REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Département : Génie Électrique**.**

Spécialité : Automatiques et Systèmes.

Régulation du système photovoltaïque connecté au réseau résidentiel par la technique de contrôle par recherche de l'extrême (Extremum Seeking Control)

Préparé et présenté par :

Mr. SALMI MOHAMED ACHERAF

Proposé et dirigé par :

Dr. ABBADI.A

Dr. HAMIDIA.F

Année universitaire 2020-2021

Table des matières

Table des matières :

Remerciement……I

Dédicace…….……....II

Résumé……..VI

Liste des figures ……VII

Liste des tableaux……...IX

Liste des abréviations……X

Liste des symboles ……XI

Remerciements :

Tout d’abord je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d’accomplir ce modeste travail.

Qu’ils ne sont d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers Allah le tout puissant, pour la volante, la patience et la santé qu'il m’a donné pour que je puisse continuer ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à ma promotrices Dr.Abbadi.A et Dr.Hamidia.F, je les remercie de m'avoir encadré, orienté avec patience, aidé et conseillé. Merci aussi pour vos qualités humaines qui mon encourager pour établir ce travail.

Je remercie aussi tous les membres de jury ; d'avoir m'honorer par leur présences en ma soutenance et d'accepter du jurer ce travail.

Enfin nos remerciements à toute personne ayant participée à élaborer ce travail.

Merci.

Dédicace :

A la mémoire de mon

Très cher père

Toute l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher.

Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour.

Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin.

Dieu repose son âme.

A ma très chère mère

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement.

Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée.

Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

A mon frère Okba
Et mes sœurs

Dalila, Sarah, Chafika

En signe de l'affection et du grand amour que je vous porte, les mots sont insuffisants pour exprimer ma profonde estime.

Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et de mon attachement indéfectible.

Que Dieu vous accorde santé, succès et félicité pour faire de vous un couple uni et heureux à jamais.

A mes tantes et oncles paternels et leurs conjoints.

A mes tantes et oncles maternels et leurs conjoints.

A mes cousins et cousines.

A mes chères amies.

A mes collègues 2020/2021.

ملخص

.الهدف من هذه الدراسة هو انتاج الطاقة بواسطة النظام الضوئي والتحسين من إنقاص استهلاك الطاقة من شبكة الطاقة الكهربائية واستهلاك الطاقة من النظام الضوئي لهدف خفض النفقات، وقد تم استعمال تقنيات التحكم MPPTوالمحول DC /ACأساسا بطريقة مراقبة البحث عن النقطة الاعظمية (ESC) من خلال تصميم نموذجMATTLAB/SUMILINK

الكلمات المفتاحية:

نظام الطاقة ألضوئية ،تقنية التحكمMPPT ،المحول DC/AC،خوارزمية البحث عن النقطة الاعظمية (ESC)

Résumé :

Le principe de ce travail c'est la production d'énergie par le système PV, et l'amélioration de la baisse de consommation d'énergie depuis le réseau électrique pour pouvoir régénérer l'énergie de système PV dans le but de réduire les dépenses .On a utilisé des technique de commande MPPT et le convertisseur DC/AC principalement la méthode de contrôle par recherche d'extremum (ESC) ont été validés par la conception d'un modèle sous MATTLAB/SUMILINK.

Mots-clés :

Système photovoltaïque, commande MPPT, convertisseur DC/AC, contrôle par recherche d'extremum (ESC)

Abstract :

The principle of this work is the production of energy by the PV system, and the improv ement of the decrease of energy consumption from the electric grid in order to be able toregen eratethe energy of PV system in order to reduce the expenses. We used MPPT control technical and converter DC/AC mainliy the extremum seeking control method (ESC) were validated by the design of a model under MATLAB/SUMILINK.

Key words :

Photovoltaic system, MPPT command, converter DC/AC, extremum seeking control (ESC)

LISTE DES FIGURES :

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables solaires

Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire……7

Figure I.2 : Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur……9

Figure I.3 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.…….10

Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque……..12

Figure I.5 : cellule monocristalline.…….13

Figure I.6 : cellule poly-cristalline.……..14

Figure I.7 : cellule amorphe……..15

Figure I .8: Modèle de cellule photovoltaïque idéale……16

Figure I .9 : Modèle électrique d'une cellule PV idéale…….17

Figure I .10 : Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes…….18

Figure I .11 : Influence du rayonnement sur la caractéristique I-V……19

Figure I .12 : Influence du rayonnement sur la caractéristique P-V……...20

Figure I .13 : Influence de la température sur la caractéristique I-V……..21

Figure I .14: Influence de la température sur la caractéristique P-V……...21

Figure I .15: Diagramme général d'un système photovoltaïque autonome……22

Figure I .16: Diagramme général d'un système photovoltaïque connecté au réseau……...23

Figure I .17. Protection des modules par les diodes anti retour et by-pass……..27

Chapitre II : Déscription du système résidentiel connecte au réseau

Figure II.1. Schéma fonctionnel général d'une topologie PV monophasée……31

Figure II.2 : Courbe graphique pour MPPT de PV……..32

Figure II.3 : Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque……..33

Figure II.4 : Schéma de converge vers le PPM par (P&O)……..34

Figure II.5 : Algorithme de la méthode P&O…….....…35

Figure II.6 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la Conductance G et de la puissance P …….37

Figure II.7 : Organigramme de l'algorithme Inc-Cond ……..39

Figure II.8 : Onduleur monophasé : Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet ……..……41

Figure II.9 *:* Principe de la MLI bipolaire ……..…..42

Figure II.10 : structure de principe d'une PLL triphasée (a) monophasée (b)…… 43

Figure II.11 : Schéma du filtre LCL **……..**……..…44

Chapitre III : La technique extrême recherche de contrôle (extremum seeking control)

Figure III.1 : Principe de la technique ESC sinusoïdal……49

Figure III.2 : Schéma de la technique ESC sinusoïdal…….50

Figure III.3 : Diagramme de commande de l'onduleur……51

Figure III.4 : Schéma proposé pour le régulateur MPPT…….…....52

Chapitre IV :Résultats de simulation Et discussions

FigureIV.1 : Environnement MATLAB……57

Figure IV.2 : Schéma bloc d'un système résidentiel relié au réseau électrique……....58

Figure IV.3 : Génération de la tension de référence du Bus continu……60

Figure IV.4 : La structure du VSC……..60

Figure IV.5.l'irradiation et la puissance PV……61

Figure IV.6. Performances en liaison CC…….62

Figure IV.7. Tension et courant de la charge résidentielle .....…….....63

Figure IV.8. Tension de charge résidentielle et courant sont en phase……63

Figure IV.9. (A). Puissance active de la charge résidentielle……..64

Figure IV.10 : Spectre des harmoniques actuels……...……..65

LISTE DES TABLEAUX :

Tableaux I.1 : rendement des cellules photovoltaïques……15

Liste des abréviations :

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

DC : Courant Continu (Direct Current).

DC/AC : Courant continu- alternatif.

ESC : Extremum Seeking Control.

GPV : Générateur photovoltaïque.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

ISE : Integrated Square Errors.

ID : Instrumentation Diagram.

MLI (PWM) : Modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation).

MPPT : Suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

P&O : Perturbation et Observation.

PLL : Boucle de verrouillage de phase (Phase Lock Loop).

PPM : Point de puissance maximale.

PV : Photovoltaïque.

PID : Action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain G ;

Action intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain Ti ;

Action dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain Td.

PWM : Pulsewith Modulation.

THD : Total Harmonie Distorsion.

VSC : Convertisseur source de tension.

LISTE DES SYMBOLES :

C **:** La vitesse de la lumière.

D_1, D_2, D_3, D_4 *:* Diodes de puissance.

E_{ph} **:** La quantité d'énergie.

E *:* Tension continue.

F : Fondamental (60Hz) =20.41.

$J(\theta)$:Fonction de coût.

$H_f(s)$: signifie la fonction de transfert de filtre.

h **:** La constante de Planck.

I_0 **:**Le courant de saturation inverse de la diode [A].

I: Le courant fourni par la cellule.

I_{ph}: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_d : Le courant de saturation de la diode.

K **:** Constante.

L **:** Inductance de l'onduleur au réseau.

L^{-1} : Indique l'inverse de la transformation de la place.

P_{pvn} : La nouvelle puissance.

P_{pvn-1} : L'ancienne puissance dans le temps (t-1).

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 *:* Transistors avec une diode antiparallèle.

R_s: Résistance en série.

R_p: Résistance en parallèle.

R **:** Résistance (Ω).

T_1, T_2, T_3, T_4 : Transistors de puissance.

THD : Total Harmonie Distorsion = 1.60%.

$U_c . I_c$: La tension et le courant de la charge.

U_c : Tension de la charge (v).

V_d :La tension aux bornes de la diode [V].

V_t :Potentielle thermique.

V_{dc} : La tension de bus DC

V_{SA} : Tension d'entrée

V_d : Tension l'axe d (v).

V_{dcref} : Tension de référence a courant continue (v).

V_{dc} : Tension filtrée (v).

V_{pv} : Tension photovoltaïque (v).

$e(i)$: L'erreur

λ : Constante positive.

α : Constante positive.

ω : Pulsation.

λ : La longueur d'onde.

(*) : Représente une convolution

Sommaire

Introduction générale… ……2

Chapitre I :Généralités sur les énergies renouvelables solaires

I .1 . Introduction … ……..5

I .2. L'énergie solaire… ……6

I .2. 1. L'énergie solaire thermique ……..6

I .2. 2. L'énergie solaire photovoltaïque……...6

I .3. Gisement solaire……..6

I .3.1. Le spectre solaire……6

I .3.2. Rayonnement solaire……7

I .3.2.1. Les composantes du rayonnement solaire……7

I .3.2.2.Rayonnement direct……8

I .3.2.3.Rayonnement diffus……8

I .3.2.4.Rayonnement réfléchi……..8

I .3.2.5.Le rayonnement global……9

I .4. L'effet photovoltaïque……...9

I .5. La cellule photovoltaïque……11

I .5. 1. Historique……...11

I .5. 2. Définition :……...11

I .6. Les différents types de la cellule photovoltaïques……12

I .6.1. Les cellules monocristallines……..13

I .6.2. Les cellules poly-cristallines……13

I .6.3. La cellule amorphe……...14

I .7. Rendement d'une cellule photovoltaïque……...15

I .8. Représentation des cellules PV……16

I .8.1. Cellule photovoltaïque idéale (parfait)……16

I .8.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale…….17

I .8.2.1.Avec une seule diode……..……...…17

I .8.2.2. Avec deux diodes……...18

I .9. Influence de l'éclairement et de la température…….19

I .9.1. Influence de l'éclairement…….19

I .9.2. Influence de la température……..20

I .10. Différentes topologies des systèmes PV…….22

I .10.1. System autonome (isolé) ……..…22

I .10.2. Système connecté au réseau……23

I .10.3. Système photovoltaïque avec stockage.……..……24

I.10.3.1.Batteries…..…….……...…..24

I .10.3.2. Accumulateurs à circulation……..…24

I .10.3.3. Pile à combustible……..……24

I .10.3.4. Système photovoltaïque sans stockage……...……25

I .11. Avantages et inconvénients de la photovoltaïques……..…25

I .11.1. Avantage de la photovoltaïques……..…25

I .11.2. Les inconvénients de la photovoltaïques ……..……..…26

I .12. Protection des modules photovoltaïques……...……..…26

I .13. Conclusion……...……...27

Chapitre II : Déscription du système résidentiel connecte au réseau

II.1. Introduction…….…….30

II.2. Structure du système…….30

II.3. Commandes MPPT…….……32

II.3.1. Définition…….32

II.3.2. Principe du MPPT ……..……...……..32

II.3.3. La méthode Perturbe et Observe (P&O) …..……...…….....33

II.3.4. Avantages et inconvénient de (P&O) …….…….36

II.3.4.1.Avantage……....….36

II.3.4.2.Inconvénients ……...……..….36

II.3.5. La méthode de la commande « Incrément de conductance » (Inc-Cond) …...36

II.4. Convertisseur DC/AC monophasé source de tension (Onduleur)..……..40

II.4.1. Définition de l'onduleur monophasé…….…...……...……41

II.5. La commande à MLI……...……42

II.6. Synchronisation par PLL……..……..…….43

II.7. Le filtre LCL…….……...….44

II.8. La charge résidentielle…….……....44

II.9. Conclusion…….……44

Chapitre III : La technique extrême recherche de contrôle (extremum seeking control)

III.1. Introduction……47

III.2.L'histrorique de contrôle par recherche d'extremum ……47

III .3. L'objectif de La technique de contrôle par recherche d'extremum…….48

III .4. Le système de commande de l'onduleur…….…….50

III .4.1. Régulateur MPPT…….50

III .4.2. Régulateurs des courants…….……50

III.5. MPPT basé sur la technique de contrôle par recherche d'extremum. …….51

III.6. Contrôle PID adaptatif……...42

III.7. conclusion…….54

Chapitre IV :Résultats de simulation Et discussions

IV.1. Introduction……56

IV.2. Introduction à MATLAB……..56

IV.2.1. Mode interactif……..56

IV.2.2. Mode exécutif ……57

IV.3.Description de système……....58

IV.4. Les régulateurs du VSC (Convertisseur source de tension)……59

IV.5. Les résultats des simulations……..61

IV.5.1. Performances du bus continu …….62

IV.5.2. Tension et courant de la charge résidentielle……63

IV.5.3. La puissance active de la charge résidentielle……64

IV.5. 4.Le spectre harmonique du courant de la charge résidentielle……..…64

IV.6.Conclusion……..65

Conclusion générale……...62

Introduction générale

Introduction générale :

Sans énergie, le monde n'aurait pas pu atteindre le niveau de développement actuel. En effet, l'homme, les machines et la nature en ont tous besoin ; donc la production de cette énergie est un défi de grande importance pour le présent et l'avenir de l'humanité.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire sont non polluante et inépuisable. Elles sont des solutions prometteuses pour nos problèmes énergétiques.

De nos jours, les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus souvent raccordés au réseau électrique. Ils permettent à un ménage de produire une partie de son électricité de manière propre et d'injecter la production d'électricité excédentaire sur le réseau. On parle ici d'un système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau.

La production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse, de la température et de la charge donc, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque, PV ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale. On utilise alors une technique qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale appelée 'maximal power point Tracking' (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence. Pour cela, on a des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie générée par le panneau, donc de permettent un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

On trouve dans la littérature des algorithmes basés sur des méthodes telles que : Perturbation & Observation 'P&O' et Incrément les conductances 'Inc. Cond' et l'intelligence artificielle…etc., ou bien par d'autre technique tire des lois de commande modernes tel que la technique de contrôle par recherche d'extremum.

L'ESC technique consiste à ajouter une petite perturbation sinusoïdale à l'entrée et traitement de la sortie perturbée pour conduire le point de fonctionnement à son maximum. Le traitement de sortie implique une multiplication synchrone et une étape de filtrage [1].

Le convertisseur DC/AC ou encore appelé onduleur, est une partie essentielle dans la chaîne de production des énergies renouvelables. C'est un appareil électronique permettant de générer des courants alternatifs à partir d'un courant continu (cas d'une production solaire).

Les onduleurs considérés dans notre étude sont basés sur une structure en pont (H) constituée d'interrupteurs électroniques tels que des MOSFET ou des IGBT.

La commande des onduleurs est traditionnellement basée sur la modulation de largeur d'impulsions (MLI) ou la commande par hystérésis avec une référence sinusoïdale (CHR) pour éliminer certaines harmoniques [2]. Les régulateurs des courants et de la tension du bus continu sont assurés par des PIDs adaptative ou la technique de contrôle par recherche d'extremum est utilisée pour régler les paramètres des régulateurs PIDs.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. La construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement.

- Dans le second chapitre, On va étudier le convertisseur DC-AC, le plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques résidentiels. Ainsi, on décrive des techniques de commandes MPPT dite classique tel que celle basée sur la contre réaction de la puissance (P&O) avec ces avantages et ces inconvénients. On a aussi donné un aperçu sur la technique MLI et la synchronisation par PLL.
- Dans le troisième chapitre, le travail sera consacré à la présentation de la technique de contrôle par recherche d'extremum *(ESC)*. Tout d'abord, on va exposer brièvement le principe de la technique de contrôle par recherche d'*e*xtremum. On abordera aussi les différents régulateurs qui interviennent dans notre système PV résidentiel : Régulateurs des courants, régulateurs de la tension du bus continu et la commande MPPT.

- Le quatrième chapitre, sera consacré à présenter les résultats de simulation obtenus par les différents régulateurs proposés de notre système photovoltaïque résidentiel connecté au réseau.

Finalement, On termine par une conclusion sur l'ensemble de cette étude, on propose des perspectives à ce travail.

Chapitre I
Généralités sur les énergies renouvelables solaires

Chapitre I :

Généralités sur les énergies renouvelables solaires

I .1 . Introduction :

Les énergies renouvelables connaissent depuis le milieu de l'année 1990 une vogue qui semble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air, le feu et le soleil. Les énergies renouvelables sont inépuisables et d'un usage immémorial.

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 400 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord état de l'art sur le système PV pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et optimiser son utilisation. Nous affecterons dans ce chapitre un rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire photovoltaïque et ses performances.

I .2. L'énergie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367W/m2 [3].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

I .2. 1. L'énergie solaire thermique :

Elle consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

I .2. 2. L'énergie solaire photovoltaïque :

Ce type consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposent pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

I .3. Gisement solaire :

I .3.1. Le spectre solaire :

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10µm

La figure I.1 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ($0,20 < \lambda < 0,38\mu m$)
- 48% dans la bande visible ($0,38 < \lambda < 0,78\mu m$).

