



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master
Filière: Electrotechnique
Spécialité: Commandes Electriques
Présenté par

BENBERRAH Safsafa Souhaifa
&
AZIZI Assma

Thème

**Contrôleur Solaire Flou avec commande
MPPT dans un système photovoltaïque**

Soutenu le :

devant la commission d'examen composée de :

Dr. BEDDIAF Yassine

Grade à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela

Encadrant

Pr. CHAIBA Azzedine

Grade à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela

Examineur

Dr. SAIDI Abdelkader

Grade à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela

Examineur

Promotion : 2021/2022

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

En cette fin de l'année qui s'est déroulé dans des très bonnes conditions tant au point de vue organisationnel que méthodique.

Aussi les acteurs de cette réussite sont divers, à savoir :

Tous les enseignants pour chaque matière enseignée et dont la compétence a amélioré nos connaissances techniques.

Leur mérite est d'être à l'écoute de chaque étudiant.

*L'enseignant chargés de l'encadrement et de l'orientation qui a été à la hauteur de ses taches respectives, Nous tenons à témoigner notre gratitude et reconnaissance à notre encadreur «**Dr.BEDDIAF Yassine**» pour nous avoir accompagné tout le long de ce mémoire, pour la confiance qu'il nous a transmis et d'avoir mis à notre disposition tout son savoir faire et ses qualités intellectuelles, professionnelles et humaines.*

*Et aussi pour les examinateurs de notre travail Mr. **CHAIBA Azzedine**, et
Mr. SAIDI Abdelkader*

Pour conclure je remercie mes parents pour leur soutien moral et leur disponibilité a mon égard.

Dédicace

Mon très cher ami, confident et mon bien aimé qui est mon père, qui ma encouragé tout au long de ma préparation de mon mémoire et de mes étude, que dieu le bénisse.

Ma très chère mère, pour ses sacrifices tout au long de sa vie pour que j'atteins les sommets.

Mes frères Samir et Aïssa qui mon soutenu moralement.

Mes très chères sœurs Narimène et Nouzha, pour leurs soutiens moral.

Ma nièce, Rym que je l'aime beaucoup.

A toutes les personnes qui m'ont aidé à préparer mon mémoire de près où de loin

A mes camarades de la faculté des sciences et technologie de l'Université de Khenchela.

KARIMA

Je dédie ce travail.

Résumé

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension.

La puissance de sortie d'un GPV dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT.

Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et les méthodes dites avancées, telle que la MPPT floue qu'on a proposée. Ce mémoire présente une étude comparative entre l'MPPT classique (P&O) et l'MPPT-Floue afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC "Boost") ont été étudiés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT-Flou sont bien meilleures que ceux du contrôleur MPPT conventionnel.

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

Abstract

A photovoltaic generator can operate in a wide range of voltage and output current, but it can only deliver maximum power for specific values of current and voltage.

The output power of a GPV depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Due to the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT techniques. There are conventional MPPT methods that are often used, namely the Perturbation and Observation (P&O) method and the so-called advanced methods, such as the fuzzy MPPT that has been proposed. This thesis presents a comparative study between classical MPPT (P&O) and Fuzzy-MPPT in order to analyze, simulate, and evaluate the global PV power system under variable operating conditions. To do this, the mathematical models of the components of the PV system (GPV, DC/DC "Boost" converter) were studied. The simulation results, obtained using the Matlab Simulink tool, proved in general that the performance of the MPPT-Flou controller is much better than that of the conventional MPPT controller.

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

المخلص

يستطيع مولد الطاقة الشمسية العمل في مجال واسع من التوتر التيار لكن لا يستطيع توزيع الطاقة القصوى إلا في توتر وتيار مميزتين.

إن الاستطاعة الناتجة عن المولد الكهروضوئي تتعلق ببعض المتغيرات، من بينها شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، نظرا للخصائص الكهربائية للاختية لهذه الخلايا فإن مردود النظام الكهروضوئي يمكن تحسينه باستعمال تقنيات "MPPT" أي إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية التي ينتجها المولد الكهروضوئي من بين هذه التقنيات توجد منها التقليدية ومن أكثرها استعمالا طريقة الاضطراب والمراقبة ومنها التقنيات الحديثة التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي منها تقنية المنطق الغامض.

هذه المذكرة تقدم مقارنة بين مختلف هذه التقنيات لغرض تحليل وتمثيل وتقديم النظام الكهروضوئي الإجمالي، وذلك تحت ظروف العمل المتغيرة. ولذلك فقد قمنا بتقديم نماذج رياضية لمكونات النظام (المولد الكهروضوئي، محول تيار مستمر/تيار مستمر، حمولة...). النتائج المتحصل عليها باستعمال لغة البرمجة Matlab/Simulink أثبتت على العموم أن الفعالية السكونية والديناميكية للمنطق الغامض في إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية للمولد الكهروضوئي أحسن من الطريقة التقليدية (طريقة الاضطراب والمراقبة).

كلمات مفتاحية: مولد كهروضوئي، محول تيار مستمر/تيار مستمر، إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية، تقنية الاضطراب والمراقبة، المنطق الغامض.

SOMMAIRE

Table des Matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
INTRODUCTION GENERALE.....	02
Chapitre I: GENERALITE SUR LE SYSTEME	
PHOTOVOLTAÏQUE	
Introduction	07
I.1. Energie solaire.....	07
I.1.1.Tendance d'énergie dans le monde.....	07
I.1.2.Le soleil.....	08
I.1.3.Spectre du rayonnement solaire.....	09
I.1.4.Mouvement apparent du soleil et énergie disponible solaire.....	10
I.1.5.Energie solaire disponible.....	11
I.1.6.Caractéristiques directionnelles du rayonnement global.....	12
I.2.L'énergie solaire photovoltaïque.....	13
I.2.1.Historique du photovoltaïque.....	14
I.2.2. La conversion de la lumière en électricité.....	14
I.2.2.1. Cellules, panneaux et champs photovoltaïques.....	15
I.2.2.2. Puissance lumineuse et éclairage.....	16
I.3.Technologies des cellules photovoltaïques.....	16
I.3.1. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin.....	16
I.3.2. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince.....	16
I.3.3. Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques».....	17
I.3.4. Les modules photovoltaïques au silicium.....	17
I.3.5. Comparatif des différentes technologies.....	18
I.4.Conversion photovoltaïque.....	19
I.4.1. Semi-conducteur.....	19
I.4.2. Le dopage de semi-conducteur.....	19
I.4.2.1. Dopage de type N.....	19
I.4.2.2. Dopage de type P.....	20
I.4.3. La Jonction PN.....	20
I.4.3.a. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	21

I.5. Avantages de l'énergie photovoltaïque.....	22
I.6. Inconvénients.....	22
I.7. Différents types de systèmes photovoltaïques.....	23
I.7.1. Les systèmes autonomes.....	23
I.7.2. Les systèmes hybrides.....	24
I.7.3. Les systèmes connectés au réseau.....	25
I.8. Module PV (panneau solaire).....	25
I.8.1. Association des modules photovoltaïques.....	26
I.8.1.1. Association en série.....	26
I.8.1.2. Association en parallèle.....	27
I.8.1.3. Association série-parallèle (mixte).....	27
Conclusion.....	27

**Chapitre II : MODELISATION MATHÉMATIQUE DU PANNEAU SOLAIRE ET
TECHNIQUE DE MPPT**

Introduction	29
II.1. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV).....	29
II.1.1. Spécification du générateur photovoltaïque.....	29
II.1.2. Caractéristique et modélisation de la cellule solaire.....	30
II.1.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	31
II.2. Modèle mathématique d'une cellule solaire.....	32
II.2.1. Modèle parfait.....	32
II.2.2. Modèle réel.....	33
II.2.2.1. La résistance série.....	33
II.2.2.2. La résistance parallèle.....	33
II.2.2.3. Recombinaison.....	33
II.2.3. Modèle d'une cellule photovoltaïque.....	34
II.2.3.1. Détermination du courant I	34
II.2.3.2. Détermination du courant I_{ph}	34
II.2.3.3. Détermination du courant I_p	35
II.2.3.4. Détermination du courant I_d	35
II.2.3.4. a. Détermination du courant I_s	35
II.2.3.4. b. Détermination de la tension V_t	35
II.2.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	36

II.2.5.Modélisation D'un GPV.....	37
II.2.6.Protections D'un Générateur.....	37
II.3.Modèle d'un module photovoltaïque sur MATLAB.....	38
II.3.1.Caractéristique D'un Générateur PV.....	40
II.3.2.Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV.....	42
II.3.2.1.Influence de la température.....	42
II.3.2.2.Influence De L'ensoleillement.....	43
II.4.Puissance maximale d'un PV.....	44
II.4.1. Principe.....	44
II.4.2. Point de puissance maximale avec Connexion directe source-charge.....	45
II.5.Adaptation entre un générateur PV et la charge.....	46
II.5.1.Convertisseur DC/DC.....	46
II.5.2. Adaptateur de Type BOOST.....	48
II.5.2.1. Définition du rapport cyclique.....	48
II.5.2.2. Principe de fonctionnement.....	48
II.5.3. Modèle mathématique équivalent.....	49
II.5.4. Modèle approximé du convertisseur Boost.....	49
II.6.Principe De La Commande MPPT.....	50
II.6.1.Classification Des Commandes MPPT.....	51
II.6.1.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.....	51
II.6.1.1.a. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS.....	51
II.6.1.1.b. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du Convertisseur	52
II.6.1.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	52
II.6.1.2.a. MPPT Indirect.....	52
II.6.1.2.b. MPPT Direct.....	52
II.6.2.Différentes techniques d'MPPT.....	53
II.6.2.1.Commande MPPT basée sur l'algorithme perturbation et observation (P&O).....	54
II.6.2.2.Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)	54
II.6.2.3.Avantages et inconvénients de (P&O).....	57
II.7.Résultats de simulation de la Technique (P&O).....	57
III.7.1.Fonctionnement avec conditions environnementales stables.....	58
III.7.2.Conditions climatiques variables.....	60

III.7.2.1.Eclairage variable.....	60
III.7.2.2.Température variable et éclairage constant.....	63
Conclusion.....	63
Chapitre III : CONTROLE FLOU DE L'MPPT	
Introduction.....	65
III.1.Généralité sur la logique floue.....	65
III.1.1.Historique.....	65
III.1.2. Domaine d'application.....	65
III.1.3. Base de la logique floue.....	66
III.1.3.1. Principe de base de la logique floue.....	66
III.1.3.2. Règles floues.....	66
III.1.3.2.1. La logique floue et l'intelligence artificielle.....	66
III.1.3.2.2. Contrôleur de logique floue.....	67
III.1.3.2.2.a.Fuzzification.....	68
III.1.3.2.2.b. Inférence.....	68
III.1.3.2.2.c. Défuzzification.....	68
III.2.MPPT du générateur photovoltaïque utilisant la logique floue.....	68
III.2.1.MPPT à base de la logique floue.....	69
III.2.1.1.Fuzzification.....	70
III.2.1.2.Les variables linguistiques.....	71
III.2.1.3.Système d'inférence.....	72
III.2.1.3.1.Base de règles.....	73
III.2.1.3.2.Base de données.....	73
III.2.1.3.3.Mécanisme de raisonnement.....	73
III.2.1.3.4.Méthodes d'inférence (les règles floues).....	73
III.2.1.3.5.Défuzzification.....	75
III.3. Avantages et inconvénients du réglage par logique floue.....	75
III.3.1.Avantages.....	75
III.3.2.Inconvénients.....	75
III.4.Analyse et simulation de méthode d'extraction de puissance maximale par le contrôleur basé sur la logique floue.....	76
III.4.1.Résultats de simulation de la commande MPPT floue.....	77
III.4.1.1.Fonctionnement avec conditions environnementales stables.....	77
III.4.1.2. Fonctionnement avec conditions environnementales changeantes.....	79

III.4.1.2.1. Fonctionnement sous ensoleillement variable.....	79
III.4.1.2.2. Fonctionnement sous une variation de température.....	80
III.5.Etude comparative entre MPPT Floue et MPPT classique (P&O).....	82
III.5.1.Fonctionnement avec conditions environnementales stables.....	82
III.5.2.Fonctionnement avec conditions environnementales changeantes.....	84
III.5.2.1. Fonctionnement sous ensoleillement variable.....	84
III.5.2.2. Fonctionnement sous température variable.....	86
Conclusion	88

Chapitre I

Figure I.1. Comparaison des besoins énergétiques mondiaux et de l'offre pour différentes Sources d'énergie.....	07
Figure I.2. Prévisions des besoins en énergies renouvelables jusqu'au 2150 (Source Aspo).....	08
Figure I.3. Photo représentant la surface du soleil réalisée à l'aide d'un filtre spectral.....	08
Figure I.4. Intensité du rayonnement spectral spécifique sous l'influence de l'atmosphère terrestre.....	10
Figure I.5. Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil.....	11
Figure I.6. Totaux mensuels moyens du rayonnement global mesurés à Potsdam pour la période 1937 - 1997 (http : //www.volker quaschnig.de/klima2000/).....	11
Figure I.7. Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45).....	12
Figure I.8. Formation des différentes composantes du rayonnement.....	12
Figure I.9. Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.....	13
Figure I.10. Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.....	13
Figure I.11. Conversion de l'énergie solaire en électricité.....	15
Figure I.12. Le semi-conducteur (silicium).....	19
Figure I.13. Dopage de semi-conducteur de type n.....	19
Figure I.14. Dopage de semi-conducteur de type p.....	20
Figure I.15. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.....	23
Figure I.16. Configuration du système hybride à bus continu.....	24
Figure I.17. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	25
Figure I.18. Association de N modules solaires en série.....	26
Figure I.19. Association des modules solaires en parallèle.....	27
Figure I.20 : Association mixte des modules solaires.....	27

Chapitre II

Figure II.1. Schéma bloc du générateur photovoltaïque.....	29
Figure II.2. Les différentes zones de la caractéristique I(V).....	30
Figure II.3. Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	32
Figure II.4. Présentation générale d'une cellule PV.....	34
Figure II.5. Schéma équivalent de la cellule PV.....	34
Figure II.6. (a) Caractéristiques I(V) et (b) la représentation classique de courbe I-V d'une cellule PV	35
Figure II.7. Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.....	36
Figure II.8. Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle.....	36
Figure II.9. Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule.....	38
Figure II.10. Schéma Bloc de simulation d'un panneau photovoltaïque.....	39
Figure II.11. Sous-système du panneau photovoltaïque.....	39
Figure II.12. Caractéristique P/V d'un panneau PV.....	41

Figure II.13. Caractéristique I/V d'un panneau PV.....	41
Figure II.14. Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.....	42
Figure II.15. Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.....	42
Figure II.16 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.....	43
Figure II.17 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.....	43
Figure II.18. Connexion directe source-charge.....	45
Figure II.19. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système dans les trois cas : $R_s < R_{opt}$, $R_s = R_{opt}$ et $R_s > R_{opt}$	46
Figure II.20. Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	46
Figure II.21. Convertisseurs DC-DC.....	47
Figure II.22. Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur.....	48
Figure II.23 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	50
Figure II.24. Principe de la commande MPPT.....	51
Figure II.25. Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	54
Figure II.26. Organigramme de l'algorithme de P&O	55
Figure II.27. Modèle de simulation pour l'algorithme (P&O).....	57
Figure II.28 Schéma de block de la commande MPPT: P&O.....	58
Figure II.29. Rapport cyclique D.....	58
Figure II.30. Puissance de sortie et d'entrée P(t).....	59
Figure II.31. Tension V_{pv} de sortie et d'entrée.....	59
Figure II.32. Courant I_{pv} de sortie et d'entrée.....	59
Figure II.33. Changement d'éclairement.....	60
Figure II.34. Courbe de puissance P(t) du GPV (P&O).....	60
Figure II.35. Courbe de tension V(t) du GPV (P&O).....	61
Figure II.36. Courbe de Courant I(t) du GPV (P&O).....	61
Figure II.37. Changement de la température.....	62
Figure II.38. Courbe de puissance P(t) du GPV (P&O).....	62
Figure II.39. Courbe de tension V(t) du GPV (P&O).....	62
Figure II.40. Courbe de courant I(t)du GPV (P&O).....	63

Chapitre III

Figure III.1. Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.....	66
Figure III.2. Traitement flou.....	67

Figure III.3. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.....	67
Figure III.4. Système MPPT flou.....	69
Figure III.5. Direction de la poursuite du point de puissance maximale.....	70
Figure III.6. Configuration globale du contrôleur à logique floue sous Matlab/Simulink.....	71
Figure III.7.a. Tracés de la fonction d'appartenance de l'erreur E.....	72
Figure III.7.b. Tracés de la fonction d'appartenance du changement de l'erreur dE.....	72
Figure III.7.c Tracés de la fonction d'appartenance du rapport cyclique D.....	72
Figure III.8. La variation du point de puissance maximal.....	73
Figure III.9. Schéma block SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT Logique flou.....	76
Figure III.10. Schéma de simulation de l'algorithme de contrôleur floue.....	77
Figure III.11. Puissance de sortie et d'entrée P(t).....	77
Figure III.12. Tension V _{pv} de sortie et d'entrée.....	78
Figure III.13. Courant I _{pv} de sortie et d'entrée.....	78
Figure III.14. Changement d'ensoleillement E.....	79
Figure III.15. Variation de la puissance dans le cas de changement d'irradiation.....	79
Figure III.16. Courbe de Courant I(t) du GPV (flou).....	80
Figure III.17. Courbe de tension V(t) du GPV (flou).....	80
Figure III.18. Changement de la température.....	81
Figure III.19. Courbe de puissance P(t) du GPV (flou).....	81
Figure III.20. Courbe de tension V(t) du GPV (flou).....	81
Figure III.21. Courbe de courant I(t)du GPV (flou).....	82
Figure III.22. Modèle « SIMULINK » du commande flou et P&O.....	82
Figure III.23. Caractéristique P(t).....	83
Figure.III.24. Caractéristique V(t).....	83
Figure.III.25. Caractéristique I(t).....	83
Figure III.26. Modèle « SIMULINK » la commande floue et P&O sous ensoleillement variable.....	84
Figure III.27. Comparaison des divers signaux MPPT pour la variation P(t) sou une Ensoleillement variable.....	85
Figure III.28. Comparaison des divers signaux MPPT pour la variation V(t) sous une Ensoleillement variable.....	85
Figure III.29. Comparaison des divers signaux MPPT pour la variation I(t) sous une Ensoleillement variable.....	85
Figure III.30. Modèle « SIMULINK » la commande floue et P&O sous température variable.....	86
Figure III.31. Puissance P(t) pour les divers algorithmes MPPT sous la température variable.....	86
Figure III.32. Tension V(t) pour les divers algorithmes MPPT sous la température variable.....	87
Figure III.33. Courant I(t) pour les divers algorithmes MPPT sous la température variable.....	87

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.....18

Chapitre II

Tableau II.1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.....40

Tableau II.2. Montre ses caractéristiques électriques fournies par la fiche technique du fabricant....40

Tableau II.3.différents types de convertisseurs DC-DC.....47

Tableau II.4.Table de vérité de l’algorithme ‘perturbation et observation’56

Tableau II.5. Paramètres de simulation.....57

Chapitre III

Tableau III.1. Règles de direction de la poursuite du PPM d'un panneau photovoltaïque.....70

Tableau III.2 Les règles du contrôleur flou.....73

Tableau III .3 règles implémentées dans le contrôleur de logique floue.....74

Notations et Symboles

Symbole	Signification
GPV	générateur photovoltaïque
PV	photovoltaïque
AM	Air Mass
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
DC	Direct current
AC	Alternating current
P&O	Perturb and Observe
V _{oc}	Tension de circuit ouvert [V]
I _{cc}	Courant de court-circuit [A]
E	Niveau d'éclairement (ou d'irradiation) [W/m ²]
I ₀	Courant de saturation de la diode [A]
K	La constante de Boltzmann $K=1.38e-23$ [J/K].
T	La température effective de la cellule [°K]
q	La charge de l'électron [C] $1.6 e-19$ [eV].
FF	Facteur de forme
η	Rendement
G	Irradiation
I _L	Courant d'obscurité
R _S	Résistance interne de la cellule
R _p	Résistance shunt
I _{cell}	Courant de sortie de la cellule PV
V _{cell}	Tension de sortie de la cellule PV
N _s	Nombre de cellules en série
N _p	Nombre de cellules en parallèle
G	Conductance du GPV
D	Rapport cyclique
ΔD	Variation du rapport cyclique.
I _{opt}	Courant Optimal
V _{opt}	Tension Optimale
V _{in}	Tension à l'entrée du convertisseur statique

V_o	Tension à la sortie du convertisseur statique
FLC	Fuzzy Logic Control
E	L'erreur
ΔE	changement d'erreur
V_{pv}	Tension de sortie du GPV
P_{pv}	Puissance de sortie du GPV
I_{ph}	Courant photo-généré ou photo-courant (A).
IGBT	Insulated Gate Bipolar.
MOSFETS	Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.
STC	Conditions de tests standards.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est l'invention la plus innovante de tous les temps. Il est devenu l'un des produits les plus essentiels de la vie humaine. L'énergie électrique peut être générée à partir de ressources énergétiques renouvelables et non renouvelables.

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique.

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours du brut, la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des **énergies renouvelables**.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable. Elles sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le soleil.

L'exploitation directe du rayonnement solaire absorbé prend actuellement de plus en plus d'importance. En plus de la production de chaleur pour le chauffage et la production d'eau industrielle, la production solaire d'électricité devient également rentable. Le photovoltaïque ainsi que la production d'électricité thermosolaire a grande échelle prennent donc de l'ampleur.

En tant que processus le plus ancien de transformation de l'énergie solaire, la production de biomasse peut également être considérée. D'autres sources primaires d'énergies renouvelables, telles que les forces de marée exercées par la Lune ainsi que les processus géothermiques, peuvent également être exploitées.

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est **l'énergie solaire photovoltaïque**.

Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme : Villages, maisons isolées (un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'énergie électrique), relais de communication, Pompage de l'eau, Refuges,...

L'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre, constitue celle qui possède le plus large potentiel de développement.

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

Bien qu'il soit connu depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages.

Durant ces dernières années le marché des systèmes photovoltaïques connectés au réseau ou autonomes ne cesse de prendre une croissance vertigineuse. Malgré à son faible coût et sa simplicité dans l'installation, l'énergie photovoltaïque reste moins rentable, à cause de la fluctuation de sa production, qui est le résultat de la non-linéarité de l'intensité lumineuse et la température.

Les systèmes PV générateurs d'électricité peuvent être exploités dans différents lieux. L'exposition extérieure des panneaux PV regroupe une combinaison complexe de facteurs (le vent, la pluie, la neige, la chaleur, la foudre, ombrage. . .) qui provoque leurs dégradations au cours du temps. Par conséquent, cette combinaison de facteurs a un impact négatif sur le rendement et donc réduit le profit de l'installation, sans compter le coût de maintenance pour remettre en marche le système en performance.

Sur le plan de la recherche, il reste encore des efforts à faire pour résoudre quelques problèmes d'ordre techniques qui sont souvent avancée comme un frein important au développement de cette ressource énergétique, il s'agit surtout de faible rendement de la cellule photovoltaïque.

Les chercheurs essayent généralement de suivre les deux pistes [1] :

- Soit augmenter le rendement énergétique des panneaux solaires et ce en adoptant des technologies récentes de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques,
- Ou maximiser la puissance instantanée délivrée par le panneau solaire.

Une considération importante dans l'utilisation du système PV est de faire fonctionner le système à proximité du point de puissance maximum afin d'augmenter l'efficacité de sortie du panneau PV.

Différentes techniques d'optimisation sont disponibles et appliquées lors des étapes de conception des systèmes de conversion d'énergies renouvelables, une de ces techniques est le suivi du point de performance maximal (MPPM) ou en anglais MPPT (Maximum Power Point Tracker) sont utilisées dans les applications photovoltaïques pour extraire la puissance maximale que le panneau photovoltaïque peut produire, qui dépend des différentes conditions atmosphériques, à savoir l'insolation solaire et la température. Un convertisseur DC-DC est inséré entre le générateur photovoltaïque et la charge pour obtenir le niveau de tension souhaité côté charge.

Les algorithmes d'intelligence artificielle sont très populaires pour le contrôle des paramètres permettant le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Parmi ces algorithmes d'intelligence artificielle, la logique floue a démontré des résultats très intéressants pour les applications dans le domaine des énergies renouvelables [2].

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres.

Après une introduction générale

Dans le premier chapitre, nous commençons tout d'abord par présenter un état d'art sur les problématiques de la production de l'énergie électrique dans le monde. Pour cela, nous donnerons la structure de la production d'électricité dans le monde et celle de l'électricité renouvelable suivie par les types d'installations des systèmes photovoltaïques. Nous présentons des notions générales sur le soleil, et des notions de base sur l'énergie solaire, l'énergie photovoltaïque ensuite nous rappellerons le principe de la conversion photovoltaïque, et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque puis le module et leur dérivé, caractéristiques, et des différents groupements possibles des cellules. Différentes technologies de construction et les avantages et la constitution d'un GPV.

Ensuite, nous passerons au deuxième chapitre consacré à la modélisation mathématique du GPV qui est essentielle à l'analyse du système photovoltaïque, en se basant sur le modèle de la cellule. Et nous allons simuler l'influence des paramètres externes comme l'éclairement, la température sur les caractéristiques tension-courant et puissance tension. Et le convertisseur statistique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT, et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode "Perturbation – Observation" (P&O).

Dans le troisième chapitre, on fait un survol général des éléments de base de la logique floue. Ensuite, nous détaillerons les principales étapes, généralement suivies, dans la conception d'un contrôleur flou dédié à une application donnée.

Et nous présenterons la commande floue d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT), et il contient principalement les résultats obtenus en simulant un contrôleur MPPT flou sous des conditions atmosphériques standards et variables, ces résultats vont être comparés à celles du contrôleur (P&O), afin de démontrer les performances de la théorie flou synthétisée.

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

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralité sur le système photovoltaïque

Introduction:

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

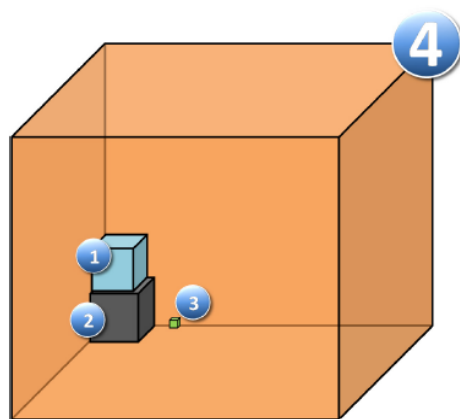
Les énergies renouvelables proviennent de 2 grandes sources naturelles : le Soleil (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et la Terre (qui dégage de la chaleur).

Surnommées "énergies propres" ou "énergies vertes", leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.

I.1. Energie solaire

Afin de se rendre compte de l'importance croissante de l'énergie solaire dans la résolution des problèmes énergétiques de demain, quelques quantités d'énergie sont indiquées sur la figure (I.1) à des fins de comparaison.

