

N° d'ordre :

N° de série :

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université d'Echahid Mohamed Lakhdar Ammara d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En réseaux Electrique

Présenté par

Bahi Khadidja

Gaid Chaima

Bekakra Ahlam

Thème

**Etude et simulation de la commande MPPT
basée sur contrôleur floue optimisée par
algorithme génétique**

Soutenu le 23/09/2020. Devant le jury composé de :

Dr. Maamri oussama

Maitre de conférences A

Président

Dr. Labbi yacine

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. Barka nour eddine

Maitre de conférences B

Examineur

Année Universitaire 2019/2020



Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail

*À nos très chers parents, que dieu les garde et les
protège pour leurs soutien moral et financier, pour
leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

À nos frères et nos sœurs et aux chers amis(es).

À tout ce que nous aimons et qui nous 'aiment.

*À tout nos collègues d'études surtout ceux
D'électrotechnique.*

Ahlem , Chaïma et Khadidja

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

*Nous remercions nos 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.*

A la suite nous tenons à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.

A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et ce travail.

Résumé

L'objectif de cette thèse est de modéliser et développer et optimiser la puissance MPPT exploitée d'un système photovoltaïque. Il faut prendre en compte que la production d'énergie solaire d'un système photovoltaïque varie fortement selon les conditions climatiques comme l'intensité lumineuse et la température, et afin d'exploiter la maximum quantité d'énergie les techniques de poursuite de puissance maximale MPPTs sont utilisées. Enfin, pour maximiser le rendement de puissance produit d'un système photovoltaïque la commande MPPT basée sur l'approche floue optimisée par les algorithmes génétiques sont proposées.

Mots clés: PV, convertisseur DC-DC , MPPT, connexion au réseau, P&Q , logique floue.

Abstract:

The objective of this thesis is to model and develop and optimize the MPPT power operated from a photovoltaic system. It is necessary to take into account that the solar energy production of a photovoltaic system varies greatly depending on climatic conditions such as the light and temperature, and in order to use the maximum amount of energy. Maximum power tracking techniques MPPTs are used. Finally, to maximize the power output produced by a photovoltaic system MPPT control based on the fuzzy approach optimized by genetic algorithms are proposed.

Keywords: PV , converter DC-DC, MPPT, grid connection, P&Q, fuzzy logic.

ملخص:

الهدف من هذه الأطروحة هو نمذجة و تطوير وتحسين قوة تعمل من نظام ضوئي. من الضروري أن تأخذ في الاعتبار إنتاج الطاقة الشمسية للنظام تختلف الخلايا الكهروضوئية اعتمادا كبيرا على الظروف المناخية مثل الضوء و درجة الحرارة ، ومن أجل استخدام تقنيات تتبع القدرة القصوى . أخيرا ، لتعظيم خرج الطاقة الناتج عن النظام الكهروضوئي التحكم على أساس النهج الغامض المحسن بواسطة الخوارزميات الجينية المقترحة

كلمات مفتاحية: مولد الكهروضوئي ، محول تيار مستمر / تيار مستمر ، توصيل شبكة ، المنطق الغامض.

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralité sur l'Energie Photovoltaïque

Figure I.1. Rayonnement solaire transmis à la terre.....	5
Figure I.2. Variation saisonnière du rayonnement solaire.....	6
Figure I.3. Cartes de l'irradiation globale en Algérie.....	7
Figure I.4 Spécification de l'irradiation globale du site d'El oued.....	7
Figure I.5. Génération de la paire électron-trou.....	9
Figure I.6. La jonction PN.....	9
Figure I.7. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.8. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.9. Le circuit équivalent d'une cellule solaire et d'un dispositif photovoltaïque.....	11
Figure I.10. Itération flow chart.....	16
Figure I.11. Déploiement I_{ph} détaillé.....	17
Figure I.12. Déploiement $I_{(0,ref)}$ détaillé.....	17
Figure I.13. Déploiement I_0 détaillé.....	17
Figure I.14. Déploiement I_{pv} détaillé.....	18
Figure I.15. Présentation de module PV.....	19
Figure I.16. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle....	20
Figure I.17. Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.....	20
Figure I.18. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.....	21
Figure I.19. Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.....	21
Figure I.20. Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.....	22
Figure I.21. Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement	22
Figure I.22. Caractéristique P-V du module PV selon la Température.....	23

Figure I.23. Caractéristique I-V du module PV selon la Température.....	23
Figure I.24. Caractéristique P-V de module PV selon résistance série.....	23
Figure I.25. Caractéristique I-V du module PV selon la résistance série.....	23
Figure I.26. Caractéristique P-V de module PV selon Eclairement et température.....	24
Figure I.27. Caractéristique I-V du module PV selon Eclairement et température.....	24
Figure I.28. Caractéristique I-V de module PV selon la facteur d'idéalité.....	24

CHAPITRE II : Contrôle d'un système photovoltaïque et poursuite de la valeur énergétique maximale de mppt

Figure .II-1. Connexion directe source-charge.....	28
Figure .II-2. Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	28
Figure .II-3. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....	29
Figure .II-4. Schéma d'un quadripôle électrique.....	30
Figure .II-5. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....	30
Figure II.6 . Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.....	32
Figure .II-7. Schémas équivalents du hacheur dévolteur.....	32
Figure .II-8. Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	34
Figure .II-9. Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	34
Figure II.10. Convertisseur dévolteur-survolteur.....	35
Figure .II-11. Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur,.....	36
Figure .II-12. Schéma de simulation du hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance pour un rapport cyclique de 0,3.....	37
Figure .II-13. (a) Le courant aux bornes du GPV (b) La tension aux bornes du GPV (c) La puissance aux bornes du GPV.....	38

Figure .II-14. (a) Le courant aux bornes du charge (b) La tension aux bornes du charge..	39
Figure .II-15. Chaîne élémentaire de photovoltaïque(c)La puissance aux bornes du charge.....	40
Figure (II.16) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.....	41
Figure II.17. Algorithme de la Tension Constante.....	43
Figure II.18. Algorithme du constant courant.....	44
Figure II.19 : Caractéristique Ppv(Vpv) et fonctionnement de la méthode Conductance Incrémentielle[32].....	45
Figure II.20. Organigramme de la méthode conductance incrémentielle	46
Figure II.21 . Caractéristique Ppv(Vpv) et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.....	47
Figure II.22. Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.....	48
Figure .II-23. Schéma block de la commande MPPT.....	49
Figure .II-24. La puissance aux bornes du GPV.....	49
Figure .II-25. La tension aux bornes du GPV.....	50
Figure .II-26. Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT P&O.....	50

CHAPITRE III : Logique Floue et les algorithmes génétique

Figure .III.1. Variables linguistiques, termes linguistiques et univers de discours	52
Figure .III.2. La représentation graphique des formes de bases des fonctions d'appartenances.....	53
Figure .III-3. Organigramme de fonctionnement d'un algorithm génétique.....	55

Figure .III.8. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue.....	56
---	----

Chapitre IV :Commande MPPT basée sur l'approche floue optimisée par AG

Figure .IV-1.MPPT floue.....	58
Figure .IV-2.Fonctions d'appartenance de la variable E.....	59
Figure .IV-3.Fonctions d'appartenance de la variable ΔE	60
Figure .IV-4. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD	60
Figure .IV-5. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue.....	61
Figure .IV-6.Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue.....	61
Figure IV-7 - Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue.....	62
Figure IV-8 - Structure et description d'un individu (chromosomes).....	63
Figure IV-9- Codage des fonctions des appartenances: E ,dE et dD.....	63
Figure IV-10 - Fonctions d'appartenances du contrôleur flou optimal.....	64
Figure IV-11 - Variation de l'ensoleillement en fonction du temps.....	65
Figure IV-12 - Puissance correspondante au contrôleur flou optimal.....	66
Figure IV-13 - Tension correspondante au contrôleur flou optimal.....	66
Figure IV-14 - Courant correspondant au contrôleur flou optimal.....	66
Figure IV-15 - Rapport cyclique correspondant au contrôleur flou optimal.....	66
Figure IV-16 - Variation de l'ensoleillement en fonction du temps.....	67
Figure .IV-17.Réponses des trois contrôleurs (FLC-GA, FLC et P&O) pour une augmentation d'ensoleillement (échelon E= 500 - 1000 - 700w/m2) à température constante T =25°C.....	67

Liste des Tableaux

Tableau I-1. Les différents types des cellules avec leur rendement.....	11
Tableau I-2. facteur d'idéalité (A)	13
Tableau I.3. MSX60 PV module (60 W) caractéristique.....	14
Tableau . IV -2 . Base de règles du MPPT floue.....	60

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.

EO : 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/m²).

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³ J/K).

q : Charge de l’électron (1,6.10⁻¹⁹ 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.

I₀ : 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.

NS : Nombre de cellules en série.

NP: 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].

ICC : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].

VCO : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

RL : 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.

Chapitre I : Généralité sur l'Energie Photovoltaïque

I.1.Introduction.....	3
I.2.Les ressources des énergies renouvelables.....	3
I.3.L'énergie solaire.....	3
I.3.1.Rayonnement solaire.....	3
I.3.1.1. Types de rayonnements.....	5
I.4.Mouvement du Globe terrestre.....	5
I.5.Cartes d'irradiation globale et de l'enseillment en Algérie	6
I.6. Spécification du site d'El oued.....	6
I.7.Description des éléments d'un système photovoltaïque	8
I.7.1.Cellule photovoltaïqu.....	8
I.7.1.1.Historique.....	8
I.7.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque	8
I.7.1.3.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque:.....	9
I.7.1.4.Type et rendement des cellules photovoltaïques:.....	10
I.8.Circuit equivalent d'une cellule solaire.....	11
I.9.Détermination des paramètres :.....	14
I.9.1.Détermination de I_{ph} :.....	15
I.9.2. Determination I_0 :.....	15
I.10.Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)	19
I.10.1.Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	19
I.10.2.Association des Cellules Photovoltaïques en Série	20
I.11.les influences.....	21
I.11.1. Influence de l'Éclairement	21

I.11.2. Influence de la Température	22
I.11.3. Influence de la résistancesérie	23
I.11.4. Influence de éclairment et temperature	24
I.11.5. Influence defacteur d'idéalité	24
I.12. Avantages et inconvénients de l'énergiePV	24
I.12.1. Avantage.....	24
I.1 2.2. Inconvénients.....	25
I.13. Secteurs d'application.....	25
I.14. Conclusion.....	25

Chapitre II :Contrôle d'un système photovoltaïque et poursuite de la valeur énergétique maximale de mppt

II.1. Introduction.....	27
II.2. Connexion directe source-charge	27
II.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge	28
II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	29
II.5 Type de convertisseurs	31
II.5.1. Hacheur dévolteur(Buck).....	31
II. 5.2. Hacheur survolteur(Boost).....	33
II.5.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).....	35
II.5. Résultat et simulation	36
II.6. Commandes MPPT.....	39
II.7. Principe du MPPT	39
II.8. Techniques de commande MPPT.....	41
II.8.1. Méthodes indirectes	42

II.8.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	42
II.8.1.2 La méthode de court-circuit.....	42
II.8.2. Méthodes directes	44
II.8.2.1 Méthode de conductance incrémentielle	45
II.8.2.2 La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	46
II.8.3 simulation de la commande MPPT numérique(P&O).....	48
II.8.4 Autres méthode de contrôle MPPT.....	50
II.9 . Conclusion	50

Chapitre III: Logique Floue et les algorithmes génétique

III.1. Introduction.....	51
III.2.la logique floue	51
III.3.1Principe et définition de la logique floue	52
III.4.Fonctions d'appartenance.....	52
III.5.Règles floues.....	53
III.6.Mécanismes d'inférence floue.....	53
III.7.Algorithme génétique.....	54
III.8 Principe d'un algorithme génétique.....	55
III.9.Conception du contrôleur MPPT flou par algorithmes génétiques.....	56
III.10.Choix des paramètres des AG	56
III.11.Conclusion	57

Chapitre IV : Commande MPPT basée sur l'approche floue optimisée par AG

IV.1.	
Introduction.....	58
IV.2.Commande MPPTfloue(FLC).....	58

IV.2.1.Fonctions d'appartenance.....	58
IV.2.2.Règles floues.....	60
IV.2.3.Conception du contrôleur MPPT flou.....	61
IV.3.Conception du contrôleur MPPT flou (LFC) par Algorithme génétiques (AG).....	61
IV.3.1. Création de la population initiale.....	62
IV.3.2 Fonction objectif.....	63
IV.3.3 Paramètres de l'AG	63
IV.4. Resultats de Simulation	64
IV.4.1. Fonctionnement sous des Conditions Constantes.....	64
IV.4.2.Etude comparative et test de robustesses	67
IV.5. Conclusion	68

Introduction générale

Introduction Générale

L'industrie moderne a des besoins de plus en plus importants en énergie. Les sources classiques d'énergie, qui sont les sources fossiles telles que le charbon et les hydrocarbures, laissent progressivement la place aux énergies renouvelables. L'augmentation fulgurante du prix du pétrole ces dernières années a en effet contraint les pays développés à investir dans ce type d'énergies telles que l'énergie solaire, éolienne, marémotrice ou géothermique. Ces énergies, en plus d'être inépuisables, représentent un secteur porteur permettant un développement durable tout en préservant l'environnement [1].

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. En plus d'être silencieuse, elle s'intègre parfaitement aux constructions (façades, toiture...), et du fait qu'elle n'intègre pas de pièces mécaniques mobiles, elle ne nécessite pas un entretien particulier. Elle reste fiable longtemps, c'est la raison pour laquelle elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Elle est en train de s'imposer comme une valeur sûre dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs. Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie [1].

Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé «Maximum Power Point» (MPP), défini par une tension et un courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge. Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPPT [1].

Le problème qui se pose toujours, comment faire fonctionner le système photovoltaïque pour qu'il fournisse sa puissance maximale? Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques étaient appliqués, et des techniques suivies pour avoir une adaptation et un rendement élevé. La méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking) rentre en compte ici, elle fait appel à plusieurs techniques, à savoir les techniques traditionnelles: numériques, analogiques

et analytiques ou les technique basées sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux de neurones, la logique floue, le neurone- flou, les algorithmes génétiques (GA).

Dans ce sens, l'optimisation par les méthodes méta éristique (GA) sera l'objectif primordial de notre travail, pour détecter le point de puissance maximale (émanent du générateur photovoltaïque) dans un système photovoltaïque sous différentes conditions climatiques. Afin de valider l'importances des telles méthodes, on va la comparaisons avec la célèbre méthode classique dite Perturbation et Observation (P&O) où l'on cherche toujours à avoir un algorithme dit efficace.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté 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 sont .

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», nous passerons au troisième chapitre qui présente la commande floue d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque MPPT (P&O) et fournit une initialisation de base se « l'algorithmes génétiques».

Ce travail est parachevé par une conclusion générale dans laquelle sont valorisés les différents développements effectués.



Chapitre I

Généralité sur l'Energie Photovoltaïque

I.1.Introduction:

Aujourd'hui plus de 85% [1] de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire, l'épuisement proche de ces ressources énergétiques ainsi que les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, ont incité au développement des énergies renouvelables. Dans le cas du photovoltaïque, l'énergie primaire est le rayonnement solaire. 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 profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser son but par le moyen dit : cellule photovoltaïque.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie son utilisation, nous effectuerons dans ce chapitre un bref rappel sur quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques. Vers la fin, on va présenter le système photovoltaïque et citer quelques avantages et inconvénients de ce dernier.

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 des gisements renouvelables donc inépuisables. ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [5]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [6][7].

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 [6], [8].

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 l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [6], [9], [5].

I.3. L'énergie solaire:

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement qui représente chaque année environ 1500 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (1KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année [2].

Depuis très longtemps, l'homme cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [3].

I.4I.3.1.Rayonnement solaire:

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre $0,4$ et $0,75\text{ }\mu\text{m}$) et dans le proche infrarouge (au-delà de $0,75$ et jusqu'à $4\text{ }\mu\text{m}$) [3]. Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie véhiculée par ce rayonnement,

correspond à un éclairement de 340 W/m^2 . Un bilan énergétique montre que sur cette quantité d'éclairement environ 100 W/m^2 sont réfléchis vers l'espace, seul le reste est absorbé, pour un tiers par atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [4].

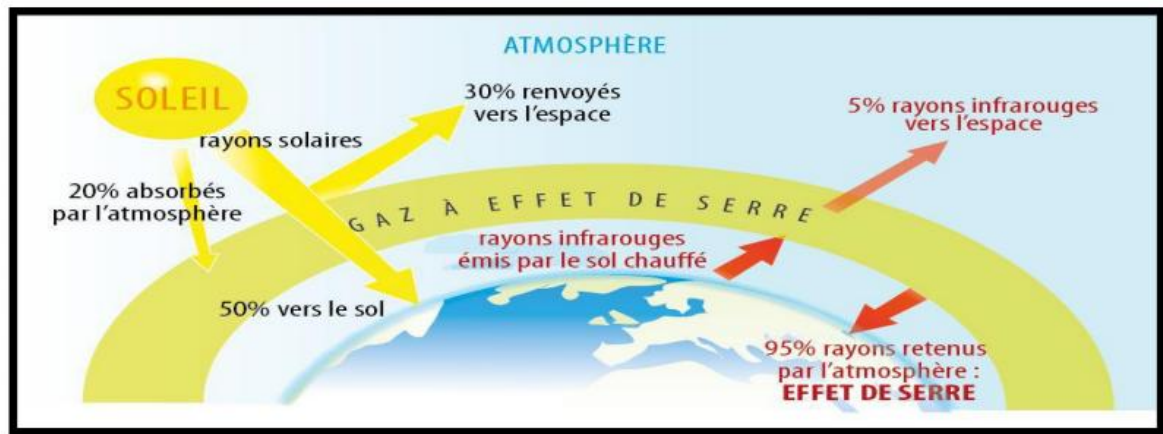


Figure I.1. Rayonnement solaire transmis à la terre[4]

I.3.1.1. Types de rayonnements

♦ **Le rayonnement direct** 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 pyréliomètre.

♦ **Le rayonnement diffus** 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** :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.

I.4.Mouvement du Globe terrestre

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 Décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22 Juin) qu'elle en est la plus éloignée. La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $\delta = 23^{\circ}27'$ avec la normale au plan de l'écliptique [5].