- 45,6% dans la bande des infrarouges (0,78< λ <10µm)

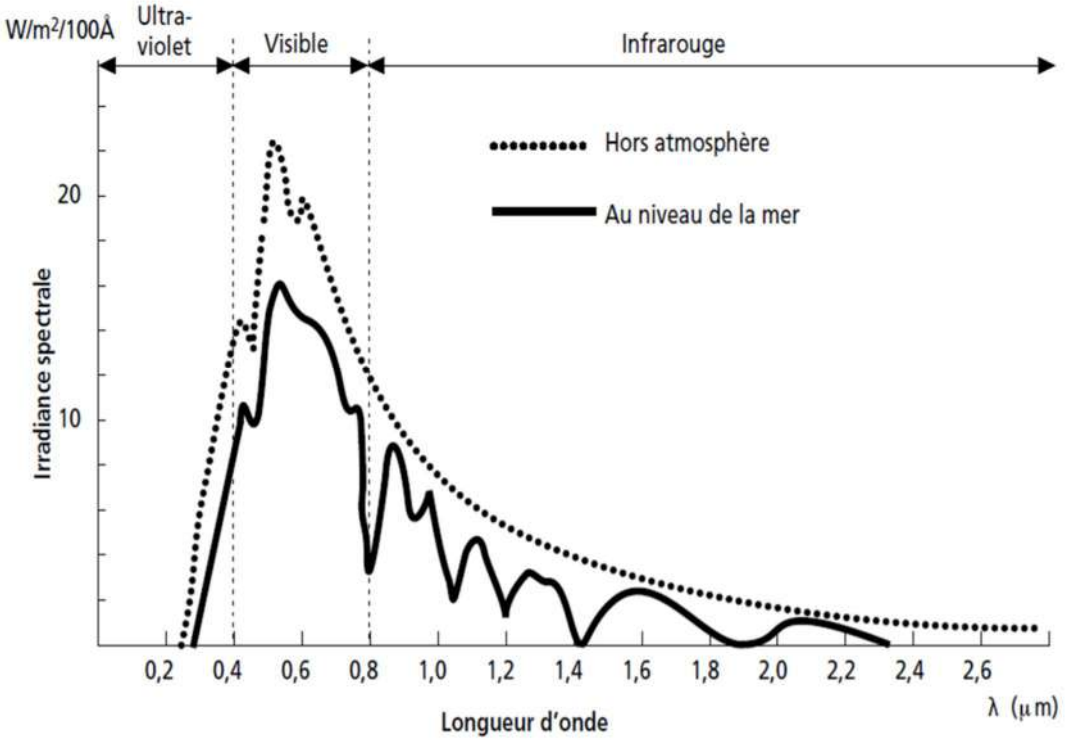


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [5].

I .3.2. Rayonnement solaire :

I .3.2.1. Les composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est reçu de façon intermittente, car il est confronté à beaucoup de contrainte avant d'arriver sur terre. Cela est dû à la résistance des différentes couches de l'atmosphère et des nuages. En effet, le mouvement de la terre sur elle-même combinais à sa géométrie sphérique est à l'origine des différences d'ensoleillement selon la localisation.

De plus, il faut savoir que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie qui répond, elle-même, à la relation suivante :

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

Avec :

- E_{ph} : représente la quantité d'énergie.
- λ : la longueur d'onde.
- h : la constante de Planck.
- c : la vitesse de la lumière.

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses déperditions du fait de son absorption par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau.

Donc Il y a quatre types de rayonnement :

I .3.2.2.Rayonnement direct :

Le rayonnement direct c'est le rayonnement reçu directement de soleil sans diffusion par l'atmosphère.

I .3.2.3.Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus c'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, le rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, …) et à sa réflexion par les nuages.

I .3.2.4.Rayonnement réfléchi :

Le rayonnement réfléchi c'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant sur sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol (environnement du site), et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neiges, eau, etc.). Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur des plans inclinés. Donc, le rayonnement global est la contribution de diverses composantes du rayonnement solaire.

I .3.2.5.Le rayonnement global :

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques mesurent généralement le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi.

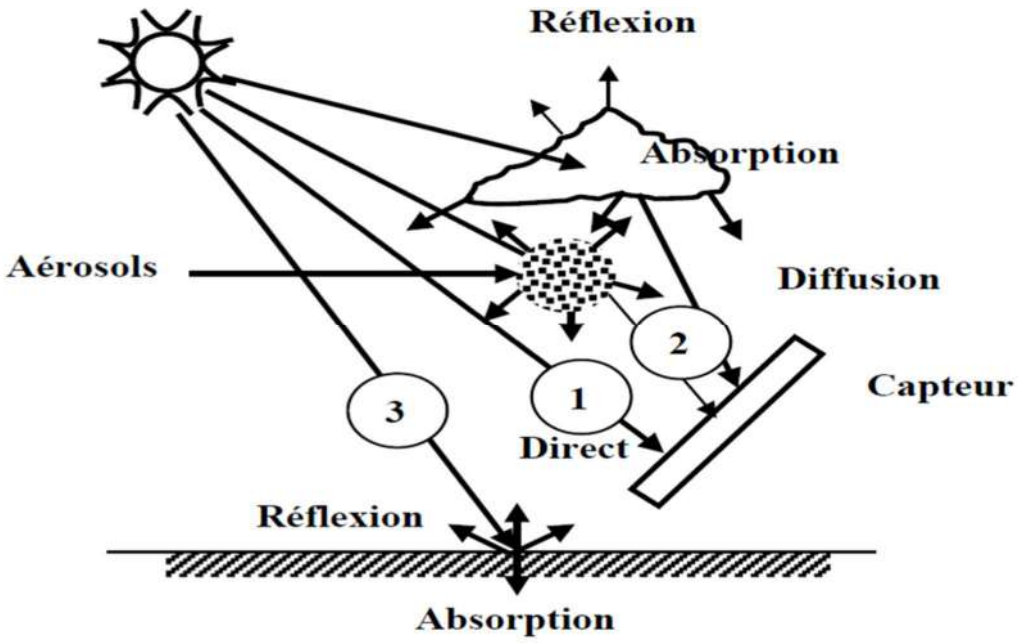


Figure I.2 : Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur

I .4. L'effet 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.

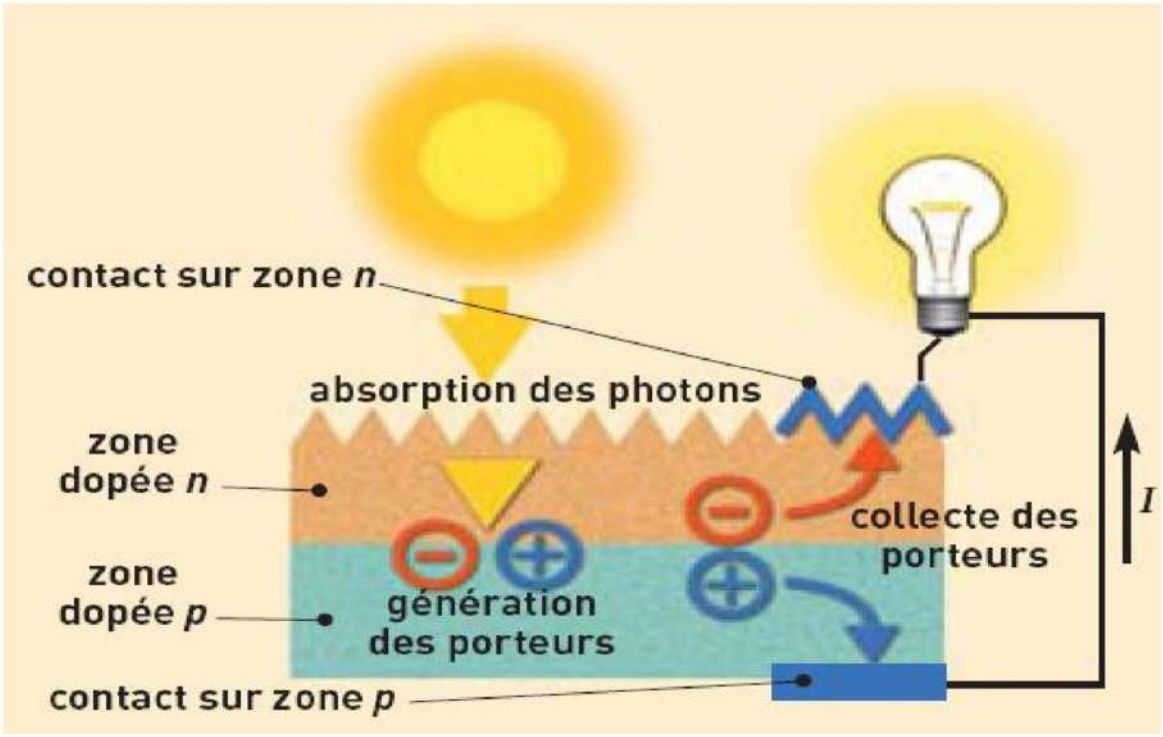


Figure I.3 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [6].

Le principe de l'effet photovoltaïque est le suivant :

- " **Les grains de lumière**" : les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince.
- Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière, qui se mettent alors en mouvement dans une direction particulière,
- Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.

I .5. La cellule photovoltaïque :

I .5. 1. Historique :

- **En 1839 :** Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrise dans un matériau solide qui représente l'effet photovoltaïque.

- **En 1875 :** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

- **En 1958 :** Une cellule avec un rendement de 9% est mise au point .Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

- **En 1973 :** La première maison alimentés par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

- **En 1983 :** La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 (km) en Australie. [7]

- **En 1954** : La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux états unis par les chercheurs des laboratoires Bell, [8]

I .5. 2. Définition :

Les cellules photovoltaïques (solaires) sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque [4].

Parce que La cellule PV est compose de deux couche minces dopée différemment : une couche dopée de type P et l'autre dopée de type N, lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons et des trous. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

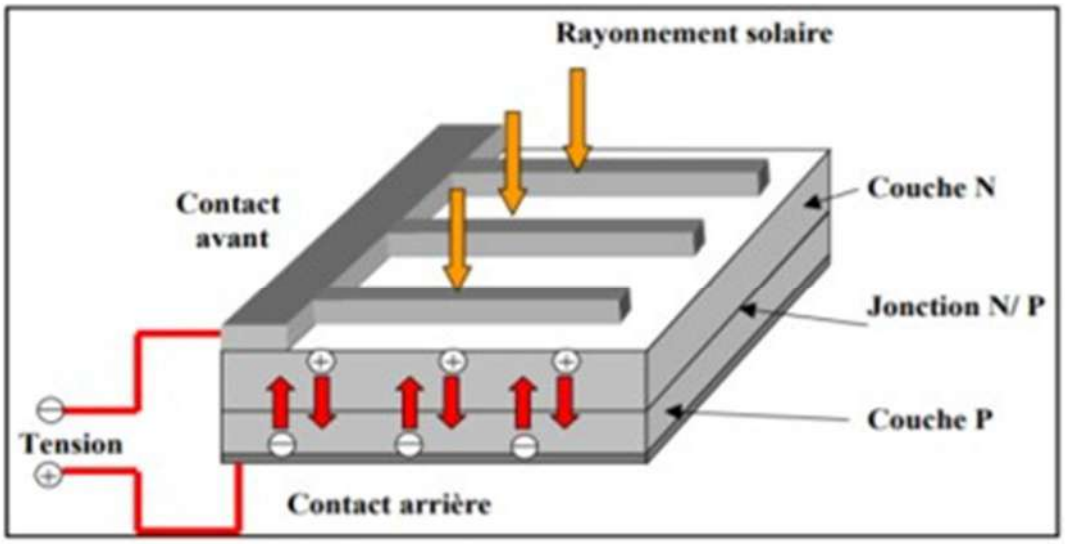


Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].

I .6. Les différents types de la cellule photovoltaïques :

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, on le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice.

Les déférents types de cellules PV existants sont :

I .6.1. Les cellules monocristallines :

Sont des cellules qui s'approchent le plus de modèle théorique, elles sont effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, avec un rendement de 12-16% .Il est cependant plus efficace que la cellule poly-cristalline [9].

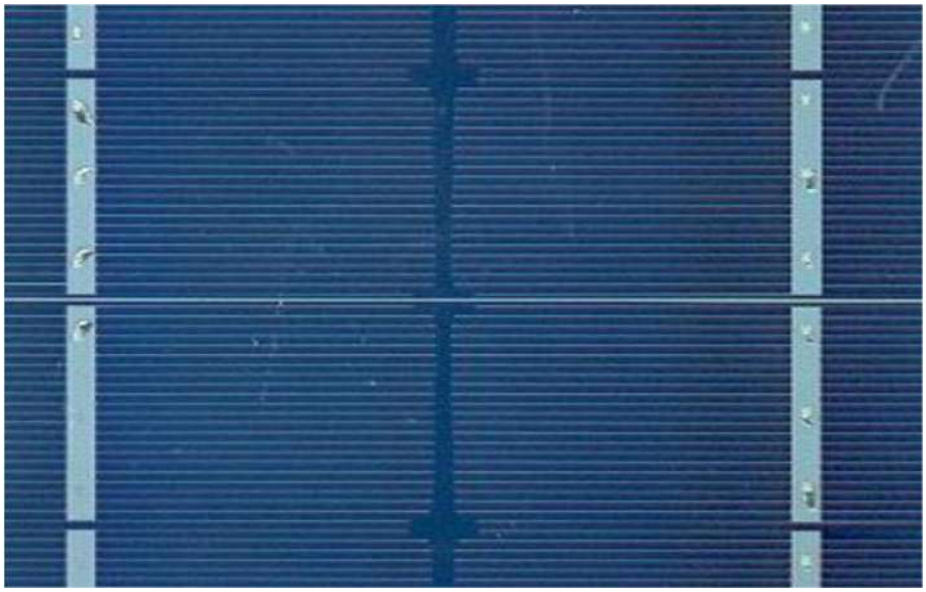


Figure I.5 : cellule monocristalline [9]

I .6.2. Les cellules poly-cristallines :

Ces cellules grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées, elles représentent 49% de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements sont de l'ordre 13 à 20% [9].

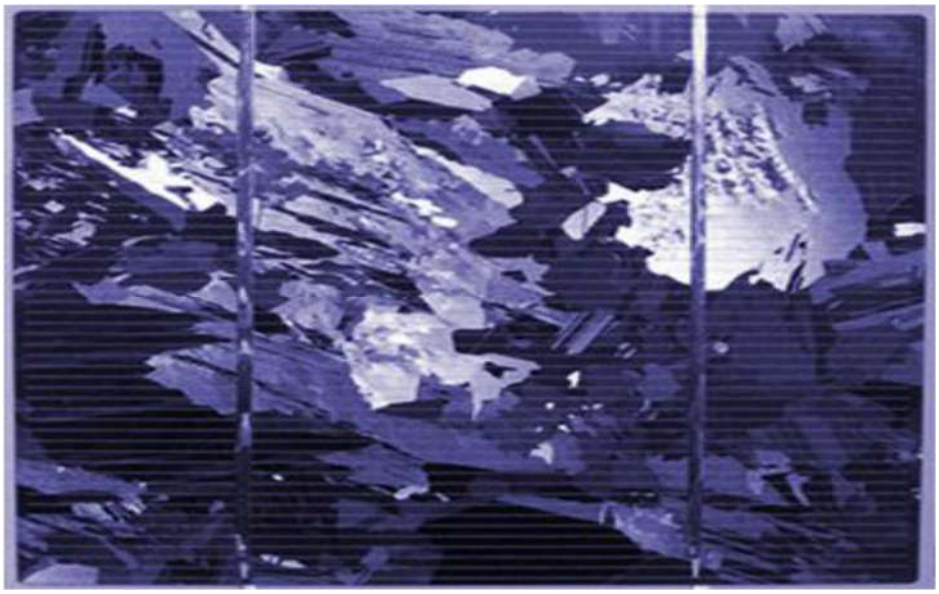


Figure I.6 : cellule poly-cristalline [9]

I .6.3. La cellule amorphe :

Le cout de fabrication est sensiblement meilleur marché que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, leurs rendement est 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de source. [9]

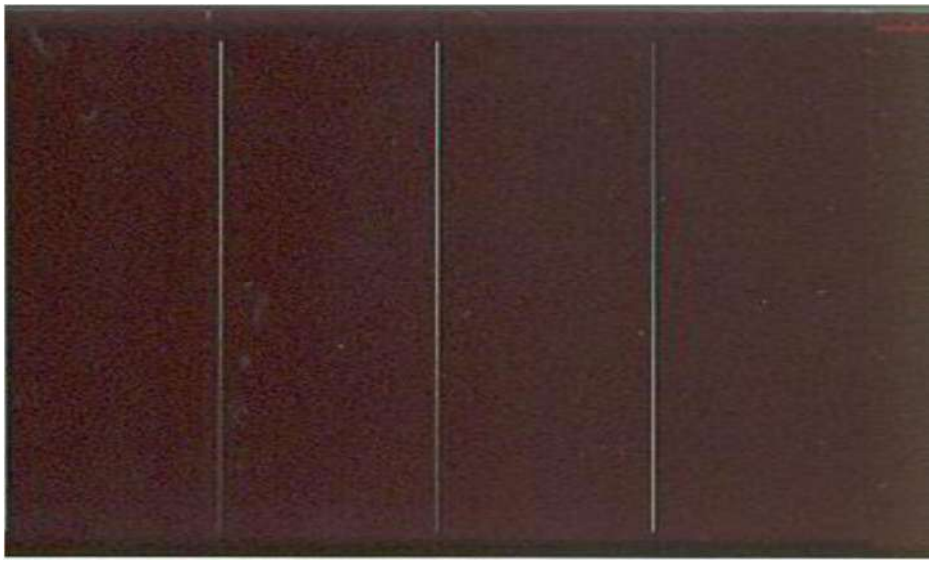


Figure I.7 : cellule amorphe [9]

I .7. Rendement d'une cellule photovoltaïque :

Le tableau suivant présente les différentes cellules avec leur rendement [9]

Technologie de cellule	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe	**13 %**	**5 à 7 %**
Silicium poly-cristallin	**19,8 %**	**11 à 15 %**
Silicium monocristallin	**24,7 %**	**13 à 17 %**

Tableaux I.1 : rendement des cellules photovoltaïques

I .8. Représentation des cellules PV :

I .8.1. Cellule photovoltaïque idéale (parfait) :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. D'après la loi de nœuds [10] :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{I.2}$$

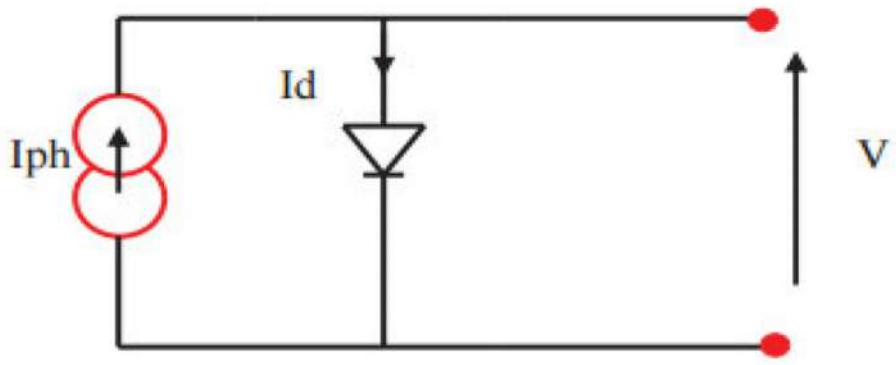


Figure I .8: Modèle de cellule photovoltaïque idéale [11].

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \tag{I.3}$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_a(Exp(\frac{V_d}{V_t}) - 1) \tag{I. 4}$$

Avec :

I_a **:** Le courant de saturation inverse de la diode [A].

V_d **:** La tension aux bornes de la diode [V].

V_t **:** Potentielle thermique.

