

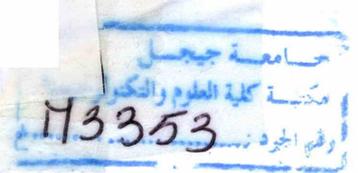
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE JIJEL



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'électrotechnique



Mémoire

De Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme
de Master en Electrotechnique
Option : commande des systèmes électriques



Thème

**Commande prédictive d'un onduleur photovoltaïque
Connecté au réseau Electrique**

Réalisé par :

Mr. HAMIDI Mokhtar
Mr. CHEIKH Abdelhai Mohamed

Encadré par :

Mr. LOURCI Nabil

Promotion: Juin 2015

Remerciements

La Louange est à Allâh, le Seigneur des mondes. Et que la prière et le salut soient sur celui qu'Allâh a envoyé en miséricorde pour l'univers, ainsi que sur sa famille, ses compagnons et ses frères jusqu'au Jour de la Rétribution.

Nous voulons remercier tout d'abord Allâh, le tout puissant qui nous a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

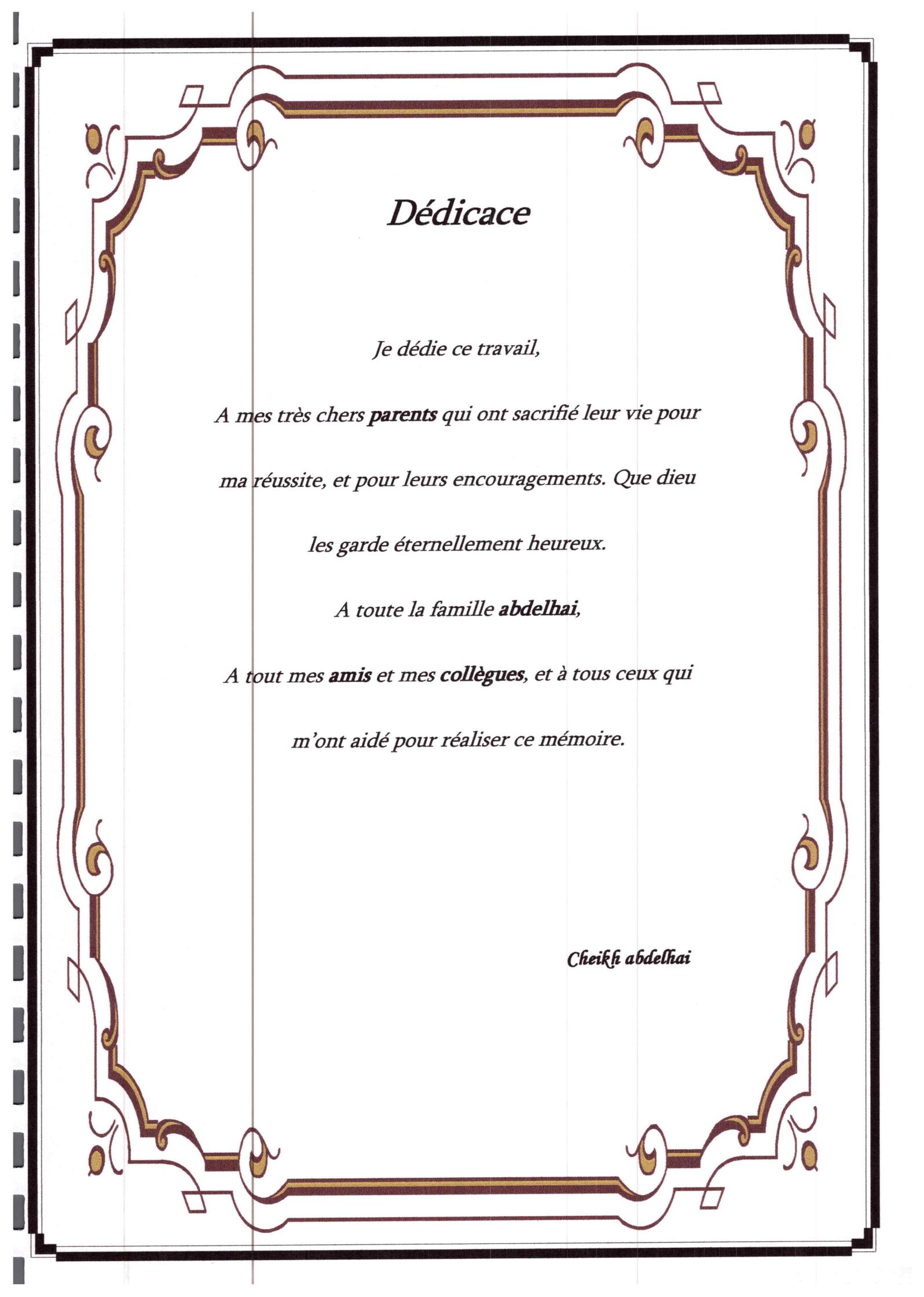
*Nous tenons à formuler notre gratitude et notre profonde reconnaissance à l'égard de notre promoteur Mr. **Lourci Nabil** qui a supervisé ce travail de recherche. Son soutien, sa disponibilité, sa patience, sa compréhension, ainsi que ses conseils judicieux tant lors de nos recherches que lors de l'écriture de ce mémoire. Ses connaissances et ses jugements nous ont permis d'acquérir des compétences essentielles en recherche.*

*Nous adressons également nos remerciements, à tous **nos enseignants**, qui nous ont donnés les bases de la science, sans oublier d'exprimer nos remerciements au **Chef du Département d'Électrotechnique**.*

*Nos remerciements aux **membres du jury** qui nous ont fait l'honneur d'accepter de lire et de juger ce mémoire.*

*Nous remercions l'ensemble des **collègues et amis** qui nous ont aidés et supportés durant ces dernières années. Et Nous remercions aussi toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

*Nous voudrions exprimer un remerciement spéciale à **nos proches et nos frères** pour leurs conseils au long de notre vie.*



Dédicace

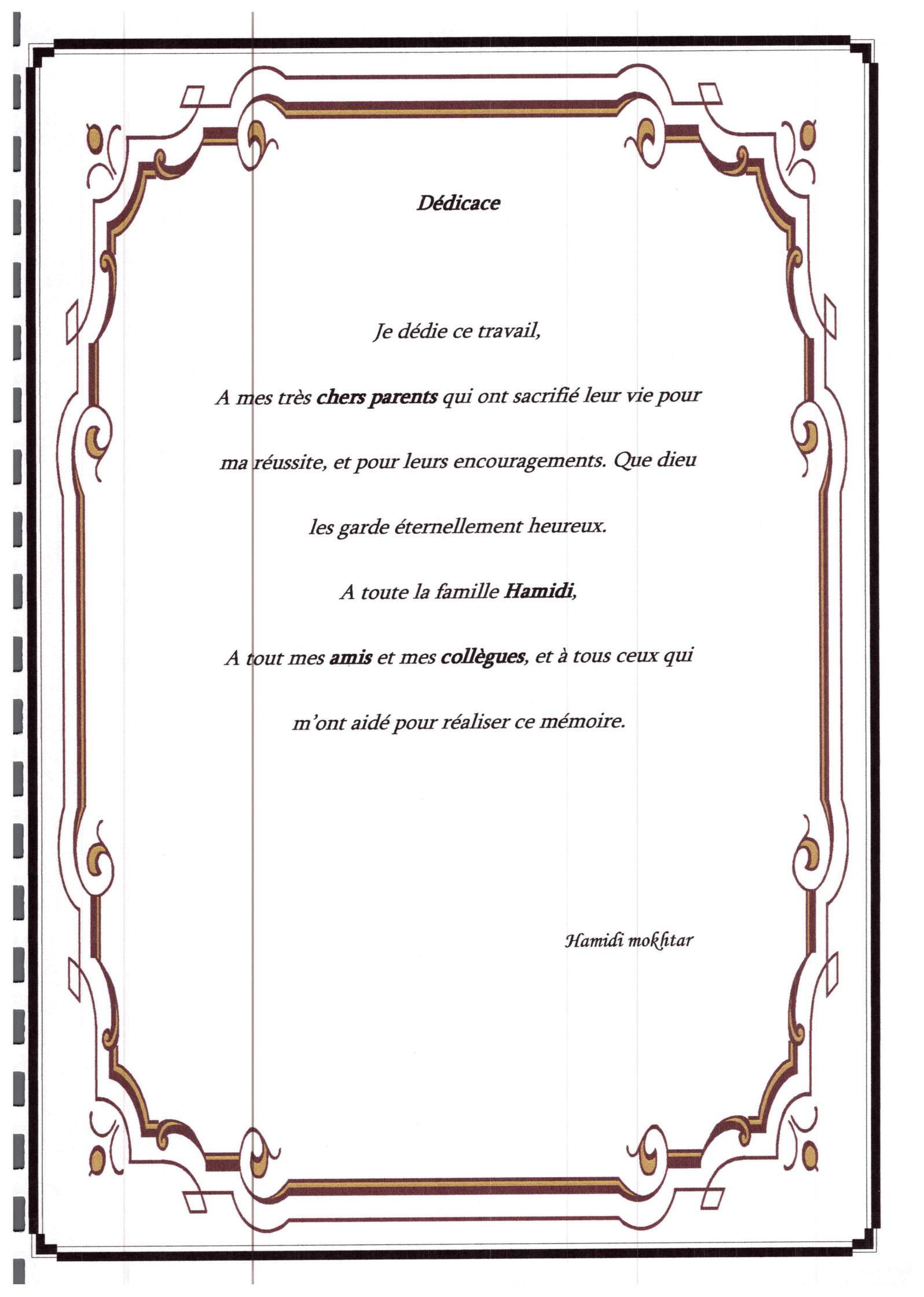
Je dédie ce travail,

*A mes très chers **parents** qui ont sacrifié leur vie pour
ma réussite, et pour leurs encouragements. Que dieu
les garde éternellement heureux.*

*A toute la famille **abdelhai**,*

*A tout mes **amis** et mes **collègues**, et à tous ceux qui
m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

*Cheikfi **abdelhai***



Dédicace

Je dédie ce travail,

*A mes très **chers parents** qui ont sacrifié leur vie pour
ma réussite, et pour leurs encouragements. Que dieu
les garde éternellement heureux.*

*A toute la famille **Hamidi**,*

*A tout mes **amis** et mes **collègues**, et à tous ceux qui
m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

Hamidi mokhtar

Onduleur de tension à deux niveaux

- F_{abc} : Fonctions de commutation des interrupteurs.
- V_{dc} : Tension continue appliquée à l'onduleur.
- $V_{ab,bc,ca}$: Tensions composées.
- m : L'indice de modulation.
- r : Coefficient de réglage.
- $V_{aref,bref,cref}$: Tensions de référence.
- V_P : Signal de porteuse.
- V_α, V_β : Les tensions biphasées à la sortie de l'onduleur.

Réseau électrique triphasé

- R : Résistance de phase du réseau.
- L : Inductance de phase du réseau.
- e_α, e_β : Les tensions biphasées de lignes de réseau.
- i_α, i_β : Les courants biphasés du réseau.
- $e_{a,b,c}$: Tensions de phase du réseau.
- $I_{a,b,c}$: Courants de phase du réseau.

Abréviations :

- MPP: Maximum Power Point (Point de puissance maximale).
- MPPT: Poursuit du point de puissance maximale.
- PV: Photovoltaïque.
- GPV: Générateur Photovoltaïque.
- PPM: Point de Puissance Maximale.
- MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion.
- P&O: Perturbation et Observation.
- DC: Courant Continu (Direct Current).
- AC: Courant Alternatif (Alternative Current).
- MPC: Model Prédictive Control.
- SVM: Space-Vector Modulation.

Listes des notations et symbole

Panneau PV (MSX 60)

- I_{ph} : photo- courant.
- I_D : Courant traversant la diode.
- A : Facteur de qualité.
- q : Charge d'électron.
- E : L'éclairement.
- K : La constante de Boltzmann.
- K_1 : Coefficient de la température du courant de court-circuit.
- V_T : Tension thermique.
- I_s : Courant de saturation.
- I_{RS} : Courant de saturation réversible.
- V : Tension aux bornes de la diode.
- T : Température absolue (en kelvin).
- T_{ref} : Température de référence de la cellule.
- E_g : Energie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule.
- R_s : La résistance séries.
- R_p : La résistance parallèle.
- N_S : Nombre de module en série.
- N_P : Nombre de module en parallèle.
- 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
- f_p : La fréquence du signal de la porteuse
- $f_{réf}$: La fréquence du signal de référence
- V_m : L'amplitude de la porteuse
- $V_{mréf}$: L'amplitude du signal de référence

Table de matières

Remerciement	
Dédicace	
Listes des notations et symbole	
Table des matières	
Introduction générale.....	3
Chapitre I :	
Généralités sur l'énergie Photovoltaïques	
I. Conversion photovoltaïque.....	3
I.1. L'effet photovoltaïque.....	3
I.2. Principe de la conversion photovoltaïque.....	4
II. Cellules photovoltaïques.....	4
II.1 Technologies des cellules photovoltaïques.....	4
II.1.1 Cellules monocristallines.....	4
II.1.2 Cellules poly-cristallines.....	5
II.1.3 Les cellules amorphes.....	5
II.2 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.....	6
II.2.1 Modèle d'une cellule solaire idéale.....	6
II.2.2 Modèle réel simplifié d'une cellule photovoltaïque.....	7
II.2.3 Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.....	7
II.2.4 Modèle double exponentielle.....	8
II.3 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	9
II.4. Paramètres des cellules photovoltaïques.....	9
II.4.1- Courant de court-circuit $I_{CC} (V_{CC}=0)$	9
II.4.2- Tension en circuit ouvert $V_{CO} (I_{CO}=0)$	10
II.4.3- Puissance maximale.....	10
II.4.4- Facteur de forme FF.....	10
II.4.5- Rendement de conversion.....	10
II.4.6- Facteur de qualité A.....	11
III. Les modules photovoltaïques.....	11
III.1 Influence des paramètres sur la caractéristique I (V) et P (V).....	11
III.1.1- Influence de l'éclairement E.....	11

III.1.2- Influence de la température T.....	12
III.1.3-Influence de la résistance série R_s	13
III.1.4- Influence de facteur de qualité A.....	14
III.2. Association des modules.....	15
III.2.1. Association série.....	16
III.2.2- Association Parallèle.....	17
III.2.3- Association mixte (Série - Parallèle).....	18
IV. Recherche du point de puissance maximal (MPPT).....	20
IV.1 Philosophie de la MPPT.....	20
IV.2 Différentes méthodes de la MPPT.....	21
IV.2.1- Méthode de Perturbation et Observation (P&O).....	21
IV.2.2-Méthode de conductance incrémentale.....	23
V. Les différents types de systèmes photovoltaïques.....	25
V.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes.....	25
V.1.1- Le mode autonome.....	25
V.1.2- Les modes hybrides.....	25
V.2. Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau.....	26
VI. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	27
VI.1- Avantages.....	27
VI.2- Inconvénients.....	27
Conclusion.....	28

Chapitre II :

Modélisation et simulation d'un Système PV Connecté au Réseau

Introduction.....	29
I. Généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.....	29
I.1 Classifications de centrales photovoltaïques connectées au réseau.....	29
I.1.1- Centrale de petite taille.....	29
I.1.2- Centrale de moyenne taille.....	29
I.1.3- Centrale de grande taille.....	29
II .Description générale des centrales photovoltaïques connectées au réseau.....	30

Table des matières

II.1.Systèmes à connexion directe au réseau	30
II.2.Systèmes avec hacheur.....	30
II.3.Composants des centrales photovoltaïques connectées au réseau.....	31
II.3.1.Onduleur	31
II.3.1.1. Onduleurs modulaires ou module photovoltaïque AC.....	31
II.3.1.2.Onduleurs centralisés	31
II.3.1.3.Onduleur "String " ou "de branche".....	32
II.3.2.Générateur photovoltaïque.....	32
II.3.3. La poursuite du point de puissance maximale.....	33
II.3.4.Bus continu.....	33
II.4.Modélisation et simulation des composants du système photovoltaïque connectée au réseau.....	34
II.4.1- Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque	34
II.4.1.1- Modélisation du GPV.....	34
II.4.1.2. Simulation du générateur PV.....	36
II.4.2- Modélisation et simulation de L'onduleur à deux niveau.....	38
II.4.2- 1Modélisation de L'onduleur triphasé a deux niveau.....	38
a) Modèle de l'onduleur triphasé.....	38
b) Commande en MLI de l'onduleur.....	40
II.4.2.2-Simulstion de la commande en MLI de l'onduleur triphasé deux niveaux.....	41
II.4.3 Structure et simulation de la commande MPPT.....	42
II.4.4 Modélisation et simulation du réseau	43
II.4.5 Modèle d'état de l'association onduleur-réseau.....	44
II.5 Simulation de la cascade sans application de la commande.....	46
Conclusion.....	51

Chapitre III :

Commande prédictive Application Simulation et Résultats

Introduction.....	52
I- Principe de la commande prédictive.....	52
II- Principe de la MLI vectorielle.....	53
II.1- Vecteur de tension de l'onduleur.....	53
II.2- Etats de l'onduleur.....	54
III- Application de la commande prédictive sur l'onduleur.....	56
IV- Schéma globale de la commande.....	57
IV.1 Simulation de la cascade avec commande.....	57
Conclusion.....	64
Conclusion générale	65
Annexe.	
Références Bibliographique	
Liste des figures	

*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.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, 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 le biais d'une cellule dite 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]

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

L'onduleur est un élément essentiel d'une installation photovoltaïque. C'est une machine d'électronique de puissance qui transforme l'énergie électrique DC issue des modules PV en énergie électrique AC. [3]

Plusieurs techniques de commande de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau électrique ont été proposées dans la littérature, telles que la structure de commande en boucles multiples pour le courant de réseau et la tension continue. [4]

Le système photovoltaïque raccordé au réseau est le système d'énergie renouvelable dont l'exploitation technique est la plus simple car aucune maintenance préventive n'est nécessaire.

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Arrivée à maturité, tellement elle est suffisamment utilisée dans l'industrie, dont ses diverses applications se sont révélées très concluantes, notamment dans les systèmes robotiques, des machines électriques, la surveillance et la conduite des procédés biotechnologiques. [5] [6]

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au problème de la recherche du point de puissance maximale suivant la méthode Conductance Incrémentale, et le réglage du déphasage entre la tension et le courant de phase réseau électrique en utilisant la théorie de la commande prédictive.

Le présent mémoire est subdivisé en trois chapitres, à savoir :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque ainsi que les différents types des systèmes photovoltaïques, nous présentons quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires.

Dans le chapitre II, nous présenterons des généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique ainsi que les différentes cascades et convertisseurs utilisés et le principe Puis, nous présenterons une modélisation et une description détaillée des éléments de notre système. A la fin du chapitre, nous simulerons la cascade sous des conditions climatiques stables.

Dans le chapitre III, on va exposer quelques généralités sur la commande prédictive, afin d'appliquer cette commande sur l'onduleur triphasé à deux niveaux, qui est connecté, en amont à un champ photovoltaïque, et en aval au réseau électrique.

Enfin, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale, qui évaluera l'ensemble des résultats obtenus et des perspectives.

Chapitre I
Généralité sur l'énergie
photovoltaïque

Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens 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.

Ce chapitre décrit les concepts de base du système photovoltaïque et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

I- Conversion photovoltaïque :

I.1- Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$ l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).

47 % dans la bande visible (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$).

44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$). [7]

I.2- L'effet photovoltaïque :

Le scientifique Edmond Becquerel fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules : les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation : [8]

$$E_{\text{photon}} = h.c / \lambda \quad (\text{I.1})$$

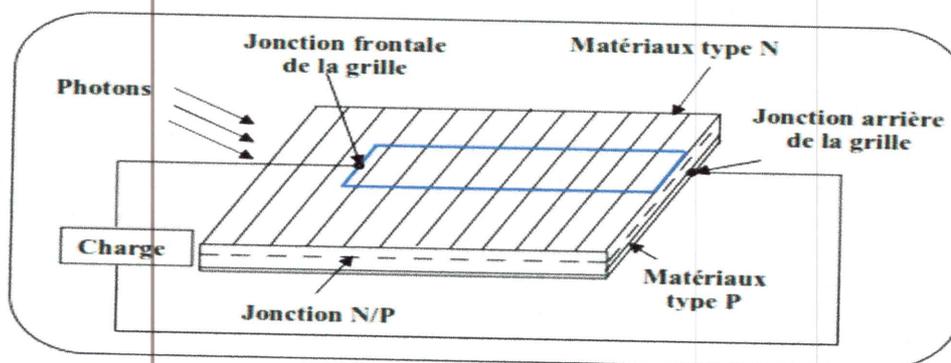
Où : 'h' est la constante de Planck, 'c' la vitesse de la lumière, et 'λ' sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Donc on peut dire que l'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie des photons constituant la lumière en énergie électrique. Cette conversion particulière de la lumière repose sur

l'utilisation des propriétés électrique et optique des matériaux semi-conducteurs sans avoir besoin d'utiliser d'autres dispositifs ou sources d'énergie extérieures d'où le nom conversion directe.

I.3- Principe de la conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée. [9]



La figure I.1 : Cellule PV typique.

II- Cellules photovoltaïques :

II.1- Technologies des cellules photovoltaïques :

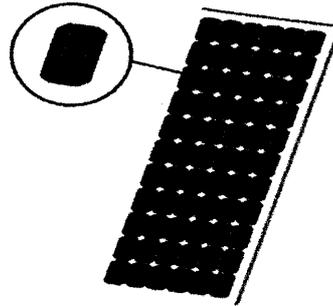
Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs. [10]

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

II.1.1- Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou

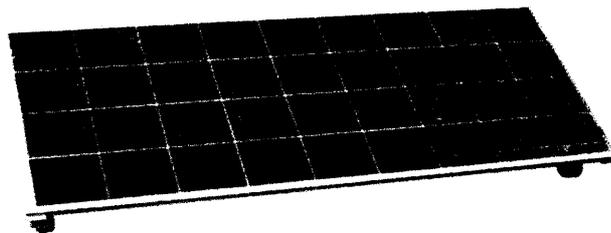
presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un taux de rendement de 12 à 16 %, mais la méthode de production est laborieuse et difficile, et donc très cher, car il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.



La figure I.2 : Cellule monocristalline.

II.1.2- Cellules poly-cristallines :

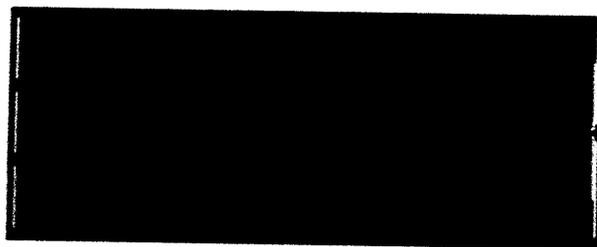
Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 13 %, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.



La figure I.3 : Cellules poly-cristallines.

II.1.3- Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (8 % - 10 %), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.



La figure I.4 : Cellules amorphes.

II.2- Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque :

Il existe plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque. [7]

II.2.1- Modèle d'une cellule solaire idéale :

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n).

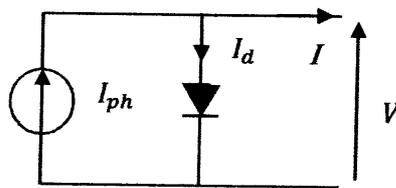


Figure I.5 : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.