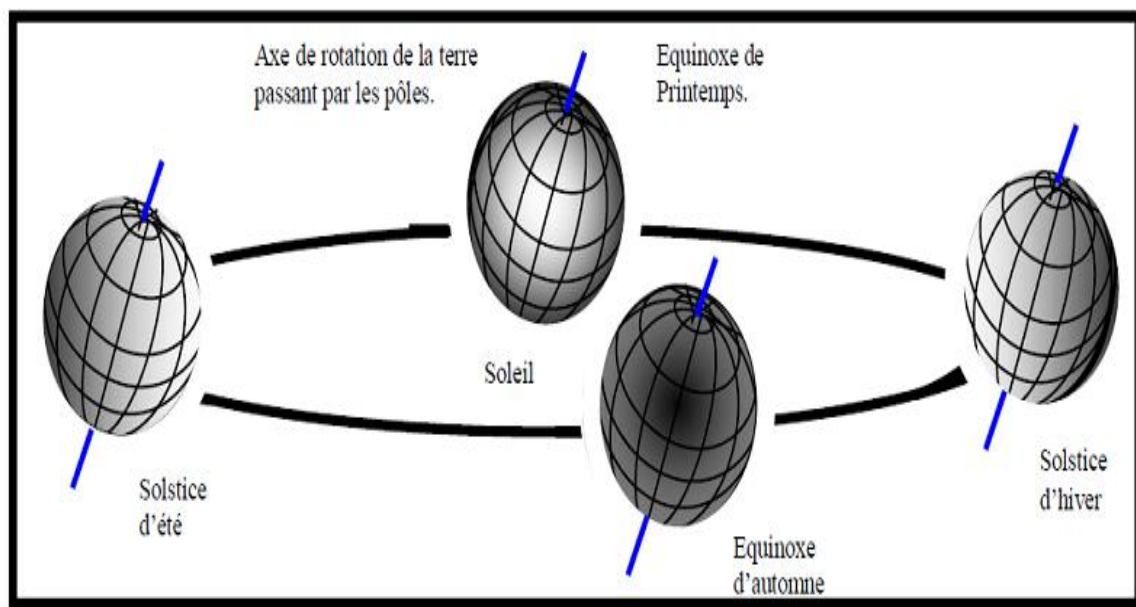


Figure I.2. Variation saisonnière du rayonnement solaire[5]

I.5.Cartes d'irradiation globale et de l'ensoleillement en Algérie

L'énergie solaire participe pour une très faible part dans le bilan énergétique national, soit seulement 0,02% de la consommation nationale d'électricité (5 GWH). Le pays est qualifié de très en retard en matière d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables. Pourtant, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde figure I.3. Lors d'un séminaire organisé à Alger, par la Chambre allégo-allemande de l'industrie et du commerce, l'intention de concrétiser le vœu algérien a été clairement affichée par les Allemands. «Vu qu'à l'horizon 2010, environ 5% de l'électricité en Algérie sera produite par l'énergie solaire ».le projet consiste à ramener le taux de l'énergie renouvelable à 6% d'ici à 2015. [11]

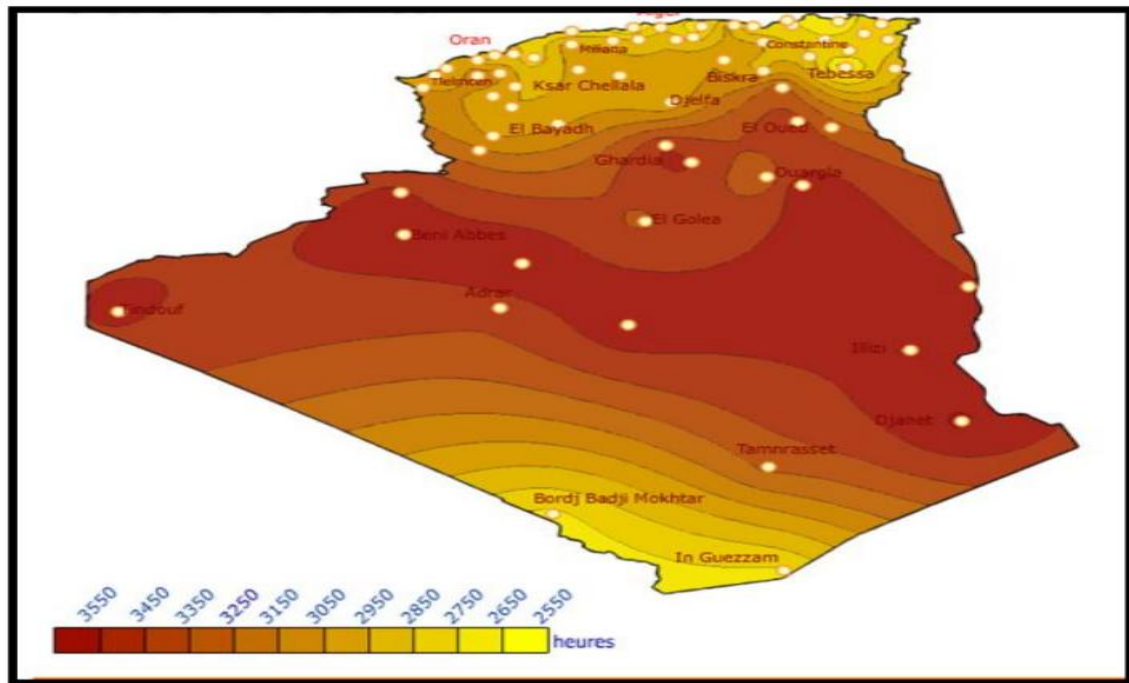


Figure I.3. Cartes de l'irradiation globale en Algérie [11]

I.6. Spécification du site d'El oued Les spécifications du site d'El oued sont dépendent les conditions de métrologie du site d'El oued. On présent par la figure I.4.

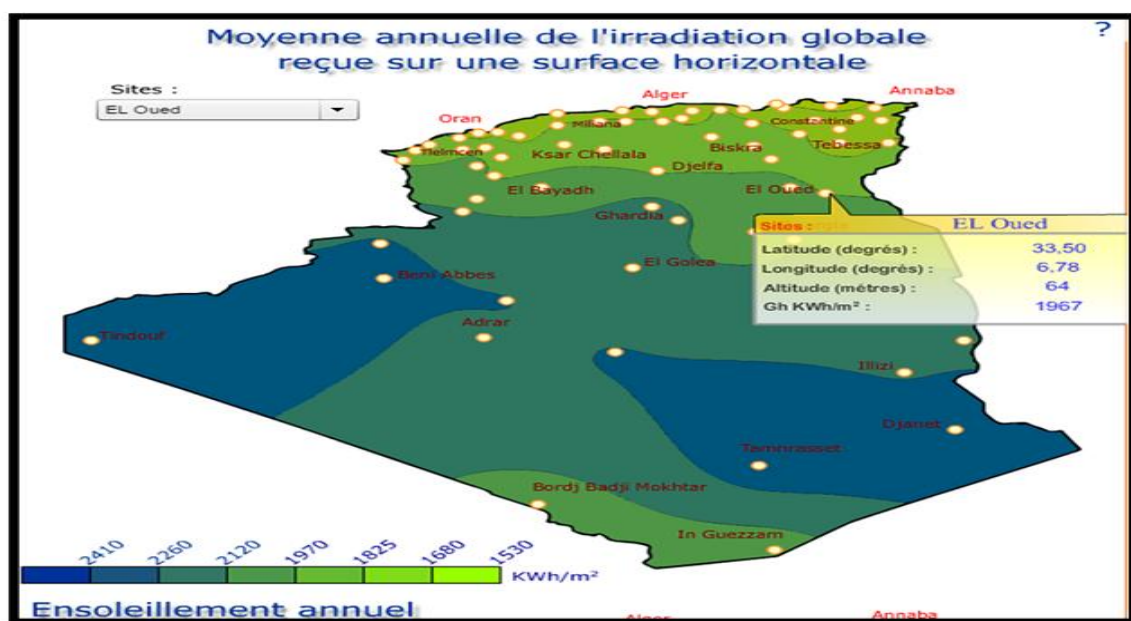


Figure I.4 Spécification de l'irradiation globale du site d'El oued [11]

I.7. Description d'un système photovoltaïque:**I.7.Description des éléments d'un système photovoltaïque****I.7.1.Cellule photovoltaïque****I.7.1.1.Historique**

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui sont : 1839: Le physicien français [edmond becquerel] découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. c'est l'effet photovoltaïque. 1890: 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. 1954: Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. 1955: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. 1958: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware. 1968: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie [12]

I.7.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. 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[12].

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).

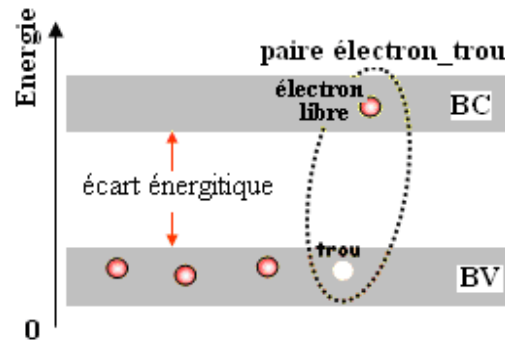


Figure I.5. Génération de la paire électron-trou[12].

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.

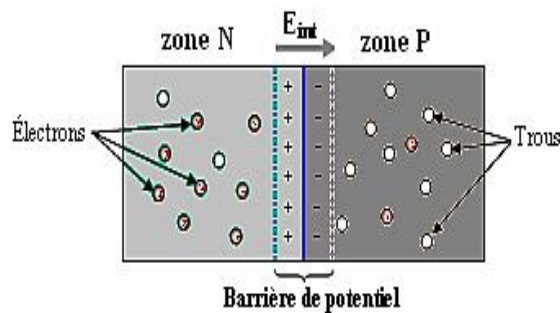


Figure I.6. La jonction PN[12].

I.7.1.3.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 [4].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (I-5) ci-dessous.

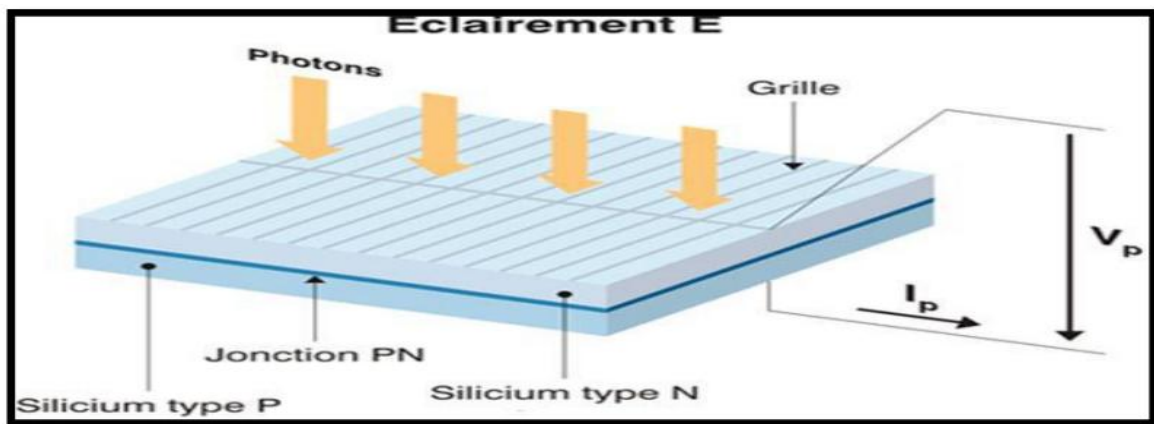


Figure I.7. Structure d'une cellule photovoltaïque[4].

I.7.1.4.Type et rendement des cellules photovoltaïques:

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a 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 [13].

Les cellules monocristallines: Ces 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 [13]

Technologies de cellules	Rendement en laboratoires	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%

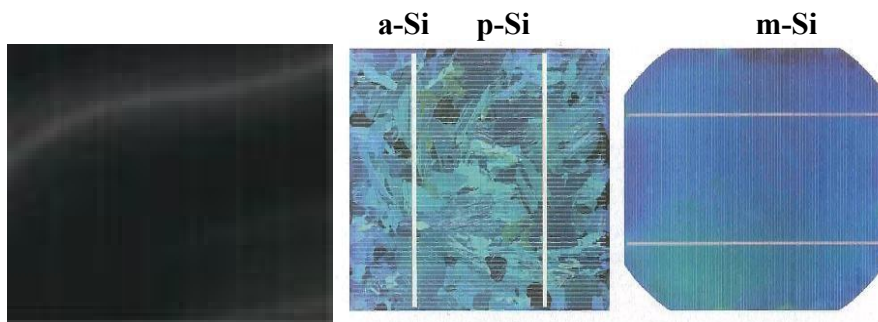
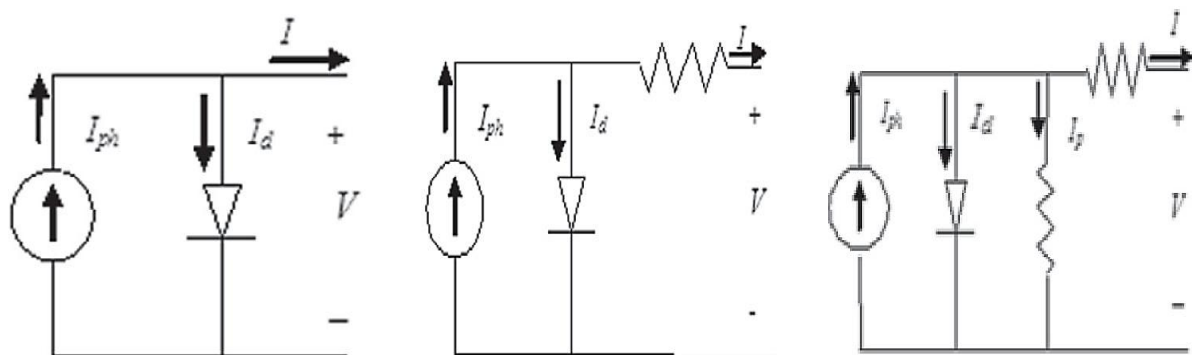


Figure I.8. Structure d'une cellule photovoltaïque. [13]

I.8. Circuit équivalent d'une cellule solaire :

Présentation et modulation de module PV :

Selon l'équation (I.7), le courant de sortie d'un 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.9. Le circuit équivalent d'une cellule solaire et d'un dispositif photovoltaïque [8].

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 :

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

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

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

V : est la tension imposée sur la diode

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

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

V_T = 26 mV à 300 K Pour cellule de silicium.

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

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

q :est 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 [15].

N_s: est le nombre de cellules PV connectées en série.

A :est 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 lesquels, V est divisé en équation (I.2) sous la fonction exponentielle

sont inversement proportionnels à la cellule

Tableau I-2facteur d'idéalité (A) [14].

Technologie	facteur d'idéalité
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
a-Si-Htandem	3.3
a-Si-Htriple	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 [19], '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 (Fig. 1b), 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:

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

Bien sûr, la fig. 1b est une forme simplifiée, facile à mettre en œuvre dans simulateurs. Mais la Fig. 1c est le plus représentatif du cellule. PV dans la (Fig. I.1. c), en appliquant la loi de Kirchhoff, l'actuel sera obtenu par l'équation:

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

I_p : est la fuite actuelle en résistance parallèle.

Tableau I.3 MSX60 PV module (60 W) caractéristique[8].

Parameters	Valeur
Pmp (W)	60
Imp (A)	3.5
Vmp (V)	17.1
Isc (A)	3.8
Voc (V)	21.1
RS (O)	0.008 x 36
Isc (K°)	2.4 $\pm$ 10 ⁻³
Kd (K°)	- 80 $\pm$ 10 ⁻³
NS	36

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

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

I.9. Détermination des paramètres :

Le nombre de paramètres varie selon les choix Modèle et sur les hypothèses adoptées par les chercheurs. Pour Exemple, Dans [16] , [17] , 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 [18],[19] les paramètres inconnus sont : I_{ph} , I_0 , R_s et γ ainsi que :

$$\gamma = N_s \times A \quad (I-8)$$

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

I.9.1.Détermination de I_{ph} :

Selon la Fig. 1 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.10) 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.9.2. Determination I_0 :

La résistance au shunt R_p est généralement considérée comme excellente, donc le dernier terme de la relation (II 8) devrait être éliminé pour la Prochaine approximation. en appliquant l'équation (II .8) 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 (11), et par en remplaçant ($I_{ph,ref}$) par l'équation (II .14):

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

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

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

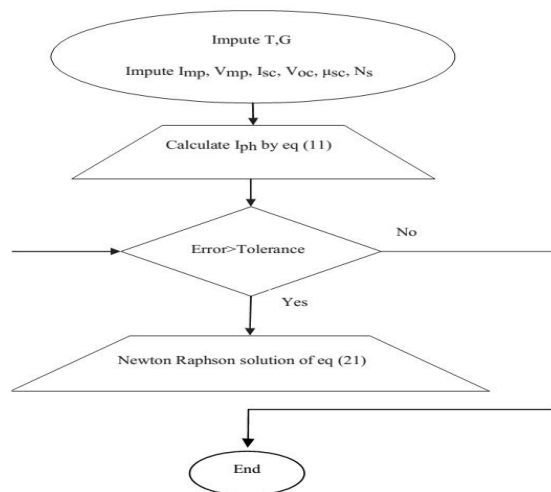
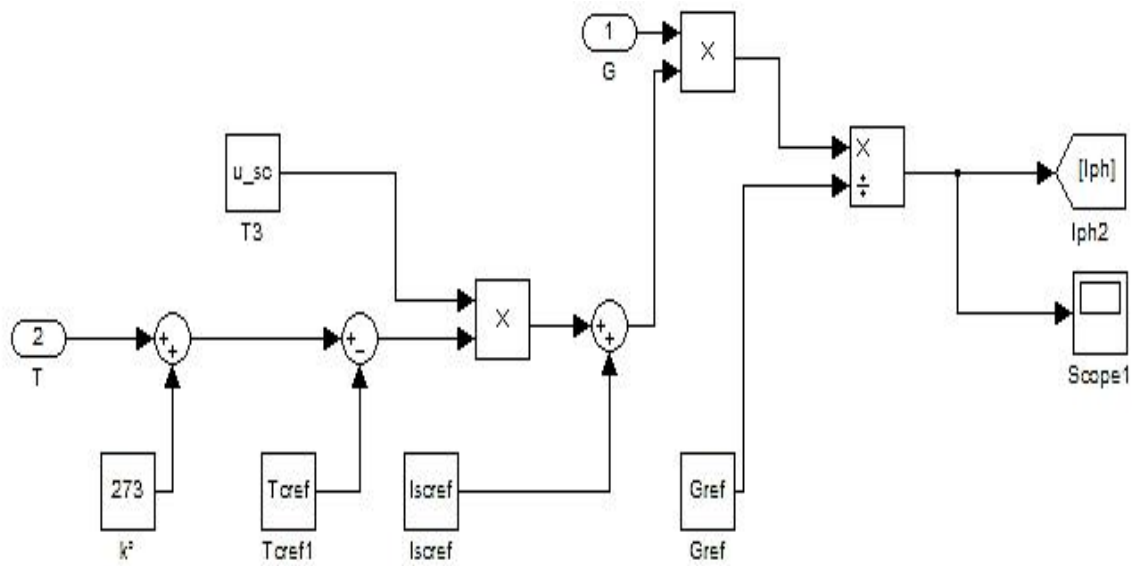
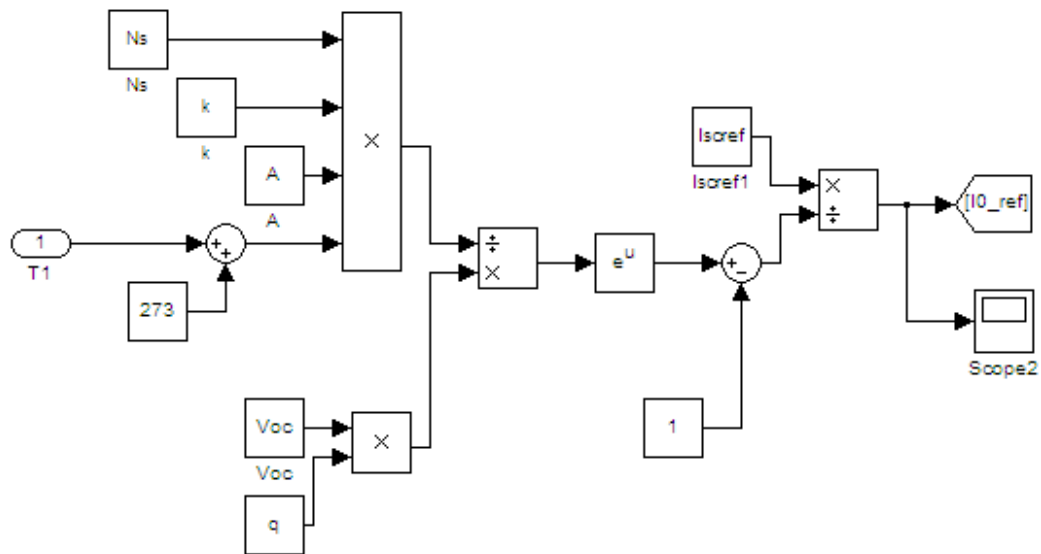


Figure I.10. Iterationflowchart

Figure I.11. Déploiement I_{ph} détaillé.Figure I.12. Déploiement $I_{0,ref}$ détaillé.