Donc la relation devient **:**

$$I = I_{ph} - I_a(Exp(\frac{V_d}{V_t}) - 1) \qquad \text{(I.5)}$$

I .8.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale :

I .8.2.1.Avec une seule diode :

Le modèle photovoltaïque précédent ne prend pas en compte tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série RS et les courants de fuite par une résistance en parallèle RP.

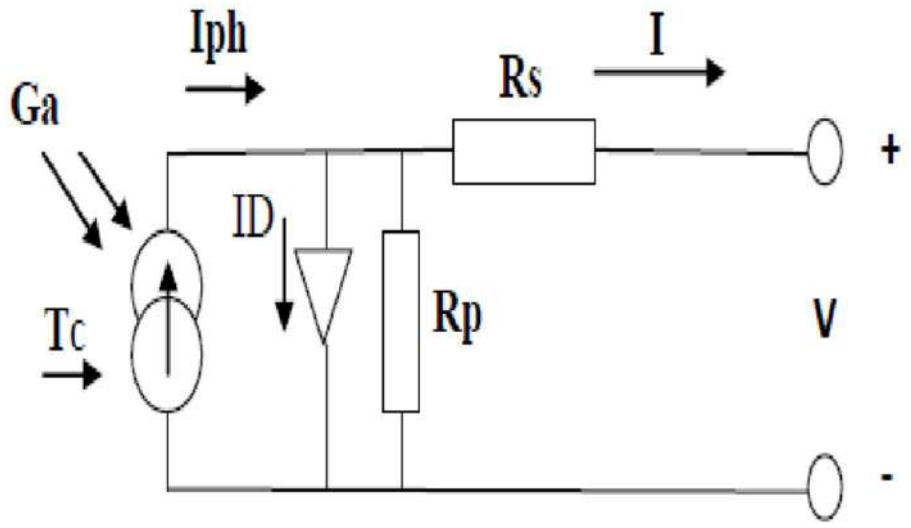


Figure I .9 : Modèle électrique d'une cellule PV idéale.

Avec :

- I: Le courant fourni par la cellule.
- I_{ph}: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).
- I_d : Le courant de saturation de la diode.
- R_s : Résistance en série.
- R_p : Résistance en parallèle.

I .8.2.2. Avec deux diodes :

Ce modèle a en plus une deuxième diode attachée en parallèle à la source de courant. Cette diode est utilisée pour améliorer la précision des caractéristiques de cellule PV. En plus elle prend en considération la différence dans le flux de courant lorsque le courant est faible à cause de la recombinaison des charges dans la zone de déplétion du semi-conducteur.

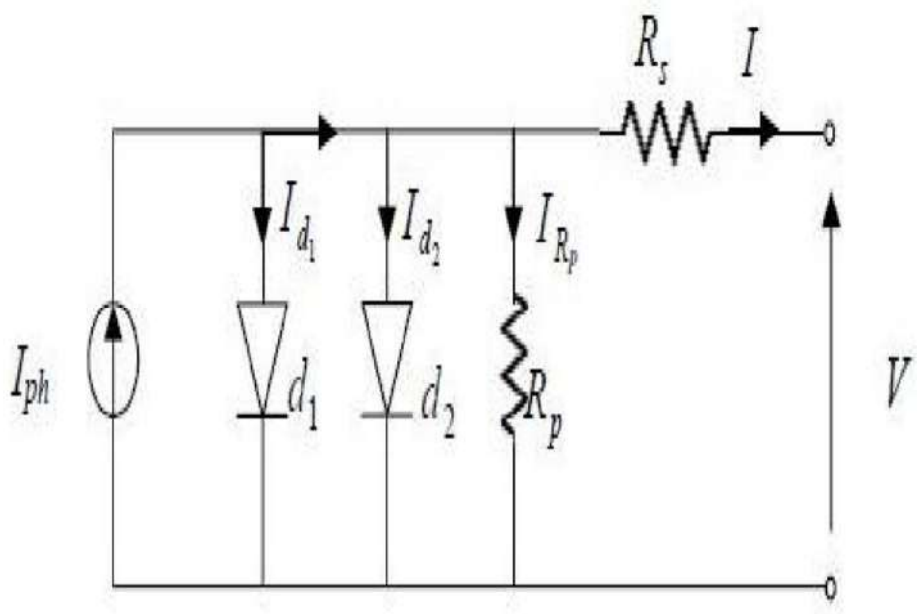


Figure I .10 : Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes.

Avec :

- I_{d1}: Le courant de diode 1 (A).
- I_{d2}: Le courant de diode 2 (A).
- I_{R_p} : le courant de résistance parallèle (A).

I .9. Influence de l'éclairement et de la température :

L'éclairement et la température ont une influence directe sur le rendement de la cellule et de la puissance générée par cette dernière.

I .9.1. Influence de l'éclairement :

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'éclairement pour une température donnée, de sort que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement [12].

Les figures (I .11 et I .12) présentent les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule/module PV sous différents niveaux de rayonnements.

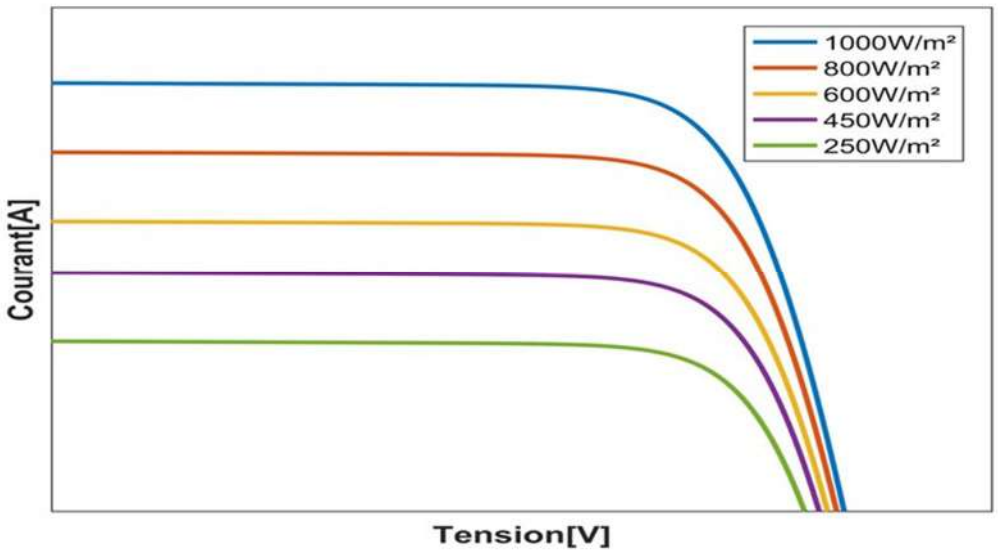


Figure I .11 : Influence du rayonnement sur la caractéristique I-V

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas de les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'éclairement standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000W/m2 et une température de 25◦ [13].

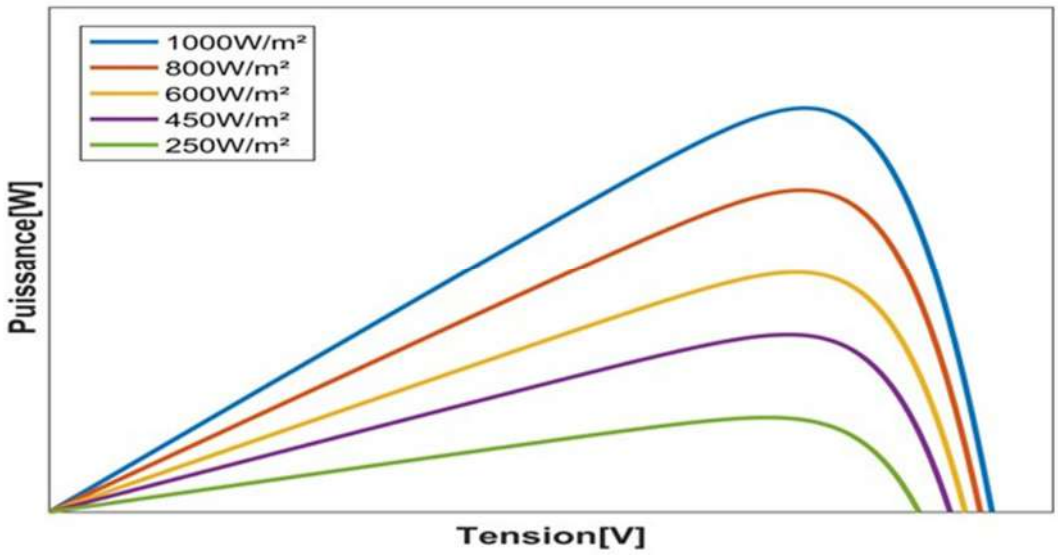


Figure I .12 : Influence du rayonnement sur la caractéristique P-V

I .9.2. Influence de la température :

Une grande partie du rayonnement absorbé par la cellule n'est pas convertie en énergie électrique, car il se dissipe sous forme de chaleur, ce qui va lui faire augmenter sa température. La tension de circuit ouvert diminue quand la température augmente, ceci engendre une diminution de la puissance maximale comme il est montré sur les figures(I .13 et I .14) [9].

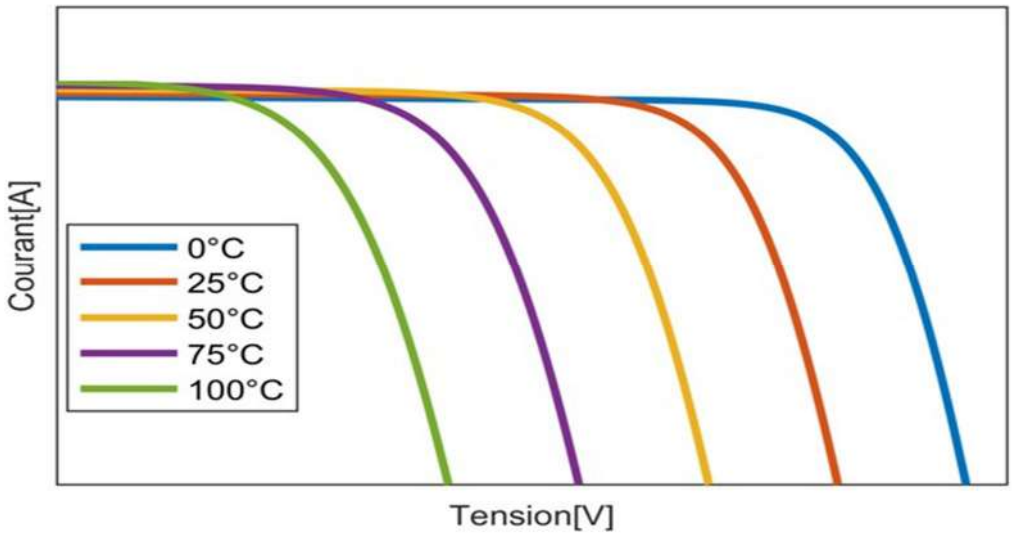


Figure I .13 : Influence de la température sur la caractéristique I-V

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit, par contre, la tension de circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent, la puissance extractible diminue.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0.5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25◦C [13].

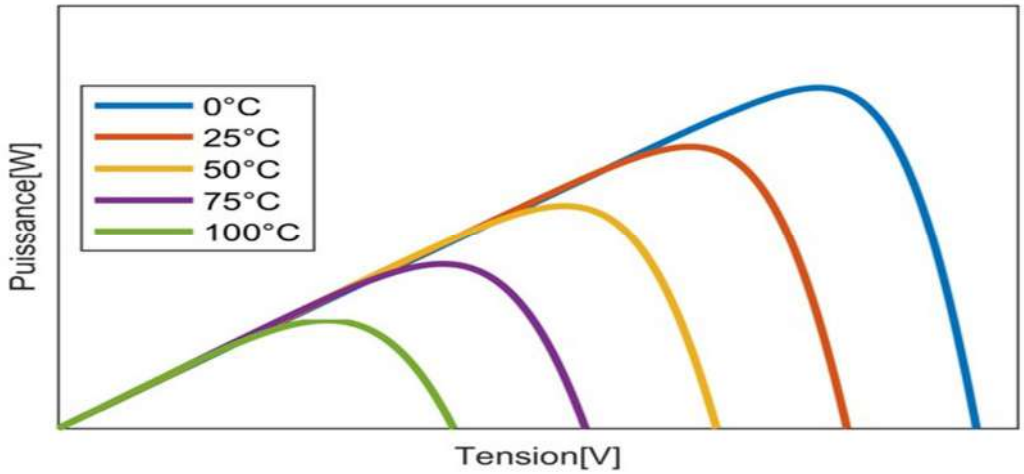


Figure I .14: Influence de la température sur la caractéristique P-V

I .10. Différentes topologies des systèmes PV :

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïque, on peut cependant les classer en deux groupes principaux. Le premier groupe inclut le système autonome, non reliés à un réseau électrique. L'autre groupe inclut des systèmes PV reliés différemment au réseau électrique. On cite dans ce qui suit les caractéristiques de chaque type [14].

I .10.1. System autonome (isolé) :

Ce système peut fonctionner indépendamment de toutes autres sources d'énergie, et dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Dans tel site, le champ photovoltaïque est dimensionné pour fournir de l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner des récepteurs précis (éclairage et équipement domestique). On aura besoin d'un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique et la réutiliser en l'absence de soleil.

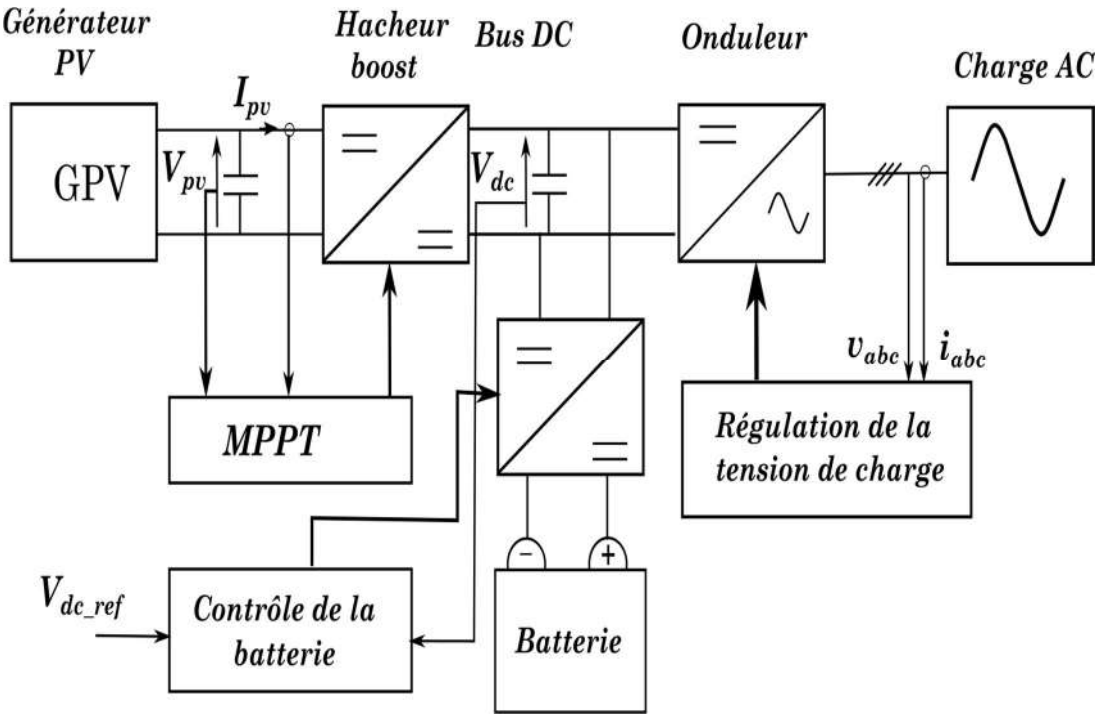


Figure I .15 : Diagramme général d'un système photovoltaïque autonome

I .10.2. Système connecté au réseau :

Les systèmes PV connectés au réseau gagnent de plus en plus de terrain puisque la demande de puissance dans le monde augmente. La disponibilité de ces sources d'énergie ainsi que leur respect pour l'environnement représentent des avantages majeurs par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, par contre leur efficacité et leur contrôlabilité restent leur principal désavantage. De plus, les opérateurs du système de transfert d'énergie doivent respecter certaines normes lorsque le système est connecté au réseau. Plusieurs critères doivent être satisfaits comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie.

Dans ce type de système PV, le champ photovoltaïque est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur, le rôle principal est d'injecter l'énergie électrique produite dans les réseaux électriques. Le particulier peut revendre tout ou partie de l'électricité qu'il produit. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'installer de batteries de stockage de l'énergie produite [15]. La structure de l'étage d'adaptation pour la connexion du générateur PV au réseau est représentée par la figure I .16

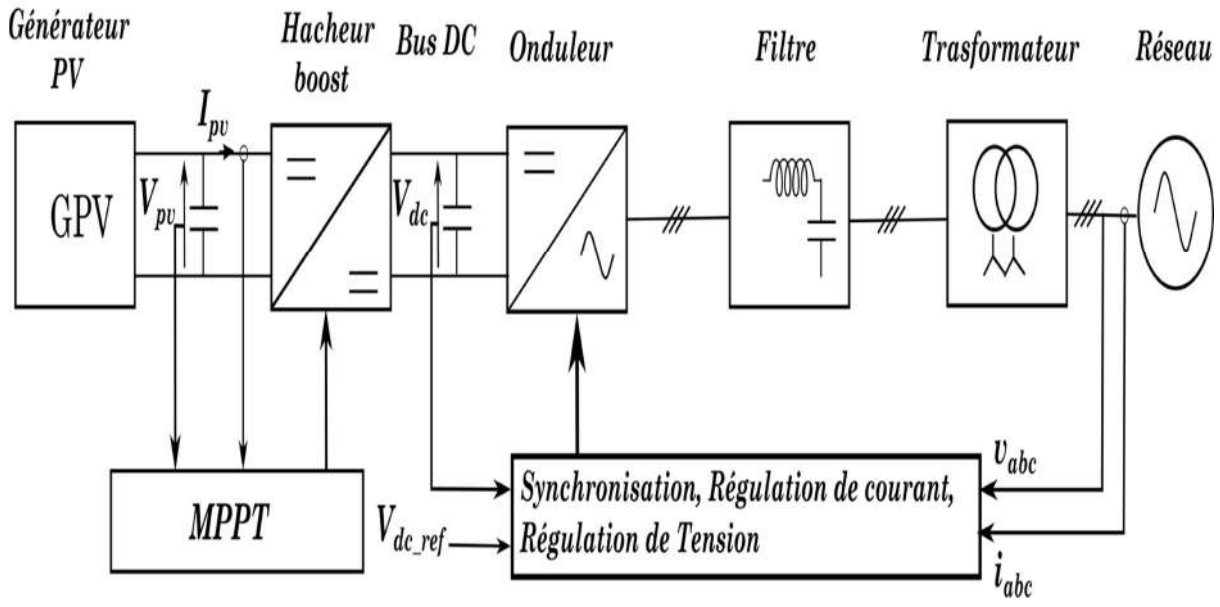


Figure I .16 : Diagramme général d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Toute la puissance produite par le panneau est transférée au réseau électrique. Le hacheur est relié directement au générateur PV, il permet d'élever la tension pour arriver à la valeur imposée au bus continu. Ce dernier est relié à un onduleur commandé en courant afin d'injecter celui-ci avec un facteur de puissance unitaire dans le réseau. Un filtre est utilisé à la sortie de l'onduleur afin de réduire les distorsions de courant et de la tension [17].

