

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Réseaux électriques

Présenté par

BEHIR Boubaker - KHEMIDA Fathi et GUETROUNE Kheir eddine

Thème

**Optimisation d'un système photovoltaïque adapté
par une commande MPPT floue**

Soutenu le 18/06/2019. Devant le jury composé de :

Mr. MAMMRI Oussama

Maitre de conférences Président

Dr. LABBI Yacine

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. BARKA Nour Eddine

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2018/2019

Dédicaces

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes grandes mères et
grand père*

À mes très chers parents.

À mes frères et sœurs,

À tout les membres de ma famille,

À mes très chers amis,

À tout les étudiants de la promotion 2019,

À tout mes amis du génie électrique,

À tout les enseignants du département génie électrique.

Fathi KHEMIDA

Dédicaces

*Je dédie ce travail à
Mes grandes mères et grand père*

A mes très chers parents.

*A mes frères et sœurs,
A tout les membres de ma famille,
A mes très chers amis,*

A tout mes amis du génie électrique,

Kheir Eddine G'UETROUN

Dédicaces

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes grandes mères et
grand père*

À mes très chers parents.

À mes frères et sœurs,

À tout les membres de ma famille,

À mes très chers amis,

À tout les étudiants de la promotion 2019,

À tout mes amis du génie électrique,

À tout les enseignants du département génie électrique.

Boubaker BEHIR

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la patience de mener et terminer ce travail et à mes parents pour leur soutien et confiance.

Nos vifs remerciements particulièrement à notre encadreur :

***Dr : LABBI Yacine**, pour son aide précieuse, ses conseils constructifs et ses orientations bénéfiques et objectives et surtout sa confiance durant les moments d'efforts pour la réalisation de notre projet.*

Nous remercions également tous les enseignants de l'électrotechnique de l'université d'El-Oued.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur contributions.

Résumé

La puissance de sortie d'un générateur PV dépend d'un quelques-uns nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des méthodes MPPT. Il existe des techniques MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et les techniques avancées, telle que la MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab/Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT flou sont bien meilleures que ceux du contrôleur MPPT P&O.

Mots clés : PV, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O, logique floue.

Abstract :

The output power of a generator PV depends on a some of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Because of the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the system performance can be improved by PV based solutions MPPT methods. There are techniques MPPT classical commonly used, namely the perturbation and observation (P&O) and the techniques called advanced, such as fuzzy MPPT. This thesis presents a comparative study of different techniques MPPT to analyze, simulate, and evaluate the overall system PV power under varying operating conditions. To do the mathematical models of system components PV (GPV, DC-DC converter, load) have been developed. Simulation results, obtained using Matlab Simulink tool, showed that in general the performances of fuzzy controller in maximum power tracking of PV array is much better than the P&O MPPT controller.

Key words: PV, converter DC-DC, MPPT, P&O, fuzzy logic.

ملخص :

ان الاستطاعة الناتجة من المولد الكهروضوئي تتعلق ببعض المتغيرات من بينها الاشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، نظرا للخصائص الكهربائية اللاخطية لهذه الخلايا فإن مردود النظام الكهروضوئي يمكن تحسينه باستعمال تقنيات MPPT اي اتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية التي ينتجها المولد الكهروضوئي من بين هذه طرق ومن اكثرها استعمال تقنية الاضطراب والمراقبة ومنها تقنيات حديثة تعتمد على الذكاء الاصطناعي منها تقنية المنطق الغامض. هذه المذكرة تقدم مقارنة بين مختلف هذه التقنيات لغرض تحليل وتمثيل وتقديم النظام الكهروضوئي الاجمالي، وذلك تحت ظروف العمل المتغيرة ولذلك فقد قمنا بتقديم نماذج رياضية لمكونات النظام (المولد الكهروضوئي، محول تيار مستمر/ تيار مستمر، حمولة ...) النتائج المتحصل عليها باستخدام لغة البرمجة Matlab / Simulink اثبتت على العموم ان الفعالية السكونية والديناميكية للمنطق الغامض في اتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية للمولد الكهروضوئي احسن من الطريقة التقليدية (الاضطراب والمراقبة).

كلمات مفتاحية: مولد الكهروضوئي، محول تيار مستمر/ تيار مستمر، اتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية، طريقة الاضطراب و المراقبة، المنطق الغامض.

Liste des Figures

CHAPITRE I : Etude et Modélisation d'un Système Photovoltaïque

Figure .I-1. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	8
Figure .I-2. Génération de la paire électron-trou.....	8
Figure .I-3. La jonction PN	9
Figure .I-4. Structure d'une cellule photovoltaïque	9
Figure .I-5. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.....	10
Figure .I-6. Le circuit équivalent d'une cellule solaire et d'un dispositif photovoltaïque.....	12
Figure .I-8. Déploiement I_{ph} détaillé	15
Figure .I-9. Déploiement $I_{0,ref}$ détaillé.....	16
Figure .I-10. Déploiement I_0 détaillé	16
Figure .I-11. Déploiement I_{pv} détaillé	17
Figure .I-12. Présentation de module PV	17
Figure .I-13. Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en parallèle	18
Figure .I-14. Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en série	18
Figure .I-15. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.....	19
Figure .I-16. Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.....	19
Figure .I-17. Caractéristique P-V du module PV selon variation d'éclairement	20
Figure .I-18. Caractéristique I-V du module PV selon variation d'éclairement	20
Figure .I-19. Caractéristique P-V du module PV selon variation de Température	20
Figure .I-20. Caractéristique I-V du module PV selon variation de Température.....	20
Figure .I-21. Caractéristique P-V de module PV selon influence de résistance série....	21
Figure .I-22. Caractéristique I-V du module PV selon influence de résistance série	21
Figure .I-23. Caractéristique I-V de module PV selon <i>variation de Eclairement et température</i>	21
Figure .I-24. Caractéristique P-V du module PV selon <i>variation de Eclairement et température</i>	21
Figure .I-25. Caractéristique I-V de module PV selon <i>la différent de la facteur d'idéalité</i>	22

CHAPITRE II: Étage d'Adaptation DC/DC avec Command MPPT

Figure .II-1. Connexion directe source-charge	25
Figure .II-2. Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.	25
Figure .II-3. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	26
Figure .II-4. Schéma d'un quadripôle électrique	26
Figure .II-5. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.	27
Figure .II-6. Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	27
Figure .II-7. Schémas équivalents du hacheur survolteur,(a): K Fermé, (b): Ouvert ...	28
Figure .II-8. Schéma de simulation du hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance pour un rapport cyclique de 0,3.....	29
Figure .III-9. (a) Le courant aux bornes du GPV (b) La tension aux bornes du GPV (c) La puissance aux bornes du GPV.....	29-30
Figure .II-10. (a) Le courant aux bornes du charge (b) La tension aux bornes du charge (c) La puissance aux bornes du charge.....	30-31
Figure .II-11. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	31
Figure .II-12. Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement,(b) suite à une variation de charge,(c) suite à une variation de température.....	32
Figure .II-13. Schéma de converge vers le PPM par P&O	33
Figure .II-14. Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O	34
Figure .II-15. Schéma block de la commande MPPT	35
Figure.II-16.La caractéristique P-V, I-V selon la température et la trajectoire de PPM..	36
Figure.II-17.La caractéristique P-V, I-V selon l'éclairement et la trajectoire de PPM .	36
Figure .II-18. La puissance aux bornes du GPV	37
Figure .II-19. La tension aux bornes du GPV	37
Figure .II-20. Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT P&O	37

CHAPITRE III Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue

Figure .III-1. MPPT floue	40
Figure .III-2. Fonctions d'appartenance de la variable E (MPPT floue type I)	41
Figure .III-3. Fonctions d'appartenance de la variable ΔE (MPPT floue type I)	42
Figure .III-4. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type I)	42
Figure .III-5. Fonctions d'appartenance de la variable ΔP (MPPT floue type II)	42
Figure .III-6. Fonctions d'appartenance de la variable ΔV (MPPT floue type II)	42
Figure .III-7. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type II)	43
Figure .III-8. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue.....	44
Figure .III-9. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type I.....	44
Figure .III-10. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type II	45
Figure .III-11. Réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards : la température $T = 25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement $E = 1000\text{W/m}^2$	45-46
Figure .III-12. Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement (échelon $E = 500$ à 1000 w/m^2) à température constante $T = 25^{\circ}\text{C}$	47

Liste des Tableaux

Tableau I-1. Les différents types des cellules avec leur rendement	10
Tableau I-2. Facteur d'idéalité (A)	11
Tableau I.3. MSX 60 PV module (60 W) caractéristique	13
Tableau III.1. Base de règles du MPPT floue (type I)	43
Tableau III.2. Base de règles du MPPT floue (type II)	44

Sommaire

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I: Etude et Modélisation d'un Système Photovoltaïque

I.1. Introduction.....	5
I.2. Les ressources des énergies renouvelables	5
I.2.1. Définition d'énergie renouvelable	6
I.3. L'énergie solaire	6
I.3.1. Rayonnement solaire:	7
I.4. Description d'un système photovoltaïque	8
I.4.1. Semi-conducteur	8
I.4.1.1. Formation de la jonction PN.....	8
I.4.1.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	9
I.4.1.3. Type et rendement des cellules photovoltaïques	10
I.5. Circuit équivalent d'une cellule solaire	10
I.6. Détermination des paramètres.....	13
I.6.1. Détermination de I_{ph}	13
I.6.2. Détermination I_0	14
I.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	17
I.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	17
I.7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série	18
I.8. Influence de l'Éclairement	19
I.9. Influence de la Température	20
I.10. Influence de la résistance série	21
I.11. Influence de Eclairement et température	21
I.12. Influence de facteur d'idéalité	22
I.13. Conclusion	22

CHAPITRE II: Étage d'Adaptation DC/DC avec Command MPPT

II.1. Introduction	24
--------------------------	----

II.2. Connexion directe source-charge	24
II.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge	25
II.4. Les convertisseurs DC-DC dévolteur	25
II.4.1. Hacheur survolteur	27
II.5. Résultat et simulation	28
II.6. Principe de fonctionnement de MPPT	31
II.7. La méthode Perturbe & Observe (P&O)	33
II.8. Simulation de la commande MPPT numérique « P&O »	35
II.8.1. Simulation de la méthode MPPT	35
II.9. Résultats de simulation de la commande MPPT	37
II.10. Conclusion	38

CHAPITRE III Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue

III.1. Introduction	40
III.2. Contrôleur MPPT flou	40
III.3. Fonctions d'appartenance	41
III.4. Règles floues	43
III.5. Conception du contrôleur MPPT flou	44
III.6. Résultats de Simulation	45
III.6.1. Fonctionnement sous des Conditions Constantes	45
III.6.2. Comportement du système face à un changement de les conditions météorologiques	47
III.7. Conclusion	48
Conclusion générale	50

Acronymes

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

DC : Courant Continu.

STC : Conditions de tests standards 'Standard Test Conditions'.

MPP : Point de fonctionnement optimal.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale. 'Maximum Power Point Tracking'.

Symboles

λ : Longueur d'onde en mètre.

E_0 : Éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelée constante solaire.

P_m : Puissance produite par le générateur PV.

E : Éclairement absorbé par la cellule (1000 w/m^2).

K : Constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23} \text{ J/K}$).

q : Charge de l'électron ($1,6.10^{-19} \text{ C}$).

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Courant de la cellule PV (Photo-Courant).

I_d : Courant circulant dans la diode.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

V_{pv} : Tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.

I_p : Courant circulant dans la résistance R_p .

: Résistance shunt de la cellule PV.

R_s : Résistance série de la cellule PV.

N_s : Nombre de cellules en série.

: Nombre de cellules en parallèle.

A : Facteur d'idéalité de la jonction (cellule PV) p-n

$V_{mpp} = V_m$: Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

$I_{mpp} = I_m$: Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

I_{mr} : Courant de référence d'un module PV au point de puissance maximale.

T : Température de la jonction des cellules PV [°K].

$T_{réf}$: Température de référence des cellules PV [°K].

I_{CC} : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].

V_{CO} : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

R_L : Résistance de filtre.

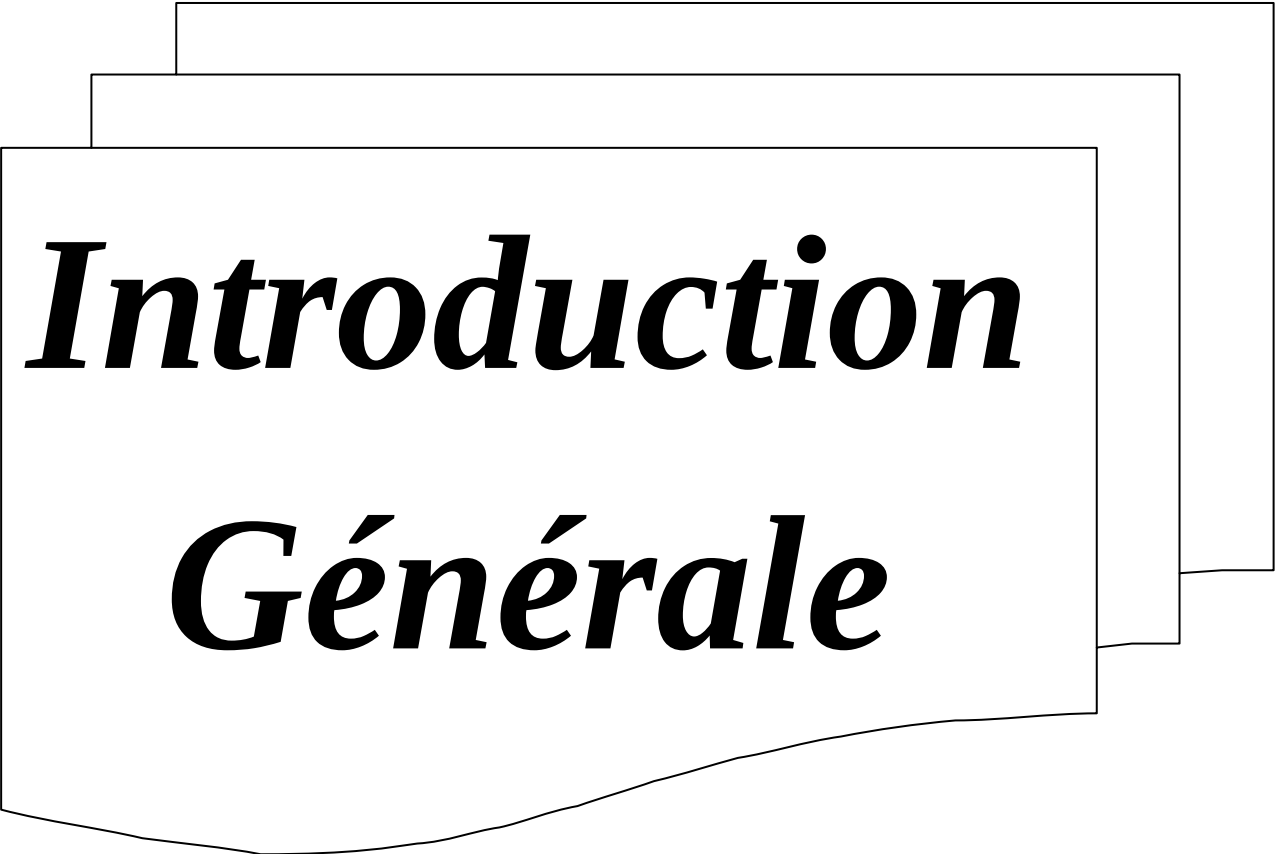
D : Rapport cyclique.

ΔD : Variation du rapport cyclique.

$P\&O$: Perturbation et Observation.

$E(K)$: Erreur.

$CE(K)$: Variation de l'Erreur.



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 sociétés industrialisées 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 de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.[1]

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.[1]

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.[1]

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur. Dans le cadre de notre travail, nous traitons l'une des structures les plus recommandées dite « onduleur de tension » qui sera utilisé pour injecter l'énergie électrique issue d'une source PV vers le réseau de distribution[1]. Cette mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre consacré à la généralité et modélisation d'un système photovoltaïque, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à une modélisation de convertisseur DC-DC. Il montre une technique de poursuite du point de puissance maximale MPPT, et nous intéressons à l'étude de la méthode « Perturbation-Observation ».

Dans le troisième chapitre nous présenterons la commande floue d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale (MPP).

Le travail a été complété par une étude comparative avec un test de robustesse entre les méthodes dites conventionnelles à savoir, la méthode Perturbation-Observation (P&O) et celle basée sur l'approche Floue.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'avantage de l'approche Floue par rapport à la méthode Perturbation et Observation (P&O).



Chapitre I

Etude et Modélisation d'un Système Photovoltaïque

I.1. Introduction:

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.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

- **Photos** : Lumière.
- **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien [**Alexandre Edmond Becquerel**]. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [2]

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [3]:

- Les systèmes autonomes,
- Les systèmes connectés au réseau,
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

I.2. Les ressources des énergies renouvelables:

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour

hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter de gisements renouvelables donc inépuisables. ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [4]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [5][6].

I. 2.1. Définition d'énergie renouvelable:

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [5].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [5], [7], [4].

I.3. L'énergie solaire:

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [8], les rayons du soleil mettent donc environ 8minutesà nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égal à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = (h \times c) / \lambda \quad \text{(I-1)}$$

h : la constante de Planck égale: 6.63×10^{-34} ,

C : la vitesse de la lumière égale: 300000Km/s .

γ :Longueur d'onde en mètre .

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande . Une façon commande d'exprimer cette énergie est:

$$E = \lambda/1.26 \quad (I-2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6 % dans la bande des ultraviolets ($<0,4\mu\text{m}$).
- 74 % dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$).
- 77 % dans la bande des infrarouges ($>0,8\mu\text{m}$).

I.3.1. Rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10^{-6}m . sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent

✚ **Le rayonnement direct :** C'est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un Pyrhéliomètre.

✚ **Le rayonnement diffus :** C'est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

✚ **Le rayonnement solaire :** réfléchi ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

✚ **Le rayonnement global :** C'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 Solari mètre sans écran [8].