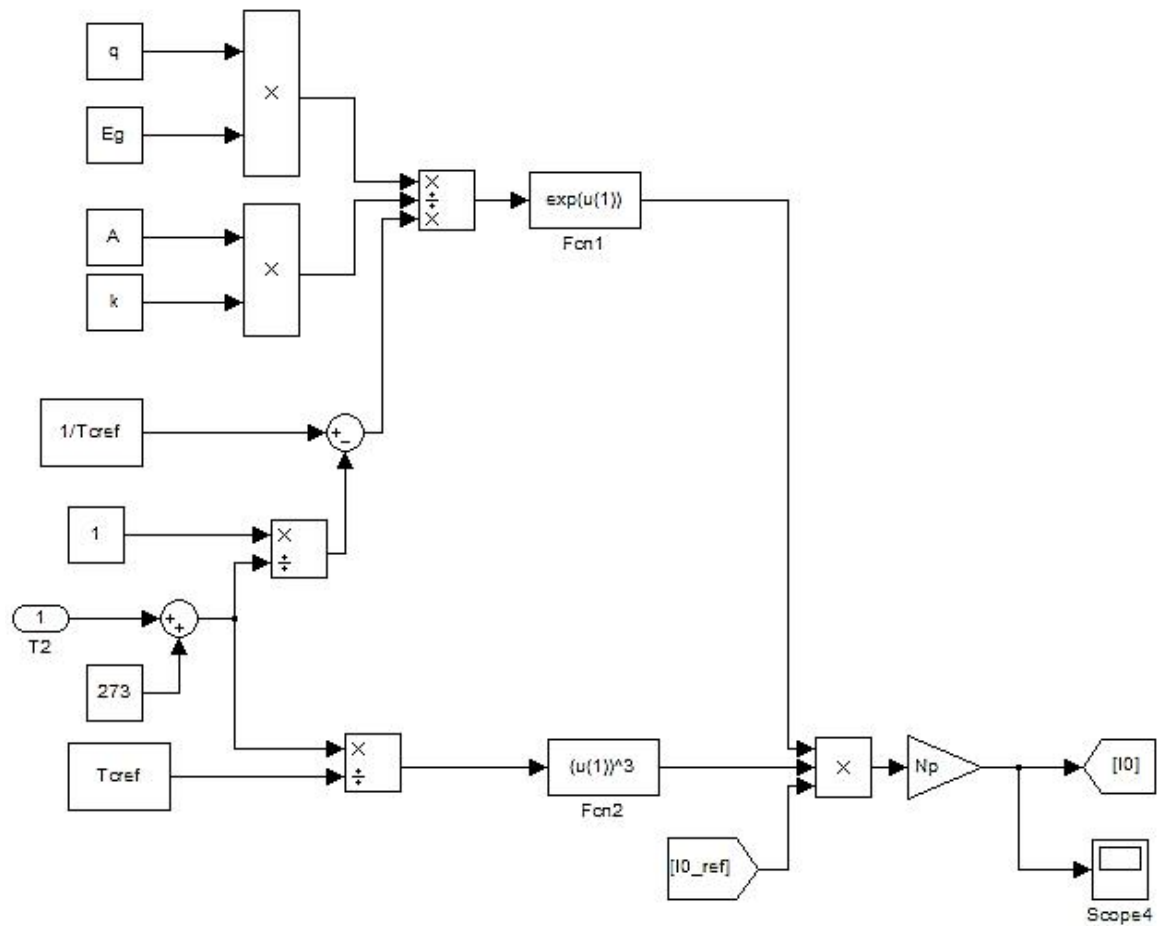
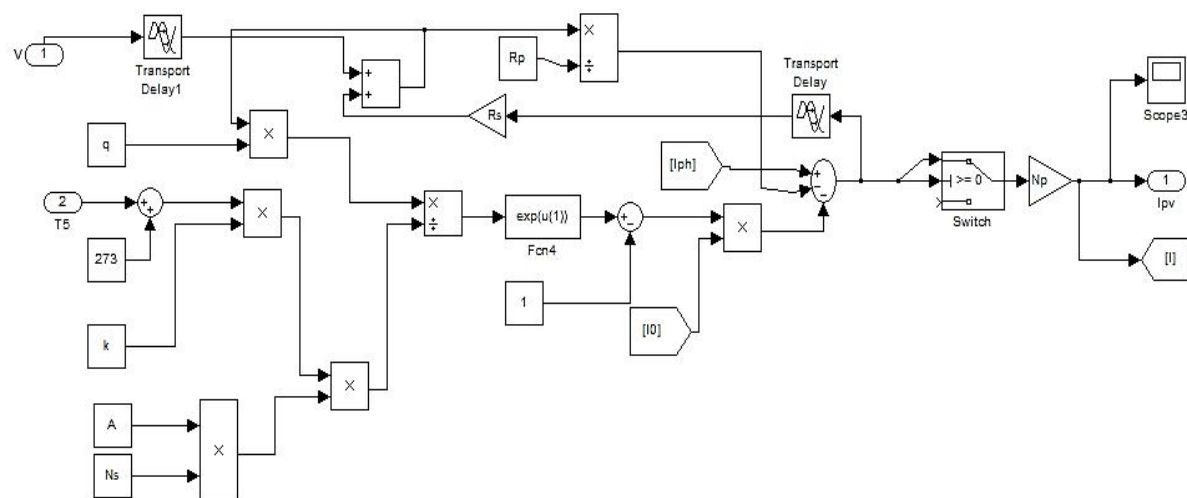
Figure I.13. Déploiement I_0 détaillé

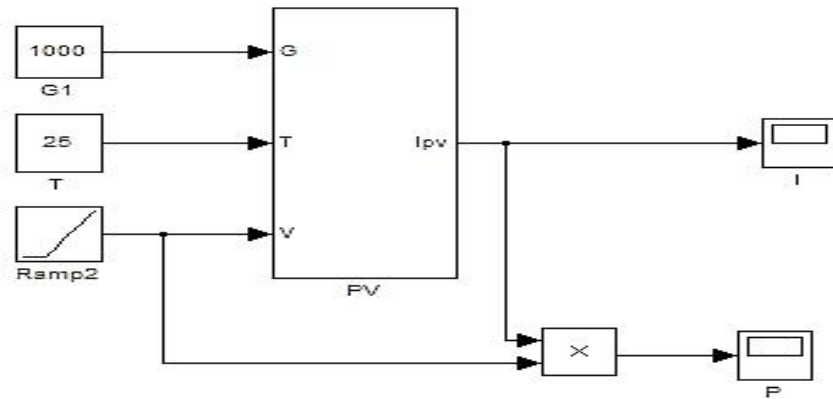
Figure I.14. Déploiement I_{pv} détaillé.

Figure I.15. Présentation de module PV

I.10. 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 comme représentés sur les figures suivantes.

I.10.1. 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. Les figures (I. (9 ; 10)) montrent les caractéristiques résultantes (I_{PCC}, V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_P cellules identiques:

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

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

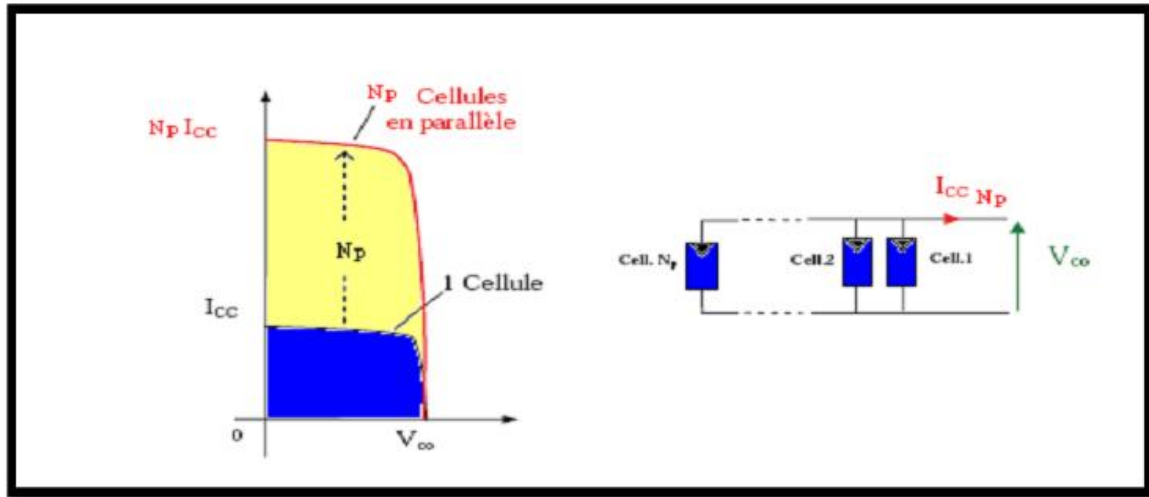


Figure I.16. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle[8]

I.10.2. 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. Les figures (I. (12 ; 13)) montrent la caractéristique résultante (I_{SC}, V_{SCO}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{CC}, V_{CO}) :

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

$$V_{SCO} = N_s \times V_{CO} \quad (I-20)$$

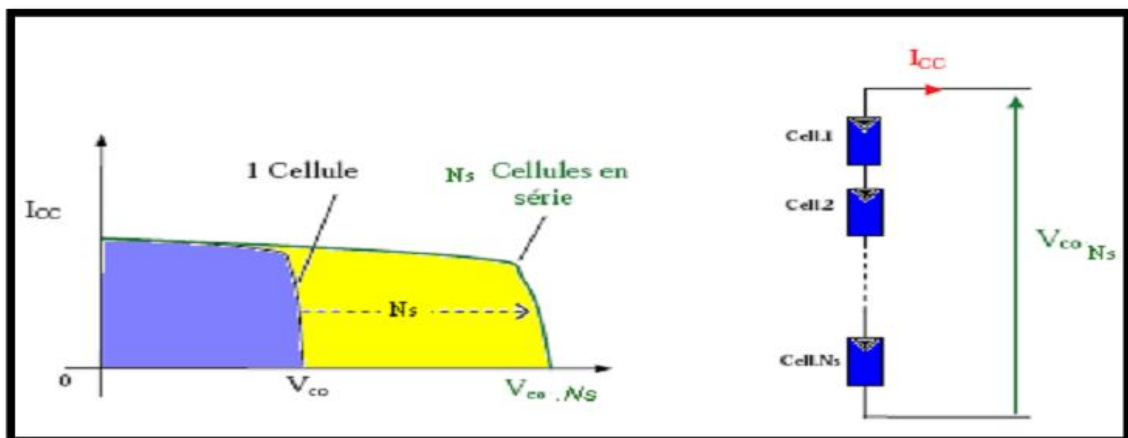


Figure I.17. Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série[8].

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 :

$$V_{max} = V_{op} - I_{op} \quad (I-1)$$

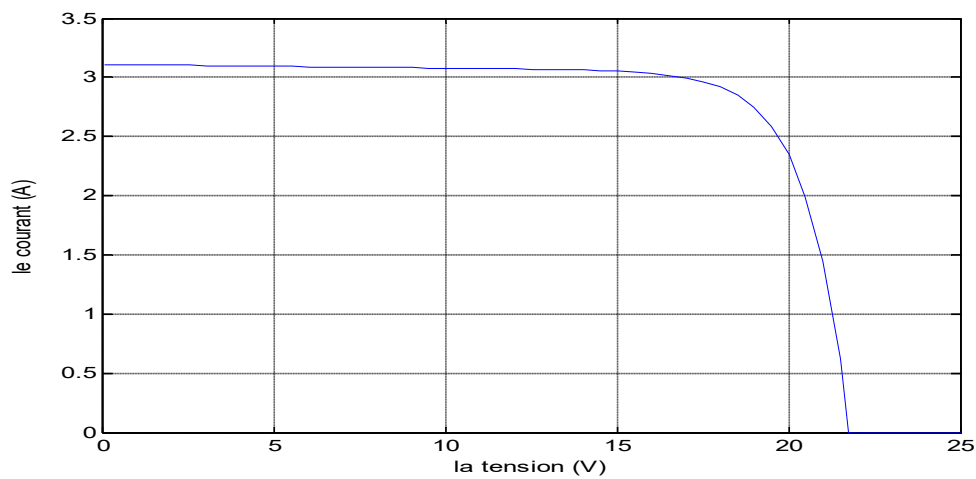


Figure I.18. Caractéristique I - V d'un générateur photovoltaïque

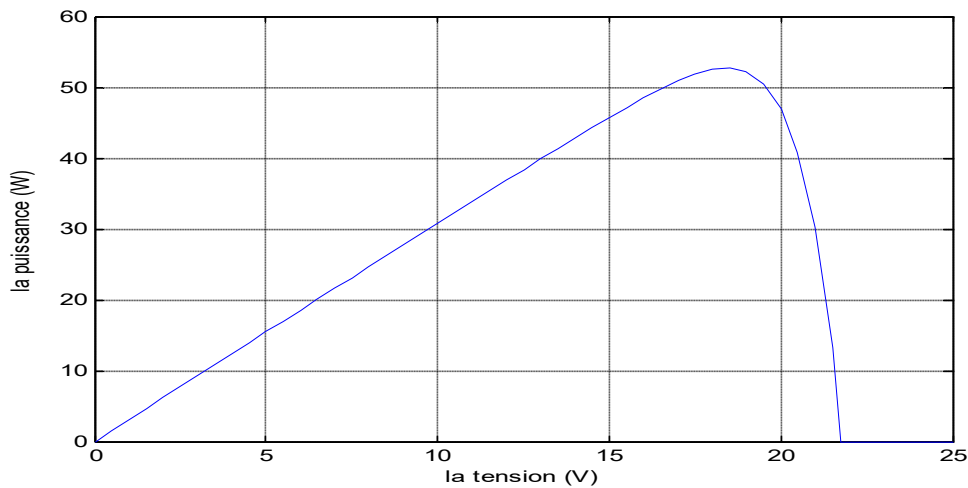


Figure I.19. Caractéristique P - V d'un générateur photovoltaïque.

I.11.les influences

I.11.1. Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m^2 et 1000 w/m^2 , 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.

L'irradiation standard internationalement acceptée pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température 25°C .

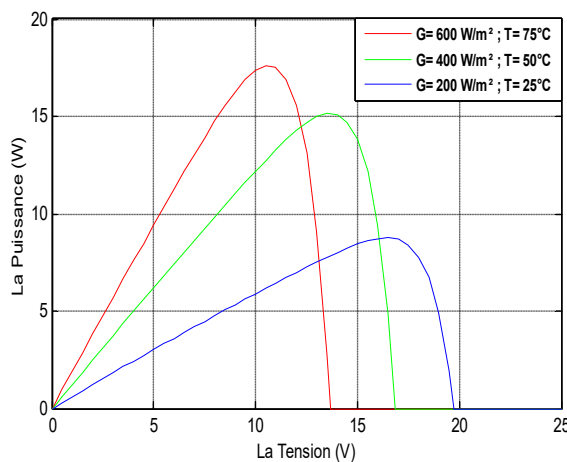


Figure I.20. Caractéristique P-V d'un module PV selon l'éclairement.

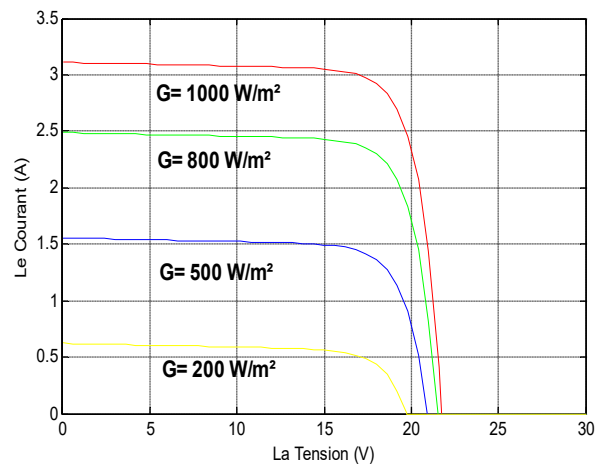


Figure I.21. Caractéristique I-V d'un module PV selon l'éclairement

I.11.2. 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.

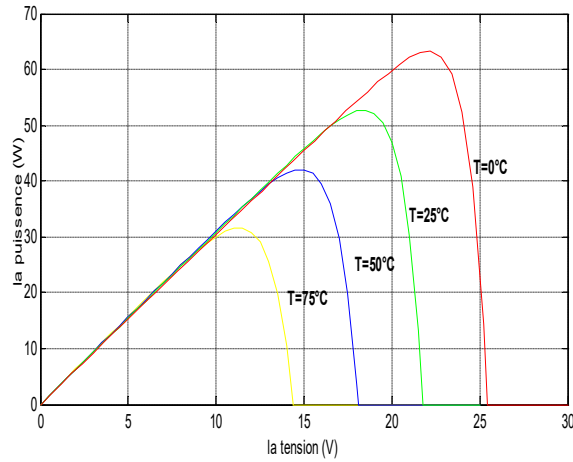


Figure I.22. Caractéristique P-V du module PV selon la Température

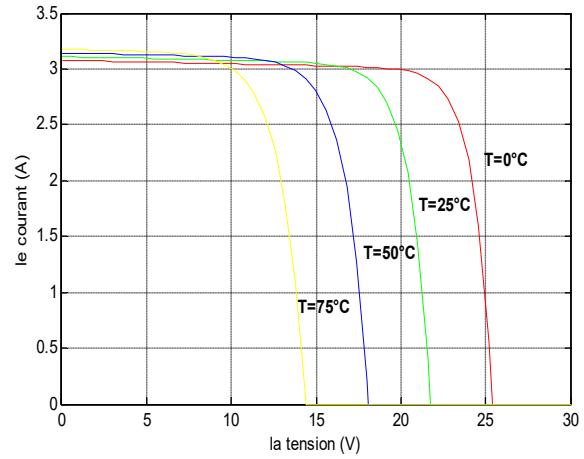


Figure I.23. Caractéristique I-V du module PV selon la Température

I.11.3. 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 .

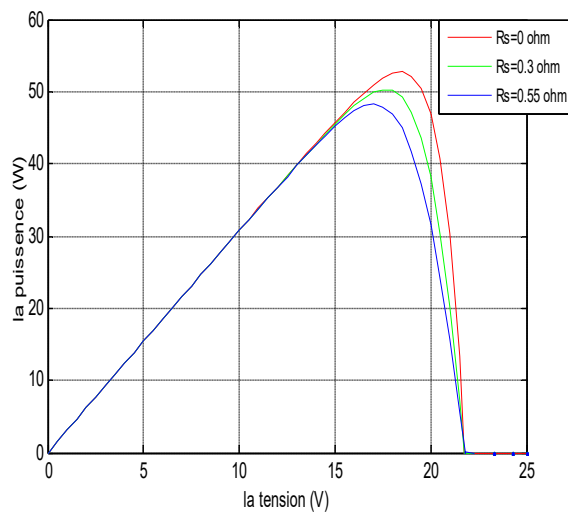


Figure I.24. Caractéristique P-V de module PV selon résistance série

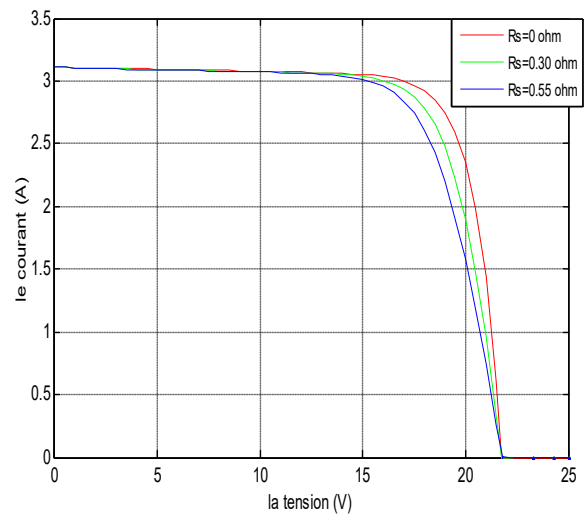


Figure I.25. Caractéristique I-V du module PV selon la résistance série

I.11.4. Influence de éclairement et température :

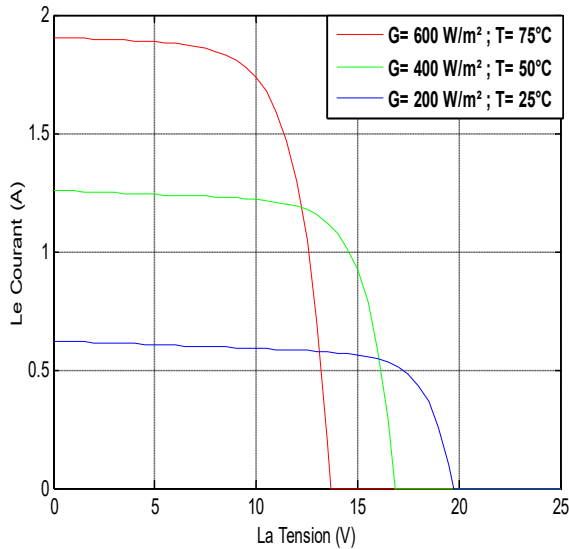


Figure I.26. Caractéristique P-V de module PV selon Eclairement et température

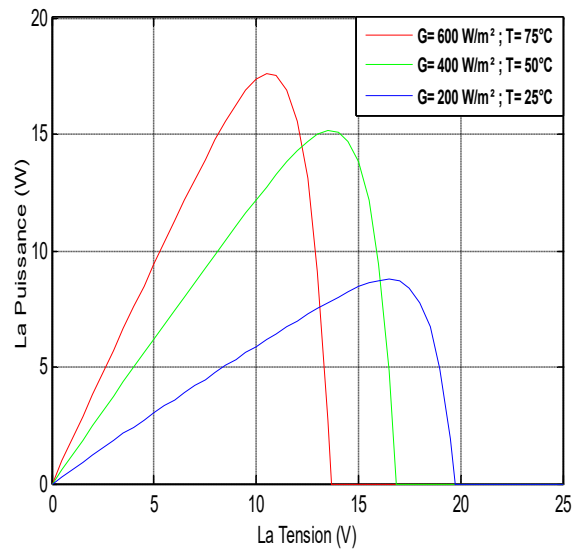


Figure I.27. Caractéristique I-V du module PV selon Eclairement et température

I.11.5. Influence de facteur d'idéalité :

Théoriquement, la facteur d'idéalité A des cellule 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 égale à 1.3. la courbe de la figure (I-25) affirme la notification précédente.