I .10.3. Système photovoltaïque avec stockage :

L'énergie électrique, en particulier celle générée par un système photovoltaïque, peut être stockée pour être réutilisée plus tard lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement ou dans le cas de l'incapacité du générateur PV de subvenir au besoin de la charge.

Cette énergie peut être stockée dans différents composants, qui sont principalement :

I .10.3.1. Batteries :

Le mode de stockage d'énergie électrique privilégie actuellement dans notre vie courante reste l'accumulateur. Qu'il s'agisse de téléphones portables ou de voitures, les batteries sont très largement répandues. La technologie est basée sur le concept chimique de pile : on accumule de l'énergie chimique. Fondamentalement, l'élément de base d'une batterie est composé de deux électrodes, jouant les rôles d'anode et cathode, ainsi que d'un électrolyte, en contact avec les électrodes et permettant la circulation des ions.

I .10.3.2. Accumulateurs à circulation :

Ceux-ci fonctionnent sur le même principe que les piles précédemment présentées, à ceci près que l'électrolyte est circulant, et donc, qu'il n'y a pas création de composés solides. Les composés chimiques responsables du stockage sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. De plus, cette technologie ne nécessite pas de substances très toxiques ou très réactives.

I .10.3.3. Pile à combustible :

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible repose sur l'oxydation d'un combustible (par exemple l'hydrogène) et la réduction d'un comburant (par exemple l'oxygène) aboutissant à la production simultanée d'eau, d'énergie électrique (W) et de chaleur (Q) [18].

I .10.3.4. Système photovoltaïque sans stockage :

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex : pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage) [14].

I .11. Avantages et inconvénients de la photovoltaïques :

I .11.1. Avantage de la photovoltaïques :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Génère l'énergie requise.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- Entretien minimal.

- Aucun bruit [19].

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I .11.2. Les inconvénients de la photovoltaïques :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km²) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. ·
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I .12. Protection des modules photovoltaïques :

Deux types de protection sont utilisés dans les installations actuelles, afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements.

- La protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courant négatifs dans les GPV (diode anti- retour).

- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaine (diode by-pass) [20].

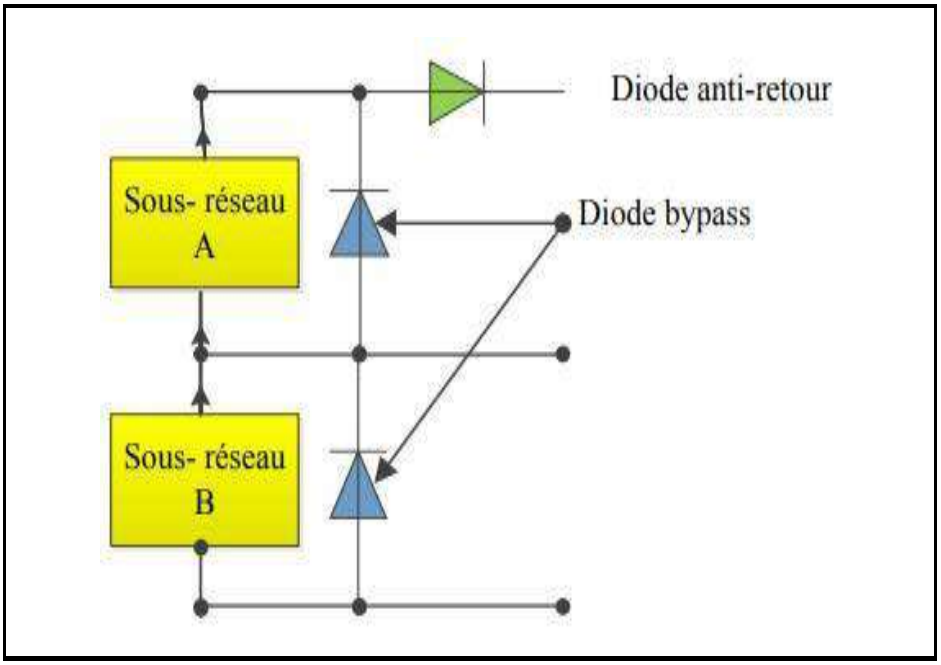


Figure I .17. Protection des modules par les diodes anti retour et by-pass [21]

I .13. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques des éléments d'un système photovoltaïque, ainsi que les modèles des cellules et ses caractéristiques électrique. On a également abordé l'influence de l'éclairement et de la température sur le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert de la cellule/module PV. On a également traité les différentes topologies des systèmes PV et les avantages et les inconvénients de la photovoltaïques. En dernier lieu, on a conflué le chapitre par présenter des solutions pour la protection des modules photovoltaïques.

Chapitre II :

Déscription du système résidentiel connecte au réseau

Chapitre II : Déscription du système Résidentiel connecte au réseau

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons aborder la composition du système photovoltaïque connectée à un système résidentiel.

Même s'il n'existe pas encore de réglementation et de norme standard, le photovoltaïque raccordé réseau doit respecter certains principes. Les différents retours d'expérience européens ont en effet permis de dégager une composition, des configurations et des schémas de raccordement communs, qu'il est nécessaire de les connaître pour comprendre l'intérêt du photovoltaïque raccordé au réseau résidentiel

Le but de ce chapitre est d'étudier quelques types de convertisseurs DC-AC (onduleur) utilisés dans les systèmes photovoltaïques, d'introduire les différents circuits de convertisseurs DC-DC. Ainsi, que de décrire quelques méthodes de la commande (Maximum power point Tracking) dit MPPT des convertisseurs DC-DC.

II.2. Structure du système :

Le système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau est constitué :

- D'un panneau photovoltaïque.

- D'une commande MPPT qui permet de faire fonctionner le générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Le signal de commande généré est la tension Vdc de référence.

- D'un onduleur DC/AC (Convertisseur DC/AC monophasé) utilisé pour bien adapter la source à la charge et au réseau électrique c'est-à-dire convertir la tension continue issue du système photovoltaïque en courant alternatif.

- D'un module de commande de l'onduleur, une charge résidentielle et à un réseau de distribution.

- D'une commande PLL capable d'évaluer d'une manière correcte l'angle de phase de la tension d'un réseau idéal. Cet angle de phase permet de synchroniser la source d'énergie PV avec le réseau électrique [22].

Figure II .1 montre la structure du système.

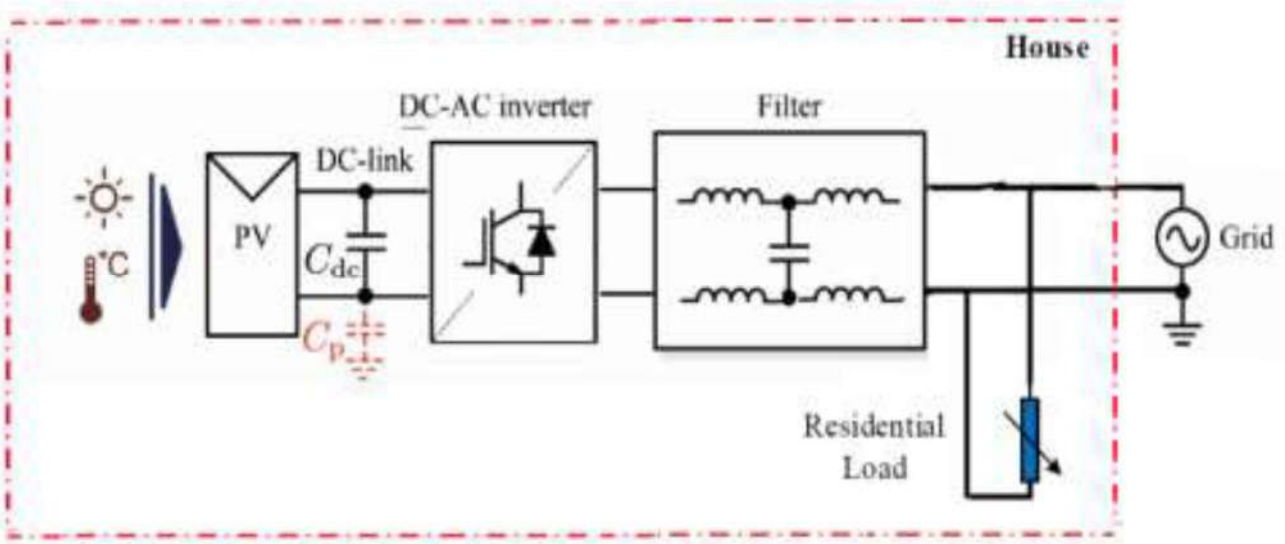


Figure II.1. Schéma fonctionnel général d'une topologie PV monophasée

II.3. Commandes MPPT :

II.3.1. Définition :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV. Il permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables [23].

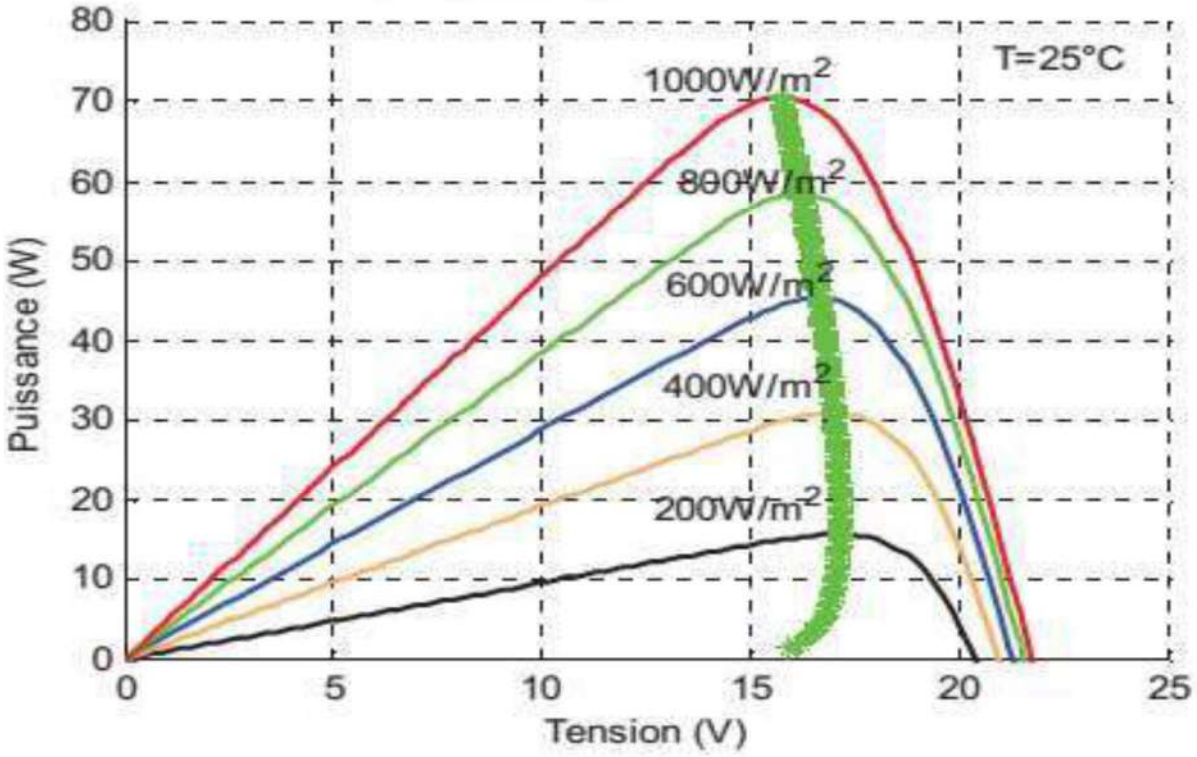


Figure II.2 : Courbe graphique pour MPPT de PV

II.3.2. Principe du MPPT :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

Figure II.3 donne le schéma fonctionnel d'un système de conversion d'énergie. Le système se compose d'un panneau PV, d'un convertisseur DC-DC, d'une commande de poursuite du point de puissance maximale et d'une charge .La commande MPPT agit sur le rapport cyclique de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge [24].

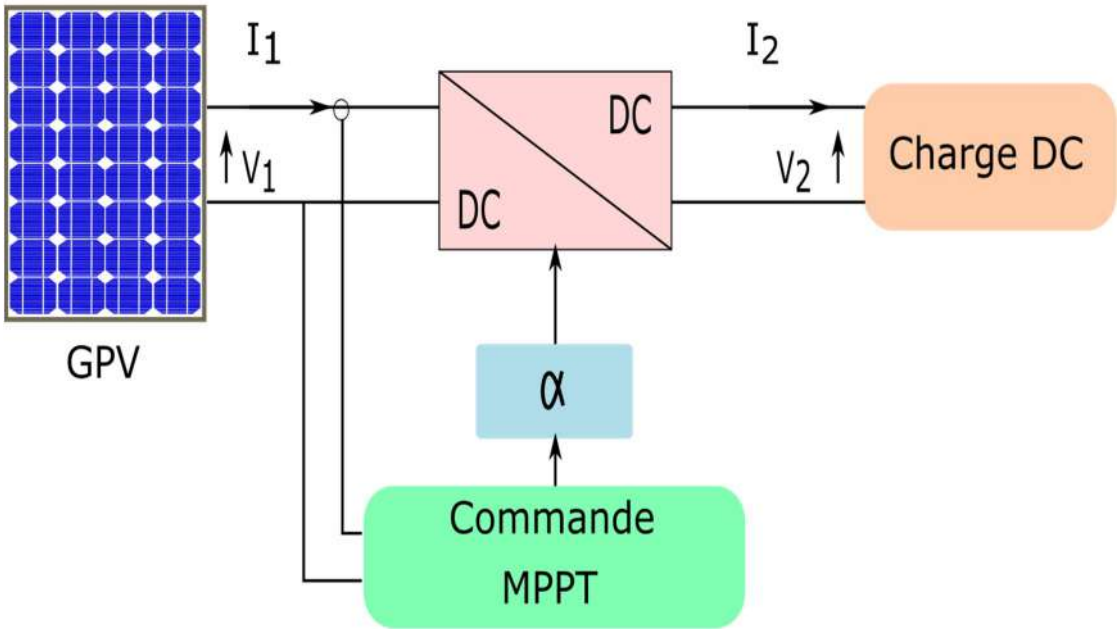


Figure II.3 : Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque

II.3.3. La méthode Perturbe et Observe (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV (VPV), il est alors facile de situer le point de

fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [24].

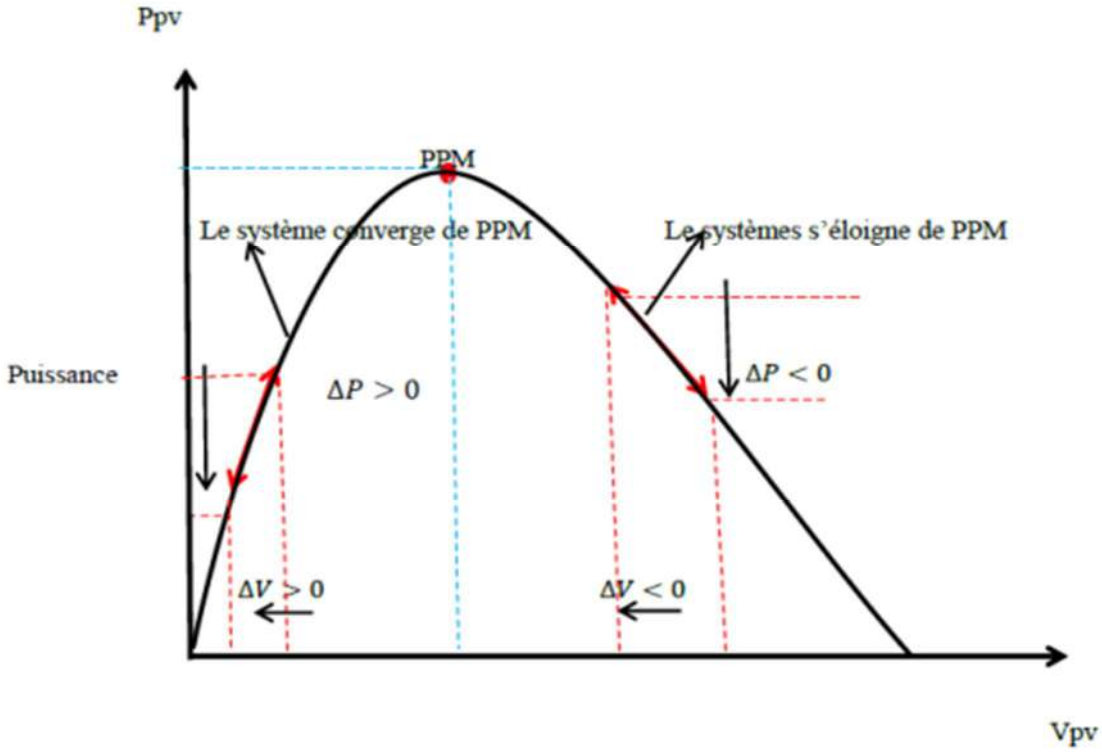


Figure II.4 : Schéma de converge vers le PPM par (P&O)

Figure II.5 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 [24].

