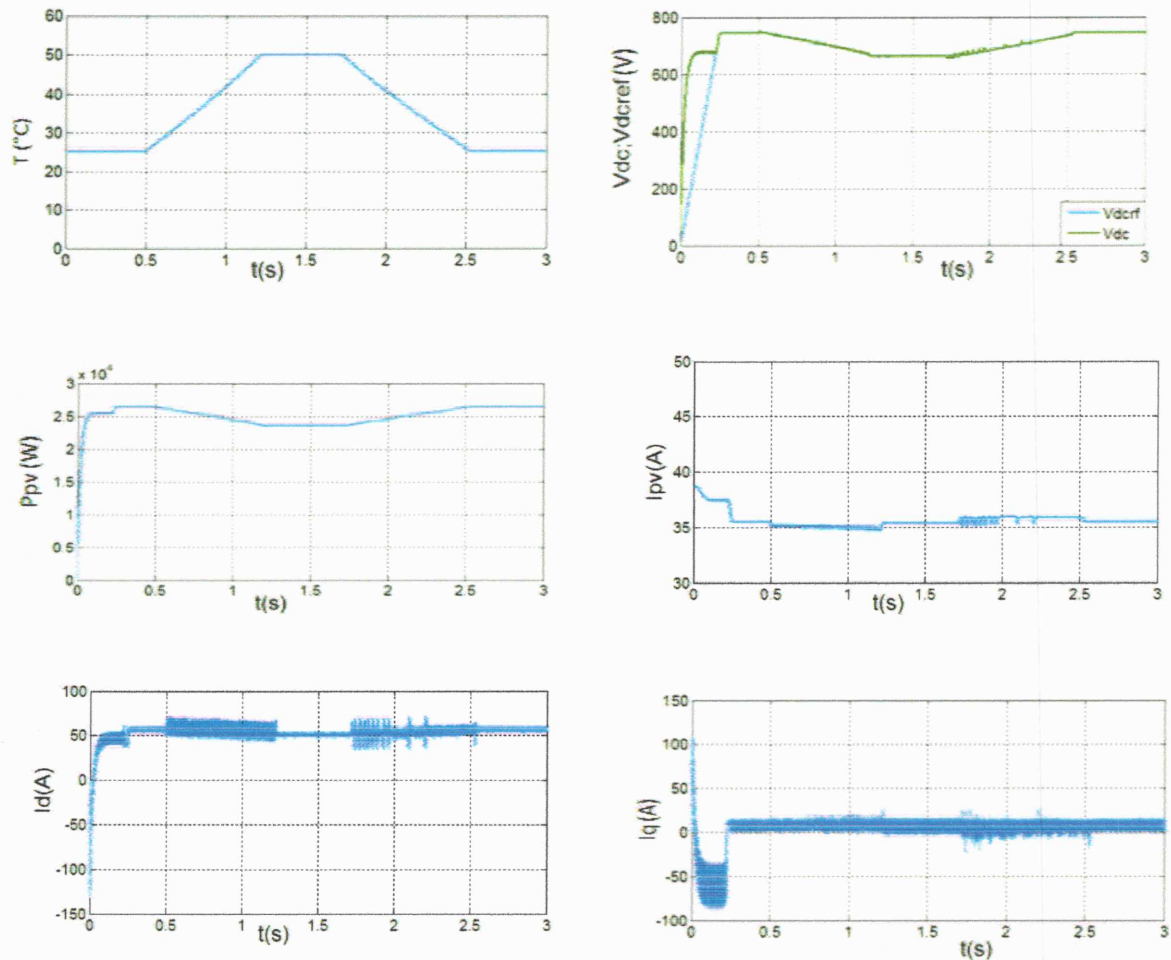


Figure III.30 La tension V_{dc} et sa référence, la puissance et le courant du champ PV, les composantes i_d et i_q du réseau