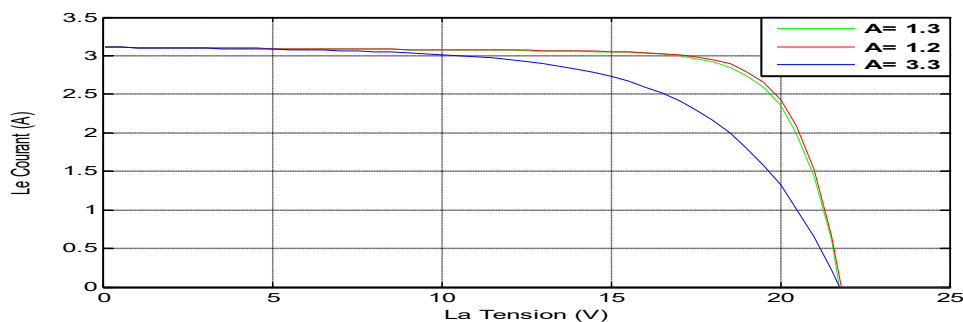


Figure I.28. Caractéristique I-V de module PV selon la facteur d'idéalité

I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie PV

I.12.1. Avantage

- ✓ Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde

entier.

- ✓ 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.
- ✓ L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et Adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Mille Watt au Méga Watt.
- ✓ Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique, ...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite incombustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Le silicium, est un matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- ✓ Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.

I.12.2. Inconvénients

- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % [22] avec une limite théorique pour une cellule de 28% [22]. Les générateurs photovoltaïques ne sont 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 stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert désinvestissements d'un coût élevé.

✓ L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.

I.13. Secteurs d'application

✓ Domaine spatial : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes, ...) Remontent aux années soixante.

✓ Télécommunications : Téléphonie rurale, radiotéléphonie...,

✓ Sites isolés : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages...

✓ Acquisition de données : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, L'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

✓ Domaine du transport : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

I. 14.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. D'autre part, nous avons vu dans ce chapitre des notions générales sur l'énergie photovoltaïque . Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre II

Contrôle d'un système photovoltaïque par MPPT

II.1. Introduction

La conception d'un étage d'adaptation entre générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), effet sur le 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 [20].

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 précédentes s'appelle 'perturbation et observation' (P&O : Perturb-and-Observe) [20].

II.2. Connexion directe source-charge :

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge (charge résistive ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite. Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fourni à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairement pour une température donnée et de la nature de la charge, figure .II-1.

L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de réglage de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [21] .

Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque: c'est le problème de dimensionnement[21] .

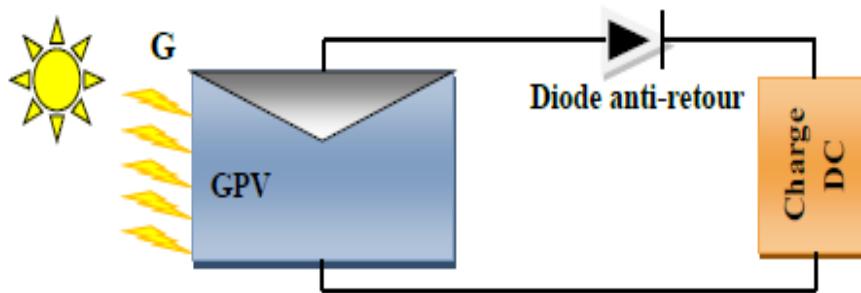


Figure .II-1. Connexion directe source-charge[22]

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). [19]

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 [23].

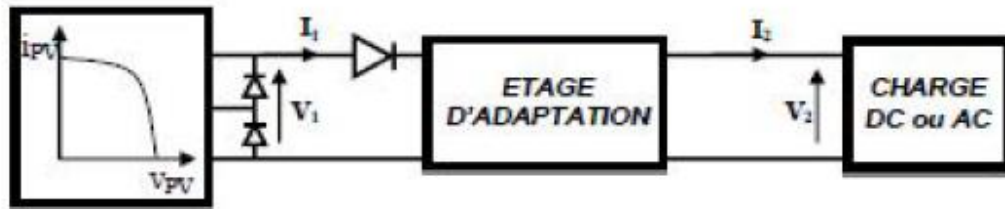


Figure .II-2. *Étage d'adaptation entre un GPV et une charge*[23].

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 la tension et le courant 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[19].

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[19].

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quel que soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation.[19]

II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [23].

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 [23].

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 [23].

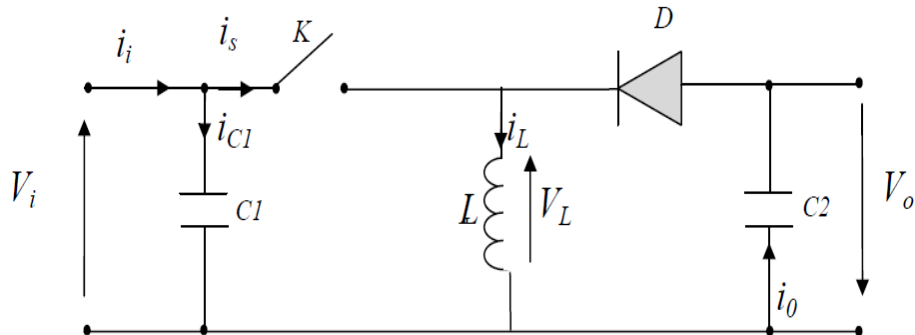


Figure .II-3. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage[23]

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 [23].

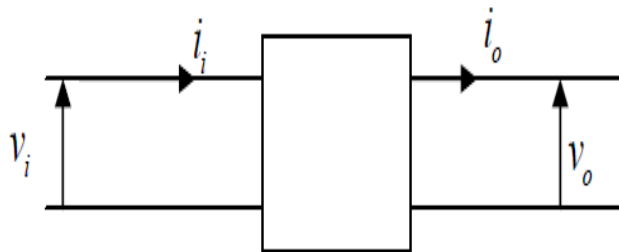


Figure .II-4. Schéma d'un quadripôle électrique[23]

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 [23].

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 ($d \in [0,1]$).

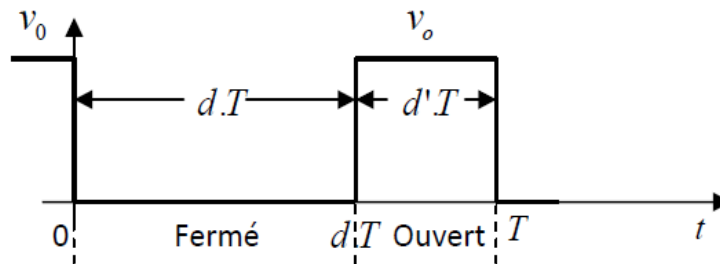


Figure .II-5. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur[24].

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 [23].

II.5 Type de convertisseurs :

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté .

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu . Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck).
- Elévateurs (Boost).
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost)[25].

Dans cette partie nous nous sommes intéressés par le hacheur abaisseur Buck en anglais).

II.5.1.Hacheur dévolteur(Buck) :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.6) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [8]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = V_o/V_i$ change avec le rapport cyclique du commutateur

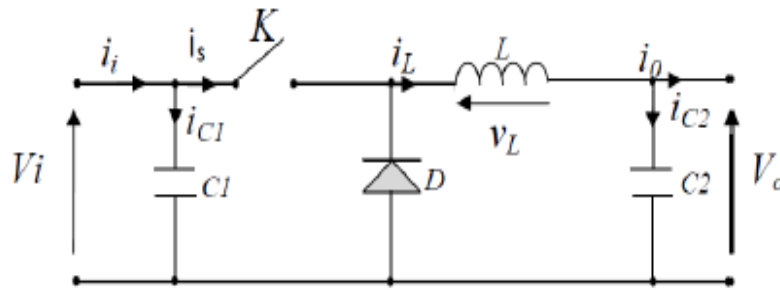


Figure .II-6 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur[24].

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.7) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant dT_s et l'interrupteur ouvert pendant $(1-d)T_s$

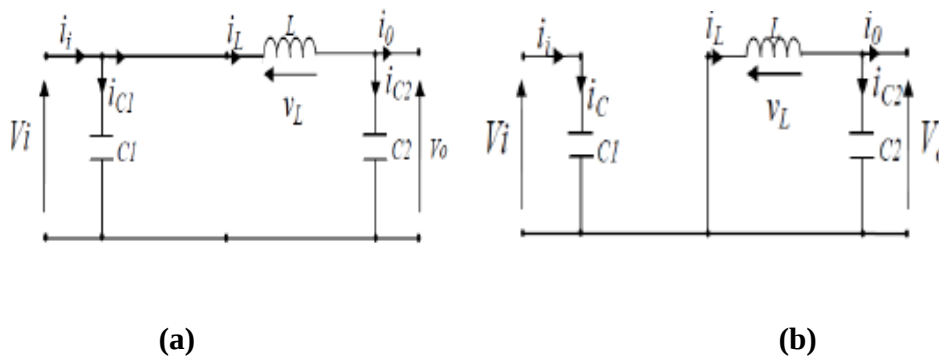


Figure .II-7. Schémas équivalents du hacheur dévolteur[24].,
(a): K Fermé, (b) : Ouvert

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 $d.T_s$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_l(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_l(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [6] :

$$\left(\frac{dx}{dy}\right) T_s = \frac{dx}{dt} \frac{dT_s}{D T_s} + \frac{dx}{dt(1-D)T_s} (1-D) T_s \quad (\text{II-3})$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = dT_s(i_L - i_0) + (1-d)T_s(i_L - i_0) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_s(V_i - V_0) + (1-d)T_s(-V_0) \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_0 = i_L - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ i_L = \frac{1}{d} \left(i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \\ V_l = \frac{1}{d} \left(L \frac{di_L}{dt} + V_0(t) \right) \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

II. 5.2. Hacheur survolteur(Boost):

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 [26].

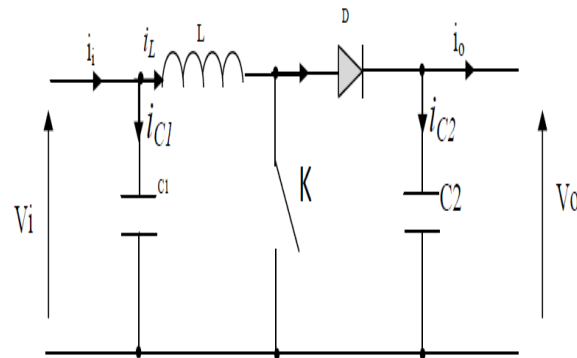


Figure .II-8. Schéma de principe d'un convertisseur Boost [24]

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 [26] :

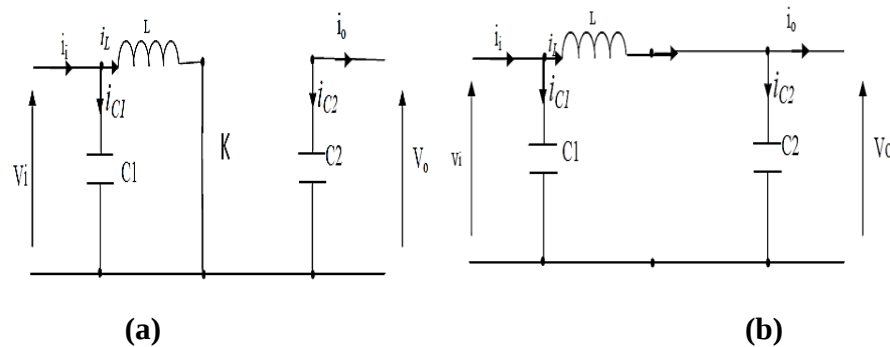


Figure .II-9. Schémas équivalents du hacheur survolteur[24],

(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 :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

On trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [26] :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d} \left(i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \\ i_o = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_L = \frac{1}{d} \left(-(1-d)V_o + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

II.5.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (II.10) [26] :

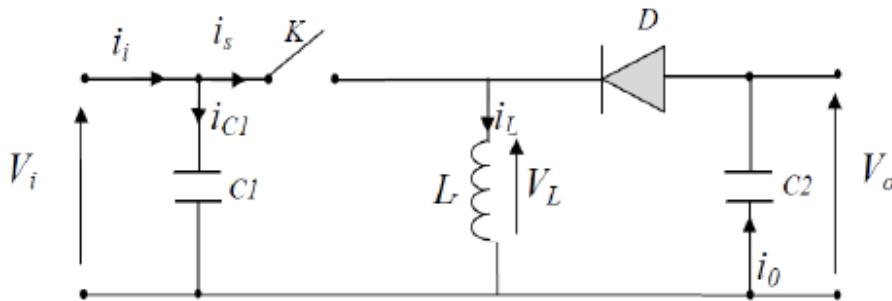


Figure II.10 : Convertisseur dévolteur-survolteur[24]

La figure (II.11) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [26].

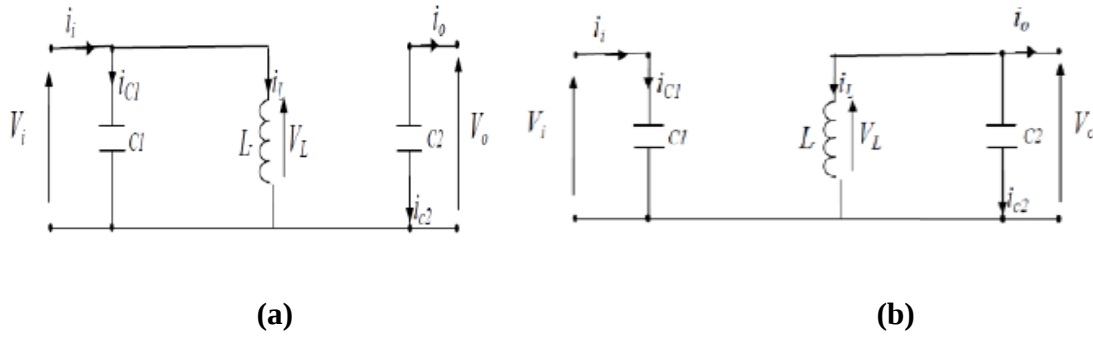


Figure .II-11. Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur[24],

(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 :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

On trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [24] :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d} \left(i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \\ i_o = -(1-d)i_L - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_L = \frac{1}{d} \left(-(1-d)V_o + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

II.5.4. 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.

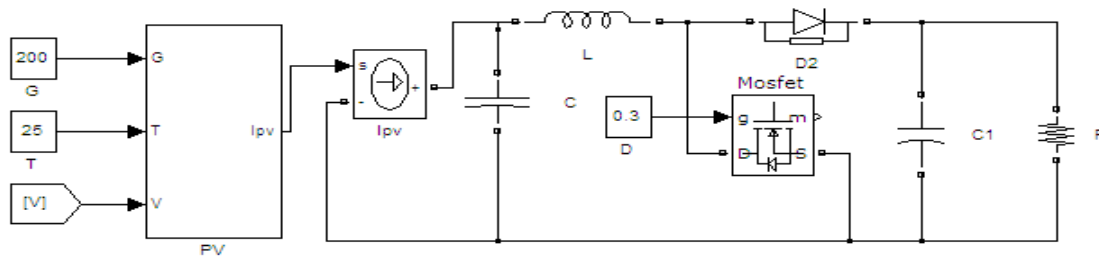
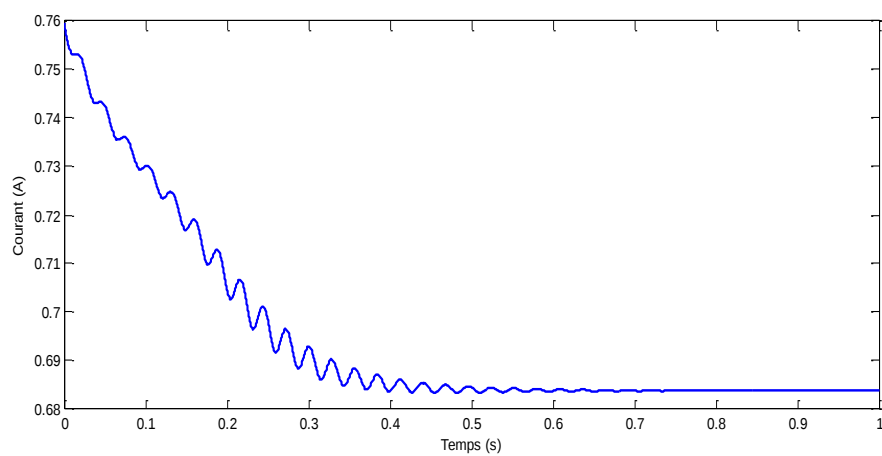
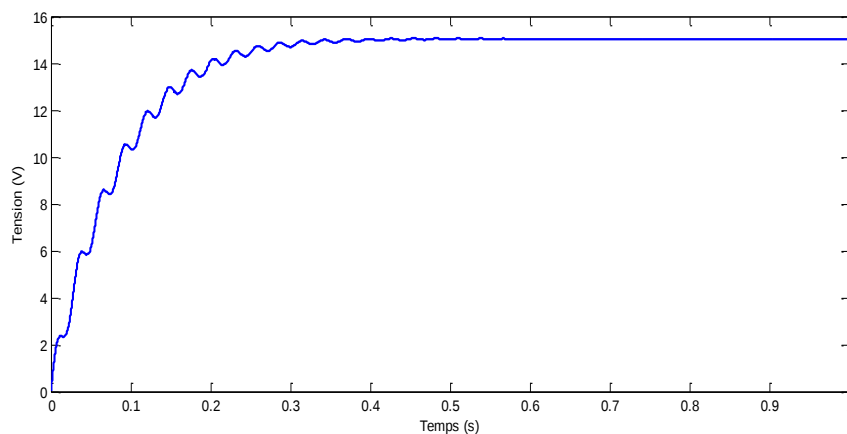


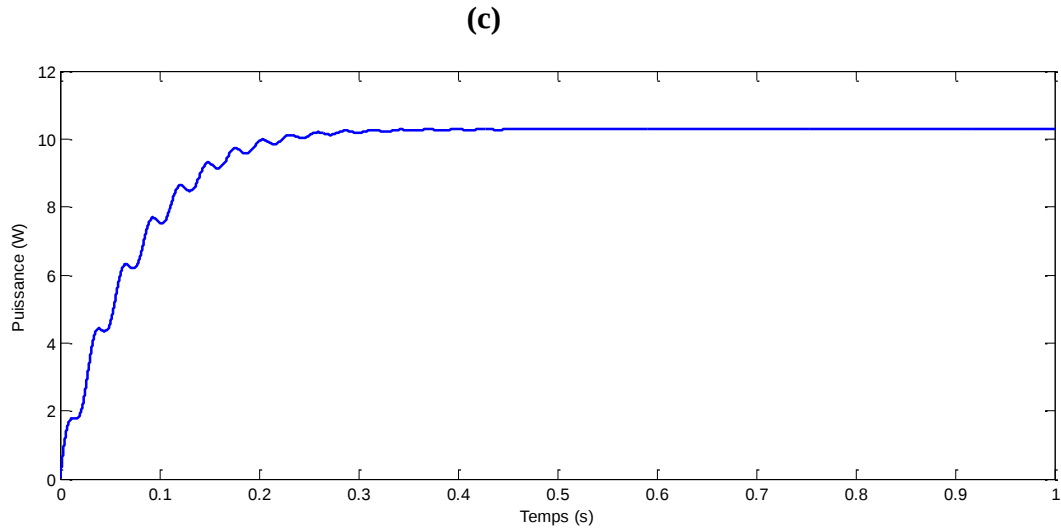
Figure .II-12. Schéma de simulation du hacheur élévateur commandé sans maximisation de puissance pour un rapport cyclique de 0,3.