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

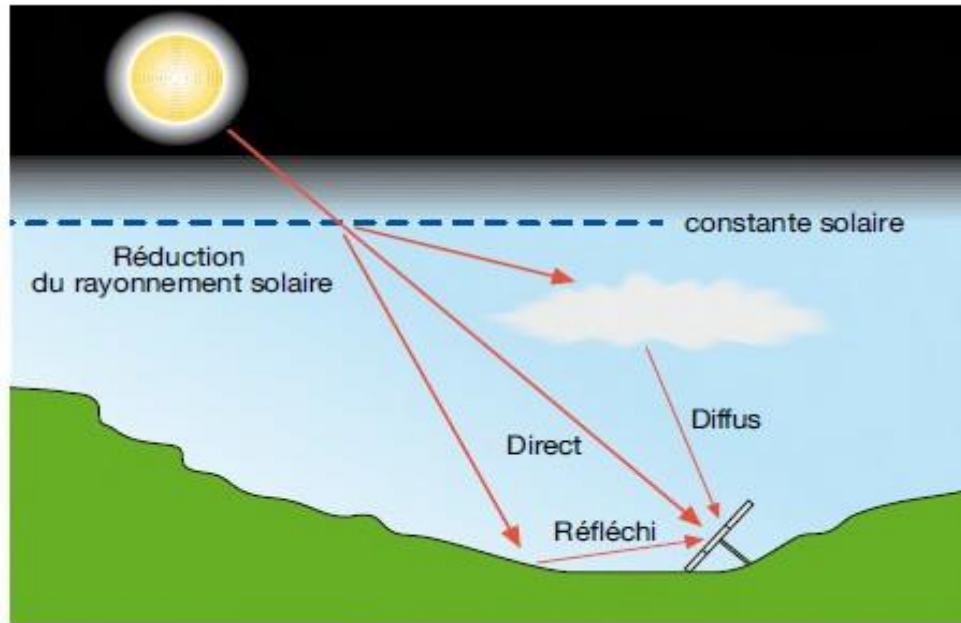


Figure .I-1. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.4. Description d'un système photovoltaïque:

I.4.1. Semi-conducteur:

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [9].

I.4.1.1. Formation de la jonction PN:

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure (I-2).

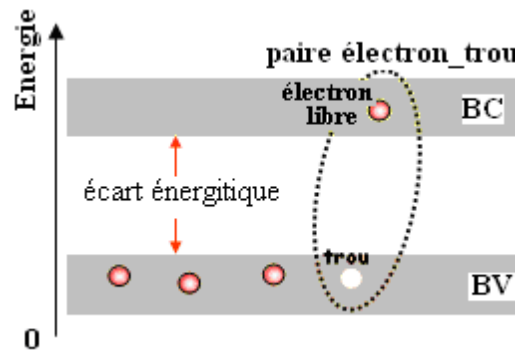


Figure .I-2. Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.

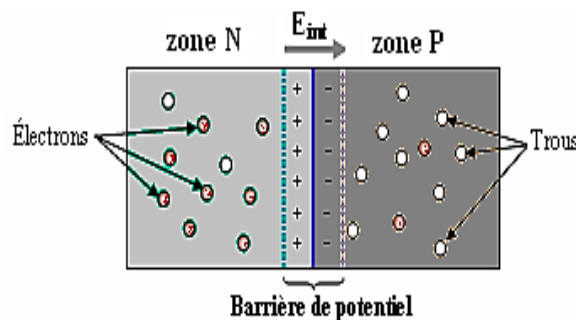


Figure .I-3. La structure PN.

I.4.1.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [3].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (I-4) ci-dessous.

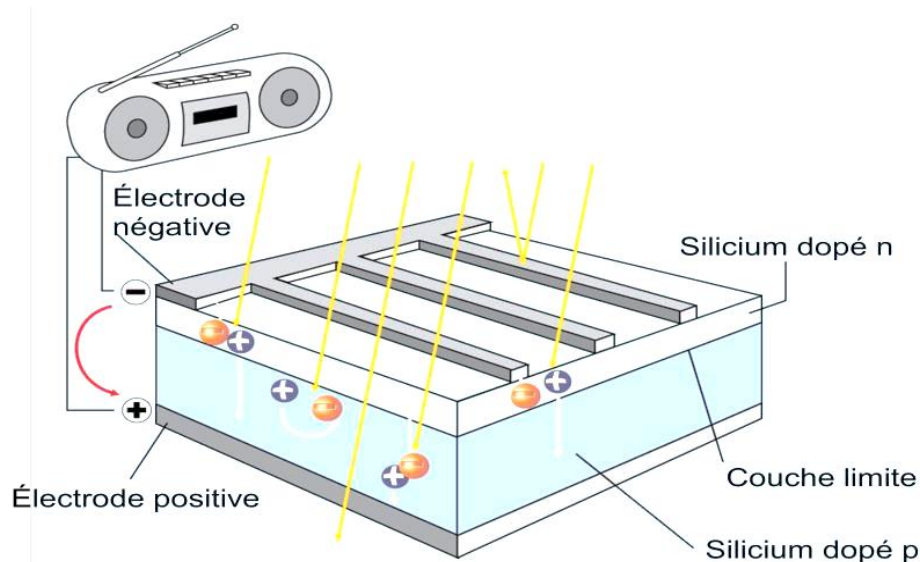


Figure .I-4. Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.4.1.3. Type et rendement des cellules photovoltaïques:

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 26% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [10].

➤ **Les cellules monocristallines:** Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

➤ **Les cellules poly cristallines:** Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

➤ **Les cellules amorphes:** Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

Le tableau suivant (I-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Tableau I-1. Les différents types des cellules avec leur rendement

Technologies de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	13 à 17%

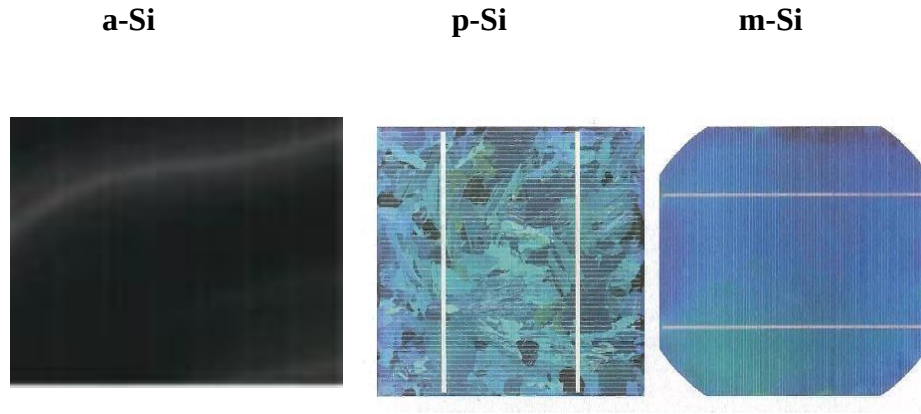


Figure .I-5. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.

I.5. Circuit équivalent d'une cellule solaire :

Le modèle ne prend pas en compte les pertes internes du actuel. Une diode est connectée en anti parallèle à la lumière de générateur de courant . Le courant de sortie **I** est obtenu Par la loi Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{I-1})$$

I_{ph} est le photo courant, **I_d** est le courant de diode qui est proportionnel au courant de saturation et il est donné par l'équation [10]

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{A \times N_s \times V_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{I-2})$$

V : est la tension imposée sur la diode

$$V_T = K \times T_c / q \quad (\text{I-3})$$

I₀ : la saturation inverse ou le courant de fuite de la diode (A).

V_{TC} = 26 mV à 300 K Pour cellule de silicium.

T_C : la température réelle de la cellule (K).

K : Boltzmann constant $1.381 \cdot 10^{-23}$ J / K.

q : la charge d'électrons ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

V_T : s'appelle la tension thermique en raison de son utilisation exclusive dépendance de la température [11].

N_s: le nombre de cellules PV connectées en série.

A : le Facteur d'idéalité.

Cela dépend de la technologie des cellules photovoltaïques et peut être choisi dans le

tableau 1. Il faut souligner que A est une constante qui dépend de la technologie des cellules photovoltaïques.

Tous les termes par les quels, V est divisé en équation (I-2) sous la fonction exponentielle sont inversement proportionnels à la cellule.

Tableau I-2 facteur d'idéalité (A) [12].

Technologie	facteur d'idéalité
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
a-Si-H tandem	3.3
a-Si-H triple	5
cdTe	1.5
CTs	1.5
AsGa	1.3

La température et donc, varient selon les conditions variables. Dans ce travail, ce terme est conçu par 'a' et appelé tension thermique (V), le facteur d'idéalité, est considéré comme constant et choisi dans le tableau 1 selon la technologie de la cellule photovoltaïque. La tension thermique " a " est présentée par l'équation (I-4)

$$a = \frac{N_s \times A \times K \times T_c}{q} = N_s \times A \times V_T \quad (\text{I-4})$$

Dans [13], 'a' s'appelle " l'idéalité modifiée Facteur " et est considéré comme un paramètre à déterminer, alors que A Est l'idéalité de la diode (voir tableau 2).

Dans la figure (I-6.b), en réalité, il est impossible de négliger la résistance en série R_s et La résistance parallèle R_p , en raison de leur impact sur l'efficacité de la cellule PV et du module photovoltaïque. Lorsque R_s est pris en considération, l'équation (I-2) devrait prendre la forme suivante:

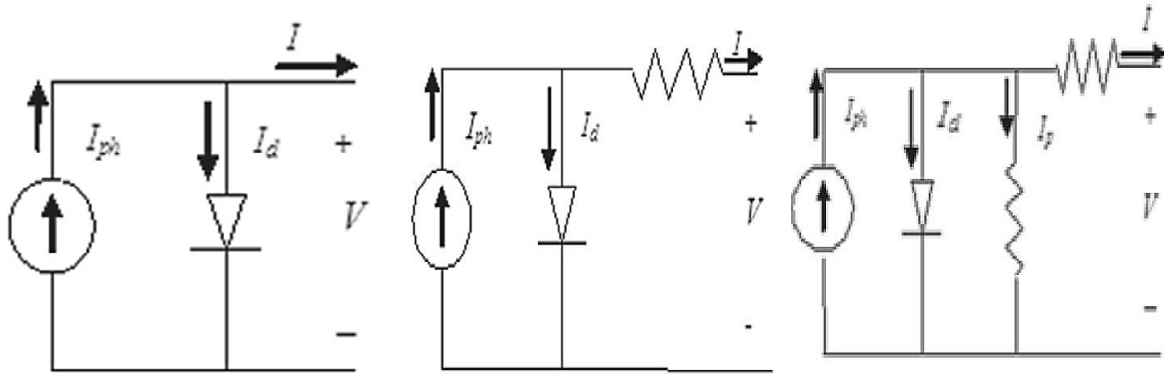
$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{q} \right) - 1 \right] \quad (\text{I-5})$$

Bien sûr, la figure (I-6.b) est une forme simplifiée, facile à mettre en œuvre dans simulateurs. Mais la figure (I-6.c) est le plus représentatif du cellule. PV dans la figure (I-6. c), en appliquant la loi de Kirchhoff, l'actuel sera obtenu par l'équation:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{I-6})$$

I_p : est la fuite actuelle en résistance parallèle.

Selon l'équation (I-7), le courant de sortie d'un le module contenant des cellules N en série sera:



a) Modèle de diode unique idéal

b) Modèle pratique avec R_s c) Modèle pratique avec R_s et R_p

Figure I-6. Le circuit équivalent d'une cellule solaire et d'un dispositif photovoltaïque.

Tableau I.3 MSX 60 PV module (60 W) caractéristique[14]

Parameters	Valeur
P_{mp} (W)	60
I_{mp} (A)	3.5
V_{mp} (V)	17.1
I_{sc} (A)	3.8
V_{oc} (V)	21.1
R_s (Ω)	0.008 x 36
I_{sc} (K°)	2.4 Å 10 ⁻³
K_d (K°)	- 80 Å 10 ⁻³
NS	36

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I \times R_s}{q}\right) - 1 \right] - \frac{V+I \times R_s}{R_p} \quad (\text{I-7})$$

Il n'est pas facile de déterminer les paramètres de ce transcendantal équation. Mais ce modèle offre le meilleur match avec valeurs expérimentales.

I.6. Détermination des paramètres :

Le nombre de paramètres varie selon les choix Modèle et sur les hypothèses adoptées par les chercheurs. Pour Exemple, Dans [15] , [16] , c'est a considéré que I_{ph} , I_0 , R_s , R_p et l'idéal du facteur sont cinq Paramètres qui dépendent du rayonnement solaire incident et la température de la cellule. Pendant que [17],[18] les paramètres inconnus sont : I_{ph} , I_0 , R_s et γ ainsi que :

$$\gamma = N_s \times A$$

λ : Longueur d'onde en mètre.

N_s : Nombre de cellules en série

A : Facteur d'idéalité de la jonction (cellule PV) p-n

(I-8)

Dans ce travail, les quatre paramètres à évaluer sont également I_{ph} , I_0 , R_s , R_p

I.6.1. Détermination de I_{ph} :

Selon la figure(I-6.a), le courant de sortie au test standard conditions (STC) est :

$$I = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (I-9)$$

Cette équation permet de quantifier $I_{ph,ref}$ qui ne peut pas être déterminé autrement. Lorsque la cellule PV est en court-circuit:

$$I_{SC,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{0}{a_{ref}}\right) - 1 \right] = I_{ph,ref} \quad (I-10)$$

Mais cette équation n'est valable que dans un cas idéal. Donc, l'égalité n'est pas correcte. Ensuite, l'équation (I-11) doit être écrite comme suit :

$$I_{SC,ref} = I_{ph,ref} \quad (I-11)$$

Le photo courant dépend à la fois de l'irradiance et température

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{sc} * \Delta T) \quad (I-12)$$

G : Irradiation (W/m^2),

G_{ref} : Irradiation à STC = 1000 W/m^2 ,

$\Delta T = T_c - T_{c,ref}$ (Kelvin),

$T_{c,ref}$: Température cellulaire à STC = 25+ 273 = 298 K,

I_{sc} : Coefficient de température de Courant de court-circuit (A / K) fourni par le fabricant,

$I_{ph,ref}$: Photocurrent (A) à STC.

I.6.2. Determiation I_0 :

La résistance au shunt R_p est généralement considérée comme excellente, donc le dernier terme de la relation (I-9) devrait être éliminé pour le Prochaine approximation[16]. en appliquant l'équation (I-9) aux trois Points les plus remarquables à l'état d'essai standard: la

tension en circuit ouvert ($I=0$, $V=V_{oc,ref}$) le courant en court-circuit ($V=0$, $I=I_{cs,ref}$) et la tension ($V_{mp,ref}$) et courant ($I_{mp,ref}$) À la puissance maximale, les équations suivantes peuvent être écrit:

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{I_{sc,ref} \times R_s}{a_{ref}} \right) - 1 \right] \quad (I-13)$$

$$0 = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{V_0}{a_{ref}} \right) - 1 \right] \quad (I-14)$$

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{V_{pm,ref} + I_{pm,ref} \times R_s}{a_{ref}} \right) - 1 \right] \quad (I-15)$$

Le terme (-1) doit être négligé car il est très plus petit que le terme exponentiel. Selon l'équation (I-12), et par en remplaçant ($I_{ph,ref}$) par l'équation (I-15):

$$0 = I_{sc,ref} - I_{0,ref} \exp \left(\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}} \right) \quad (I-16)$$

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp \left(\frac{-V_{oc,ref}}{a} \right) \quad (I-17)$$

$$I_0 = DT_c^3 \exp \left(\frac{-q \cdot E_g}{A \cdot K} \right) - 1 \quad (I-18)$$

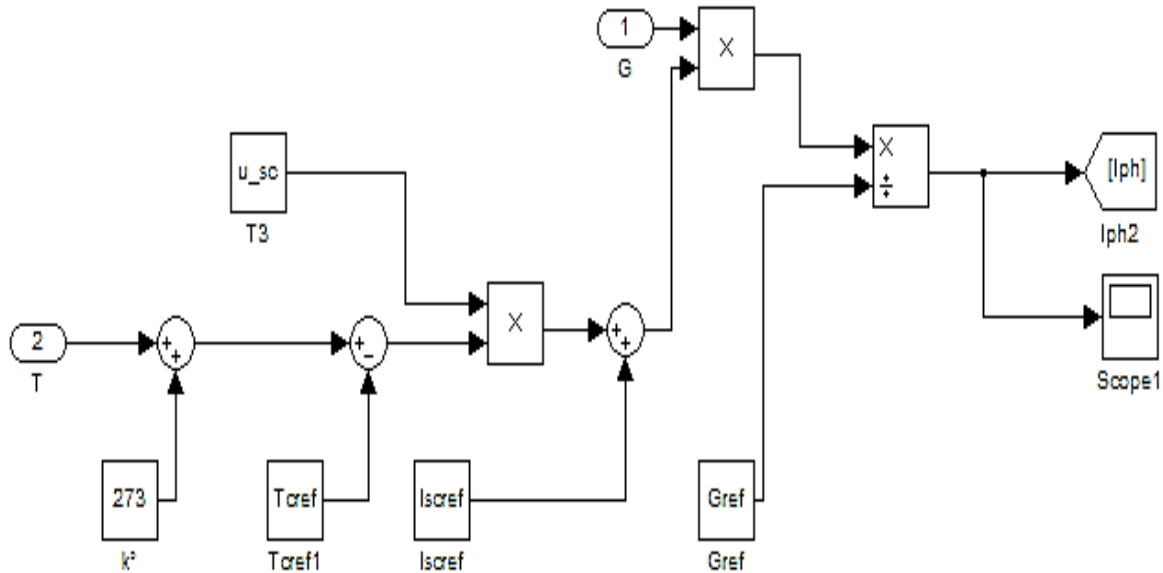


Figure I-8. Déploiement I_{ph} détaillé.

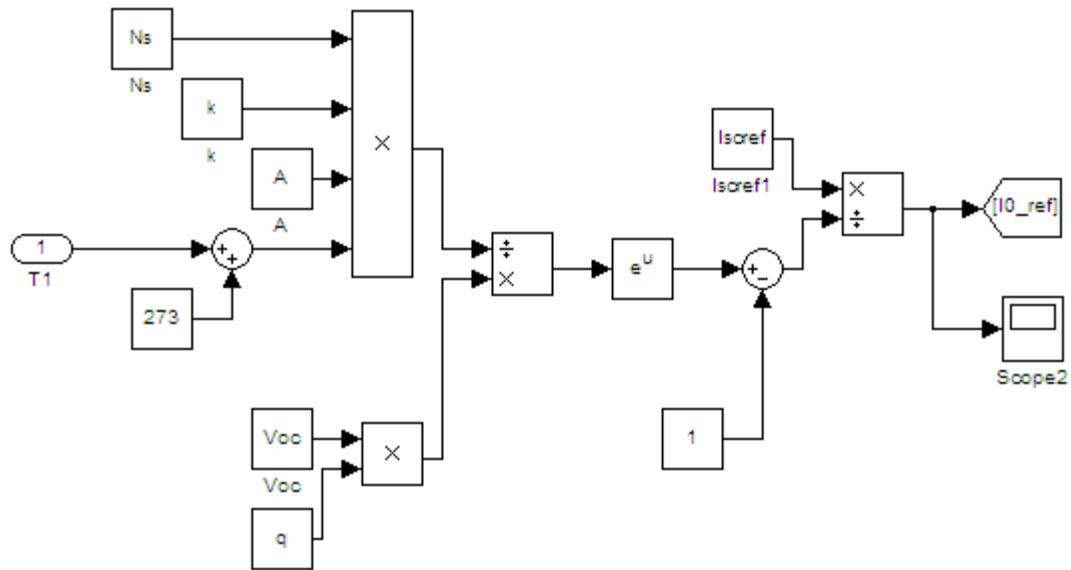


Figure .I-9. Déploiement $I_{0,ref}$ détaillé.