Le courant aux bornes de la cellule est :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.2)$$

Avec:

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{V}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Et :

$$V_T = \frac{k.T}{e} \quad (I.4)$$

Où :

I_{ph} : Photo courant en A.

I_d : Courant de la diode en A.

V : Tension aux bornes de la cellule en V.

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$). J/K

e : Charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$). C

V_T : Tension thermique en V.

T : Température de la cellule en K.

II.2.2 Modèle réel simplifié d'une cellule photovoltaïque :

Ce modèle est représenté à la figure I.6. Une résistance série R_s est ajoutée par rapport au modèle précédent. Cette résistance représente les pertes ohmiques du matériau. [10]

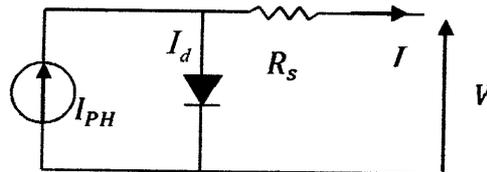


Figure I.6: Schéma du modèle réel simplifié d'une cellule photovoltaïque.

II.2.3- Modèle réel d'une cellule photovoltaïque :

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte.

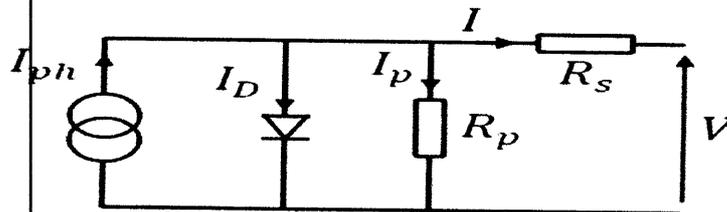


Figure I.7: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle

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 :

À partir de la figure (I.7) on a la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (I.5)$$

On remplace I_D et I_p par leurs expressions :

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{AU_T}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

$$I_p = \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \tag{I.7}$$

On obtient:

$$I = I_{ph} - I_D - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \tag{I.8}$$

$$\Rightarrow I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{AU_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \tag{I.9}$$

II.2.4- Modèle double exponentielle :

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. [7]

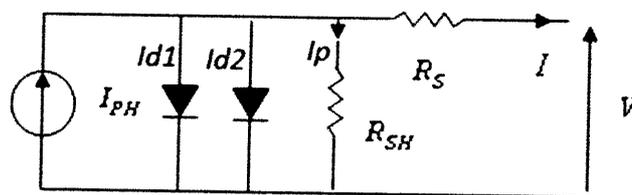


Figure I.8 : Modèle à deux diodes d'une cellule solaire.

À partir de cette figure, on a la relation suivante :

$$I = I_{PH} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \tag{I.10}$$

D'une façon générale, on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres. (figure I.9) :

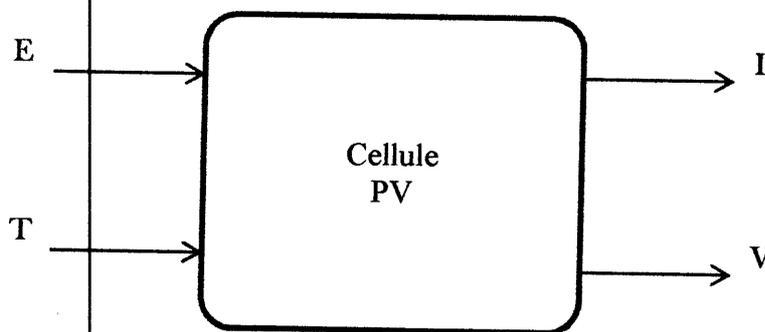


Figure I.9 : Schéma bloc d'une cellule PV.

Avec deux variables d'entrée :

E : ensoleillement dans le plan de la cellule W/m^2

T : température de la cellule (K).

Et deux variables de sortie :

I : intensité du courant fourni par la cellule.

V : tension aux bornes de la cellule.

II.3- 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 entre ses 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. [11]

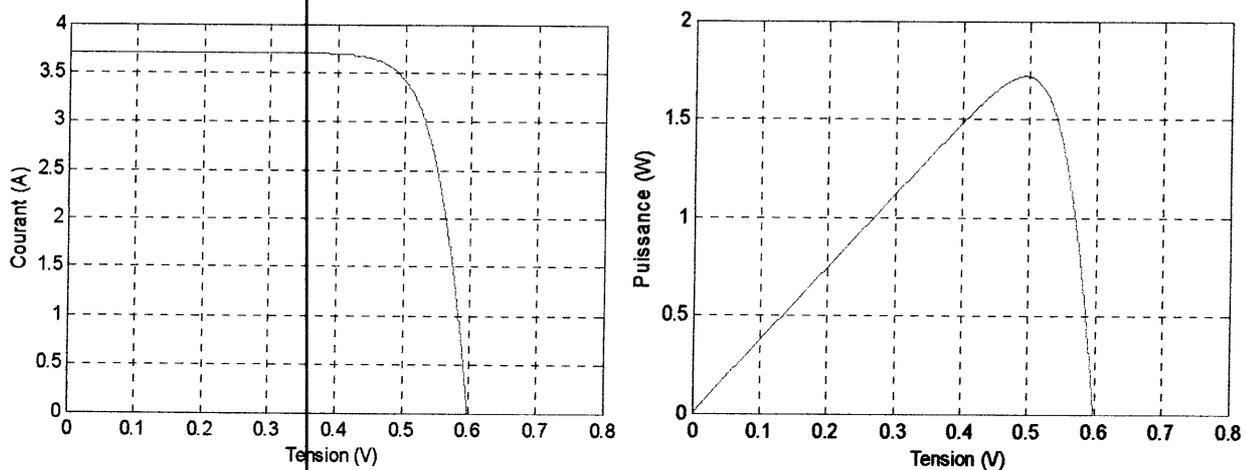


Figure I.10 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque.

II.4- Paramètres des cellules photovoltaïques :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants : [12,13]

II.4.1- Courant de court-circuit $I_{CC} (V_{CC}=0)$

C'est le courant débité par la cellule lorsque la résistance de charge est nulle, On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du module.

II.4.2- Tension en circuit ouvert $V_{co} (I_{co}=0)$

C'est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule, la résistance de charge est infiniment grande. On obtient sa valeur en branchant un voltmètre aux bornes du module.

II.4.3- Puissance maximale :

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, etc.), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V .

$$P = V \cdot I \quad (I.11)$$

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (I.12)$$

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC) (en général un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C)

II.4.4- Facteur de forme FF :

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule PV (P_{PPM}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

$$FF = \frac{P_{PPM}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.13)$$

Le facteur de forme FF est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle.

II.4.5- Rendement de conversion :

Le rendement 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} .

$$\eta = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{in}} \quad (I.14)$$

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

II.4.6- Facteur de qualité A :

C'est un paramètre dépendant de la qualité de la diode (compris entre 1 et 2).

III- Les modules photovoltaïques :

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, donc par définition le module photovoltaïque est un groupement des cellules connectées entre elles en série pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. [14]

La figure (I.11) représente un module photovoltaïque.

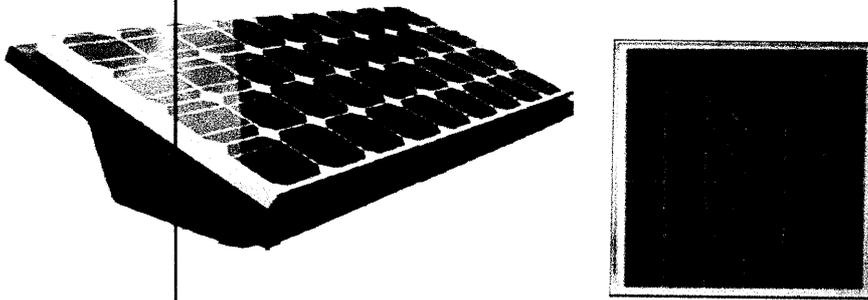


Figure. I.11 Module photovoltaïque [14].

III.1- Influence des paramètres sur la caractéristique I (V) et P (V) :

III.1.1- Influence de l'éclairement E :

La puissance délivrée par un générateur photovoltaïque dépend de l'irradiation qu'il reçoit. La figure (I.12) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. [7]

On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

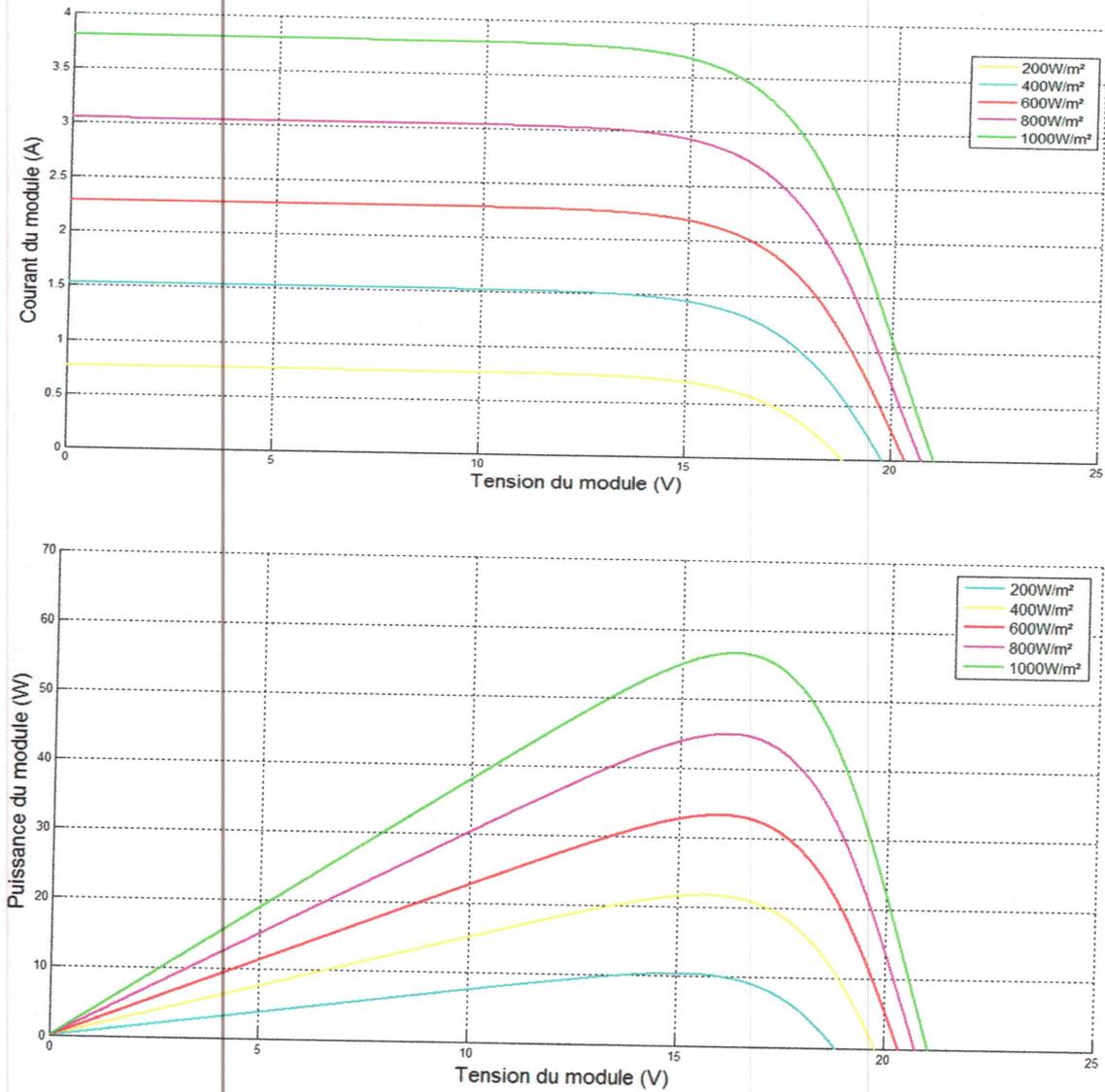


Figure I.12 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I (V) et P(V).

III.1.2- Influence de la température T :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. [7]

La figure (I.13) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque en fonction de la température, à un éclairement constant.

On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

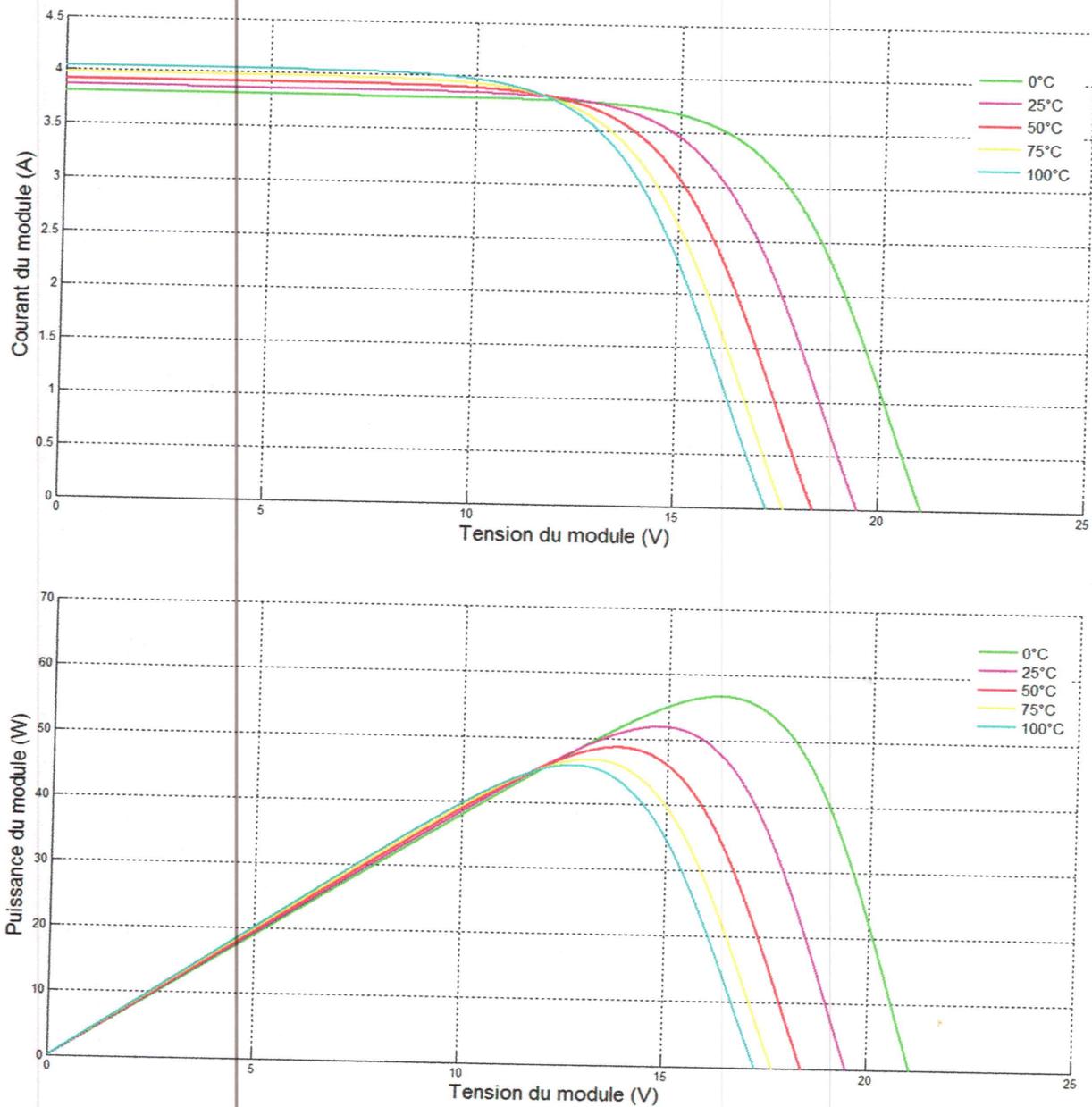


Figure I.13 : Influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$

III.1.3-Influence de la résistance série R_s :

La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [7]

La variation de la résistance agit légèrement sur le point de puissance maximale, mais elle n'a pas d'influence sur le courant de court-circuit ni sur la tension du circuit ouvert, comme elle montre la figure (I.14).

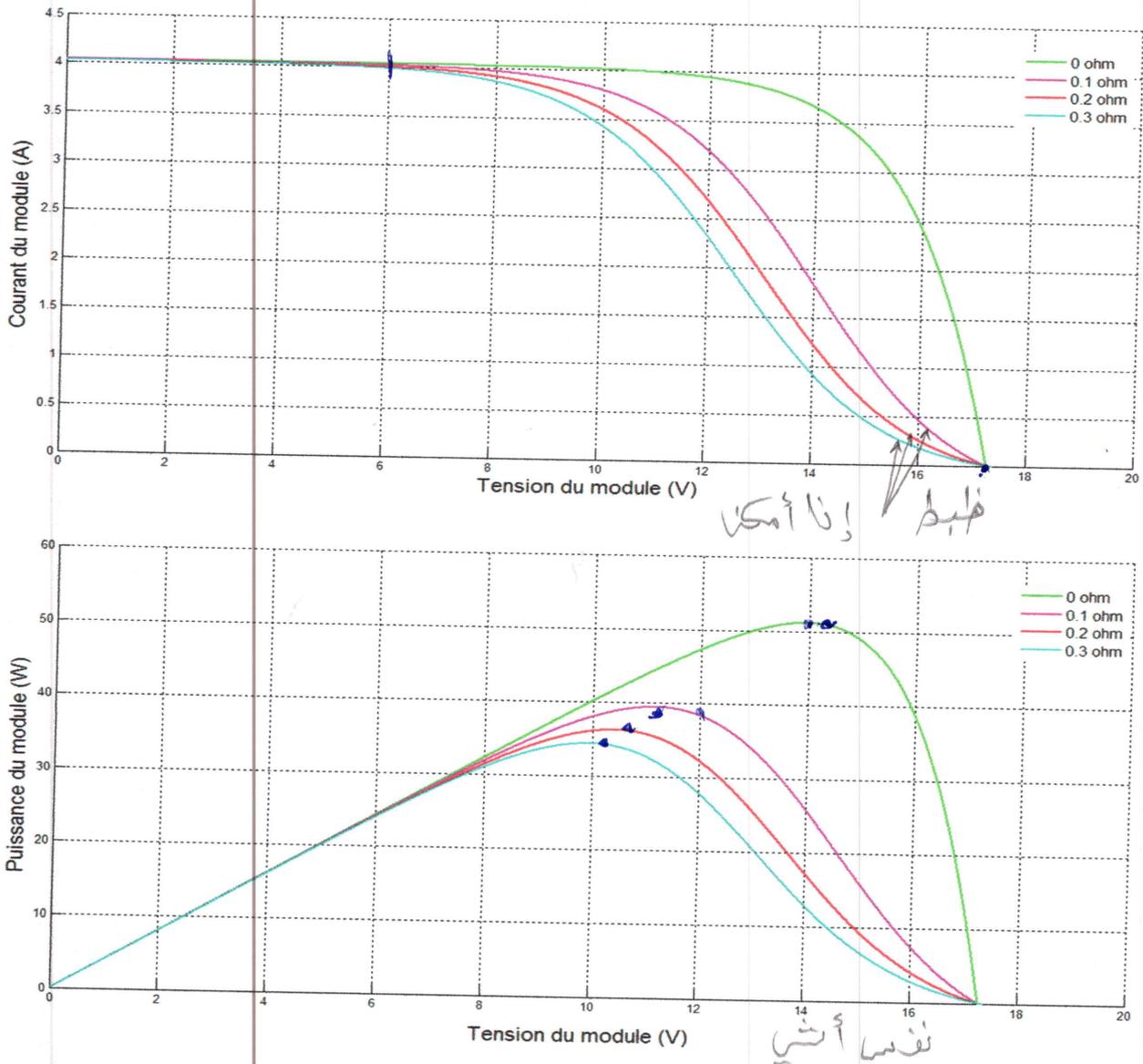


Figure (I.14) : Influence de la résistance série sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$

III.1.4- Influence de facteur de qualité A :

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, comme elle montre la figure (I.15) ci-dessous. [7]

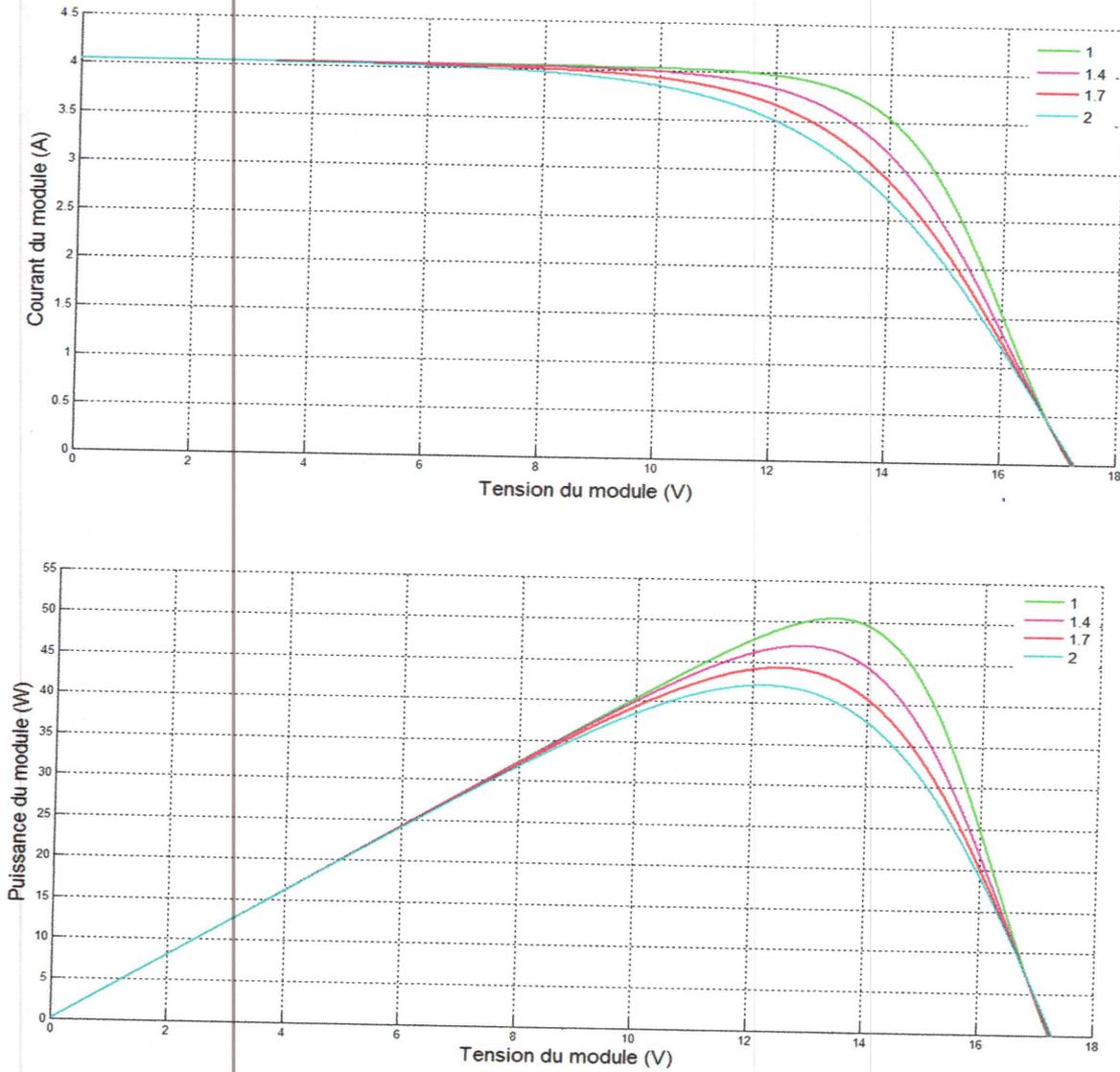


Figure I.15 : Influence du facteur de qualité 'A' sur les caractéristiques I (V) et P(V)

III.2 Association des modules :

Les modules peuvent être assemblés en panneaux; eux même interconnectés pour former un champ de module. Dans une installation, l'ensemble des champs de modules constitue le champ photovoltaïque.