(a)

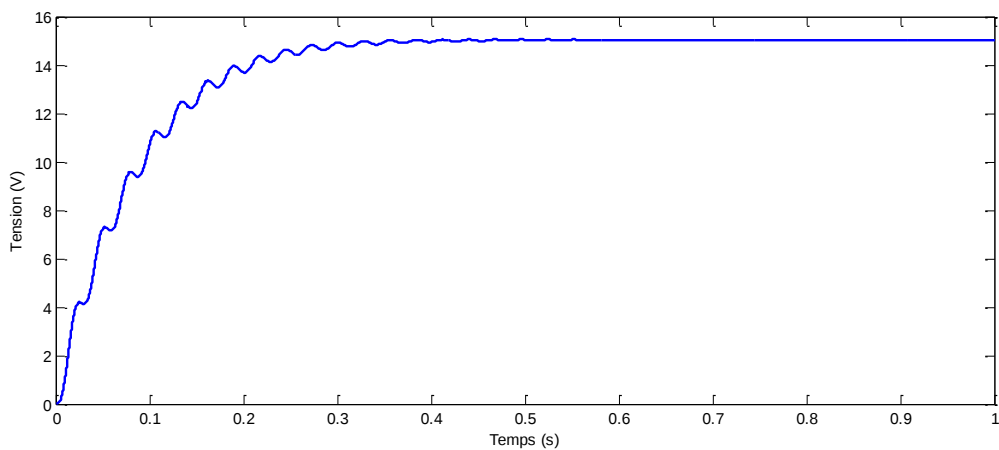
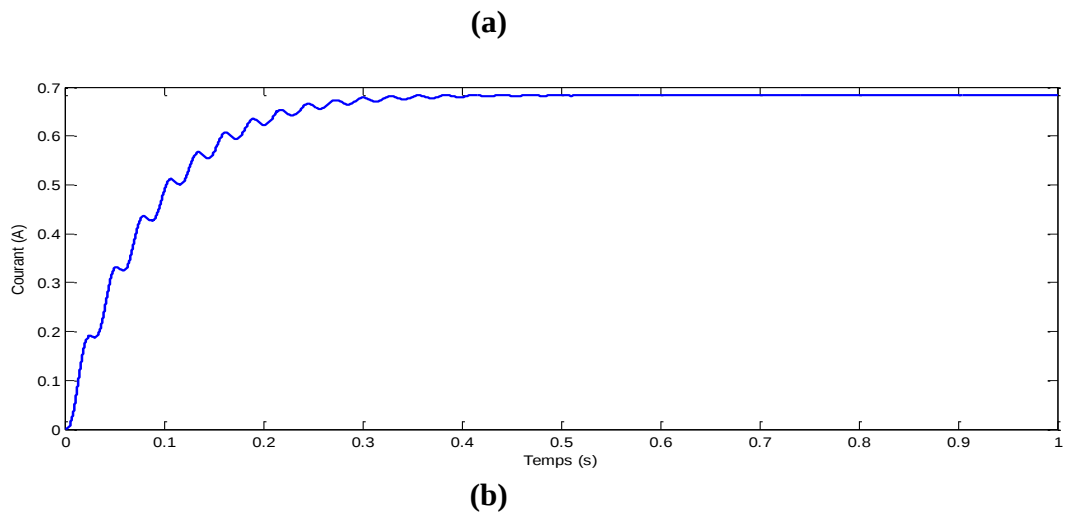


(b)





**Figure .II-13. (a) Le courant aux bornes du GPV (b) La tension aux bornes du GPV
(c) La puissanceaux bornes du GPV**



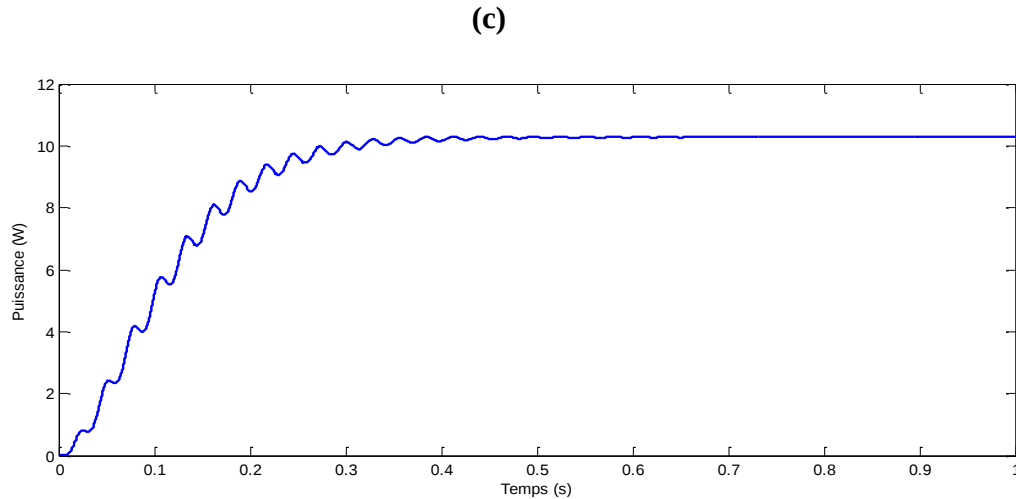


Figure .II-14. (a) Le courant aux bornes du charge (b) La tension aux bornes du charge
(c) La puissance aux bornes du charge

II.6. Commandes MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques.[27]

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application[27].

II.7. Principe du MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [27].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.15).

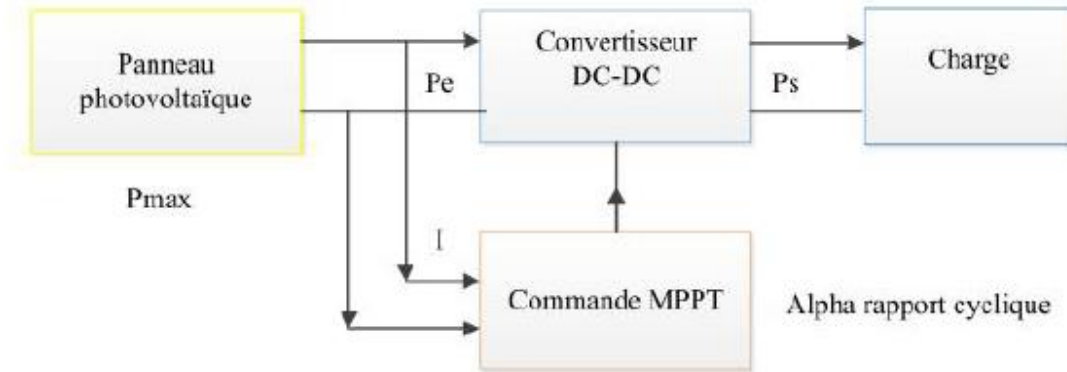


Figure .II-15. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque[27]

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (II.16) 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.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV(cas c).Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM.

réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [25].

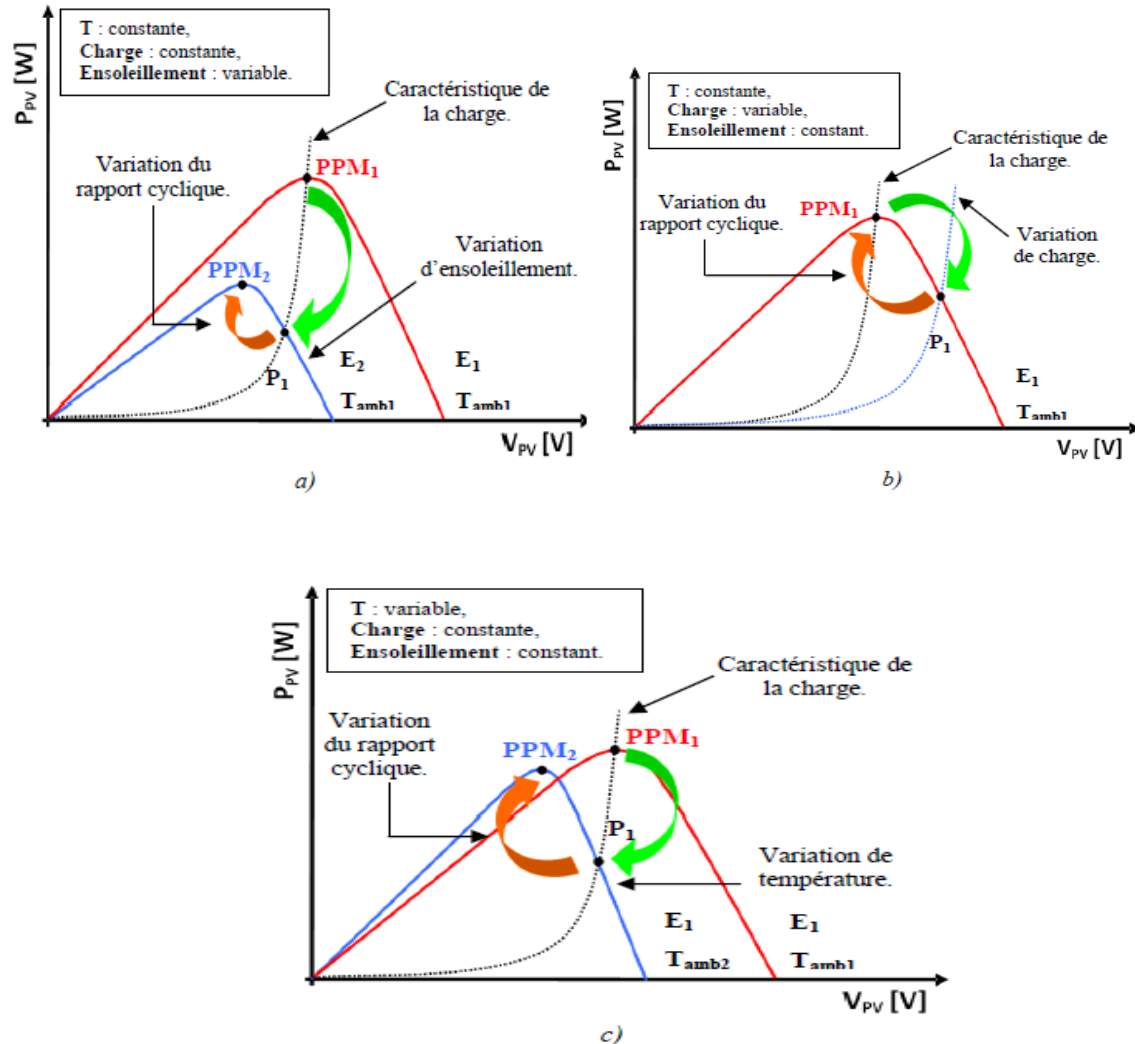


Figure .II-16 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température[28].

II.8. Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation et / ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres.

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes[29].

II.8.1. Méthodes indirectes :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}) qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc....[29].

II.8.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle k_1 , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \text{ Cst} < 1 \dots \dots \dots (II.12).$$

$$V_{mpp} = K_1 * V_{oc}$$

Où est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8. k[30]

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (II.12), et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de K_1 . Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur[31].

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{oc} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [30].

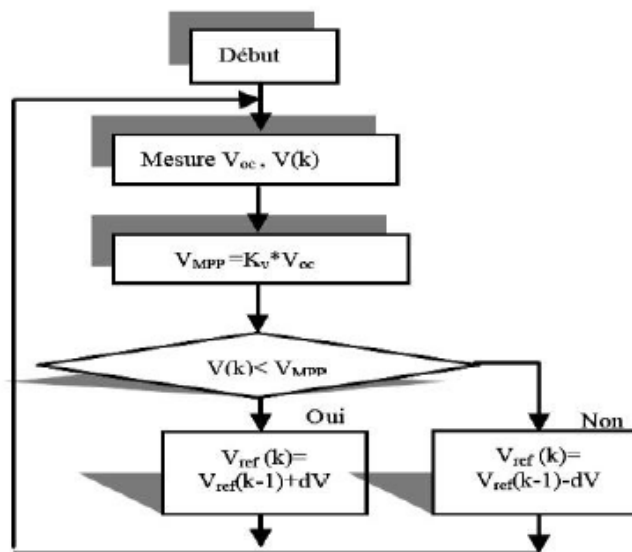


Figure II. 17: Algorithme de la Tension Constante[30]

II.8.1.2 La méthode de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale (équation II.13)

$$K2 = \frac{I_{mpp}}{I_{cc}} \cong Cst < 1 \dots \dots \dots (II.13).$$

$$I_{mpp} = K_2 * I_{cc}$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92 [30].

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert[31].

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale[30].

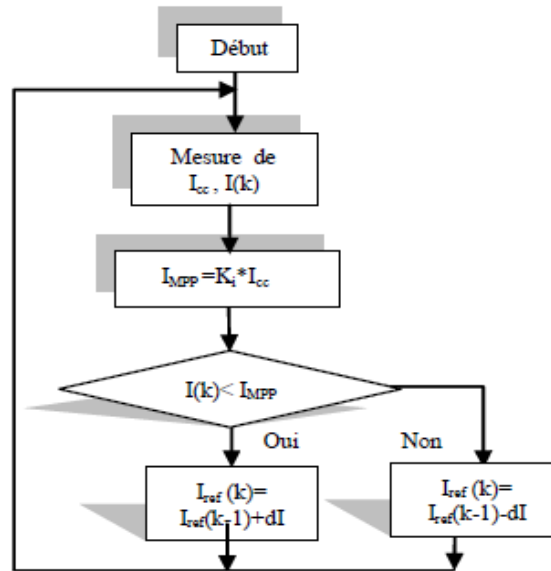


Figure II. 18: Algorithme du constant courant[30]

II.8.2. Méthodes directes :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc....[29]

II.8.2.1 Méthode de conductance incrémentielle:

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. Le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. Son principe consiste à comparer entre la conductance ($G' = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) et de sa dérivée ($\Delta G' = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ($\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$) [26].

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

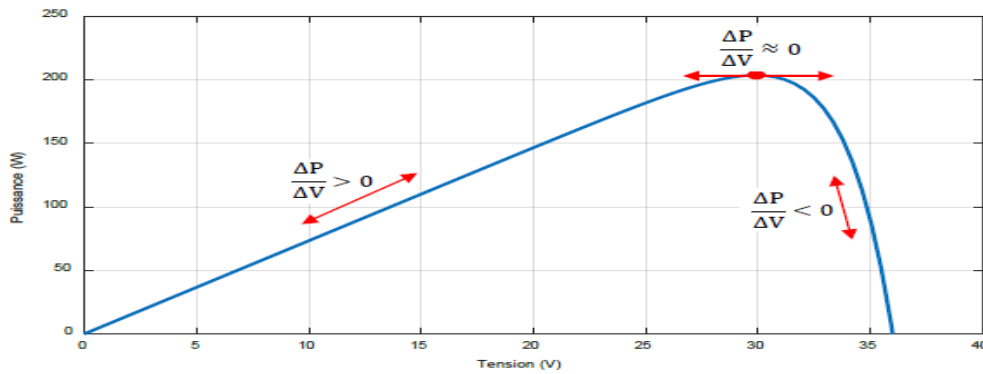


Figure II.19 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Conductance Incrémentielle [32].

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il est adapté aux conditions climatiques instables car, théoriquement, il est possible de trouver un MPP et de s'y immobiliser si la perturbation cesse. Dans ce cas-là, la variation de tension est nulle ; l'apparition d'une variation de courant permet d'ajuster la valeur de la tension de référence pour atteindre un nouveau MPP.

La méthode conductance incrémentielle est souvent jugée efficace de point de vue efficacité de recherche du point de puissance maximale [Vec 05]. Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une grande capacité de calcul, ce qui réduit la période de contrôle du système. La figure (II.20), montre l'organigramme de cette méthode. [33]

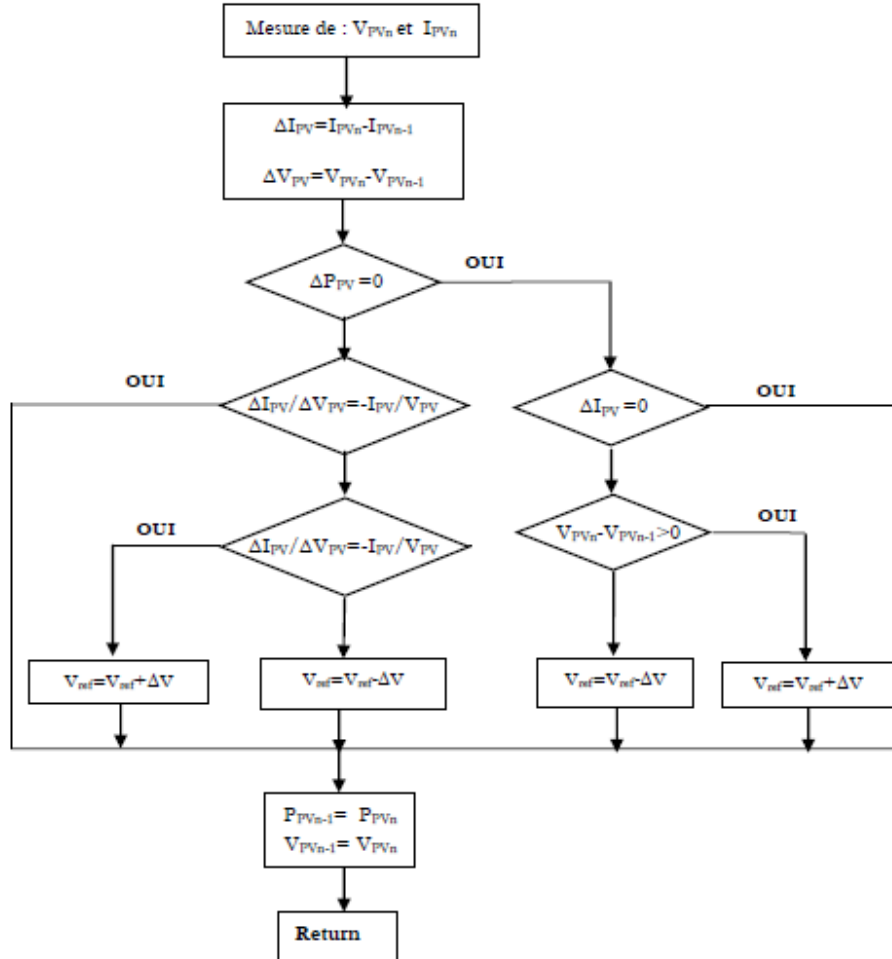


Figure II.20: Organigramme de la méthode conductance incrémentielle [34]

II.8.2.2 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée d'une faible amplitude (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la suivante est faite dans la même direction (cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP). Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.[33]

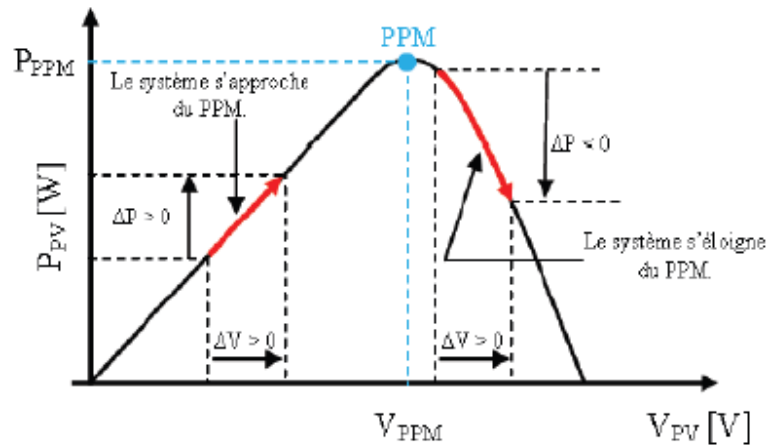


Figure II.21 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation[34]

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 MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance (voir figure (II.21)).

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (II.22).

Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit: la connaissance des caractéristiques de générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie[33].

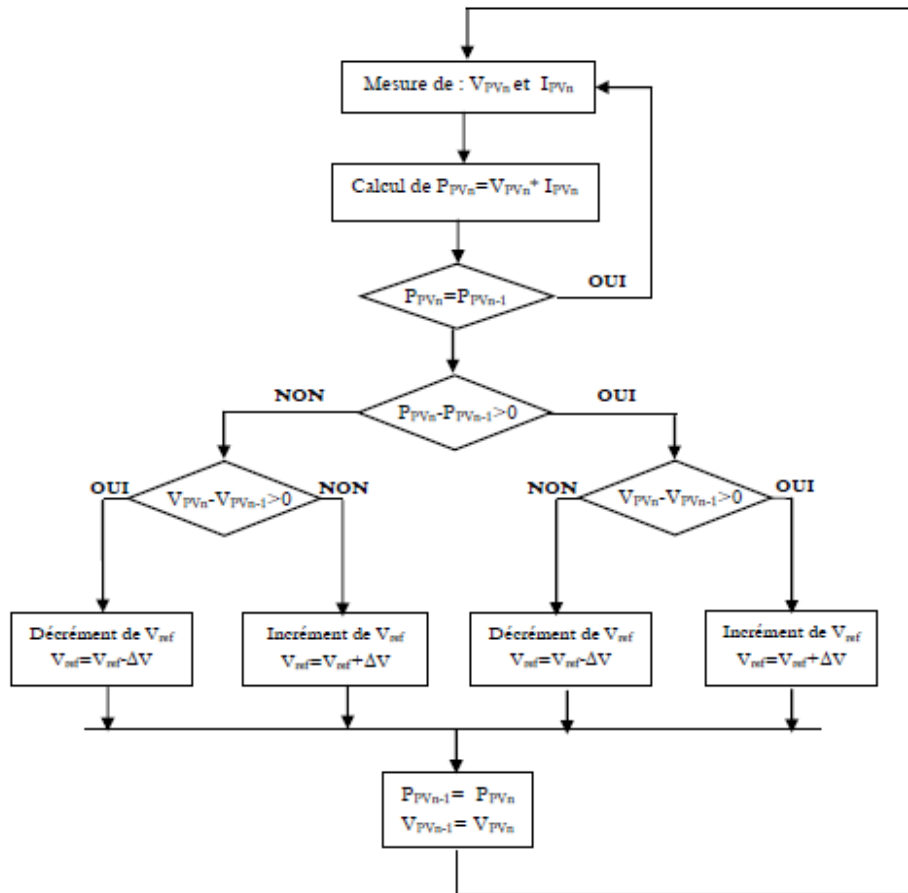


Figure II.22: Organigramme de la méthode Perturbation et Observation[34].