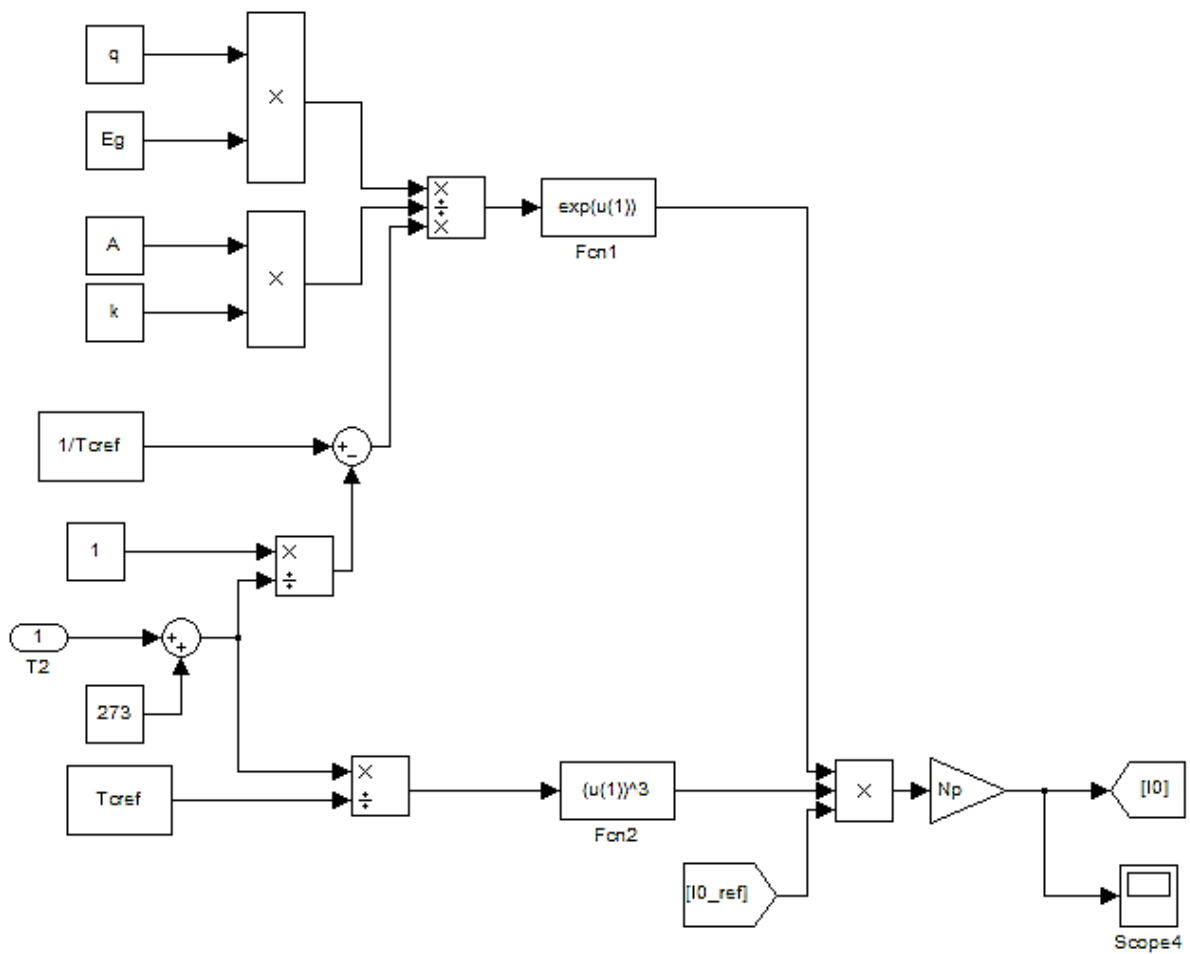


Figure .I-10. Déploiement I_0 détaillé

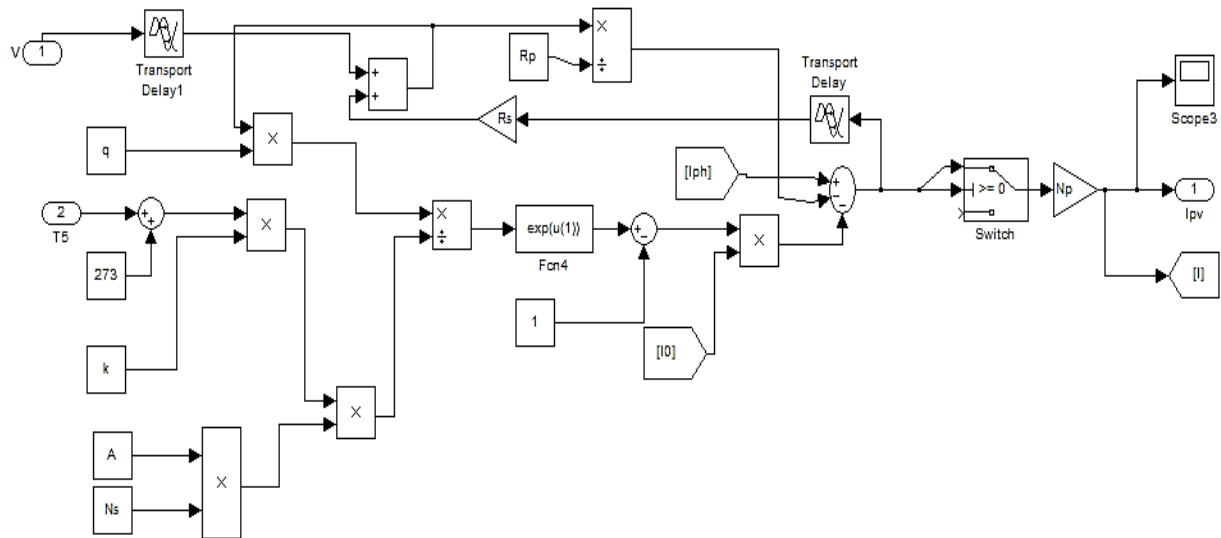


Figure .I-11. Déploiement I_{pv} détaillé.

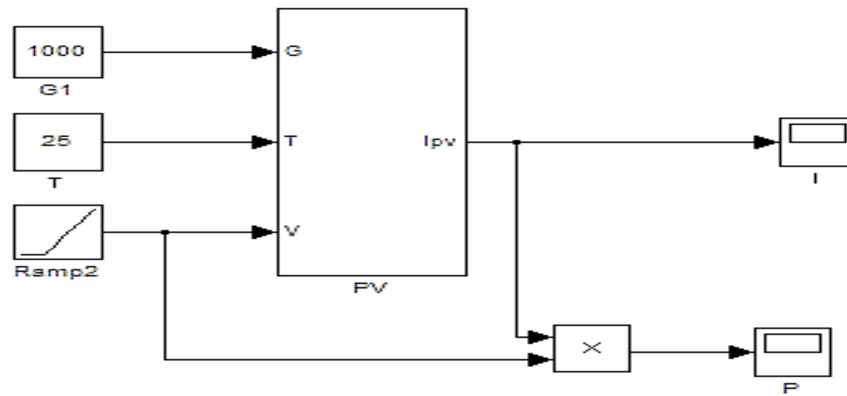


Figure .I-12. Présentation de module PV

I.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [17].

I.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle:

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

$$I_{PCC} = N_P \times I_{CC} \quad (I-18)$$

$$V_{PCO} = V_{CO} \quad (I-19)$$

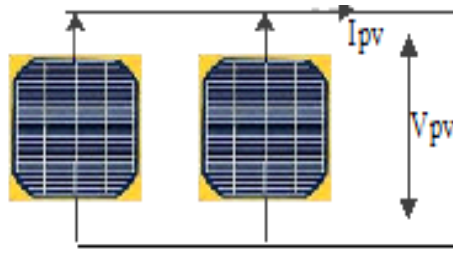


Figure .I-13. Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en parallèle

I.7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [17].

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad (I-20)$$

$$V_{SCO} = N_S \times V_{CO} \quad (I-21)$$

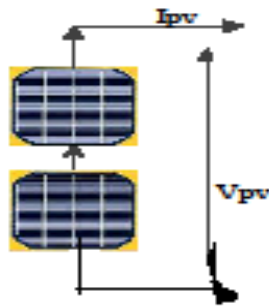


Figure .I-14. Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en série

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} comme représente la formule suivante :

$$P_{max} = V_{op} * I_{op} \quad (I-22)$$

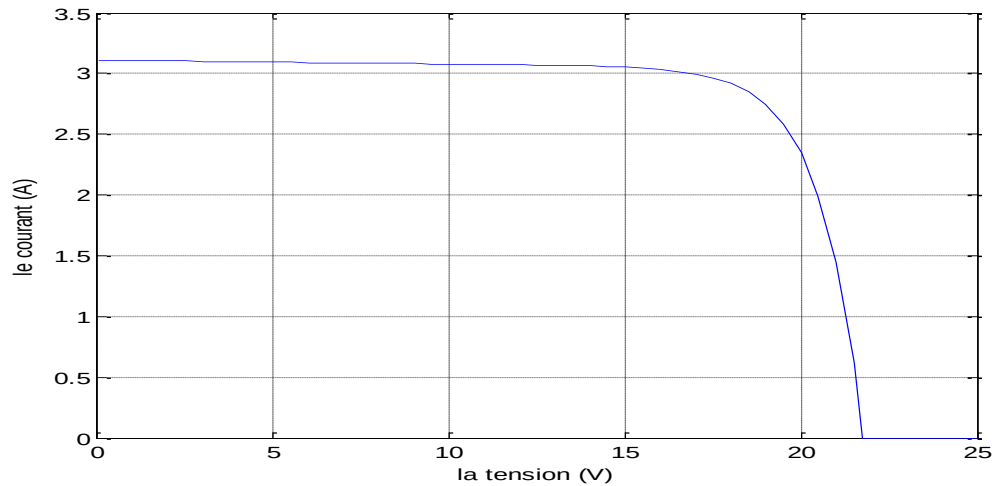


Figure .I-15. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

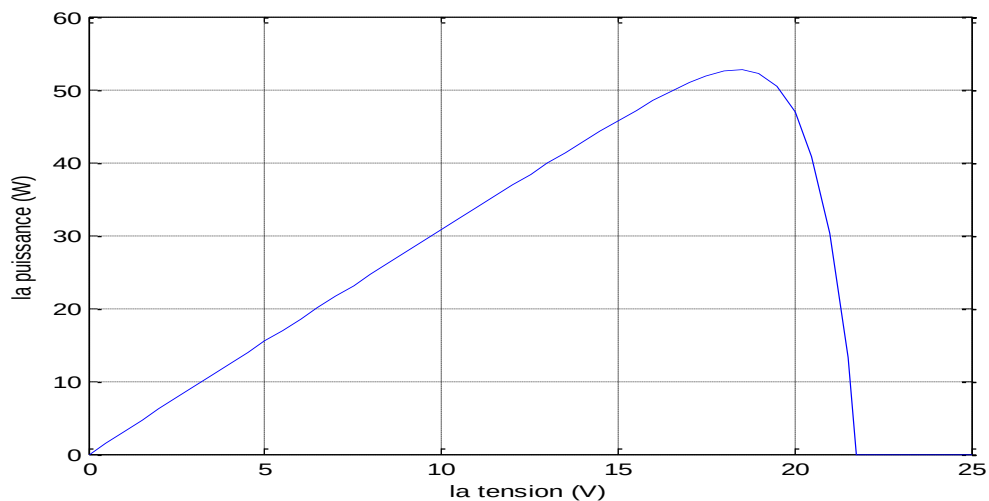


Figure .I-16. Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.

I.8. Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m², la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I-(17,18)). 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 dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement [18].

L'irradiation standard internationalement accepter pour mesure le réponse des panneaux photovoltaïque est un intensité rayonnante de 1000W/m²et une température 25 C⁰.

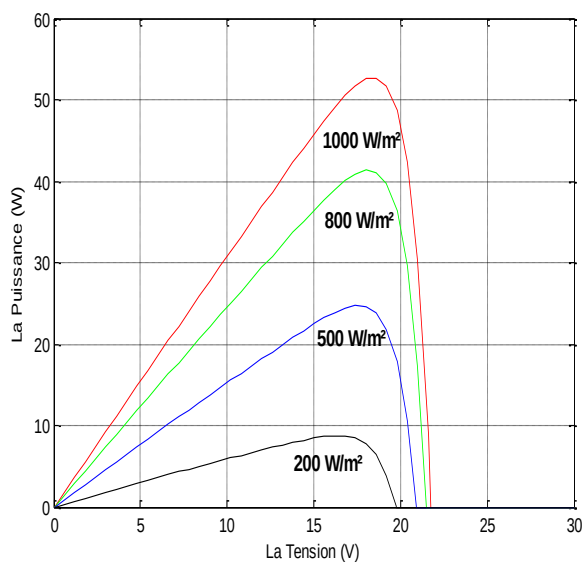


Figure .I-17. Caractéristique P-V du module PV selon variation d'éclairement.

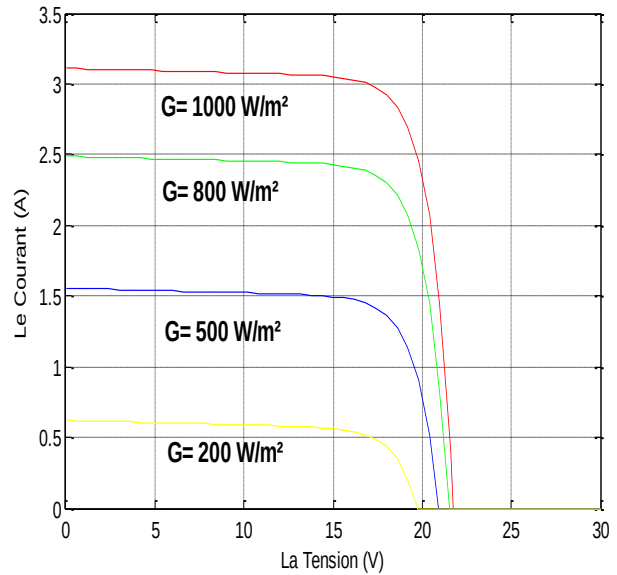


Figure .I-18. Caractéristique I-V du module PV selon variation d'éclairement.

I.9. Influence de la Température :

En faisant varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I-(19,20)). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

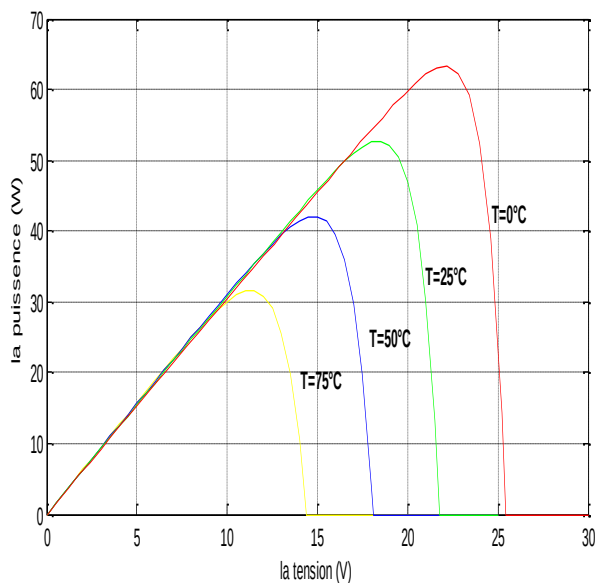


Figure .I-19. Caractéristique P-V du module PV selon variation de Température

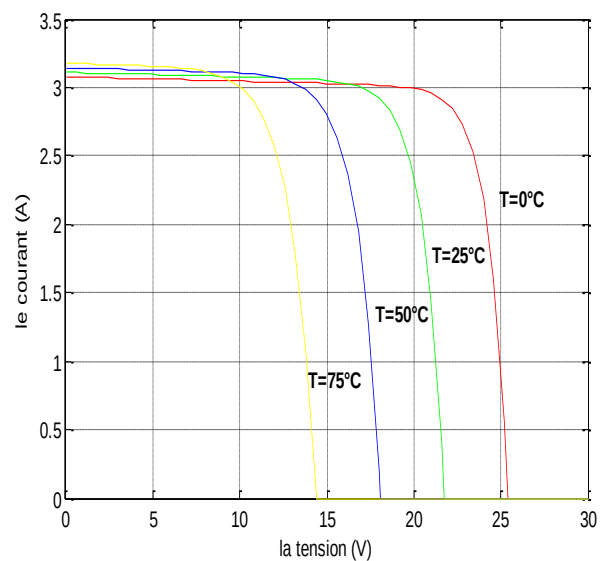


Figure .I-20. Caractéristique I-V du module PV selon variation de Température

I.10 . Influence de la résistance série :

La figure (I-(21,22)) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance P-V dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension constante .

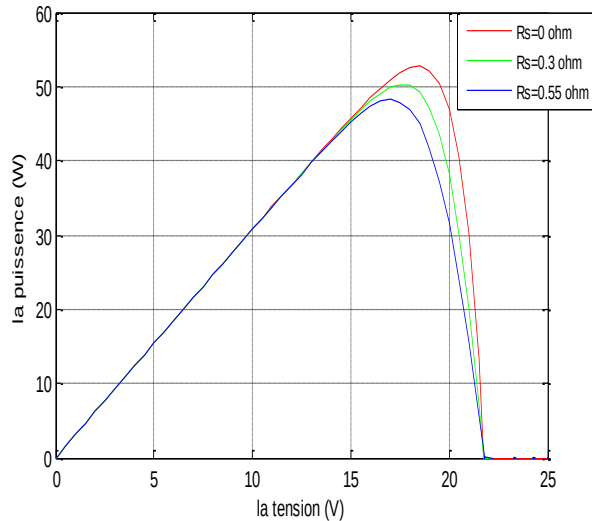


Figure .I-21. Caractéristique P-V de module PV selon influence de résistance série

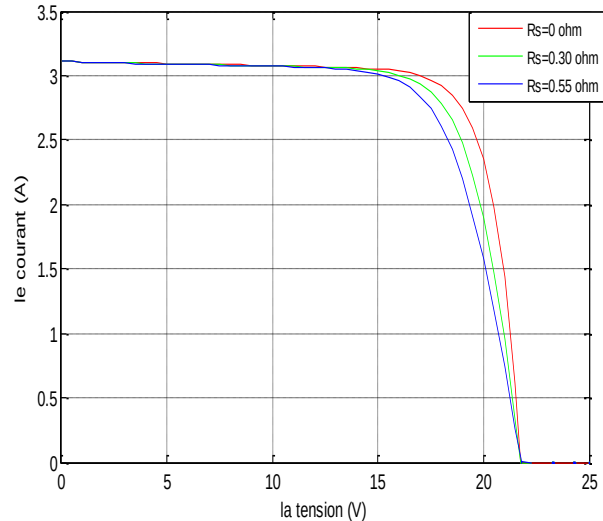


Figure .I-22. Caractéristique I-V du module PV selon influence de résistance série

I.11 . Influence de éclairement et température :

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentent par les figures (I-(23,24)). Ces figures représentent les caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents éclairement et température.