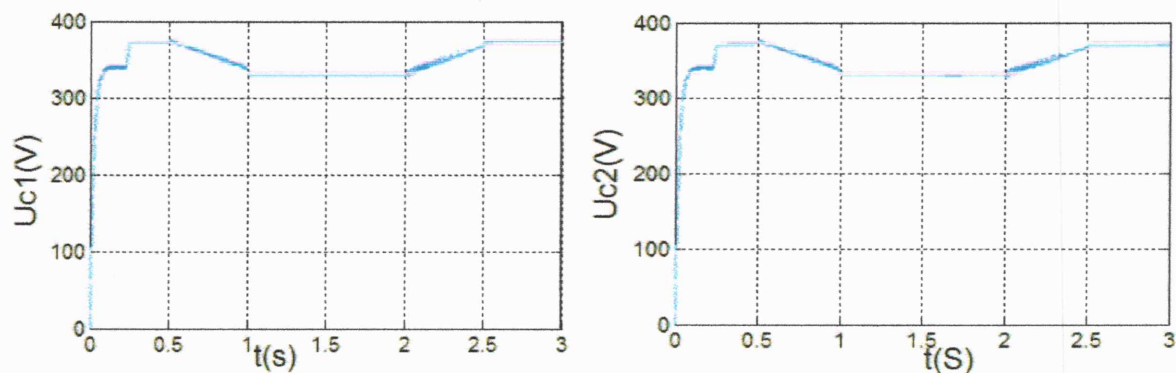


Figure III.31 Les tensions (U_{c1}) et (U_{c2})