II.8.3 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 [20].

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.

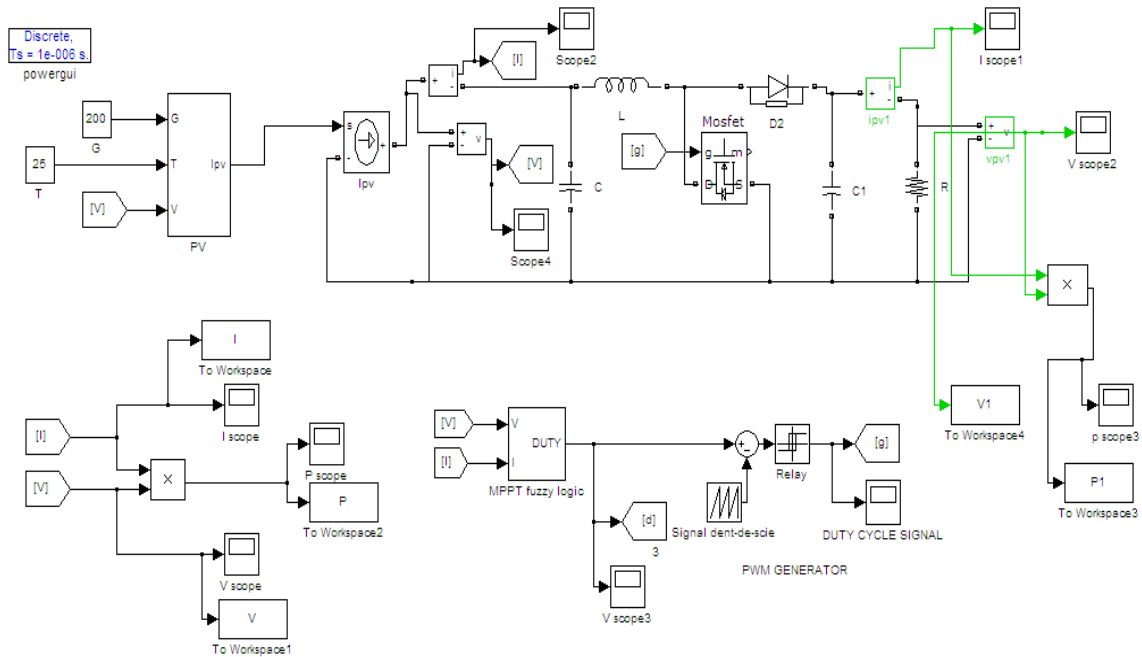


Figure .II-23. Schéma block de la commande MPPT

❖ Résultats de simulation avec de la commande MPPT :

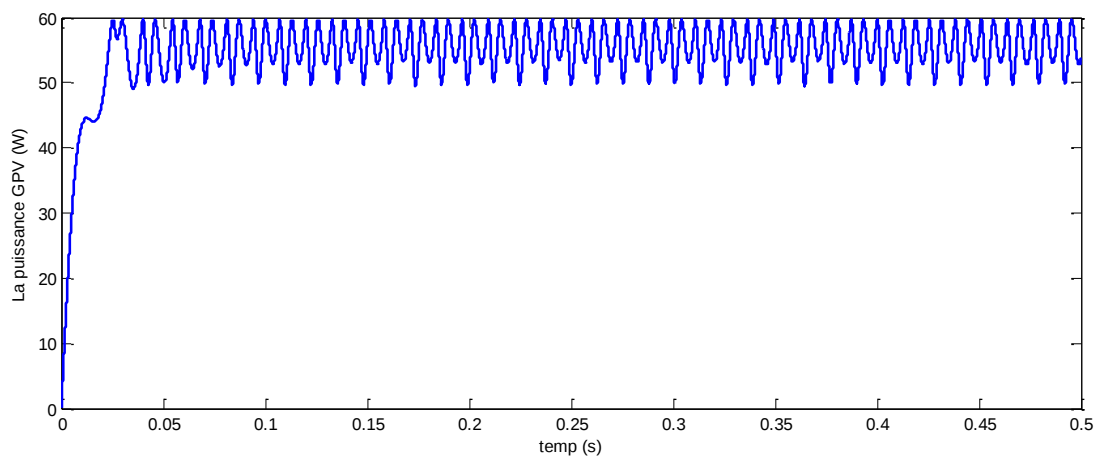


Figure .II-24. La puissance aux bornes du GPV

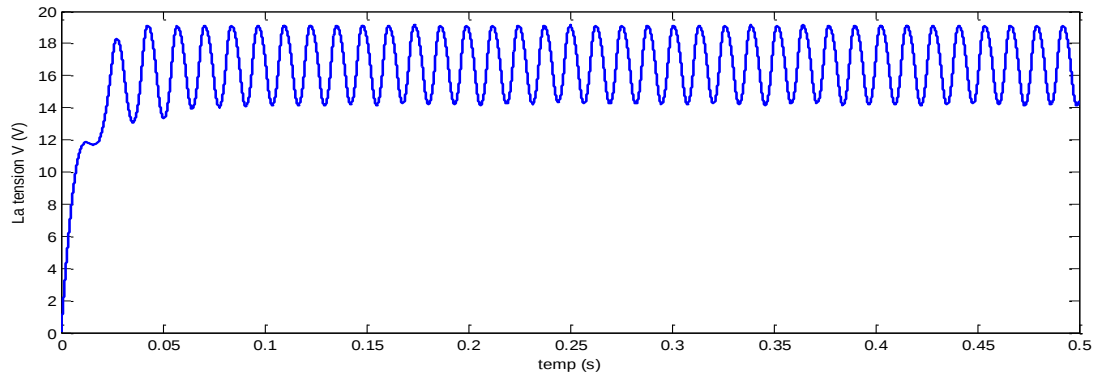


Figure .II-25. La tension aux bornes du GPV

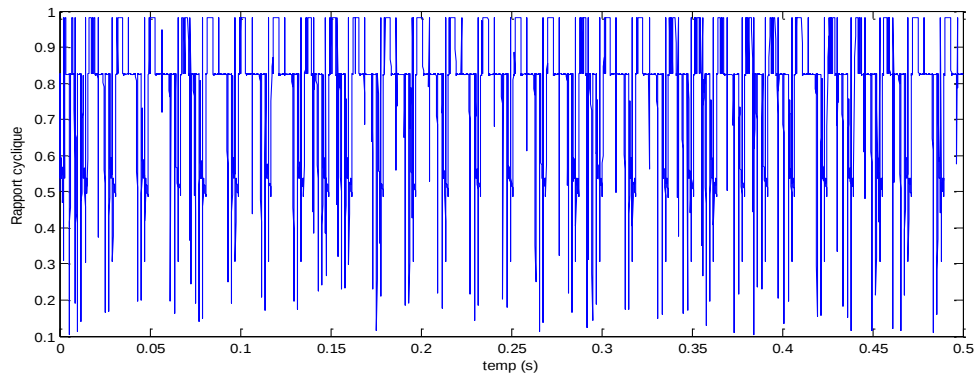


Figure .II-26. Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT P&O

II.8.4 Autres méthode de contrôle MPPT:

Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du MPP .Ces derniers sont indépendants du modèle du processus, ils se caractérisent par leur aptitude à appréhender les problèmes de non linéarité et ils présentent des performances robustes par rapport aux variations des conditions atmosphériques et de la charge. On retrouve aussi les méthodes à base d'algorithme génétique et de réseau de Neurone [34].

II.9 . Conclusion :

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

Présenter commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale. En plus , nous avons présenté les méthodes de poursuite de la puissance maximale.

Chapitre III

Logique Floue et les algorithmes
génétique

III.1. Introduction :

Le développement des techniques intelligentes connaît un grand essor actuellement, que ce soit pour la modélisation, l'identification ou la commande des systèmes complexes tels que les robots, les procédés biologique, les véhicules routiers..., ceci grâce à leurs adaptabilités face aux changements des paramètres des systèmes, et leurs robustesses envers les perturbations et les erreurs de modélisation. Les systèmes photovoltaïques présentent des caractéristiques fortement non linéaires, ajouté à cela leurs dépendances des conditions climatiques qui sont hautement aléatoires, cela a incité la publication de beaucoup de travaux concernant l'optimisation de ces systèmes en utilisant des techniques intelligentes.

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les notions relatives à la logique floue ainsi que la structure d'un régulateur flou. Ensuite, on décrit le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique, méthode d'optimisation globale et de recherche parallèle [23].

III.2. La logique floue (FLC):

La logique floue (*fuzzylogic, en anglais*) est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques ; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie.

Elle a été formalisée par *Lotfi Zadehen* 1965 et utilisée dans des domaines aussi variés. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous. Cette théorie, introduite par *Zadeh*, est une extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise. C'est une théorie formelle et mathématique dans le sens où *Zadeh*, en partant du concept de fonction d'appartenance pour modéliser la définition d'un sous-ensemble d'un univers donné, a élaboré un modèle complet de propriétés et de définitions formelles. Il a aussi montré que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit effectivement à la théorie des sous-ensembles classiques dans le cas où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires (0,1). Elle présente aussi l'intérêt d'être plus facile et meilleur marché à implémenter qu'une logique probabiliste [35].

A l'état actuel, les deux domaines d'applications de la logique floue qui deviennent plus en plus importants sont ;

- La conception de régulateurs pour des procédés difficilement modélisables.
- La conception de régulateurs non linéaires pour des procédés modélisables.

Pour notre part, nous utiliserons la logique floue pour améliorer les performances du contrôle du MPPT[35].

III.3.1 Principe et définition de la logique floue

Un être humain peut réagir à des problèmes et donner de bonnes réponses avec des données imprécises, inachevées et incertaines. Etudier un tel problème par des méthodes classiques exige souvent des notions assez avancées de mathématiques et la connaissance des différents paramètres qui peuvent influencer sur celui-ci, cette étude est aussi souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation de processus.

On peut résoudre ce genre de problème en utilisant des méthodes dites robustes et la logique floue en est une. Cette dernière est issue de la capacité de l'homme qui décide et agit de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles.

Donc l'idée de la logique floue est de transmettre cette richesse de raisonnement humain à un ordinateur.

Ainsi, la logique floue peut être considérée comme une technique puissante pour le traitement des connaissances imprécises et incertaines[35].

Elle permet de prendre en considération des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou des expressions naturelles, telle que ; froid, chaud, tiède, très froid,...etc [35].

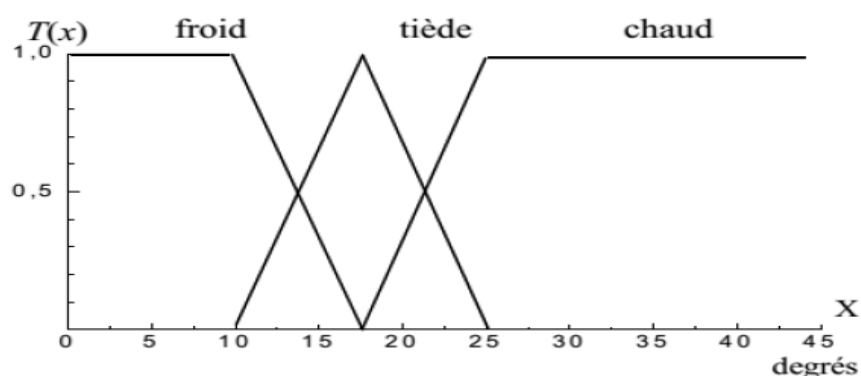


Figure .III-1 : Variables linguistiques, termes linguistiques et univers de discours [35]

III.4.Fonctions d'appartenance:

Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance de forme *trapézoïdale* ou *triangulaires*, *gaussienne*, *rectangulaires* ... Il s'agit des formes les plus simples.

La figure (IV.2) définit la représentation graphique des formes de bases des fonctions d'appartenances.

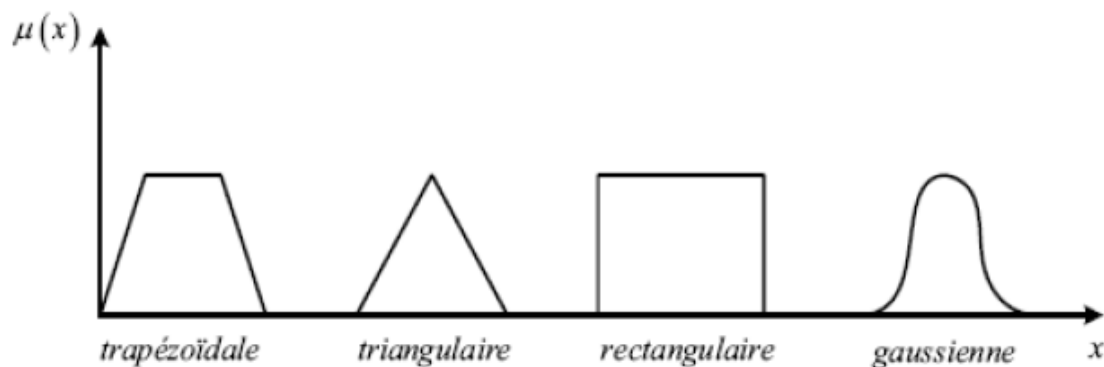


Figure. III-2 : La représentation graphique des formes de bases des fonctions d'appartenances[35]

III.5.Règles floues

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue, est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme Si...alors...Chaque règle a deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...,
- Partie conséquente (conclusion) exprimée par alors.

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquente exprime

l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue. Il y a plusieurs formes de Si...alors ...la forme générale est :

Si (un ensemble de conditions est satisfait) alors (un ensemble de conséquences peut être exécuté)[36].

III.6.Mécanismes d'inférence floue

Une base de règles floues comprend donc les règles linguistiques qui font appel à des fonctions d'appartenances. Le mécanisme d'inférences comprend les étapes suivantes:

- **Fuzzification:** la fuzzification permet de transformer les variables réels numériques d'entrées, en variables floue. Cette première étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état (après la définition des entrées et sorties). Celui-ci déterminé à l'aide des fonctions d'appartenance définie dans le système (projection des variables physique sur des ensembles floue). Dons la fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles.
- **Degrée d'activation :** le degré d'activation d'une règle est l'évaluation des prédicats de chaque règle par combinaison logiques des propositions du prédicat.
- **Implication :** le degré d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion dela règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs operateurs d'implication, mais la plusutilisée est le minimum. L'ensemble de conclusion est construit en réalisant leminimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance.
- **Agrégation :** L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacun règles concernant cette sortie. Les règles sont liées entre eux par un opérateur logique « OU » on calcule donc le maximum entre la fonction d'appartenance résultant de chaque règle.
- **Défuzzification:** la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais iln'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. il est nécessaire de passer d'une valeur floue à une valeur numérique, c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, les méthodes les plussouvent rencontrées étant le calcul du centre de gravité. La méthode du centre degravité est une des méthodes les plus mentionnées dans la littérature [35] .

III.7.Algorithme génétique. [1]

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées, et les échanges d'information pseudo-aléatoires, pour former un algorithme d'exploration qui possède certaines des caractéristiques de l'exploration humaine.

Ils reposent sur un codage de variables organisées sous forme de structures chromosomiques et prennent modèle sur les principes de l'évolution naturelle de Darwin pour déterminer une solution optimale au problème considéré. Ils ont été introduits par Holland pour des problèmes d'optimisations complexes.

Contrairement aux méthodes d'optimisations classiques, ces algorithmes sont caractérisés par une grande robustesse et possèdent la capacité d'éviter les minimums locaux pour effectuer une recherche globale. De plus, ces algorithmes n'obéissent pas aux hypothèses de dérivabilité qui contraignent pas mal de méthodes classiques destinées à traiter des problèmes réels.

Un algorithme génétique est constitué principalement des étapes suivantes :

- 1. Initialisation** : une population initiale de taille N chromosomes est tirée aléatoirement
- 2. Evaluation** : chaque chromosome est décodé puis évalué.
- 3. Reproduction** : création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection.
- 4. Opérateurs génétiques** : croisement et mutation de certains chromosomes au sein de la nouvelle population.
- 5. Retour** à la phase deux tant que la condition d'arrêt du problème n'est pas satisfaite.

La figure suivante illustre l'organigramme de fonctionnement d'un algorithme génétique :

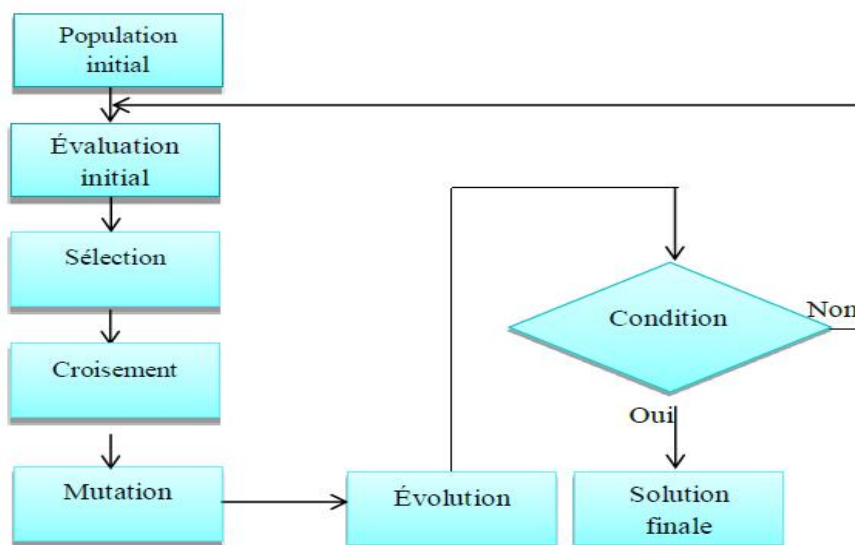


Figure (III-7): Organigramme de fonctionnement d'un algorithme génétique[23].

III.8 Principe d'un algorithme génétique

Un algorithme génétique recherche le ou les extremums d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- **Un principe de codage de l'élément de population** : Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. Le choix du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques.
- **Un mécanisme de génération de la population initiale** : Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.
- **Une fonction à optimiser** : appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Elle est utilisée pour sélectionner et reproduire les meilleurs individus de la population.
- **Des opérateurs génétiques** : permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.
- **Des paramètres de dimensionnement** : Taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation [23].

III.9. Conception du contrôleur MPPT flou par algorithmes génétiques

Les difficultés rencontrées dans la conception des contrôleurs flous (CF), ont guidé les chercheurs à s'orienter vers l'utilisation des algorithmes génétiques à cause de leur caractéristique d'exploration globale dans un environnement complexe.

Dans ce travail nous utilisons les algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres des fonctions d'appartenance associées aux variables d'entre et de sortie du contrôleur flou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT flou) [23]. La figure IV-5 illustre la stratégie de cette approche d'optimisation que l'on peut résumer à partir des étapes suivantes :

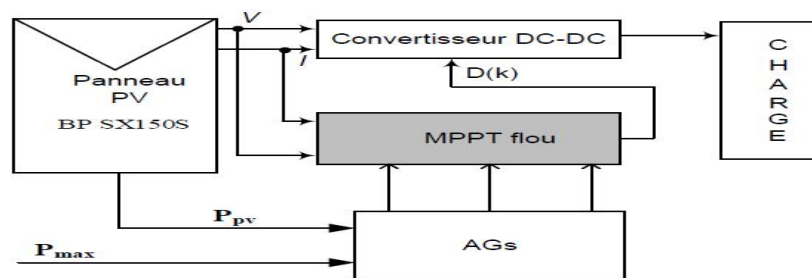


Figure .III-8: Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue[23]

III.10.Choix des paramètres des AG :

❖ La taille de la population

Les conditions de convergence changent avec la taille de la population, lorsque celle-ci est grande, sa diversité augmente ce qui diminue la convergence vers un optimum local, le temps d'exécution de chaque génération augmente, la recherche risque de s'effectuer d'une façon redondante et l'efficacité de l'algorithme est globalement affectée. Par contre, si la taille de la population est petite, alors la probabilité de s'attarder sur des extremums locaux est grande.