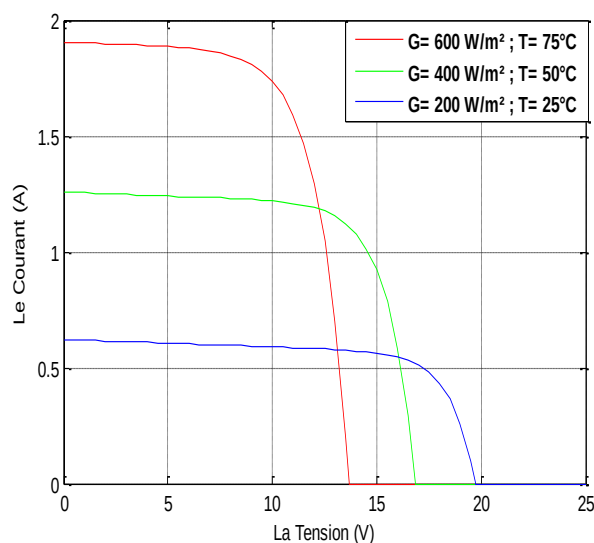


Figure .I-23. Caractéristique I-V de module PV selon variation de Eclairement et température

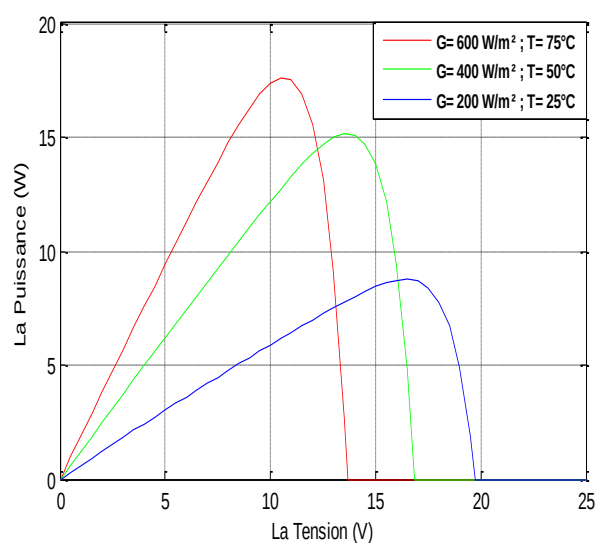


Figure .I-24. Caractéristique P-V du module PV selon variation de Eclairement et température

I.12. Influence de facteur d'idéalité :

Théoriquement, le facteur d'idéalité A des cellules poly-cristallines prend une valeur entre 1 et 2, tout en étant près de la valeur de 1 par rapport aux courants élevés, il augmente jusqu'à la valeur pour des courants faibles. Pour un fonctionnement normal, il est généralement égal à 1.3. La courbe de la figure (I-25) confirme la notification précédente.

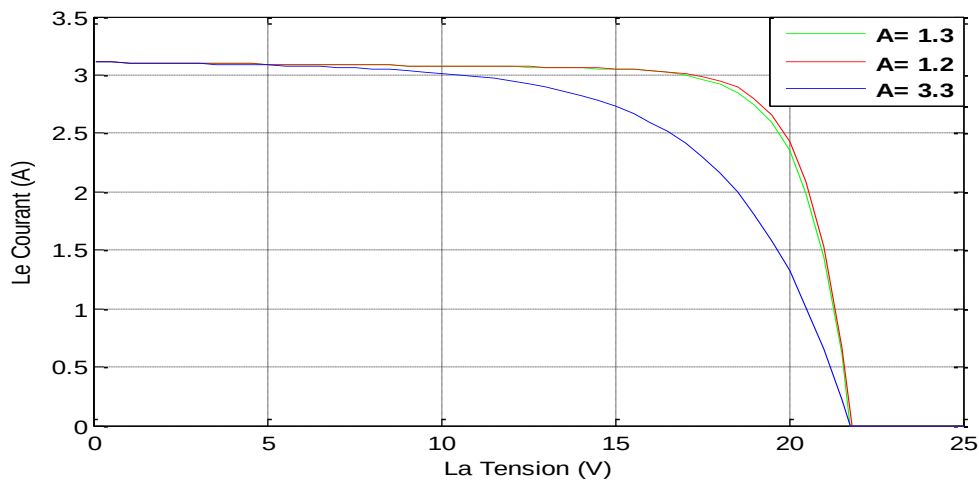
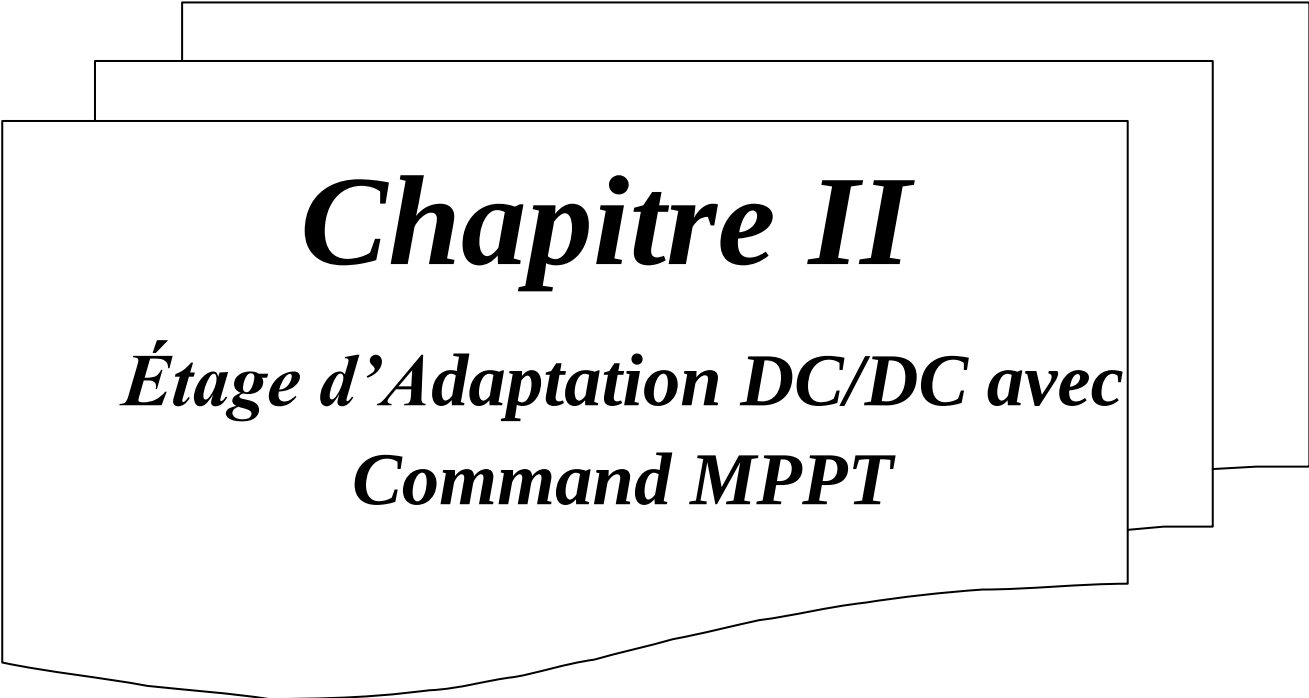


Figure I-25. Caractéristique I-V de module PV selon la différence du facteur d'idéalité.

I.13. Conclusion:

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leur commande MPPT pour rechercher le point où la puissance maximale du générateur photovoltaïque.



Chapitre II

***Étage d'Adaptation DC/DC avec
Command MPPT***

II.1. Introduction

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [2].

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale (MPPT) placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance.

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but.

Dans ce chapitre nous allons citer et expliquer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPPT et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi les précédents s'appelle 'perturbation et observation' (P&O : Perturb-and-Observe) [19].

II.2. Connexion directe source-charge :

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure (II -1) montre ce cas de connexion. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur photovoltaïque et en plus l'endommager irréversiblement, Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge.

Cette configuration est illustrée à la figure (II -1). L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le

transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti [20] .

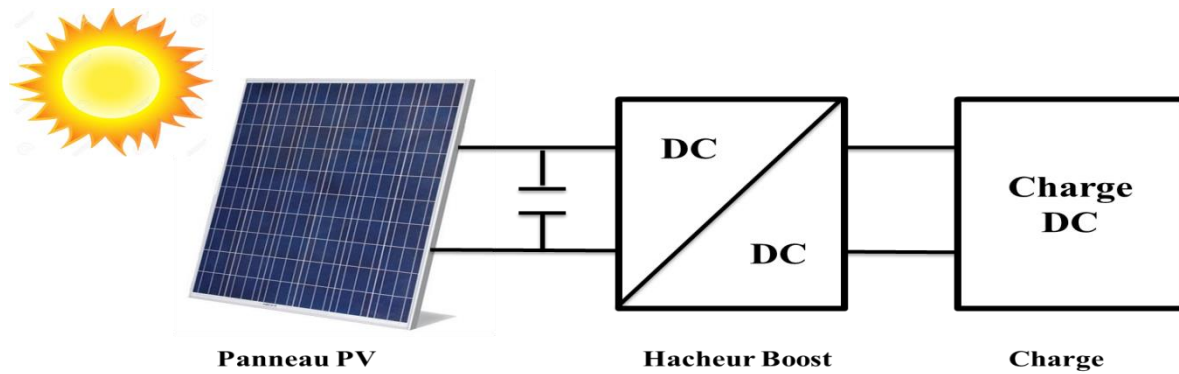


Figure .II-1. Connexion directe source-charge

II.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure (II -2).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [21].

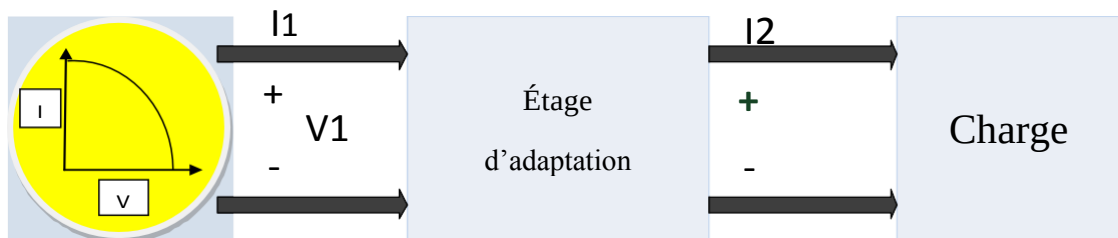


Figure .II-2. Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée; P_{max} ($P_{max} = V_{opt} \times I_{opt}$, où V_{opt} et I_{opt} représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe I-V donnée), tout en assurant que la tension ou bien le

courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

II.4. Les convertisseurs DC-DC dévolteur:

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [22].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure II-3), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [22].

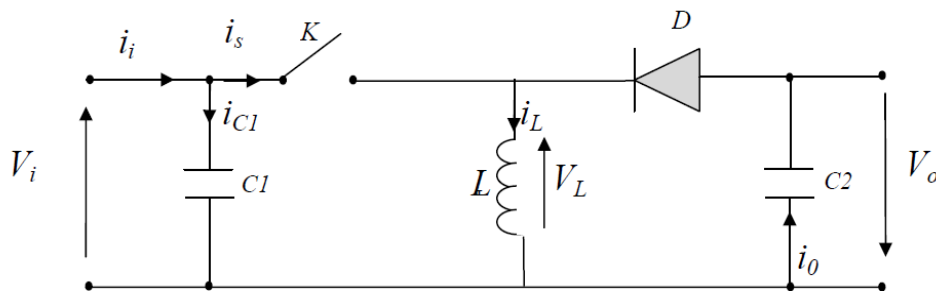


Figure .II-3. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure II.4), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [22].

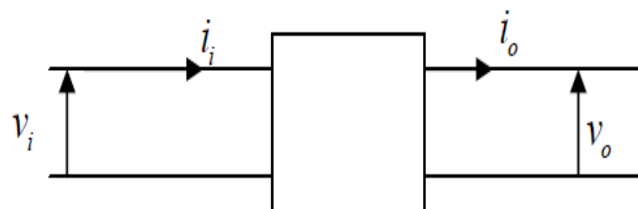


Figure .II-4. Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est

passant (figure II.5). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [22].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f avec un temps de fermeture = T_{ds} et un temps d'ouverture = $(1-d) T_s$. Où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

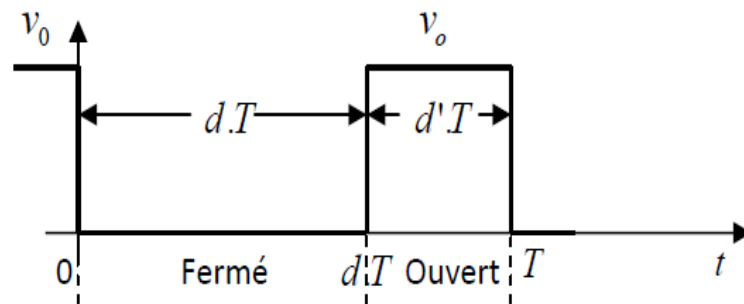


Figure .II-5. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [22 23 24 25].

II. 4.1 Hacheur survolteur:

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « **boost** » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II-6). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [22].

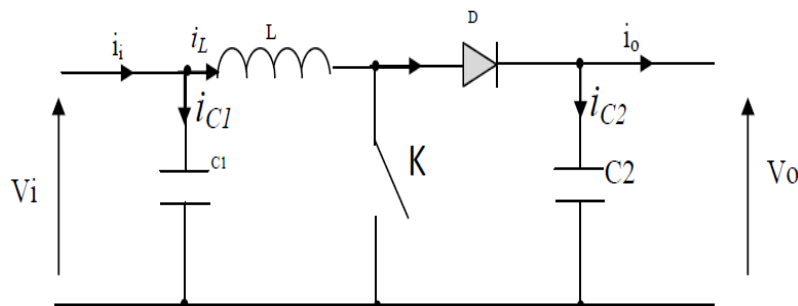


Figure .II-6. Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II-7) des deux phases de fonctionnement donne [22] :

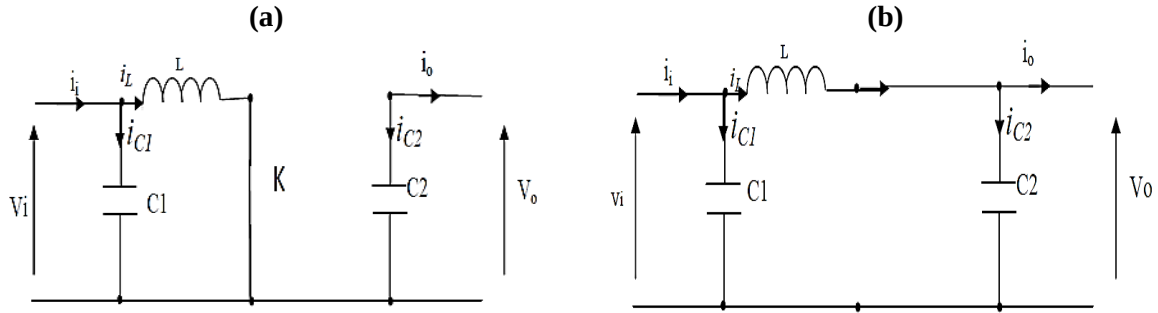


Figure .II-7. Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a): K Fermé, (b) : Ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.7), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période d.Ts :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_l(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_l(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

On trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [22] :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d} \left(i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \\ i_o = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_l = \frac{1}{d} \left(-(1-d)V_o + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

II.5.Résultat et simulation :

Le hacheur élévateur est commandé en boucle ouverte avec un rapport cyclique constant (D=0.3) Le schéma de simulation du hacheur dans l'environnement Matlab/Simulink est illustré dans la figure ci-dessous.