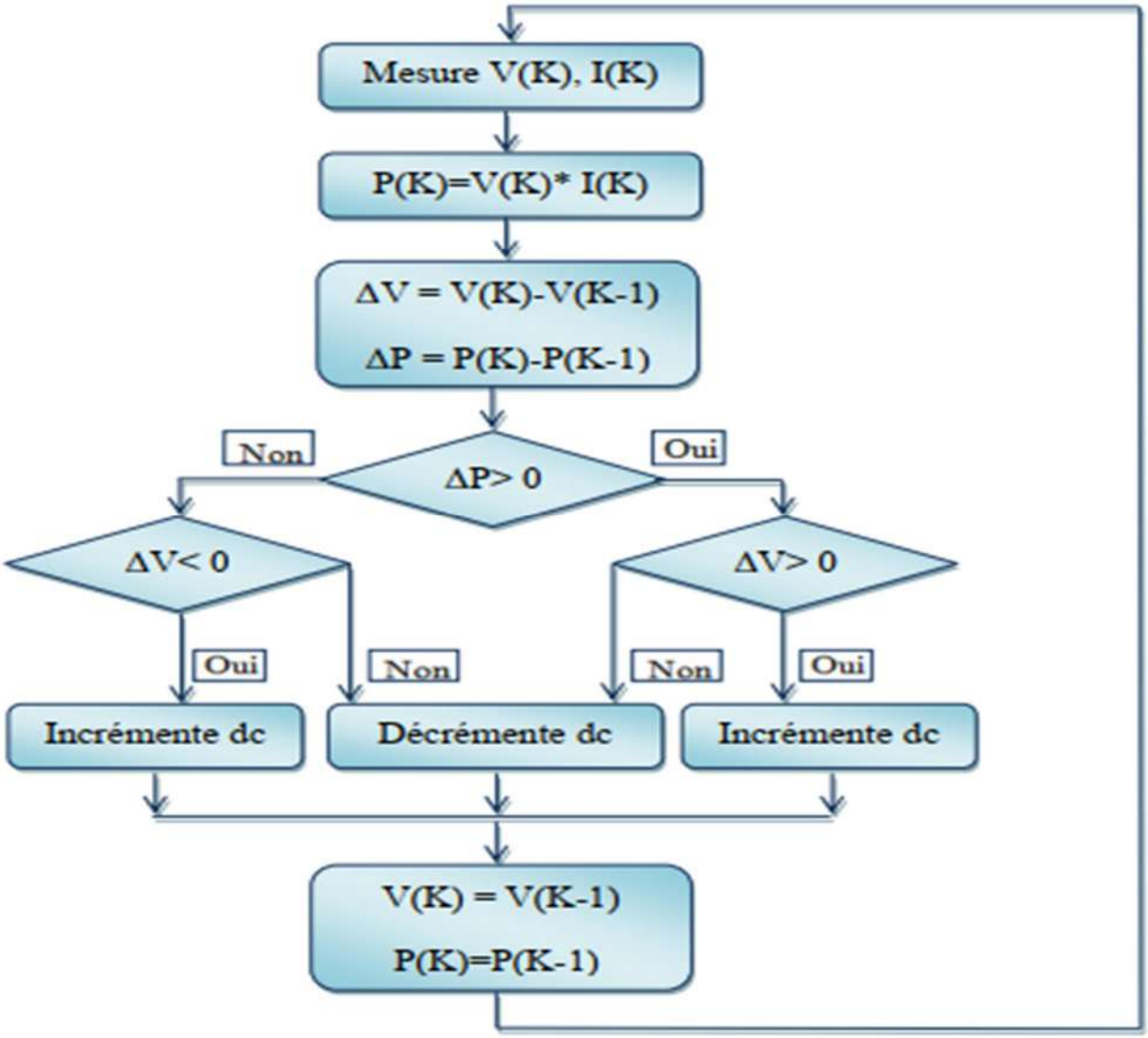


Figure II.5 : Algorithme de la méthode P&O.

Telle que :

$P_{pv}(k)$: La nouvelle puissance.

$P_{pv}(k-1)$: L'ancienne puissance dans le temps (t-1).

Alors :

$$\Delta V = V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1) \qquad \text{(II.1)}$$

$$\Delta P = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \quad \text{(II.2)}$$

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM. [24]

II.3.4. Avantages et inconvénient de (P&O) :

II.3.4.1.Avantage :

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesurés réduit

II.3.4.2.Inconvénients :

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.
- présente des oscillations autour du MPP [27].

II.3.5. La méthode de la commande « Incrément de conductance » (Inc - Cond) :

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous [25].

$$G = \frac{I}{V} \quad \text{(II.3)}$$

Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI}{dV} \tag{II.4}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure (II.6) permet d'écrire les conditions suivantes :

Si $\frac{dP}{dV} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM.

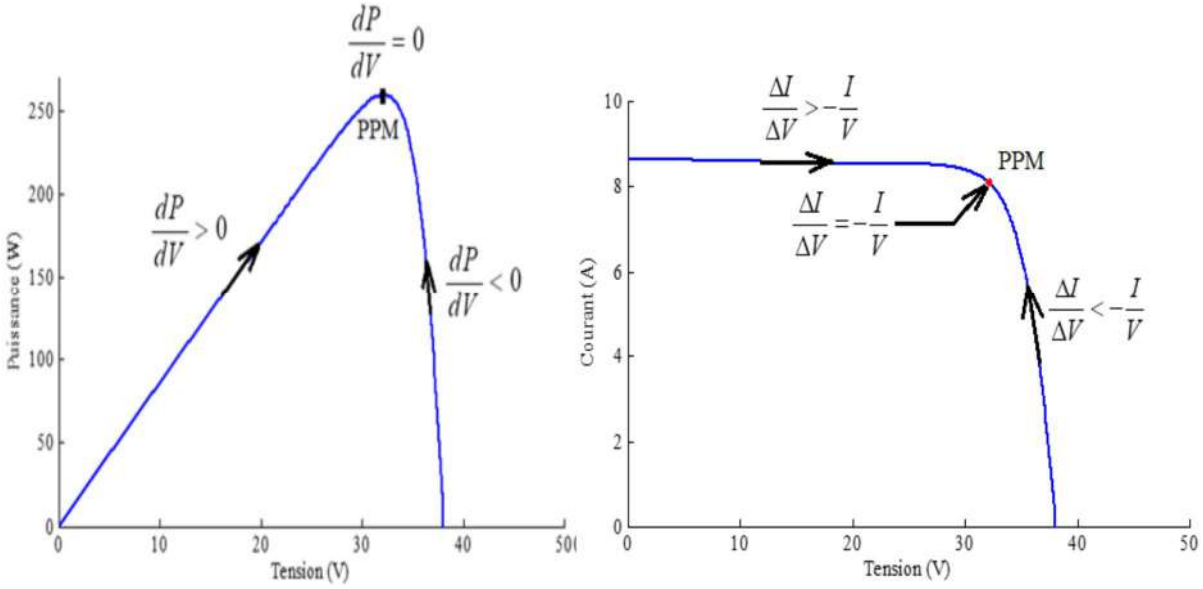


Figure II.6 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la Conductance G et de la puissance P

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (II.3) et la dérivée de la puissance $\frac{dP}{dV}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \cong I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} \qquad \text{(II.5)}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique α.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique α restent constants.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique α.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance $\left(\frac{I}{V}\right)$ avec celle de l'incrément de conductance $\left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right)$ comme l'illustre l'algorithme de la figure (II.7).

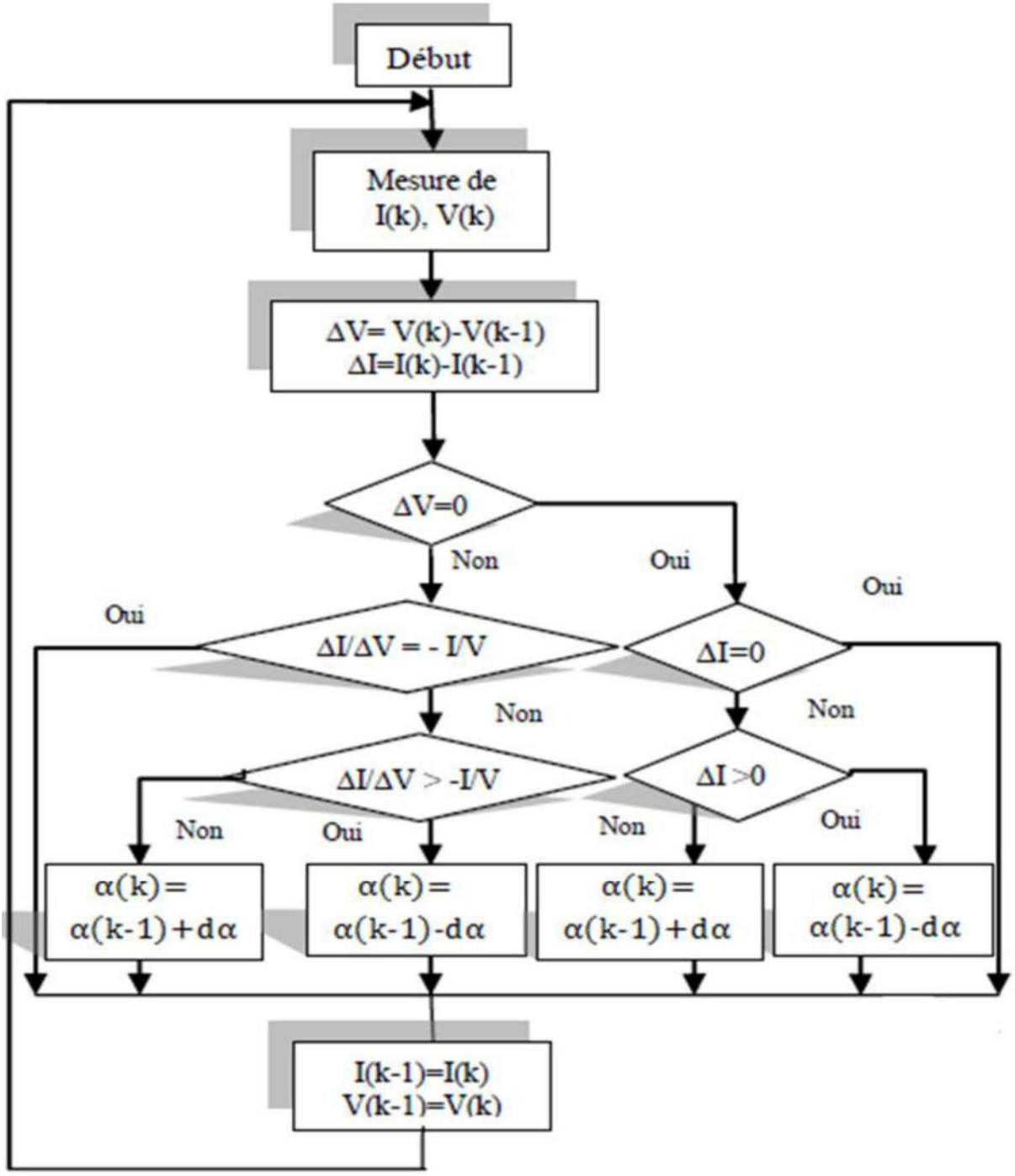


Figure II.7 : Organigramme de l'algorithme Inc-Cond

$d\alpha$: Pas d'incrémentation de l'algorithme Inc-Cond.

Le terme $\left(\frac{I}{V}\right)$ est la conductance instantanée alors que $\left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right)$ désigne la variation de cette conductance. Pour éviter que la différentielle de la tension du panneau ΔV ne devienne nulle,

lorsque le PPM est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui va conduire à une division par zéro, l'algorithme fait un test de ΔV.
Si ΔV est nul il teste si le $\Delta I = 0$. Si c'est le cas alors le *PPM* est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de ΔI pour déterminer la position du *PPM* et ajuste le rapport cyclique α. Si $\Delta I > 0$ donc on décrémente le rapport cyclique α, dans le cas contraire on incrémente ce dernier [26].

Si ΔV est différent de zéro, il teste si $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$. Si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ pour déterminer la position du *PPM* et ajuste le rapport cyclique α.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ donc on décrémente le rapport cyclique α, dans le cas contraire on incrémente ce dernier.

II.4. Convertisseur DC/AC monophasé source de tension (Onduleur) :

Un onduleur (DC-AC) est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour : [28]

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [28]. Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation.

Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde.
Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion :

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

II.4.1. Définition de l'onduleur monophasé :

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de fabriquer un échange d'énergie entre une source de tension continue fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. Cette fonction est schématisée sur la figure II.8 [29].

La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composant à semi-conducteur entièrement commandables, puissants et robuste et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des technique dites de modulation de largeur d'impulsion [29], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique.

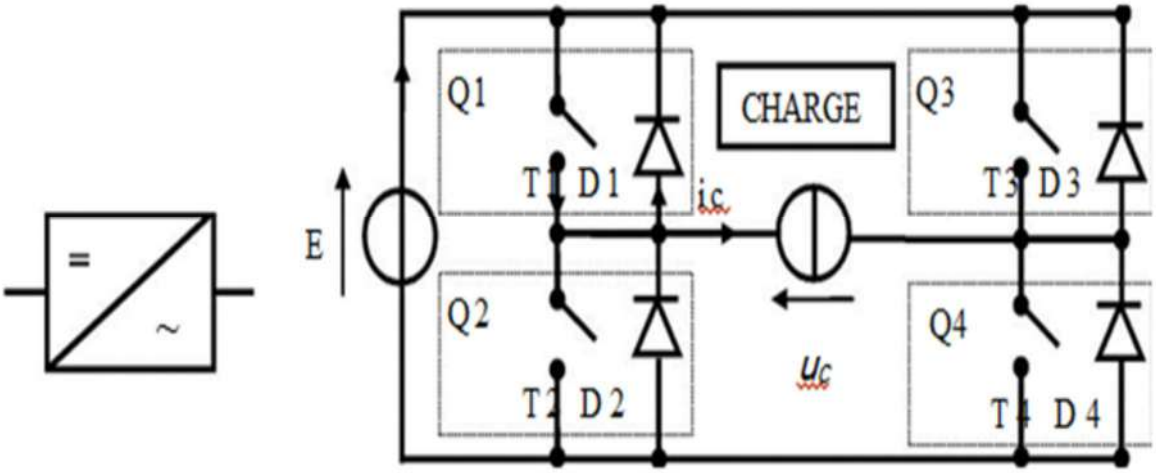


Figure II.8 : Onduleur monophasé : Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet

On notera que :

- T_1, T_2, T_3, T_4 *:* Transistors de puissance.
- D_1, D_2, D_3, D_4 *:* Diodes de puissance.
- Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 *:* Transistors avec une diode antiparallèle.
- E *:* Tension continue.
- $U_c . I_c$ *:* La tension et le courant de la charge.

La Figure II.8 rappelle le schéma symbolique de l'onduleur et le montage d'un onduleur en pont complet. Le montage consiste deux bras ; chaque bras est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux composant semi-conducteur (transistors IGBT ou MOSFET) avec une diode en antiparallèle. Les diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde à la sortie.

II.5. La commande à MLI :

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse With Modulation ou Modulation de la Largeur d'Impulsion en Français) est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois référence sinusoïdales sont déphasées de120° à la même fréquence f [30].

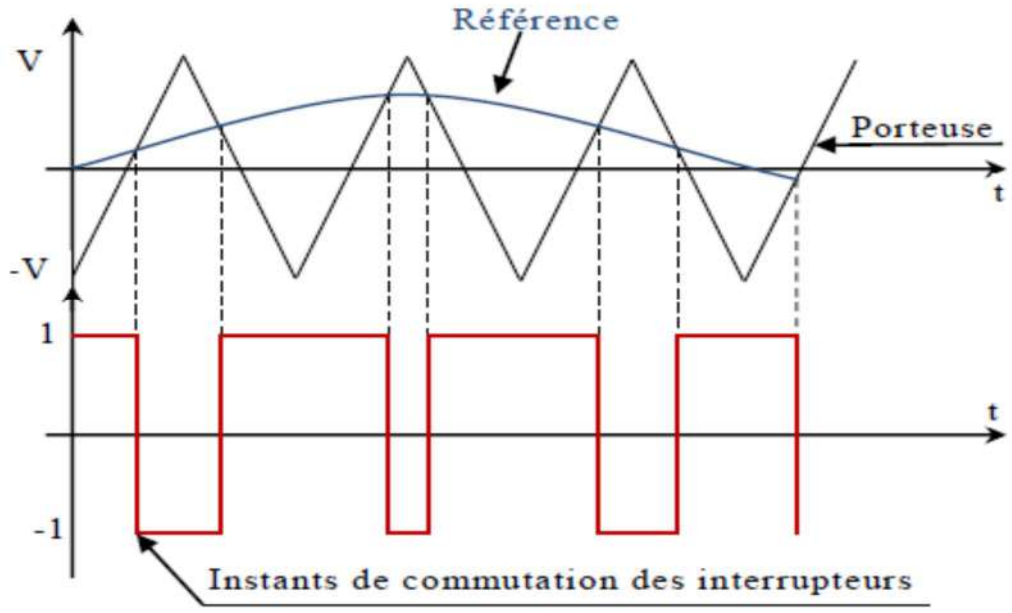


Figure II.9 : Principe de la MLI bipolaire [27].

II.6. Synchronisation par PLL :

Les boucles à verrouillage de phase appelées PLL (PLL = Phased Locked Loop) sont utilisées afin de connecter des sources à énergies renouvelables au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur PV avec celle du réseau en matière de phase et de fréquence tout en contrôlant celles relatives au réseau [31].

Les techniques de PLL recherchent une poursuite robuste de la phase du réseau malgré l'existence des perturbations. Les principales perturbations sont : saut de phase, creux et bosses de tension (Creux de tension c'est une sous-tension, Bosse c'est une surtension.), harmonique, saut de fréquence.

Les PLL monophasées sont soumises aux mêmes problèmes qu'en triphasé avec une difficulté supplémentaire qui tient du champ d'information plus réduit (une seule phase).

Pour créer 2 signaux orthogonaux, la PLL triphasée peut utiliser la transformation de Park, mais pour la PLL monophasée, il faut rajouter un bloc ≪ Quadrature ≫ de démodulation, voir la figure II.10.

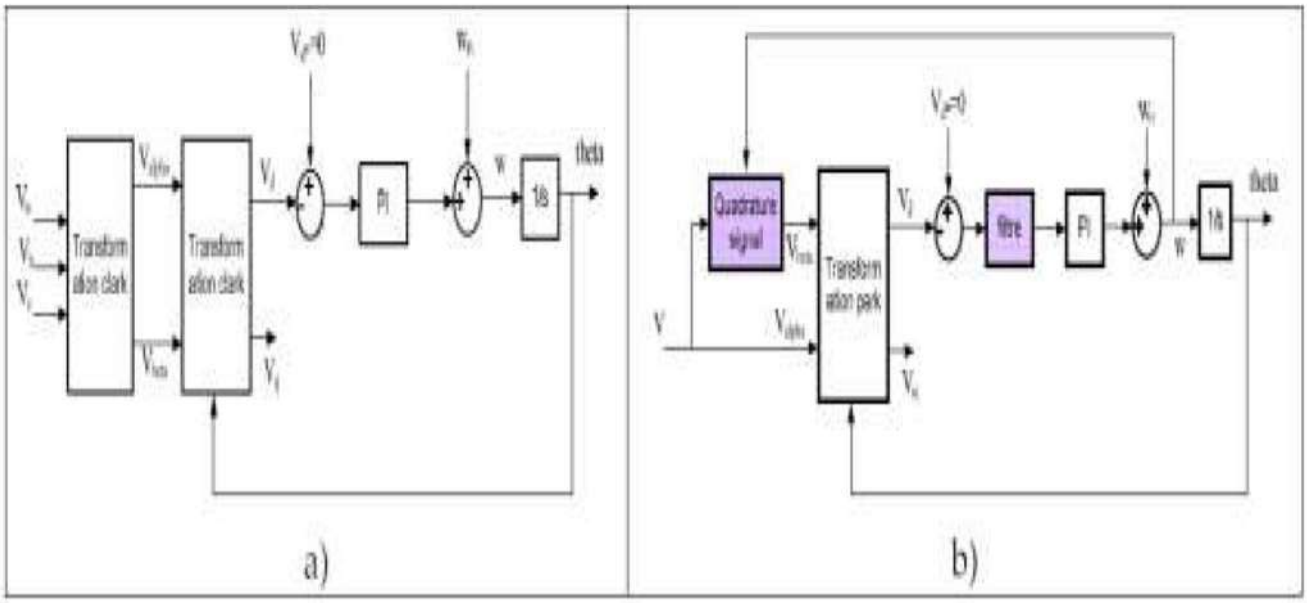


Figure II.10 : Structure de principe d'une PLL triphasée (a) et monophasée (b)

II.7. Le filtre LCL :

Pour tous les onduleurs, un filtre de sortie passe-bas est nécessaire pour obtenir la sortie de fréquence fondamentale. Généralement, il existe quatre types différents de filtres utilisés pour les onduleurs : les filtres L, LC, LCL et LLCL.