La figure (I.16) illustre la construction d'un champ photovoltaïque à partir des cellules.

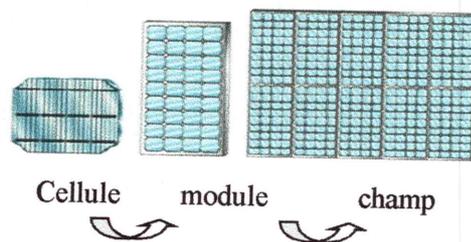


Fig. (I.16) Composants d'un champ de modules photovoltaïques.

Il y a trois types d'association :

III.2.1- Association série :

Dans un groupement en série, les modules sont traversés par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

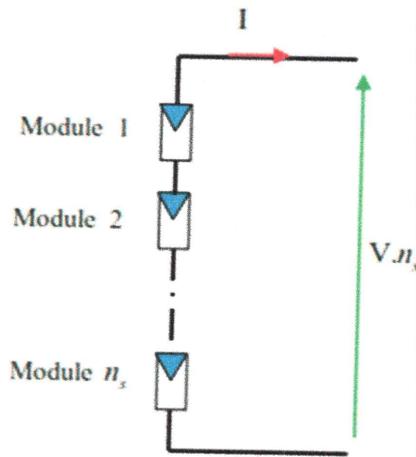


Figure I.17 : Associations de n_s modules photovoltaïques en série

Les caractéristiques résultantes ($I=f(V)$, $P=f(V)$) obtenues en associant en série n_s modules identiques. [15] sont représentées par les figures (I.18.19) :

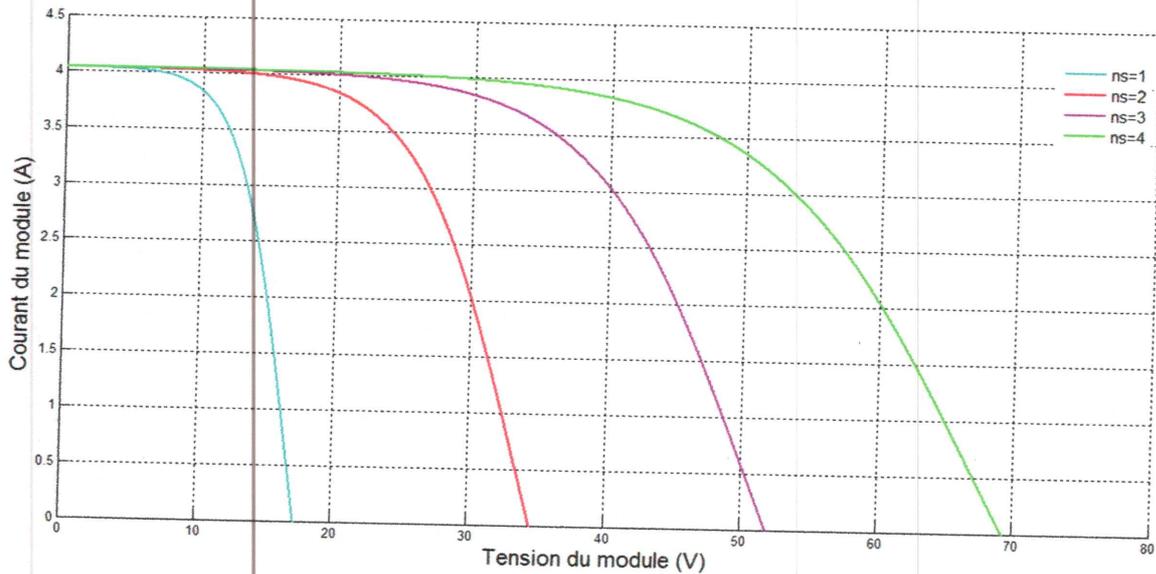


Figure I.18 : Caractéristiques $I=f(V)$ d'un groupement de n_s modules en série.

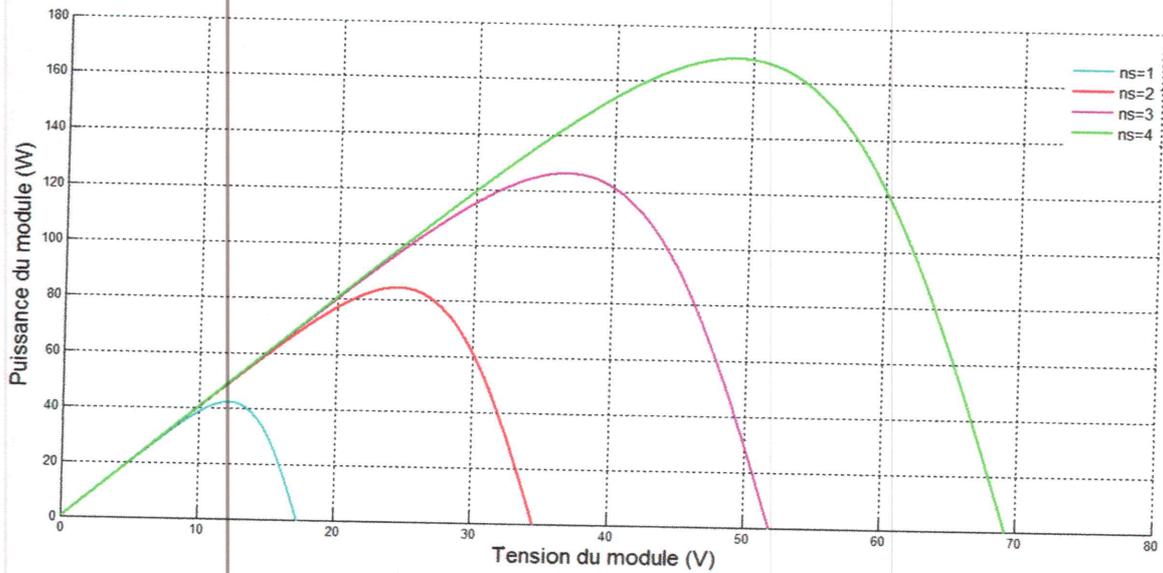


Figure I.19 : Caractéristiques $P=f(V)$ d'un groupement de n_s modules en série.

III.2.2- Association Parallèle :

L'association en parallèle des modules photovoltaïques délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celle d'un seul module.

La figure (I.20) représente une association de n_p modules en parallèle.

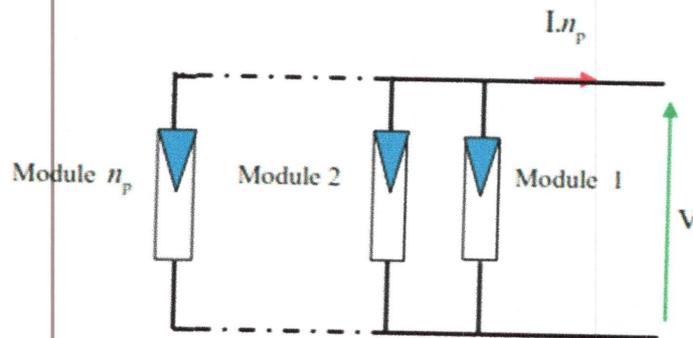


Figure I.20 : Association de n_p modules photovoltaïques en parallèle.

La caractéristique d'un groupement de n_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure (I.21) :

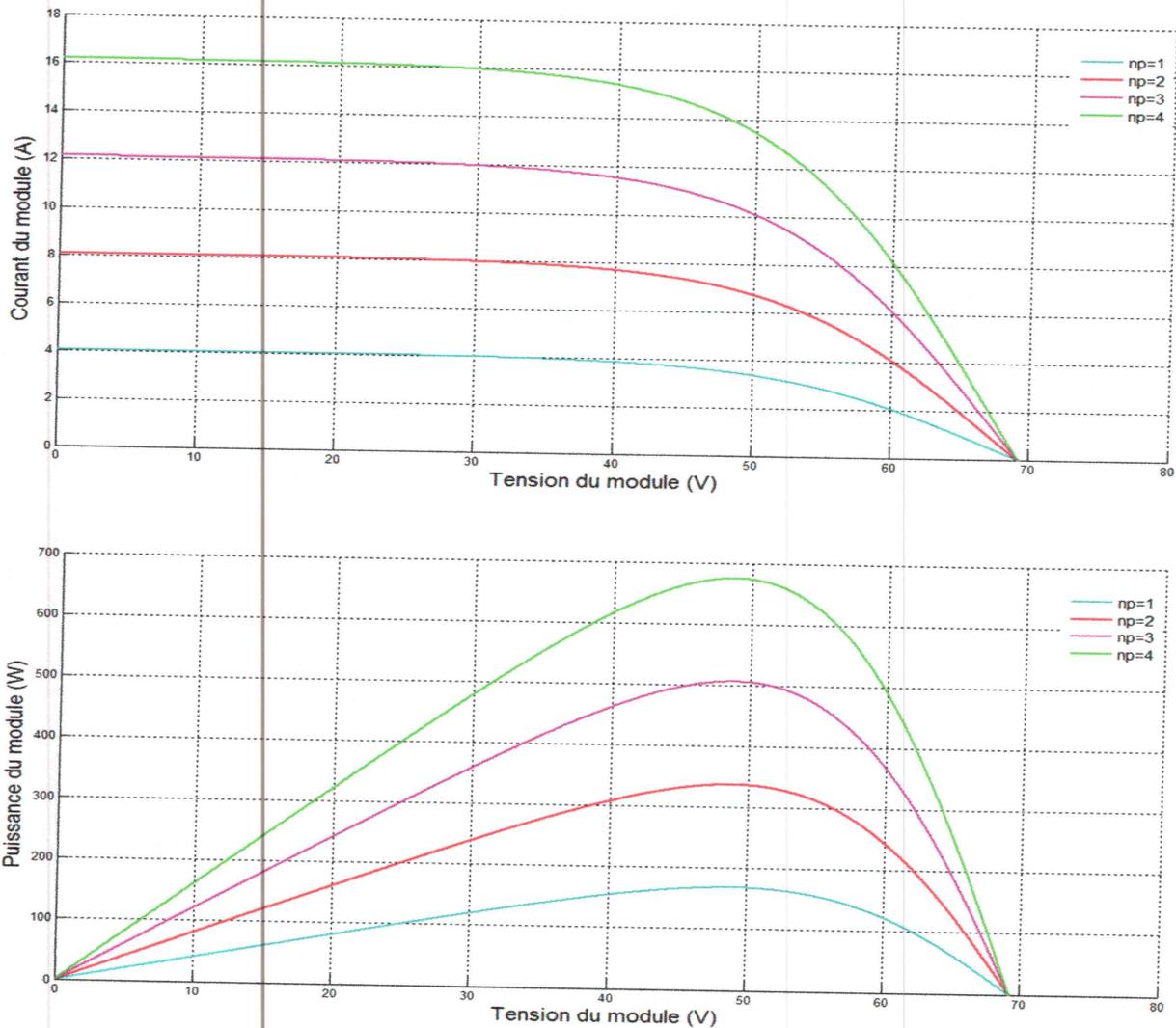


Figure I.21 : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un groupement de n_p modules en parallèle

III.2.3- Association mixte (Série - Parallèle) :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle. La figure (I.22) représente l'association mixte des modules.

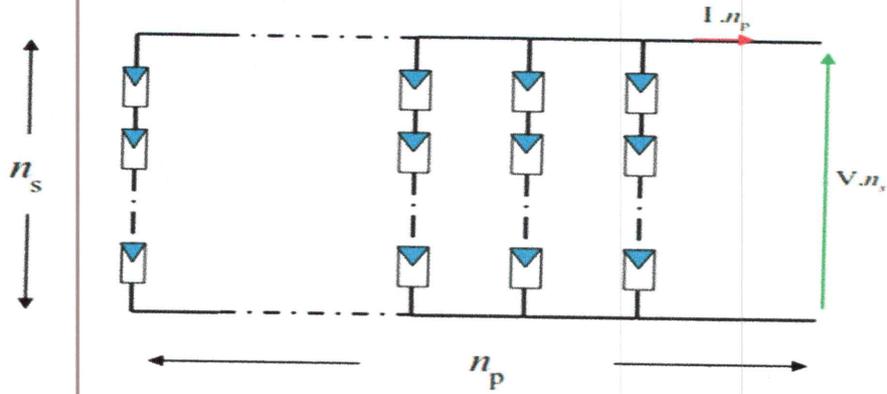


Figure I.22 : Association mixte de $n_s * n_p$ modules photovoltaïques

La caractéristique d'un groupement de $n_s * n_p$ modules solaires en Série-Parallèle est représentée par la figure (I.23) :

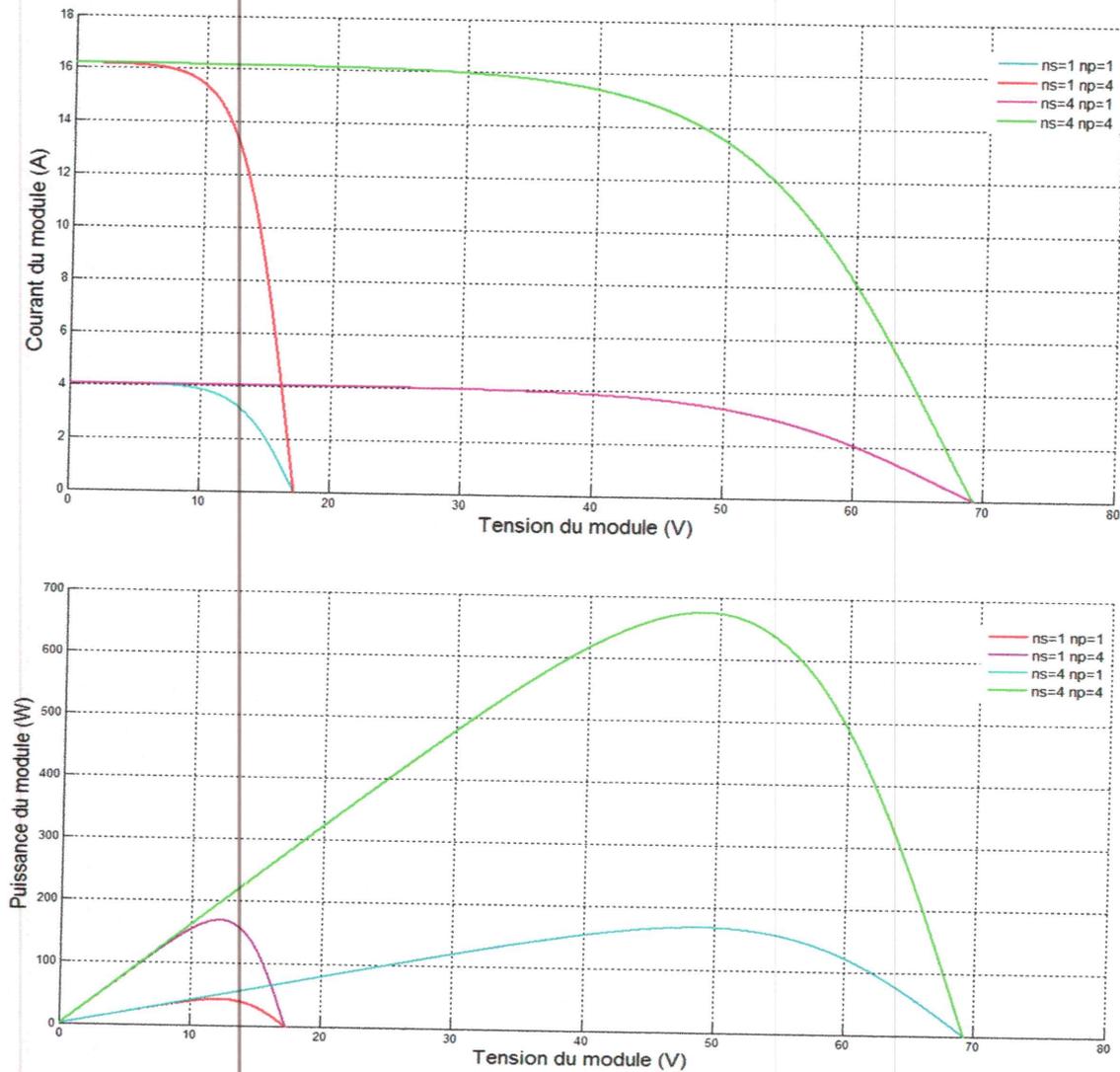


Figure I.23 : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un groupement mixte de $n_s * n_p$ modules

IV- Recherche du point de puissance maximal (MPPT) :

Si les valeurs des paramètres du modèle mathématique du panneau sont connues, alors le courant et la tension du panneau peuvent être calculés à partir des mesures de l'ensoleillement et de la température. La tension V_{mpp} peut être directement calculée et Choisie comme tension de fonctionnement du panneau. Un tel algorithme est appelé algorithme MPPT basé sur le modèle. [16]

Bien qu'intéressant, cet algorithme n'est généralement pas pratique, car les paramètres ne sont pas connus avec certitudes et peuvent varier considérablement d'un panneau à un autre du Même fabricant. de plus, le coût d'un capteur de lumière précis (pyromètre), fait que cette Méthode n'est pas réalisable.

IV.1. Philosophie de la MPPT :

Les modules photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracker) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des modules. Nous avons vu dans la présentation des modules la caractéristique d'une cellule, et l'évolution de cette caractéristique en fonction de l'éclairement ou de la température.

Le terme MPPT signifie : Poursuite du Point de Puissance Maximale. Il s'agit, par un moyen (à trouver), de venir se placer sur le point maximum de la caractéristique en puissance et de pouvoir y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre.

Pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et produire la puissance maximale, le (MPPT) a été développée depuis 1968, ces genres de contrôleurs forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP) induisant une amélioration du rendement du système [7].

La stratégie de recherche du point de puissance maximale est celle représentée sur la figure (I.24).

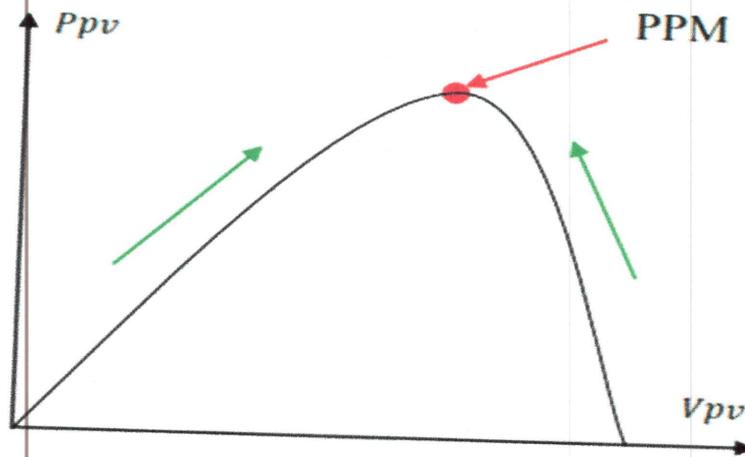


Figure 1.24 : Principe de la recherche du point de puissance maximale

IV.2. Différentes méthodes de la MPPT :

Il y'a plusieurs méthodes de recherche du PPM. Ces méthodes varient selon leur complexité, leur vitesse de convergence, leur coût, le nombre de capteurs nécessaires, le type d'implémentation (analogique ou numérique) ainsi que leur degré d'efficacité. [11]

Parmi ces méthodes on cite la méthode de conductance incrémentale, la méthode de perturbation et observation, la méthode à contre réaction de courant, les méthodes à base d'intelligence artificielle...etc. [11]

IV.2.1- Méthode de Perturbation et Observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPP parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température [17].

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

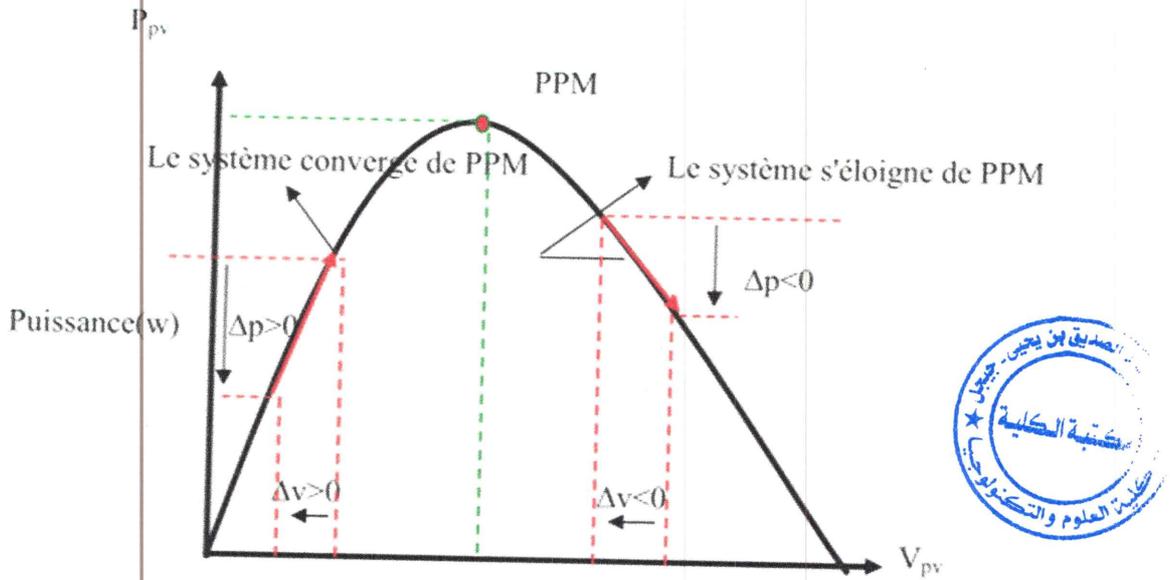


Figure I.25: Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

La figure (I.26) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

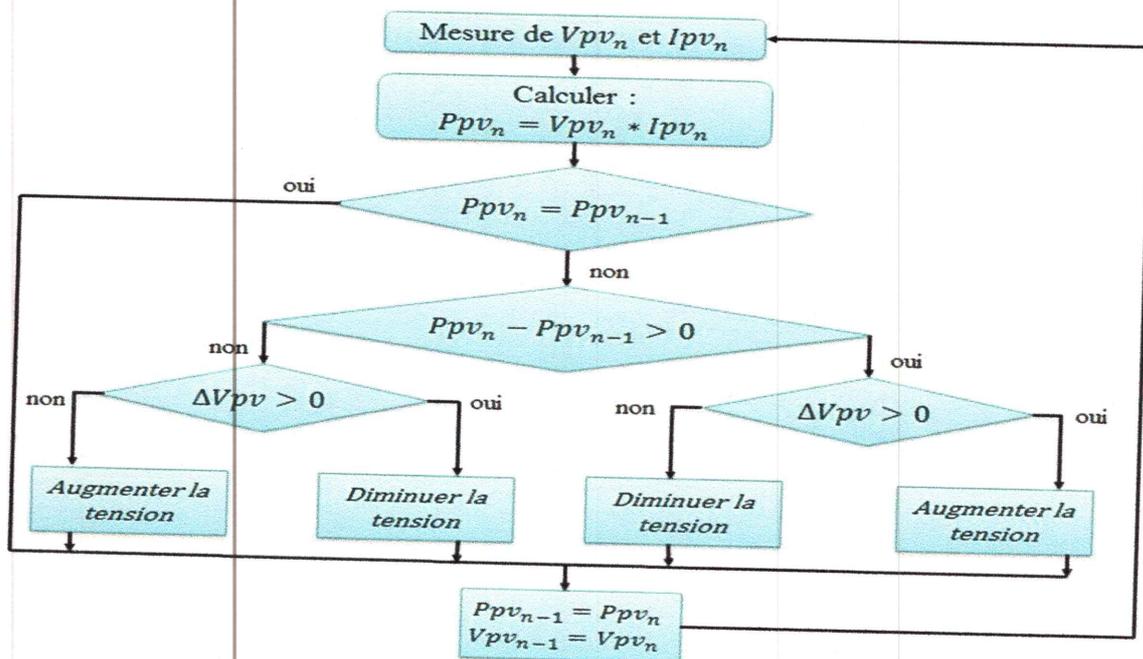


Figure I.26 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

Telle que :

Ppv_n : La nouvelle puissance.