L'énergie solaire irradiant chaque année la Terre est de $1,08 \times 10^{18}$ kWh par an. Cela correspond à environ 10.000 fois les besoins mondiaux en énergie primaire. L'exploitation technique de cette énergie solaire est à portée de main.



1	Gisements d'uranium	3	Besoin énergétique annuel primaire au niveau mondial
2	Gisements de charbon	4	Quantité annuelle d'énergie issue du rayonnement solaire

Fig. I.1. Comparaison des besoins énergétiques mondiaux et de l'offre pour différentes sources d'énergie

I.1.1. Tendance d'énergie dans le monde

Les énergies d'origine fossile sont menacées d'épuisement à court ou moyen terme. Il est donc indispensable de mettre en place des mesures d'économie, de récupération, et de recyclage pour remédier à ce problème.

Plusieurs estimations des stocks et d'épuisement d'énergie existent. Les scénarios de production d'énergie de l'Association for Study of Peak Oil, (Aspo) est illustré par la figure I.2. [3]

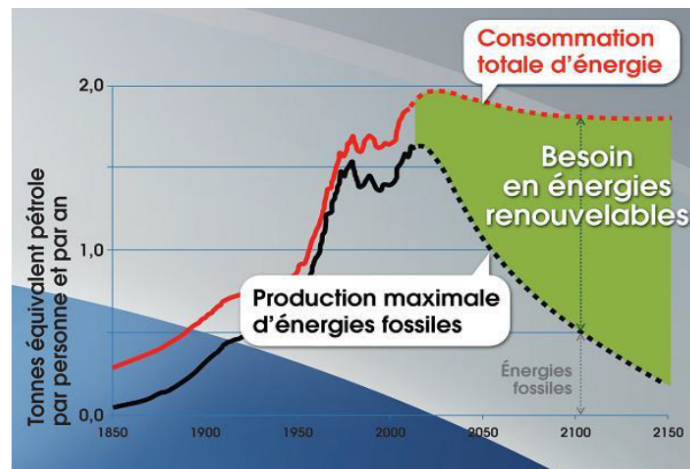


Figure I.2. Prévisions des besoins en énergies renouvelables jusqu'au 2150 (Source Aspo)

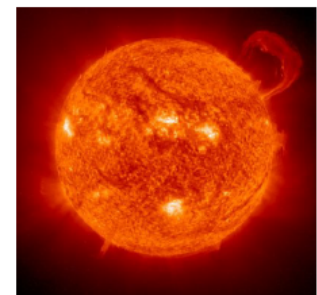
Cette figure montre la production d'énergies fossiles par habitant et par an et la consommation d'énergie totale (fossiles + renouvelables). On remarque bien que la courbe qui représente la production rapportée à la population mondiale, présente un maximum vers ou avant l'année 2020, puis décroît : la cause est que la production n'est plus capable de satisfaire la demande. Alors que la zone verte, écart entre la consommation totale d'énergie et la production d'énergies fossiles, indique le besoin en énergies renouvelables.

En conséquence, les besoins en énergie augmentent et les stocks d'énergies fossiles diminuent. Pour cela, et afin de répondre au besoin mondial en énergie, les recherches sur les énergies renouvelables sont accentuées. L'énergie solaire, qui est disponible sur toute la planète avec une quantité énorme, représente l'un des énergies qui répond à cette demande. En effet, pour une journée ensoleillée, les radiations solaires sur la terre peuvent atteindre 3000W/m^2 selon le lieu. C'est pour cela que la plupart des pays du monde ont introduit l'énergie solaire dans leur politique énergétique.

I.1.2. Le soleil

Le soleil est une étoile âgée de 4,5 milliards d'années et elle est distante d'environ 150 millions de 158 kilomètres de la Terre. L'énergie du soleil est issue de réactions thermonucléaires se produisant 159 en permanence dans son noyau [4].

Fig. I.3. Photo représentant la surface du soleil réalisée à l'aide d'un filtre spectral



Le soleil représente le centre du système solaire auquel appartient notre planète la Terre. Cette étoile qui nous procure de la chaleur et de la lumière, est une source d'énergie abondante disponible, renouvelable et propre.

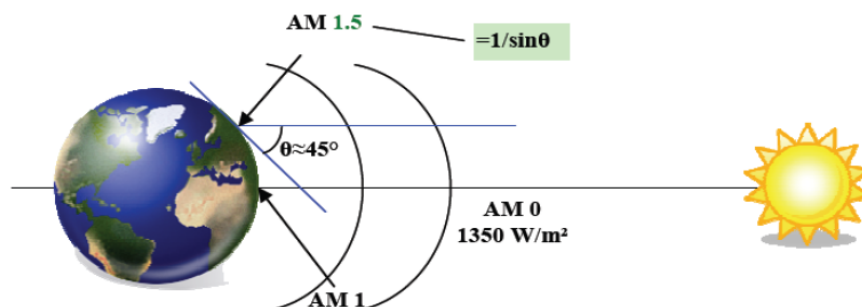
I.1.3.Spectre du rayonnement solaire

A l'intérieur du soleil, des processus de fusion produisent une température centrale pouvant aller jusqu'à 15.000.000K. Le spectre de la lumière émise est cependant du à des réactions qui ont lieu dans les couches externes du soleil. La composition spectrale peut être assimilée, d'un point de vue théorique, à un corps noir rayonnant ayant une température superficielle de 5.777K.

Le rayonnement solaire est atténué dans l'atmosphère au cours du trajet vers la surface de la Terre. L'unité qui permet d'exprimer cette atténuation est la masse d'air efficace exprimée par AM (air mass). Le spectre en dehors de l'atmosphère est défini par AM 0. L'intensité moyenne de rayonnement y est de 1367 W/m^2 . AM 1 désigne l'incidence perpendiculaire à la surface de la Terre.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000 W/m^2 au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM1).

$$\begin{aligned} 1\text{kWh/m}^2 \cdot j &= 1 \text{ heure de soleil maximum } (1000\text{W/m}^2)/\text{jour} \\ &= 3,6 \text{ MJ/m}^2 \cdot j \\ &= 86 \text{ cal/cm}^2 \cdot j \end{aligned}$$



Les lacunes dans le spectre solaire réel sont dues à l'absorption par la vapeur d'eau et à d'autres gaz de l'atmosphère.

Du point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photons de longueur d'onde λ transportant une énergie donnée par la relation : [3]

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

Avec :

E (J) énergie,

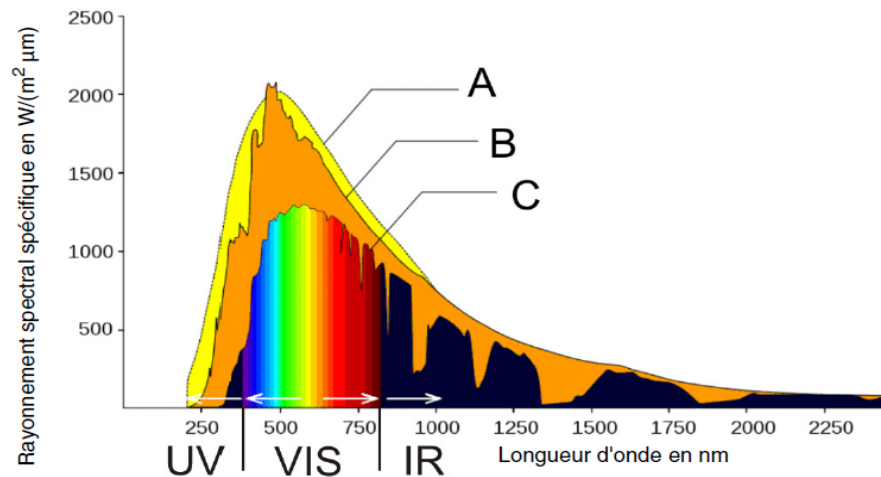
h (J.s) constante de Planck ($= 6,62.10^{-34}$),

c (m.s⁻¹) vitesse de la lumière ($= 3.10^8$),

λ (m) longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre),

ν (Hz) fréquence.

On obtient donc la relation suivante qui lie l'énergie du photon exprimée en électron-volt (eV) et sa longueur d'onde exprimée en μm par : $E_{\text{ev}} = 1,2419 / \lambda_{\mu\text{m}}$



A	Spectre du corps noir rayonnant ($T = 5777\text{K}$)
B	Spectre solaire hors de l'atmosphère terrestre (AM 0)
C	Spectre solaire à la surface de la Terre (AM 1,5)
UV	Rayonnement ultraviolet
VIS	Rayonnement visible
IR	Rayonnement infrarouge

Fig. I.4. Intensité du rayonnement spectral spécifique sous l'influence de l'atmosphère terrestre

La conversion photovoltaïque est donc définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

I.1.4. Mouvement apparent du soleil et énergie disponible solaire

La terre fait un tour sur elle-même en 24h et effectue une révolution complète autour du soleil en 365 jours. Vu de la terre (prise comme référentiel fixe), le mouvement apparent du soleil est un mouvement de rotation.

A ce mouvement, s'ajoute celui de la déclinaison cyclique du soleil. La déclinaison est définie comme l'angle entre l'axe soleil-terre et le plan de l'équateur. Cet angle est noté α sur la figure ci-dessous. Au cours d'une année, la déclinaison du soleil varie entre $+23^\circ$ (21 juin) et -23° (21 décembre). [5]

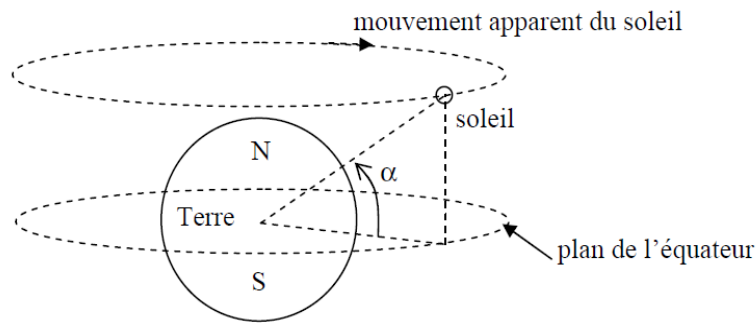
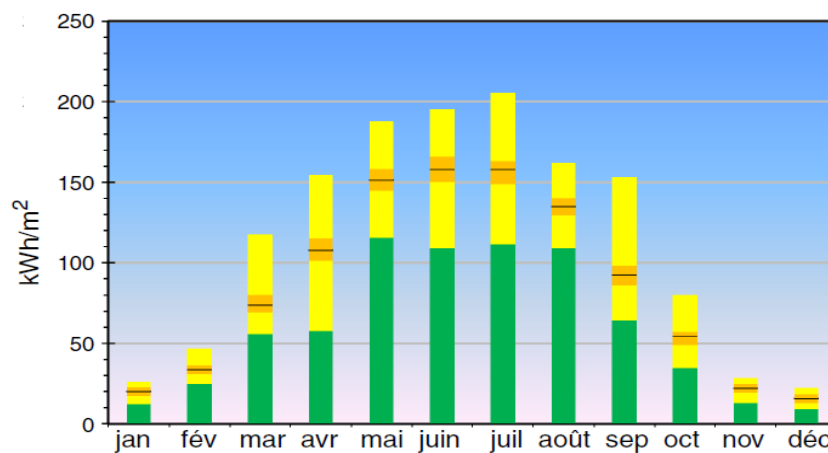


Figure. I.5: Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil

I.1.5. Energie solaire disponible

Du fait de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à son orbite autour du Soleil, l'exploitabilité de la lumière du soleil à la surface de la Terre est déterminée par la situation géographique de l'absorbeur solaire.

En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivant [6]:



Jaune	Plage comprise entre les valeurs maximale et minimale
Orange	Ecart standard
Ligne noire	Valeur moyenne
Vert	Valeur minimale

Fig. I.6 : Totaux mensuels moyens du rayonnement global mesurés à Potsdam pour la période 1937 - 1997 ([http : //www.volker-quaschning.de/klima2000/](http://www.volker-quaschning.de/klima2000/))

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude);
- la saison;
- l'heure;
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...);
- l'altitude du lieu.

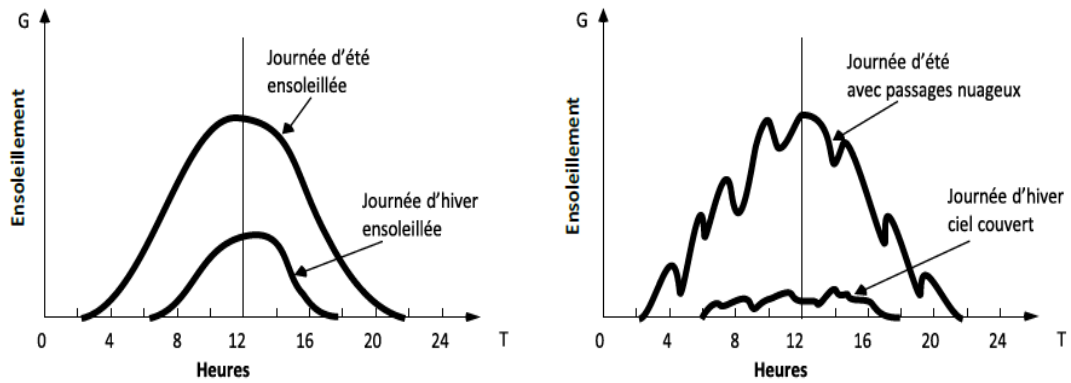


Figure. I.7 Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45) [6].

I.1.6. Caractéristiques directionnelles du rayonnement global

Le terme de rayonnement global désigne la totalité du rayonnement du soleil arrivant sur une surface. Il se compose du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La formation de ces composantes du rayonnement est représentée sur la Fig. I.8. Le rayonnement est partiellement réfléchi et dispersé par les nuages.

A proximité de l'eau, des quantités non négligeables de lumière peuvent provenir de la réflexion à la surface. Au total, la composante diffuse du rayonnement peut, selon la météorologie et les conditions environnementales, représenter 50% et plus. Les totaux annuels souvent indiqués sur les cartes du rayonnement global sont composés de la partie directe et de la partie diffusée.

A	Réflexion, dispersion
B	Rayonnement diffus
C	Rayonnement direct
D	Réflexion

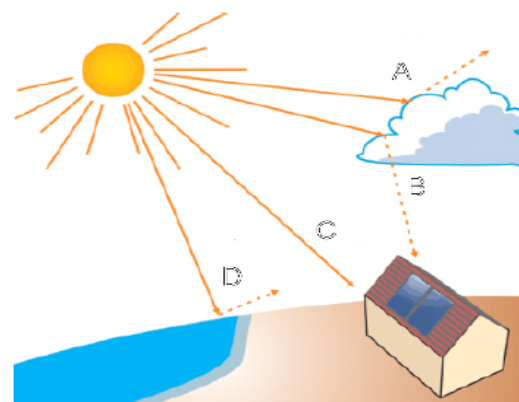


Fig. I.8 : Formation des différentes composantes du rayonnement

Dans la figure (I.9) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

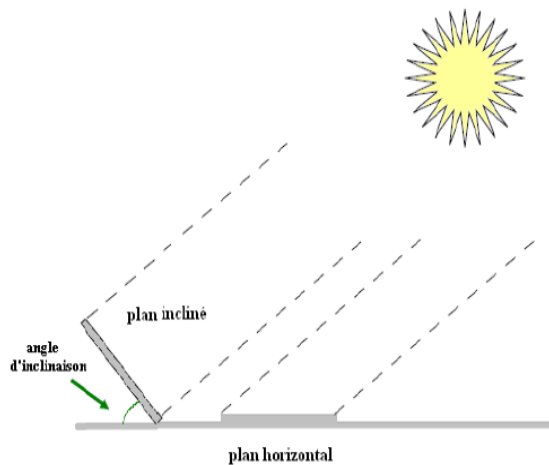


Figure I.9 Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.

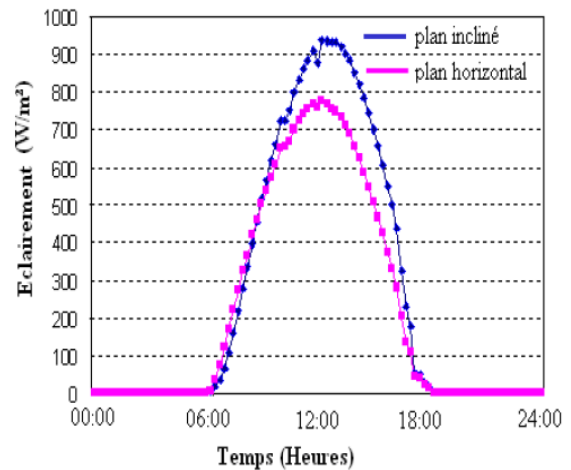
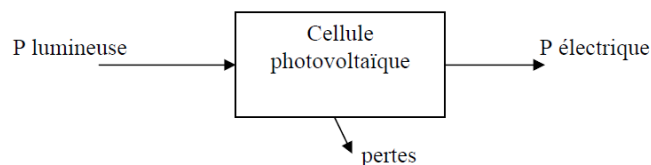


Figure I.10 Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.

I.2.L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. [5]



Les panneaux photovoltaïques présentent plusieurs avantages, production d'énergie à partir d'une source solaire durable, renouvelable et propre, faible coût de fonctionnement en comparaison des sources traditionnelles d'énergie, prix d'achat des panneaux PV peu élevé, modularité des éléments d'un panneau PV facilitant le montage même en zone dégroupée, entretien minimum, travail sécuritaire des techniciens.

Cependant, des points faibles sont également à noter rendement fluctuant à cause des variations de la source solaire, rendement concret et densité d'énergie faible, matériels encombrants ce qui nécessite des endroits d'installations plus grands.

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

I.2.1. Historique du photovoltaïque:

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **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.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **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.
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première *cellule photovoltaïque (ou photopile)* a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.



Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

I.2.2. La conversion de la lumière en électricité:

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « **photo** » un mot grec signifiant lumière et « **Volta** » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

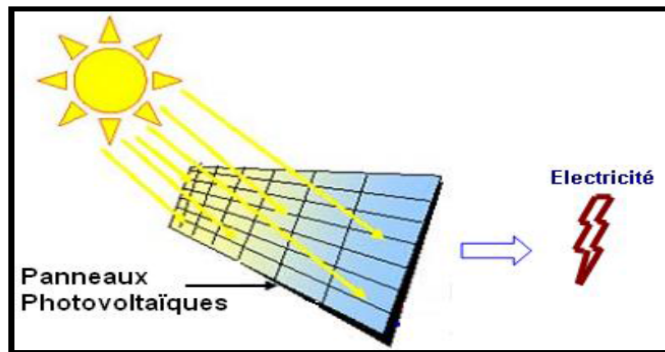


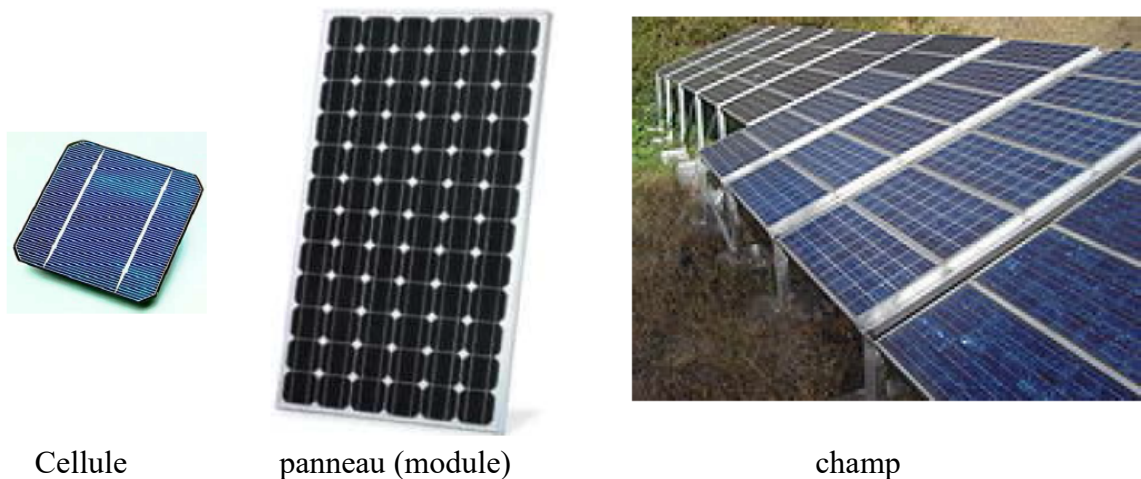
Figure I.11 : conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

1.2.2.1. Cellules, panneaux et champs photovoltaïques

- La **cellule photovoltaïque** est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.
- Un **panneau photovoltaïque** est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques.
- Parfois, les panneaux sont aussi appelés **modules photovoltaïques**.
- Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un **champ photovoltaïque**.



Cellule

panneau (module)

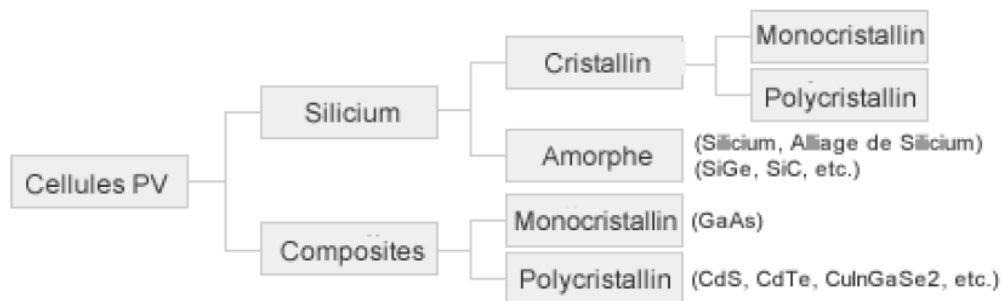
champ

I.2.2.2. Puissance lumineuse et éclairement

L'**éclairage** caractérise la puissance lumineuse reçue par unité de surface. Il s'exprime en W/m^2 . La grandeur associée à l'éclairage est notée **G**. Parfois, cette grandeur est aussi appelée **irradiance**.

I.3. Technologies des cellules photovoltaïques

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques.



I.3.1. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [6].

I.3.2. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide.

Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir [6] :

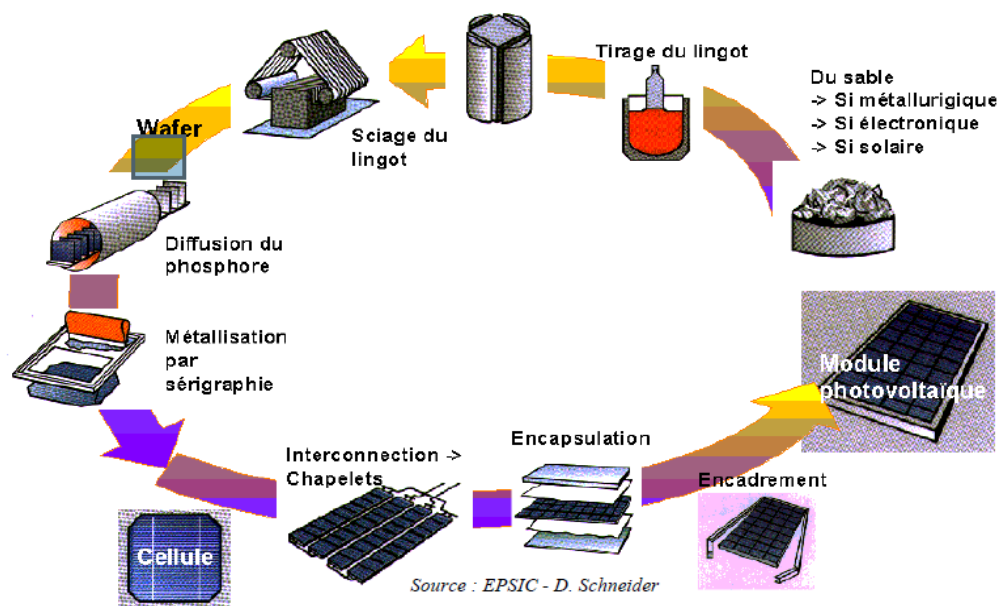
- le silicium amorphe (a-si).
- le tellure de Cadmium (CdTe).
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

I.3.3. Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques»

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement [6].

I.3.4. Les modules photovoltaïques au silicium

- *Processus de fabrication :*



Le **silicium** est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium.

Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (**wafers**). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le

transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (*wafers*), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.



Les cellules monocristallines et polycristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté.

I.3.5. Comparatif des différentes technologies

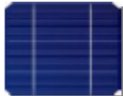




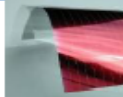
Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium poly-cristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules organiques	≤ 5%	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

Tableau I.1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques

I.4. Conversion photovoltaïque

I.4.1. Semi-conducteur

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique. [7]

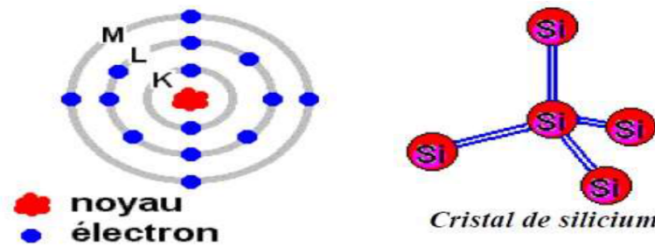


Figure I.12 : Le semi-conducteur (silicium).

I.4.2. Le dopage de semi-conducteur

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

I.4.2.1. Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (phosphore p). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible, il sera excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique.

D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif). [7]

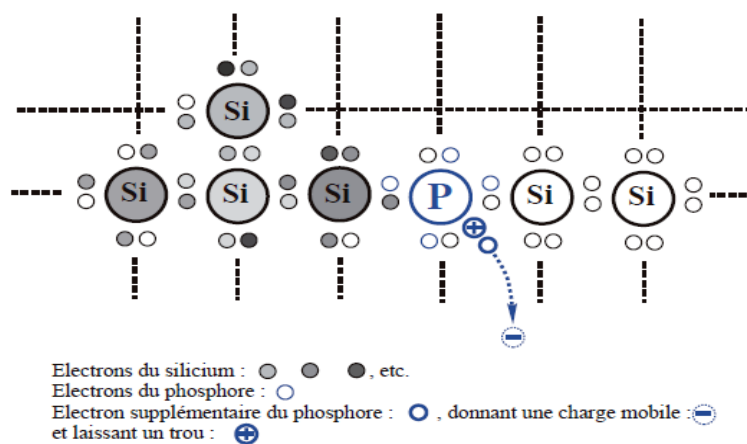


Figure I.13 : dopage de semi-conducteur de type n.