Le filtre LCL (Figure II.11) est largement utilisé depuis ces dernières années avec les onduleurs connectés au réseau en raison de son atténuation élevée au-delà de la fréquence de résonance.

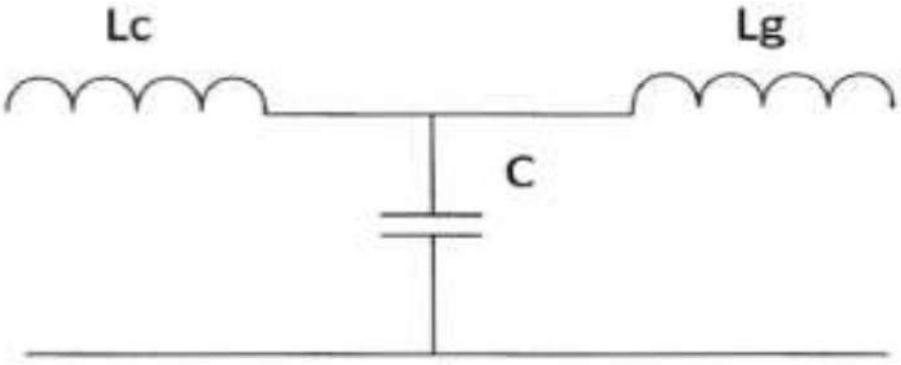


Figure II.11 *:* Schéma du filtre LCL

II.8. La charge résidentielle :

Plusieurs types de charges résidentielles existent. On trouve généralement des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc.

Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive.

II.9. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents composants qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Ainsi que le principe de fonctionnement de chaque élément tels que : Convertisseur DC/AC, la technique MLI, PLL, MPPT, Le filtre LCL, et la charge résidentielle.

Dans notre étude, on a visé deux point, le premier c'est la commande MPPT et le deuxième point c'est la commande des courants directe et en quadrature de l'onduleur monophasé avec la technique de contrôle par recherche d'extremum (extremum seeking control)

Chapitre III :

La technique de Contrôle par recherche d'extremum (Extremum seeking control)

Chapitre III: *La technique de contrôle par Recherche d'extremum*

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudie la technique de contrôle par recherche d'extremum (extremum seeking control), Nous présentons d'abord l'objectif de cette technique et les principes fondamentaux de ce type de commande en générale.

Cette commande est utilisée pour le contrôle du système photovoltaïque connecté aux réseaux électrique.

III.2.L'historique de la technique de contrôle par recherche d'extremum :

La première oeuvre remarquable a été réalisée par Leblanc en 1922 [32], En effet la paternité de cette approche est attribuée à Maurice Leblanc, ingénieur et industriel français du début du XX^{ieme} siècle. Le problème traité est celui de la commande des moteurs de locomotives par un courant alternatif. L'auteur propose de faire varier de manière automatique une auto-induction (self-induction) pour rendre maximale l'intensité d'un courant induit. Comme souligne par Ariyur et Krstić (2003) [33] [34], cette méthode de commande extrémale représente le premier algorithme de commande adaptative.

Au cours des années soixante, les travaux relatifs à la commande adaptative se scindèrent en deux axes de recherche : celui concernant le problème de la stabilisation de la sortie d'un système dynamique et celui dont l'objectif est l'optimisation d'une fonction de la sortie d'un système dynamique (Astrom, 1995 [35]), (Sternby, 1980 [36]). Dans la première catégorie, la stabilité du schéma de commande adaptative par modèle de référence ("M.R.A.C." pour Model Reference Adaptive Control) est demontree par Parks (1966) [37] en utilisant le formalisme des fonctions de Lyapunov. La seconde catégorie n'a pu, quant à elle, faire l'objet

d'une analyse de stabilité rigoureuse que jusqu'à récemment avec la publication par Krstic et Wang (2000) d'une preuve formelle de convergence du schéma de commande extrémale par la méthode des perturbations.
Cette contribution majeure a renouvelé l'intérêt de la communauté automaticienne pour cette classe de méthodes et stimule la publication de nombreux travaux portant autant sur la synthèse de méthodes originales que sur leurs applications.

III .3. L'objectif de La technique de contrôl*e* par recherche d'extremum :

L'objectif de l'ESC est de forcer le point de fonctionnement à être aussi proche que possi ble de l'optimum pour un système décrit par une fonction non linéaire inconnue avec un seul extremum (C.-à-d. un maximum ou un minimum) [28].

Le principe de l'ESC sinusoïdal, illustré par
la figure III.1, peut être résumé comme suit :

- Si un signal sinusoïdal de faible amplitude est ajouté au signal d'entrée « x ». Le signal de sortie « y » oscille autour de sa valeur moyenne.

- Les deux signaux sinusoïdaux seront en phase si le signal d'entrée « x » est à gauche du point maximum de la fonction non linéaire (fonction objective) et déphasé de 180° si le signal d'entrée « x » est à droite du point maximum de la fonction objective (figure III.1).

- On peut remarquer que lorsque le signal d'entrée « x » atteint le maximum, le signal de sortie « y » double sa fréquence . On peut également distinguer que l'amplitude de l'ondulation du signal de sortie « y » dépend de la pente de la courbe $y = f(x)$.

- On peut aussi noter que lorsque le signal « y » est multiplié par un sinusoïdal de la même fréquence et phase, le signal de sortie « g » est positif avant le maximum et négatif à droite du maximum (figure III.1) [28].

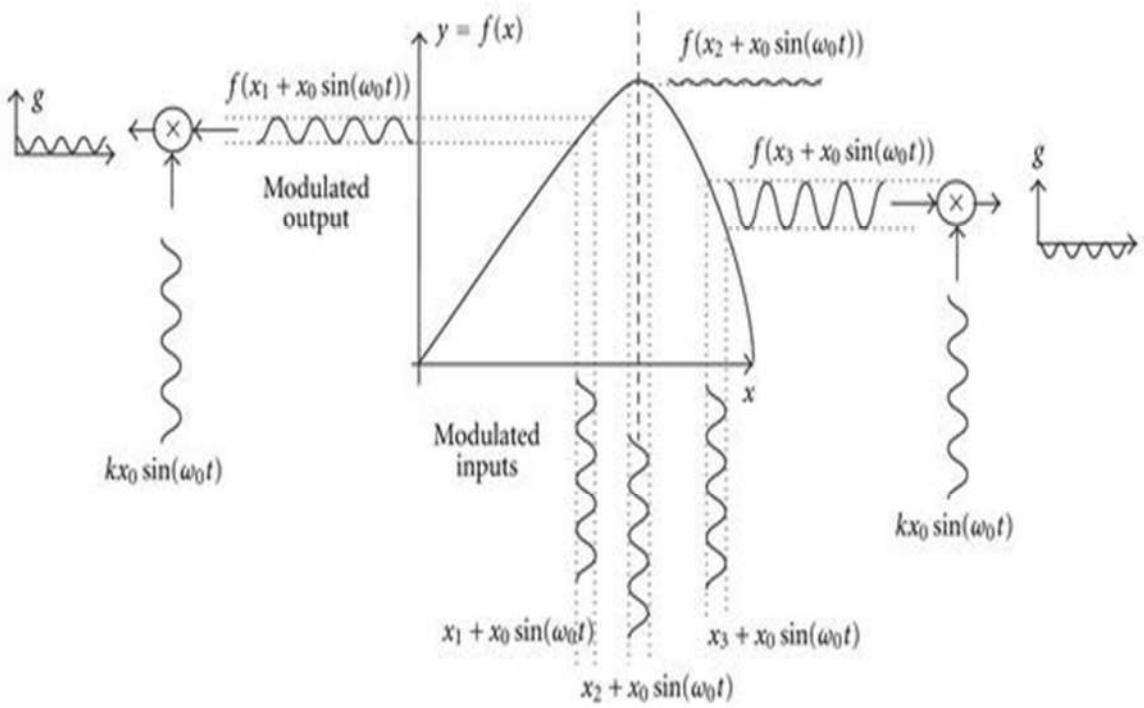


Figure III.1 : Principe de la technique ESC sinusoïdal [28].

La méthode est représentée par le schéma de la figure III.2. Le schéma se compose du modèle non linéaire du système a commandé d'un intégrateur et d'un bloc de Détection, et d'un petit signal sinusoïdal (perturbation imposée)

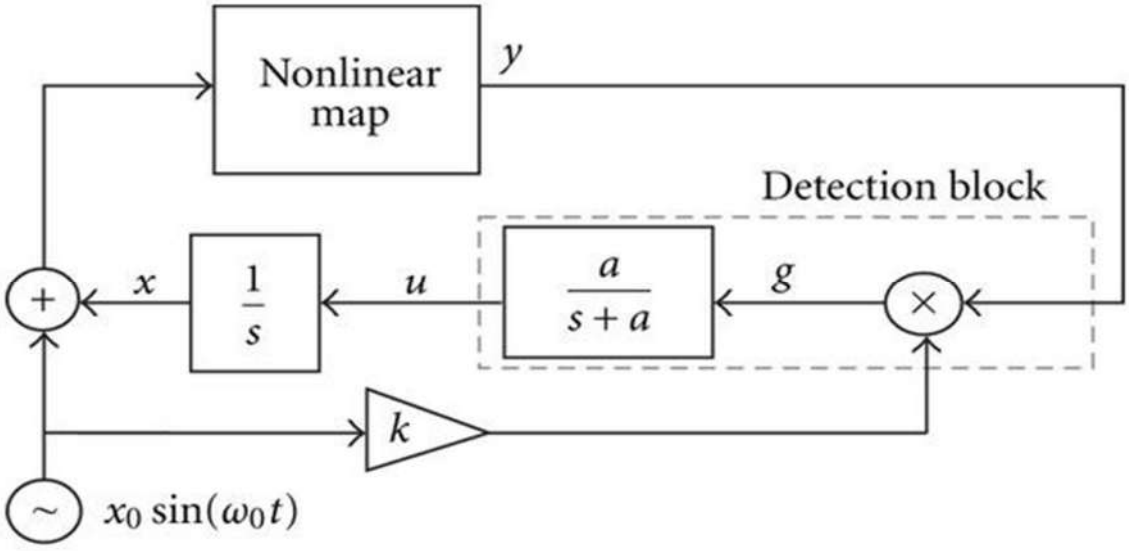


Figure III.2 : Schéma de la technique ESC sinusoïdal.

III .4. Le système de commande de l'onduleur :

Le système de commande de l'onduleur contient :

III .4.1. Régulateur MPPT :

- Ce système MPPT fait varier automatiquement le signal de référence Vdc du régulateur Vdc de l'onduleur.

III .4.2. Régulateurs des courants :

- Régulateur V_{dc} : Déterminez la référence du courant $<< I_d >>$ (courant actif) requise pour le régulateur du courant.
- Régulateur du courant : Sur la base des références actuelles $<< I_d >>$ et $<< I_q >>$ (courant réactif).
- Le régulateur détermine les tensions de référence requises pour l'onduleur.
- La référence « Iq» est imposé égale à zéro.

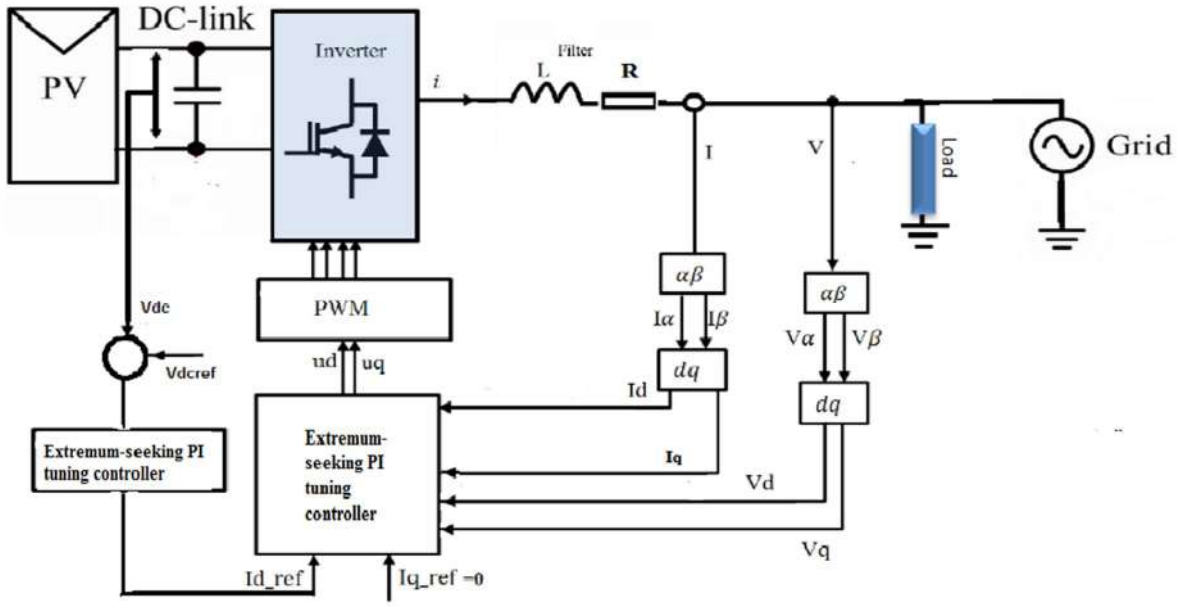


Figure III.3 : Diagramme de commande de l'onduleur

Les onduleurs monophasés raccordés au réseau sont habituellement nécessaires pour contrôler l'amplitude de la tension du bus CC et injecter un courant sinusoïdal dans le réseau.

Le système de commande est habituellement composé de régulateurs en cascade employés dans la boucle externe pour réguler la tension et la boucle interne pour commander le courant. Typiquement, l'onduleur fonctionne avec un facteur de puissance unité.

III. 5. MPPT basé sur la technique de contrôle par recherche d'extremum :

Le schéma proposé pour le régulateur MPPT est représenté par la figure III.4.

- MPPT basé la technique de contrôle par recherche d'extremum ce classe parmi les algorithmes qui cherchent le maximum d'une fonction de coût.
- Un système régi par l'ESC oscille automatiquement autour de l'optimum ou l'oscillation est forcée par un signal sinusoïdal.

- 'ESC sinusoïdal est appliqué pour suivre la MPP du système PV.

- La fonction du coût considérée dans notre cas c'est la puissance délivrée par le système photovoltaïque.

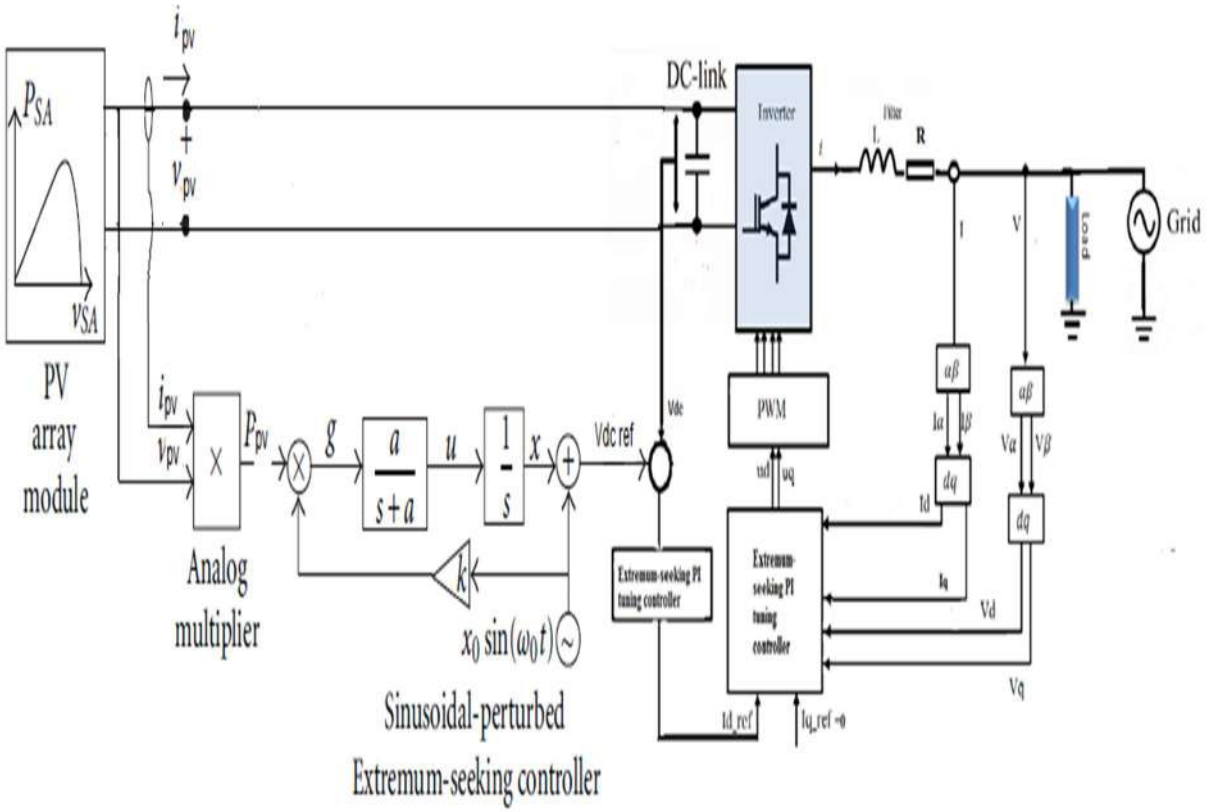


Figure III.4 : Schéma proposé pour le régulateur MPPT

III.6. Contrôle PID adaptatif :

ES est utilisé pour régler les paramètres d'un contrôleur PID afin de minimiser une fonction de cout donnée .La fonction de cout, qui quantifie l'efficacité d'un contrôleur PID est la fonction de cout ISE (Integrated Square Errors) [38].

$$J(\theta) = \frac{1}{T - t_0} \int_{t_0}^{T} e^2(t, \theta) dt \qquad \text{(III.1)}$$

avec $i = 1, 2, 3$.