Ppv_{n-1} : L'ancienne puissance.

$$\Delta v = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} \quad (I.15)$$

$$\Delta p = P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}} \quad (I.16)$$

La méthode P&O est largement utilisée de part sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. [18]

IV.2.2-Méthode de conductance incrémentale :

Dans cet algorithme, la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI . Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du MPP et négative à droite [13].

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimée par :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \quad (I.17)$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension P_{pv} :

$$\frac{1}{V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (I.18)$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (I.19)$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (I.20)$$

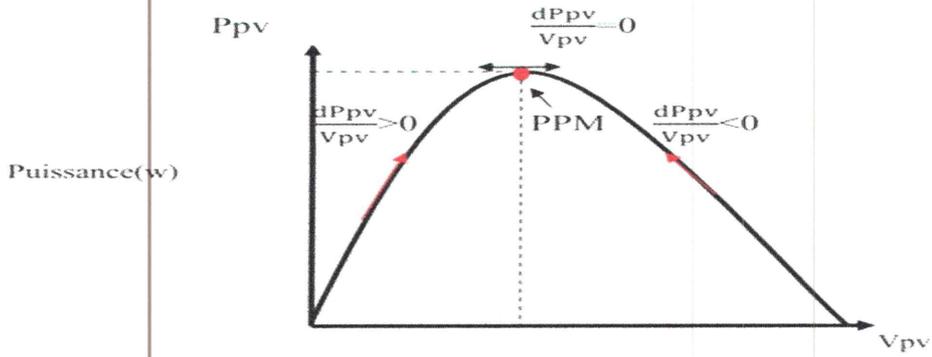


Figure I.27 : Trajectoire de convergence par Incrémentation de la Conductance.

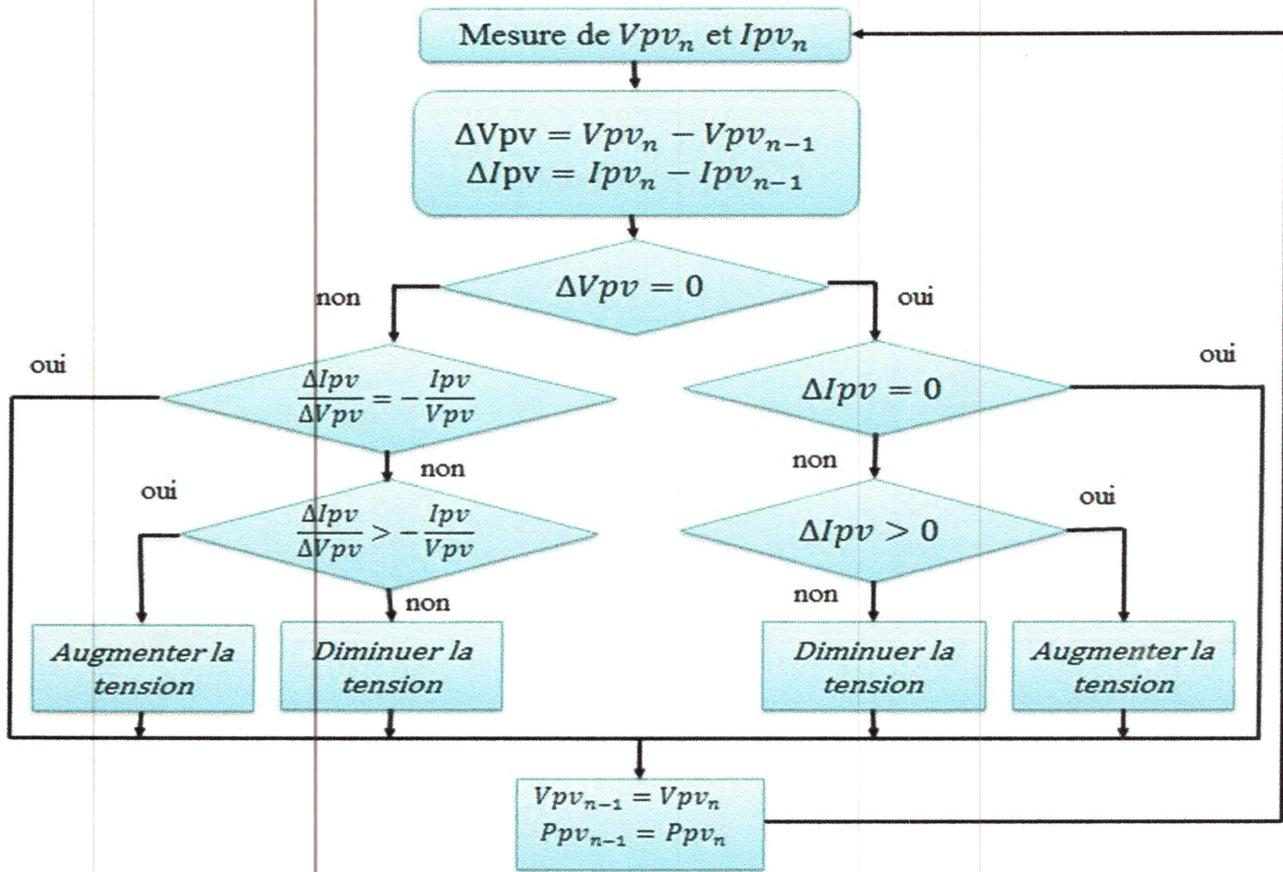


Figure I.28 : Algorithme d'incrément de la conductance.

On peut écrire aussi:

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$: Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$: Le point de fonctionnement est sur le PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$: Le point de fonctionnement est droit du PPM.

V. Les différents types de systèmes photovoltaïques :

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en deux grandes catégories : les systèmes autonomes (non connectés au réseau) et les systèmes couplés au réseau. [19]

V.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes :

V.1.1- Le mode autonome :

Les systèmes photovoltaïques à alimentation autonome n'ont pas un raccordement à un réseau électrique. Afin d'assurer l'approvisionnement en courant électrique notamment dans les temps sans rayonnement (par exemple pendant la nuit) ou avec le rayonnement très bas (par exemple, dans les cas de forte nébulosité), les systèmes autonomes ont la plupart du temps un système de stockage. Si ces systèmes sont employés seulement pendant le moment où le rayonnement est suffisant pour fournir le courant électrique directement, un système de stockage n'est pas nécessaire.

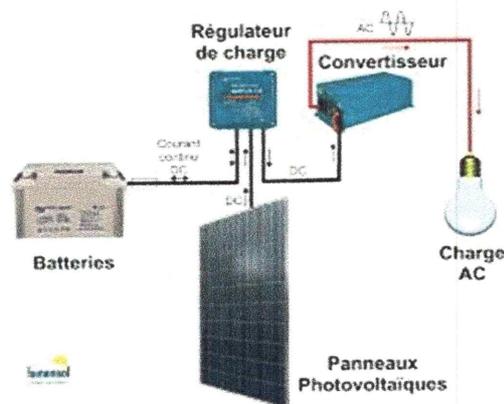


Fig. I.29. Système autonome.

V.1.2- Les modes hybrides :

Les systèmes hybrides (Fig. I.30), qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a

pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si vous désirez diminuer votre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

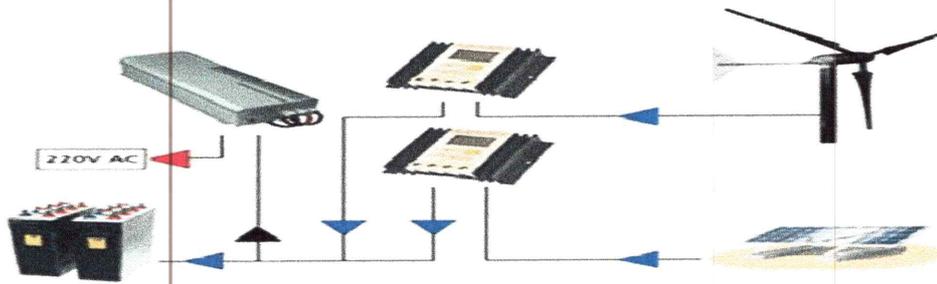


Figure I.30 : Système hybride. [20]

V.2- Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :

Ce système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu-Courant Alternatif (CC-CA) étant donné que l'énergie est normalement injecté dans le réseau même. Il existe deux types d'installations pour l'injection de la production solaire : [20]

- **Injection de la totalité de la production :** L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.
- **Injection du surplus de production :** L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

Les installations photovoltaïques couplées au réseau ont cependant deux inconvénients majeurs :

- ❖ L'intermittence de la production d'énergie solaire ne permet pas le contrôle des périodes d'injections.
- ❖ Le déphasage entre la production et la consommation réduit la notion d'autonomie énergétique personnelle.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons brièvement décrit les cellules solaires les plus couramment utilisées; les avantages et les inconvénients de chaque type ont été mentionnés. La modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes caractéristiques de celle-ci ont été détaillées.

On a présenté aussi la commande MPPT pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié quelques méthodes MPPT, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

Nous avons ensuite présenté les deux grandes familles des systèmes solaires photovoltaïques, à savoir les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau.

Chapitre II
Modélisation et simulation
d'un système PV connecté au
réseau

Introduction :

Les systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique deviennent 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.

Les composants principaux d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique incluent un arrangement avec raccordement en série parallèle des panneaux photovoltaïques disponibles et d'un système de commande de puissance responsable pour poursuivre et transférer correctement la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque au réseau, et un onduleur pour convertir la tension continue du panneau en alternative.

Dans ce chapitre, une étude descriptive détaillée d'un système photovoltaïque connecté au réseau est proposée et présentée. Après une présentation des généralités sur un système relié au réseau. on présente son modélisation mathématique et simulation, ainsi que les méthodes de recherche du point de puissance maximale.

I- Généralités sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique :**I.1- Classification de centrales photovoltaïques connectées au réseau :****I.1.1- Centrale de petite taille :**

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parking. Elles se connectent au réseau basse tension. [22]

I.1.2- Centrale de moyenne taille :

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. [22]

I.1.3- Centrale de grande taille :

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. [22]

II- Description générale des centrales photovoltaïques connectées au réseau :

Les centrales photovoltaïques connectées au réseau électrique conventionnel sont généralement installées à proximité du lieu de consommation et intégrées dans l'architecture en plus ou moins grande partie sur l'édifice de consommation. Elles fonctionnent « au fil du jour ». Leur fonctionnement est particulièrement optimisé du fait des exigences imposées par les caractéristiques techniques de la connexion au réseau de distribution électrique. [22]

On distingue deux types de structure des systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

II.1- Systèmes à connexion directe au réseau :

La figure (II.1) montre un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur, au réseau électrique :

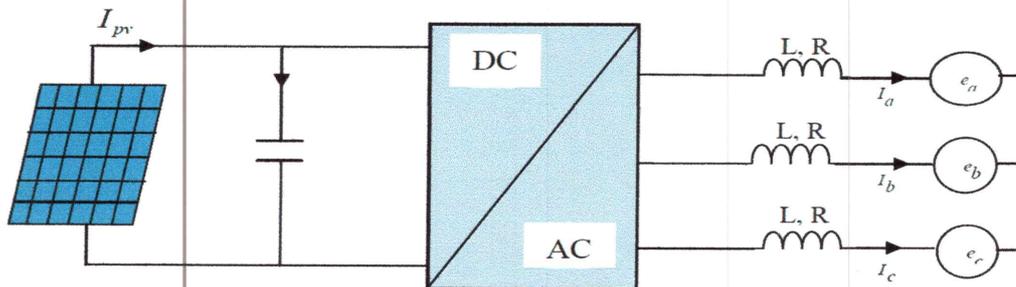


Figure II.1 : Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau.

C'est la structure que nous allons étudier dans ce travail.

II.2- Systèmes avec hacheur :

Ce type de systèmes est constitué essentiellement d'un hacheur à la sortie du panneau et un onduleur au côté réseau pour convertir la tension continu en alternatif.

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Il y'a trois type de hacheurs pour les systèmes photovoltaïques : hacheur dévolteur (buck), hacheur survolteur (Boost), et hacheur dévolteur survolteur (buck-boost).

Dans les systèmes photovoltaïques, les hacheurs jouent un rôle important : ils permettent de contrôler le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques.

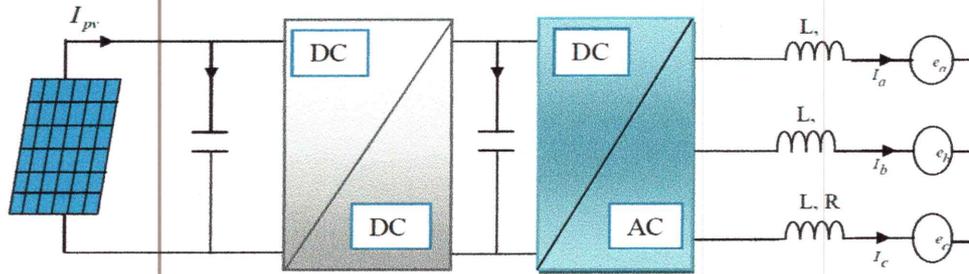


Figure II.2 : Générateur photovoltaïque relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur

II.3- Composants des centrales photovoltaïques connectées au réseau :

II.3.1- Onduleur :

L'onduleur d'une CPCRC a pour rôle principal la conversion de la puissance continue en puissance alternative en synchronisation avec le réseau, auquel on peut ajouter quelques fonctions supplémentaires de contrôle nécessaires au fonctionnement de l'ensemble de la centrale connectée au réseau qui seront :

- suivi du point de puissance maximale du générateur PV.
- connexion et déconnexion du réseau en fonction des conditions de celui-ci et du rayonnement incident sur le générateur.
- détection des pertes d'isolement.
- mesure d'énergie, etc.. [22]

Les types d'onduleurs connectés au réseau pour les systèmes photovoltaïques sont : [14]

II.3.1.1- Onduleurs modulaires ou module photovoltaïque AC :

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour des installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module correspondant, très souvent sous le module. [22]

II.3.1.2- Onduleurs centralisés :

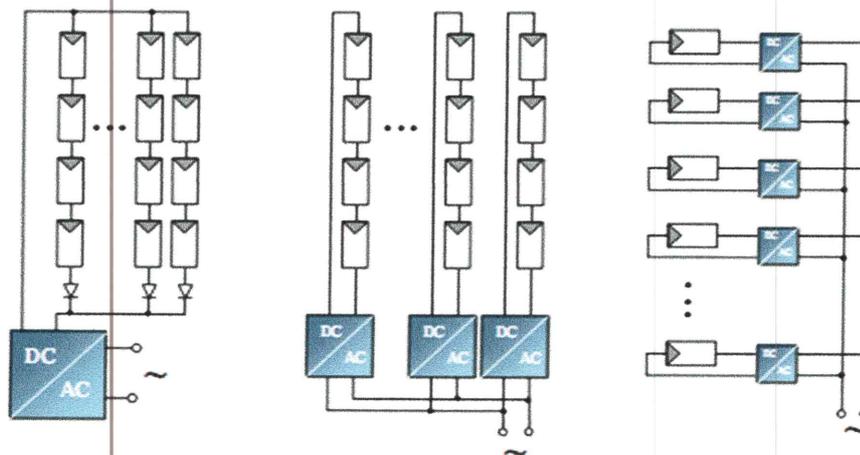
Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de modules en courant alternatif. Le champ PV est en règle générale, constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules

connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série. [22]

II.3.1.3- Onduleur "String " ou "de branche" :

C'est l'onduleur le plus utilisé. Un certain nombre de modules sont connectés en série, pour chacune des séries de ce genre est connecté un seul onduleur. C'est ainsi qu'en cas d'ombrage partiel des modules, il n'y a de perte que pour la rangée ombragée. L'emploi de diodes by-pass est nécessaire. On peut utiliser un seul et même onduleur string pour des installations jusqu'à 3 kW de puissance. Pour des puissances plus importantes, il est parfaitement 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 le coût de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, la production de la seule rangée concernée est défaillante.



a) Onduleur central b) Onduleur string c) Onduleur intégré au PV

Figure II.3. Différents types d'onduleurs couplés au réseau.

II.3.2- Générateur photovoltaïque :

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ PV.

Le générateur PV se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

II.3.3- 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 fourni 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 maximale (I_m et V_m). [22]

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont : [9]

- . Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- . Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- . Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- . Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

II.3.4- Bus continu :

Le condensateur d'entrée de l'onduleur a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable.

Il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension dues aux commutations. Il assure ainsi un écoulement homogène du courant du générateur PV vers le réseau en maintenant la tension constante.

Les condensateurs électrolytiques (électrochimiques) aluminium sont utilisés dans des applications en courant continu ou à très basses fréquences et sont ceux généralement rencontrés dans les systèmes PV. Ils présentent des valeurs de capacité importantes et une faible résistance série. [23]

II.4- Modélisation et simulation des composants du système photovoltaïque

Connecté au réseau :

La structure complète du générateur photovoltaïque connecté au réseau que nous proposons pour l'étude et la simulation est présentée sur la figure (II.4).

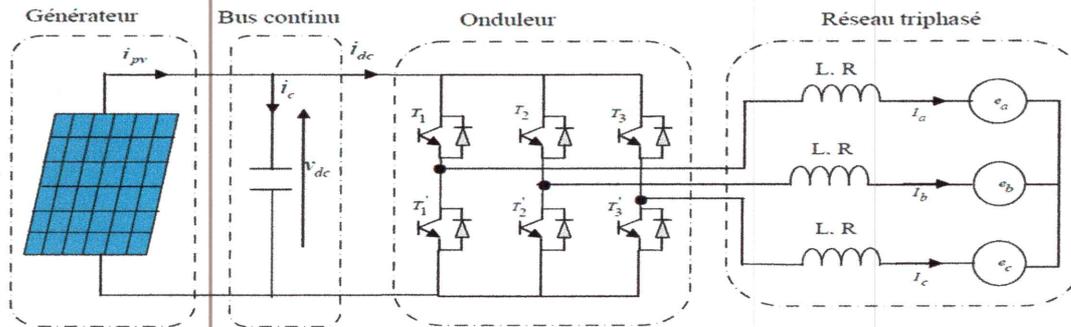


Figure II.4. Système photovoltaïque connecté au réseau (non autonome).

II.4.1- Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

II.4.1.1- Modélisation du GPV :

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_p caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (II.5) :

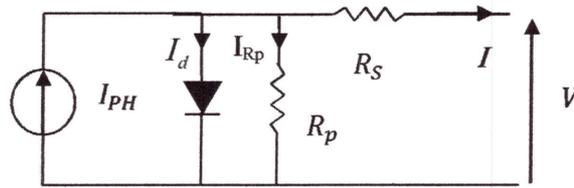


Figure II.5 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc (Figure II.6) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrée qui sont [24] : l'ensoleillement dans le plan des panneaux E (W/m²), température T (°C) de jonction des cellules et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV I (A), et tension aux bornes du GPV V (V).

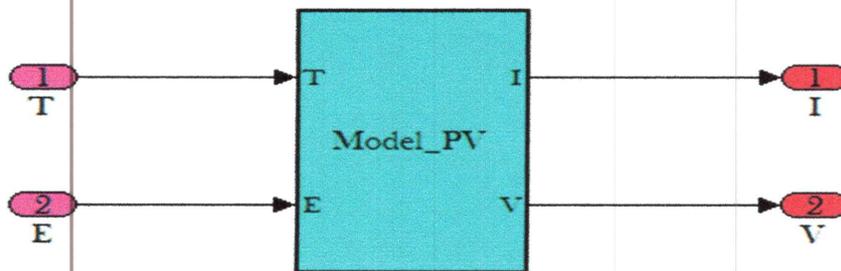


Figure II.6 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant-tension.

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

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

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

$$I_{module} = I_{ph} - I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{module} + N_s \cdot R_s \cdot I}{N_s \cdot nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{module} + R_s \cdot I}{R_p} \tag{II.2}$$

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

$$V_{pv} = n_s \cdot V_{module} \tag{II.3}$$

$$I_{pv} = n_p \cdot I_{module} \tag{II.4}$$

II.4.1.2- Simulation du générateur PV :

Le schéma du générateur photovoltaïque dans l'environnement Matlab-Simulink est représenté par figure (II.7) :

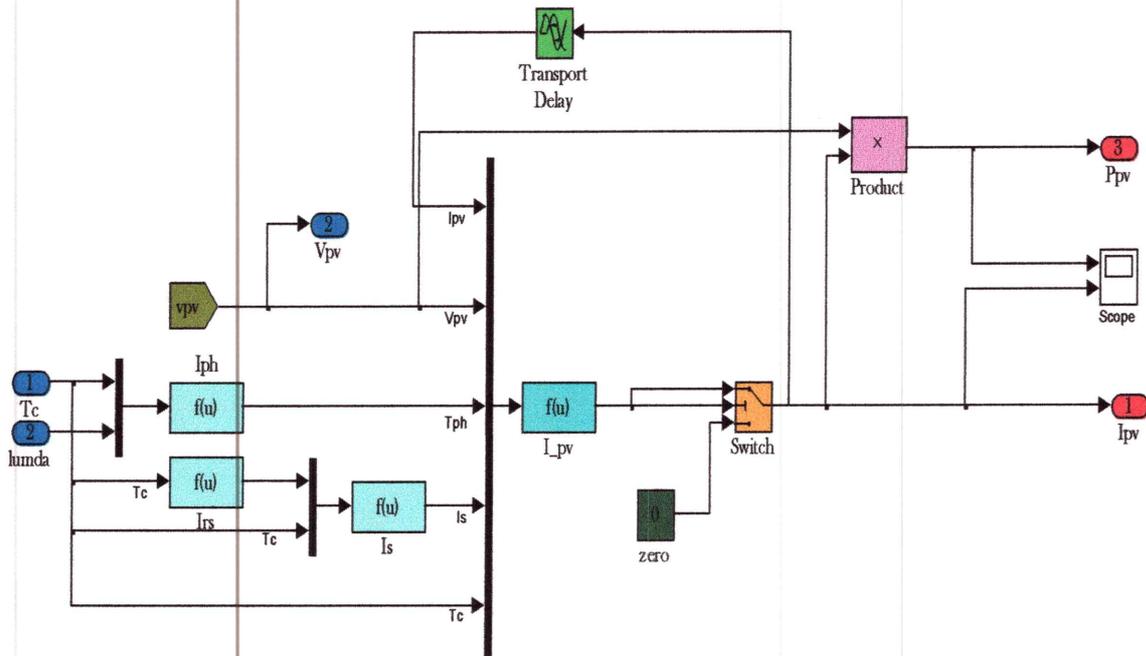


Figure (II.7) : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque sont représentés par les figures (II.8) à (II.11). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclairnements.