I.4.2.2. Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore B. [7]

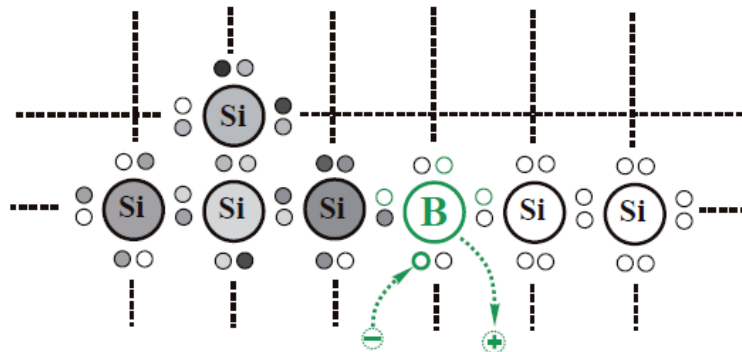
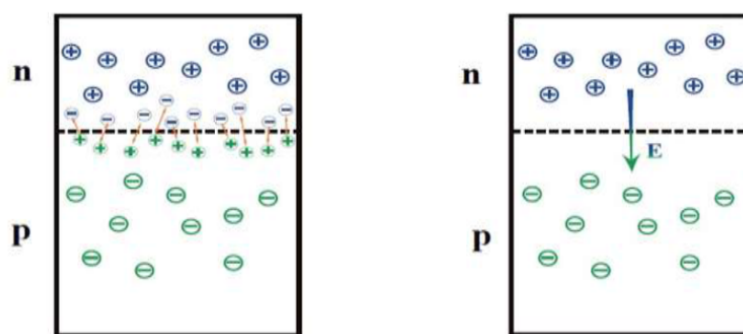


Figure I.14: Dopage de semi-conducteur de type p.

I.4.3. La Jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner. [8]



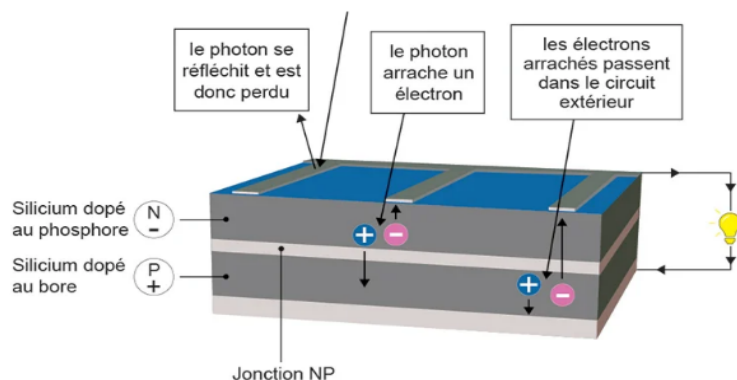
a) - Migration des charges
mobiles vers le plan de jonction.

b) - Champ électrique E
Résultant, dû aux charges fixes.

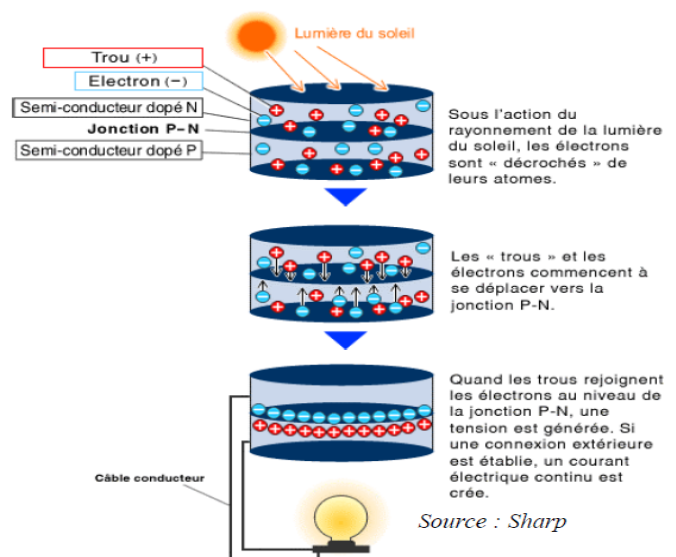
I.4.3.a. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.



Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface.



Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

I.5. Avantages de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

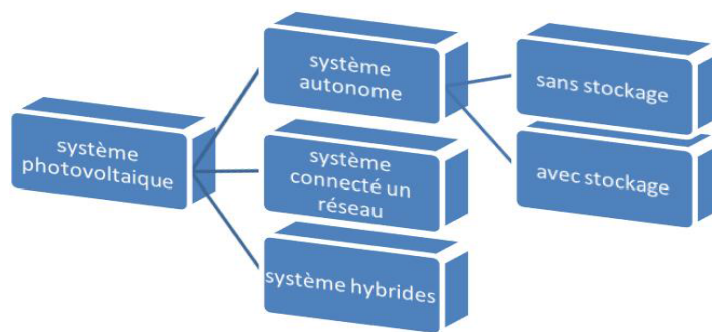
I.6. Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

I.7. Différents types de systèmes photovoltaïques :

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.



I.7.1. Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I.15) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

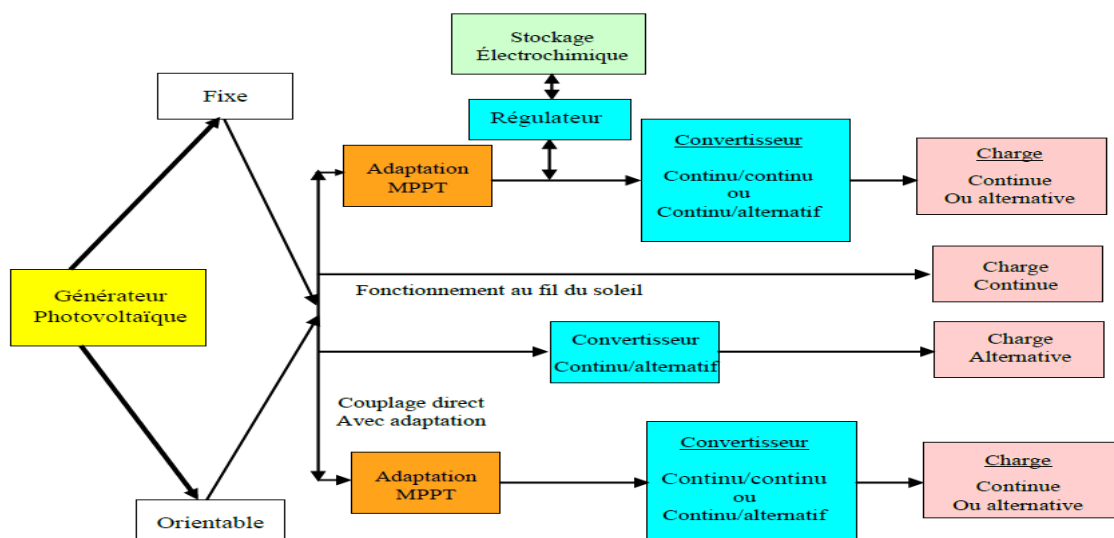


Figure I.15 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

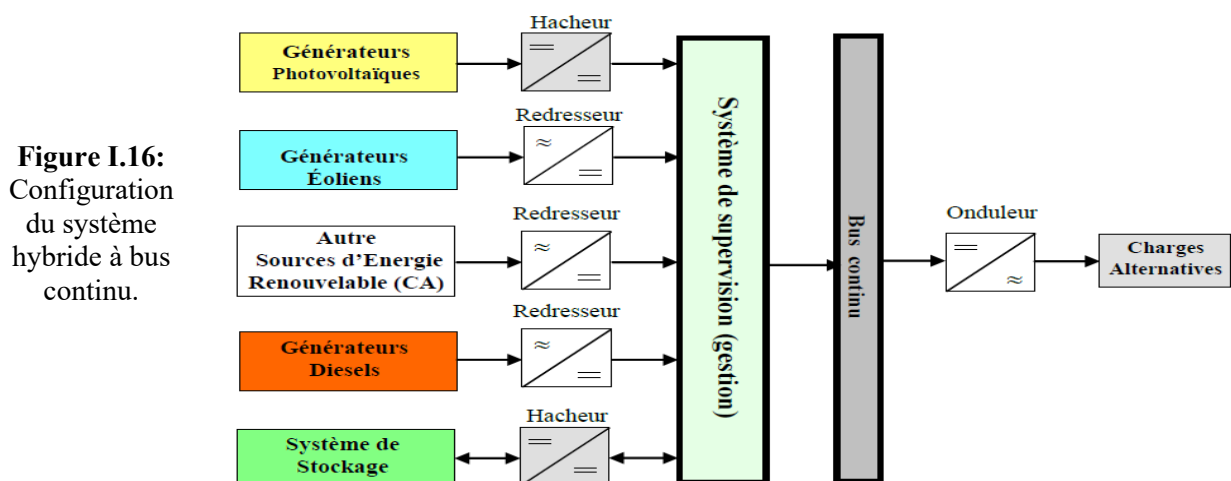
Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir).

Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

I.7.2. Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu (voir figure I.16). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence.



La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

I.7.3. Les systèmes connectés au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.17) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

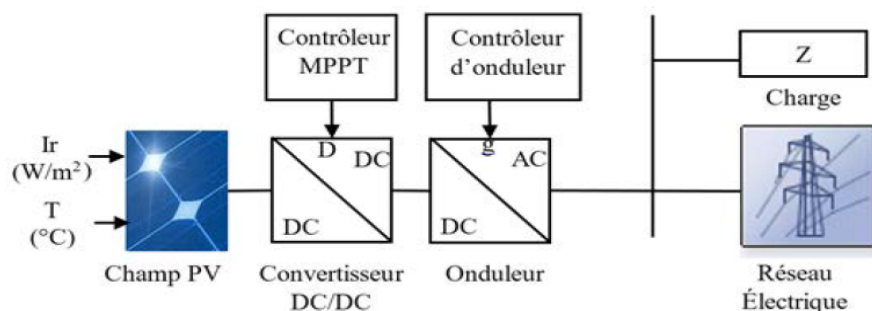


Figure I.17 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

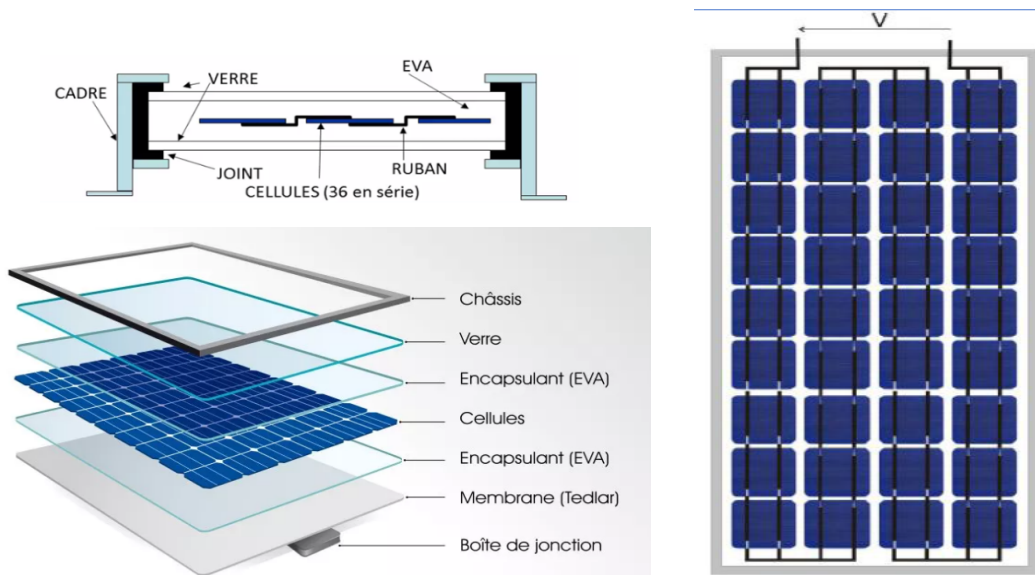
I.8. Module PV (panneau solaire)

En raison de la faible tension générée par une cellule PV (environ 0,5 V) et de sa faible puissance, il est nécessaire de combiner plusieurs cellules. On obtient alors un panneau solaire. L'association des cellules en série permet l'augmentation de la tension pour une irradiance et température fixes. La combinaison des cellules en parallèle permet d'augmenter le courant. De cette façon, on peut avoir un générateur PV adapté aux applications souhaitées.

Les caractéristiques I-V d'un panneau PV sont fonction de la température et de l'irradiance comme dans le cas d'une cellule simple. D'autres facteurs tout aussi importants comme l'environnement, positionnement, l'état de surface et les ombres partielles conditionnent le fonctionnement des panneaux PV.

En général, un module PV est constitué de 36 ou 72 cellules montées en série. Néanmoins, ce nombre peut varier selon les applications. On peut trouver des modules de 40, 54, 72 voire même 96 cellules en série.

Les cellules sont connectées entre elles en série pour former un groupe PV. Chaque groupe est connecté en antiparallèle avec diode de by-pass afin de les protéger de fonctionner en inverse (en cas d'ombrage par exemple). L'idéal est de connecter une diode by-pass par cellule, mais cette technique n'est pas utilisée vu sa complexité et de son coût élevé. [9]



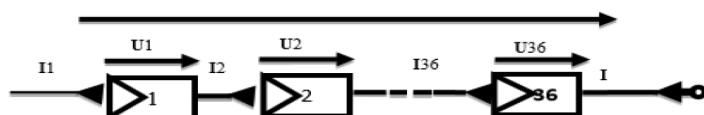
I.8.1. Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc..) peuvent endommager les cellules de façon permanente [10].

I.8.1.1. Association en série

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [10].

Figure I.18 : Association de N modules solaires en série.



I.8.1.2. Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [10].

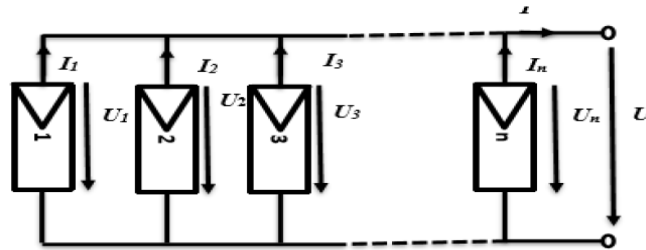


Figure I.19 : Association des modules solaires en parallèle.

I.8.1.3. Association série-parallèle (mixte)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [10].

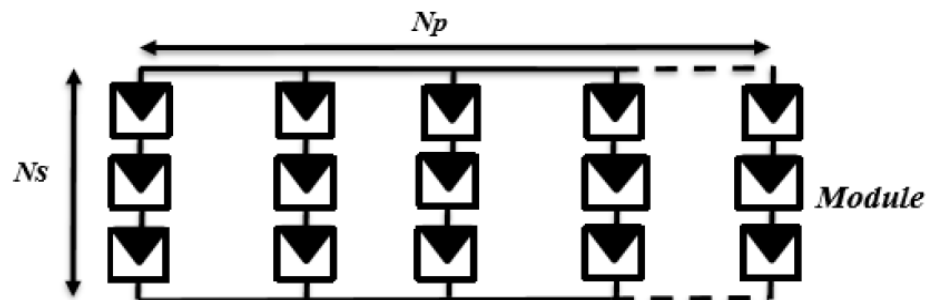


Figure I.20 : Association mixte des modules solaires.

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau, champ PV) afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV.

Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque.

Introduction :

Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert. Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque (GPV), il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

II.1. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

Le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque est réduit en un simple schéma bloc (**Figure. II.1**) à deux entrées (E : l'éclairement et T : la température de la cellule) et deux sorties (I : le courant et V : la tension).

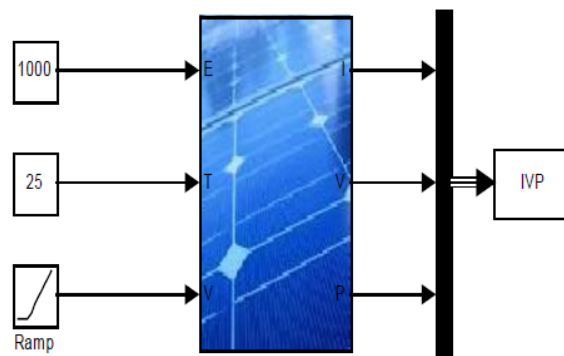


Figure. II.1. Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

II.1.1. Spécification du générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure II.2, représente trois zones essentielles :

- La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

- La zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- La zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

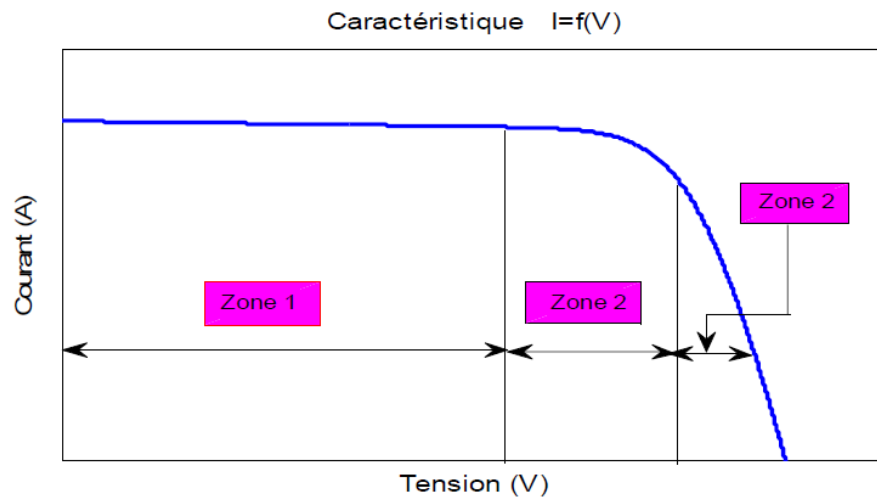


Figure. II.2 : les différentes zones de la caractéristique $I(V)$.

II.1.2. Caractéristique et modélisation de la cellule solaire

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique $I(V)$ la plus performante possible, parmi ces modèles on peut citer les suivants [11] :

- Modèle à sept paramètres (7P)
- Modèle à six paramètres (6P)
- Modèle à cinq paramètres (5P)
- Modèle à quatre paramètres (4P)
- Modèle à trois paramètres (3P)

Les principaux paramètres sont les suivants :

- I_L = le courant photonique
- I_0 = courant de saturation inverse
- n = facteur de qualité

- R_s = la résistance séries
- R_{SH} = la résistance shunt

Ces modèles sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres mis en jeu.

II.1.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique électrique dépend de la puissance du rayonnement reçu par unité de surface (éclairage (W / m^2)). Ses principaux paramètres sont :

- **Le courant de court-circuit I_{cc}** qui est proportionnel à la surface et à l'éclairage de la cellule, on obtient ce courant lorsqu'on place le module PV en court-circuit ($V_{oc} = 0$), cela est
- **La tension de circuit ouvert V_{oc}** qui est proportionnelle à la température. Elle représente la tension maximale générée par le panneau photovoltaïque. On obtient cette tension dans des conditions de circuit ouvert ($I_{cc} = 0$).
- **Le point de puissance maximale PPM** qui représente le point pour lequel le produit $V.I$ est maximal, il est situé sur le coude de la courbe. A cette puissance maximale on a une tension maximale V_{mpp} et un courant maximal I_{mpp} donné par l'équation suivante :

$$P_{max} = V_{mpp} I_{mpp} \quad (II.1)$$

Chaque panneau est caractérisé par quatre valeurs (V_{oc} , I_{sc} , I_{mpp} et V_{mpp}), qui sont obtenues à des conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire un éclairage de $1000 W/m^2$ et une température de $25^\circ C$. A

- **Facteur de forme FF (Fill Factor)** C'est le rapport de la puissance maximale fournie au module PV et du produit du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension de circuit ouvert V_{oc} donné par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{oc}} \quad (II.2)$$

- **Le rendement énergétique η** C'est le rapport de la puissance électrique maximale P_{max} fournie et le module et la puissance solaire incidente. Comme montre la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{P_{max}}{G.A} \quad (II.3)$$

Où :

P_m = Puissance électrique délivrée par le panneau photovoltaïque (W)

S = Surface effective du panneau photovoltaïque (m^2)

G = Irradiation (W/m^2).

II.2. Modèle mathématique d'une cellule solaire :

II.2.1. Modèle parfait

Le modèle le plus simple d'une cellule PV est montré comme un circuit équivalent figure (II.3), constitué d'une source de courant idéale en parallèle avec une diode idéale. La source de courant représente le courant produit par les photons (souvent désignés par I_{ph} ou I_l), et sa production est stable sous température et irradiation incidente constante [12].

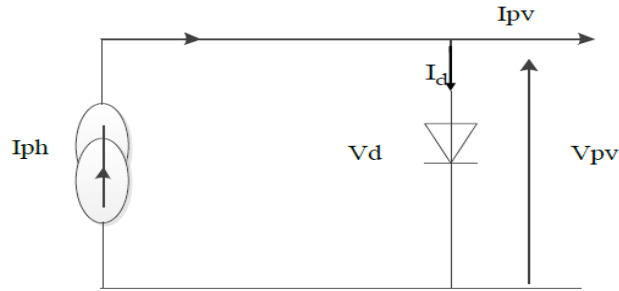


Figure II.3. Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.4})$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (\text{II.5})$$

E : Éclairement absorbé par la cellule ;

E_{ref} : Éclairement de référence (1000 w/m^2) ;

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (\text{II.7})$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

K : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) ;

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

II.2.2.Modèle réel

Dans le modèle parfait ou idéal, il y a quelques paramètres qui n'ont pas été pris en considération, et cela affectera la performance de la cellule PV dans la pratique.

Pour rapprocher le plus possible à un modèle réel, il faut prendre en considération les pertes et les différents phénomènes évoqués dans le modèle idéal, qui sont caractérisées généralement par les résistances et les diodes, on peut citer, la résistance série, qui représente les pertes de contacts, la résistance shunt qui représente les pertes de fuites et les diodes parallèles qui représentent le phénomène de recombinaison [12].

II.2.2.1.La résistance série

Dans une cellule PV réelle, il y a une résistance série dans le chemin du courant à travers le matériau semi conducteur, la grille du métal et les différents contacts. Ces pertes sont réunies comme une résistance série R_s , son effet devient très remarquable dans un module PV qui se compose de plusieurs cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre des cellules.

II.2.2.2.La résistance parallèle

Celle-ci s'appelle également la résistance shunt. L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance R_p , qui apparaît en parallèle sur le schéma électrique.

Cette résistance parallèle est liée directement aux processus de fabrication, son effet est beaucoup moins remarquable dans un module PV comparé à la résistance série, il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules PV sont reliés en parallèle pour un grand système.

II.2.2.3.Recombinaison

La recombinaison dans la région d'épuisement des cellules de PV fournit les chemins courants non-ohmiques parallèlement à la cellule intrinsèque de PV. Ceci peut être représenté par la deuxième diode (D2) dans le circuit équivalent.

D'après les données que nous avons jusqu'à maintenant en peuvent faire une représentation simple d'une cellule PV figure (II.4).

Ce modèle comporte quatre variables, les deux variables d'entrées sont

- ✓ G_S : Ensoleillement dans le plan de module
- ✓ T_J : Température de jonction des cellules

Et les deux variables de sortie sont :

- ✓ I_G : Le courant fournit par le module
- ✓ V_G : La tension à la borne du module

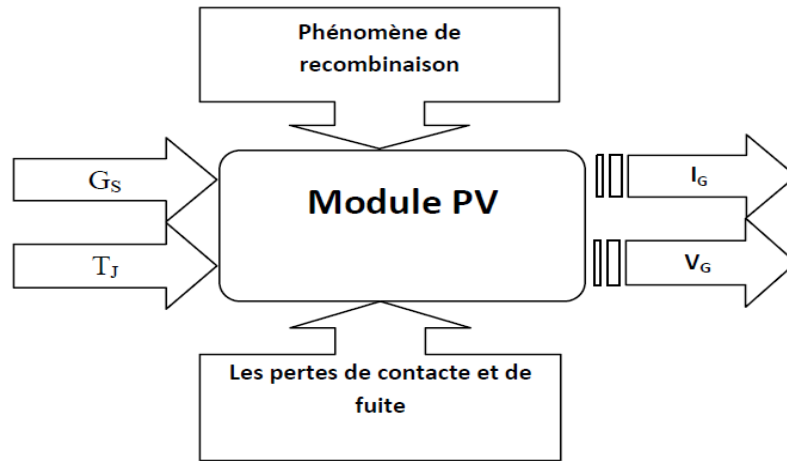


Fig. II.4 : Présentation générale d’une cellule PV

II.2.3.Modèle d’une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d’une cellule photovoltaïque est présenté dans la figure suivante. Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt.

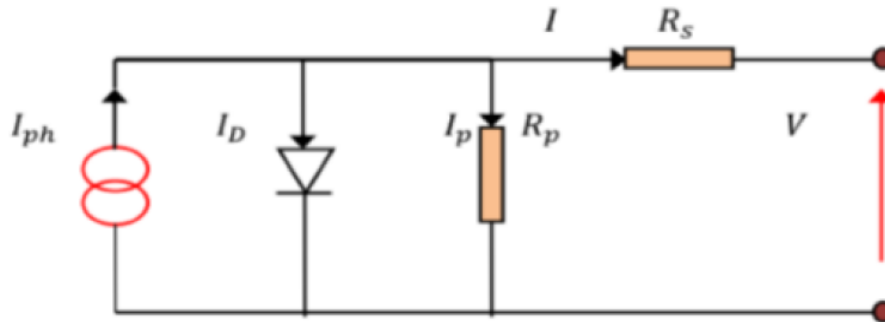


Fig. II.5 : Schéma équivalent de la cellule PV

II.2.3.1.Détermination du courant I

$$I = I_{ph} - I_p - I_d \tag{II.8}$$

I_{ph} : Le photo-courant,

I_p : Le courant de la résistance parallèle,

I_d : Le courant de polarisation d'une diode.

II.2.3.2.Détermination du courant I_{ph}

$$I_{ph} = I_{rr} \cdot [I_{sc} + K_i \cdot (T_{op} - T_{ref})] \tag{II.9}$$

I_{rr} : est le rapport entre l’irradiation en cours sur l’irradiation dans les conditions STC.

I_{sc} : Il s’agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C’est le plus grand courant que la cellule peut fournir.

K_i : Coefficient de sensibilité de la tension à la température en A/K.

T_{op} : Température absolue opérationnelle en Kelvin.

T_{ref} : La température de la cellule à la condition de référence en Kelvin.

II.2.3.3. Détermination du courant I_p

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \tag{II.10}$$

V : La tension disponible en sortie du générateur PV.

R_s : La résistance série.

R_p : La résistance parallèle.

I : Le courant disponible en sortie du générateur PV.

II.2.3.4. Détermination du courant I_d

$$I_d = I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] \tag{II.11}$$

n : Facteur d'idéalité.

II.2.3.4. a. Détermination du courant I_s

I_s : est le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule.

$$I_s = I_{rs} \cdot \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \tag{II.12}$$

E_g : La bande interdite de la fonction d'une cellule Si elle est en silicium, $E_g = 1,12$ eV

I_{rs} : est le courant de saturation inverse à la condition de référence STC.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right]} \tag{II.13}$$

I_{sc} : Le courant de court-circuit.

V_{oc} : La tension à circuit ouvert.