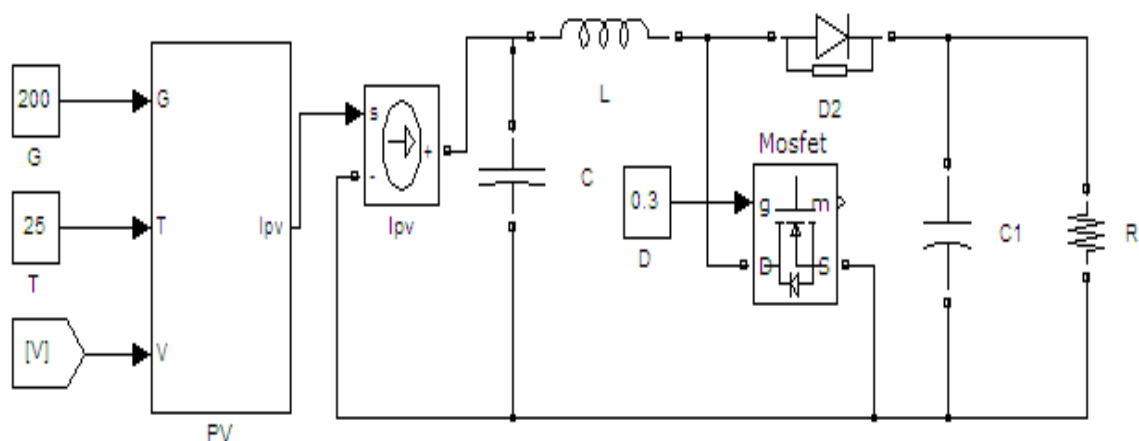
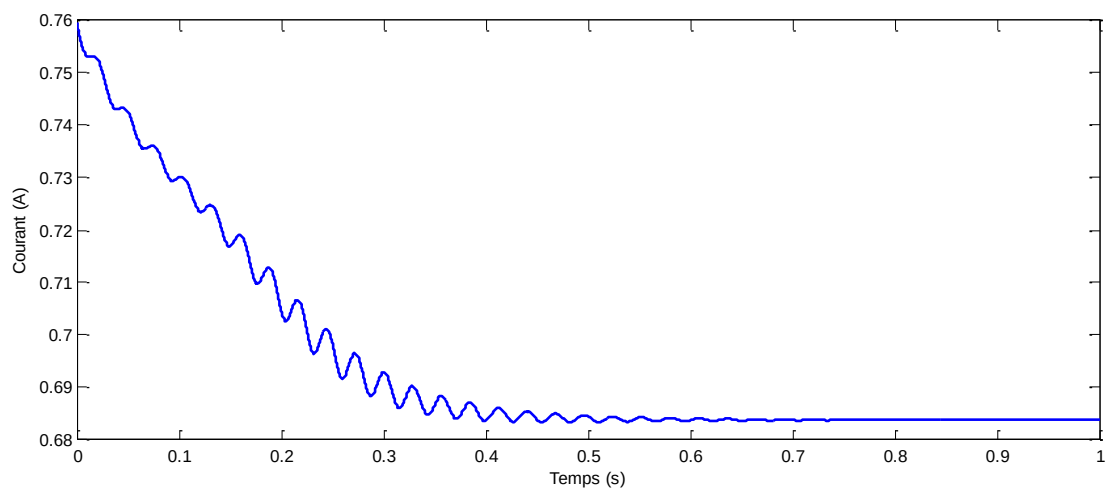
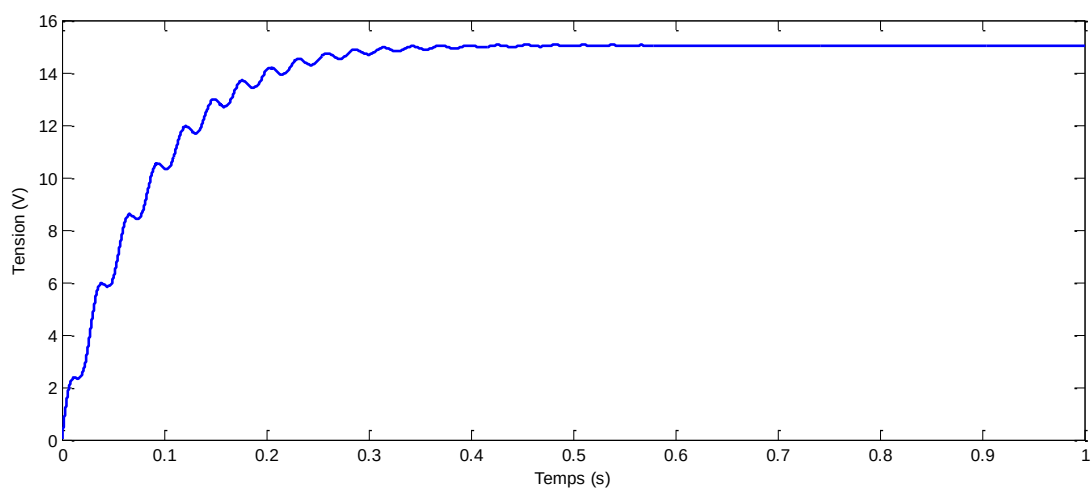


Figure .II-8. Schéma de simulation du hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance pour un rapport cyclique de 0,3.

(a)



(b)



(c)

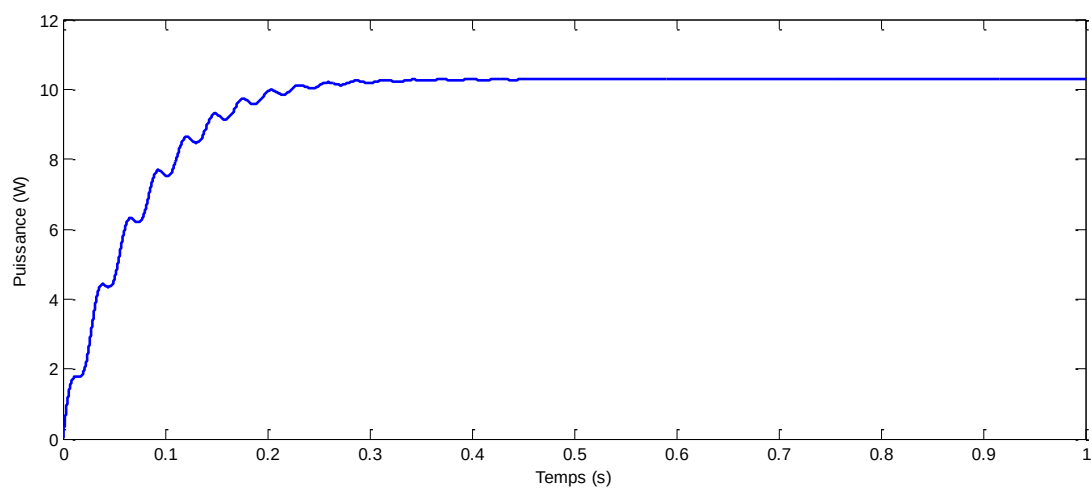
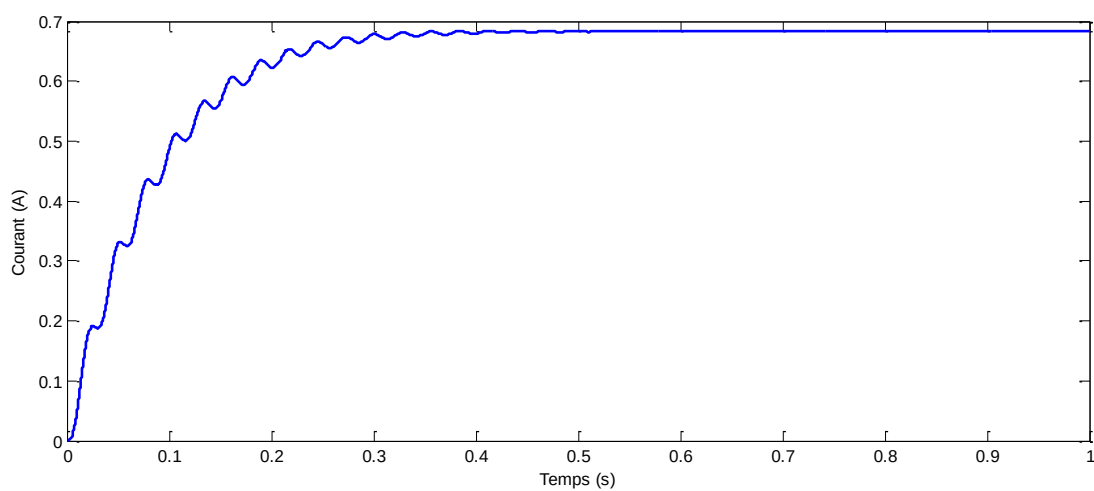
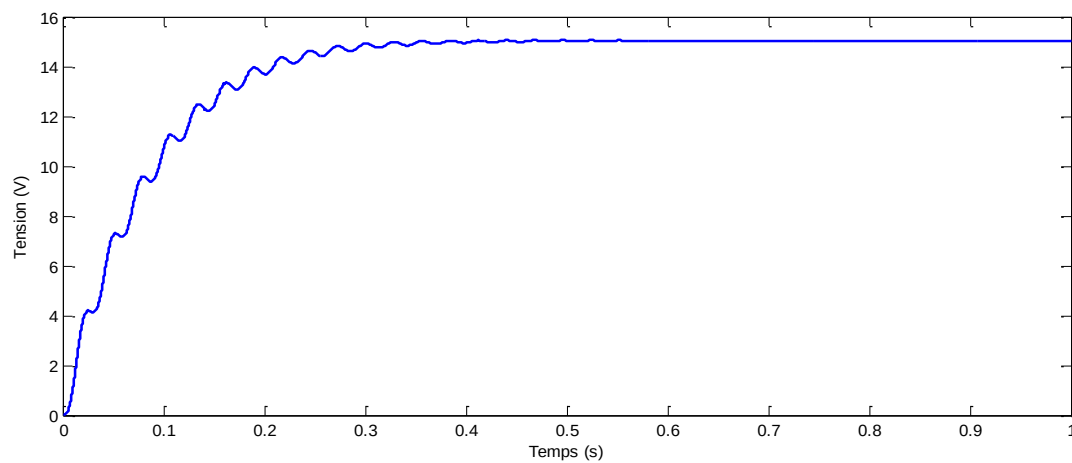


Figure .II-9. (a) Le courant aux bornes du GPV (b) La tension aux bornes du GPV (c) La puissance aux bornes du GPV

(a)



(b)



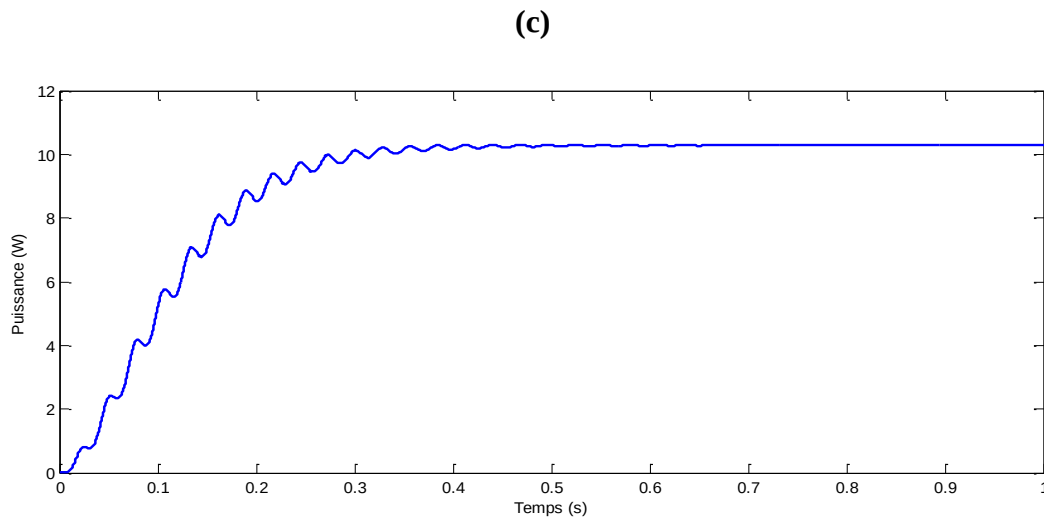


Figure .II-10. (a) Le courant aux bornes du charge (b) La tension aux bornes du charge
(c) La puissance aux bornes du charge

II.6.Principe de fonctionnement de MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant.

La Figure (II-11) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.[1]

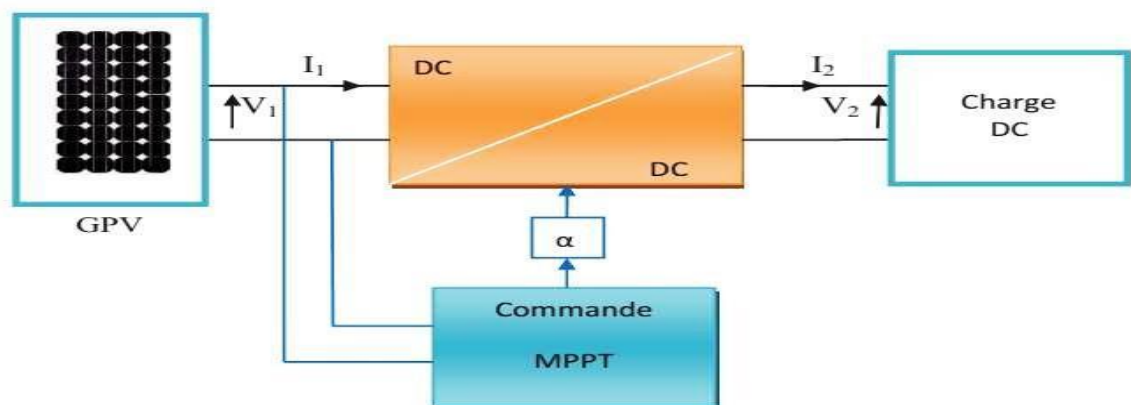


Figure .II-11. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La figure (II-12) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

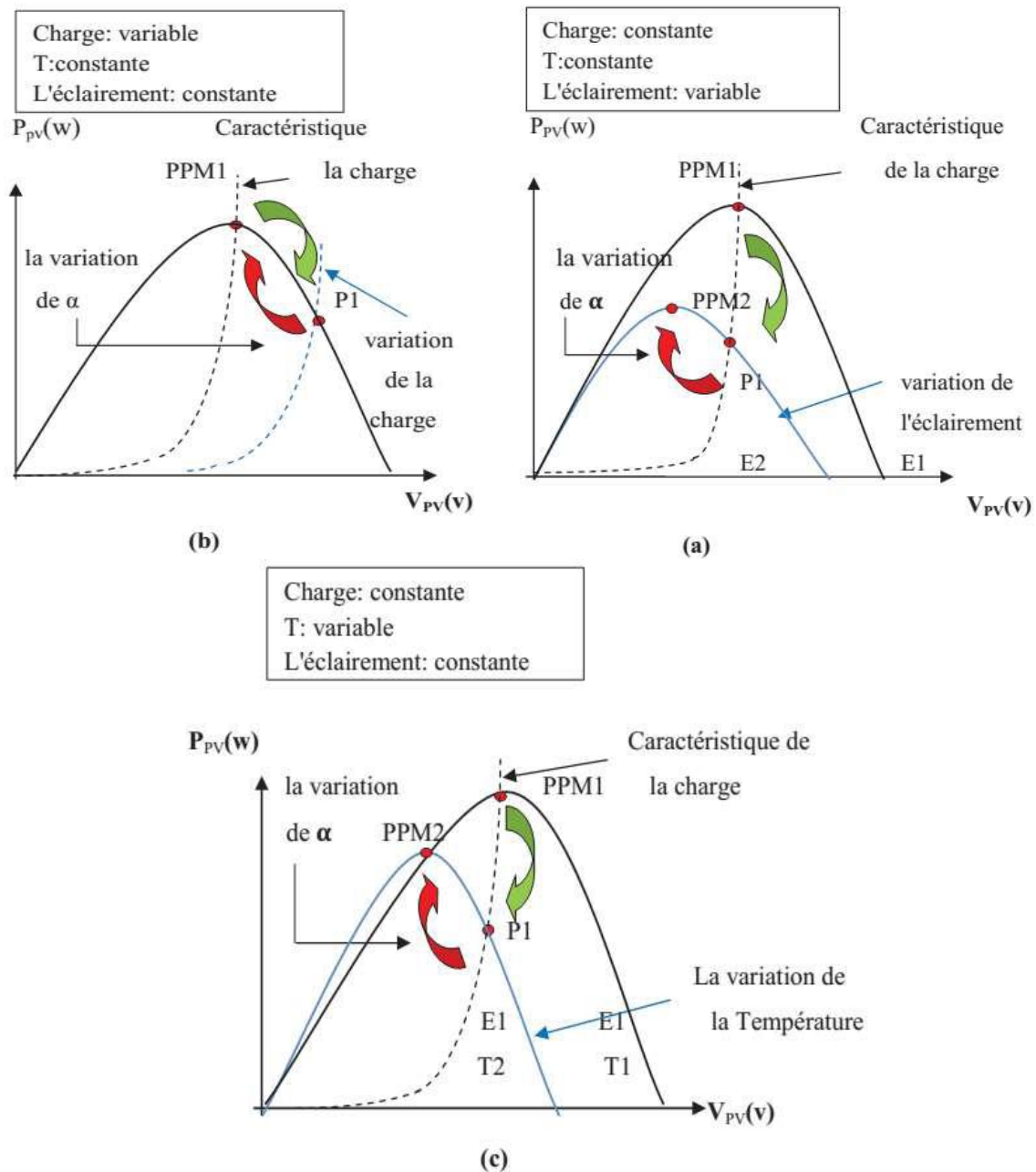


Figure .II-12. Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une

commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [26].

II.7. La méthode Perturbe & Observe (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II-13), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM [1].

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 $P_{pv}(V_{pv})$, 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.

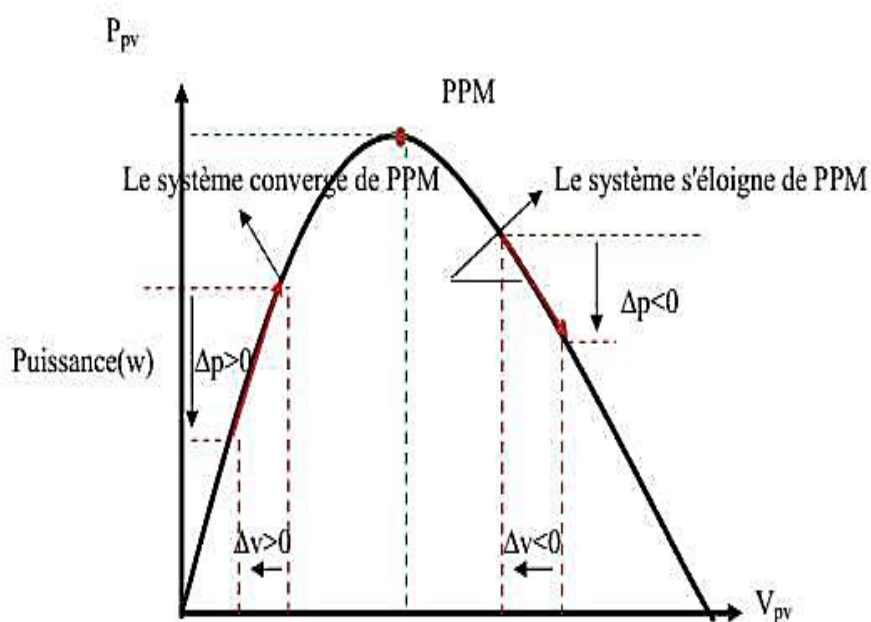


Figure .II-13. Schéma de convergence vers le PPM par P&O

La figure (II-14) 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.