La figure (II.8) ci-dessous montre que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (II.9) que l'augmentation de la température se traduit

aussi par une diminution de la puissance maximale disponible. Les figures (II.10) et (II.11) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

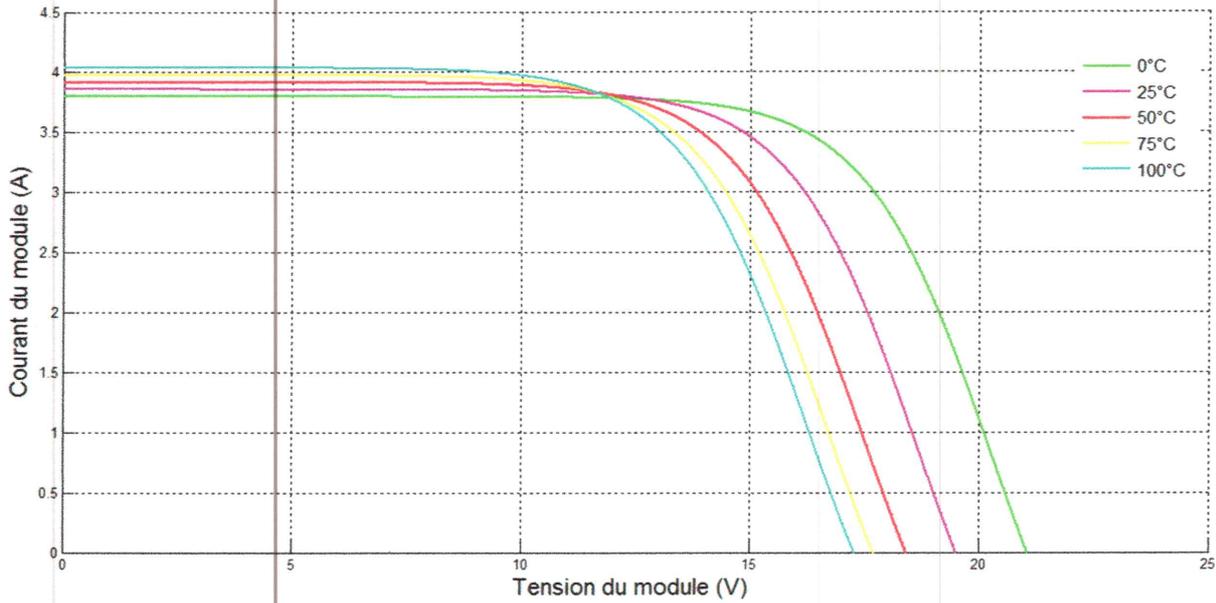


Figure.II.8 : Caractéristiques Courant-Tension, du champ PV à $E=1000W/m^2$.

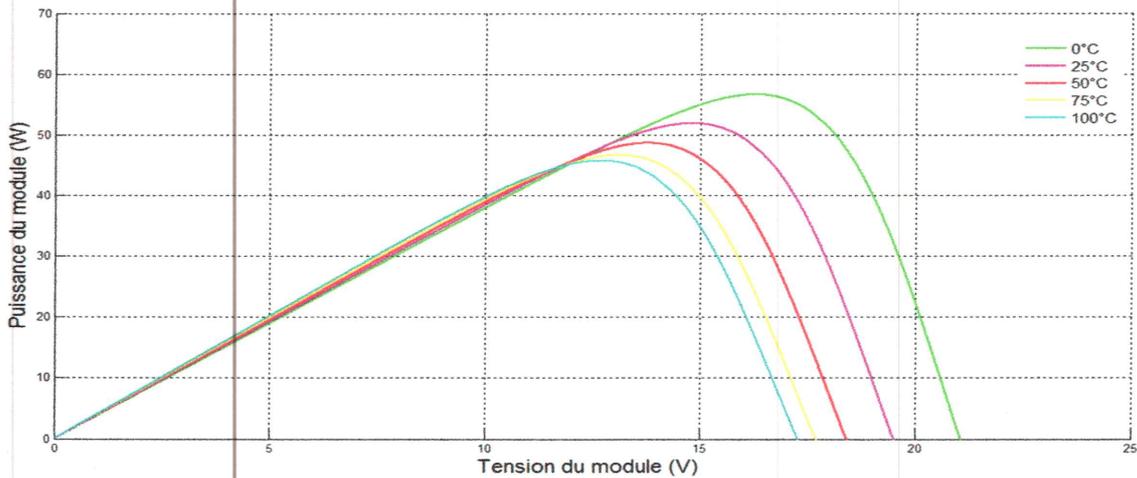


Figure II.9 : Caractéristiques puissance tension du champ PV à $E=1000 W/m^2$.

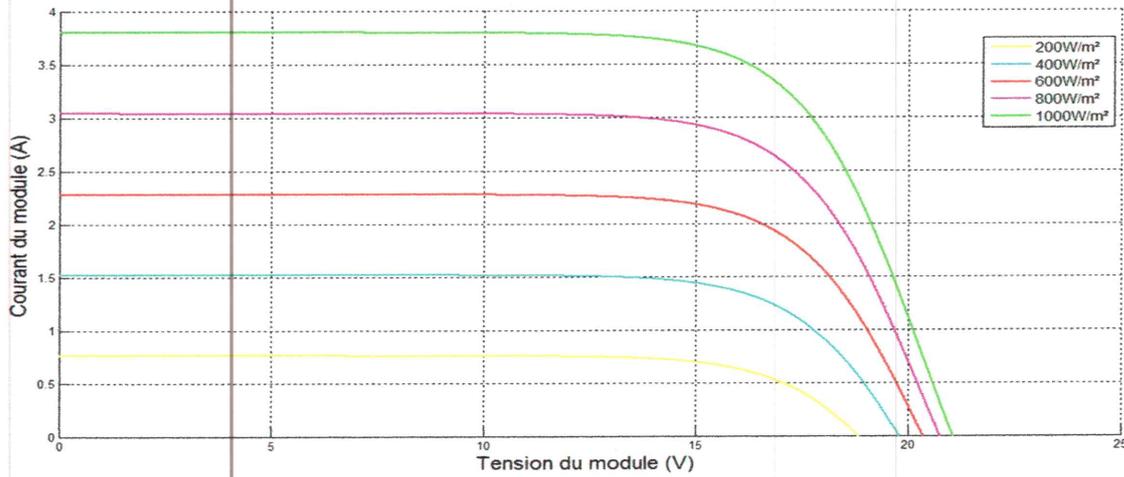


Figure II.10 : Caractéristiques courant-tension du champ PV à T=25°C.

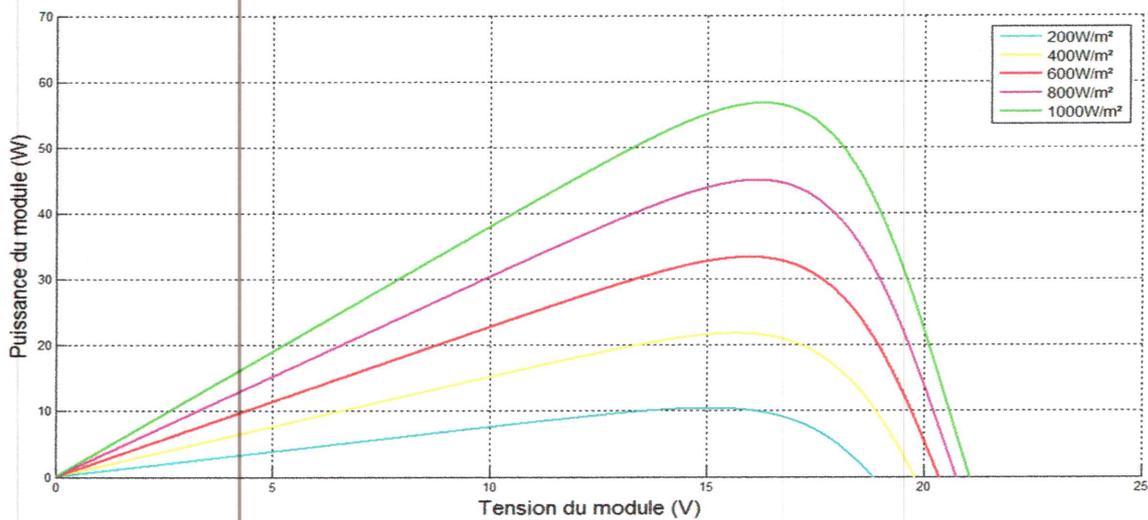


Figure II.11. Caractéristiques puissance-tension du champ PV à T=25°C.

II.4.2- Modélisation et simulation de L'onduleur à deux niveaux :

II.4.2- 1 Modélisation de L'onduleur triphasé a deux niveaux :

a)- Modèle de l'onduleur triphasé :

Habituellement, les systèmes photovoltaïques reliés au réseau ont deux-étapes ou phases de conversion : La première phase est un convertisseur continu-continu qui assure la poursuite de MPP, et la deuxième phase est un convertisseur continu alternatif. Si la commande de PPM est déplacée vers le convertisseur continu alternatif, on peut supprimer le convertisseur continu-continu du système, ayant pour résultat la croissance de la simplicité, l'augmentation de l'efficacité globale et la réduction des coûts du montage [25].

L'onduleur triphasé à deux niveaux a pour but de convertir la tension continue à la sortie des panneaux en tension alternative afin d'alimenter le réseau triphasé .Cet onduleur est commandé en modulation de largeur d'impulsions.

Les états de commutation de l'onduleur sont définit par les fonctions logiques suivantes.

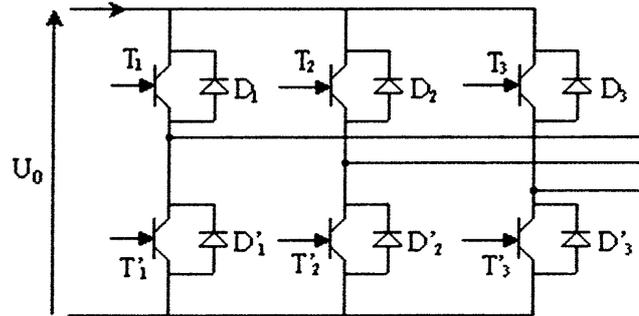


Figure II.12 : Schéma de l'onduleur de tension.

$$\begin{aligned}
 F_a &= \begin{cases} 0 & \text{si } T_1 \text{ conduit et } T_1' \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T_1' \text{ conduit et } T_1 \text{ bloqué} \end{cases} \\
 F_b &= \begin{cases} 0 & \text{si } T_2 \text{ conduit et } T_2' \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T_2' \text{ conduit et } T_2 \text{ bloqué} \end{cases} \\
 F_c &= \begin{cases} 0 & \text{si } T_3 \text{ conduit et } T_3' \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T_3' \text{ conduit et } T_3 \text{ bloqué} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{II.5}$$

Avec T_i, T_i' ($i = 1, 2, 3$) : transistors des trois bras de l'onduleur, chaque bras est composé de deux interrupteurs bidirectionnelle (Figure II.12).

Les tensions des phases sont exprimées en fonction des variables logiques $F_a, F_b, \text{ et } F_c$ par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2F_a - F_b - F_c \\ 2F_b - F_a - F_c \\ 2F_c - F_a - F_b \end{pmatrix} \tag{II6}$$

v_{dc} : C'est la tension d'alimentation continue de l'onduleur, obtenue à la sortie des panneaux photovoltaïques.

Pour la génération des fonctions logiques $F_a, F_b, \text{ et } F_c$, il existe plusieurs techniques de modulation comme la modulation a hystérésis, la modulation vectorielle, et la modulation triangulo-sinusoidale.

b)- Commande en MLI de l'onduleur :

La modulation des largeurs d'impulsions (MLI) est une technique de commande qui permet d'une part de réduire les harmoniques de tension et d'autre part de contrôler son amplitude.

La MLI consiste à multiplier le nombre des commutations des interrupteurs de l'onduleur, en gardant la tension d'entrée continue fixe, et en variant les largeurs des impulsions de la tension.

Il existe plusieurs stratégies de modulation de largeur d'impulsions :

- MLI triangulo-sinusoidale,
- MLI à hystérésis,
- MLI vectorielle ... etc.

Chacune d'elle doit obéir à un algorithme bien défini, mais toutes sont conçues pour générer une source de tension la plus sinusoidale possible à la sortie de l'onduleur.

Dans notre étude, on va appliquer la modulation triangulo-sinusoidale.

Le principe de cette stratégie consiste à comparer trois tensions de référence sinusoidales avec un signal triangulaire nommé « porteuse ». Les instants de commutations des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par l'intersection entre la porteuse et les signaux de référence.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

-l'indice de modulation « m » qui est le rapport entre la fréquence « F_p » de la porteuse et la fréquence « F » de la tension de référence $m = F_p / F$.

-Le taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude « V_m » de la tension de référence à l'amplitude « U_{pm} » de la porteuse $r = V_m / U_{pm}$.

Les tensions de référence sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{ref3} = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (II.7)$$

Les signaux de commande des interrupteurs sont générés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} (|V_{refk}| < |V_p|) &\Rightarrow F_k = 1 \\ (|V_{refk}| > |V_p|) &\Rightarrow F_k = 0 \end{aligned}, \quad k = 1, 2, 3. \quad (II.8)$$

A l'aide de l'outil Matlab/Simulink, on simule l'onduleur triphasé.

Les paramètres de la commande MLI :

L'indice de modulation : $m = 28$.

Le taux de modulation : $r = 0.9$.

La figure (II.13) indique la forme de la porteuse, et des tensions de référence.

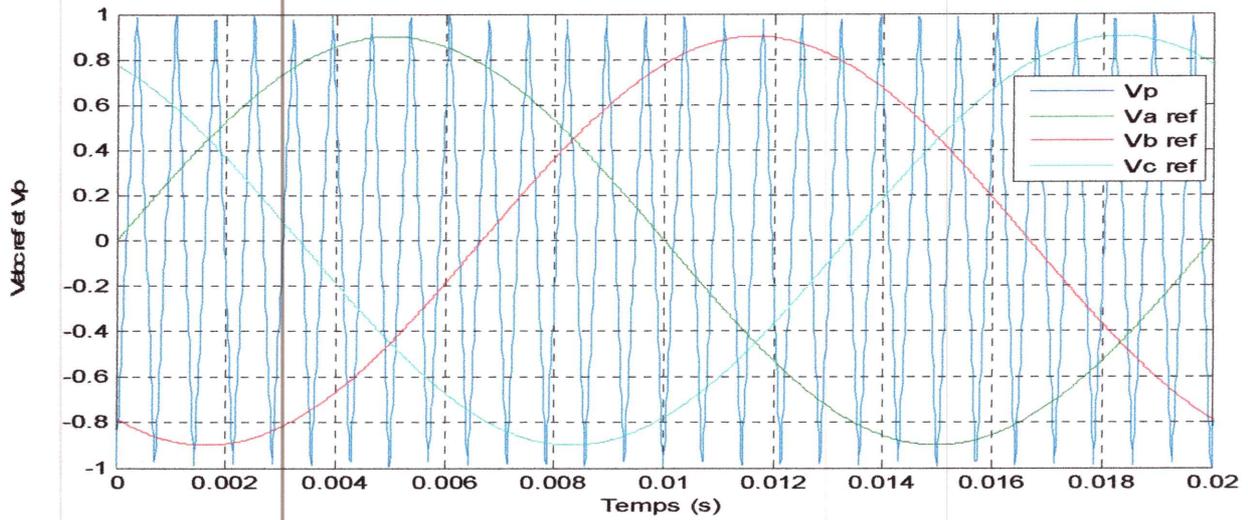


Figure II.13 : signaux de la commande triangulo-sinusoïdal.

II.4.2.2- Simulation de la commande en MLI de l'onduleur triphasé deux niveaux :

La figure (II.14) représente le schéma block d'un onduleur triphasé deux niveaux :

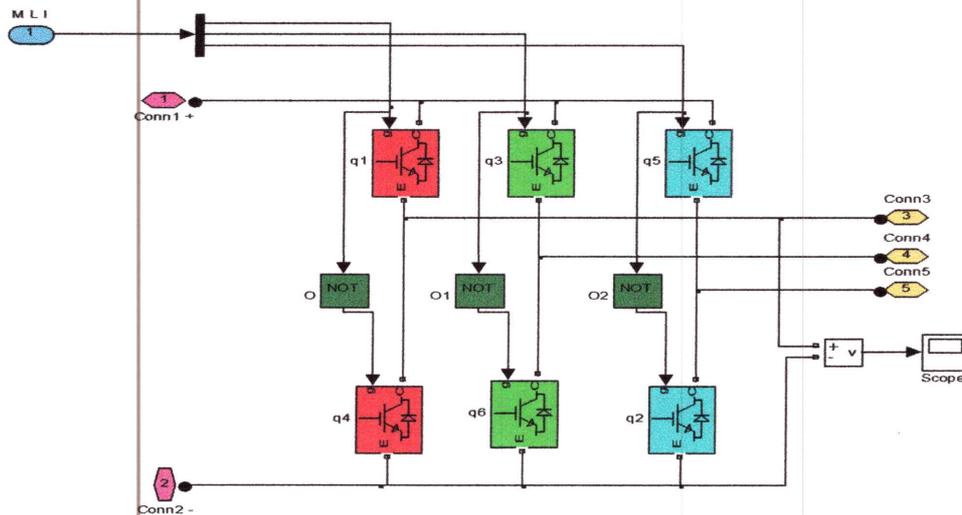


Figure II.14 : Schéma bloc de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

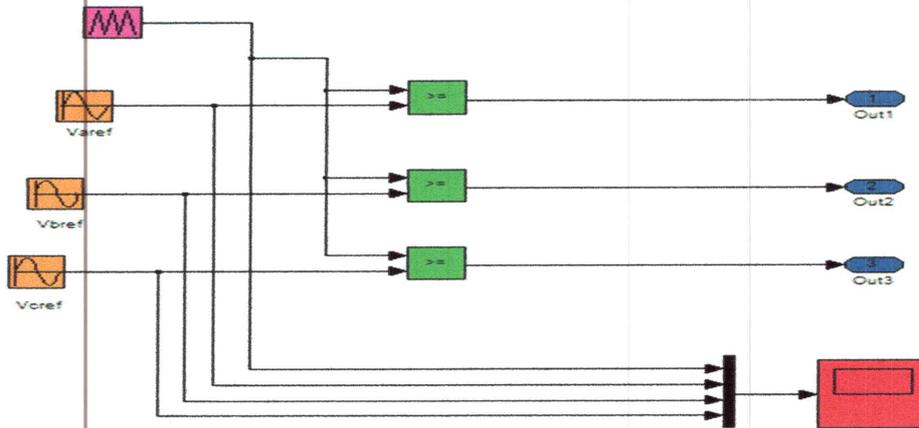


Figure II.15 : Schéma bloc de la MLI triangulo-sinusoidale.

II.4.3- Structure et simulation de la commande MPPT :

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge.

Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [24].

La méthode d'incrément de l'inductance est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. 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 II.16). [11]

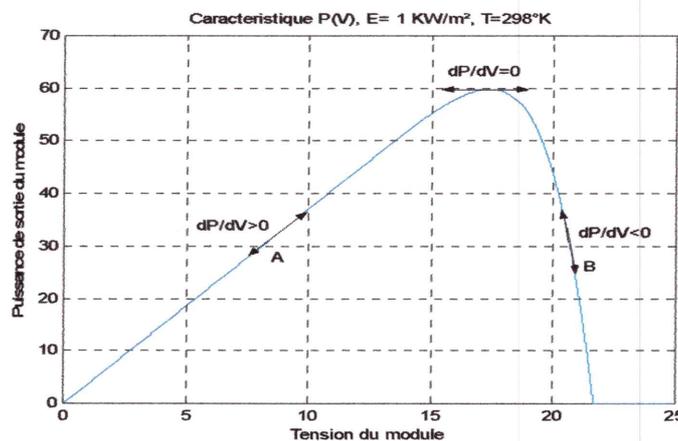


Figure II.16 : Caractéristique P(V) du module PV (1KW/m², 298 K) et variation de dP/dV.

La figure (II.17) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

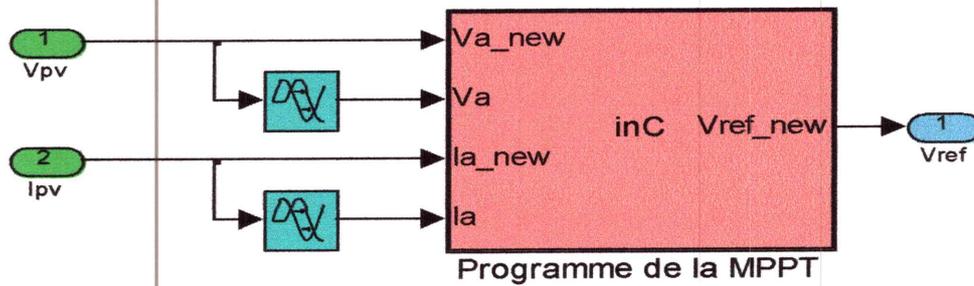


Figure (II.17) : Schéma block de la commande MPPT

II.4.4- Modélisation et simulation du réseau :

Les équations triphasées du réseau électrique lié au côté alternatif de l'onduleur à deux niveaux sont données par :

$$\begin{cases} V_a = R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = R \cdot i_b + L \cdot \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = R \cdot i_c + L \cdot \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (II.9)$$

On applique la transformation de Clarke sur l'équation (II.9)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{Ou} \quad P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

On obtient le système suivant dans le repère α - β :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

Avec :

- e_α, e_β : Les tensions biphasées de lignes de réseau.
- v_α, v_β : Les tensions biphasées à la sortie de l'onduleur.
- i_α, i_β : Les courants biphasés du réseau.

La figure(II.18) représente le schéma bloc du réseau électrique triphasé dans l'environnement matlab/Simulink.