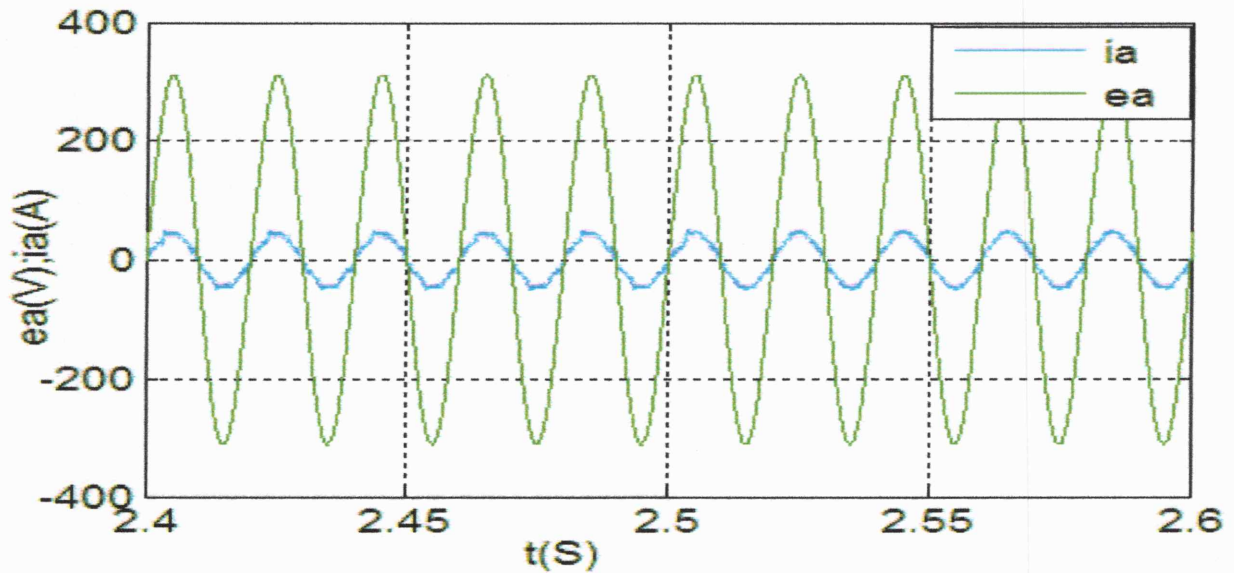


Figure III.32 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

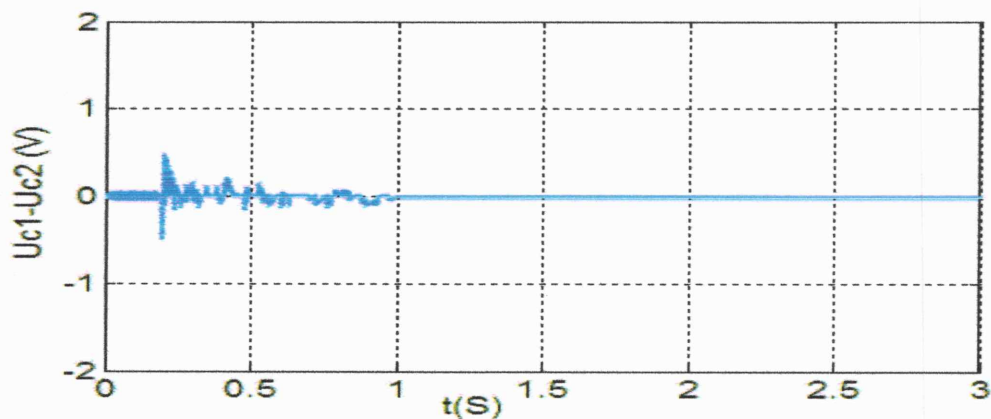


Figure III.33 Différence de tension ($U_{c1} - U_{c2}$)

Les figures précédentes montrent que la composante i_q du courant du réseau reste nulle, contrairement à la composante i_d qui a varié. Par conséquent, le facteur de puissance du réseau n'est pas affecté. Dans la figure III.33 on remarque que la courbe de $(U_{c1} - U_{c2})$ tend vers zéros, ainsi les tensions des deux condensateurs C_1 et C_2 sont équilibrées.

III.7.3 Test de variation du courant de référence i_{qref}

Dans ce qui suit on va faire varier la référence de la composante en quadrature du courant i_{qref} , de la manière suivante :

- entre $t=0$ et $t=2$ s, i_{qref} est nulle.
- A partir de l'instant $t = 2$ s, $i_{qref} = 20$ A.

La simulation de ce changement de i_{qref} nous a donné les résultats suivants :