II.2.3.4.b. Détermination de la tension V_t

$$V_t = \frac{n \cdot K \cdot T_{op}}{q} \tag{II.14}$$

K : La constante de Boltzmann. $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

q : La constante de charge d'électron : $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

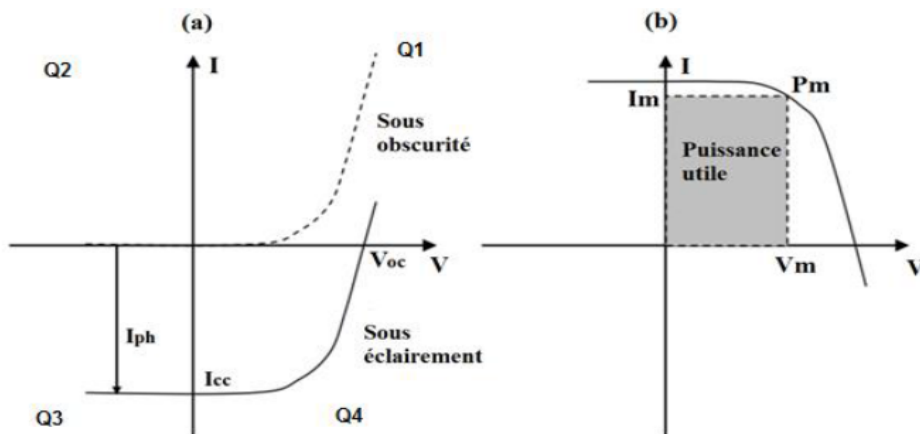


Fig. II.6. (a) Caractéristiques I(V) et (b) la représentation classique de courbe I-V d'une cellule PV.

II.2.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Dans des conditions d'ensoleillement standard ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W sous une tension de 0.5V . Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Le générateur photovoltaïque est donc constitué d'un réseau série/parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques. Lorsque les cellules sont assemblées en série, les tensions s'additionnent; alors que si elles sont montées en parallèle, les courants s'additionnent. Ces cellules doivent avoir les mêmes caractéristiques.

Dans un groupement de n_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même. La figure (II.7) montre la caractéristique résultante (I_{ccns}, V_{cons}), avec $I_{ccns} = I_{cc}$ et $V_{cons} = n_s \cdot V_{co}$.

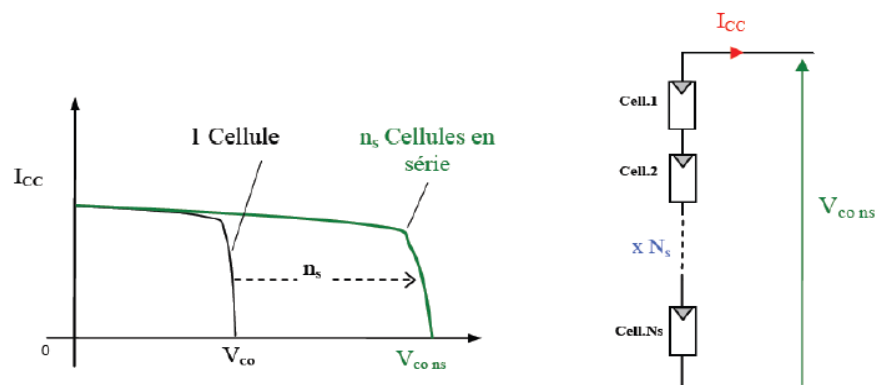


Figure II.7 : Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série.

Dans le cas d'un groupement de n_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La Figure (II.8) illustre la caractéristique résultante avec $I_{ccnp} = n_p \cdot I_{cc}$ et $V_{conp} = V_{co}$.

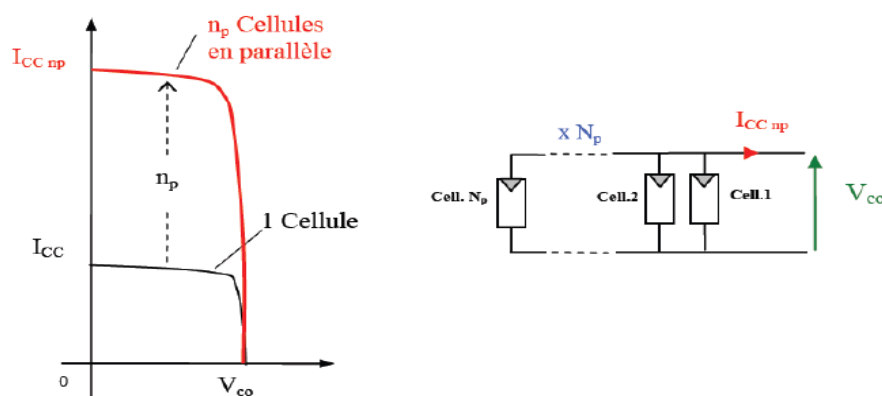


Figure II.8 : Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

II.2.5. Modélisation D'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_S (e^{(V_{cell} + R_S I_{cell})/V_{th}} - 1) \quad (II.15)$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres, I_{ph} et I_S en particulier, ne peuvent être établis à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de I_{sc} , V_{oc} et P_{max} qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium :

- le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{(V + IR_S/V_{th})} \gg 1$ pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_S e^{(V_{cell} + R_S I_{cell})/V_{th}} \quad (II.16)$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_S} \right) \quad (II.17)$$

D'où :

$$I_S = I_{sc} \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad (II.18)$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{(V - V_{oc} + IR_S)/V_{th}} \right) \quad (II.19)$$

Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent N_P branches en parallèle, chacune avec N_S cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant I^P , généré par le module PV sera exprimé par:

$$I^P = N_P I_{sc} \left(1 - e^{(V^P - N_S V_{oc} + \frac{N_S R_S I^P}{N_P})/V_{th}} \right) \quad (II.20)$$

II.2.6. Protections D'un Générateur

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux modules pour éviter des pannes destructrices liées à l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés :

- la diode anti-retour empêche la circulation d'un courant négatif dans les GPV lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit.
- les diodes by-pass servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

La figure (II.9) montre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection, et la mise en évidence du courant de circulation dans le cas de la défaillance d'une cellule.

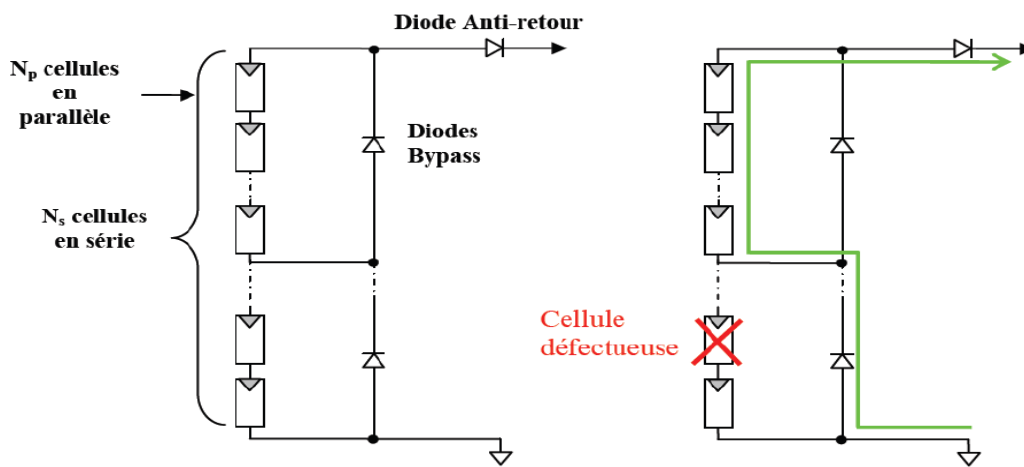
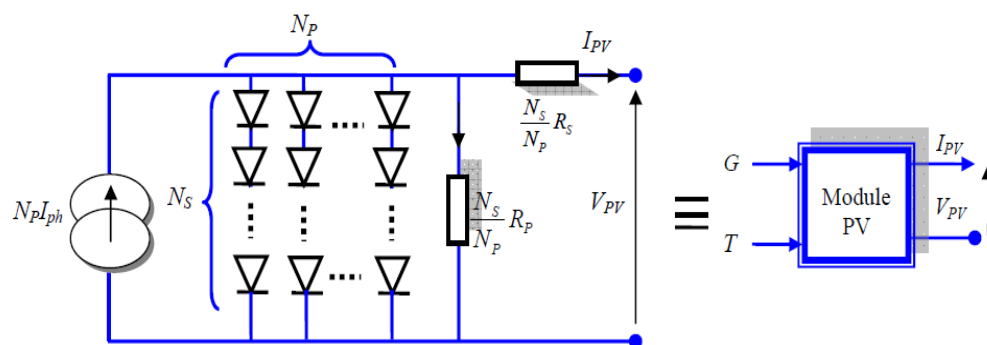


Figure II.9. Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule.

II.3. Modèle d'un module photovoltaïque sur MATLAB

L'équation de base de courant I de la cellule photovoltaïque élémentaire ne représente pas la caractéristique I - V d'un module photovoltaïque. Les modules sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle. Les cellules connectées en série augmentent la tension et les cellules connectées en parallèle augmentent le courant.



N_s : Nombre des cellules en série. On prend $N_s = 72$.

N_p : Nombre des cellules en parallèle. On prend $N_p = 1$.

La résistance parallèle est négligée, elle est très grande ($R_p = \infty$) si comparée à la résistance série. Alors le courant de la résistance parallèle I_p est négligé.

Dans le but d'avoir un modèle simple à utiliser, nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink qui va être utilisé dans la suite de notre travail. Le modèle, basé sur l'équation, les figures (II.10) et (II.11) illustrent le modèle du panneau photovoltaïque et de son sous-système.

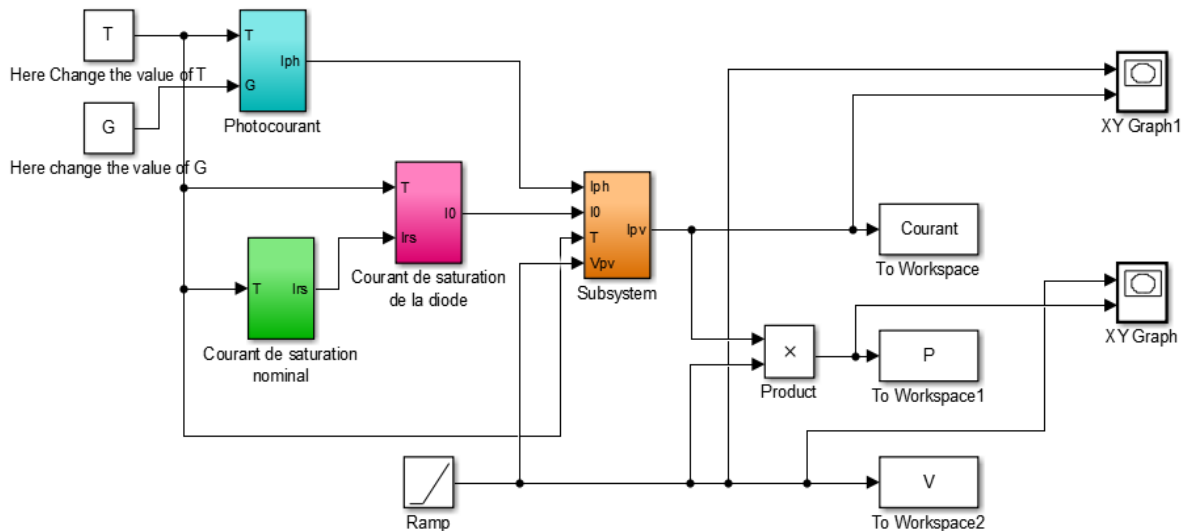


Figure II.10. Schéma Bloc de simulation d'un panneau photovoltaïque.

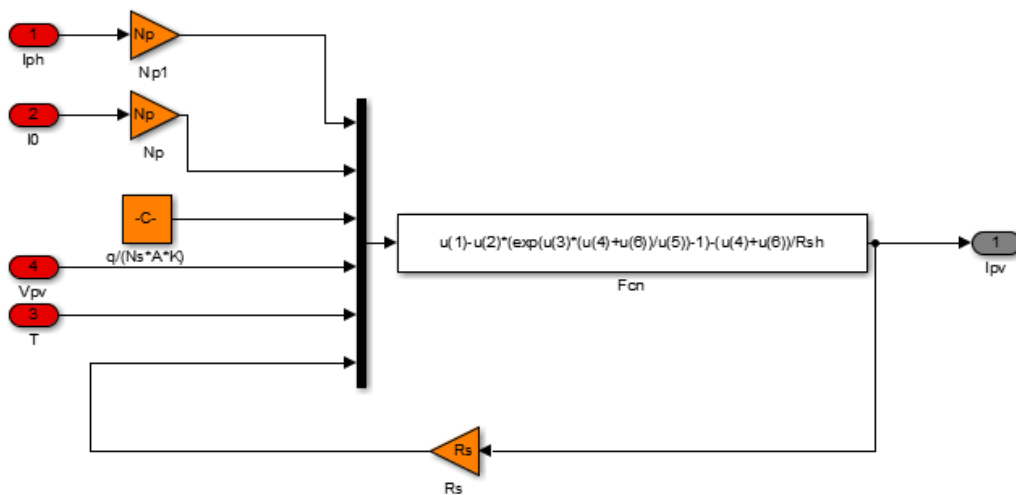


Figure II.11. Sous-système du panneau photovoltaïque.

Dans notre étude, Les données de simulation sont ceux du panneau BP 3150s cité à l'annexe.

Le BP 3150s est un module photovoltaïque de 150W particulièrement abouti. Les cellules poly-cristallines avec couche anti-reflet SiN assurent une meilleure absorption. Une tolérance en puissance plus étroite de 3% garantie une puissance de sortie moyenne plus élevée.

Le BP 3150 a été particulièrement conçu pour les applications connectées au réseau, telles que les toitures de grands bâtiments commerciaux, le petit résidentiel et les centrales photovoltaïques de puissance. Ce module offre un rapport qualité-prix de premier ordre grâce à ses 72 cellules à haut rendement et sa feuille de Tedlar arrière blanche.

II.3.1. Caractéristique D'un Générateur PV

Les figures ci contres présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température de 25°C.

Performance

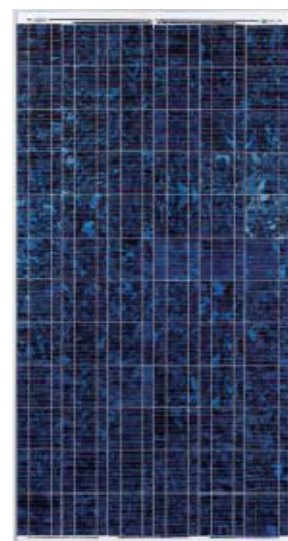
Puissance nominale 150W

Rendement module 12%

Tension nominale 24V

Caractéristiques électriques	
Puissance maximale (Pmax) :	150W
Tolérance :	± 3%
Tension à Pmax (Vmp) :	34.5V
Courant à Pmax (Imp) :	4.35A
Tension à circuit ouvert (Voc) :	43.5V
Courant de court-circuit (Isc) :	4.75A
Maximum system voltage :	1000 V
Size :	1593 x 790 x 50 mm
Test condition :	1000W/m ² , AM1.5G, 25°C

Tableau II.1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque



Le tableau II.2. Montre ses caractéristiques électriques fournies par la fiche technique du fabricant.

Trois points d'opération, sur la courbe $I(V)$, sont importants en définissant les performances d'un module PV, telles que :

- Le point de puissance maximale,
- Le courant court-circuit,
- La tension de circuit ouvert.

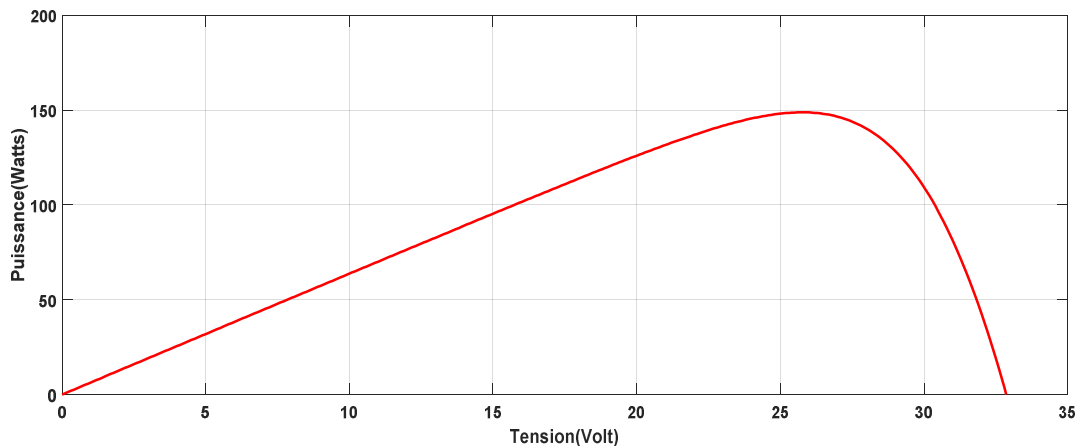
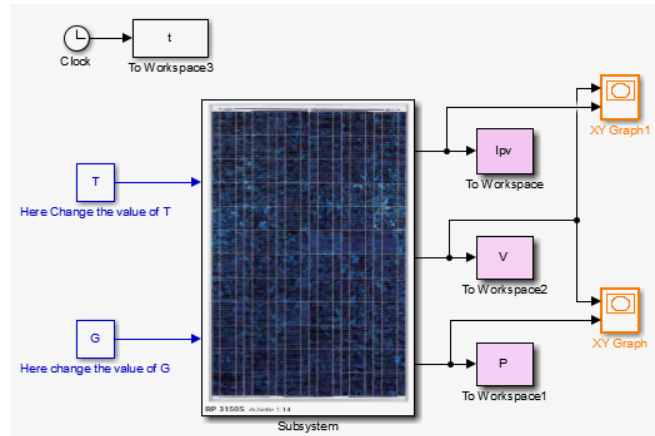


Figure. II.12 : Caractéristique P/V d'un panneau PV

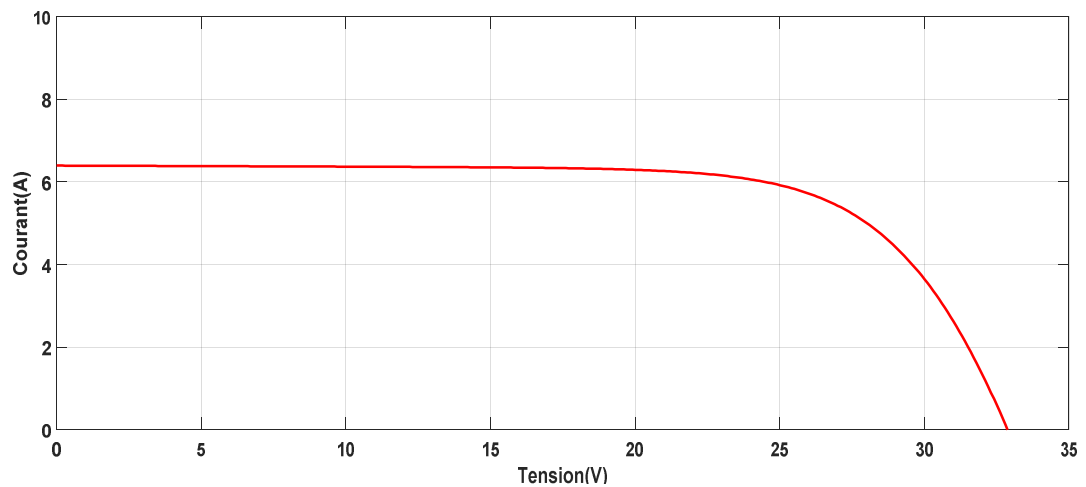


Figure. II.13. Caractéristique I/V d'un panneau PV

II.3.2. Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV

Le comportement du module PV est très sensible aux variations de l'éclairement (E) et de la température (T) car ces variations ont un effet important sur la puissance fournie par le module.

II.3.2.1. Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 5°C à 45°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer que l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV. Les figures suivantes représentent les caractéristiques Courant - Tension et Puissance- Tension pour un rayonnement constant et différentes températures.

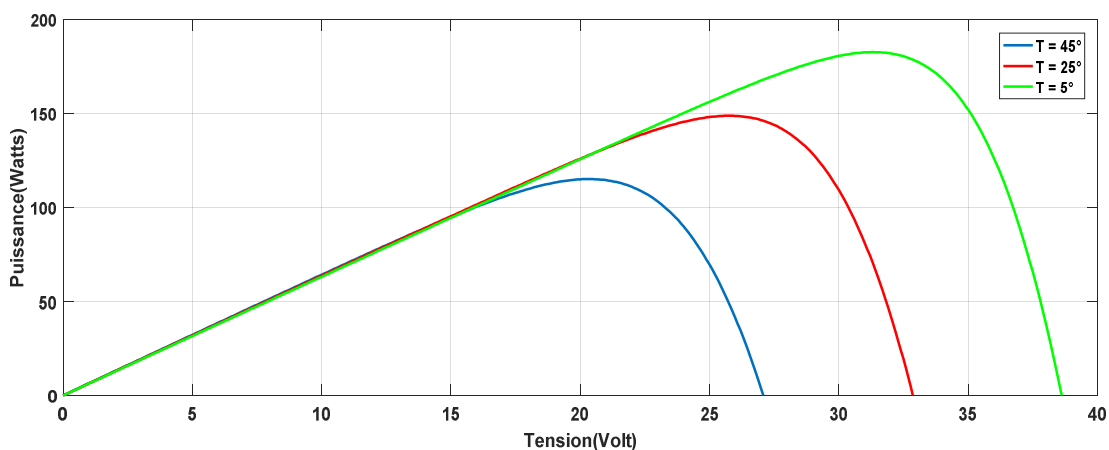


Figure. II.14. Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.

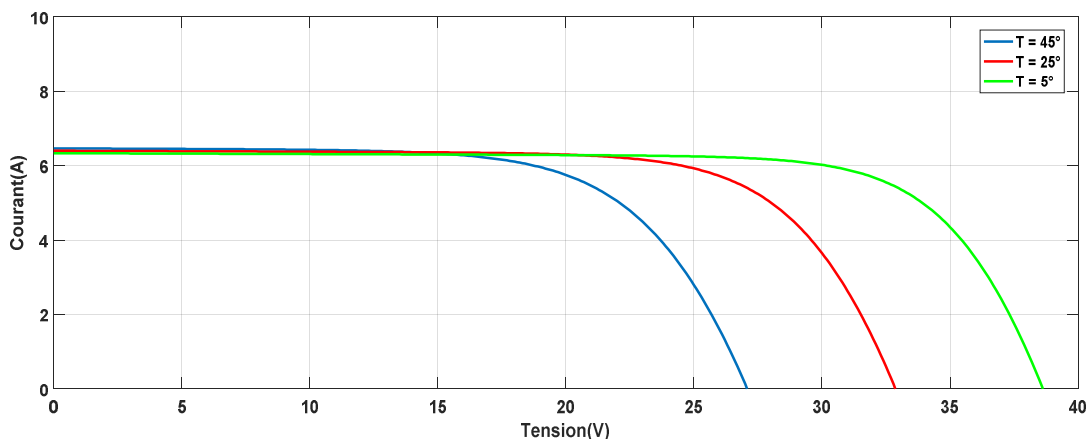


Figure. II.15. Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule).

Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule). Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

II.3.2.2. Influence De L'enseillement

Une baisse de l'enseillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire ICCM proportionnelle à la variation de l'enseillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension VCOM et donc un décalage du point Pmax du panneau solaire vers les puissances inférieures.

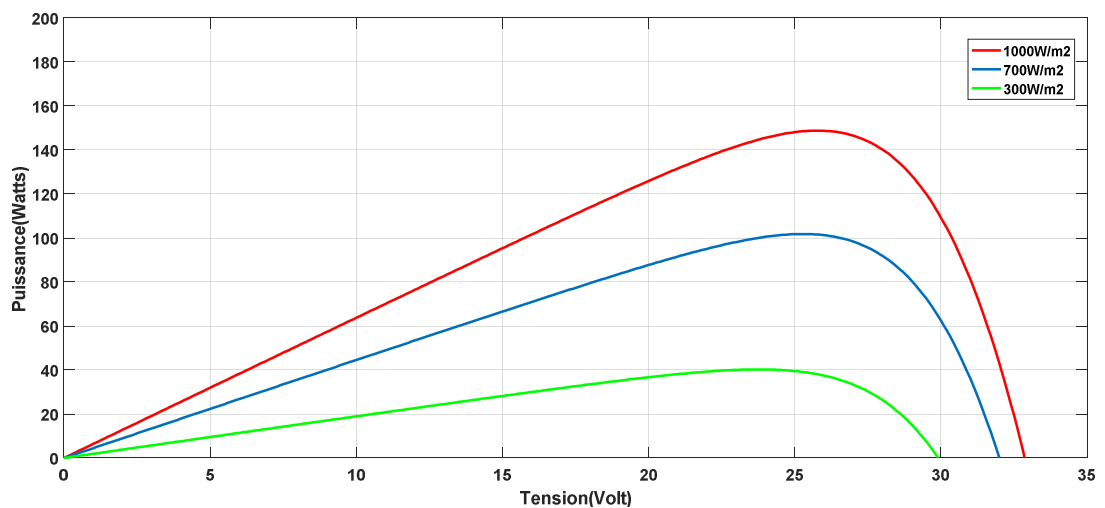


Figure. II.16 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

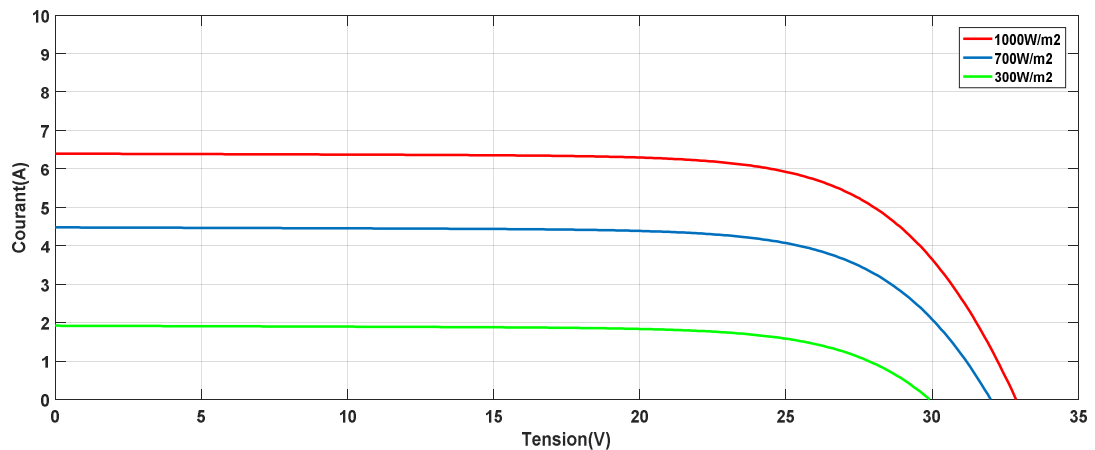


Figure. II.17 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Les figures précédentes montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, il est clair 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, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

A cet effet, il faut prendre en considération ces facteurs afin de dimensionner correctement le générateur PV qui permettra d'obtenir la puissance souhaitée.

II.4.Puissance maximale d'un PV

La production d'un GPV est variable, elle dépend d'une part du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi du vieillissement de l'ensemble, d'autre part de la charge qu'il alimente. Afin de maintenir la production stable et maximale, il faut assurer deux conditions nécessaires qui sont :

- Des conditions optimales (un éclairement élevé, une température basse et installation récente) pour que la production soit maximale.
- des charges optimales pour en transfert optimale.