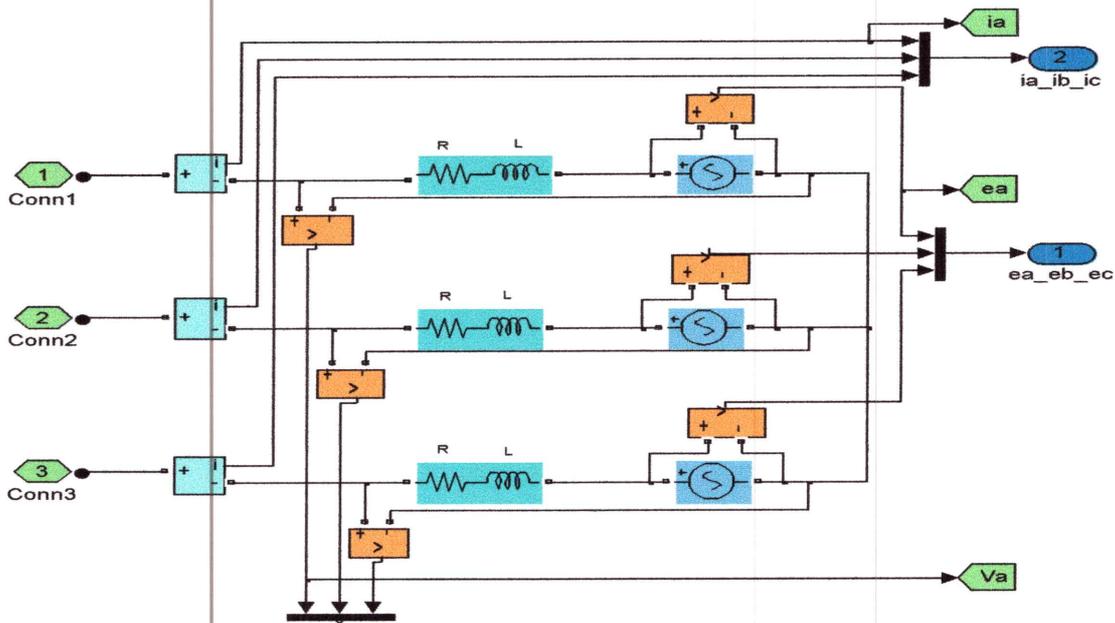


Figure II.18 : Schéma bloc du réseau triphasé.

II.4.5- Modèle d'état de l'association onduleur-réseau :

En négligeant les pertes de puissance dans les interrupteurs de l'onduleur, le principe de la conservation de la puissance entre le côté continu et le côté alternatif permet d'écrire :

$$e_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + e_{\beta} \cdot i_{\beta} = v_{dc} \cdot i_{dc} \tag{II.12}$$

En appliquant la loi de Kirchhoff au côté continu de l'onduleur, on obtient :

$$c \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{pv} - i_{dc} = i_{pv} - \frac{e_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + e_{\beta} \cdot i_{\beta}}{v_{dc}} \tag{II.13}$$

Les équations différentielles (II.11) et (II.13) forment le modèle d'état de l'onduleur connecté à la capacité d'entrée et le réseau.

On peut grouper ces équations dans la forme vectorielle suivante:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}i_\alpha - \frac{e_\beta}{L} \\ -\frac{R}{L}i_\beta - \frac{e_\alpha}{L} \\ \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta}{v_{dc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot U \quad (II.14)$$

Ou :

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'entrée.}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ v_{dc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur d'état.}$$

L'équation(II.14) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\dot{X} = f(x) + g(x) \cdot U \quad (II.15)$$

$f(x)$ et $g(x)$: sont deux champs de vecteur définis par :

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{e_q}{L} \\ \frac{i_{pv}}{c} - \frac{e_d x_1 + e_q x_2}{c x_3} \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le modèle d'état (II.14) présente une non-linéarité dans la troisième équation, due à la division des états i_α et i_β par l'état v_{dc} .

II.5- Simulation de la cascade sans application de la commande :

La figure (II.19) montre la cascade que nous allons simuler dans ce travail :

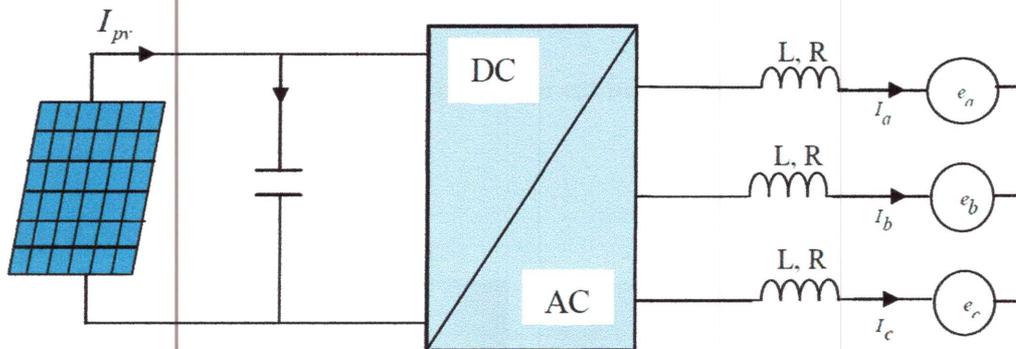


Figure II.19 : Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau

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).

Les Paramètres du module photovoltaïque MSX 60 simulé sont les suivants :

- Puissance maximale : 60 W
- Tension au point de puissance maximale : 17.1 V
- Courant au point de puissance maximale : 3.5 A
- Nombre de cellules en série (N_s): 36
- Nombre de cellules en parallèle (N_p): 1
- Résistance série (R_s): 0,21 Ω
- Courant en court-circuit (I_{cc}): 3,8 A
- Coefficient de la température du courant de court-circuit (K 1): 0,003 A/ $^{\circ}$ K
- Tension en circuit ouvert (V_{co}): 21.1 V
- Température de référence de la cellule (T_{ref}): 322 k
- Facteur de qualité (A): 1,5
- La constante de Boltzmann (K): $1,38 \cdot 10^{-23}$ j/K
- La charge d'électron (q): $1,9 \cdot 10^{-19}$ coul

Figure II.21 tension fournis par le générateur PV.

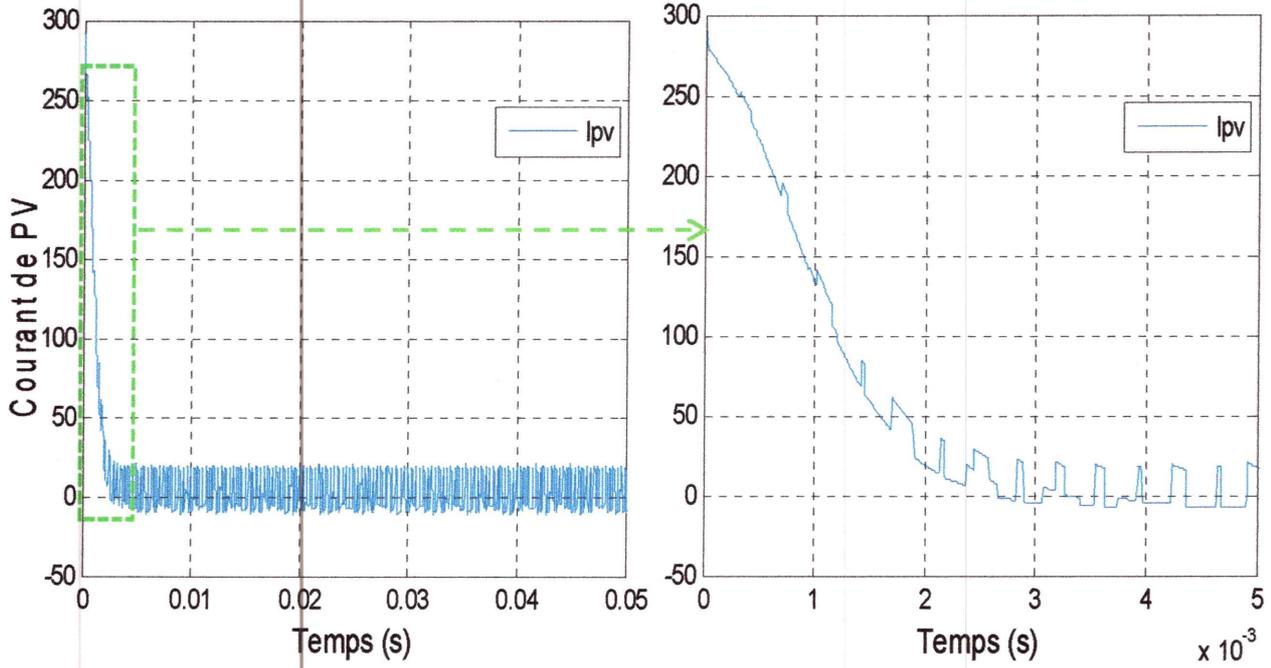


Figure II.22 courant fournis par le générateur PV.

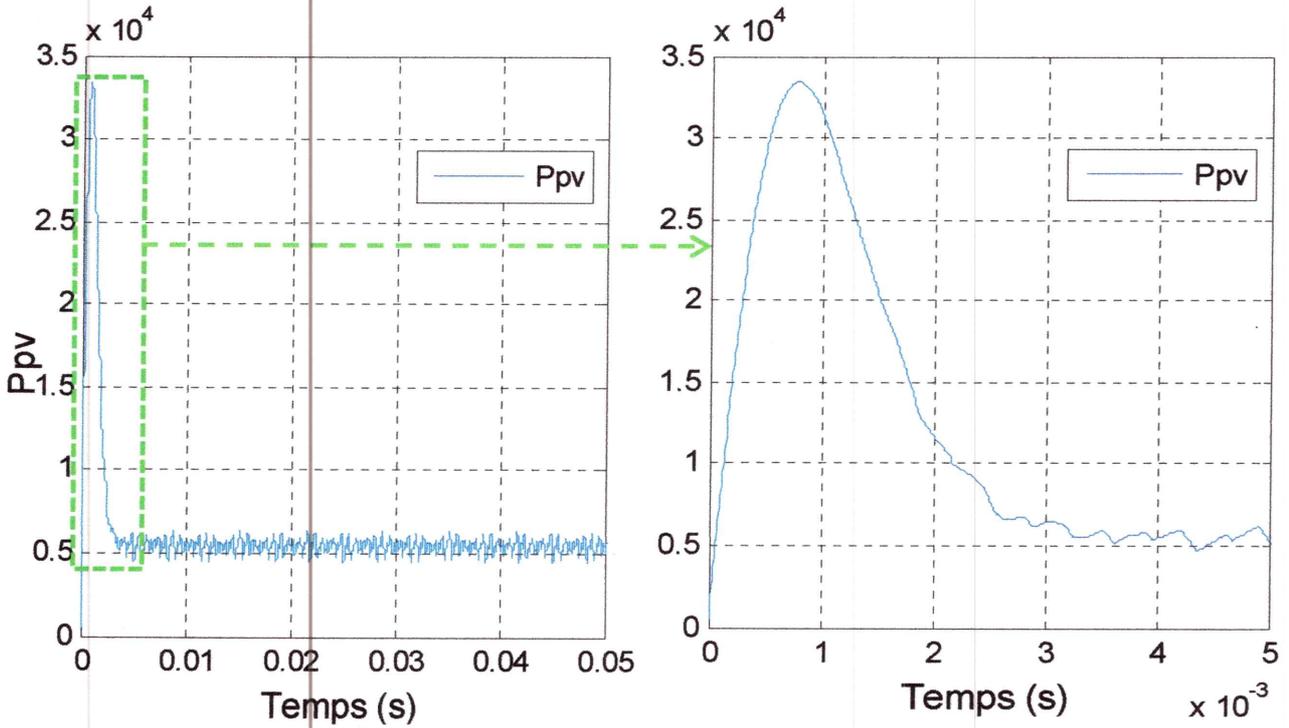


Figure II.23 La puissance fournit par le générateur PV.

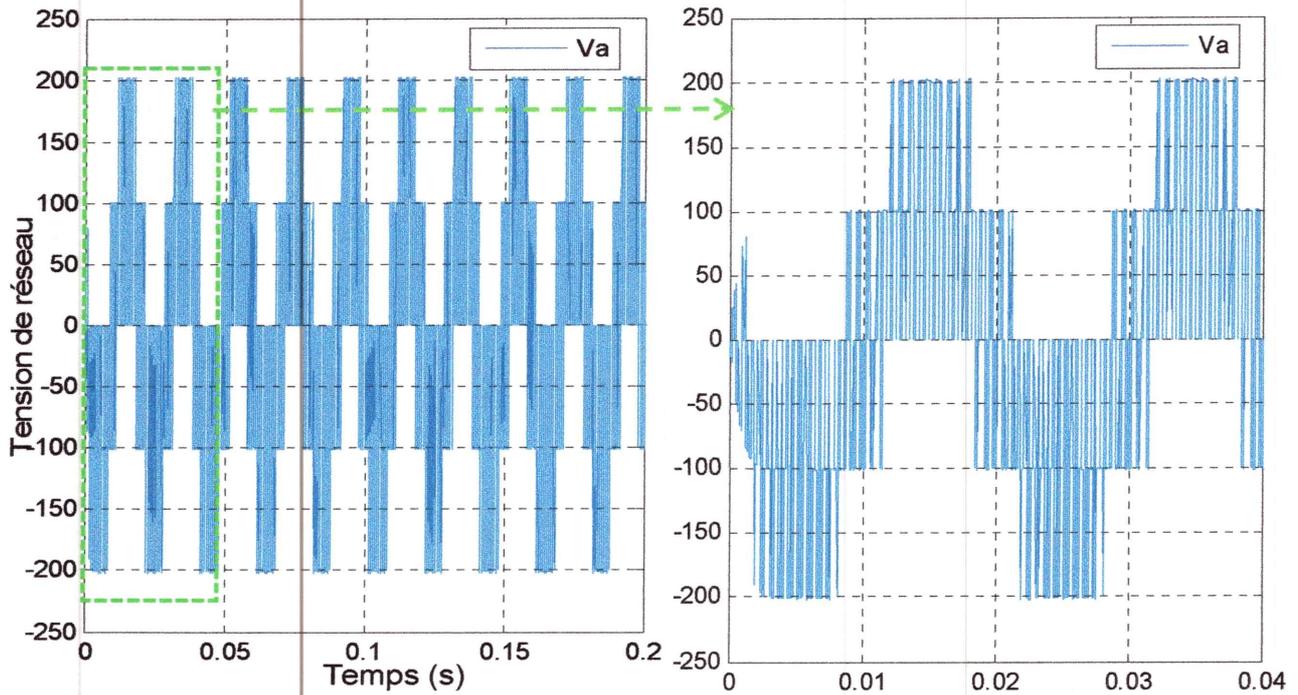


Figure II.24: Tension de sortie de l'onduleur (V_a).

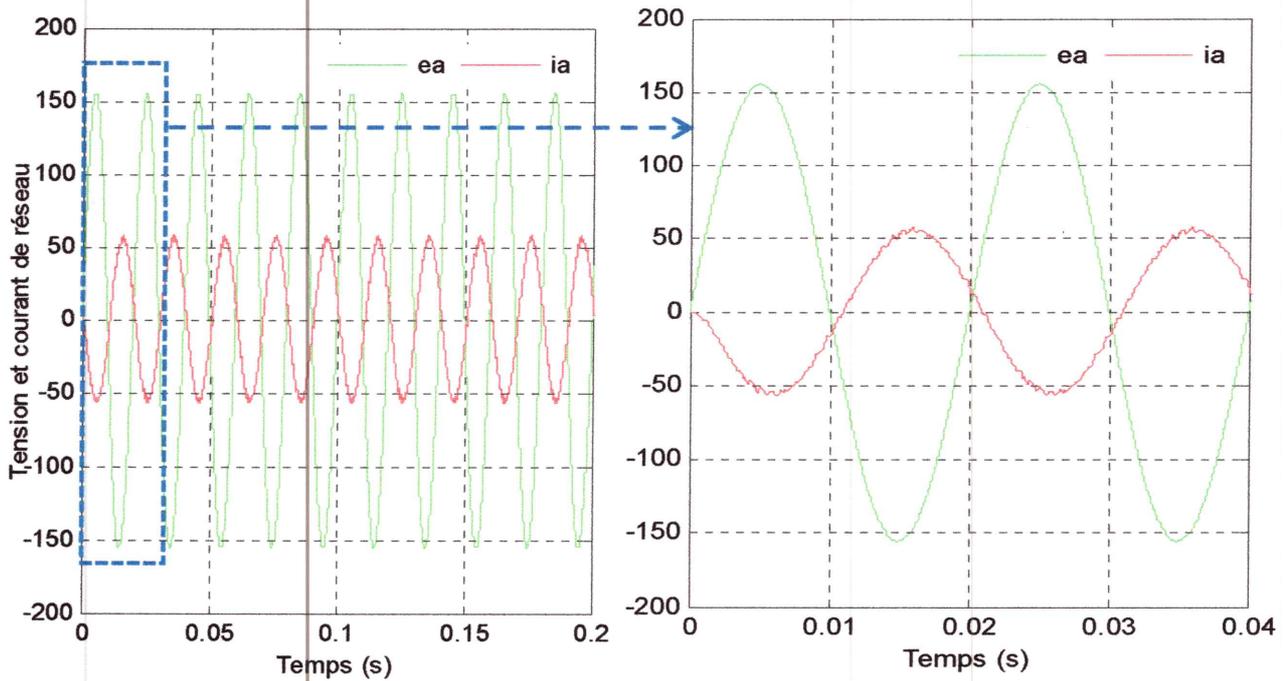


Figure II.25 Tension et courant de la phase (a) du réseau.

Les figures (II.21 et II.22 II.23) représentent la tension aux bornes du bus continu, le courant et la puissance fournis par le générateur PV. On remarque que la tension aux bornes du bus continu n'est pas stable et tend vers 300 (V), la même chose pour le courant fournis par le générateur qui tend vers 17.92 (A) et la puissance tend vers 5135 (W), le générateur donc ne fonctionne pas au point de puissance maximale (à P_{mpp} , I_{mpp} , V_{mpp}).

La figure II.25 montre bien le déphasage entre la tension et le courant de phase.

Ces résultats montrent que le générateur PV ne fonctionne pas dans le point de puissance maximale. Ainsi, il existe un déphasage entre la tension et le courant de phase du réseau.

Ces résultats montrent alors qu'on doit appliquer une commande en avant de l'onduleur pour la recherche du point de puissance maximale du générateur PV, et en aval de l'onduleur pour l'amélioration du facteur de puissance du réseau électrique.

Pour cela, nous avons choisis la commande prédictive dans ce travail pour résoudre ce problème, et c'est la commande que nous allons étudier et appliquer sur le système dans le chapitre suivant.

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 public, puis on a donné les différentes configurations des raccordements de ces centrales au réseau : raccordement direct avec onduleurs a plusieurs topologies, et raccordement par l'intermédiaire d'un hacheur qui a principalement pour but d'appliquer une commande MPPT en cascade avec un onduleur qui a pour rôle de commander le courant de sortie en plus de la conversion continu alternatif.

Ensuite on a donné la description et la modélisation et la simulation de notre système proposé, en commençant par le modèle mathématique de la cellule, en passant par la capacité d'entrée de l'onduleur et son rôle de stabilisation. On a présenté et expliquer l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale.

Par suite, on a présenté et simulé l'onduleur à deux niveaux et sa commande en MLI, et nous avons déduit le modèle d'état de la cascade.

Nous avons simulé la cascade, et nous avons bien remarqué que le générateur PV ne fonctionne pas au point de puissance maximale, et qu'il existe un déphasage entre la tension et le courant du réseau, d'où la nécessité d'une commande assurant le fonctionnement du générateur PV au point de puissance maximale tout en assurant un déphasage nul entre la tension et le courant du réseau.

Chapitre III
Commande prédictive
application et résultat

Introduction :

La commande prédictive à base de modèle (MPC, sigle Anglais correspondant à Model Predictive Control) connue aussi sous l'appellation de commande à horizon fuyant ou glissant (Receding Horizon Control or Moving Horizon Control) est apparu au début de la décennie 60, connue plus simplement comme commande prédictive, se situe parmi les commandes avancées les plus utilisées dans le milieu industriel ces dernières décennies. [29]

Au début des années 1960, Propos [30] fut l'un des premiers à proposer explicitement une forme de commande prédictive basée sur un modèle en utilisant une méthode de programmation linéaire. L'idée est d'insérer, dans l'algorithme de commande, un élément de prédiction concernant l'évolution des sorties du procédé, donnée par un modèle.

Au chapitre précédent nous avons vu la modélisation et la simulation d'un système PV connecté au réseau, les résultats de simulation ont montré le besoin et la nécessité d'application d'une commande non linéaire tel que la commande prédictive sur ce système, dans le but de régler la tension continue 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.

I- Principe de la commande prédictive :

La commande prédictive, appelée aussi compensation ou correction anticipatrice, est une technique de commande avancée. Elle a pour objectif la commande des systèmes industriels complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PI est insuffisant. Le principe de cette commande est d'utiliser un modèle dynamique du processus commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de commande à modèle interne. [31, 32]

De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

- Le Utilisation d'un modèle permettant de prédire le comportement futur des variables jusqu'à un horizon.
- Une fonction de coût qui représente le comportement souhaité du système.
- L'actionnement optimal est obtenu en minimisant la fonction de coût.

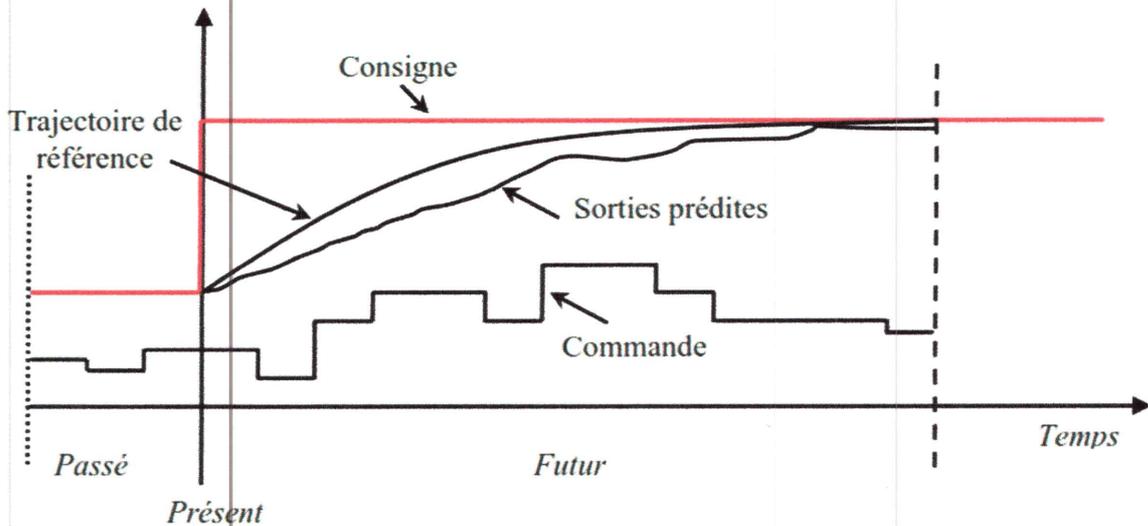


Figure III.1 : Principe de la commande prédictive à modèle interne de référence.

II- Principe de la MLI vectorielle :

Le principe de la modélisation vectorielle (SVM) consiste à reconstruire le vecteur tension V_{ref} à partir de huit vectrices tensions. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, elle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations par chacun des bras de l'onduleur [33].

Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs permet de calculer le vecteur de tension $\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix}$. Nous pouvons donc dresser un tableau, des différents états de l'onduleur. [34]

II.1- Vecteur de tension de l'onduleur :

A partir des tensions triphasé de l'onduleur V_a , V_b et V_c on déduit le vecteur de tension de l'onduleur :

$$\bar{V} = V_a e^{j0} + V_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + V_c e^{-\frac{j2\pi}{3}} \quad (\text{III.1})$$

Si on applique la transformation de Clarke on obtient :

$$\bar{V} = V_\alpha + jV_\beta \quad (\text{III.2})$$

Le vecteur \bar{V} peut prendre huit positions discrètes dans le plan $(\alpha-\beta)$ correspondantes aux états de l'onduleur.