Où l'erreur de sortie de

$$e(t) = r(t) - y(t), \tag{III.2}$$

Est la différence entre la référence et le signal de sortie du système en boucle fermée Et et θ est donné par :

$$\theta = [K, T_i, T_d]^T \tag{III.3}$$

Cette recherche propose un contrôle de recherche d'extrémité basé sur des signaux de perturbation périodiques pour adapter les paramètres de contrôle PID branchés dans le système en boucle fermée et minimiser la fonction de coût choisie pour refléter les attributs de performance souhaités. Le contrôleur est paramétré comme suit :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \forall_t \geq 0 \tag{III.4}$$

Où u(t) est le signal de contrôle et les constantes

$$K_p = K > 0 \tag{III.5}$$

$$K_i = \frac{K}{T_i} > 0 \tag{III.6}$$

$$K_d = KT_d > 0 \tag{III.7}$$

Sont les gains proportionnels, intégraux et dérivés [39].

III.8. conclusion :

Les approches de recherche d'extremum sont proposées pour régler les paramètres des contrôleurs PID du courant et de la tension du bus DC et comme contrôleur MPPT dans un réseau connecté au système photovoltaïque résidentiel.

Chapitre IV :

Résultats de simulation

Et

Discussions

Chapitre IV :
Résultats de simulation Et discussions

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulations des différentes techniques de commande proposées sous une température de 25° et différente irradiations.

Les résultats obtenus ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2. Introduction à MATLAB :

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.

MATLAB est un interpréteur : les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne.

MATLAB fonctionne dans plusieurs environnements tels que X-Windows, Windows, Macintosh.

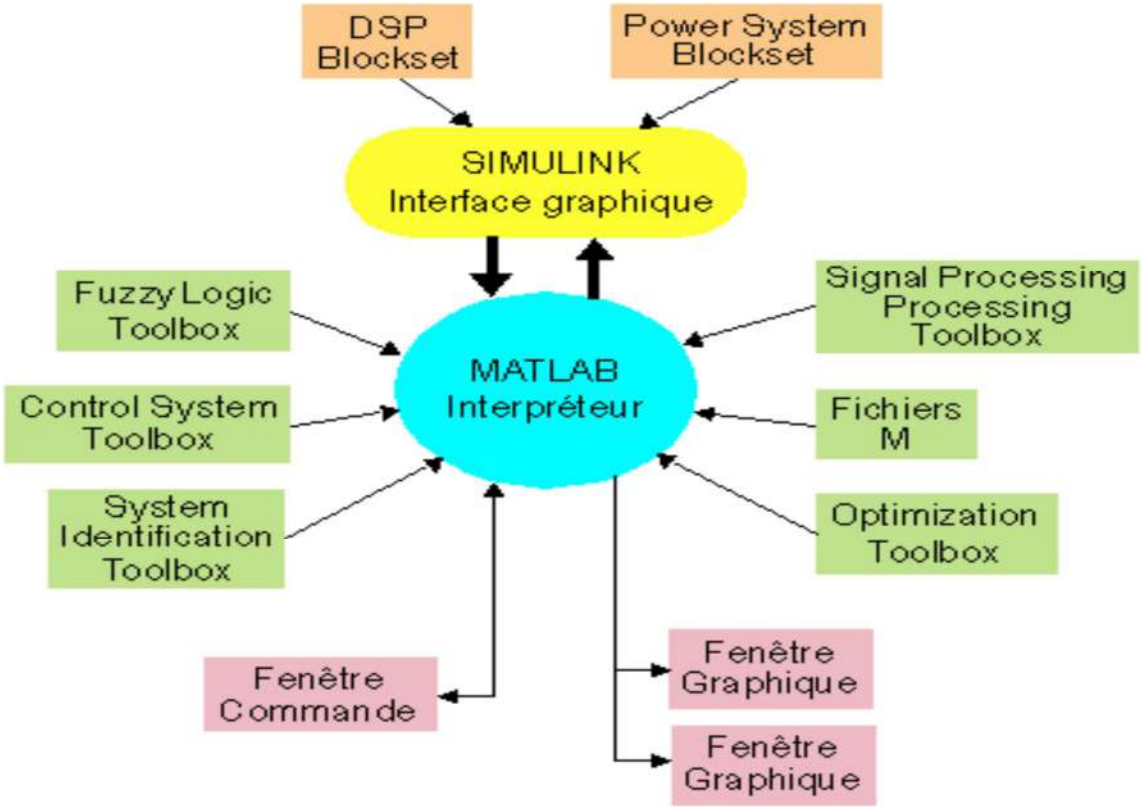
Il existe deux modes de fonctionnement :

IV.2.1. Mode interactif :

MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'usager.

IV.2.2.Mode exécutif :

MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langageMATLAB).



FigureIV.1 Environnement MATLAB

- **Fenêtre Commande :**

  Dans cette fenêtre, l'usager donne les instructions et MATLAB retourne les résultats.

- **Fenêtres Graphique :**

  MATLAB trace les graphiques dans ces fenêtres.

- **Fichiers M :**

  Ce sont des programmes en langage MATLAB (écrits par l'usager).

- **Toolboxes :**

Ce sont des collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques (Signal Processing Toolbox, System Identification Toolbox, Control System Toolbox, u-Synthesis and Analysis Toolbox, Robust Control Toolbox, Optimization Toolbox, Neural Network Toolbox, Spline Toolbox, Chemometrics Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, etc.)

- **Simulink :**

C'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des diagrammes en blocs.

- **Blocksets** *:*

Ce sont des collections de blocs Simulink développés pour des domaines d'application spécifiques (DSP Blockset, Power System Blockset, etc.) ;

IV.3.Description de système :

La figure IV.2 représente le schéma bloc d'un système résidentiel relié au réseau électrique

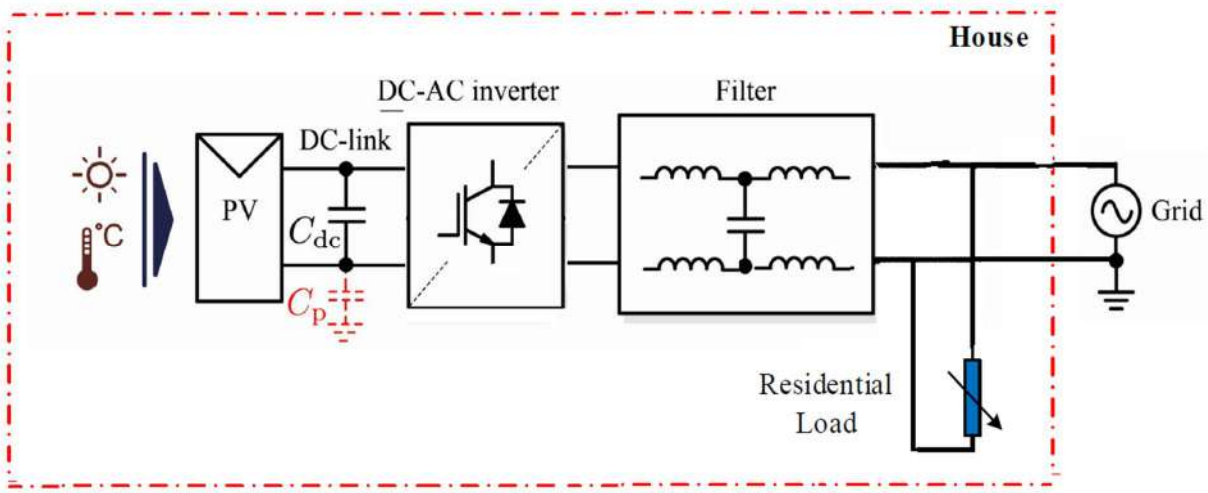


Figure IV.2. Schéma bloc d'un système résidentiel relié au réseau électrique.

Le système est composé d'un générateur PV connecté à un réseau de 14.4kV par l'intermédiaire d'un convertisseur de tension monophasé continu-alternative (onduleur). La commande de cet onduleur est mise en œuvre en utilisant la technique de contrôle par recherche de l'extremum (Extremum Seeking Control).

Le modèle contient :

- Panneaux photovoltaïques utilisés est une chaîne de 14 modules Trina Solar TSM-250connectés en série. La puissance fournit dans les conditions standards de température et irradiation est de 3.5 kW.

- L'onduleur est modélisé à l'aide d'un module IGBT monophasé à pont complet contrôlé par MLI.

- La topologie du filtre côté réseau est la configuration LCL classique avec les inducteurs répartis également entre les branches ligne et neutre.

- La charge résidentielle (10 kW / 4 kvar avec 240 Vrms).

- Le réseau électrique est modélisé à l'aide d'un transformateur d'une source AC idéale de 14,4 kVrms. L'enroulement secondaire du transformateur 240V est à prise centrale.

IV.4. Les régulateurs du VSC (Convertisseur source de tension) :

- La commande VSC qui contrôle les courants I_d et I_q (composants active et réactive du courant).

- La commande MPPT qui fournit la tension $V_{dc\,\mathrm{Re}\,f}$

- La commande de la tension V_{dc} qui fournit le courant $I_{d\,\mathrm{Re}\,f}$

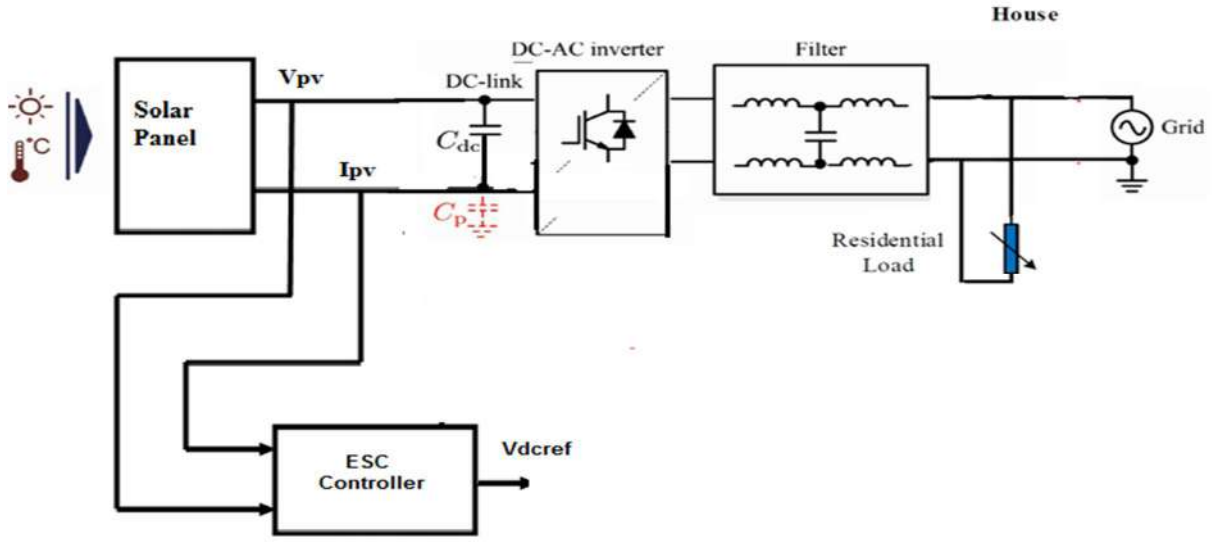


Figure IV.3 : Génération de la tension de référence du Bus continu

La référence du courant I_q est fixée à zéro, afin de maintenir le facteur de puissance à1. Les sorties de tension V_d et V_q du régulateur de courant sont converties en 2 signaux de modulation U_{ref} utilisés par le générateur d'impulsions MLI (PWM).

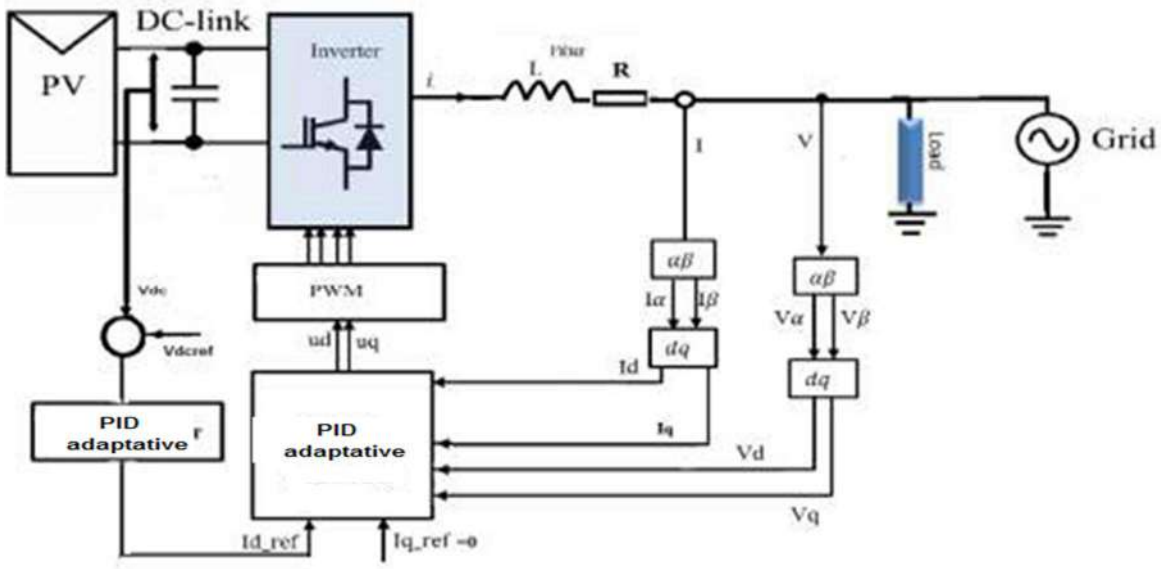


Figure IV.4 : La structure du VSC

IV.5. Les résultats des simulations :

Les simulations ont été effectuées sous une température constante 25° C et différentes valeurs d'irradiations (Figure IV.5). La puissance PV généré varie suivant l'irradiation imposée (Figure IV.5).

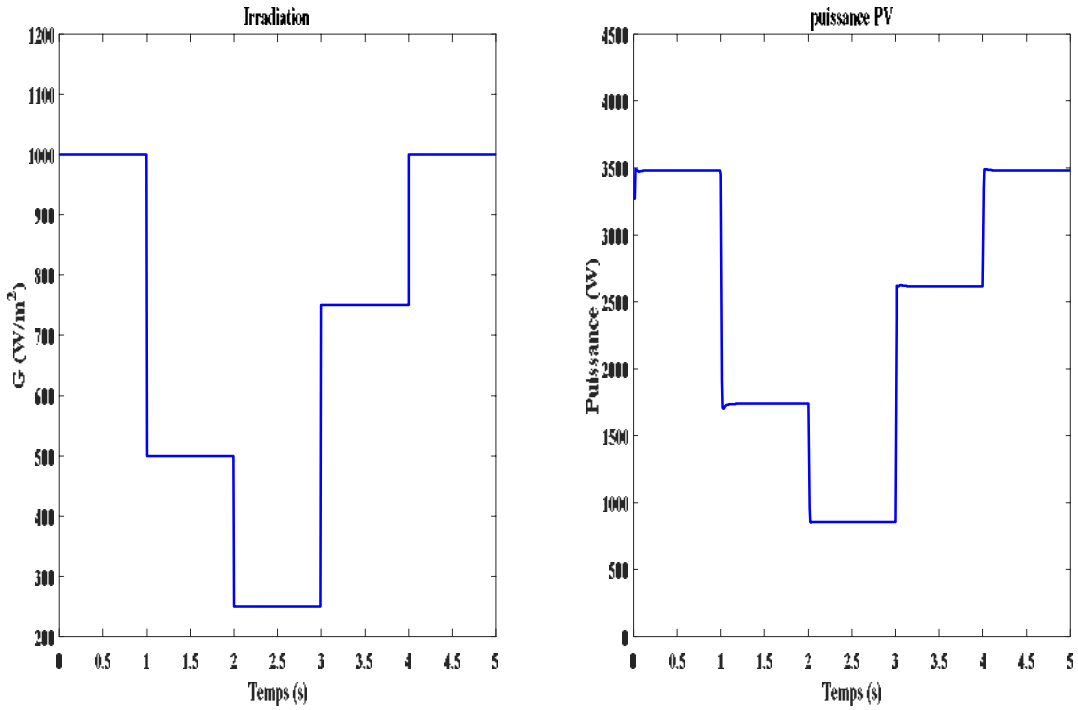


Figure IV.5. L'irradiation et la puissance PV

IV.5.1. Performances du bus continu :

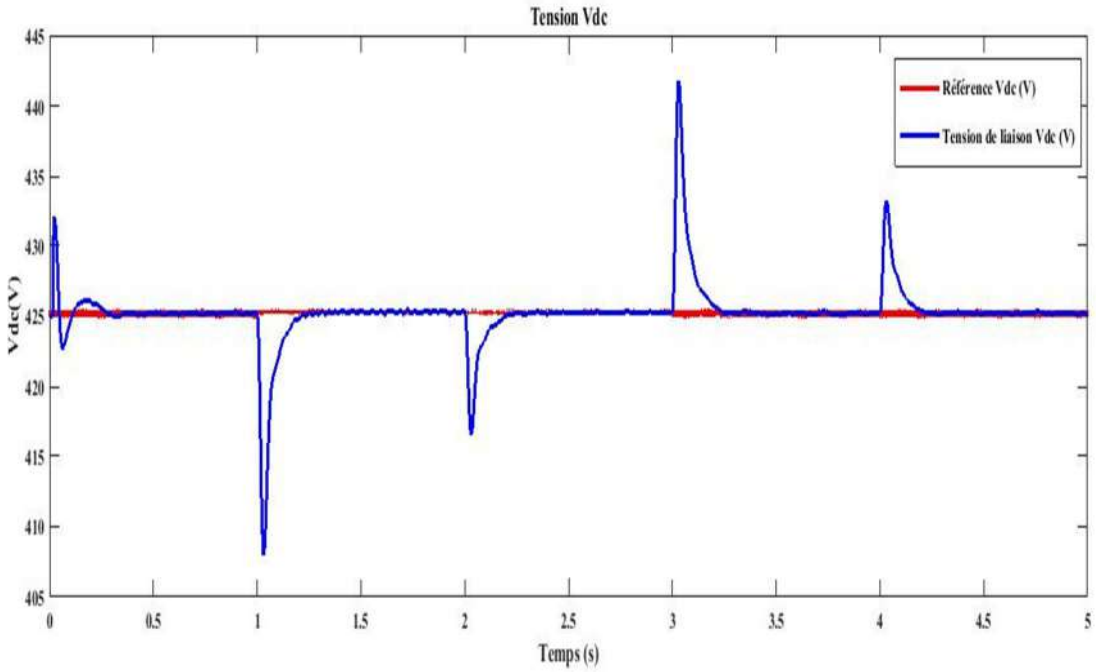


Figure IV.6. Performances en liaison CC

On remarque la tension de bus DC V_{dc} suit bien la tension de référence en dépit des changements de courant injecte dans ce bus I_{dc}. Comme le montre Figure IV.6, la valeur de cette tension est égale a tension de référence (425V) tout au long de l'intervalle de simulation, les pics enregistres aux instants de changement de coutant sont de très courte durée et leur amplitude ne dépasse pas 15% de la valeur de référence.