La fluctuation de l'éclairement et la température au cours de la journée sont imposées par les conditions climatiques, par contre, l'atteinte de la charge optimale est l'objectif du control.

Le problème de couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge (surtout de type continue) n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le transfert de la puissance maximale du GPV à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale PPM. [12]

II.4.1. Principe

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés doit prendre en compte la nature de la charge et les différents phénomènes qui peuvent influencer sur la source. Il faut donc arriver à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge, qu'elle soit de nature continue (DC) comme des batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique 240V/50Hz.

Le principe donc est de faire fonctionner le système à sa puissance maximale, quel que soit les perturbations qui peuvent apparaître (variation de l'éclairement ou la température).

II.4.2. Point de puissance maximale avec Connexion directe source-charge

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque et d'une charge (charge ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite figure (II.18).

Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fournis à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairement pour une température donnée et de la nature de la charge [12].

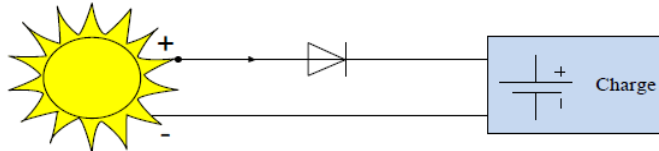
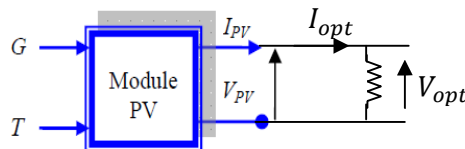


Figure. II.18. Connexion directe source-charge.



Pour une charge résistive R_s . On peut dire que le générateur PV fonctionne à sa puissance maximale (P_{max}) lorsque :

$$V_{pv} = V_{opt} , I_{pv} = I_{opt} , R_s = R_{opt} = \frac{V_{pv}}{I_{opt}}$$

$$P_{pv} = V_{pv}.I_{pv} = P_{max} = V_{opt}.I_{opt}$$

Pour un éclairement donné, la condition optimale de fonctionnement des générateurs PV est alors caractérisée par une tension V_{opt} et un courant I_{opt} . Le produit V_{opt} par I_{opt} constitue ainsi le maximum de puissance qu'on peut extraire du module PV.

Ce point (V_{opt} et I_{opt}) est appelé point de puissance maximale (PPM) du générateur PV pour une température et un éclairement donnés. Il est caractérisé par une résistance interne optimale R_{opt} du générateur.

- Les points P_1 , P_2 et PPM sont les points de fonctionnement du système de la figure (II.19) dans les conditions suivantes : $R_s < R_{opt}$, $R_s = R_{opt}$ et $R_s > R_{opt}$.
- Lorsque la valeur de la charge est supérieure ou inférieure à celle correspondant aux conditions optimales R_{opt} la puissance fournie par le générateur est inférieure à celle optimale P_{max} .

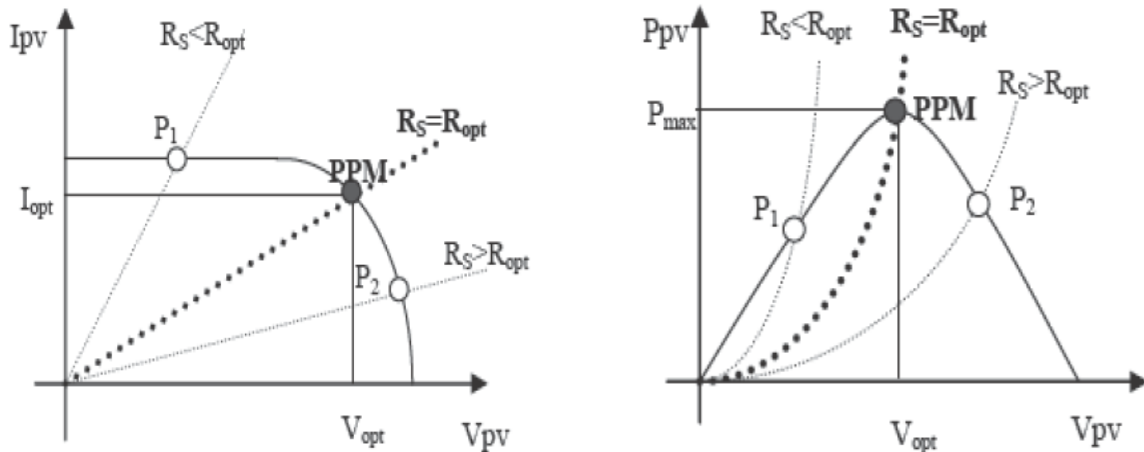


Fig. II.19 : Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système dans les trois cas : $R_s < R_{opt}$, $R_s = R_{opt}$ et $R_s > R_{opt}$

Remarque : Pour que le générateur PV travaille dans les conditions optimales il utilise une régulation dite MPPT (Max Power Point Tracker).

II.5. Adaptation entre un générateur PV et la charge

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.20).

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. [11]

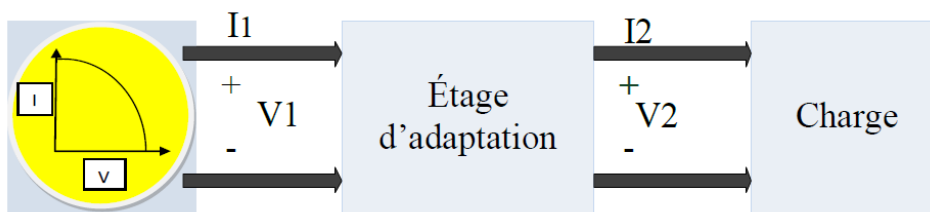


Figure. II.20. Étage d’adaptation entre un GPV et une charge.

L’adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

II.5.1. Convertisseur DC/DC

La figure. II.21 montre la représentation d’un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

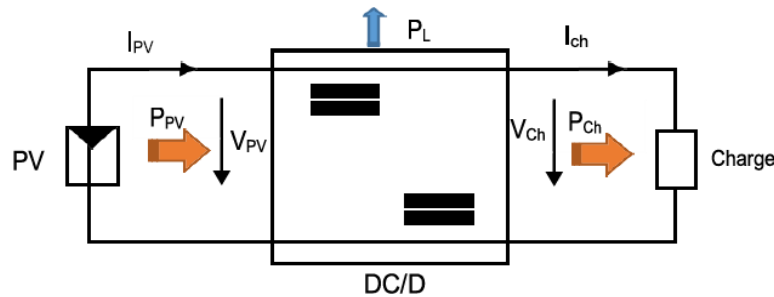


Figure. II.21 convertisseurs DC-DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances 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. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [13].

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Tableau II.3. différents types de convertisseurs DC-DC

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [14].

II.5.2. Adaptateur de Type BOOST

La figure (II.22) illustre un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV. [15]

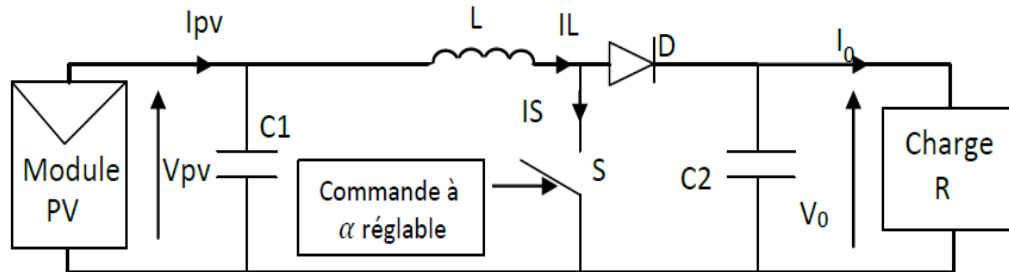


Figure. II.22 Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur

II.5.2.1. Définition du rapport cyclique :

Le rapport cyclique est défini comme le temps T_{on} , pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T , soit :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (II.21)$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé par :

$$T_{off} = T - T_{on} \quad (II.22)$$

II.5.2.2. Principe de fonctionnement :

Le convertisseur Boost permet d'avoir une tension moyenne de sortie supérieure à celle d'entrée, Cette structure nécessite un interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture (bipolaire, MOS, IGBT...), et une diode (amorçage et blocage spontanés).

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [16].

$$V_S = \frac{E}{1 - \alpha} \quad (II.23)$$

$$I_S = I_e (1 - \alpha) \quad (II.24)$$

II.5.3. Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle αT_s :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II.25})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II.26})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \quad (\text{II.27})$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - \alpha) T_s$:

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II.28})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II.29})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_0 - R_L I_L \quad (\text{II.30})$$

II.5.4. Modèle approximé du convertisseur Boost

Les systèmes d'équations de base représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_1 , V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($e^\xi \approx 1 + \xi$ si $\xi \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux intervalles du temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II.31})$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle T_s . Cette relation est valide

si: $\frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}}$ et $\frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}}$ sont constants sur les intervalles respectivement αT_s et $(1 - \alpha) T_s$

respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αT_s et $(1 - \alpha) T_s$ sont très faibles devant la constante de temps du circuit $C_1 R_g$, $C_2 Z$, et L/R_L .

En appliquant la relation sur les systèmes d'équations obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \alpha T_s = (I_{PV} - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_{PV} - I_L) \quad (\text{II.32})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad (\text{II.33})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad (\text{II.34})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_L = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II.36})$$

$$V_{PV} = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II.37})$$

Le rapport de conversion M(D) s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{II.38})$$

II.6.Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT.

Il peut être représenté par le schéma de la Figure (II.23).

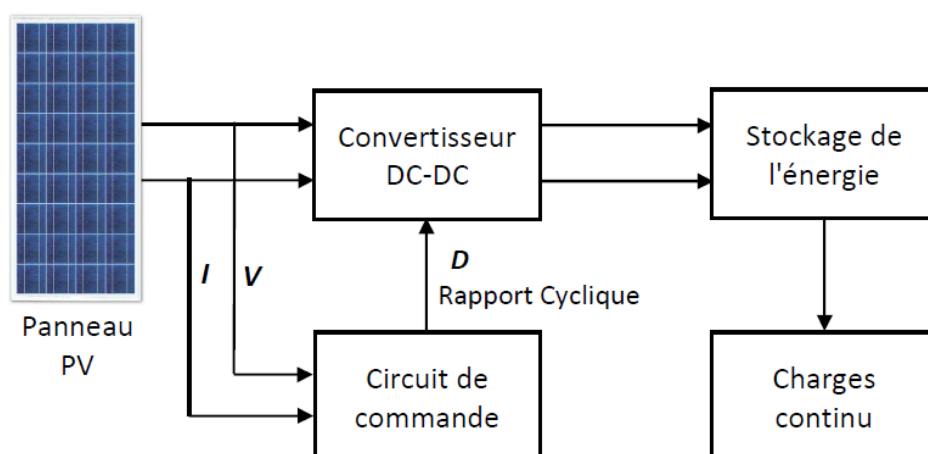


Figure II.23 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

A partir de la fonction de transfert de la tension, sa relation avec le rapport cyclique D est :

- Si $0 < D < 0.5$, la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée.
- Si $D = 0.5$, les tensions d'entrée et de sortie sont égales.
- Si $0.5 < D < 1$, la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction.

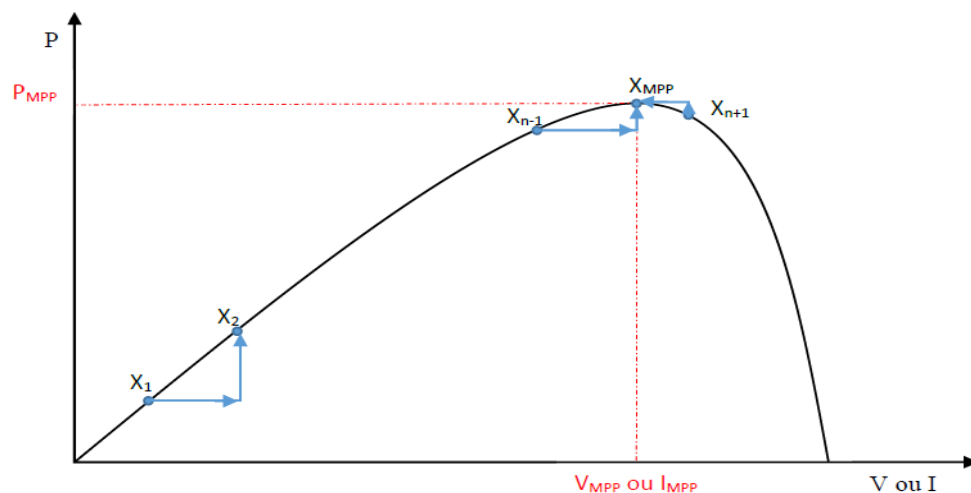


Figure II.24 Principe de la commande MPPT

II.6.1. Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [17].

II.6.1.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

II.6.1.1.a. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV.

Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal ($VOPT$ et $IOPT$) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [17].

II.6.1.1.b. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [17].

II.6.1.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

II.6.1.2.a. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), 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 [17].

II.6.1.2.b. MPPT Direct

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.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. [17]

II.6.2. Différentes techniques d'MPPT

Afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes. Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation... Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [17] :

- Algorithme Perturbation et observation (P&O).
- La méthode d'incrément de la conductance.
- Hill Climbing
- Méthode de retour de l'information de tension
- Méthode à contre réaction
- Le contrôle du MPP à base des réseaux de neurones
- MPPT à base de la logique floue. Etc.....

Le choix de l'algorithme dépend de la complexité; le temps nécessaire pour suivre le MPP et le coût de la mise en œuvre.

II.6.2.1. Commande MPPT basée sur l'algorithme perturbation et observation (P&O)

C'est la méthode la plus répandue dans le domaine MPPT vu la simplicité de son principe et la facilité de son implémentation. Elle est basée, comme son nom l'indique, sur l'introduction d'une perturbation sur le système et l'observation de son impact sur le changement de la puissance de sortie du panneau.

II.6.2.2. Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.25), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. [18]

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance du GPV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

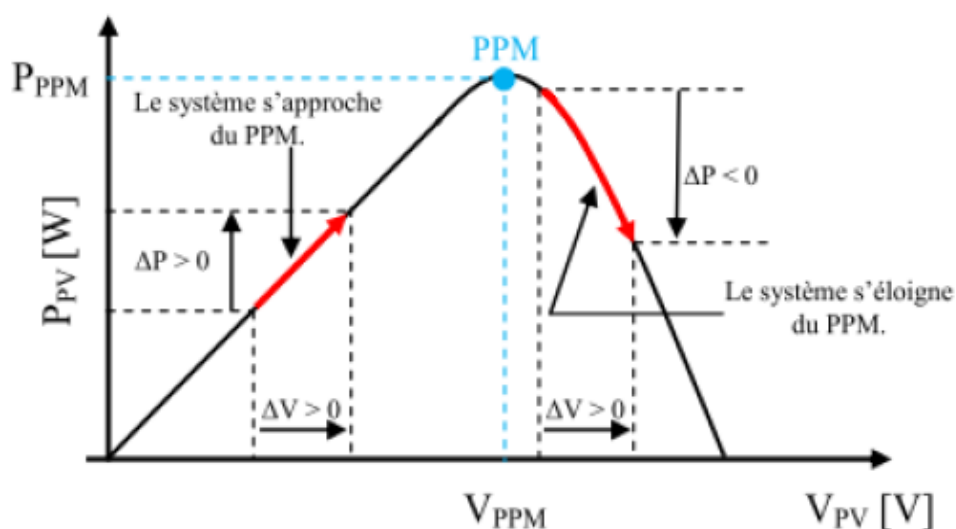


Figure II.25. Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

La Figure (II.26) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

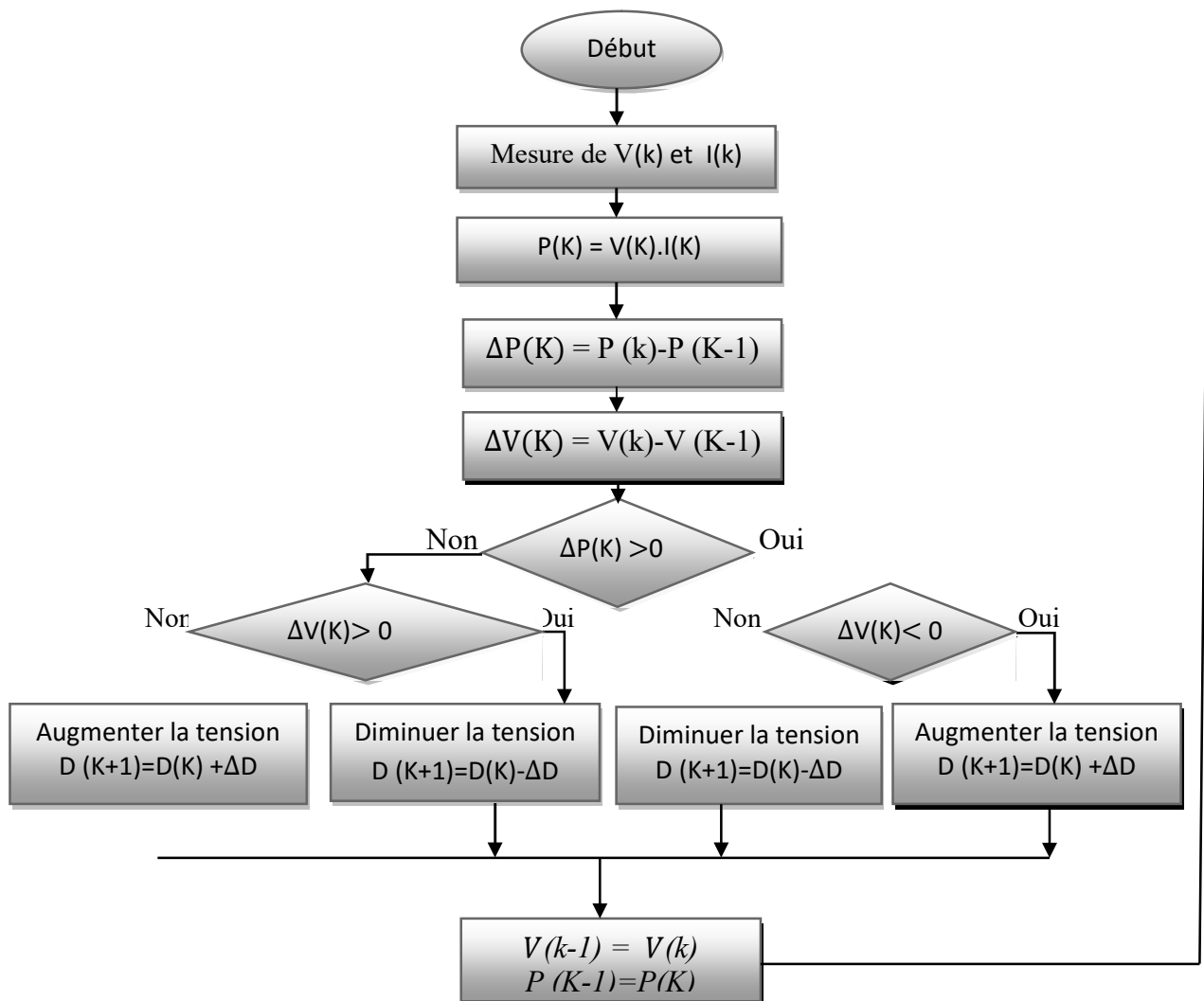


Figure II.26. Organigramme de l'algorithme de **P&O**.

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$.

Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrément ou des incréments du rapport cyclique D continueront dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

- Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire

$$D(k+1) = D(k) + \Delta D$$

- Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre:

$$D(k+1) = D(k) - \Delta D$$

Perturbation de la tension	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

Tableau II.4. Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation'.

Donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrément ou la des incréments du rapport cyclique D sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dv . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle [19].

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint[20]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [21] :

- ✚ Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- ✚ Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques.

II.6.2.3. Avantages et inconvénients de (P&O)

• **Avantages**

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesurés réduit

• **Inconvénient**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide de conditions atmosphériques.

II.7. Résultats de simulation de la Technique (P&O)

Les paramètres de simulation d'un convertisseur DC-DC Boost sont donnés dans le tableau suivant.

paramètres	R ₁ (Ω)	L(H)	C ₁ (F)	C(F)
Valeurs	1	0.002	2e ⁻³	2e ⁻³

Tableau II.5. Paramètres de simulation.

$$C = \frac{D}{R(\Delta V_0/V_0)f} \qquad L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f}$$

La Figure (II.27) donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés: GPV, DC-DC et MPPT.

Le bloc ci-dessous représente l'implantation de l'algorithme P&O sur l'environnement MATLAB/SIMULINK.

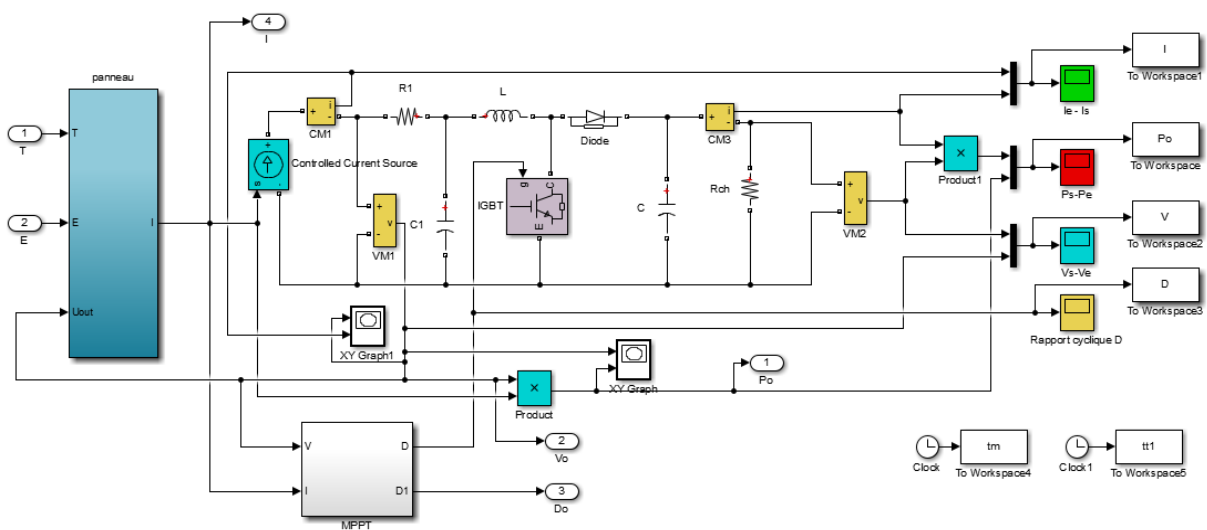
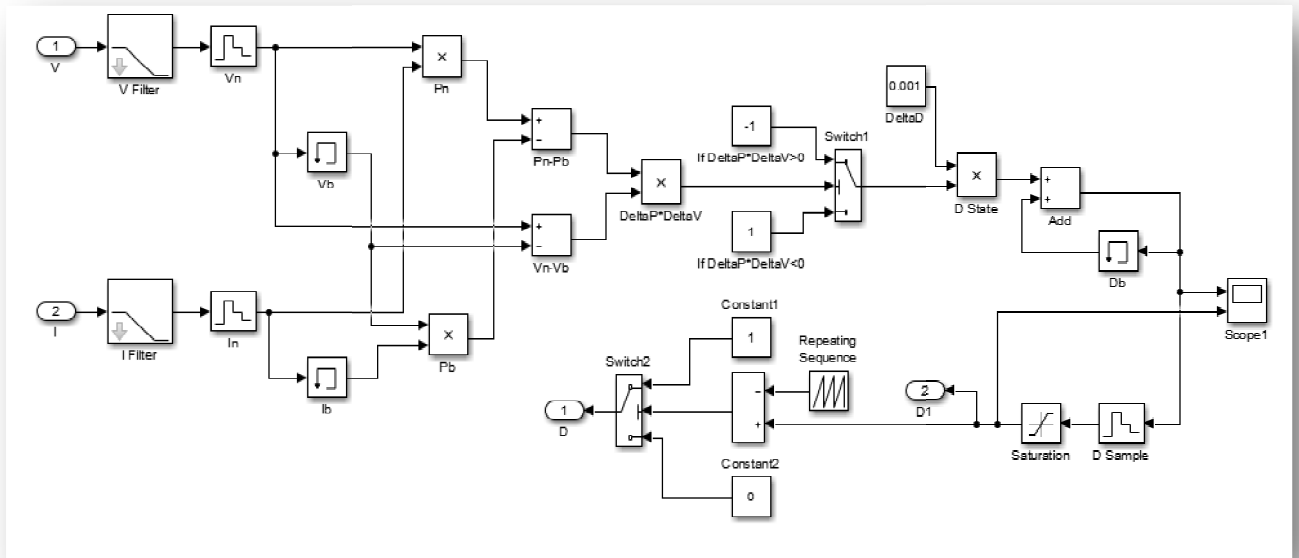


Figure II.27. Modèle de simulation pour l'algorithme (P&O).

Figure II.28 Schéma de block de la commande MPPT: P&O



D est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période T lorsque l'interrupteur S est passant. $0 < D < 1$.

III.7.1.Fonctionnement avec conditions environnementales stables

Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température égale 25°C et l'ensoleillement égale 1000W/m². Le but de ces simulations est de visualiser les différentes allures de puissances P, des rapports cycliques D et des tensions délivrant du panneau photovoltaïque avec la méthode de poursuivre la puissance maximale (MPP).