II.2- Etats de l'onduleur :

L'onduleur triphasé à deux niveaux possède huit états possibles suivant l'état fermé ou ouvert de chaque interrupteur. Le tableau (III.1) résume la correspondance entre les états de l'onduleur, les états de commutation des interrupteurs, les tensions de phase de l'onduleur et le vecteur de sortie de l'onduleur.

\bar{V}	F_1	F_2	F_3	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_α	V_β	Vecteur \bar{V}_i
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
V_2	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot e^{j\frac{\pi}{3}}$
V_3	0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}$
V_4	0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$	0	$-\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc}$
V_5	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}$
V_6	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot e^{j\frac{5\pi}{3}}$
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau (III.1) : Etats de l'onduleur.

La figure (III.2) montre les vecteurs correspondants à chaque état de l'onduleur.

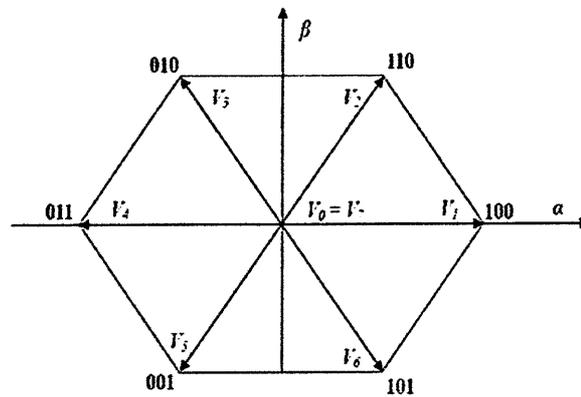


Figure III.2: Vecteurs de tension produits par l'onduleur.

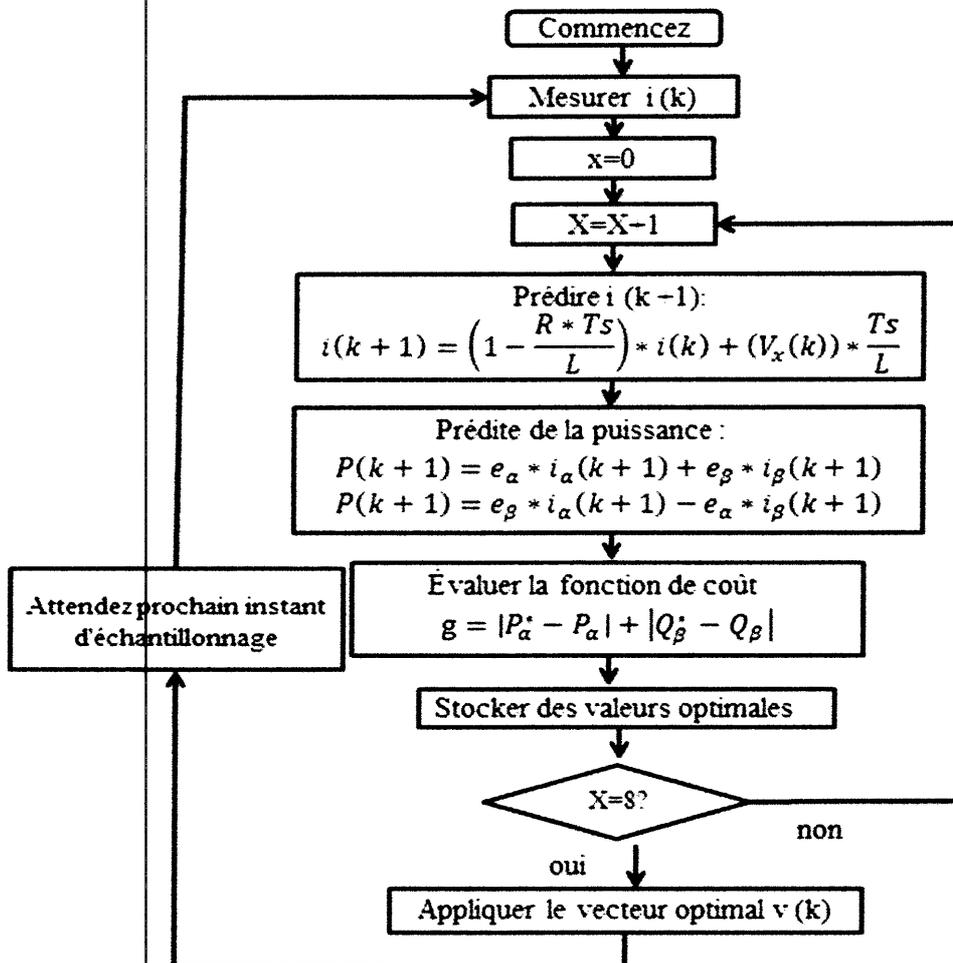


Figure III.3: organigramme de la commande prédictive de courant.

III- Application de la commande prédictive sur l'onduleur :

Les courants instantanés du réseau :

$$\frac{di_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\alpha} - \frac{e_{\alpha}}{L} + \frac{v_{\alpha}}{L} \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{di_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\beta} - \frac{e_{\beta}}{L} + \frac{v_{\beta}}{L} \quad (\text{III.4})$$

Comme la commande prédictive est une commande discrète, on utilise l'approximation d'Euler :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (\text{III.5})$$

T_s = infiniment petite.

En trouve la prédiction des courants dans le plan (α - β) :

$$i_{\alpha}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \cdot i_{\alpha}(k) + (v_{\alpha}(k) - e_{\alpha}) \cdot \frac{T_s}{L} \quad (\text{III.6})$$

$$i_{\beta}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \cdot i_{\beta}(k) + (v_{\beta}(k) - e_{\beta}) \cdot \frac{T_s}{L} \quad (\text{III.7})$$

Les expressions des puissances dans le plan (α - β) sont données par :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{\alpha} & e_{\beta} \\ e_{\beta} & -e_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Donc la puissance prédite pour chaque vecteur d'état :

$$P(k+1) = e_{\alpha} \cdot i_{\alpha}(k+1) + e_{\beta} \cdot i_{\beta}(k+1) \quad (\text{III.9})$$

$$Q(k+1) = e_{\beta} \cdot i_{\alpha}(k+1) - e_{\alpha} \cdot i_{\beta}(k+1) \quad (\text{III.10})$$

On peut définir un fonction de cout comme suit :

$$g = |P_{ref} - P(k+1)| + |Q_{ref} - Q(k+1)| \quad (\text{III.11})$$

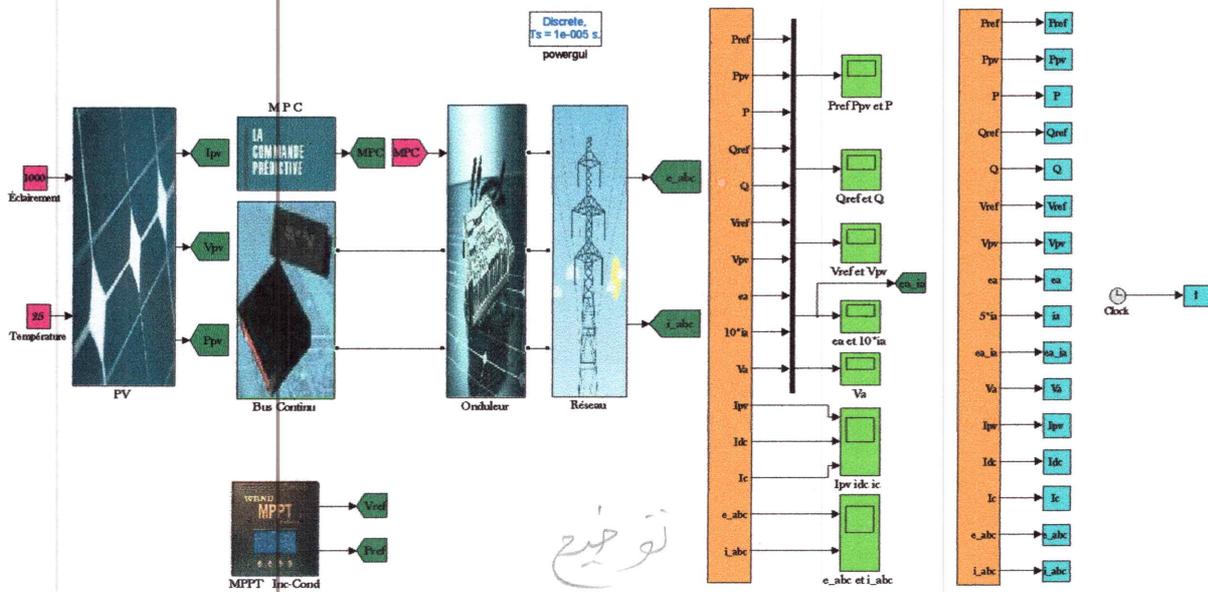


Figure III.5: Schéma Simulink de la cascade avec commande.

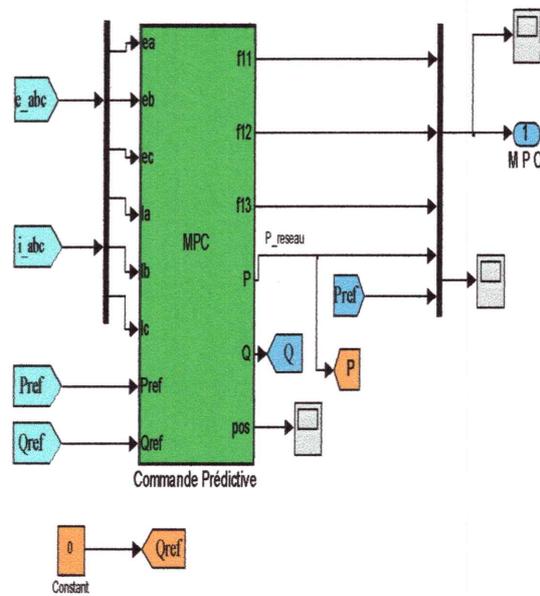


Figure III.6: Schéma Simulink du MPC.

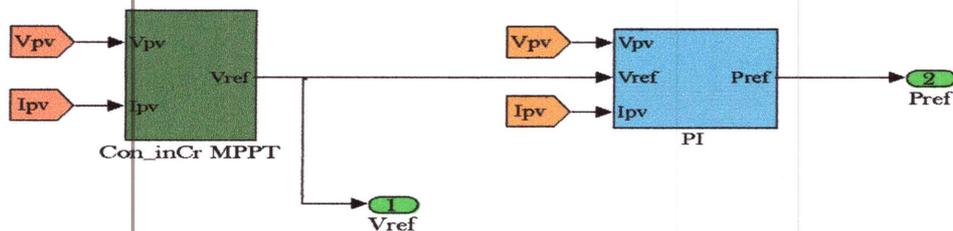


Figure III.7 : Schéma Simulink de la MPPT.

Les paramètres du circuit de puissance simulé sont les suivants :

- La tension de ligne : $E = 110\sqrt{2}$ V.
- La fréquence du réseau : $F = 50$ Hz.
- L'inductance de phase du réseau : $L = 10$ mH.
- La résistance de phase du réseau : $R = 10$ Ω .
- La capacité d'entrée de l'onduleur : $C = 1$ mF.

Les résultats de simulation sont indiqués aux figures :

Les figures (III.8, III.9, III.10) montre qu'après l'application du réglage, la tension continue V_{pv} suit sa référence, Si on fait un zoom sur V_{pv} et V_{ref} on remarque qu'il y a une erreur de poursuite entre les deux tensions égale 0.02 V, on remarque aussi une convergence de la puissance de sortie, la tension et le courant du champ photovoltaïque vers le point de puissance maximal, qui est caractérisé par une puissance de 1186 W, une tension continue $V_{pv} = 308$ V et un courant

$$I_{pv} = 4.84 \text{ A.}$$

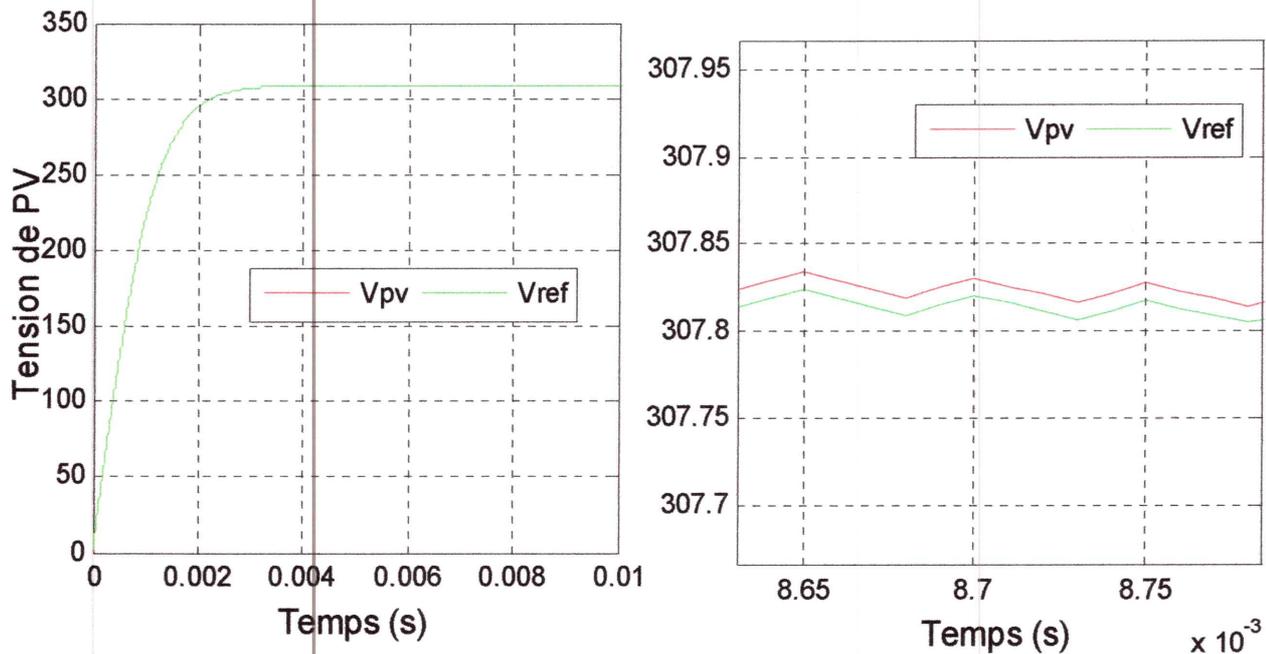


Figure III.8 : tension V_{pv} et V_{ref} de sortie a champ PV avec réglage.

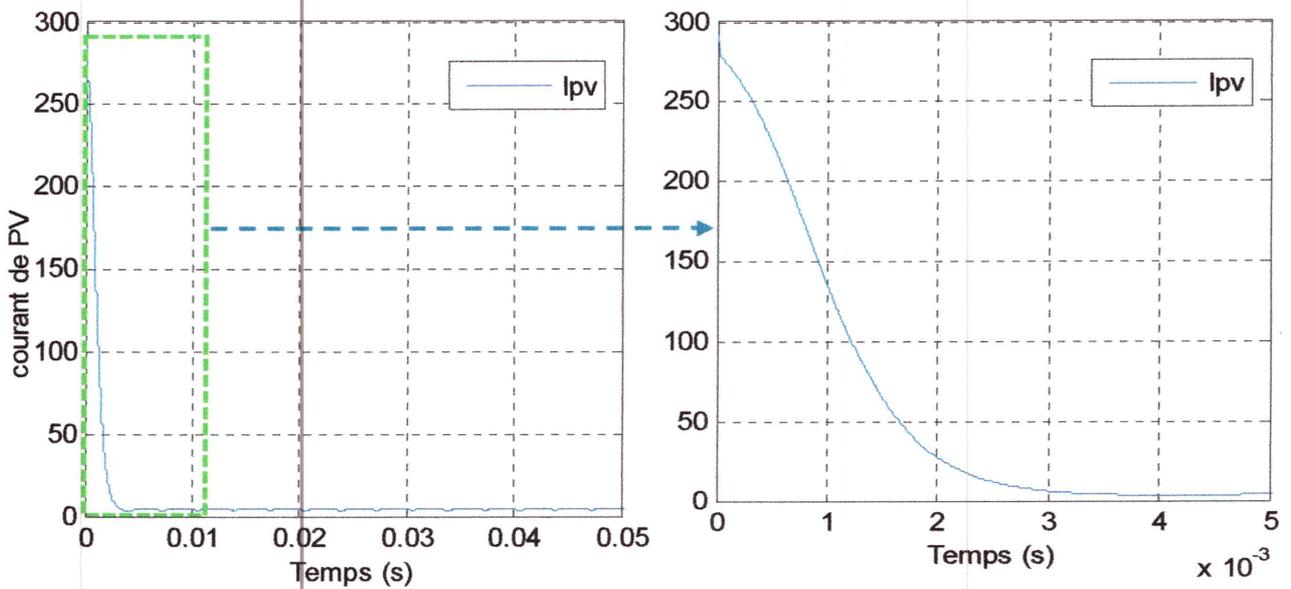


Figure III.9 : courant I_{pv} (A) de champ PV avec réglage.

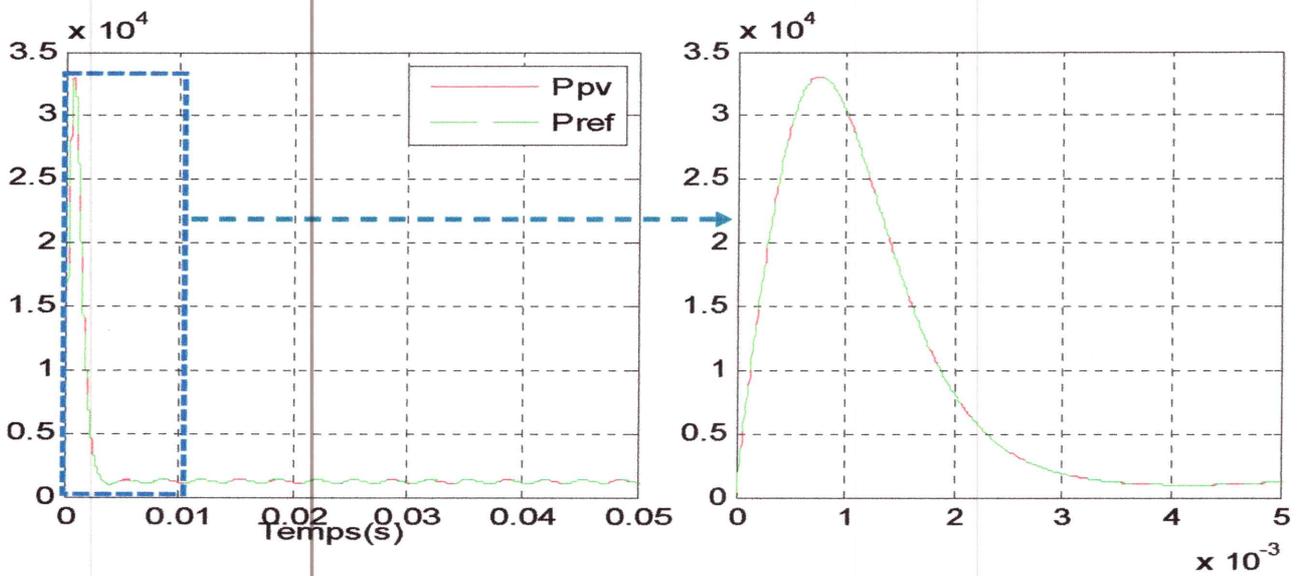


Figure III.10 : puissance P_{pv} (W) de champ PV avec réglage.

Les figures (III.11, III.12) montre que le courant i_c et i_{dc} présentent une forme impulsionnel. Ces impulsions traduisent le chargement et le déchargement du condensateur.

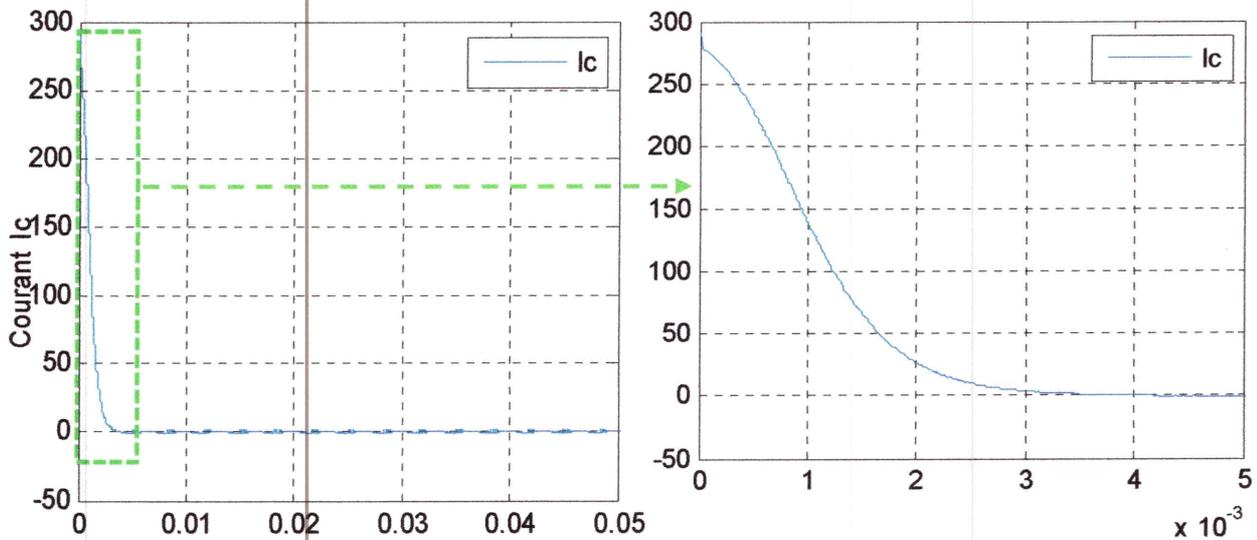


Figure III. 11: Courant i_c du condensateur.

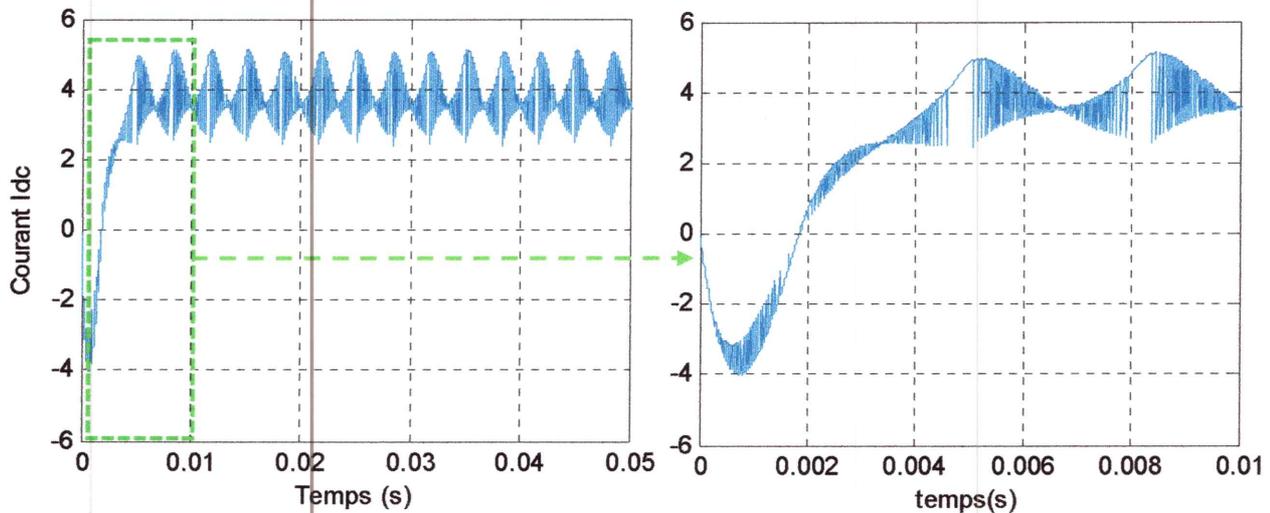


Figure III.12 : Courant i_{dc} d'entrée de l'onduleur.