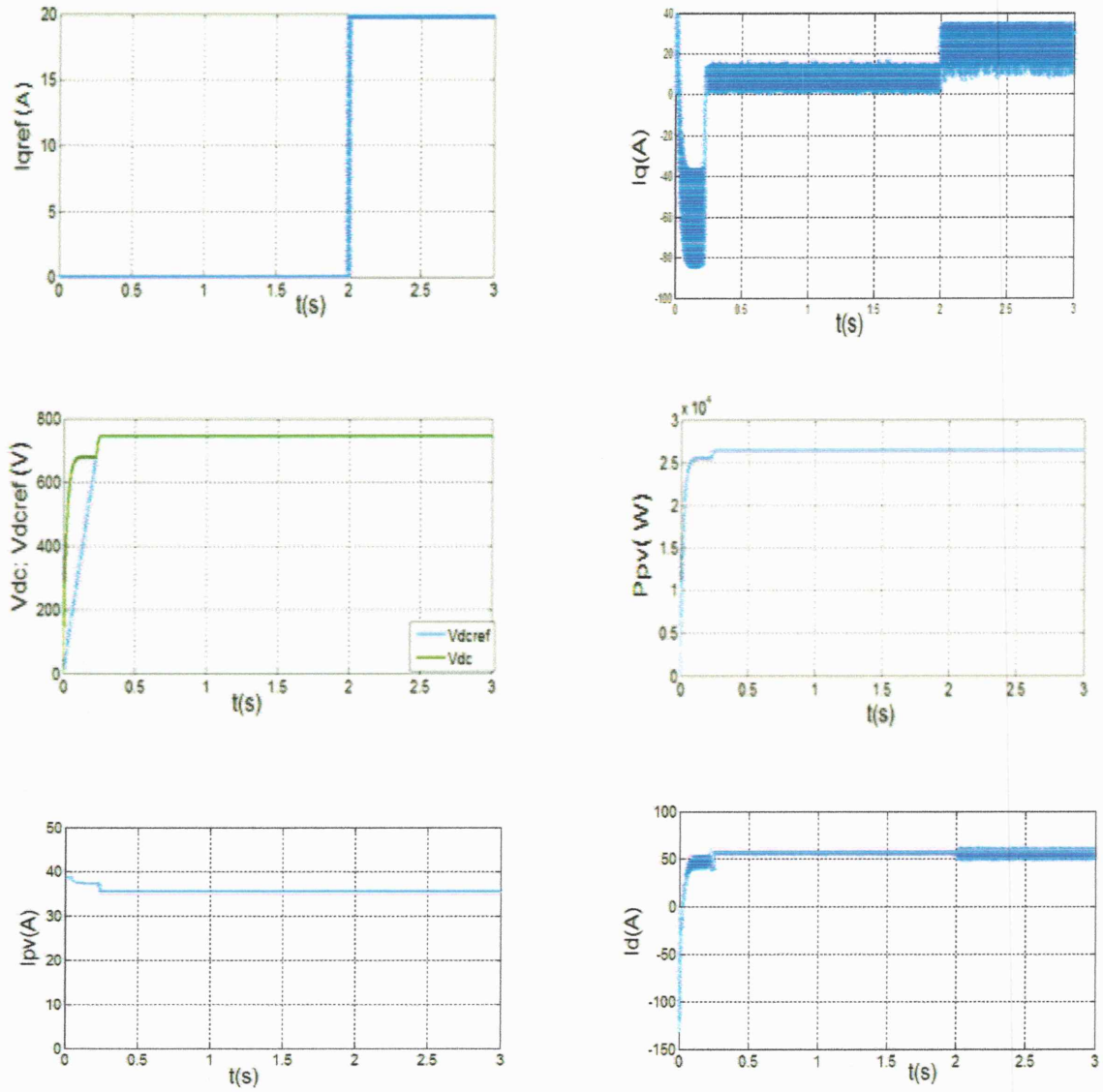


Figure III.34 Le courant i_q et i_{qref} , la tension V_{dc} et sa référence, le courant et la puissance du champ PV et la composante i_d du réseau

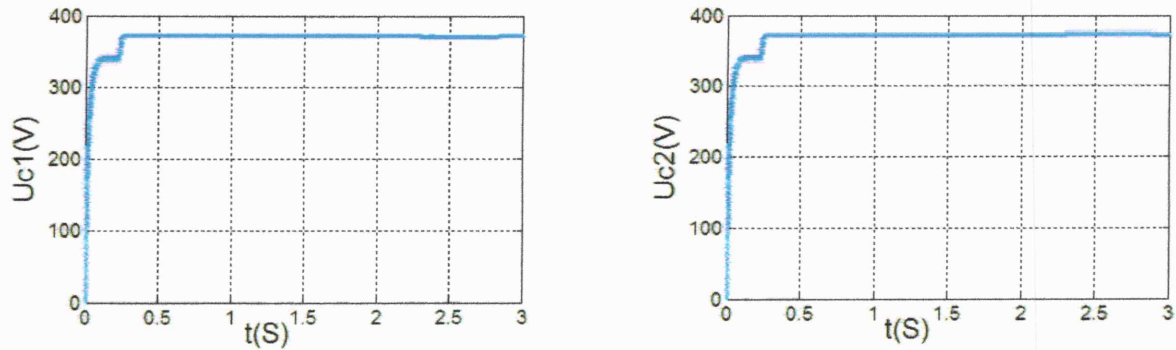


Figure III.35 Les tensions (U_{c1}) et (U_{c2})

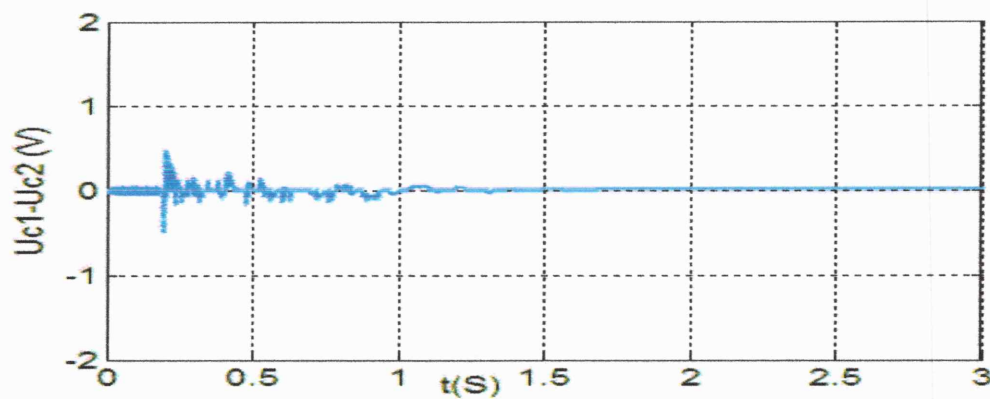


Figure III.36 Différence de tensions ($U_{c1} - U_{c2}$)