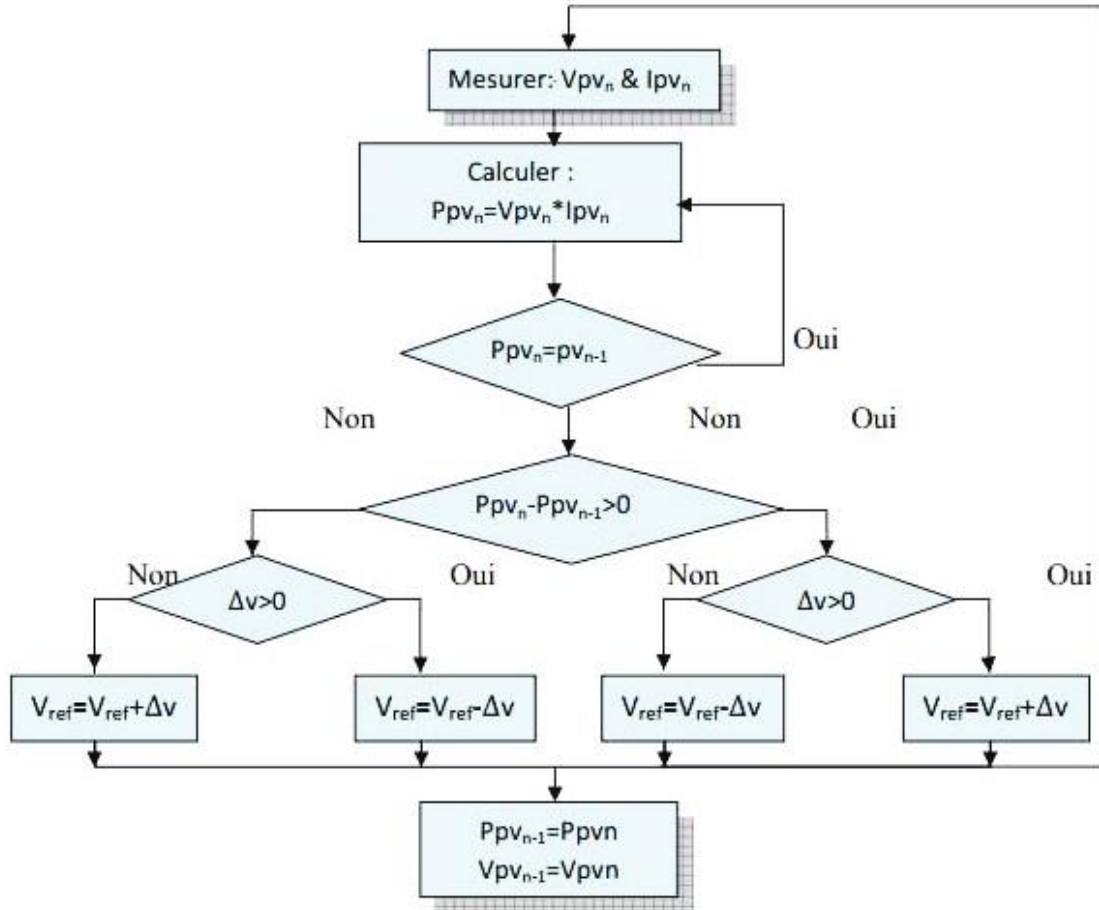


Figure .II-14. Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O la nouvelle puissance : P_{pv_n}

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [27].

$P_{pv_{n-1}}$: l'enceint puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta V = V_{PV_n} - V_{PV_{n-1}} \quad (\text{II-4})$$

$$\Delta P = P_{PV_n} - P_{PV_{n-1}} \quad (\text{II-5})$$

La méthode P&O est aujourd'hui 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 ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser[27].

II.8. Simulation de la commande MPPT numérique « P&O »:

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 [28].

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement.

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception d'une commande MPPT numérique «perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.

II.8.1. Simulation de la méthode MPPT:

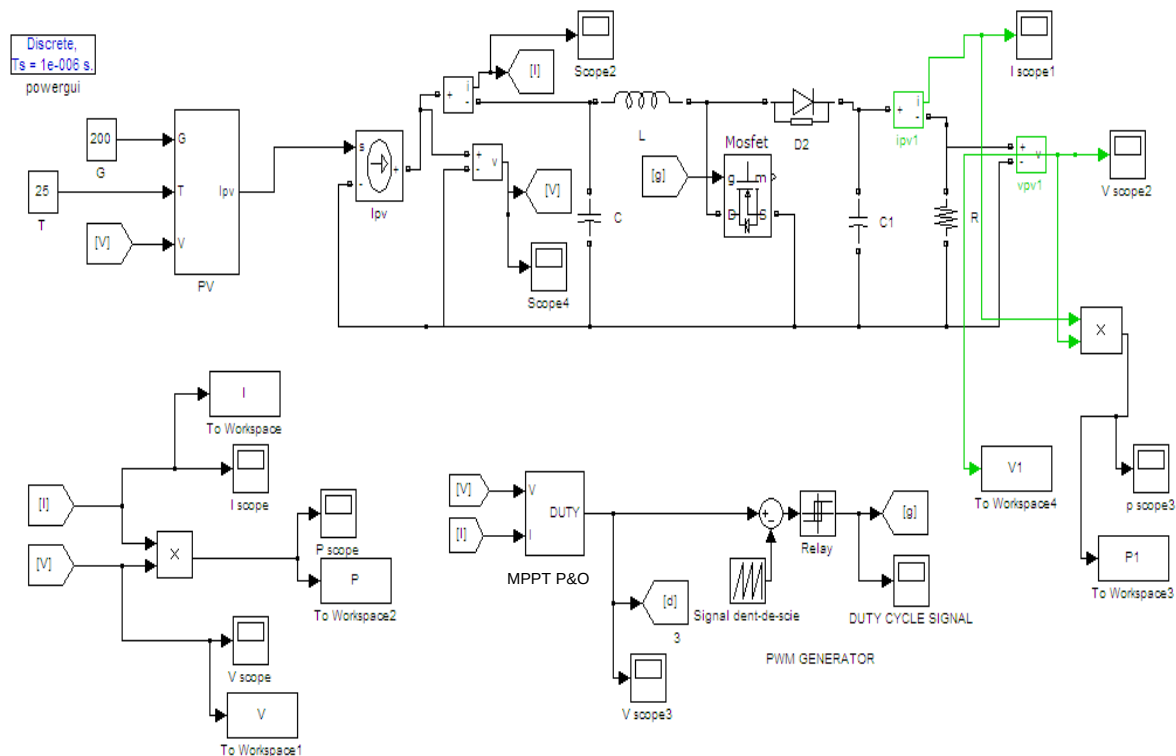


Figure .II-15. Schéma block de la commande MPPT

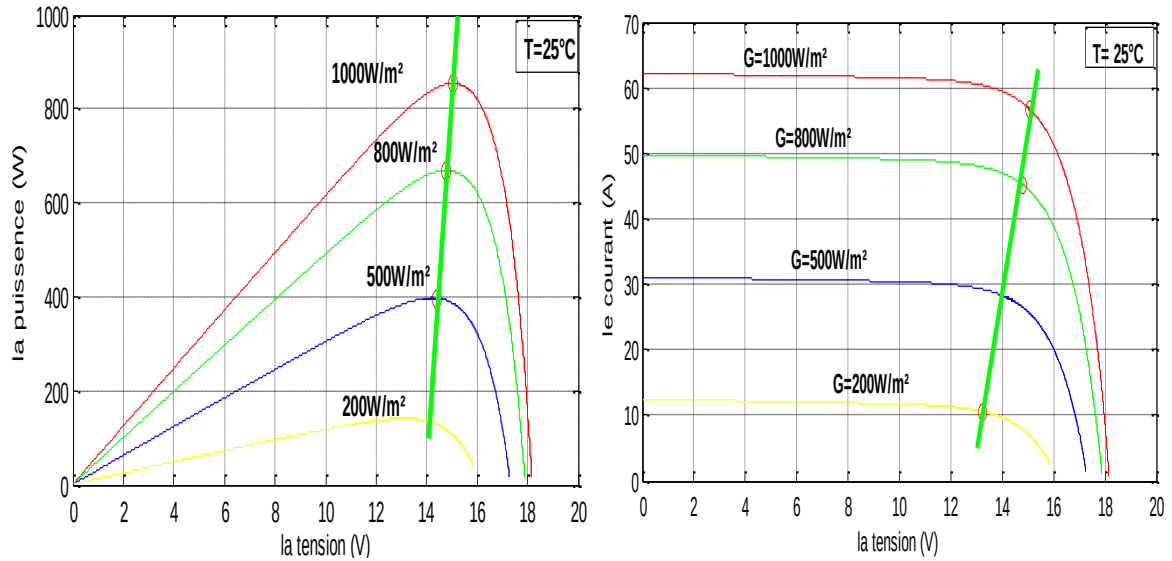


Figure .II-16. La caractéristique P-V, I-V selon la température et la trajectoire de PPM

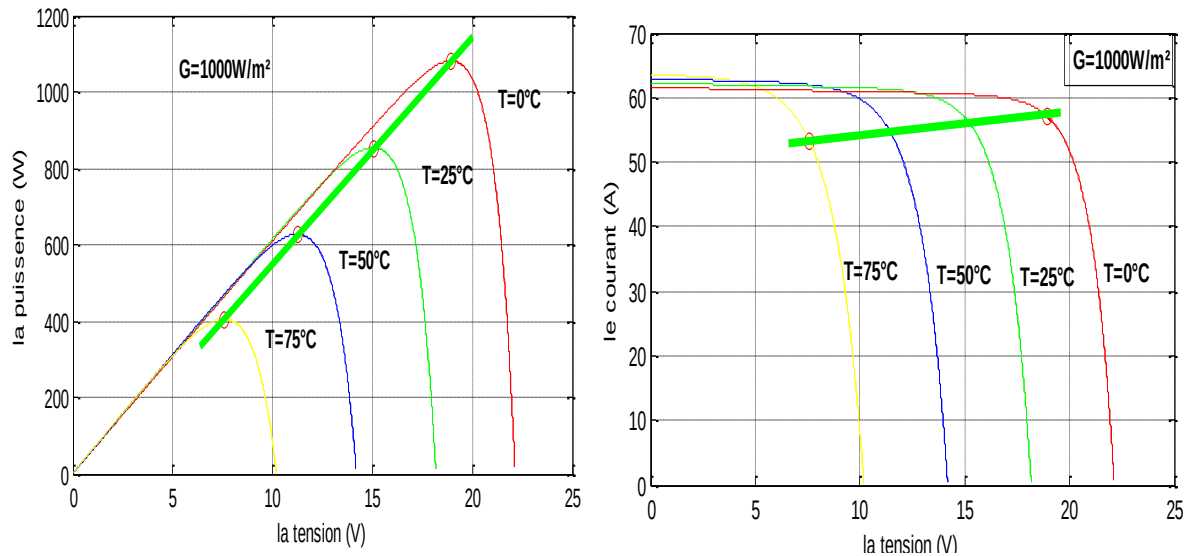
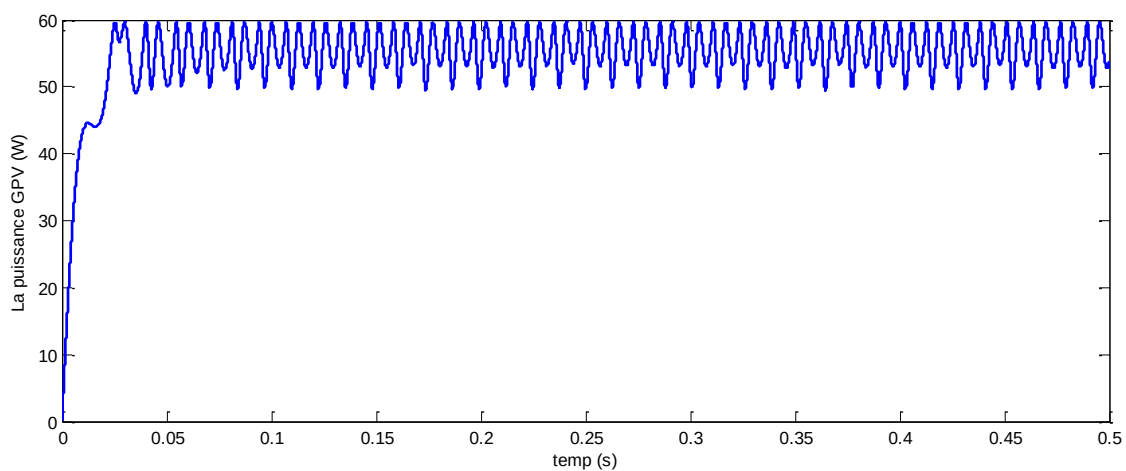
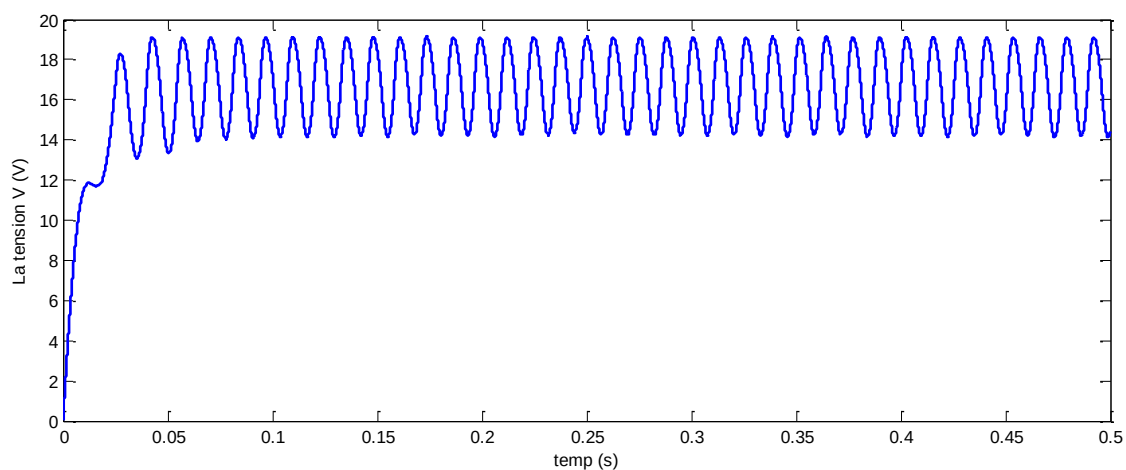
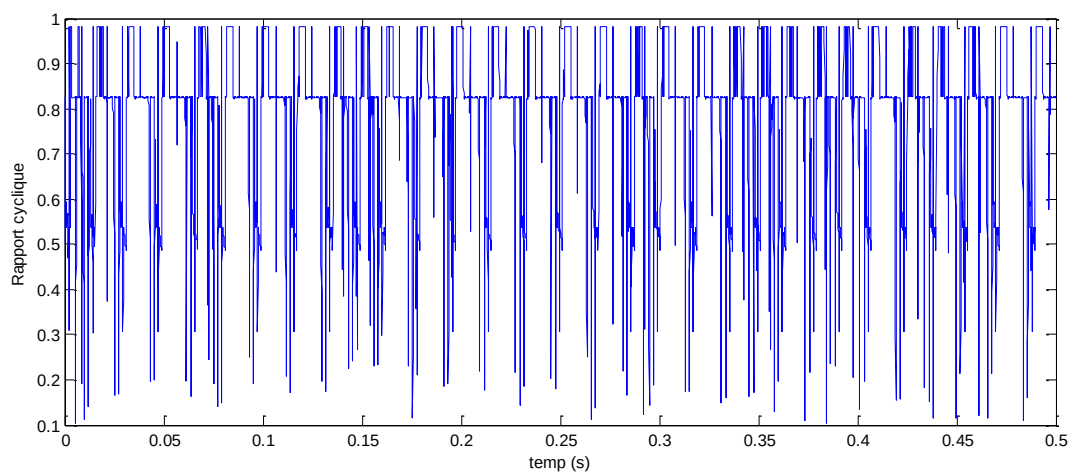


Figure .II-17. La caractéristique P-V, I-V selon l'éclairement et la trajectoire de PPM

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [29].

II.9. Résultats de simulation avec de la commande MPPT :**Figure .II-18.** La puissance aux bornes du GPV**Figure .II-19.** La tension aux bornes du GPV**Figure .II-20.** Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT P&O

III.4 . Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré l'intérêt d'utilisation d'un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge .

On a présenté et étudié aussi la commande MPPT basées sur la méthode perturbation et observation pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnements (température et ensoleillement).

Dans le dernier chapitre va être consacré à la commande MPPT basée sur la logique floue afin de comparer ses résultats avec les résultats de la commande MPPT perturbation et observation.



Chapitre III

***Commande MPPT Basée sur
l'Approche Floue***

III.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter en bref un rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système photovoltaïque. Nous introduisons d'abord quelques notions de la logique floue; nous nous limiterons aux propriétés essentielles, puis nous appliquerons cette technique d'optimisation pour maximiser le rendement du système PV.

Au cours des cette dernière décennie des techniques du soft computing ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques. Pas mal de travaux dans ce domaine ont fait l'objet d'une étude comparative entre une commande MPPT floue et d'autres techniques comme la méthode P&O (perturbation et observation) [30] et à chaque fois la commande MPPT flou donne de meilleurs résultats.

Bien que la commande MPPT floue tient une place respectable par apport à pas mal de méthodes MPPT proposées dans la littérature, la conception d'une commande MPPT floue présente quelques difficultés liées au choix optimal des paramètres des fonctions d'appartenance du contrôleur flou associé à la commande MPPT.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une commande MPPT flou en utilisant l'approche FLOU.

III.2. Commande MPPT floue :

La figure ci-dessous donne la structure de la commande MPPT floue utilisée pour la poursuite de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

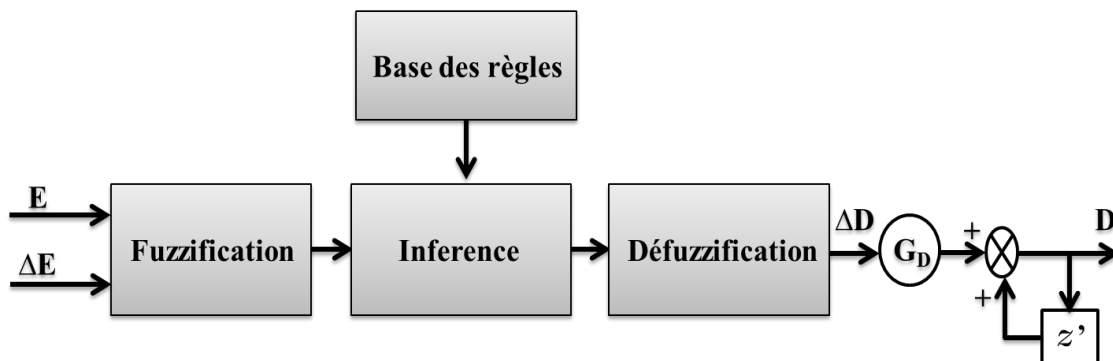


Figure .III-1. MPPT floue

Dans le première type de la commande MPPT floue les entrées du contrôleur sont l'erreur $E(k)$ et la variation de l'erreur $\Delta E(k)$ exprimées par :

$$E(K) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (III-1)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (III-2)$$

avec : P_{pv} et V_{pv} sont respectivement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

La première entrée $E(k)$ permet de savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe P-V, tandis que l'entrée $\Delta E(k)$ montre la direction du point de fonctionnement. La sortie du contrôleur flou est ΔD qui représente la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC [30].