IV.5.2.Tension et courant de la charge résidentielle :

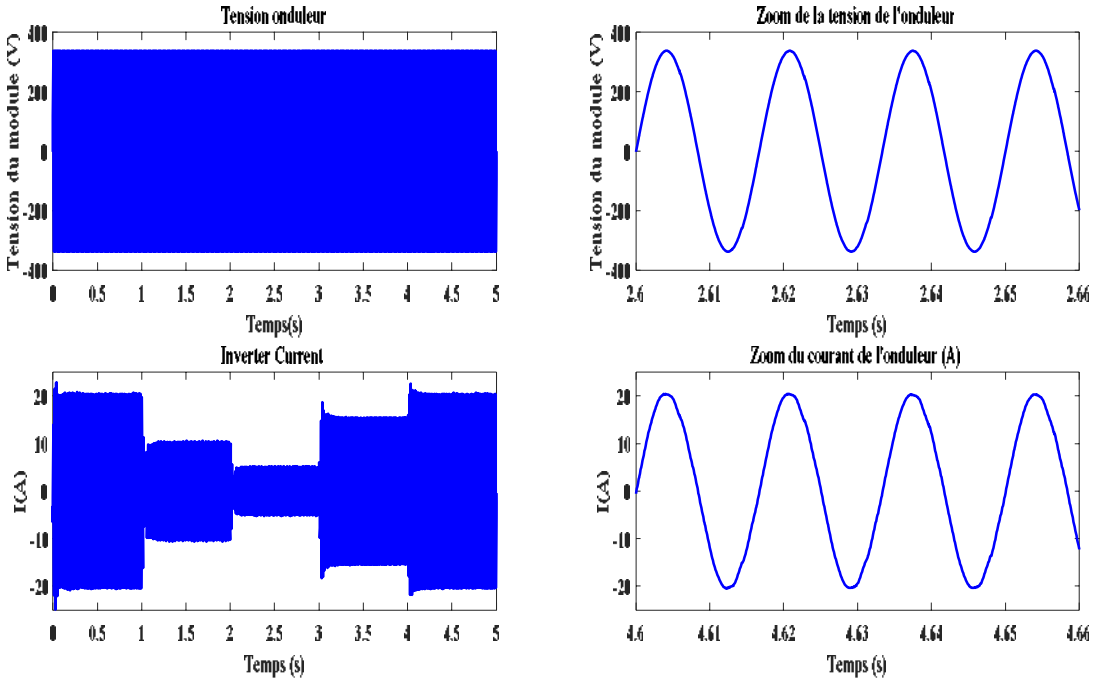


Figure IV.7. Tension et courant de la charge résidentielle

Les courbes des courants et tensions se rapprochent de la forme sinusoïdale, comme il est montre sur leurs Figure IV.7. Les courants injectés à la charge dépendent très fortement de l'irradiation.

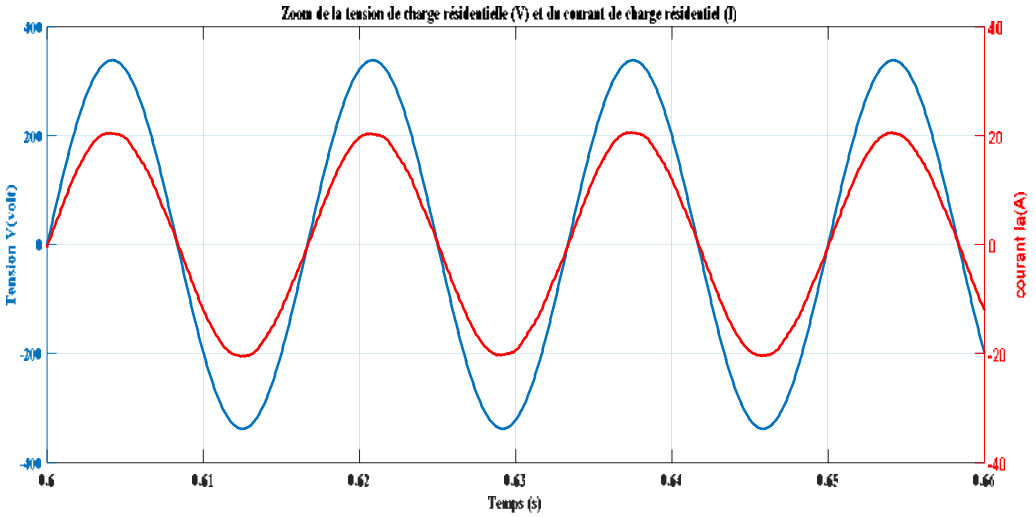


Figure IV.8. Tension de charge résidentielle et courant sont en phase

On remarque d'après la figure IV.8 que la tension et le courant du réseau sont en phase, par conséquent, le système fournit la puissance active à la charge résidentielle avec un facteur de puissance unitaire comme prévu.

IV.5.3. La puissance active de la charge résidentielle :

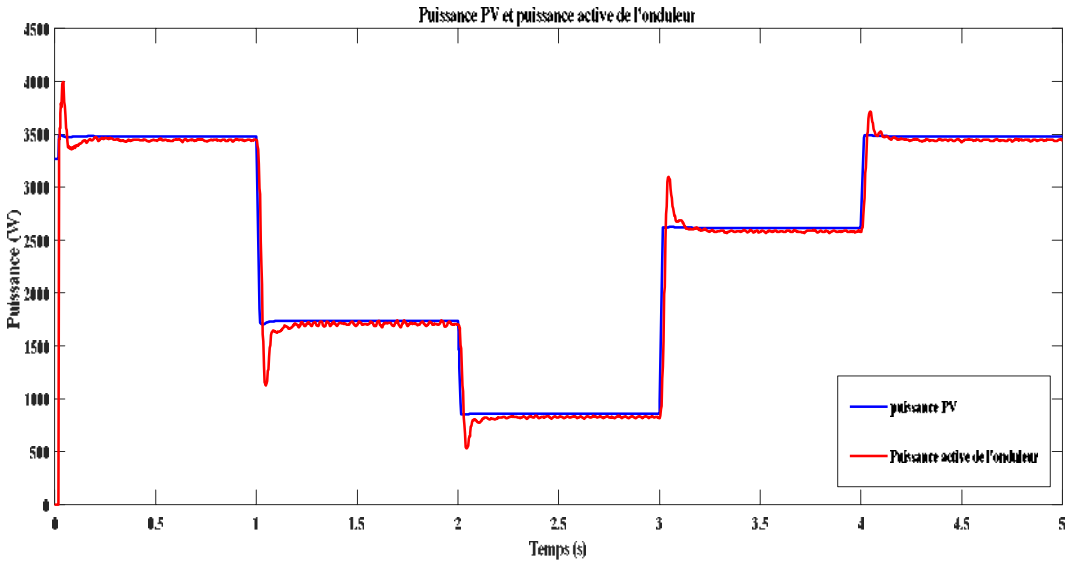


Figure IV.9. Puissance active de la charge résidentielle

D'après la figure IV.9, il est claire que la puissance délivrée par le système PV et la puissance active générée par l'onduleur sont similaires nous remarquons que le taux le plus élevé atteint par la puissance active de l'onduleur est 3500 w et la puissance de photovoltaïque est 3500 W.

IV.5. 4.Le spectre harmonique du courant de la charge résidentielle

D'après la Figure IV.9, on remarque que le THD (Total Harmonie Distorsion) = 1.60% ce qui représente un bon résultat en ce qui concerne le taux d'harmoniques

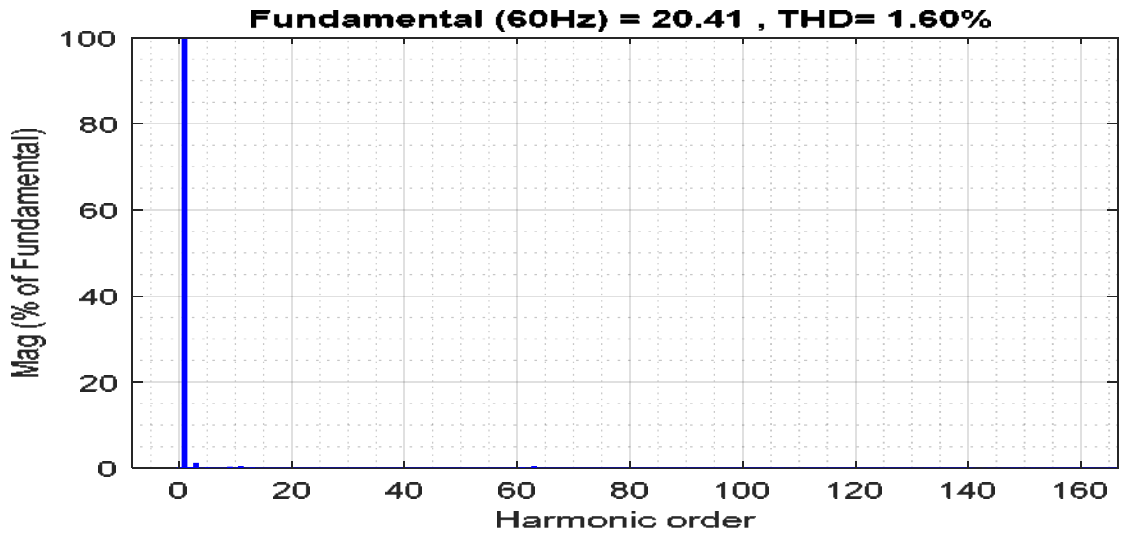


Figure IV.10 : Spectre des harmoniques actuels

IV.6.Conclusion :

Dans ce chapitre les résultats obtenus ont démontré que les régulateurs proposés sont très efficaces pour effectuer premièrement la poursuite du point de puissance maximale et deuxièmement permettre la régulation de l'amplitude et de la fréquence de la tension et du courant de l'onduleur.

Les résultats obtenus pour les différentes conditions de fonctionnement, ont montré de bonnes performances du système photovoltaïque résidentiel avec les approches proposées

Le THD du courant de la charge résidentielle répond aux normes de qualité du courant recommandées par l'IEEE.

Conclusion générale :

Conclusion générale :

Dans ce travail, on a proposé une nouvelle approche pour la commande d'un système photovoltaïque résidentiel connecté au réseau afin d'extraire le maximum d'énergie du panneau photovoltaïque (fonctionnement optimal du système photovoltaïque).

Au premier chapitre, on s'est intéressé à la description générale des systèmes photovoltaïques, à leur principe de fonctionnement et leur modélisation. On a donné les différentes architectures des systèmes PV.

On a abordé, au deuxième chapitre, la composition du système photovoltaïque connecté à un système résidentiel. On a présenté la technique MPPT, les convertisseurs DC-AC et plus spécialement l'onduleur monophasé en pont, utilisé dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau résidentiel. On a traité aussi la technique MLI et la synchronisation par PLL ainsi que les filtres.

Nous avons présenté dans le troisième chapitre la technique de contrôle par recherche d'extrémum (extremum seeking control)

Les approches de recherche d'extremum sont proposées pour régler les paramètres du contrôleur PID du courant de la tension du bus DC et aussi comme contrôleur MPPT dans un système photovoltaïque connecté au réseau résidentiel.

PID du courant de la tension du bus DC et aussi comme contrôleur MMPT dans un système photovoltaïque connecté au réseau résidentiel.

Les stratégies de contrôle développées sont vérifiées par des simulations sur un système photovoltaïque connecté à un réseau résidentiel.

Les performances du système ont été démontrées dans déférentes conditions d'irradiation. Les résultats obtenus ont prouvé que les systèmes de commande utilisant les contrôleurs proposés sont très efficaces pour suivre le MPP et pour permettre la régulation de l'amplitude et de la fréquence de la tension et du courant de l'onduleur.

Le THD du courant de la charge résidentielle répond aux normes de qualité du courant recommandées par l'IEEE.

Il serait intéressant de compléter ce travail en envisageant d'implémenter ces techniques de commande sur des cartes Dspace ou Arduino.

Bibliographies:

[1] : Darby, M.L.; Nikolaoub, M.; Jones, J.; Nicholson, D. RTO: An overview and assessment of current practice. J. Process Control 2011, 21, 874–884.

[2] : ZIGHA ALI**,** « ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN » Master en Électrotechnique UNIVERSITE CONSTANTINE I, 2014.

[3] : Alayat Mahmoud et Boucetta Issam. Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairements différents. Mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR de Annaba, juin 2017.

[4] : Zahar Soria et Makhlouf cheymaa. Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique. Mémoire de master, électronique, instrumentation et maintenance industrielle, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2017.

[5] : R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.

[6] : B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.

[7] : A. MESTOURI. « Commande d'une machine asynchrone par un onduleur sa sœur d'énergie est obtenue par photovoltaïque ».Mémoire de Master, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2017.

[8] : N.BENMESOUD.M.KECIRI « Etude Et Maximisation De Puissance D'un Système Photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2017.

[9] R.Hamouche, « atlas vent de l'Algérie », publication interne de l'ONM, office National de météorologie, Alger, 1990

[10] : Mr. FEKROUN« POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT) D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE PAR UN CONTROLEUR FLOU TYPE 2 T2FLC». Mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2017

[11] : LAREF Soumia**,** Commande d'un Hacheur Solaire Photovoltaïque par des Techniques d'intelligence Artificielle, mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2017.

[12] : AGROUM Abderrahmane. Etude d'un Système Photovoltaïque autonome. Mémoire de master, électrotechnique Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE), " Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, 2017

[13] : KADRI Ibtissem. Etude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil. Mémoire de master, physique énergétique et énergies renouvelables, université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, juin 2018.

[14] : HADJILA Djallal. Etude de simulation d'une unité de commande d'un caractériseur I-V à entrées multiples pour modules photovoltaïque. Mémoire de master, ginie électroniques, contrôle industriel, université Mohamed Boudiaf - M'SILA, juin 2011.

[15] : GUICHI Amar. ETUDE ET COMMANDE D'UN SYSTEME HYBRIDE Photovoltaïque - EOLIENGROUPE DIESEL. Thèse de doctorat en sciences, électroniques, instrumentation, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Faculté d'Electronique et d'Informatique, 2019.

[16] : Aissa STATRA et Omar BEN MEBAREK. Etude et commande d'un convertisseur DC/DC à base d'un microcontrôleur. Application à un système photovoltaïque. Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en automatique, Laboratoire de Commande des Processus, Ecole Nationale Polytechnique, 2018.

[17] BISKER Asma et CHIRI Meriem. Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau. Projet de fin d'études, électrotechnique, école Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, Juin 2012.

[18] : BOUHARCHOUCHE Abderrezzaq. ETUDE ET COMMANDE D'UN SYSTEME

DE PRODUCTION HYBRIDE EOLIENPHOTOVOLTAIQUE. Mémoire de magister, systèmes électrotechniques, conditionnement de l'énergie et entrainements électriques, Ecole Militaire Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2013.

[19] : Dr. BELAID LALOUNI Sofia « Cours Energie Solaire Photovoltaïque » Université A.MIRA de BEJAIA Faculté de Technologie Année universitaire 2014/2015.

[20] : M.BELCACEMI, L.GHARDOUI « Etude Et Simulation De Poursuite Du Point De

Puissance Maximale D'un Générateur Photovoltaïque Base Sur L'intelligence Artificielle ».Mémoire de Master, Université Yahia Fares, Médéa, 2018.

[21] : F. SLAMA. « Modélisation D'un Système Multi Générateurs Photovoltaïques

Interconnectés Au Réseau Electrique ». Mémoire de Magistère. Université Ferhat Abbas. Sétif.2012.

[22] : KALACHE Belkacem, HAMI Nabil«Commande d'un VSC d'un réseau résidentiel connecté aux réseaux » Mémoire De Master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE, MEDEA, **2020.**

[23] : Mr. KHOUALED Karim, « techniques de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau utilisant de contrôleur MPPT », Mémoire De Master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE, MEDEA, 2016.

[24] : Chapitre 3 : les convertisseurs utilisent dans un chaine photovoltaïque et les différentes types de commande MPPT

[25] :C. Cabal, 'Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédié à la Conversion Photovoltaïque', Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, Décembre 2008

[26] :J. Fadat, 'Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque Commande MPPT', La Revue 3EI, N°43, Décembre 2005.

[27] :D.LOUKIZ. « Poursuite du Point Maximale d'un Système Photovoltaïque Par Les Méthodes Intelligents ». Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf. Msila.2016.

[28] : Violaine Didier «Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » rapport de HESPUL, 2007.

[29] : S. MECHERI, << Réalisation d'un onduleur de tension monophasé centrale par carte ARDUINE >>, Université de Constantine I, 2013/2014.

[30] Krim Med lamine, Debbah Houssem Eddine«Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque » MEMOIRE DE MASTER DOMAINE : Sciences et Technologies, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, Juin 2018

[31] Mr. fekroun sidahmed, Mr. otmanine omar, « poursuite du point de puissance maximale (mppt) d'un système photovoltaïque par un contrôleur flou type 2 t2flc.», mémoire de master, université Yahia Fares de Médéa, 2017.

[**32**] M. Leblanc, " Sur l ' electrification des chemins de fer au moyen de courants alternatifs de frequence elevee, " Revue générale de l'électricité, vol. 12, no. 8, pp. 275–277, 1922.

[33] M. Krstićand H.Wang, " Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems, " Automatica, vol. 36, no. 4, pp. 595–601, 2000.

[34] K. Ariyur and M. Krstic, Real-time optimization by extremum-seeking control. Wiley-Interscience, 2003.

[35] K. J. Astrom and B.Wittenmark, Adaptive control. Dover Publications, 2008.

[36] J. Sternby, “Extremum control systems: An area for adaptive control?,” in Joint Amer. Contr. Conf., WA2-A, San Francisco, CA, 1980.

[37] Parks P.C.(1966). Lyapunov redesign ofmodel reference adaptive control systems. IEEE Trans. Automat. Contrt.~Vo1.AC-13, No.2, pp~337-342~

[38] KILLINGSWORTH NJ AND KRSTIC M. 2006. PID tuning using extremum seeking. IEEE Control Syst Mag 26: 70-79.

[39] ROUX-OLIVEIRA T, COSTA LR AND PINO AV. 2019. Extremum Seeking-based Adaptive PID Control applied to Neuromuscular Electrical Stimulation. An Acad Bras Cienc 91 : e20180544. DOI 10.1590/0001-3765201820180544.