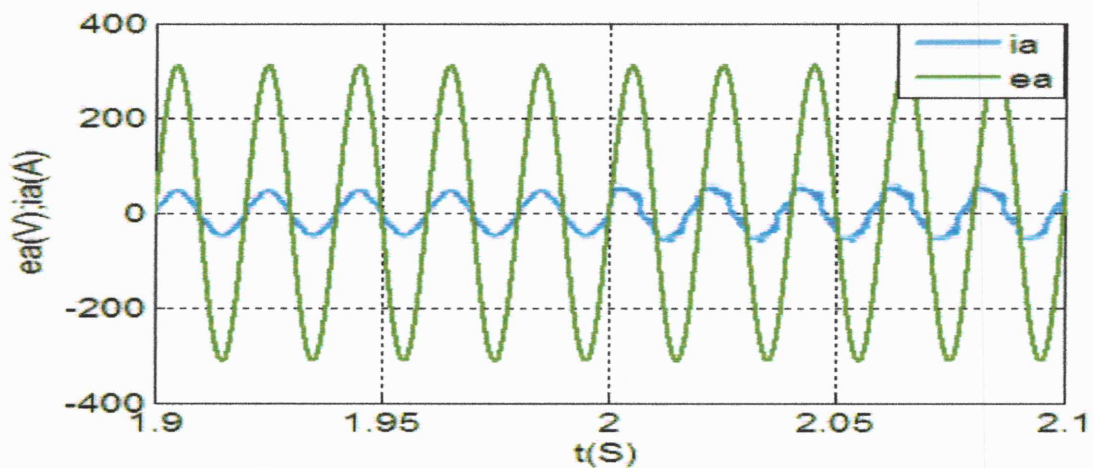


Figure III.37 La tension et le courant de la phase (a) du réseau

Les résultats indiquent que la composante i_q tend rapidement vers sa nouvelle référence et que la composante directe (i_d) n'est pas affectée par le changement de i_{qref} , et on constate un déphasage entre la tension et le courant de ligne du réseau lors du changement de i_{qref} de 0 à 20 A ce qui confirme que le facteur de puissance n'est plus unitaire, et par conséquent, une puissance réactive circule dans le réseau.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a appliqué la commande par mode glissant sur l'association panneaux photovoltaïques-onduleur triphasé-réseau électrique.

La commande permet de régler le facteur de puissance du réseau et la tension continue à l'entrée de l'onduleur. L'équilibrage des tensions d'entrée est assuré. La variation de l'irradiation solaire, la température, n'affectent pas le facteur de puissance du réseau, qui peut être imposé unitaire ou à n'importe quelle autre valeur.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier l'application de la commande par mode glissant et la commande MPPT perturber et observer (P&O) sur un système photovoltaïque connecté au réseau ayant un seul étage de conversion continu/alternatif.

On a commencé, en premier lieu, par des généralités sur les systèmes photovoltaïques, après une présentation des notions fondamentales concernant l'énergie solaire, l'effet photovoltaïque, et les éléments principaux d'un système photovoltaïque.

Ainsi, on a présenté les générateurs photovoltaïques et ses éléments de base qui est la cellule solaire, on a donné leur principe de fonctionnement et les différents modèles mathématiques et électriques ainsi l'influence des conditions atmosphériques (ensoleillement et température) sur la caractéristique puissance-tension et courant-tension des modules photovoltaïques et leur connections série/parallèle, et on a terminé par une définition des différents types des systèmes photovoltaïques et leurs avantages et inconvénients. Nous avons exposé un aperçu général sur les différentes méthodes et techniques utilisées pour la recherche du point de puissance maximale d'un module PV. On a présenté en détail la méthode de (P&O) qui est l'une des méthodes les plus simples et efficaces.