Nous utilisons un contrôleur flou de type PI, la sortie du contrôleur $\Delta D(k)$ est considérée comme un incrémental du rapport cyclique $D(k)$:

$$D(k) = D(k-1) + GD \times \Delta D(k) \quad (III-3)$$

Nous avons aussi une deuxième proposition de la commande MPPT floue (type II), où les entrées du contrôleur sont la variation de la puissance $\Delta P_{pv}(k)$ ($P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)$) et la variation de tension $\Delta V_{pv}(k)$ ($V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)$) du générateur photovoltaïque.

III.3. Fonctions d'appartenance :

Chaque variable du contrôleur est définie par cinq (5) fonctions d'appartenance. Nous utilisons des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée (E et ΔE) et des fonctions de type singleton pour la variable de sortie (ΔD). Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont: PB (positif grand), PS (positif petit), Z (Zéro), NS (négatif petit) et NB (négatif grand).

Les figures III-2, III-3 et III-4 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E , ΔE et ΔD le premier contrôleur de type I.

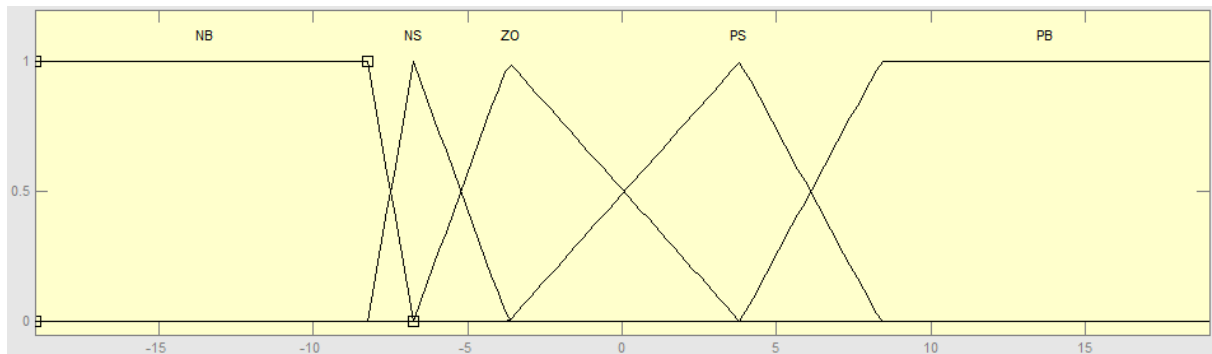


Figure .III-2. Fonctions d'appartenance de la variable E (MPPT floue type I)

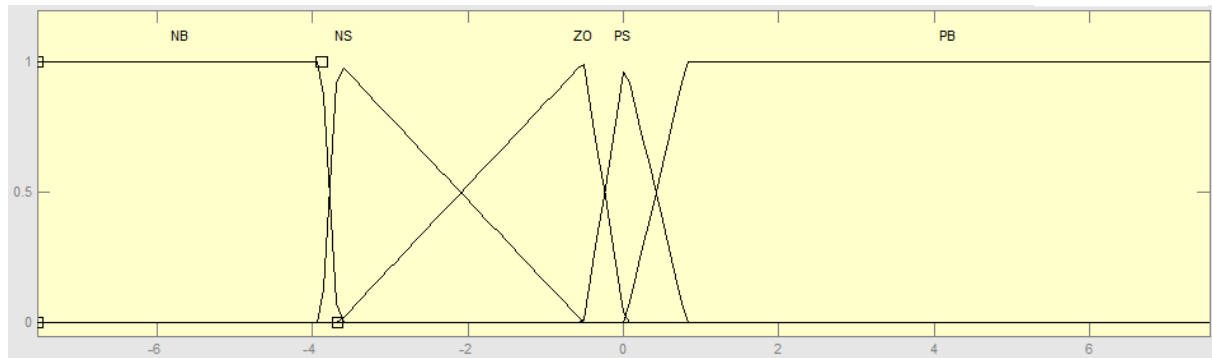


Figure .III-3. Fonctions d'appartenance de la variable ΔE (MPPT floue type I)

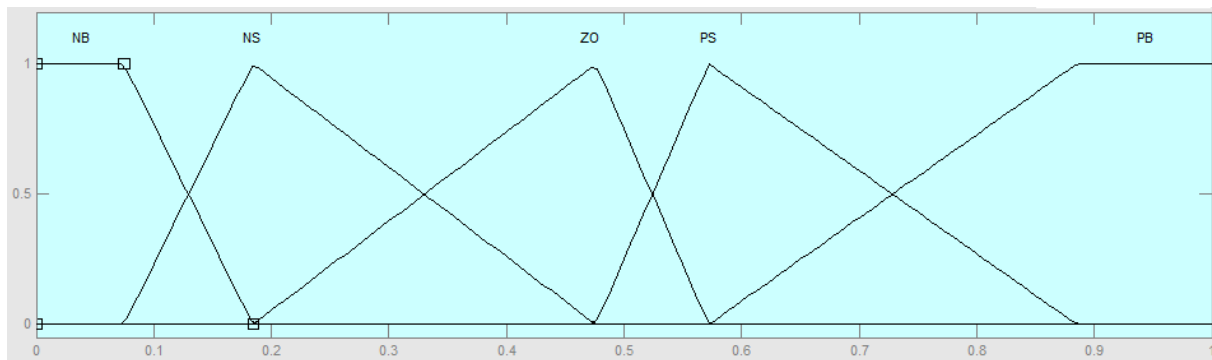


Figure .III-4. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type I)

Les univers de discours sont respectivement $[-19.01 \ 19.01]$, $[-7.54 \ 7.54]$ et $[0, 1]$ pour les variables E , ΔE et ΔD .

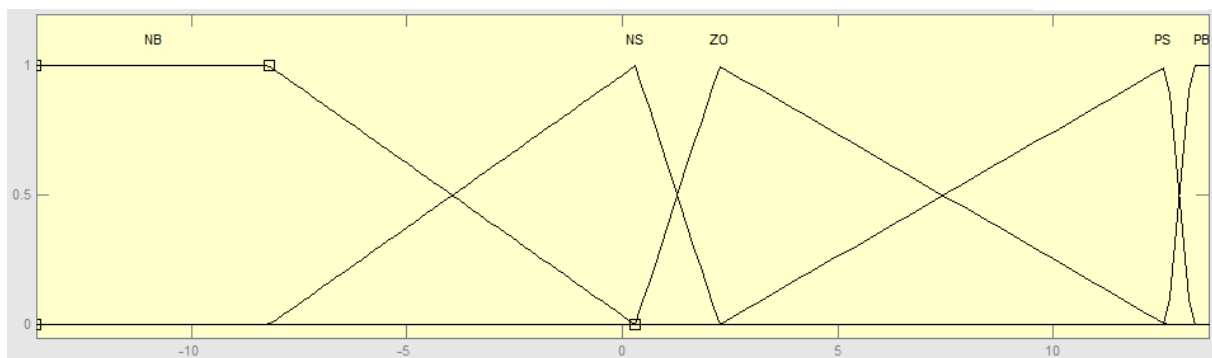


Figure .III-5. Fonctions d'appartenance de la variable ΔP (MPPT floue type II)

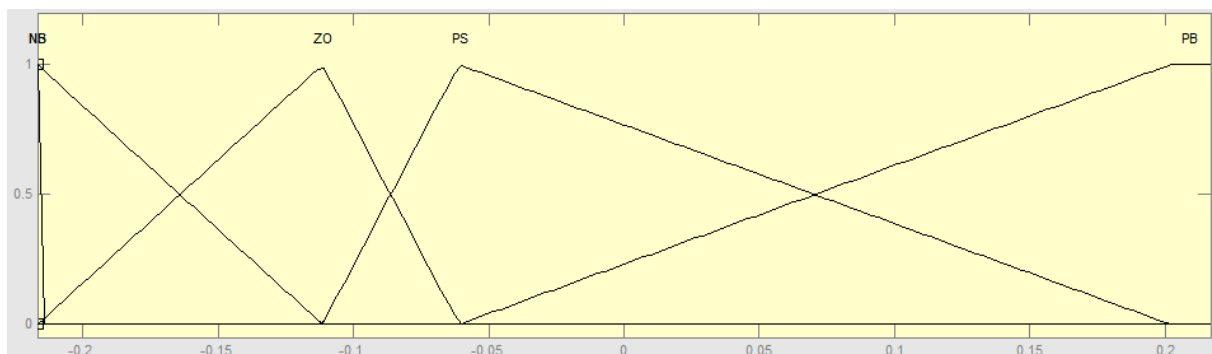


Figure .III-6. Fonctions d'appartenance de la variable ΔV (MPPT floue type II)

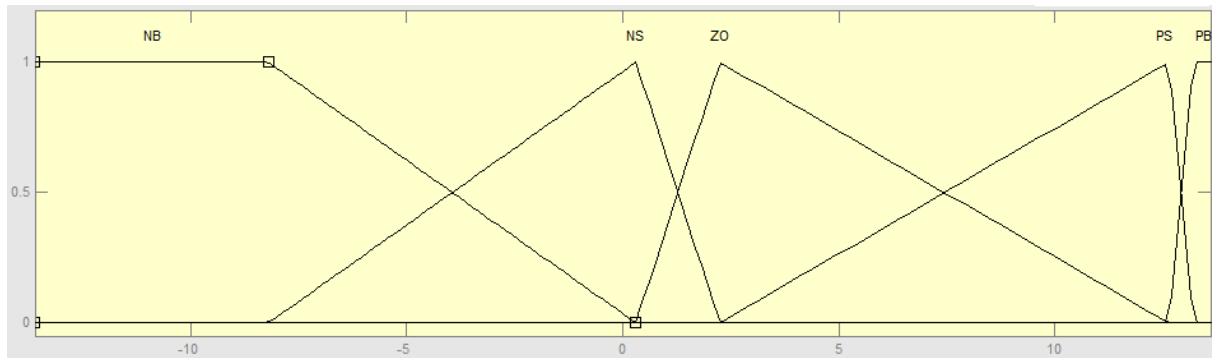


Figure .III-7. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD (MPPT floue type II)

Les figures III-5, III-6 et III-7 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E , ΔE et ΔD la deuxième contrôleur de type II. Les univers de discours sont respectivement $[-13.6 \ 13.6]$, $[-0.2169 \ 0.2169]$ et $[0, 1]$ pour les variables ΔP , ΔV et ΔD .

III.4. Règles floues :

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie ΔD du régulateur MPPT en fonction des signaux d'entrées (E et ΔE). Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E doit être toujours nulle [30].

Tableau III.1. Base de règles du MPPT floue (type I)

		ΔE					
		ΔD	NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	PS	NS	NB	ZO	NS	
	NS	NS	ZO	ZO	ZO	NS	
	ZO	NB	NB	NS	PS	ZO	
	PS	NB	NS	NS	PB	PB	
	PB	ZO	NS	NS	PB	PS	

La règle correspondante à la cellule rouge du tableau est interprétée comme suit :

Si E est Positif Grand et ΔE est Zéro Alors ΔD est Négatif petit.

Ce qui veut dire que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (MPP) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe $P(V)$ est environ de Zéro; Alors en diminuer le rapport cyclique largement pour atteindre le "MPP".

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signal de sortie ΔD du régulateur MPPT floue type II en fonction des signaux d'entrées (ΔP et ΔV).

Tableau III.2. Base de règles du MPPT floue (type II)

		ΔV					
		ΔD	NB	NS	ZO	PS	PB
ΔP	NB	ZO	ZO	NB	ZO	PS	
	NS	NB	ZO	ZO	NB	PS	
	ZO	NS	NS	PS	NB	ZO	
	PS	NB	ZO	PS	NS	PS	
	PB	PS	NS	PB	NS	ZO	

C'est la méthode d'inférence de Mamdani qui a été utilisée pour le traitement des règles floues. Elle consiste à modéliser l'opérateur MIN pour le ET flou et l'opérateur MAX pour le OU flou.

Nous avons également utilisé la méthode du centre de gravité comme méthode de défuzzification [30].

III.5. Conception du contrôleur MPPT flou :

Dans ce travail nous utilisons la conception des contrôleurs flous (CF) appliqué à la poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT floue).

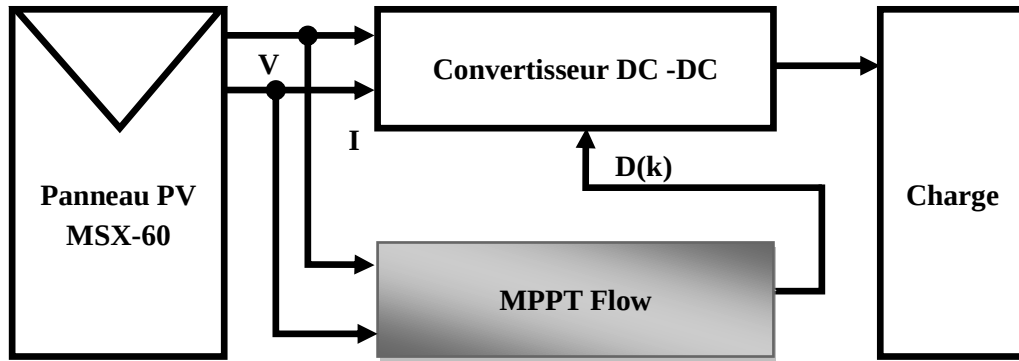


Figure .III-8. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue

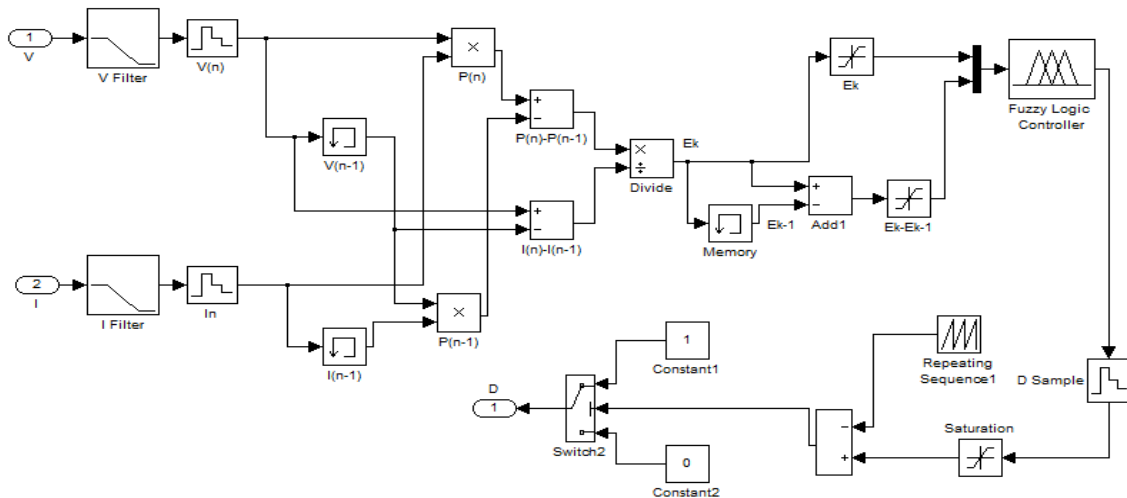


Figure .III-9. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type I

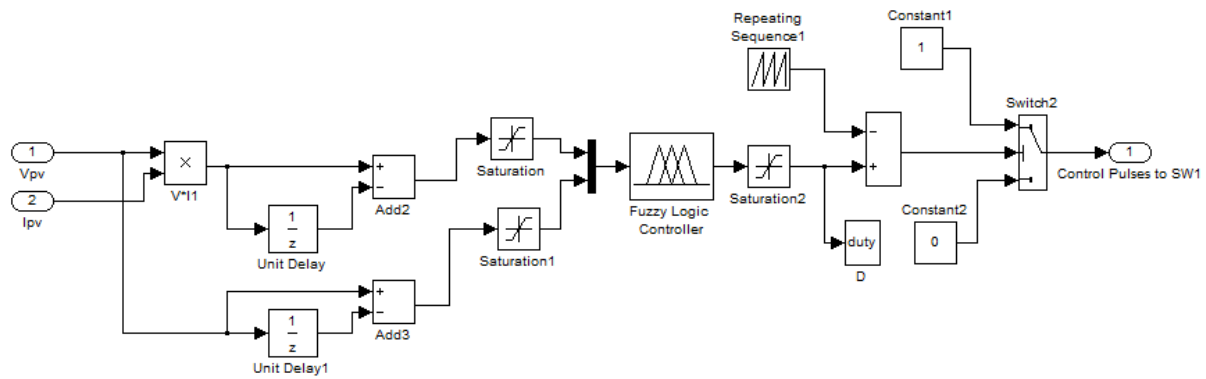


Figure .III-10. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type II

La figure III-9 illustre la stratégie de cette approche que l'on peut présenter la schéma synoptique d'un contrôleur MPPT flou types I et II dans la figure III-10.

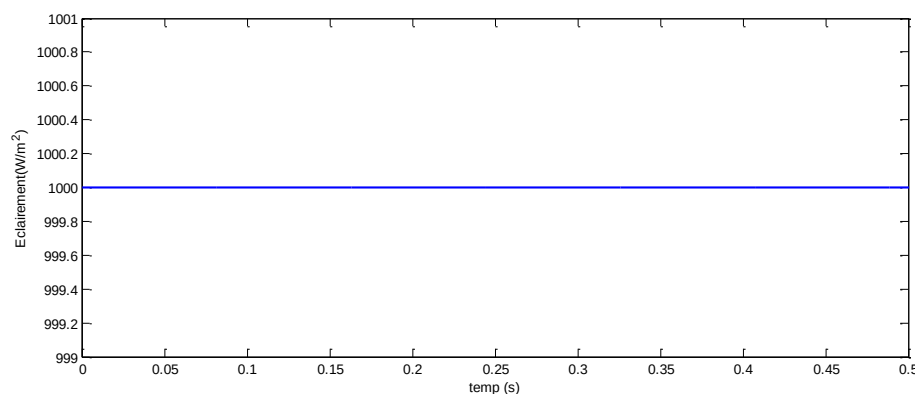
III.6. Résultats de Simulation :

Dans cette partie, on commence par évaluer le système solaire sans régulateur par simulation avec l'outil de simulation MATLAB/Simulink. Ensuite, les deux méthodes de poursuite MPPT sont étudiées; la méthode (P&O), la méthode utilisant le contrôleur flou. Les deux systèmes sont simulés sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions météorologiques.

III.6.1. Fonctionnement sous des Conditions Constantes :

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température $T = 25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement $= 1000\text{W/m}^2$. Le but de ces simulations est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP. Il sert aussi à évaluer les pertes dues aux oscillations autour de ce point.