La figure (III.13) montre qu'après l'application du réglage, la puissance active P suit sa référence après un régime transitoire d'environ 0.06 secondes, Si on fait un zoom sur P_{pv} et P_{ref} on remarque qu'il y a une erreur de poursuite de 4 W entre les deux puissances.

La figure (III.14) montre que la puissance réactive Q suit sa puissance réactive de référence Q_{ref} après un régime transitoire d'environ 0.03 secondes au tour de zéro.

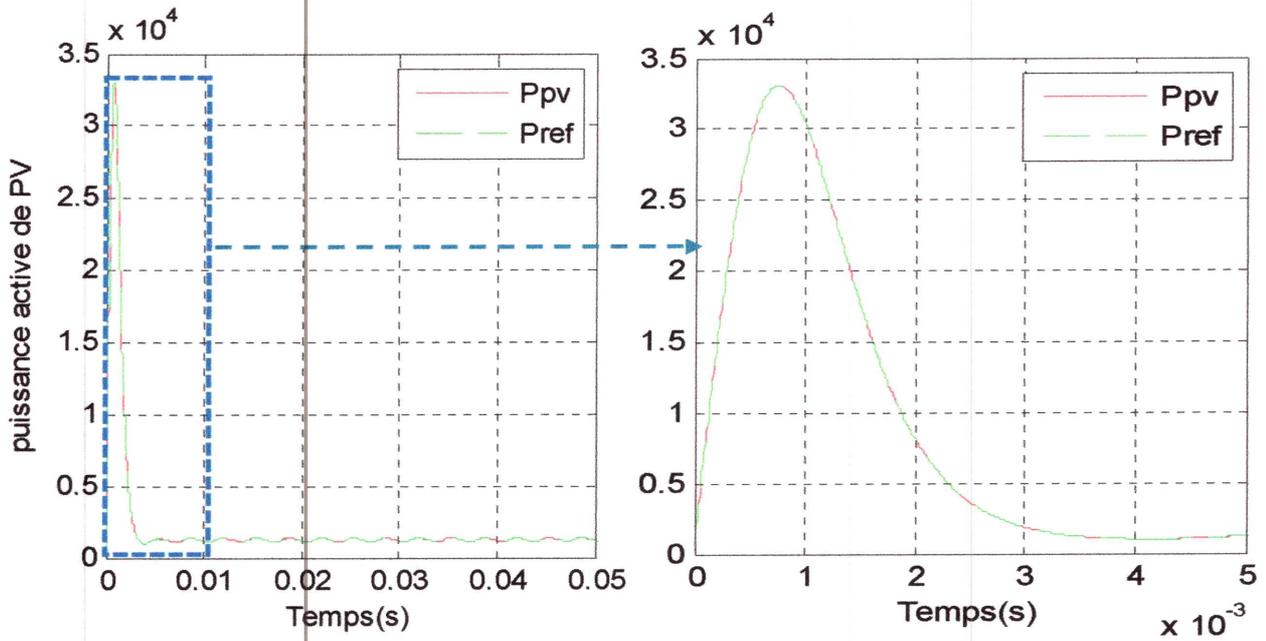


Figure III.13 : Puissance active et sa référence.

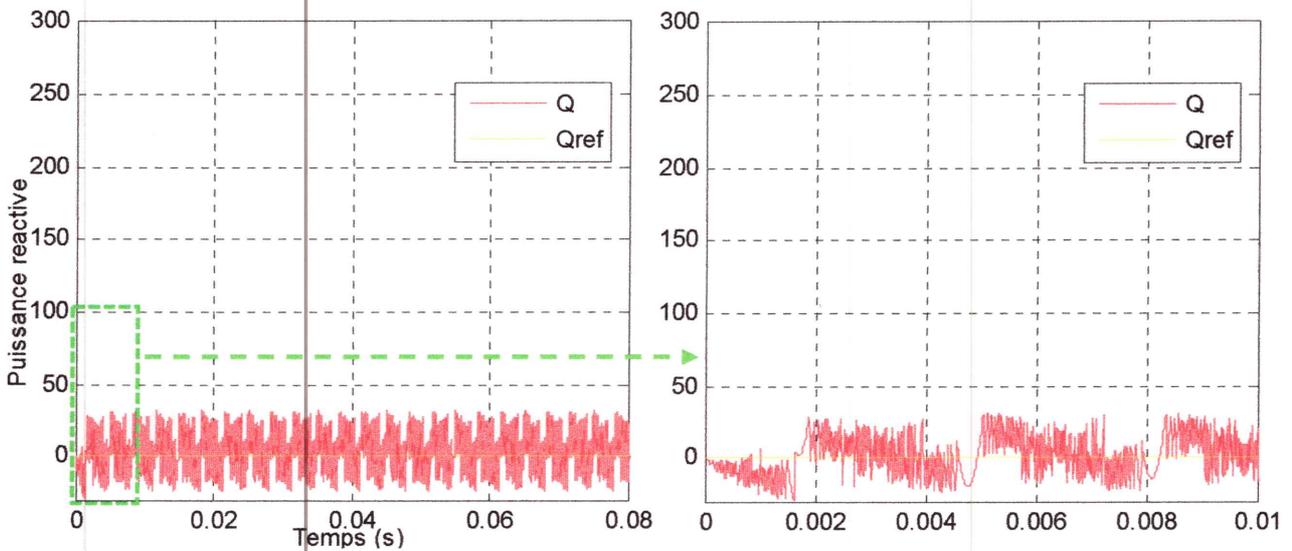


Figure III.14 : Puissance réactive et sa référence

La figure (III.15) montre que la tension simple à la sortie de l'onduleur V_a prend une forme impulsionnelle.

La figure (III.16) 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.

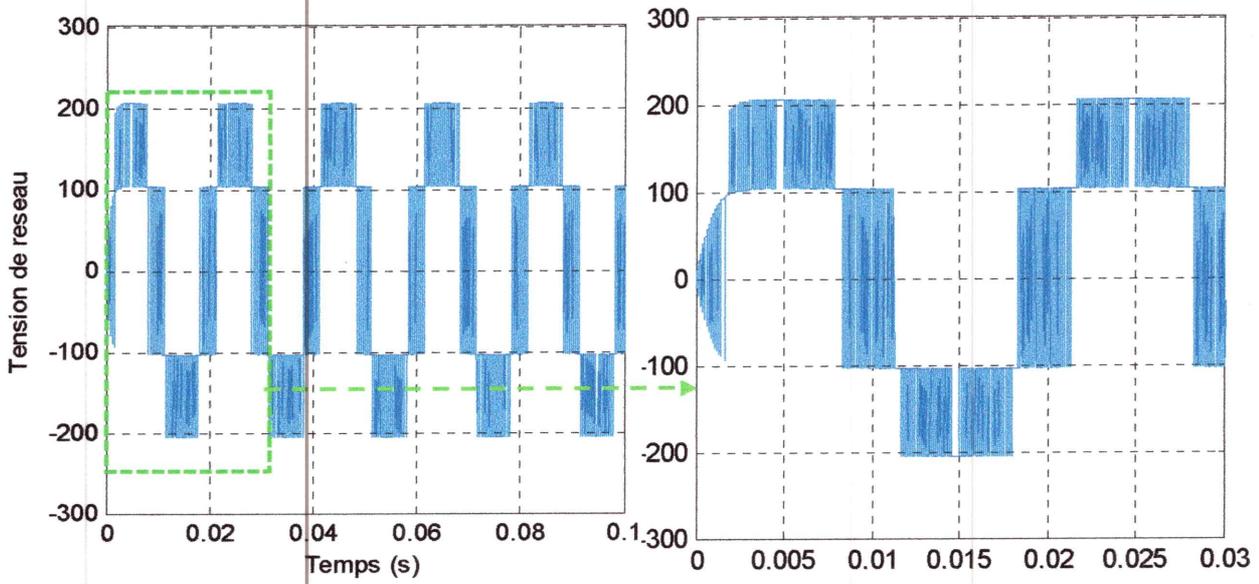


Figure III.15 : Tension de sortie de l'onduleur (Va).

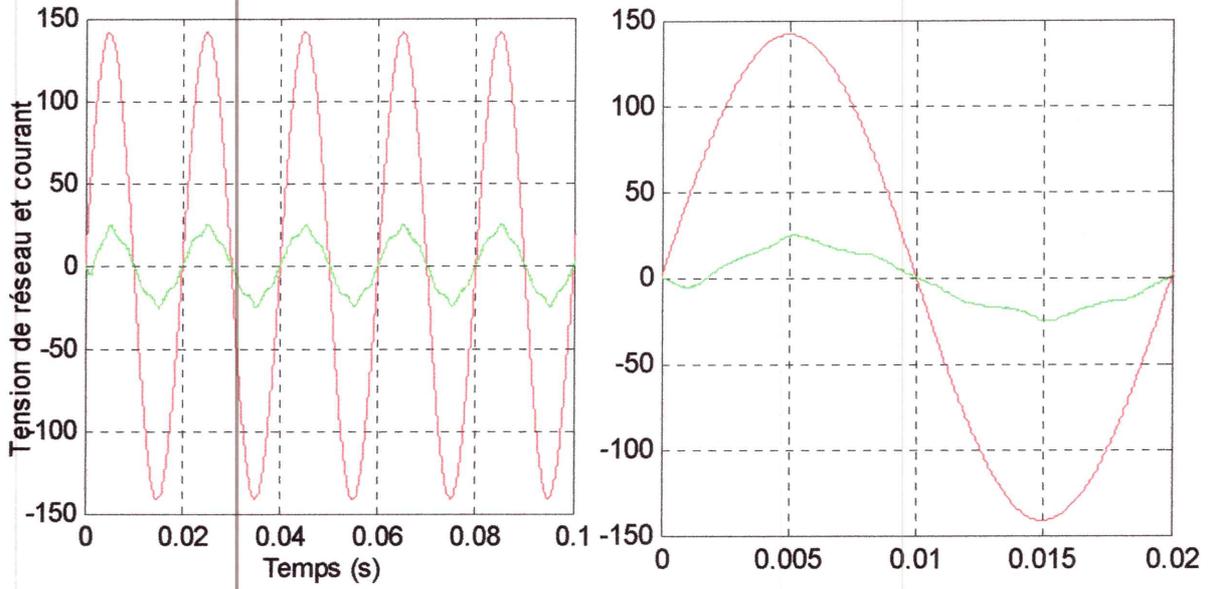


Figure III.16 : Tension et courant de phase du réseau

Conclusion :

Dans ce chapitre, la commande prédictive, combiné avec la commande de poursuite du point de puissance maximale MPPT, a été appliquée sur une cascade champ photovoltaïque -onduleur triphasé à deux niveaux- réseau électrique.

La commande permet de mettre en phase la tension et le courant du réseau en annulant la puissance réactive d'où un facteur de puissance unitaire.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la commande des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Cette connexion se fait par l'intermédiaire d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Nous avons commencé tout d'abord, dans la première partie, par donner les concepts de base indispensables pour la compréhension et la maîtrise des principes de la conversion photovoltaïque. Nous avons constaté que la puissance électrique produite par des champs photovoltaïques présente un point optimum de fonctionnement.

Nous avons exposé les méthodes et techniques utilisées pour la recherche du point de puissance maximale d'un module PV. On a présenté en détail la méthode de conductance incrémentale, qui est l'une des méthodes les plus simples et efficaces.

Dans la deuxième partie, nous avons abordé l'étude et la modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique, on a commencé par une description de l'onduleur de tension à deux 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 la capacité d'entrée et leur rôle dans la stabilisation des tensions à l'entrée de l'onduleur, jusqu'à la présentation du modèle d'état du système dans le repère de Clarke.

Dans le troisième chapitre, la commande prédictive est appliquée sur le système photovoltaïque connecté au réseau. Cette application nous a permis d'obtenir des puissances active et réactive qui suivent toujours ses puissances de référence, en assurant la poursuite du point de puissance maximale et le réglage de la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

Les résultats de simulation nous ont montré l'efficacité de la commande appliquée. A travers ces résultats, on a montré qu'on peut imposer une puissance réactive nulle dans le réseau électrique d'où un facteur de puissance pratiquement unitaire.

Comme perspectives de ce travail, on propose d'étendre la commande prédictive (non linéaire) à un onduleur photovoltaïque de niveau plus élevé, et de remplacer l'algorithme de recherche du point de puissance maximale par d'autres algorithmes.

Annexe

ANNEXE

Paramètres du module photovoltaïque MSX 60 :

Puissance maximal :	60 W
Tension au point de puissance maximal :	17.1 V
Courant au point de puissance maximale :	3.5 A
Nombre de cellule en série (N_s):	36
Nombre de cellule en parallèle (N_p):	1
Résistance série (R_s):	0,21 Ω
Courant en court-circuit (I_{cc}):	3,8 A
Coefficient de la température du courant de court-circuit (K_1):	0,003 A/ $^{\circ}$ K
Tension en circuit ouvert (V_{co}):	21.1V
Température de référence de la cellule (T_{ref}):	322 $^{\circ}$ K
Facteur de qualité (A):	1,5
La constante de Boltzmann (K):	$1,38 \cdot 10^{-23}$ j/K
La charge d'électron (q):	$1,9 \cdot 10^{-19}$ coul

Paramètres du Réseau :

La tension de ligne (e):	$110\sqrt{2}$ V
La fréquence du réseau (f):	50 Hz
L'inductance de phase du réseau (L):	5 mH
La résistance de phase du réseau (R):	0.1 Ω
La capacité d'entrée de l'onduleur (C):	2.2 mF

*Références
Bibliographiques*

Références Bibliographiques

- [1] Boukhers Djamil «optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » magister en électrotechnique 28/11/2007 Université Mentouri de Constantine.
- [2] Mr. messaoudene Hichem «Détermination intelligente de la puissance maximale Des modules photovoltaïques» 2013/2014 diplôme de Magister en Electronique Université el hadj lakhdar batna.
- [3] IBGE institut bruxellois pour la gestion de l'environnement «le photovoltaïque –module.3 – fonctionnement et technologies» novembre 2010-9/10.
- [4] Molina MG, Mercado PE, "Modeling and control of grid-connected photovoltaica energy conversion system used as a dispersed generator", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 13^e15 August 2008.
- [5] M. Maaziz, "Commande adaptative des systèmes non linéaires : Application `a la commande d'une machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Paris (2000).
- [6] A. KADDOURI " Étude d'une Commande Non Linéaire Adaptative d'une machine Synchronne à Aimants Permanents ", Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec,2000.
- [7] D.Boukhers, "Optimisation d'un Système d'Energie Photovoltaïque Application au Pompage", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [8] Molina MG, Mercado PE, "Modeling and control of grid-connected photovoltaic energy conversion system used as a dispersed generator", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 13e15 August 2008.
- [9] Pétibon Stéphane, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [10] Isidori A, "Nonlinear control systems", Springer Verlag; 1989.
- [11] A.Bouchetab, D. Lalili, "Commande d'un Onduleur Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique", Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique, Université de Jijel, 2012.
- [12] S.Makhloufi, "Contribution à l'Optimisation des Installations Photovoltaïques par des Commandes Intelligentes", Thèse De Doctorat, Université de Batna, 2013.
- [13] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.

- [14] Bekkari Wafa et Saker Samah, " Etude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque", Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, université de Biskra, 2006.
- [15] F.Slama, "Modélisation d'un Système Multi Générateurs Photovoltaïques Interconnectés au Réseau Electrique", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2011.
- [16] N.Pongratananukul, "Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems", University of Central Florida, 2005
- [17] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [18] V.Boitier, P. Maussion ,C.CABAL 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [19] C. Semassou, « Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Benin », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2009.
- [20] "Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques", Cours, Ecole nationale d'ingénieurs de Sfax.
- [21] Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.
- [22] F. Boukhtouche Cherfa, « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2004.
- [23] Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005.
- [24] Detlef Schulz, Matthias Jahn and Thomas Pfeifer «Grid Integration of Photovoltaics and Fuel Cells». Department of Electrical Engineering, Electrical Power.
- [25] Violaine Didier sous la direction de Bruno Gaidon. Rapport rédigé sur « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances », Août 2007.
- [26] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [27] Sotirios B. Skretas, Demetrios P. Papadopoulos, « Efficient design and simulation of an expandable hybrid (wind-photovoltaic) power system with MPPT and inverter input voltage regulation features in compliance with electric grid requirements », Electric Power Systems Research 79 (2009) 1271-1285.

- [28] D. Lalili, A.Mellit, N. Lourci , B. Medjahed , E.M Berkouk, " Imput output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter", *Renewable Energy* 36(2011) 3282e3291.
- [29] Gérard Ramond, "Contribution à la commande prédictive généralisée adaptative directe et applications", le grade de docteur en sciences de l'université Paris Xiorsay, septembre 2001.
- [30] Cristina Nicoletta, " Robustification de lois de commande prédictives multivariables",2008.
- [31] A.Merabet: "Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone", Thèse de doctorat en ingénierie de l'Université de Québec, Canada, 2007.
- [32] L. Malesani, P. Mattavelli, S. Buso: "Robust dead-beat current control for PWM rectifiers and active filters", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35,no.3, pp. 613-620, May./Jun. 1999.
- [33] J. H. Choi, J. M. Kwon, J. H. Jung, and B. H. Kwon: "High-performance online UPS using three-leg-type converter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 889-897, Jun. 2005.
- [34] L. Benchaita : "Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande", Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.

liste des figures

Fig. I.1 Cellule PV typique.....	4
Fig. I.2 Cellule monocristalline.....	5
Fig. I.3 Cellules poly-cristallines.....	5
Fig. I.4 Cellules amorphes.....	5
Fig. I.5 Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.....	6
Fig. I.6 Schéma du modèle réel simplifié d'une cellule photovoltaïque.....	7
Fig. I.7 Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.....	7
Fig. I.8 Modèle à deux diodes d'une cellule solaire.....	8
Fig. I.9 schéma de bloc d'une cellule.....	8
Fig. I.10 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque.....	9
Fig. I.11 Le Module photovoltaïque.....	11
Fig. I.12 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I (V) et P(V).....	12
Fig. I.13 Influence de la température sur les caractéristiques I=f(V) et P=f(V).....	13
Fig. I.14 Influence de la résistance série sur les caractéristiques I=f(V) et P=f(V).....	14
Fig. I.15 Influence du facteur de qualité 'A' sur les caractéristiques I (V) et P(V).....	15
Fig. I.16 Composants d'un champ de modules photovoltaïques.....	15
Fig. I.17 Associations de <i>ns</i> modules photovoltaïques en série.....	16
Fig. I.18 Caractéristiques I=f(V) d'un groupement de <i>ns</i> modules en série.....	16
Fig. I.19 Caractéristiques P=f(V) d'un groupement de <i>ns</i> modules en série.....	17
Fig. I.20 Association de <i>np</i> modules photovoltaïques en parallèle.....	17
Fig. I.21 Caractéristiques I=f(V) et P=f(V) d'un groupement de <i>np</i> modules en parallèle.....	18
Fig. I.22 Association mixte de <i>ns * np</i> modules photovoltaïques.....	19
Fig. I.23. Caractéristiques I=f(V) et P=f(V) d'un groupement mixte de <i>ns * np</i> modules.....	19
Fig. I.24 Principe de la recherche du point de puissance maximale.....	21
Fig. I.25 Schéma de convergence vers le PPM par P&O.....	22
Fig. I.26 Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O.....	22
Fig. I.27 Trajectoire de convergence par Incrémentation de la Conductance.....	24
Fig. I.28 Algorithme d'incrémentation de la conductance.....	24
Fig. I.29 Système autonome.....	25
Fig. I.30 Système hybride.....	26
Fig. I.31 Systèmes connectés à un réseau BT.....	26
Fig. II.1 Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau.....	29
Fig. II.2 Générateur photovoltaïque relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur.....	30
Fig. II.3 Différents types d'onduleurs couplés au réseau.....	31
Fig. II.4 Système photovoltaïque connecté au réseau (non autonome).....	33
Fig. II.5 Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.....	34
Fig. II.6 Schéma bloc du générateur photovoltaïque.....	34
Fig. II.7 Schéma du générateur PV dans MATLAB-SIMULINK.....	35
Fig. II.8 Caractéristiques Courant-Tension, du champ PV à $E=1000W/m^2$	36
Fig. II.9 Caractéristiques puissance tension du champ PV à $E=1000 Wm^2$	36
Fig. II.10 Caractéristiques courant- tension du champ PV à $T=25^{\circ}C$	37
Fig. II.11 Caractéristiques puissance -tension du champ PV à $T=25^{\circ}C$	37

Fig.II.12 schéma de l'onduleur de tension.....	38
Fig.II.13 signaux de la commande triangulo-sinusoïdal.....	40
Fig.II.14 Schéma bloc de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	40
Fig.II.15 Schéma bloc de la MLI triangulo-sinusoïdale.....	21
Fig.II.16 Caractéristique P(V) du module PV (1KW/m ² , 298 K) et variation de dP/dV.....	41
Fig.II.17 Schéma block de la commande MPPT.....	42
Fig.II.18 Schéma bloc du réseau triphasé.....	43
Fig.II.19 Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau.....	45
Fig.II.20 Schéma Simulink de la cascade sans commande.....	46
Fig.II.21 tension fournis par le générateur PV.....	46
Fig.II.22 courant fournis par le générateur PV.....	47
Fig.II.23 La puissance fournit par le générateur PV.....	47
Fig.II.24 Tension de sortie de l'onduleur (Va).....	48
Fig.II.25 Tension et courant de la phase (a) du réseau.....	48
Fig.III.1 Principe de la commande prédictive à modèle interne de référence.....	53
Fig.III.2 Vecteurs de tension produits par l'onduleur.....	55
Fig.III.3 organigramme de la commande prédictive de courant.....	55
Fig.III.4 Schéma fonctionnel du système étudié.....	57
Fig.III.5 Schéma Simulink de la cascade avec commande.....	58
Fig.III.6 Schéma Simulink du MPC.....	58
Fig.III.7 Schéma Simulink de la MPPT.....	58
Fig.III.8 tension V _{pv} et V _{ref} de sortie a champ PV avec réglage.....	59
Fig.III.9 courant I _{pv} (A) de champ PV avec réglage.....	60
Fig.III.10 puissance P _{pv} (W) de champ PV avec réglage.....	60
Fig.III.11 Courant i_c du condensateur.....	61
Fig.III.12 C Courant idc d'entrée de l'onduleur.....	61
Fig.III.13 Puissance active et sa référence.....	62
Fig.III.14 Puissance réactive et sa référence.....	62
Fig.III.15Tension de sortie de l'onduleur (Va).....	63
Fig.III.16 Tension et courant de phase du réseau.....	63