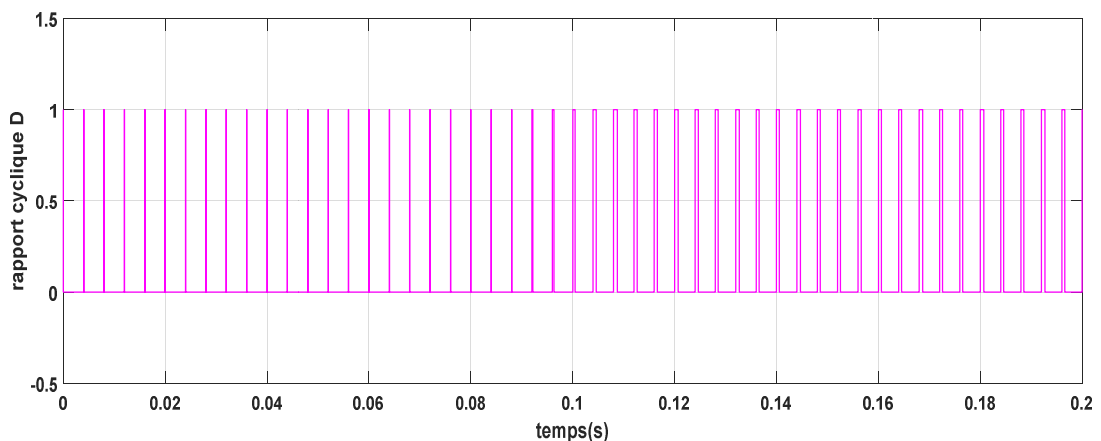


Figure. II.29.Rapport cyclique D

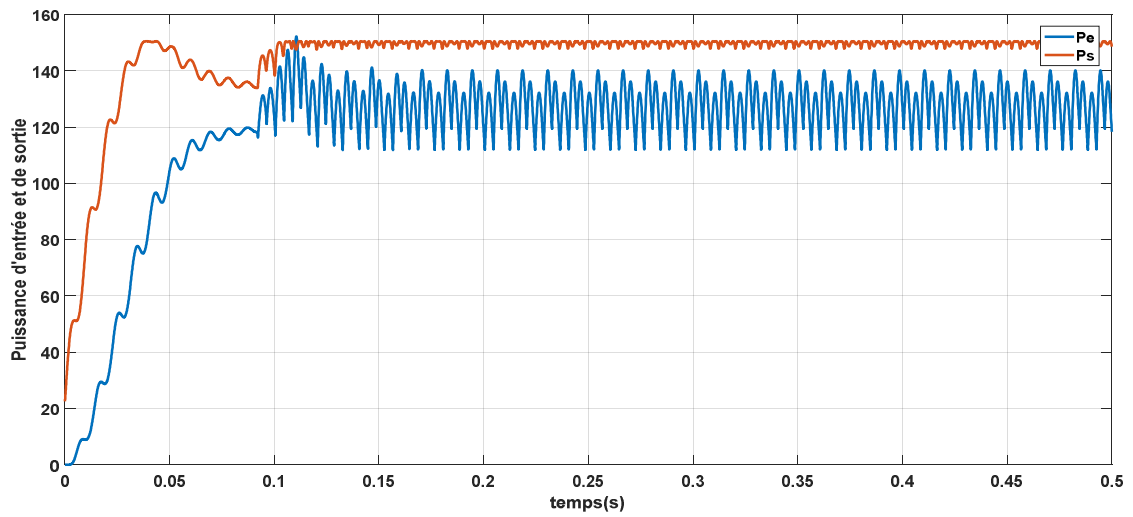


Figure. II.30. Puissance de sortie et d'entrée $P(t)$.

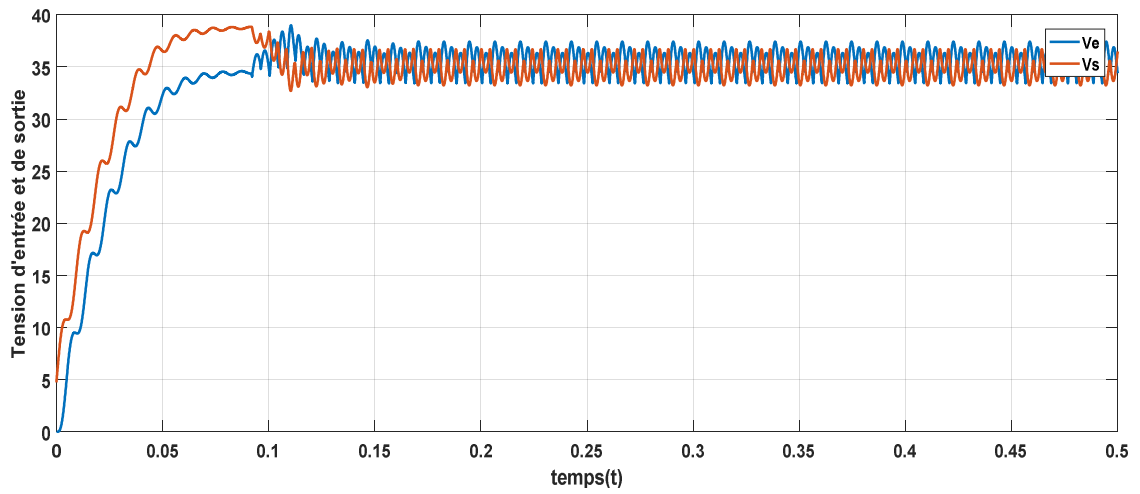


Figure. II.31. Tension V_{pv} de sortie et d'entrée.

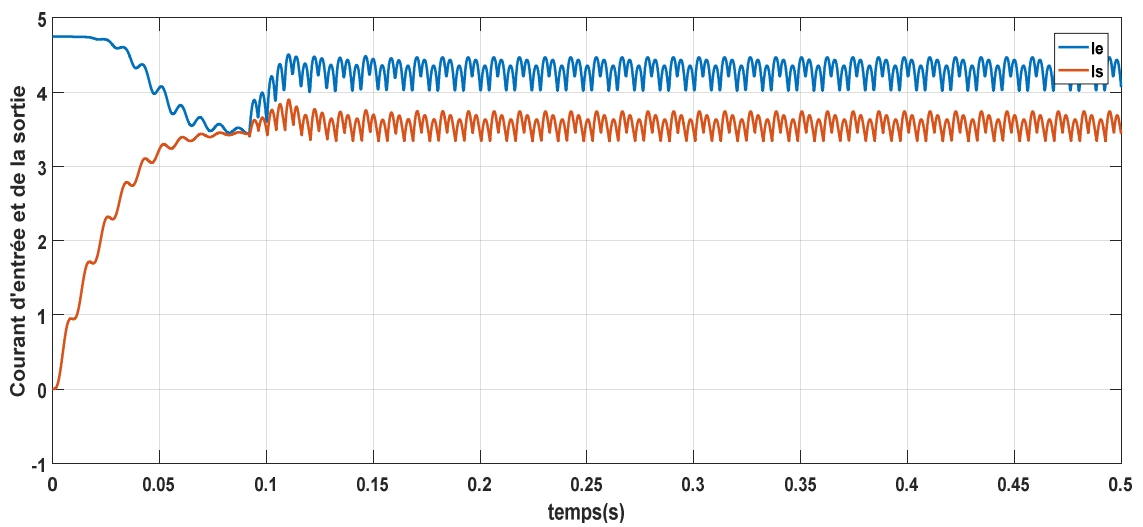


Figure. II.32. Courant I_{pv} de sortie et d'entrée.

III.7.2. Conditions climatiques variables

Pour valider l'algorithme P&O, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l'irradiation et de la température en fonction du pas de perturbation

III.7.2.1. Eclairage variable

Pour présenter l'effet de l'éclairage E sur la puissance, on fait maintenir la température à une valeur constante $T=25^{\circ}\text{C}$ et on fait varier rapidement l'éclairage plusieurs fois de sens pour créer plusieurs points de puissance maximale que le contrôleur doit les suivre.

La Figure II.33 donne une comparaison des courbes de la puissance de sortie en fonction du pas de perturbation pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 300 800 1000] W/m^2 .

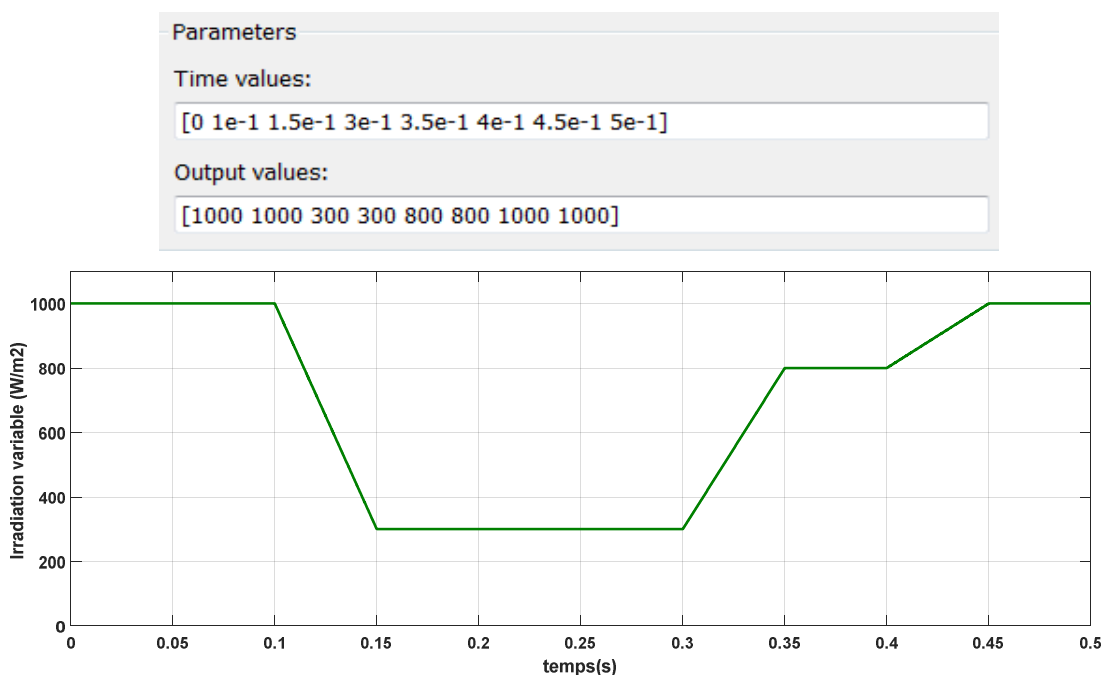


Figure. II.33. Changement d'éclairage.

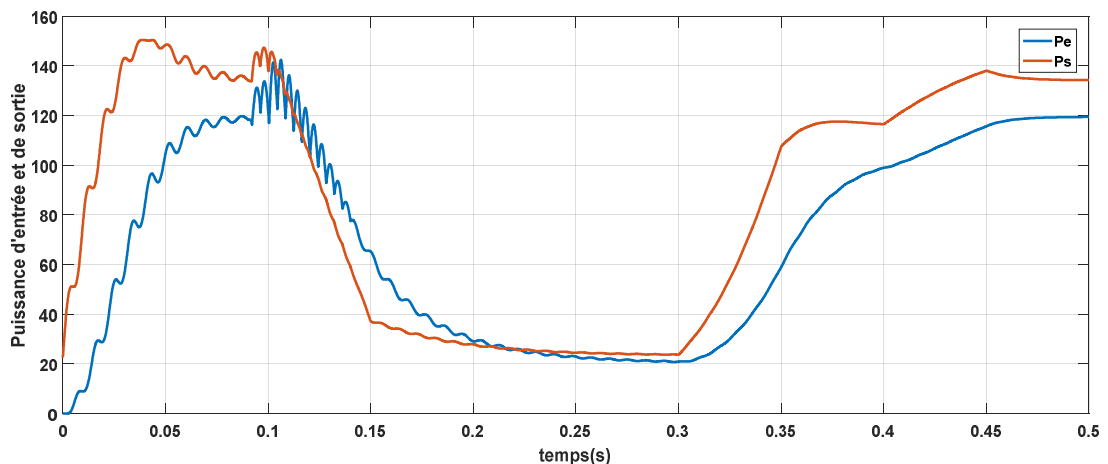


Figure II.34. Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (P&O).

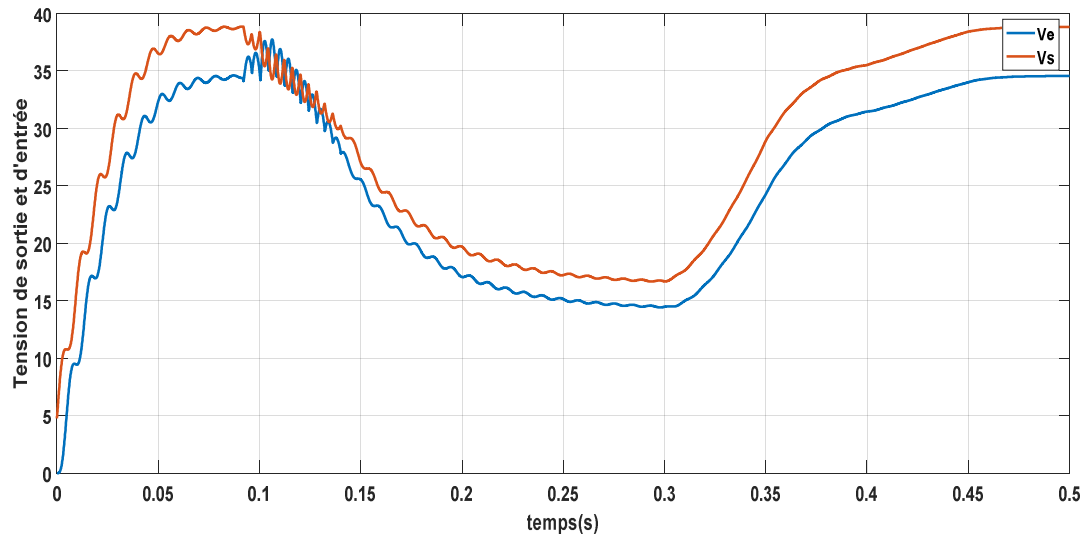


Figure. II.35. Courbe de tension $V(t)$ du GPV (P&O).

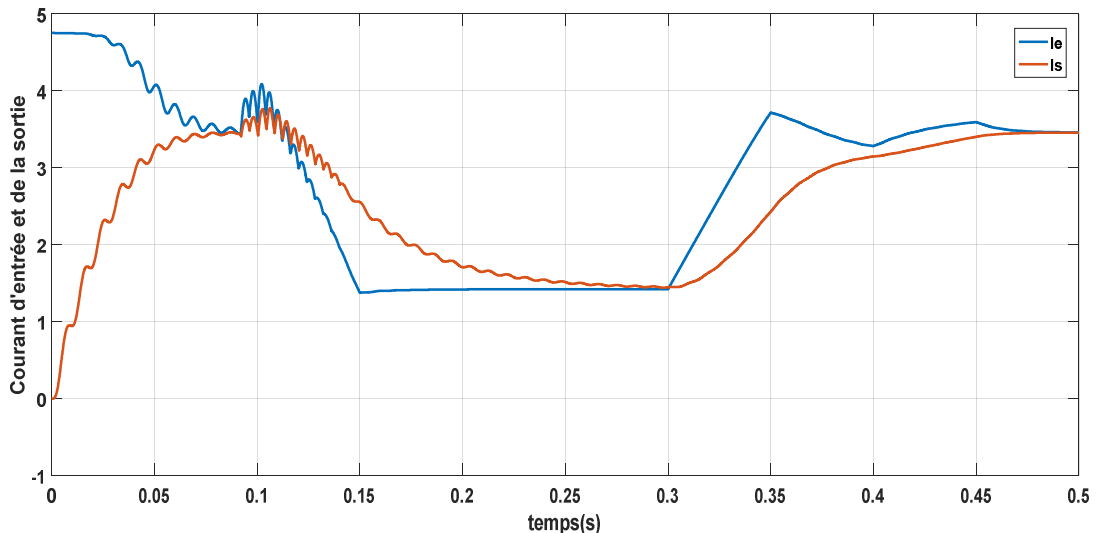


Figure. II.36. Courbe de Courant $I(t)$ du GPV (P&O).

On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement.

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que les courbes de la puissance, de la tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent.

Les résultats des Figures II.34 et II.35 montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale, nous remarquons que si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Par contre, si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

III.7.2.2. Température variable et éclairciment constant

Pour présenter l'effet de la température T sur la puissance, la tension et le courant, on fait maintenir l'éclairciment à une valeur constante $E= 1000 \text{ w/m}^2$ et on fait varier rapidement la température plusieurs fois de (25, 50 et 10) C° .

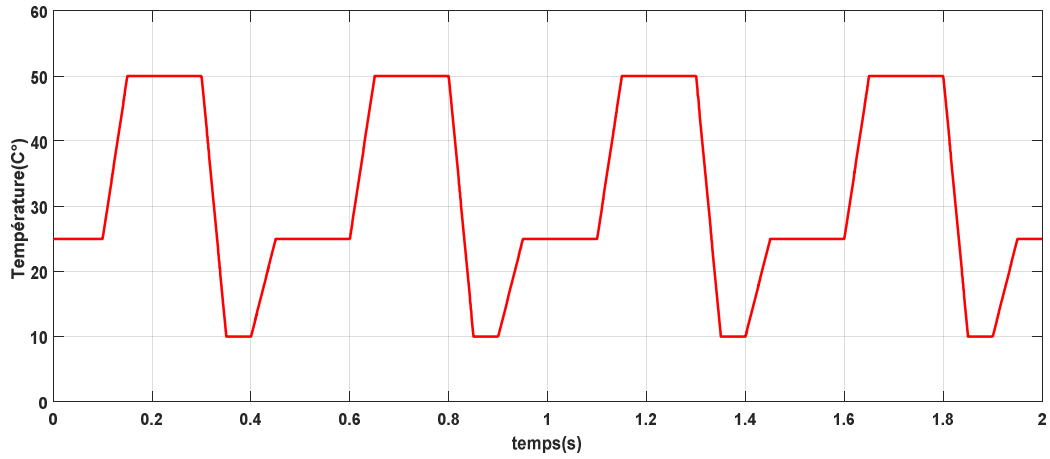


Figure II.37. Changement de la température.

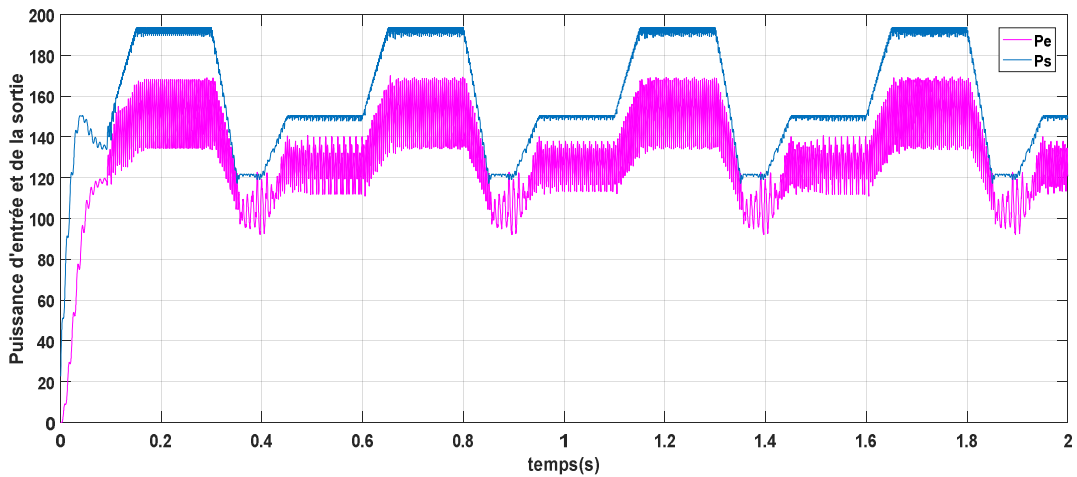


Figure II.38. Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (P&O).

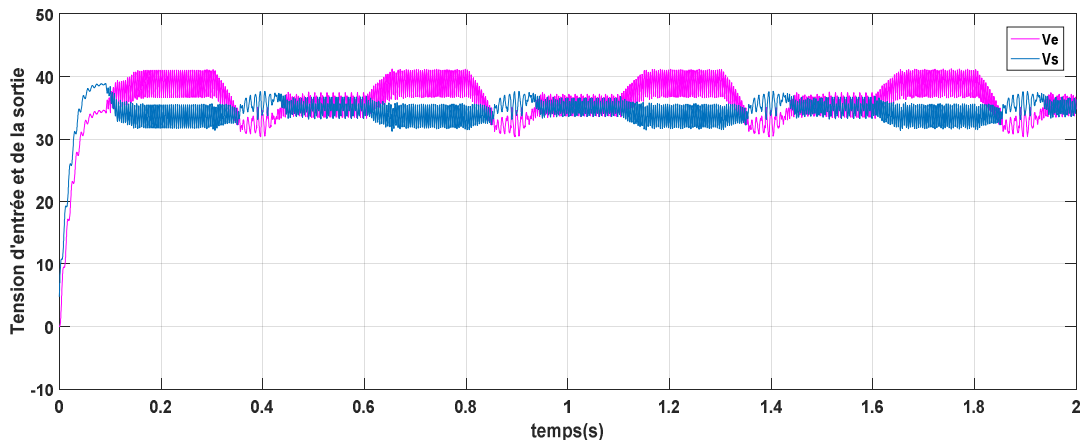


Figure II.39. Courbe de tension $V(t)$ du GPV (P&O).

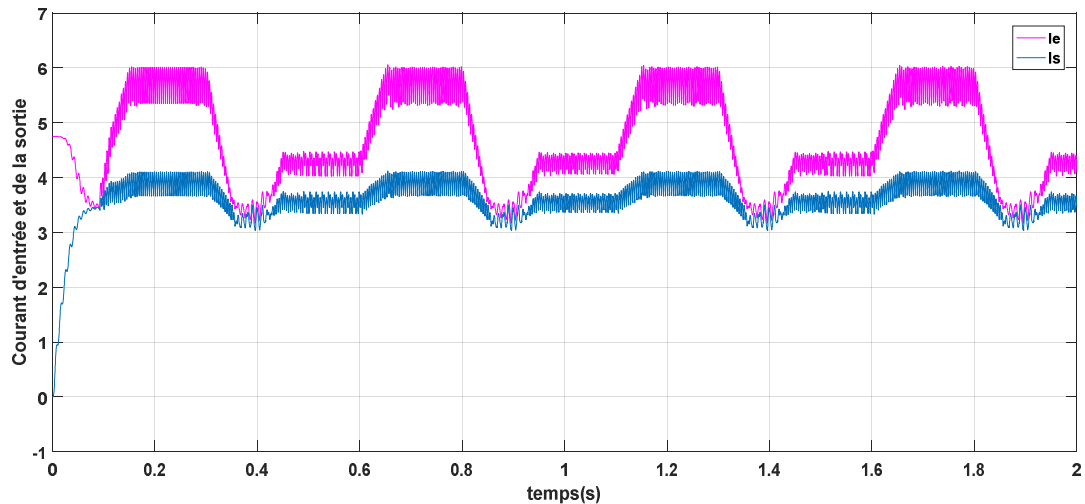


Figure II.40. Courbe de courant $I(t)$ du GPV (P&O).

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'une variation rapide de la température (augmentation ou diminution) provoque une variation considérable de la tension (V_{pv}), par contre le courant I_{pv} dans ce cas se varie légèrement. Ainsi on constate que les courbes de puissance, de tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Nous avons, par la suite, présenté le comportement électrique du générateur photovoltaïque. En effet, les simulations des caractéristiques principales de ce générateur, à savoir les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, ont bien montré l'influence de la température et de l'ensoleillement sur son comportement électrique.

Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Pour la partie commande MPPT, on a utilisé la méthode (P&O).

Les résultats de simulation montrent que le système est stable, et il atteint son état d'équilibre dans un temps assez court mais avec des oscillations au niveau de la réponse en puissance. Le chapitre qui suit fait l'objet d'amélioration de cette réponse par la technique de la logique floue.

Chapitre III

Contrôle flou de l'MPPT

Introduction :

La logique floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

La logique floue 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.

III.1.Généralité sur la logique floue

III.1.1.Historique :

La logique floue (fuzzy logic) a fait son apparition en 1965 avec les travaux de Lotfi Zadeh. Ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissance imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connus. En 1973, le professeur Zadeh publie un article dans l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques (dont la valeur est un mot et non un nombre). En 1974, Madani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à émerger (notamment au Japon). Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation [22].

III.1.2. Domaine d'application

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique. Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissance à priori ou acquise antérieurement. Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants [23] :

- Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible ;
- Pour les systèmes contrôlés par des experts humains ;
- Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou des règles de contrôle ;
- Pour les systèmes ayant de nombreuses entrées/sorties continues ou discontinues ;
- Pour les commandes MPPT des systèmes photovoltaïques.

III.1.3. Base de la logique floue

III.1.3.1. Principe de base de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. C'est pour prendre en compte de telles situations, qu'a été créée la notion d'ensemble flou.

La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle, chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (Figure III.1) ne sont « nets », mais « flous » ou « graduels ».

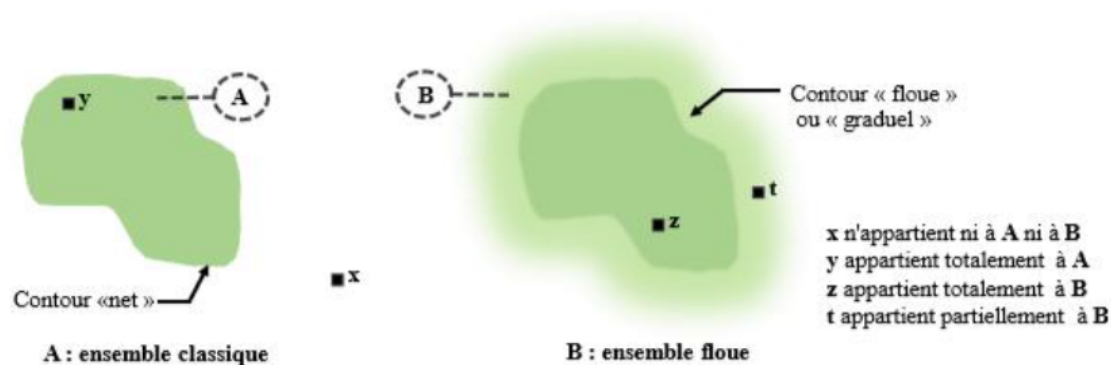


Figure III.1 Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.

III.1.3.2. Règles floues

III.1.3.2.1. La logique floue et l'intelligence artificielle

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications. Une règle est du type : SI « prédicat » ALORS « conclusion ».

a. Prédicat : Un prédicat (encore appelé prémisses ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON. b. Conclusion : La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs ET. Le traitement flou d'une règle comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans Figure III.2. [23]

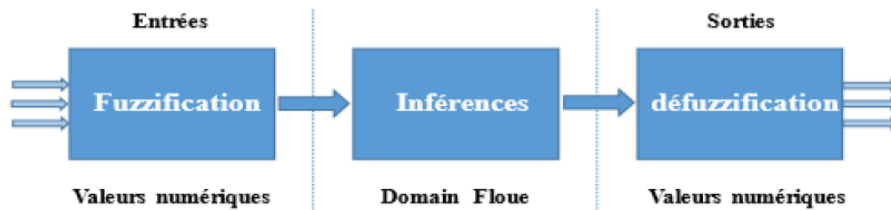


Figure III.2 Traitement flou.

III.1.3.2.2. Contrôleur de logique floue :

Les contrôleurs de logique floue ont été largement utilisés dans les processus industriels au cours des dernières années en raison de leur nature heuristique associée à la simplicité, de l'efficacité et de la prise en compte de sa variable multi-règles pour la variation des paramètres linéaires et non linéaires du système.

Le système flou est composé d'un système de règles basé sur la connaissance (Expertise); la partie principale de FLC est la connaissance de la base composée des règles If-Then. Fuzzy Logic est implémenté pour obtenir le point de tension de fonctionnement plus rapidement avec moins de dépassement et il peut également minimiser la fluctuation de tension après la reconnaissance du MPP. L'objectif de contrôle est de suivre la puissance maximale conduira par conséquent à un fonctionnement efficace du panneau PV. Pour concevoir le FLC, les variables qui représentent les performances dynamiques du système doivent être choisies comme entrée pour le contrôleur. [24]

La technique de la logique floue est composée de trois systèmes :

- ✚ La fuzzification;
- ✚ L'inférence;
- ✚ La défuzzification

La structure générale d'un contrôleur flou peut être présentée sous la forme suivante, figure III.3.