La Figure.III-11 illustre les réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards ($T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000\text{W/m}^2$).



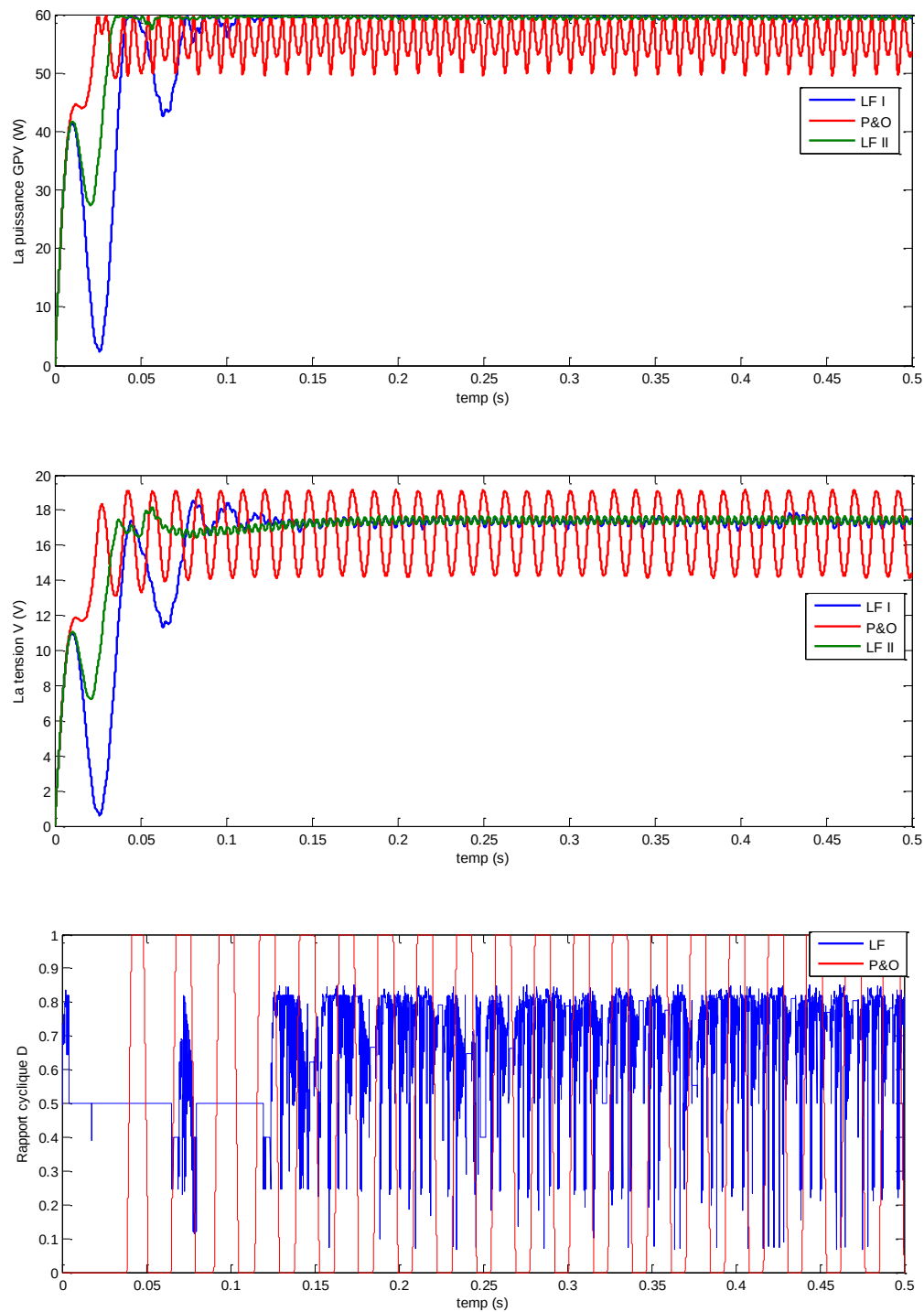


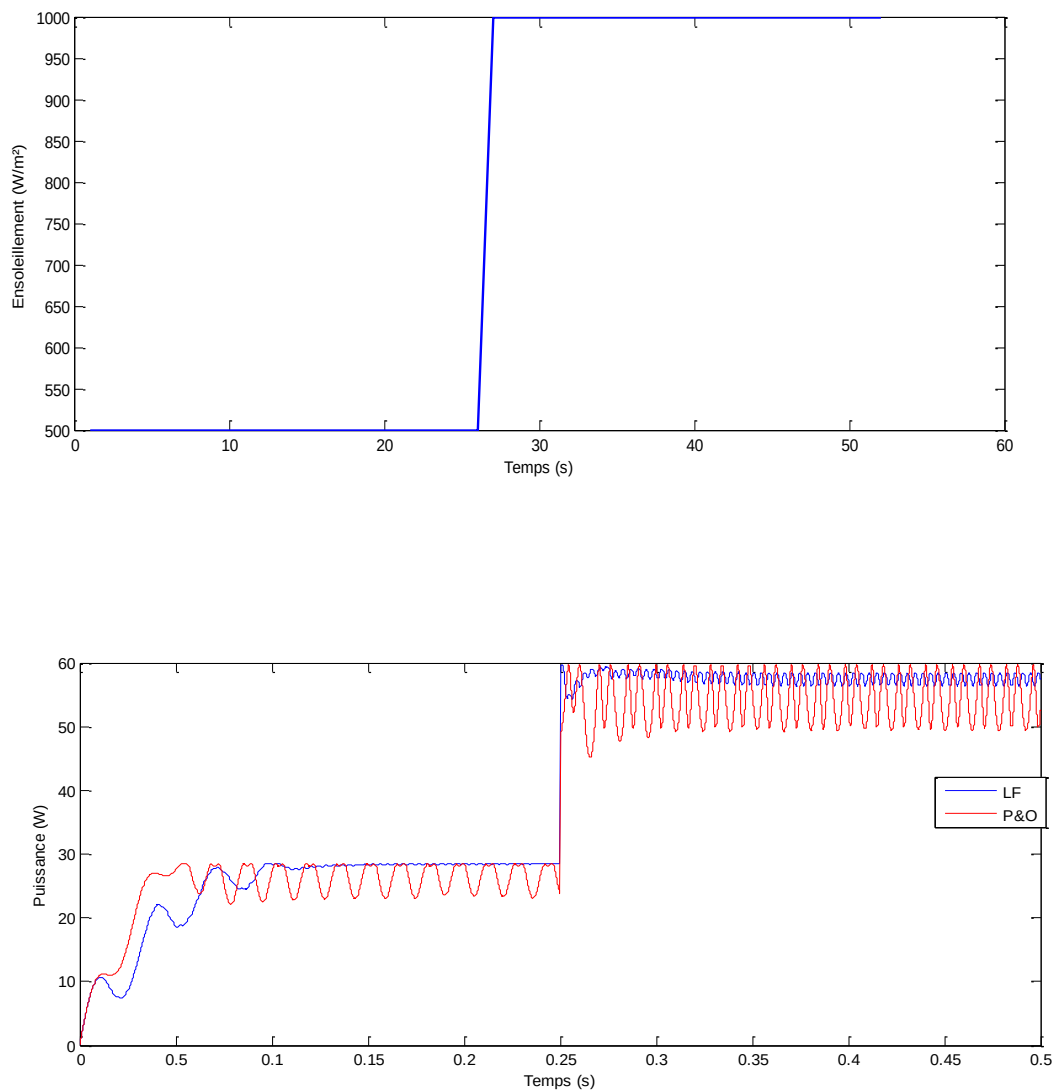
Figure .III-11. Réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards : la température $T= 25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement $E= 1000\text{W}/\text{m}^2$.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

III.6.2. Comportement du système face à un changement de les conditions météorologiques :

Afin d'évaluer le temps de réponse des deux mécanismes de poursuite, ces derniers sont soumis à des variations des conditions météorologiques. Pour voir le comportement du système face aux changements climatiques on va lui faire subir les tests suivants : d'abord on maintient une température constante (25 °C) et on varie l'éclairement solaire avec signal échelon ($E = 500$ à 1000 w/m^2) et signal rampe.

Figure III-11 et III-12 montrent que le phénomène d'oscillation apparaît au niveau de la commande MPPT P&O, par contre la commande à logique floue réagissent avec finesse en déminant toute oscillation possible.



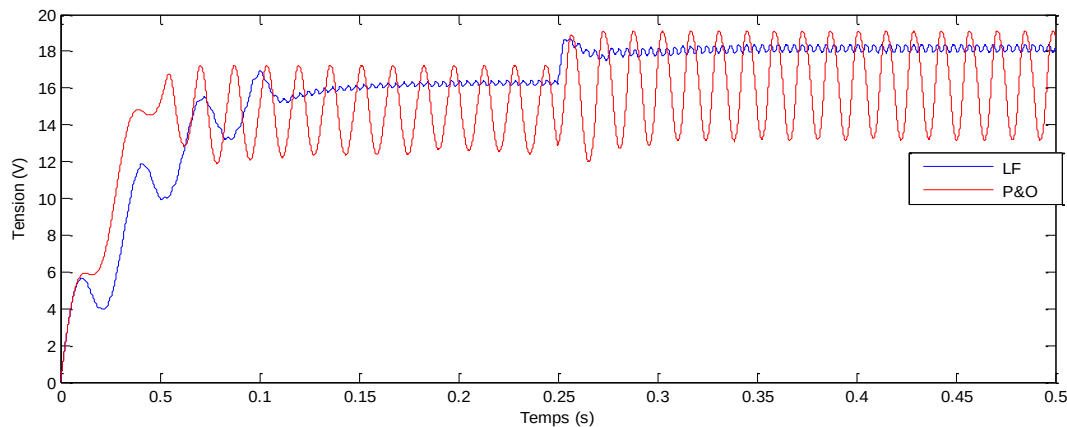


Figure .III-12. Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement (échelon $E= 500$ a 1000 w/m^2) à température constante $T = 25^\circ\text{C}$

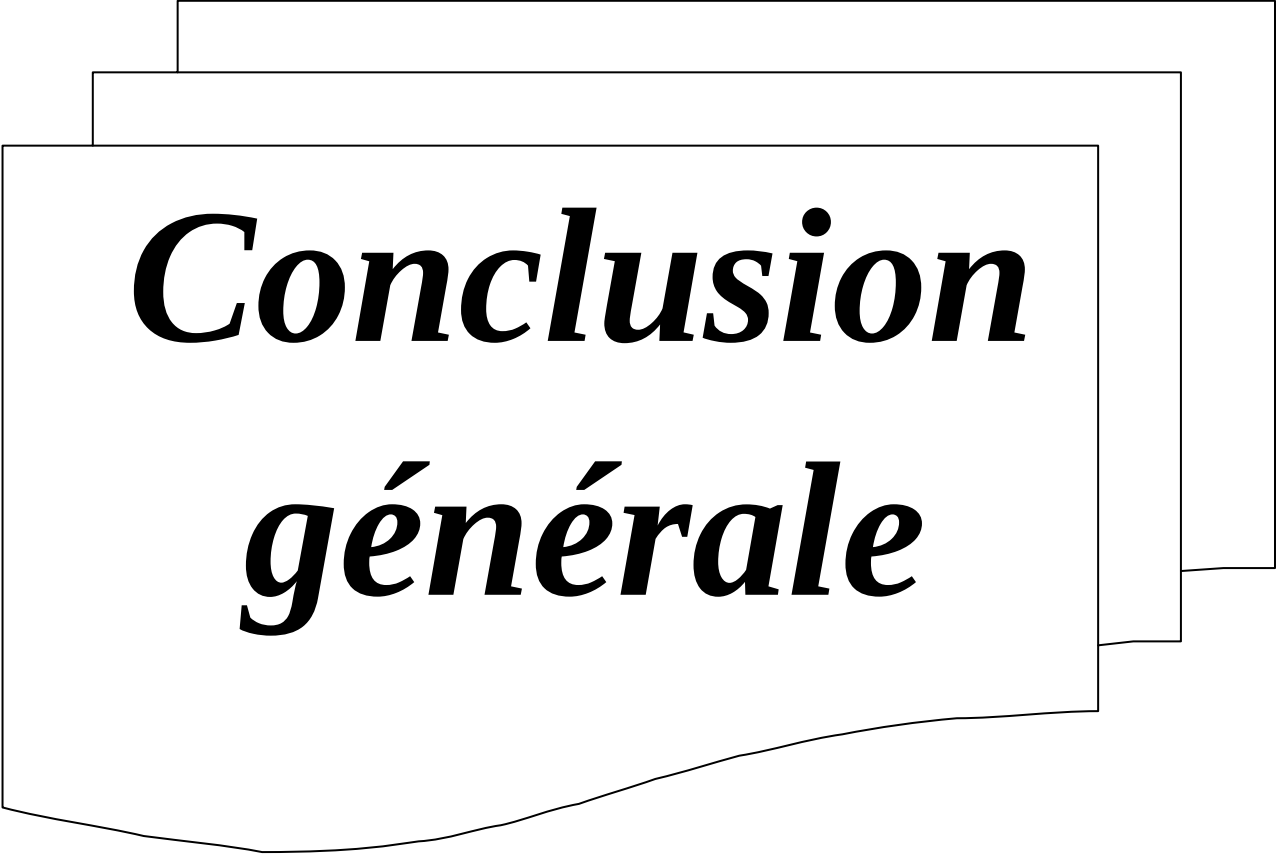
La figure (III.12) montre comment la puissance de (P&O) augmente presque linéairement, avec un léger retard, On voit que la MPPT floue, dans ce cas, est plus rapide avec une faible oscillation autour du MPP.

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'éclairement et de température, ont été obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou et P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P&O). Le contrôleur P&O présente un temps de réponse rapide. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT floue a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

III.7. Conclusion :

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, logique floue sous différents conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur MPPT Flou sont meilleurs que celle du contrôleur MPPT P&O, du point de vue robustesse vis-à-vis des changements des paramètres météorologiques. La puissance de charge suit bien la puissance du GPV quelques soient les variations des paramètres météorologiques pour les deux contrôleurs. La méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en

termes de poursuite du PPM, présente des pertes de puissance dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT floue a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, mais il provoque aussi des oscillations importantes au démarrage et à chaque phase de transition; ce qui implique une amélioration du rendement du système.



Conclusion générale

Conclusion générale:

Cette étude concerne l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. Il s'agit d'utiliser une commande MPPT à base de logique floue (contrôleur flou) en vue d'améliorer les performances du mécanisme de poursuite du point de puissance maximale en termes de temps de réponse et de robustesse vis-à-vis aux variations des conditions climatiques.

Pour atteindre un tel objectif, nous avons commencé par donner le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque, élément principal dans un générateur photovoltaïque. Cette modélisation a été ensuite appuyée par simulation sous Matlab/Simulink d'un modèle de panneau photovoltaïque de type Solarex MSX-60 qui fournit une puissance maximale de 60 W sous des conditions atmosphériques standards. Cette simulation nous a permis d'une part de valider le modèle du panneau et d'autre part d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques (I-V et P-V) du panneau.

Après l'étape de la modélisation, nous avons abordé le problème de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes de conversion photovoltaïque. Plusieurs techniques de commande MPPT ont été utilisées dans la littérature. Nous nous sommes intéressés à la commande MPPT floue utilisé dans le processus de recherche du point MPP.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que la commande MPPT floue est plus robuste par rapport à une commande MPPT conventionnelle.

Ainsi, les perspectives futures sont d'améliorer les performances d'une commande MPPT floue en optimisant les paramètres du contrôleur flou par les métaheuristiques pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque.

***Référence
Bibliographies***

Référence Bibliographies

- [1] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane , **Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque** , Mémoire de Master Académique , Université El Oued , 2015.
- [2] BOUALEMDENDIB, **Technique Conventionnelles et Avancée de Poursuite MPPT Pour des Applications Photovoltaïque : Étude Comparative**, Université Ferhat Abbas-Sétif, Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [3] S. NAOUAL, "**Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur**," université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010.
- [4] baroud kendo li, « **État de l'Art Et Modélisation des Micro-centrales** », Magister en Électrotechnique de l'Université Mentouri de Constantine 2007.
- [5] Gergaud, Olivier. *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [6] Belhadj Mohammed, « **Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome** », Mémoire de Magister en Microélectronique–Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.
- [7] B .Flèche, D. Delagnes, « **Énergie Solaire Photovoltaïque** », STIELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [8] Dahbi, M. *Etude et optimisation d' une installation Hybride PV-Eolienne*. Diss. Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [9] F. HEROGUEL, "**Les Cellules Photovoltaïques**," Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [10] Djarallah, Mohamed. "contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique." *Université de Batna Thèse de Doctorat en Science* (2008).
- [11] Labouret, Anne, and Michel Villoz. *Energie solaire photovoltaïque*. Vol. 4. Dunod, 2006.
- [12] Habbati Bellia et all , A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2014,3, p53–61.

- [13] Chouder, Aissa, et al. "Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters." *Simulation Modelling Practice and Theory* 20.1 (2012): 46-58.
- [14] Motahhir, Saad, Abdelaziz El Ghzizal, and Aziz Derouich. "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM." *Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes*. 2015.
- [15] Beckman, W.A., Klein, S.A., Kou, Q., A method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Pv Pumping Systems, University Of Wisconsin Solar Energy Laboratory. 1500 Engineering Drive, Madison, U.S.A.
- [16] De Soto, W., 2006. Improvement And Validation Of A Model For Photovoltaic Array Performance By Solar Energy, 80, 78-88.
- [17] Bryan F., 1999, Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems. MS thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.
- [18] Townsend, T.U., 1989, Method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Photovoltaic Systems. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. Of Wisconsin-Madison.
- [19] Salama fateh , Modélisation d'un Système Multi-Générateurs Photovoltaïques Interconnectés Au Réseau Électrique, Mémoire de Magister , Université Ferhat Abbas – Setif , 2011
- [20] A. C. Pastor, "**Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Électroniques**," Institut National de Science Appliquée de toulouse Thèse de doctorat.
- [21] A. Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011
- [22] N. Abouchabana, «*Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT*», Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009..
- [23] S. M. Ait-Cheikh, «*Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [24] 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.
- [25] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «*Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation*

- photovoltaïque*», Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [26] C. CABAL „Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008
 - [27] M.ARROUF „Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque“, thèse doctorats université de Constantine,2007.
 - [28] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
 - [29] .S.ABADA „ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic“ Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
 - [30] K. Sundareswaran, V. Vigneshkumar and S. Palani. "Application of acombined par ticle swarn optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions", Renewable Energy 75 (2015) 308-317.