Le second chapitre est consacré a l'étude de la modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique, on a commencé par une description de l'onduleur de tension à trois niveaux , ainsi que la commande de cet onduleur par la stratégie MLI triangulo- sinusoïdal, puis on a présenté une description détaillée de notre système avec tous ces éléments, en commençant par le panneau photovoltaïque, passant par les deux capacités d'entrée et leur rôle dans la stabilisation des tensions à l'entrée de l'onduleur, jusqu'à la présentation du modèle d'état de l'onduleur dans le repère de Park. Nous avons vu que ce système peut être modélisé par cinq équations différentielles non linéaire.

La théorie du mode glissant est exposée dans le troisième chapitre, on a présenté les bases théoriques et les fondements du mode glissant, ainsi que la structure d'une commande basée sur cette approche, puis on a effectué la synthèse des régulateurs du courant et de tension à mode glissant.

A travers les résultats de simulation, nous avons vérifié que l'algorithme de la MPPT est robuste vis à vis des changements de la température et de l'irradiation. Nous avons constaté que ces changement n'affectent, ni le facteur de puissance du réseau, qui peut être gardé

volontairement unitaire ou à n'importe quelle autre valeur, ni l'équilibrage et le réglage des tensions du bus continu.

Comme perspectives de ce travail, on propose d'étendre la commande par de glissement à un onduleur photovoltaïque trois niveaux, et de remplacer l'algorithme de recherche du point de puissance maximale par la méthode de perturber et observer (P&O) par un algorithme à base d'intelligence artificielle.

Description du module BP-Solar SX 120

Les séries des modules BP-Solar SX fournissent une puissance rentable pour l'usage général, soit pour alimenter des charges à courant continu directement ou à travers un onduleur pour les charges à courant alternatif.

Le module BP SX 120 est constitué de 72 cellules monocristallines connectées en série, d'une puissance crête de 120W, [23].

Type de module	BP SX 120	
Caractéristiques électriques		
Puissance maximale	W	120
Tension au point de puissance maximale	V	33.7
Courant au point de puissance maximale	A	3.56
Courant de court circuit	A	3.87
Tension en circuit ouvert	V	42.1
Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température	%/°C	-(0.5±0.05)
Coefficient de variation du courant du court circuit en fonction de la température	%/°C	(0.065±0.015)
Coefficient de variation de la tension du circuit ouvert en fonction de la température	mV/°C	-(160±10)
Température nominale de fonctionnement de la cellule (NOCT)	°C	(47±2)
Résistance série (R_s):	5 mΩ	

Caractéristiques électriques du module PV BP SX 120

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- [01] **F. boukhtouche cherfa**, "Etude et réalisation d'une centrale PV connectée au réseau de distribution électrique BT", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- [02] **A. Lyes**, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque", Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [03] **D. LALILI**, " MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multi niveaux", Thèse de doctorat en Sciences en Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [04] **L. Vechiu**, "Modélisation et Analyse de l'Intégration des Énergies Renouvelables dans un Réseau Autonome", Université du Havre, 2005.
- [05] **Z. Bendjellouli**, " Contribution à la modélisation d'une cellule solaire", Thèse de Magister, Université de Bechar, 2009.
- [06] **D. Boukhers**, "Optimisation d'un Système d'Energie Photovoltaïque. Application au Pompage", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [07] **W. Bensaci**, " Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque Adapté par une Commande MPPT", Mémoire de Master en génie électrique, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [08] **A. Bouchetab** , "Commande d'un onduleur photovoltaïque Connecté au réseau électrique" , Mémoire de Master en Electrotechnique, Université de Jijel, 2012.
- [09] **W. Boucheritte**, "Convertisseurs Multiniveaux dans les Systèmes PV Connectés au Réseau", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, 2009.
- [10] **I. Chabani** , **O. Belila** , "L'intégration de photovoltaïque au Réseau électrique Problèmes et Perspectives " , Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, 2006.
- [11] "Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques", Cours, Ecole nationale d'ingénieurs de Sfax.
- [12] **S. Issaadi**, "Commande d'une Poursuite du Point de Puissance Maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones", Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2006.