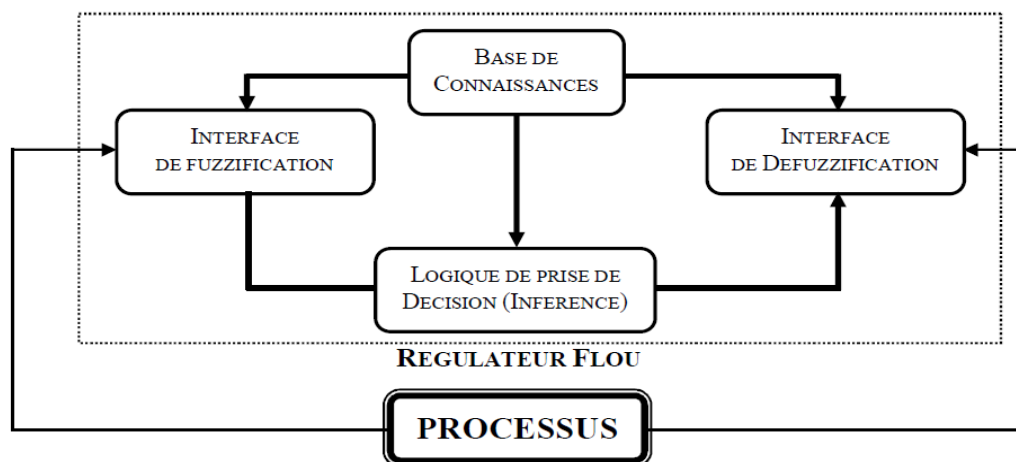


Figure III.3. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

III.1.3.2.2.a.Fuzzification

L'opération de fuzzification, permettant le passage des grandeurs réelles aux valeurs floues, consiste à déterminer les différents univers de discours correspondant aux domaines de variation des variables d'entrée et de sortie. Ensuite, définir pour chacune des variables ses sous-ensembles flous ainsi que leurs fonctions d'appartenance associée [10].

III.1.3.2.2.b. Inférence

L'opération d'inférence permet de relier les valeurs des variables linguistiques d'entrée à celles des variables linguistiques de sortie par une table de règles, qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système à commander. C'est un mécanisme qui, en manipulant les règles floues, établit une décision.

Il existe plusieurs méthodes d'inférence : Maximum-Minimum, Max-Produit, Somme Produit. Le nom de la méthode désigne les opérateurs utilisés respectivement pour l'agrégation des règles floues et l'implication floue [10].

III.3.2.2.c. Défuzzification

Elle consiste à définir précisément quelle doit être l'action sur le processus. En effet, le procédé ne peut pas interpréter des ordres linguistiques fournis par les méthodes d'inférence. L'opération de défuzzification permet de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des maxima. Il est toutefois reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs résultats. Notons que des blocs de normalisation et de dé-normalisation sont ajoutés respectivement en entrée et en sortie du régulateur flou afin qu'il soit transportable et adaptable même avec des paramètres différents [10].

III.2.MPPT du générateur photovoltaïque utilisant la logique floue :

Le mécanisme de poursuite du point maximum (MPPT) suit le nouveau point de puissance maximale modifié dans sa courbe correspondante à la variation de température et / ou l'insolation. Il est utilisé pour extraire la puissance maximale du module PV et transférer cette énergie à la charge. Un convertisseur DC /DC agit comme une interface entre la charge et le module. La MPPT changera le rapport cyclique pour maintenir la puissance transférée à partir du module solaire photovoltaïque à la charge au point maximum.

MPP par logique floue mesure les valeurs de tension et de courant à la sortie du module PV, ensuite il calcule la puissance par la relation ($P = VI$) pour extraire les entrées du contrôleur.

La sortie du contrôleur représente le rapport cyclique pour commander l'ouverture et la fermeture du convertisseur DC/DC. La figure III.4 Présente le schéma bloc d'un système MPPT flou.

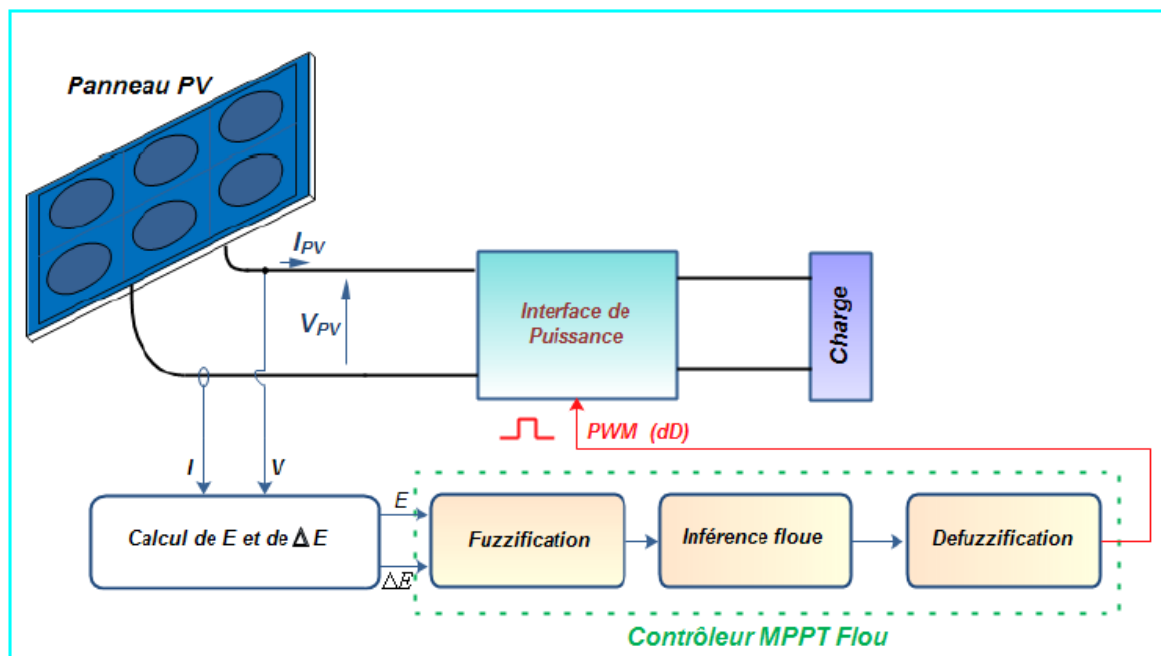


Figure III.4. Système MPPT flou

III.2.1.MPPT à base de la logique floue

Le principe est de construire un système flou avec pour entrées :

- Le changement de la puissance du générateur dP/dV
- Sa dérivée d^2P/dV^2

Et comme sortie :

- La variation du rapport cyclique du convertisseur : ΔD

Le contrôleur flou examine la puissance PV à chaque échantillon, et détermine la variation de la puissance par rapport à la tension (dp/dv). Si cette valeur est supérieure à zéro le dispositif de commande modifie le rapport cyclique de la modulation de largeur d'impulsion pour augmenter la tension jusqu'à ce que la puissance soit maximale ou la valeur (dp/dv) = 0, si cette valeur est inférieure à zéro le contrôleur modifie le rapport cyclique pour diminuer la tension jusqu'à ce que la puissance soit maximale, comme indiqué sur la figure III.5.

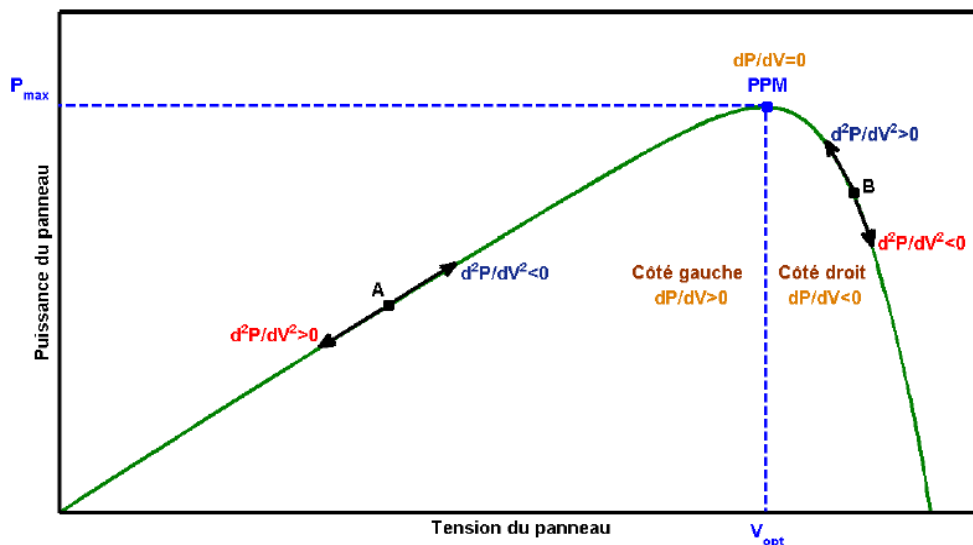


Figure III.5 Direction de la poursuite du point de puissance maximale

		$d^2 P / dV^2$		
		Négatif	Zéro	Positif
dP / dV	Négatif	Diminuer V	Diminuer V	Nul
	Zéro	Nul	Nul	Nul
	Positif	Nul	Augmenter V	Augmenter V

Tableau III.1. Règles de direction de la poursuite du PPM d'un panneau photovoltaïque

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la defuzzification.

III.2.1.1.Fuzzification : La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément, et la puissance peut être ainsi calculée :

Les deux variables d'entrées E (erreur) et ΔE (variation d'erreur) à l'échantillon K sont définie par :

$$E(K) = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)}$$

$$\Delta E(K) = E(K) - E(K-1)$$

Où $P(K)$ est la puissance instantanée du générateur photovoltaïque.

$E(K)$ indique si le point de fonctionnement à l'instant K est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale sur la courbe caractéristique du PV, tandis que $\Delta E(K)$ exprime la direction de déplacement de ce point.

La valeur de l'entrée $E(k)$ nous indique de quel côté est situé le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale MPP. Si cette valeur est positive, cela veut dire que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point MPP, si par contre elle est négative alors le point de fonctionnement est à droite du point MPP. L'entrée $dE(k)$ nous permet d'estimer le degré d'éloignement entre le point de fonctionnement et le point MPP. Si sa valeur est petite, cela veut dire que le point de fonctionnement est encore loin du point MPP, si par contre cette valeur est élevée cela indique que le point de fonctionnement est très proche du point MPP. Ces deux entrées nous permettent de prendre la décision appropriée sur la valeur de la sortie dD du pas du rapport cyclique. Augmenter le rapport cyclique du convertisseur DC-DC permet d'augmenter la tension du point de fonctionnement et inversement.

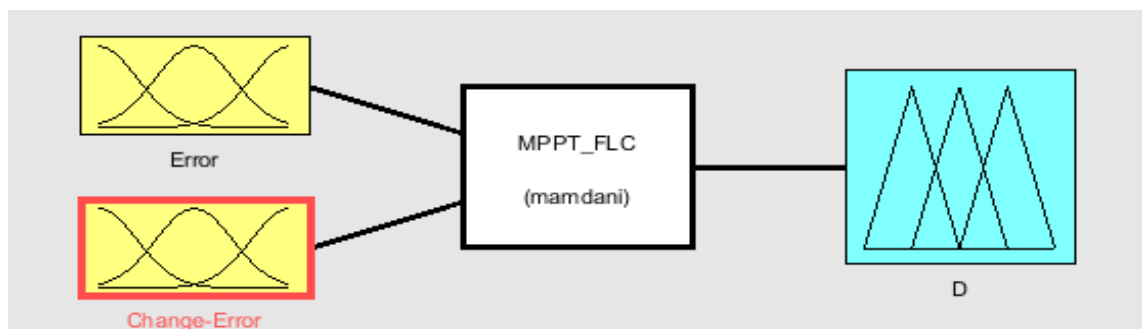


Figure III.6. Configuration globale du contrôleur à logique floue sous Matlab/Simulink

III.2.1.2. Les variables linguistiques

En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en termes des variables linguistiques suivantes : PG : (très petit /very small), P : (petit/small), M : (moyenne/medium), G : (grand/large) et GG : (très grand : very large). Le Figure.III.7 Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée erreur E , (b) L'entrée changement d'erreur dE et (c) La sortie D . Montre les fonctions d'appartenance du cinq sous-ensemble flou de base pour les variables d'entrée et de sortie.

Les formes triangulaires et trapézoïdales ont été adoptées pour les fonctions d'appartenance.

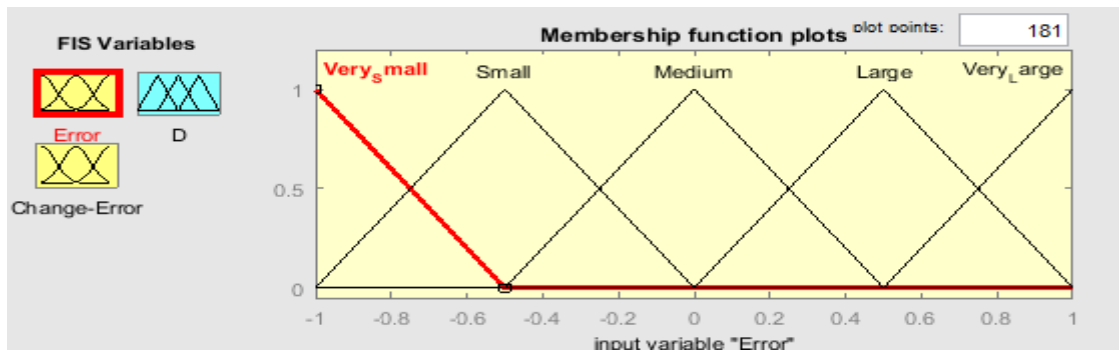


Figure III.7.a. Tracés de la fonction d'appartenance de l'erreur E.

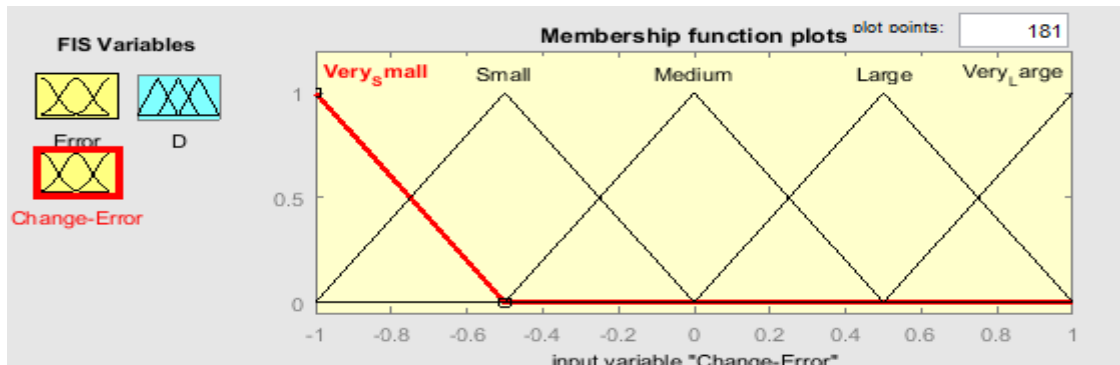


Figure III.7.b. Tracés de la fonction d'appartenance du changement de l'erreur dE.

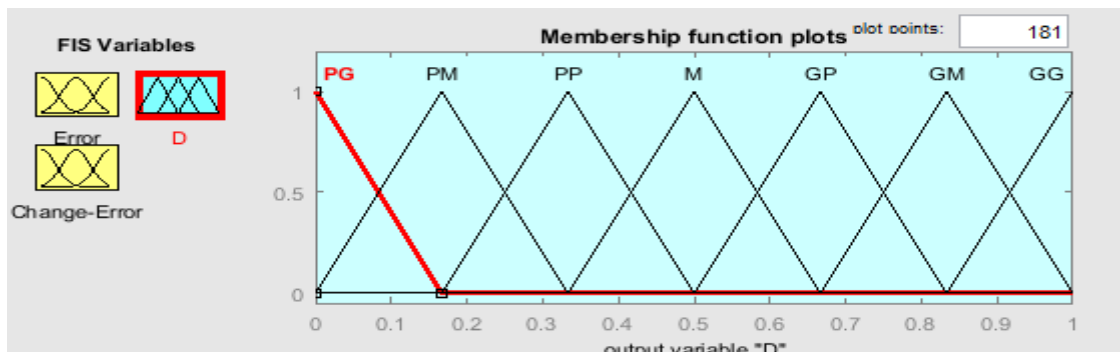


Figure III.7.c Tracés de la fonction d'appartenance du rapport cyclique D.

Les limites de la fonction d'appartenance d'entrée et de sortie appliquées dans le système sont déterminées par les connaissances antérieures du système concerné. Variation des paramètres.

III.2.1.3. Système d'inférence

L'algorithme de règles floues collecte un ensemble de règles de contrôle floues dans un ordre spécifique. Ces règles sont utilisées pour contrôler un système afin de répondre aux exigences de performances souhaitées et elles sont conçues à partir de la connaissance experte du système sous contrôle. L'inférence floue du FLC est basée sur la méthode de Mamdani qui est associée à la composition max-min.

Le système d'inférence dans un contrôleur à logique floue peut être subdivisé en trois parties :

III.2.1.3.1.Base de règles: Il se compose d'un certain nombre de règles If-Then pour le bon fonctionnement du contrôleur. Le côté If de la règle est appelé l'antécédent et le côté Then est appelé la conséquence. Ces règles peuvent être considérées comme des réponses similaires apportées par le processus des pensées humaines et le contrôleur utilise les variables d'entrée linguistiques, obtenir après fuzzification pour le fonctionnement des règles

III.2.1.3.2.Base de données: Elle comprend toutes les fonctions d'appartenance définies par l'utilisateur qui doivent être utilisées dans les règles.

III.2.1.3.3.Mécanisme de raisonnement: Il traite essentiellement les règles données et selon des règles particulières et une condition donnée nous fournit le résultat requis.

III.2.1.3.4.Méthodes d'inférence (les règles floues) : La Figure III.8 montre l'évolution de la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension dp/dv les points de 1 à 10 montre le sens de variation et l'éloignement de la valeur courant par rapport au point maximum de puissance. Le Tableau III.2 représente la méthode que nous avons suivie pour extraire les règles floues à partir de la compréhension du système en fonctionnement avec la méthode P&O. Ceci implique que : "si le point de fonctionnement est éloigné du point de puissance maximale MPP au côté gauche et le changement de la pente dans la courbe P-I est environ zéro, alors lever le rapport cyclique [23].

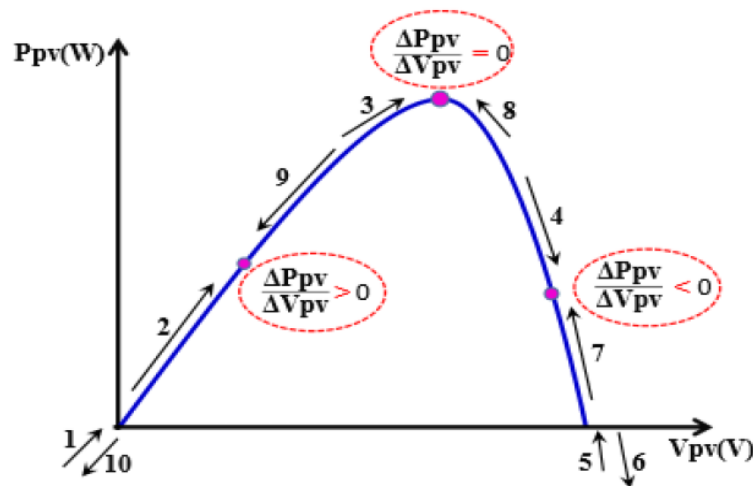


Figure III.8 La variation du point de puissance maximal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP	+	+	0	-	-	+	+	0	-	-
ΔV	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$E = \Delta P/\Delta V$	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
ΔE	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
D	GG	GP	M	PP	PG	GP	GP	M	PP	PG

Tableau III.2 Les règles du contrôleur flou.

Le Tableau III.2 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les fonctions d'appartenance floues de l'erreur E et celle du changement de l'erreur dE et la variation du rapport cyclique dD. Dans le cas de la commande floue, la règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée E doive toujours être zéro.

La base de règles définit les règles pour la relation souhaitée entre les variables d'entrée et de sortie est illustré dans le tableau III.3.

DP \ DV	PG	PM	PP	M	GP	GM	GG
PG	GG	GM	GP	PP	PP	PM	PG
PM	GM	PG	GP	PP	PP	PP	PM
PP	GP	GP	GP	PP	PP	PP	PP
M	PP	GP	PP	M	M	GP	PP
GP	PP	PP	PP	GP	GP	PP	GP
GM	PM	PP	PM	GP	GP	GM	GG
GG	PG	PM	GP	GP	GP	GM	GM

Tableau III .3 règles implémentées dans le contrôleur de logique floue.

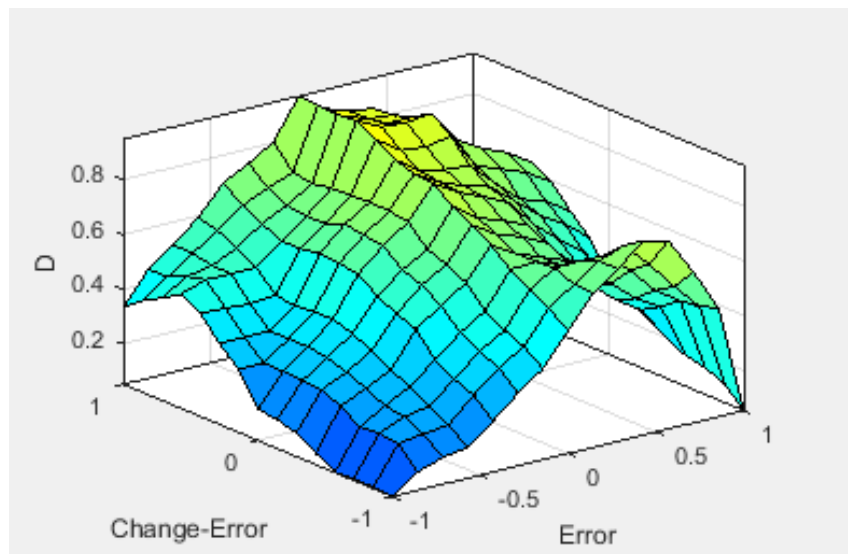
Le Tableau III.3 inclut 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur tel que la puissance maximum du panneau solaire est vérifiée.

1. If (Error is Very_Small) and (Change-Error is Very_Small) then (D is PG) (1)
2. If (Error is Very_Small) and (Change-Error is Small) then (D is PG) (1)
3. If (Error is Very_Small) and (Change-Error is Medium) then (D is PM) (1)
4. If (Error is Very_Small) and (Change-Error is Very_Large) then (D is PP) (1)
5. If (Error is Very_Small) and (Change-Error is Large) then (D is M) (1)
6. If (Error is Very_Large) and (Change-Error is Very_Small) then (D is PG) (1)
7. If (Error is Very_Large) and (Change-Error is Small) then (D is PM) (1)
8. If (Error is Very_Large) and (Change-Error is Medium) then (D is PP) (1)
9. If (Error is Very_Large) and (Change-Error is Very_Large) then (D is M) (1)
10. If (Error is Very_Large) and (Change-Error is Large) then (D is GP) (1)
11. If (Error is Small) and (Change-Error is Very_Small) then (D is PM) (1)
12. If (Error is Small) and (Change-Error is Small) then (D is PP) (1)
13. If (Error is Small) and (Change-Error is Medium) then (D is M) (1)
14. If (Error is Small) and (Change-Error is Very_Large) then (D is GP) (1)
15. If (Error is Small) and (Change-Error is Large) then (D is M) (1)
16. If (Error is Large) and (Change-Error is Very_Small) then (D is GM) (1)
17. If (Error is Large) and (Change-Error is Small) then (D is M) (1)
18. If (Error is Large) and (Change-Error is Medium) then (D is GP) (1)
19. If (Error is Large) and (Change-Error is Very_Large) then (D is GM) (1)
20. If (Error is Large) and (Change-Error is Large) then (D is GG) (1)
21. If (Error is Medium) and (Change-Error is Very_Small) then (D is M) (1)
22. If (Error is Medium) and (Change-Error is Small) then (D is GP) (1)
23. If (Error is Medium) and (Change-Error is Medium) then (D is GM) (1)
24. If (Error is Medium) and (Change-Error is Very_Large) then (D is GG) (1)
25. If (Error is Medium) and (Change-Error is Large) then (D is GG) (1)

	If	and	Then
	Error is	Change-Error is	D is
	<input type="text" value="Very_Small"/> <ul style="list-style-type: none"> Very_Large Small Large Medium none 	<input type="text" value="Very_Small"/> <ul style="list-style-type: none"> Small Medium Very_Large Large none 	<input type="text" value="PG"/> <ul style="list-style-type: none"> PM PP GP M GM

III.2.1.3.5. Défuzzification :

L'entrée pour le processus de défuzzification est un ensemble flou et la sortie est un nombre unique qui doit être appliqué au système, pour la sortie finale souhaitée selon le système, une valeur non floue de sortie de contrôle est requise, donc une étape de défuzzification est obligatoire. Il existe différentes méthodes de défuzzification qui sont utilisées de nos jours, mais la méthode la plus courante est le centroïde de l'aire et la bissectrice de l'aire. Dans le schéma proposé, la méthode de défuzzification.



III.3. Avantages et inconvénients du réglage par logique floue

III.3.1. Avantages Le réglage par logique floue présente les avantages suivants [25]:

- Le non nécessité de la modélisation du système.
- La possibilité d'implémenter des connaissances linguistiques de l'opérateur du processus.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (systèmes non linéaire et difficile à modéliser).
- La disponibilité de système de développement efficace, soit par microprocesseur ou PC, soit par des circuits intégrés.

III.3.2. Inconvénients

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix de grandeur mesurée).
- Détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).

- L'approche artisanale et asymptotique (implantation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toutes circonstances (en l'absence d'un modèle valable).
- La cohérence des inférences non garanties (possibilité d'apparition de règles d'inférences contradictoires).

III.4. Analyse et simulation de méthode d'extraction de puissance maximale par le contrôleur basé sur la logique floue

La figure (III.9) : présente Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (FLOU), composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pointées la tension et le courant de sortie du module. Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque BP 3150s 150W de BP, un hacheur Boost caractérisé par : $C_1 = 2e^{-3}F$, $C = 2e^{-3}F$, $L = 0.002H$, $R_1 = 1\text{Ohm}$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type logique flou et une charge $R_{ch} = 10\text{ Ohm}$.