❖ Le taux de croisement

L'opérateur de croisement est appliqué avec une probabilité P_c , et plus cette valeur est élevée plus de nouvelles structures (individus) sont introduites dans la nouvelle génération, les structures performantes sont trop fréquemment détruites. Par contre, si ce taux est trop bas, la population n'évolue pas assez vite. En général, P_c varie entre 0.25 et 0.70.

❖ Le taux de mutation

L'opérateur de mutation est appliqué avec une probabilité P_m ; si ce taux est grand alors la recherche devient purement aléatoire, la population est diversifiée et l'AG perd de son efficacité. Si au contraire ce taux est faible, la population est moins diversifiée et en plus il y a risque de stagnation. [23]

III.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous allons décrire les techniques de l'intelligence artificielle à savoir la logique floue et les algorithmes génétiques que nous allons associer à la commande. et nous avons retenu l'algorithme de Perturbation puis observation (P&O), nous avons aussi présenté en détail les mécanismes d'un algorithme génétique. Les algorithmes génétiques constituent une famille d'algorithmes heuristiques permettant de rechercher l'optimum ou un quasi optimum des fonctions objectives.

Chapitre IV

***Commande MPPT basée sur
l'approche floue optimisée par AG***

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente une méthode de contrôle intelligente pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque dans des conditions de température et d'irradiance variables. Tout d'abord, à des fins de comparaison et en raison de ses performances avérées et robustesses. Un contrôleur à logique floue basé sur MPPT (FLC) est alors proposé qui a montré de meilleures performances par rapport à l'approche basée sur P&O. Le FLC proposé a également été amélioré à l'aide d'algorithmes génétiques (AG) pour l'optimisation.

Nous allons appliquer une commande MPPT floue optimisée par AG pour l'optimisation d'un système photovoltaïque, et fait l'objet d'une étude comparative entre une commande MPPT-AG floue et d'autres techniques comme la méthode P&O (perturbation et observation). Différentes étapes de développement sont présentées et le contrôleur MPPT à logique floue optimisée (OFLC) est ensuite simulé et évalué, ce qui a montré de meilleures performances.

IV.2. Commande MPPT floue (FLC):

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

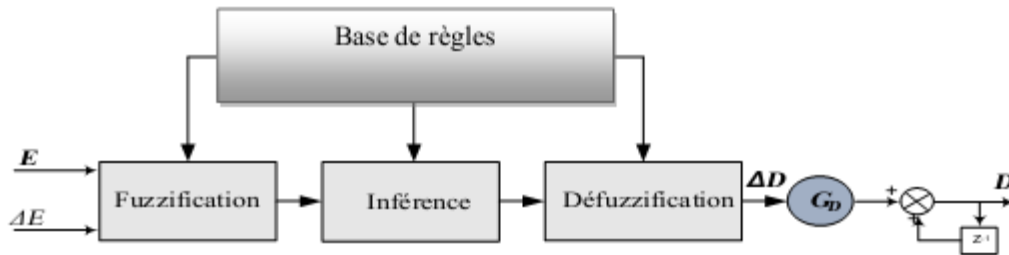


Figure .IV-1. MPPT floue

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 :

$$E(K) = \frac{Ppv(k) - Ppv(k-1)}{Vpv(k) - Vpv(k-1)} \quad (IV-1)$$

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

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. GD La sortie du contrôleur flou est ΔD qui représente la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

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

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

Nous avons aussi une deuxième proposition de la commande MPPT floue (type II), où les entrée 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.

IV.2.1. 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 IV-2, IV-3 et IV-4 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E , ΔE et ΔD le contrôleur FLC.

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

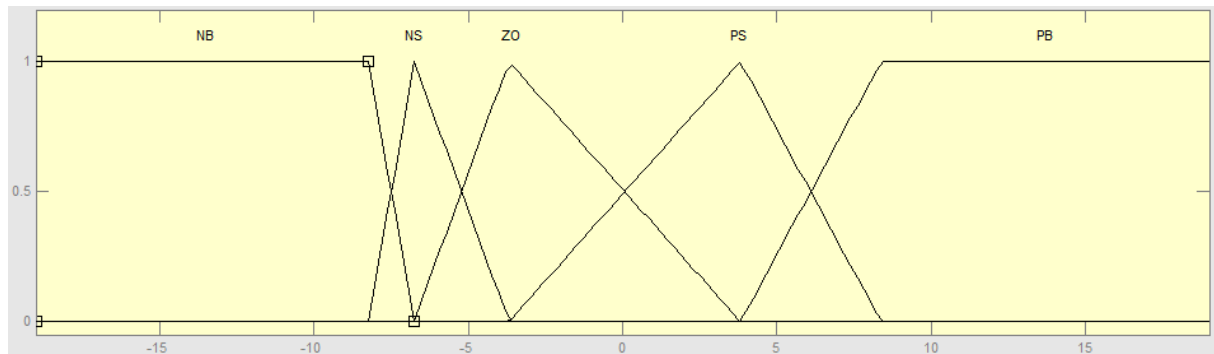
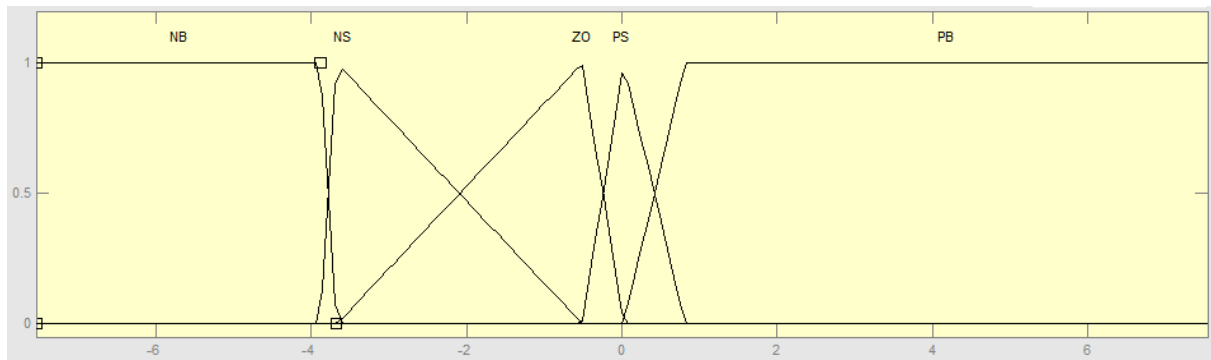
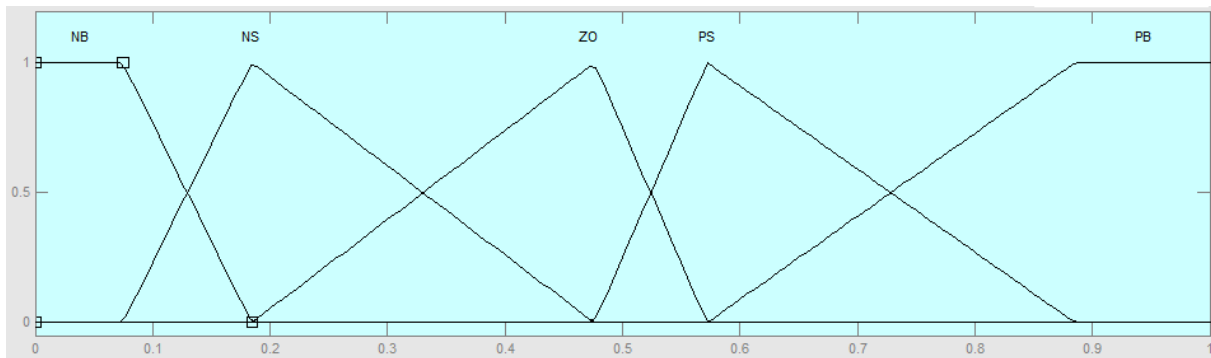


Figure .IV-2. Fonctions d'appartenance de la variable E

Figure .IV-3. Fonctions d'appartenance de la variable ΔE Figure .IV-4. Fonctions d'appartenance de la variable ΔD

IV.2.2. 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.

Tableau IV.1. Base de règles du MPPT floue

		ΔE				
E	ΔD	NB	NS	ZO	PS	PB
	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 noire 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".

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.

IV.2.3. 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).

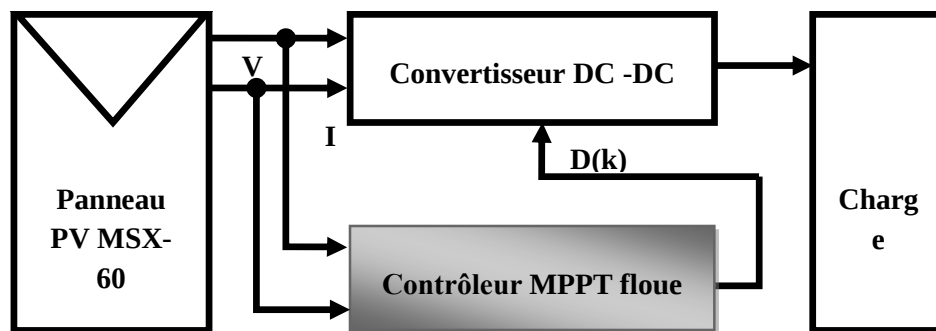


Figure .IV-5. Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue

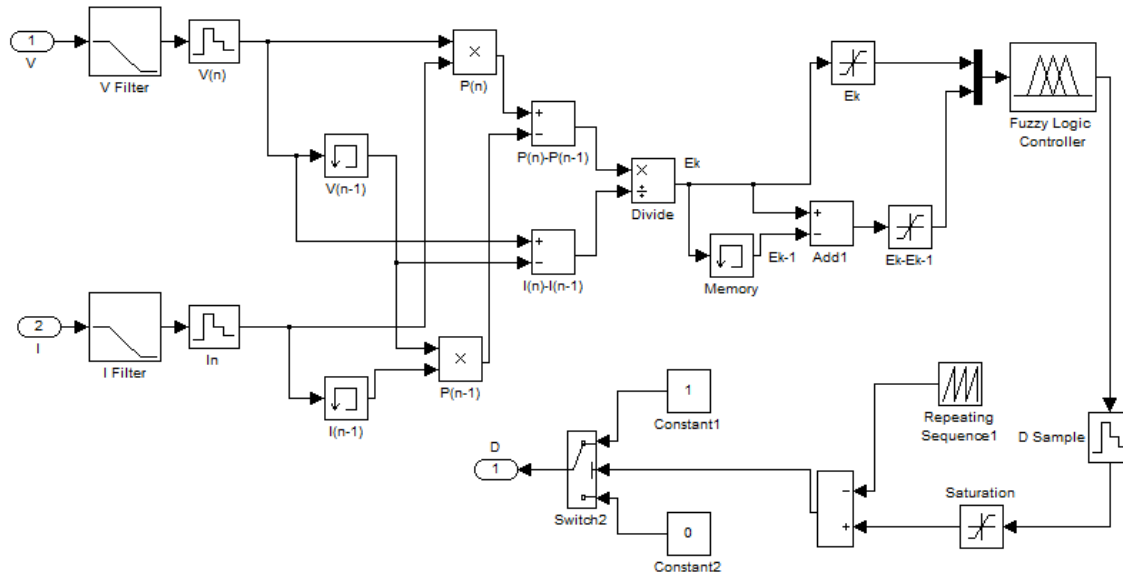


Figure .IV-6. Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue

La figure IV-5-6 illustre la stratégie de cette approche que présenter la schéma synoptique d'un contrôleur MPPT flou.

IV.3. Conception du contrôleur MPPT flou (LFC) par Algorithme génétiques (AG):

Les difficultés rencontrées dans la conception des contrôleurs flous (LFC), ont guidé les chercheurs à s'orienter vers l'utilisation des algorithmes évolutionnaires à cause de leur caractéristique d'exploration globale dans un environnement complexe.

Dans ce travail nous utilisons les algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres des fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT floue).

La figure suivante illustre la stratégie de cette approche d'optimisation que l'on peut résumer à partir des étapes suivantes :

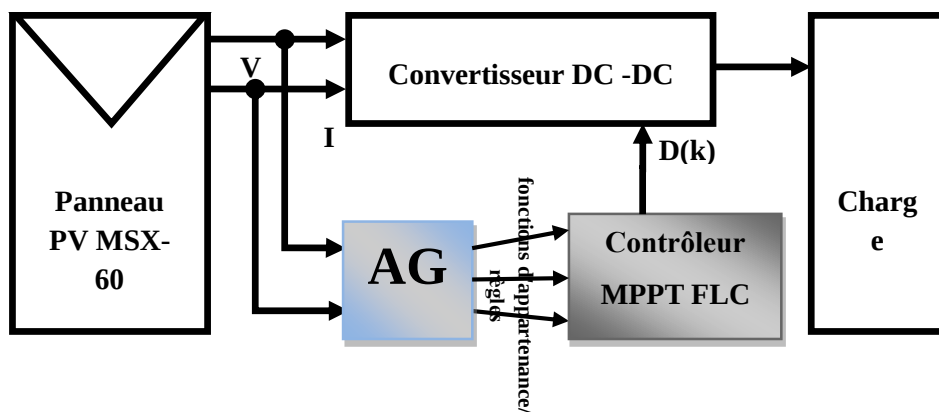


Figure IV-7 - Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue

IV.3.1. Création de la population initiale

Comme l'espace de recherches de chaque variable (E , ΔE et ΔD) est réparti en 5 fonctions d'appartenance complètement définies par 5 paramètres (centres des fonctions d'appartenance), nous avons alors au total 15 paramètres à optimiser.

Nous avons défini pour chaque paramètre un intervalle de variation, ensuite le paramètre est créé aléatoirement à l'intérieur de cet intervalle. Les centres de ces fonctions d'appartenance appartiennent aux limites correspondantes (L1 pour E , L2 pour ΔE).

Ainsi que le nombre des règles que nous obtenons des algorithmes génétiques est de 25 règles (5 fonctions d'appartenance de variable $E \times 5$ fonctions d'appartenance de variable ΔE).

La population se compose d'un ensemble de particules dont la structure est illustrée par la figure IV-7 et IV-8.

L1	L2	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	D1	D2	D3	D4	D5	R1	...	R25
2 Limites (E, ΔE)		5 centres des fonctions d'appartenance E					5 centres des fonctions d'appartenance ΔE					5 centres des fonctions d'appartenance ΔD					25 règles		

Figure IV-7 - Structure et description d'un individu (chromosomes).

avec :

L_i ($i=1, \dots, 2$) : sont les limites des centres des variables E et ΔE.

X_i ($i=1, \dots, 5$) : sont les centres des fonctions d'appartenance de la variable E.

Y_i ($i=1, \dots, 5$) : sont les centres des fonctions d'appartenance de la variable ΔE.

D_i ($m=1, \dots, 5$) : sont les centres des fonctions d'appartenance de la sortie ΔD.

R_i ($m=1, \dots, 25$) : sont l'ensemble des règles floues.

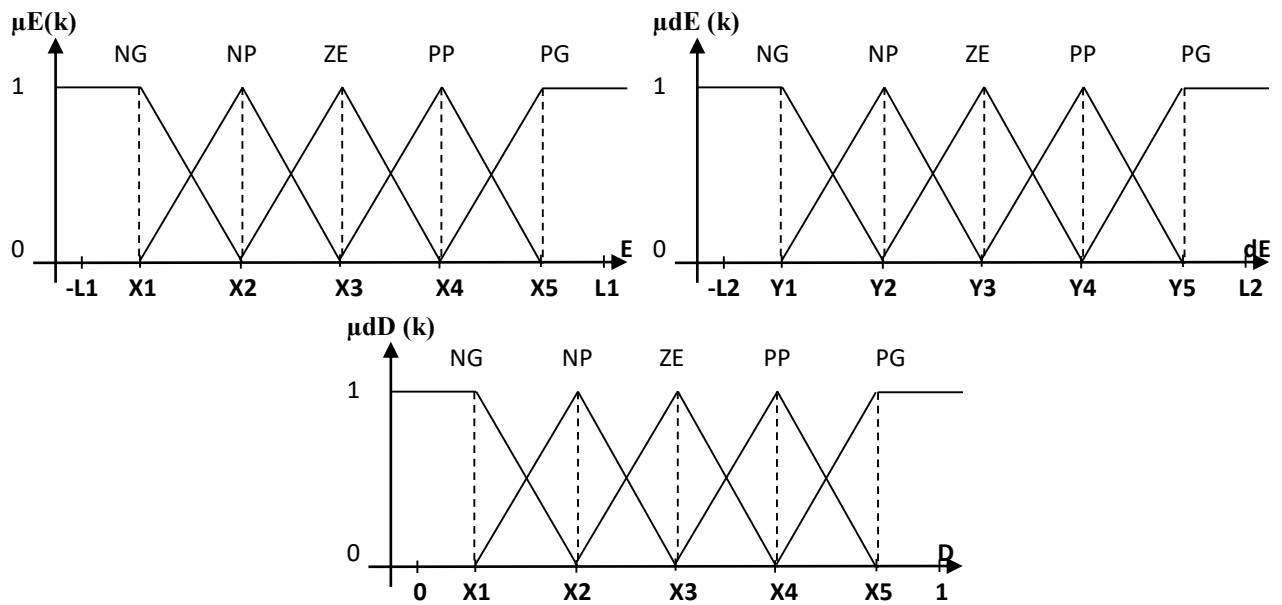


Figure IV-8 - Codage des fonctions des appartenances: E , dE et dD

IV.3.2 Fonction objectif :

Pour évaluer les particules à chaque génération, nous avons utilisé le critère fitness (fonction d'objective) suivant :

$$J = \int_0^{t_f} |P_{max} - P_{pv}| dt \quad (IV-4)$$

Où P_{max} est la puissance maximale que le panneau peut délivrer délivrée sous les conditions normalisées : $T=25^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$ et t_f est le temps de simulation.

Ce choix de le critère J a été fait dans le but d'améliorer le temps de réponse et de réduire les fluctuations.

IV.3.3 Paramètres de l'AG :

L'algorithme AG décrit précédemment (chapitre III) doit permettre d'optimiser les paramètres du contrôleur flou. Pour se faire, on doit choisir les valeurs des paramètres de l'AG

pour générer la population suivante, les paramètres suivantes sont effectuées:

- Taille de population est 20 individus (N).
- L'opération de croisement: des variables continues avec une probabilité de croisement (Pc) égale 0.8.
- La mutation: la méthode des variables continues, avec une probabilité de $P_m = 0.1$, et un indice de distribution n est utilisée.
- Le critère d'arrêt est effectué lorsque le nombre maximum de générations atteint 60 (it_{Max}) c'est-à-dire là où la fonction de fitness est à son minimum.

IV.4. Resultats de Simulation :

Dans cette partie, on commence par évaluer le système PV MPPT par l'outil de simulation MATLAB/Simulink. Ensuite, les différentes méthodes de poursuite MPPT sont simulés sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions météorologiques.

IV.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.

Les variations de la valeur minimale de la fonction objectif (critère J) en fonction du nombre de générations sont données par la figure IV-9. Nous remarquons que l'AG a convergé vers une solution optimale ($J = 82575.29$) représentée par la meilleure individu de la population de la dernière génération. Cet individu donne les valeurs des paramètres recherchés.