- [13] **H. Rezzouk**, "Simulation et implémentation d'algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA", Mémoire de Magister en Electronique, Université de Jijel, 2010.
- [14] **Benmosbah. Aet Mecheraoui. A**, "Implémentation sur FPGA des méthodes MPPT : "P&O" et "floue optimisée par les Algorithmes Génétiques", Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electronique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2006.
- [15] **K. Touafek**, " Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique ", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [16] **S. Pétibon**, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ", Thèse en vue de l'obtention du doctorat de Université de Toulouse, 2009.
- [17] **M.Tellouche**, " Etude d'un moteur synchrone triphasé a pôles saillants alimenté par une cascade redresseur – onduleur MLI à trois niveaux à structure NPC ", Mémoire d'ingénieur d'état en électromécanique, Université m'hamed b. Boumerdes, 2007.
- [18] **S. Kherbouche**, "Commande non linéaire d'un redresseur MLI en vue d'asservissement de la tension redressée et du facteur de puissance", Mémoire d'ingénieur d'état en commande, Université de Jijel, 2009.
- [19] **H. Zeghad**, "commande à structure variable d'un moteur à commutation électrique ", Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2010.
- [20] **A. Kebbiche** " La commande par mode glissant : application à la machine synchrone à aimants permanents ", Afrique SCIENCE, (2008),
- [21] **H. Khebbache**, " Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires ", Mémoire de magister en automatique, Université Ferhat Abbas de Setif, 2011.
- [22] **A. Saibi**, " Commande par régulateurs IP et par mode de glissement d'une machine synchrone à double étoile ", Mémoire de magister, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2006.
- [23] **Bp solar**, Bp SX120, 120-Watt Multicrystalline Photovoltaic Module, 2001.

Nomenclatures

I_{ph} : Photo courant en A.

I_s : courant de saturation en A.

I_d : Courant de la diode en A.

V : La tension à la borne de la cellule en V.

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann en J/K ($1,381.10^{-23}$).

q : Charge d'électron ($1,9.10^{-19}$ Coulomb).

e : Charge de l'électron en C ($1,602.10^{-19}$).

V_T : Tension thermique en V.

T : Température de la cellule en K.

I_{cc} : courant de court-circuit en A.

G : éclairement en W/m^2 .

T : température de la cellule en K.

V_{oc} : tension en circuit ouvert de la cellule en V.

S : Surface du module photovoltaïque en m^2

V_{pv} : tension à la sortie du générateur PV.

I_{pv} : Courant à la sortie du générateur PV.

P_{pv} : Puissance à la sortie du générateur PV.

N_s : Nombre de module en série.

N_p : Nombre de module en parallèle.

R_s : La résistance séries.

MPP : Maximum Power Point (Point de puissance maximale).

$MPPT$: Poursuit du point de puissance maximale.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

CPCR : Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau.

Onduleur de tension à trois niveaux

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

S_{ij} : Interrupteurs bidirectionnel en courant.

F_{ij} : Fonctions de commutation des interrupteurs.

F_{Cij} : Fonctions de connections des bras.

V_{dc} : Tension continue appliquée à l'onduleur.

$V_{ao,bo,co}$: Tensions polaire.

$V_{am,bn,cn}$: Tensions simples.

$V_{ab,bc,ca}$: Tensions composées.

$I_{d0,d1,d2}$: Courants de sources.

m : L'indice de modulation.

r : Coefficient de réglage.

$V_{ref1,ref2,ref3}$: Tensions de référence.

$V_{P1,P2}$: Signaux des porteuses.

$V_{K0,K1,K2}$: Signaux intermédiaire.

V_d, V_q : Les tensions biphasées a la sortie de l'onduleur.

Réseau électrique triphasé

R : Résistance de phase du réseau.

L : Inductance de phase du réseau.

e_d, e_q : Les tensions biphasées de lignes de réseau.

i_d, i_q : Les courants biphasés du réseau.

$e_{a,b,c}$: Tensions de phase du réseau.

$I_{a,b,c}$: Courants de phase du réseau.