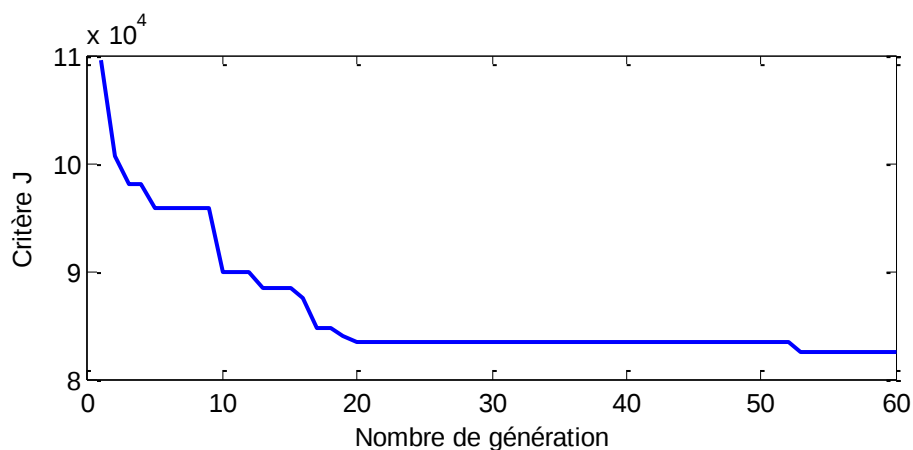


Figure IV-9 – convergence de la fonction objectif à travers les générations

La solution optimale obtenue donne alors les formes des fonctions d'appartenance illustrées par la figure suivante :

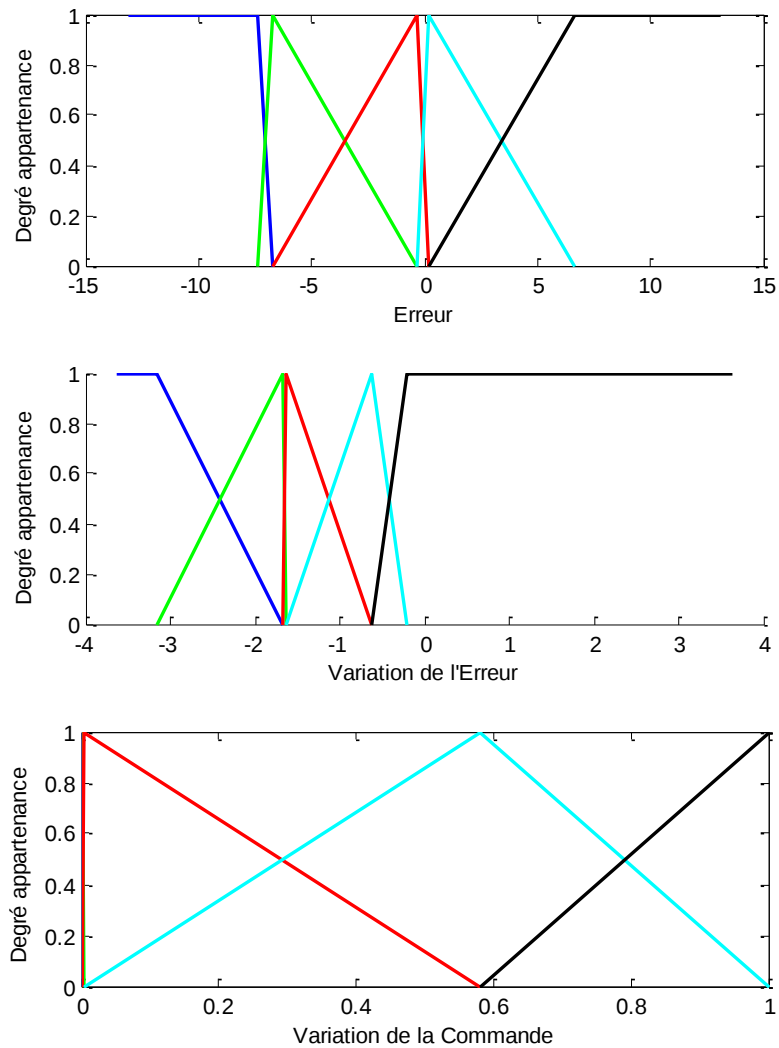


Figure IV-10 - Fonctions d'appartenances du contrôleur flou optimal

Les figures IV-11 à IV-15 donnent les caractéristiques électriques correspondantes à la meilleure solution obtenue après 60 générations.

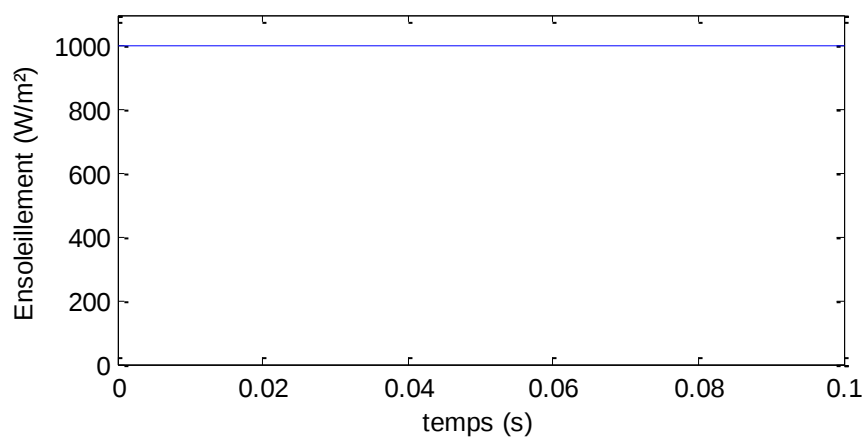


Figure IV-11 - Variation de l'ensoleillement en fonction du temps

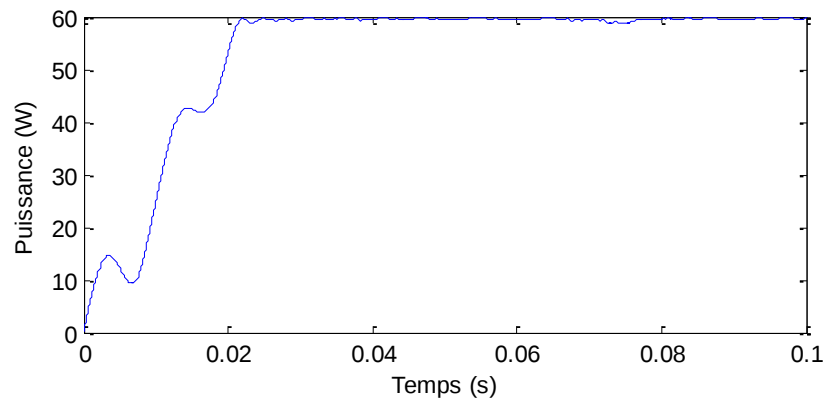


Figure IV-12 - Puissance correspondante au contrôleur FLC-AG

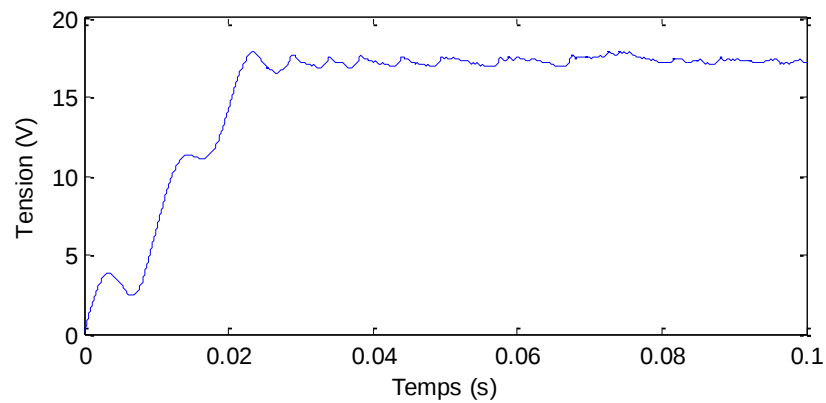


Figure IV-13 - Tension correspondante au contrôleur FLC-AG

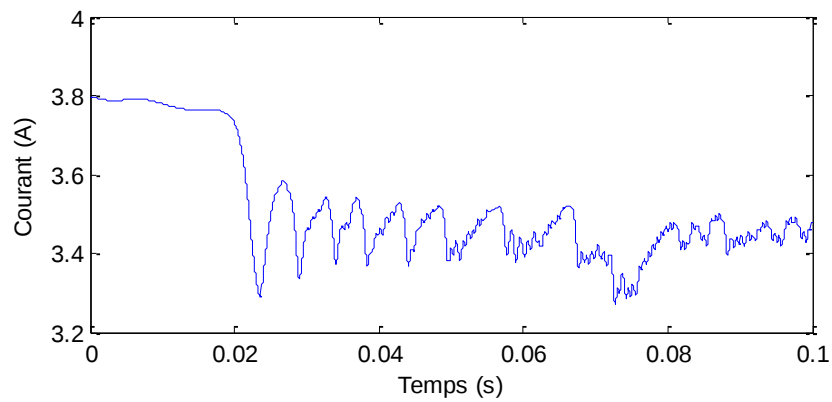


Figure IV-14 - Courant correspondant au contrôleur FLC-AG

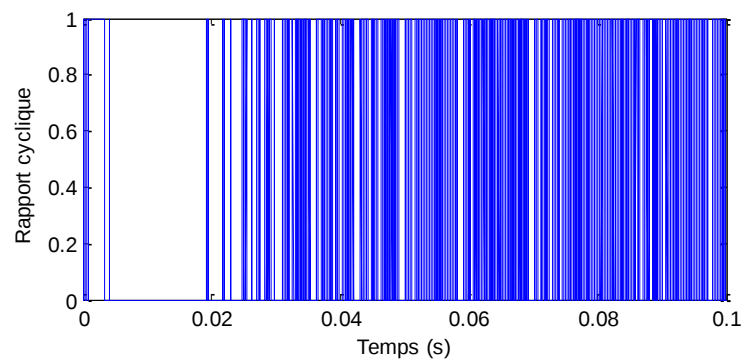


Figure IV-15 - Rapport cyclique correspondant au contrôleur FLC-AG

IVI.6.2. Etude comparative et test de robustesses :

Afin d'évaluer réponses temporelles des 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 ($E = 500 - 1000 - 700 \text{ w/m}^2$).

Figure IV -17 présente la réponse Ppv des trois contrôleurs (MPPT flou optimisé par les algorithmes génétiques (FLC-GA), MPPT flou non optimisé (FLC) et P&O).

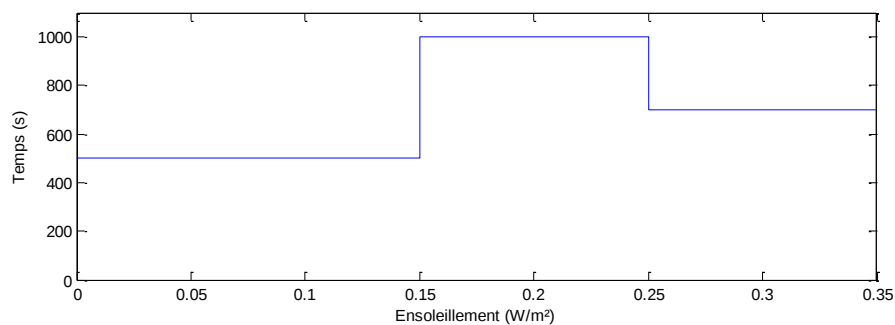


Figure IV-11 - Variation de l'ensoleillement en fonction du temps

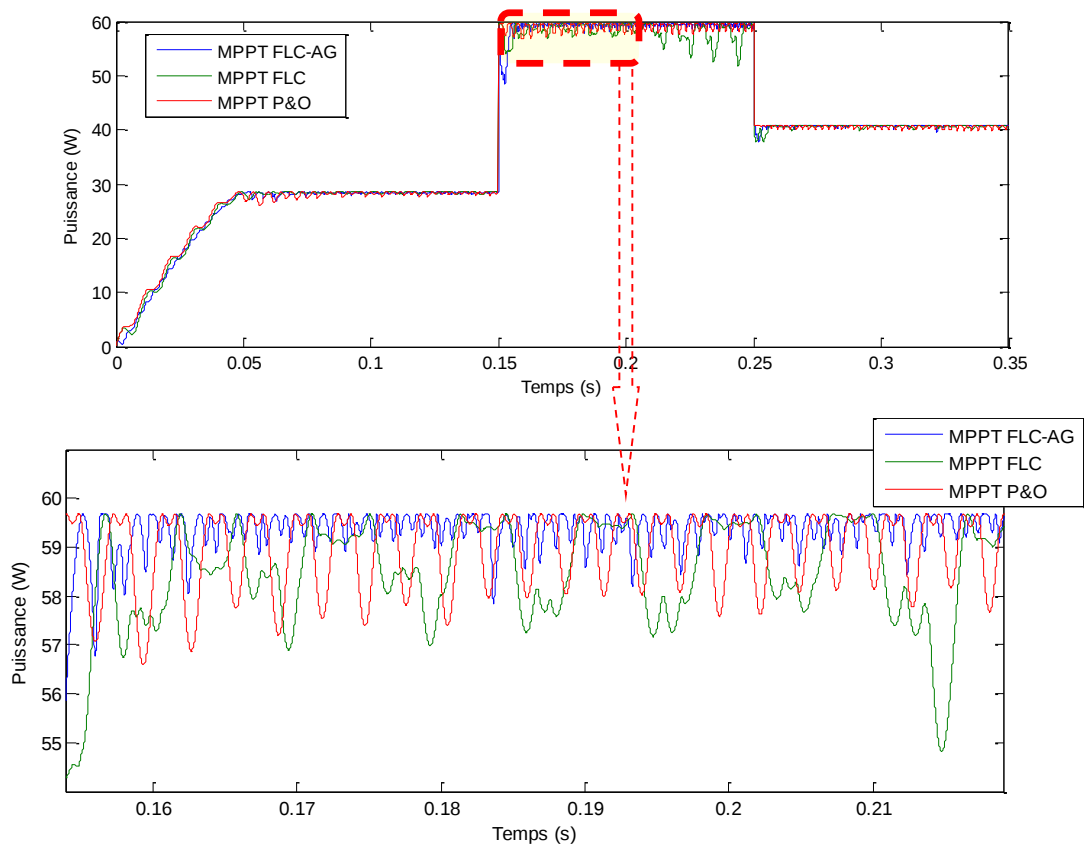


Figure .IV-17. Réponses des trois contrôleurs (FLC-GA, FLC et P&O) pour une augmentation d'ensoleillement (échelon $E = 500 - 1000 - 700 \text{ w/m}^2$) à température constante $T = 25^\circ\text{C}$

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque, pour différentes valeurs d'éclairement, ont été obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou-GA 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 flou-GA a un taux d'ondulation 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.

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté la méthode d'optimisation d'une commande MPPT floue par l'algorithme AG pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque. Les résultats de simulations obtenus ont permis de vérifier l'efficacité des AG dans la recherche et l'optimisation des paramètres d'un contrôleur flou.

Les tests de robustesse vis-à-vis les variations de l'ensoleillement ont montré que le contrôleur flou optimisé présente des performances plus intéressantes que celles d'un contrôleur flou non optimisé.

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. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques, un mécanisme de poursuite s'avère indispensable pour une efficacité meilleure du générateur. A travers ce projet, les AGs est proposée afin de maximiser le profit en termes d'énergie qui alimentant la charge ce qui signifie la minimisation des pertes d'énergie.

On peut dire après la comparaison des techniques d'optimisation MPPT-AG aux les autres MPPT classique a été présenté, pour le calcul instantanément le point de puissance maximum PPM d'un module photovoltaïque afin de maximiser le profit de puissance avec les contraintes du changement instantané de les conditions climatiques. ces techniques basé sur les méthodes méta heuristique (MPPT-AG) est la meilleure technique utilisée pour suivre la puissance optimale PPM qui remarquent elle converge rapidement à la solution optimale avec un nombre d'itération minimale.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que le contrôleur flou optimisé présente des performances plus intéressantes que celles d'un contrôleur flou non optimisé.

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

- [1] M. Med Nadjib, H. Charaf Eddine, “ Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque En Fonctionnement Autonome Et Connecté Au Réseau”, Mémoire Master, Université KasdiMerbah – Ouargla, 2013.
- [2] H. Fatiha, R. Aicha, “Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque”, Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2014.
- [3] H. Kamelia, “Modélisation D'une Cellule PV : Etude Comparative”, Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2012.
- [4] B. Tarek, B. AMAR Radhia, “Étude D'un Système D'énergie Renouvelable Avec Système De Stockage”, Diplôme De Master, Université D'el-Oued, 2014.
- [5] ZEGHIB ILHEM « Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire » parabolique par UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE (2005).
- [6] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivé, „Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique“ / Décembre 2007.
- [7] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [8] T. Nacer Eddine, G. Slimane, “Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque”, Mémoire Master, Université Echahid Hama Lakhder D'el-Oued, 2015.
- [9] B. Wafa, “ Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque Adapté Par Une Commande MPPT ”, Diplôme De Master, Université KasdiMerbah–Ouargla, 2012
- [10] B. Boubaker, K. Fathi, G. Kheireddine, “Optimisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT floue “, Mémoire Master , Université Eshahid Hama Lakhder D'el-Oued ,2019.
- [11] N. Abdellatif ,B. Abdel Djabar , “ Conception et Réalisation d'un Suiveur du Soleil Commandé par une Carte Arduino “, Mémoire Master , Université Eshahid Hama Lakhder D'el-Oued ,2019.
- [12] B. Flèche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [13] Y. Pankow, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de recherche technologique de lille, 2004.
- [14] A. Guen, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992.
- [15] 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
- [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 DirectCoupled Photovoltaic Systems. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. Of WisconsinMadison.
- [19]Salamafateh , 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 Phot
- [20]AMRANIAbderrahim et BEN GLIARamdane, « Modélisation et Optimisation d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau électrique»,MASTER ACADEMIQUE En Réseaux électriques ,Université El Oued , 28/05/2017
- [21]DEBILINarimene" Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque", DIPLOME DE Magister en Electronique , UNIVERSITE CONSTANTINE I,2015
- [22]M .Bentoumi. « Poursuite du Point Maximale d'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Intelligentes ». MEMOIRE DE MASTER Systèmes Electro Energétiques de Sources d'Energies Renouvelables. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA. JUIN 2016
- [23]YahiaouiYasmina.«Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques» Mémoire de Master. Université A.MIRA-BEJAIA.2013
- [24]Cheikh AbdErazek « *Modélisation d'une station de pompage Photovoltaïque* ». MÉMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master. UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2019
- [25]DJERIOU SALIM « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 03/07/ 2011
- [26]N. Abouchabana, « *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [27]BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des application photovoltaïque : étude comparative.," Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électroniqueTS4/6338, 2007.
- [28]Cédric CABAL „Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque Thèse de doctorat université de Toulouse III ,15/12/2008
- [29]DJELLAL LEILA IMEMNE & DIB YASMINA"Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque",MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER, Université Abou-BekrBelkaid de Tlemcen, 22 Juin 2017
- [30]Hanen Abbes, Hafedh Abid, KaisLoukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid« Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque »,National School of Engineering of Sfax, University of Sfax, PO Box: 1173,3038 Sfax Tunisia. Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) .Sousse, Tunisie - 2013

- [31] AMAMRA MOHAMMED SALAH DJEDIDI YAHIA « Optimisation de la production d'un générateur photovoltaïque », MémoireMASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE KASDIMERBAH OUARGLA, 09/06/2015
- [32]HADJI Slimane « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque »Doctorat en Sciences Université Ferhat Abbas Sétif 1.10 octobre 2018
- [33]Dr. BELAID LALOUNI Sofia , Maître de Conférences Classe B« Cours Energie Solaire Photovoltaïque »Université A.MIRA de BEJAIA,2015
- [34]TERKI AMEL, « Contrôle Flou -Génétique Hybride d'un Moteur BLDC dans un Système de Pompage photovoltaïque »,Thèse de Doctorat ,Université Mohamed Khider –Biskra 2012
- [35]LITIMAhlam et ABID Zouleykha,
« Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque ». Mémoire de Fin d'Etudes. Université Dr. Tahar Moulay de Saïda. 20/06/2017
- [36]Mr. Yassine LASMI « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes ».MEMOIRE de Magister en Electrotechnique ,Université Sétif -1 (ALGERIE).09 / 12 /2013
- [37]ZaiemKamar « *Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit* »,MÉMOIRE de Master, BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITYUNIVERSITÉBADJI MOKHTAR- ANNABA,2019
- [38] DRIR Nadia. « modélisation et optimisation de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par de technique intelligent » thèse doctorat . . Université des science et de la technologie houari boumediene.17/12/2014
- [39]Hanen Abbes, HafedhAbid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid.« Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) .Sousse, Tunisie - 2013
- [40] M.BEDRANE Farid. 'Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques''.Mémoire de fin d'études. UniversitéAbderrahmane MIRA de Bejaia. 2013
- [41]Kangrong Tan, ShozoTokinaga, OPTIMIZATION OF FUZZY INFERENCE RULES BY USING THE GENETIC ALGORITHM AND ITS APPLICATION TO THE BOND RATING, Journal of the Operations Research Society of Japan Vol. 42, No. 3, September 1999
- [42]AMAOUI Abdenour, Optimisation d'une commande MPPT floue par essaims Particulaire, PROJET DE FIN D'ETUDES Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, 2014-2015
- [43]C. Larbes, S.M. AitCheikh, T. Obeidi, A. Zerguerras, Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system, Renewable Energy 34 (2009) 2093–2100