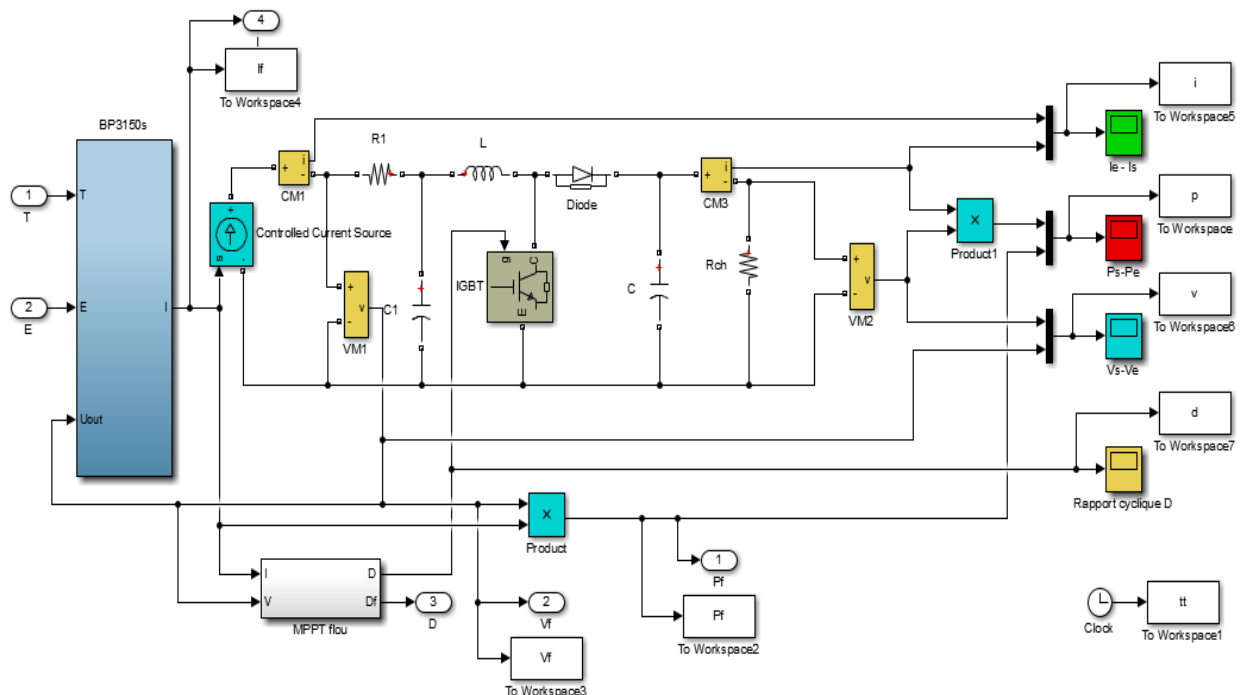


Figure III.9 Schéma block SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT Logique flou.

On représente le modèle mathématique de contrôleur flou sous le programme MATLAB
Comme suit :

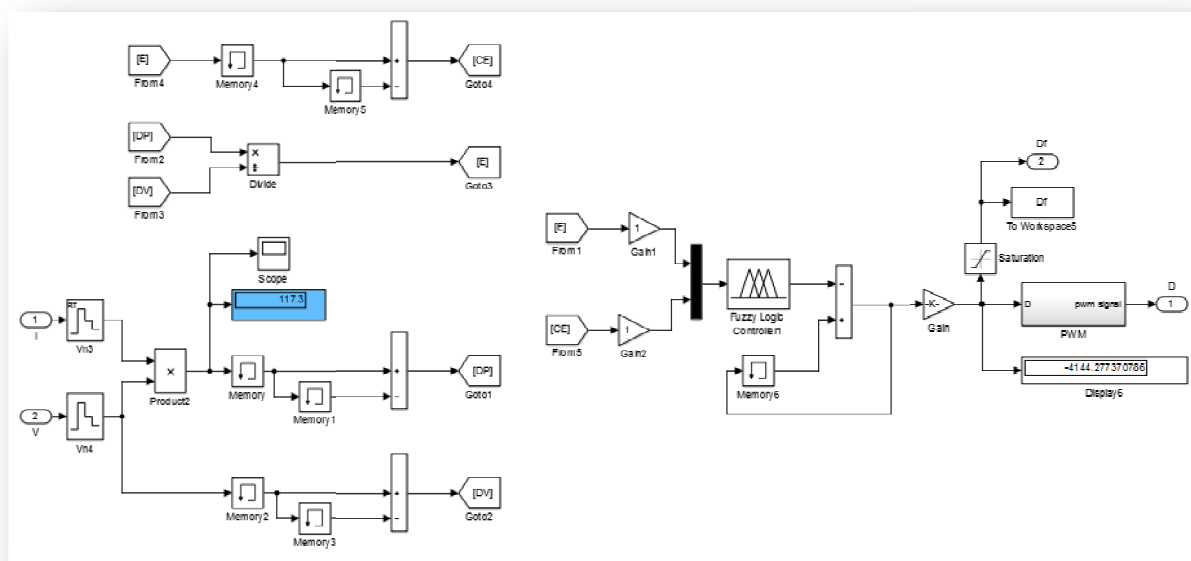


Figure III.10 Schéma de simulation de l'algorithme de contrôleur flou.

La Figure (III.10) illustre le contrôleur flou remplaçant le contrôleur à base de la méthode (P&O) dans le but de réaliser des comparaisons entre les deux méthodes de contrôle et d'en tirer les conclusions.

III.4.1. Résultats de simulation de la commande MPPT floue

III.4.1.1. Fonctionnement avec conditions environnementales stables

Dans ce cas de simulation, les paramètres (température $T=25C^{\circ}$ et l'ensoleillement $E=1000w/m^2$) sont maintenus constants. Les figures (III.11) à (III.13) représentent respectivement les caractéristiques : $P(t)$, $V(t)$, $I(t)$.

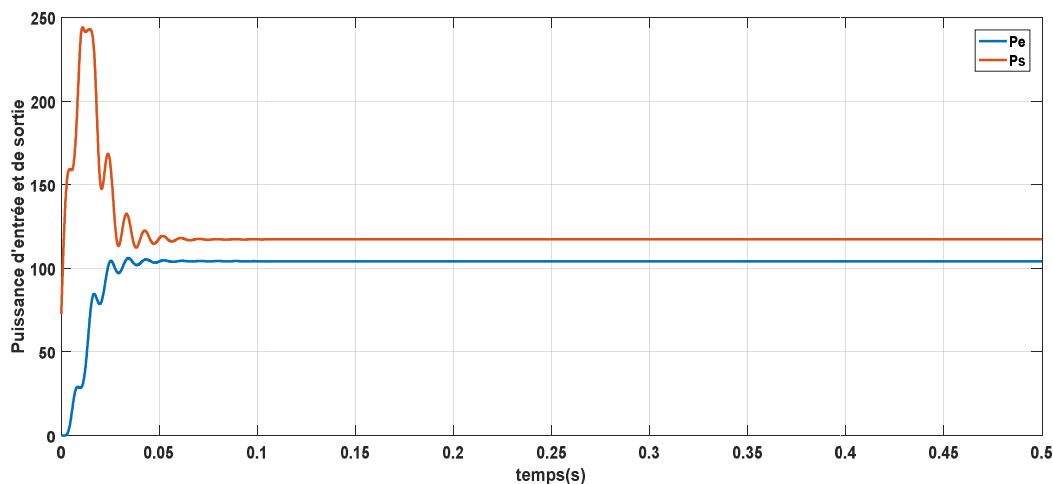


Figure III.11. Puissance de sortie et d'entrée $P(t)$.

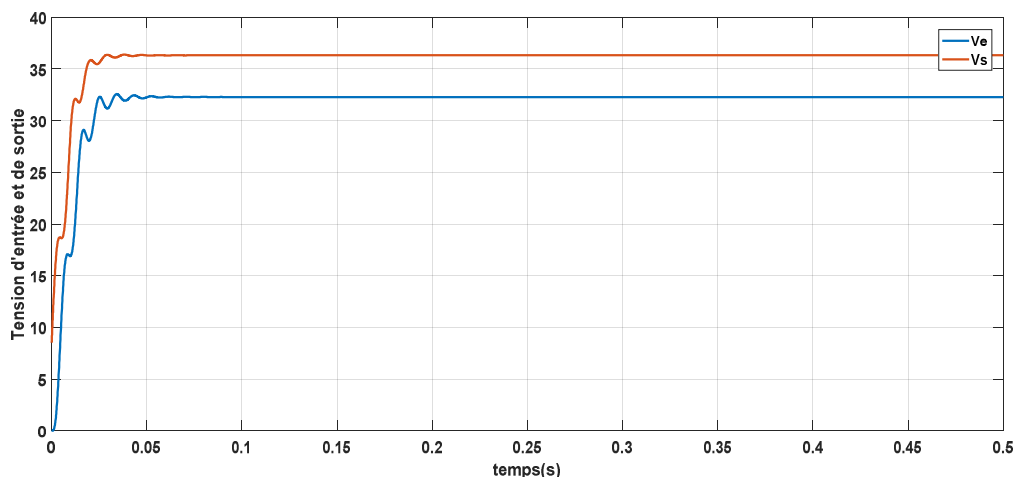


Figure III.12. Tension V_{pv} de sortie et d'entrée.

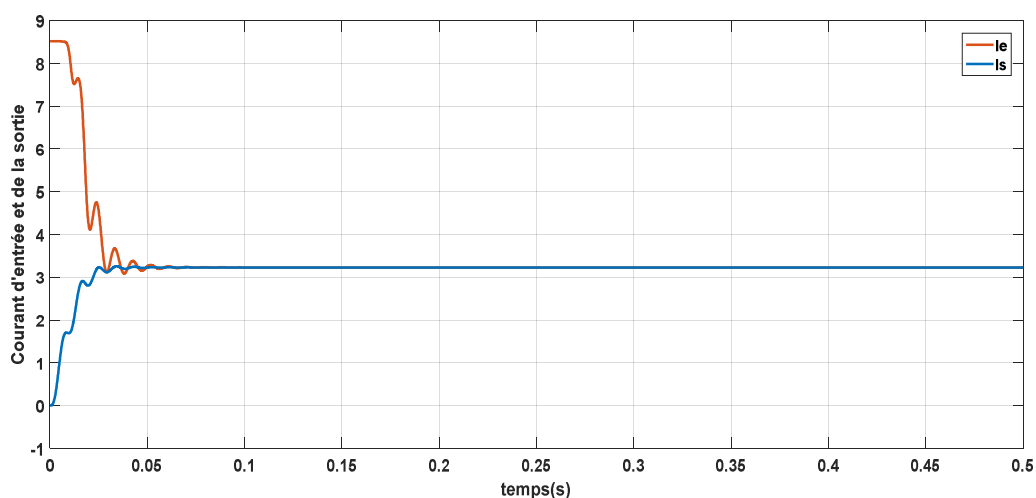


Figure III.13. Courant I_{pv} de sortie et d'entrée.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût.

III.4.1.2. Fonctionnement avec conditions environnementales changeantes

III.4.1.2.1. Fonctionnement sous ensoleillement variable

La Figure III.14 donne la courbe pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 300 800 1000] W/m².

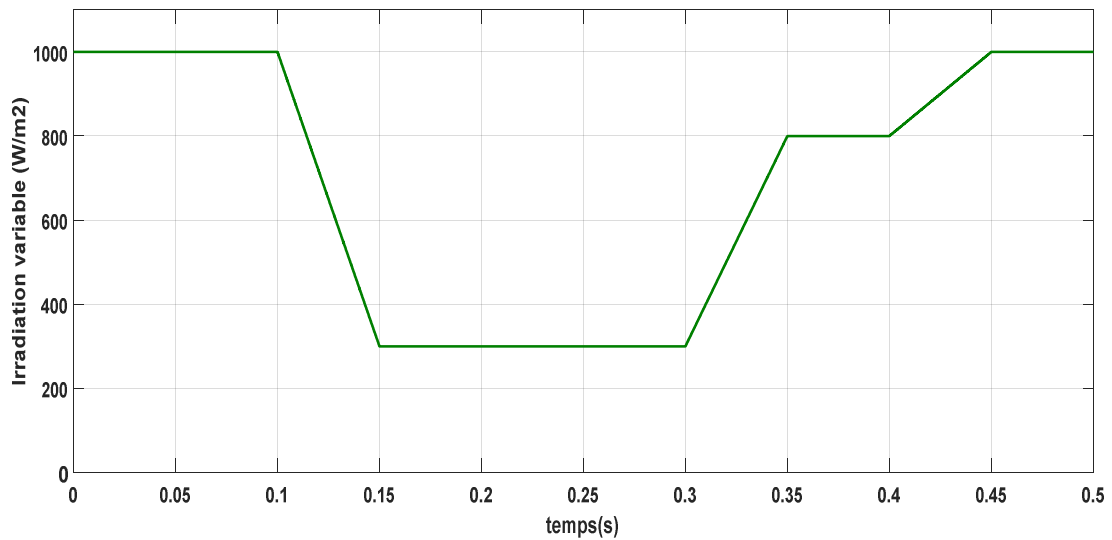


Figure III.14. Changement d'ensoleillement E .

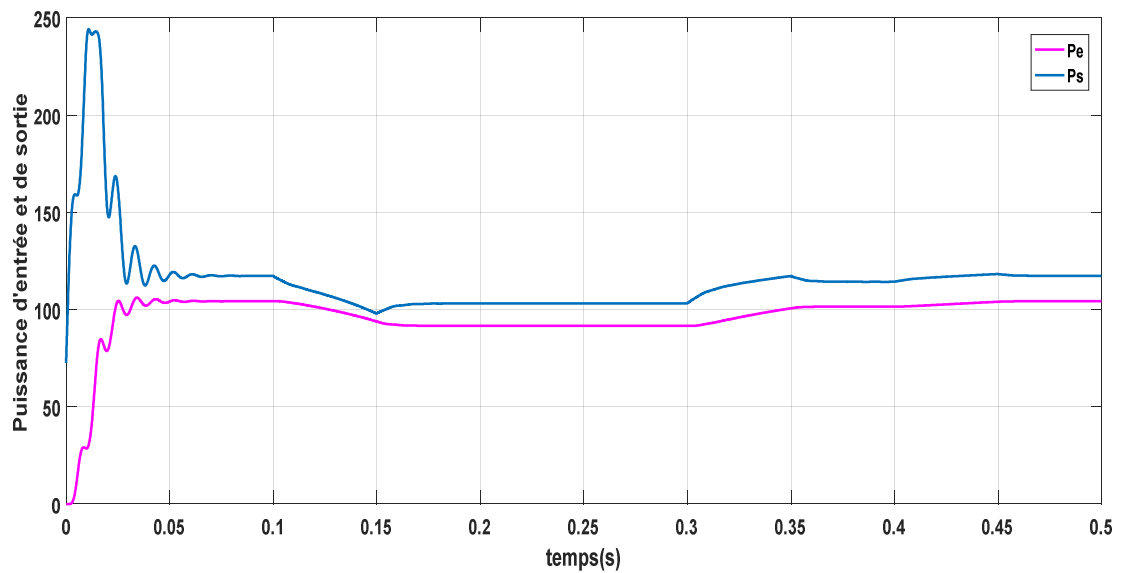


Figure III.15. Variation de la puissance dans le cas de changement d'irradiation

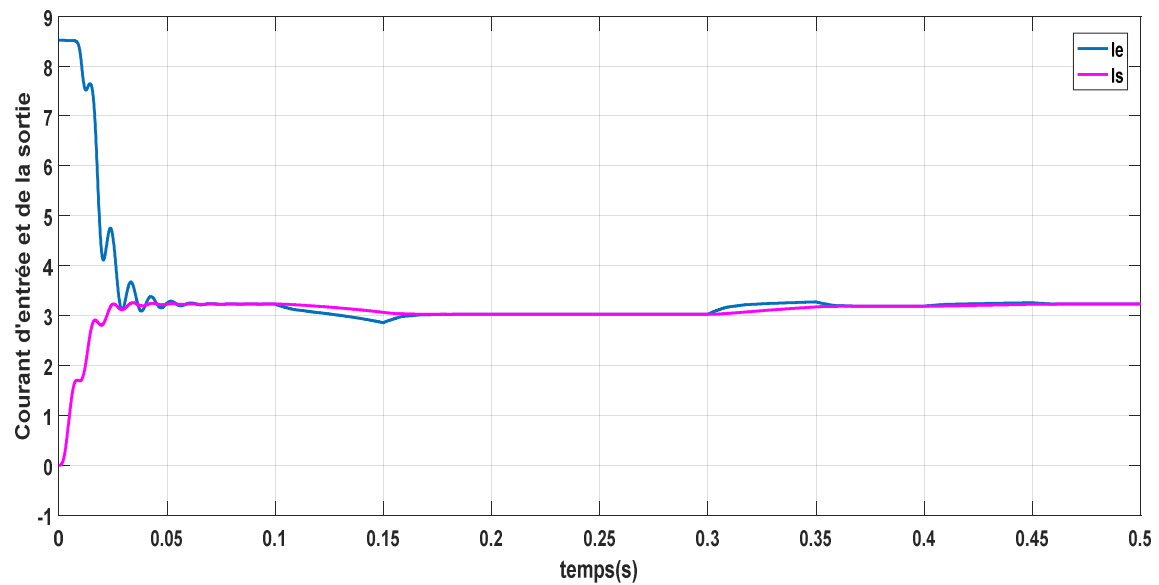


Figure III.16. Courbe de Courant $I(t)$ du GPV (flou).

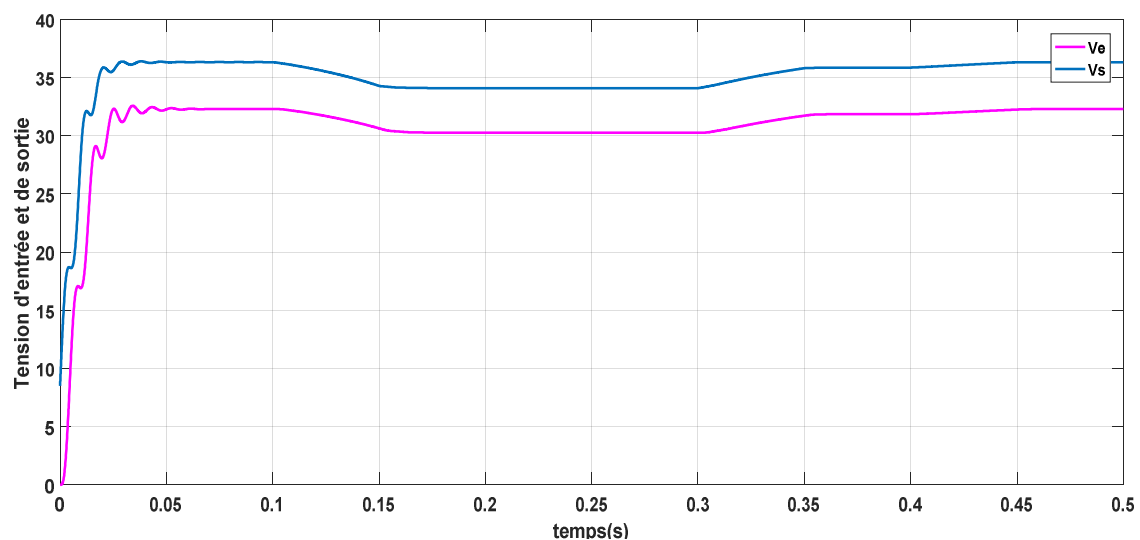


Figure III.17. Courbe de tension $V(t)$ du GPV (flou).

III.4.1.2.2. Fonctionnement sous une variation de température

Les figures (III. (19, 20,21)) Montrent les courbes de puissance, de tension et courant de commande des techniques MPPT pour une variation de la température. La température s'élève de 10°C à 50°C sous un ensoleillement constant de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Parameters
Time values:
<input type="text" value="[0 1e-1 1.5e-1 3e-1 3.5e-1 4e-1 4.5e-1 5e-1]"/>
Output values:
<input type="text" value="[25 25 50 50 10 10 25 25]"/>

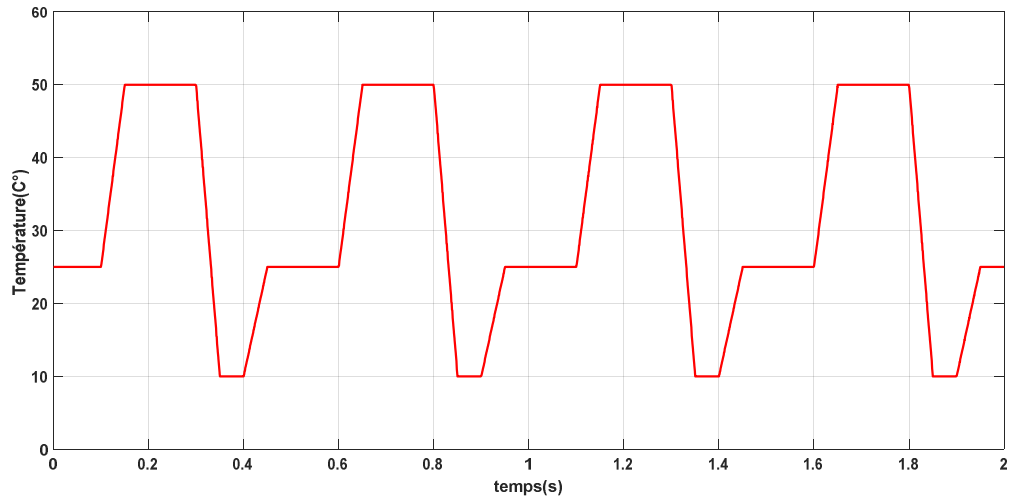


Figure III.18. Changement de la température.

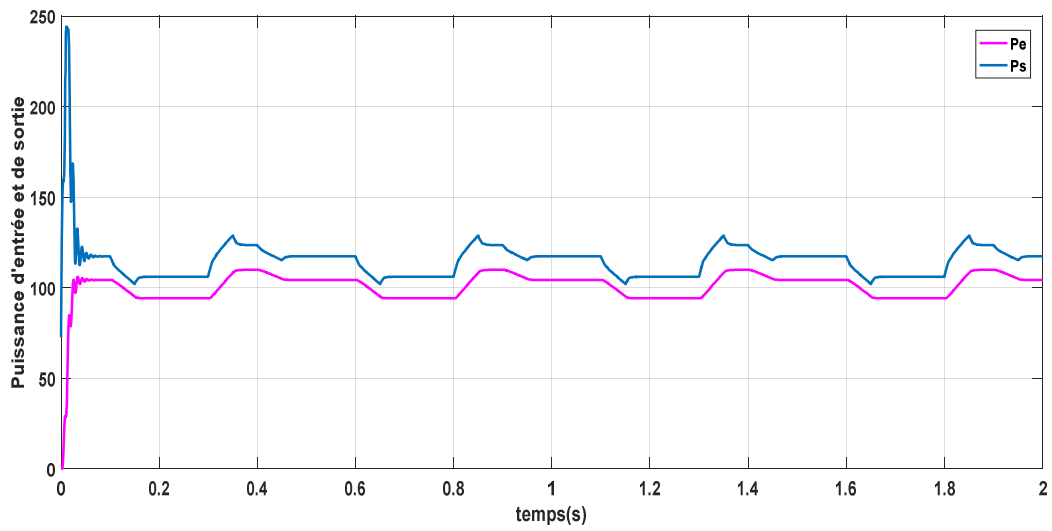


Figure III.19. Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (flou).

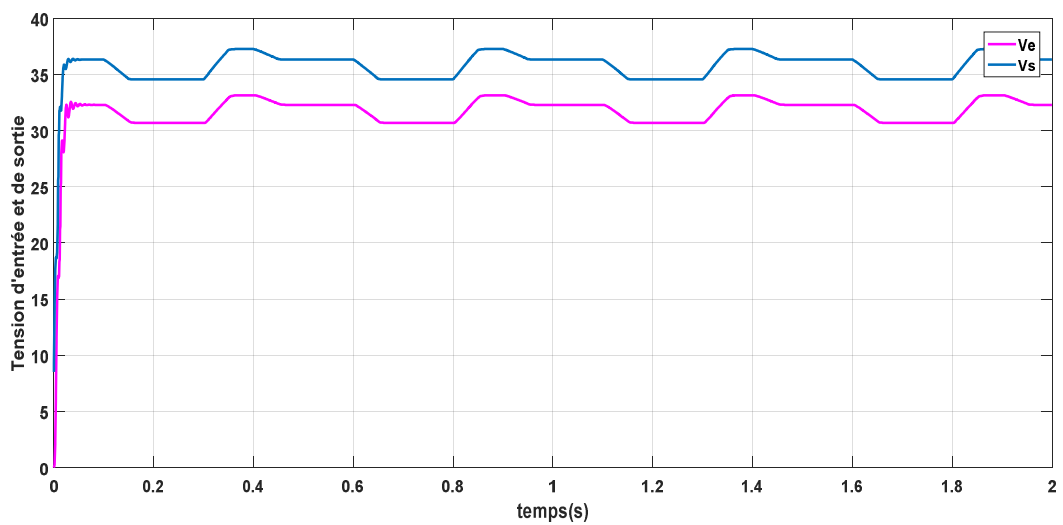


Figure III.20. Courbe de tension $V(t)$ du GPV (flou).

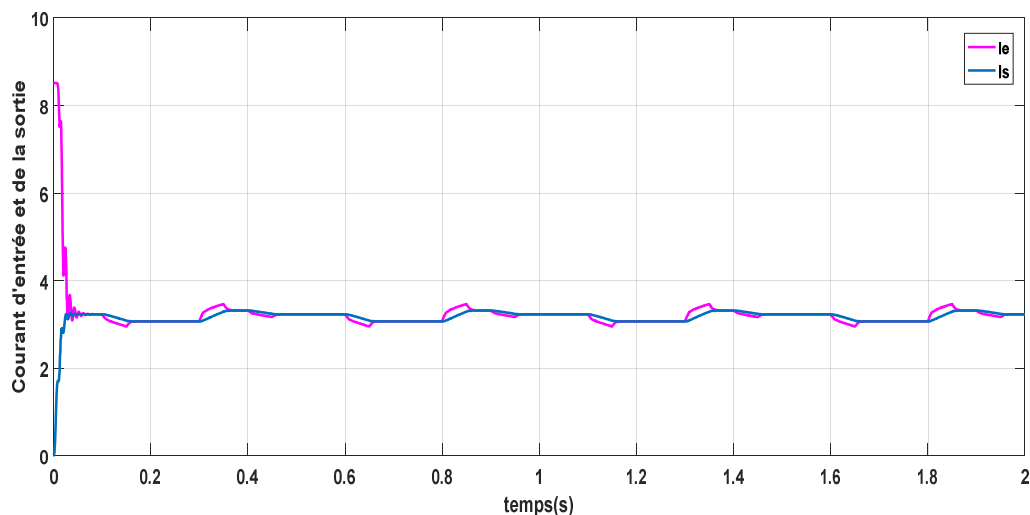


Figure III.21. Courbe de courant $I(t)$ du GPV (flow).

III.5. Etude comparative entre MPPT Floue et MPPT classique (P&O)

Pour montrer l'intérêt de la commande floue par rapport à la commande classique (P&O), on a fait une étude comparative et on a obtenu les résultats de simulation suivants :

III.5.1. Fonctionnement avec conditions environnementales stables

Dans ce cas de simulation, les paramètres (température $T=25C^{\circ}$ et l'ensoleillement $E=1000w/m^2$) sont maintenus constants. Les figures (III.23, III.24, III.25), montrent, à titre de comparaison, les résultats de simulation pour la MPPT floue et les méthodes P&O.

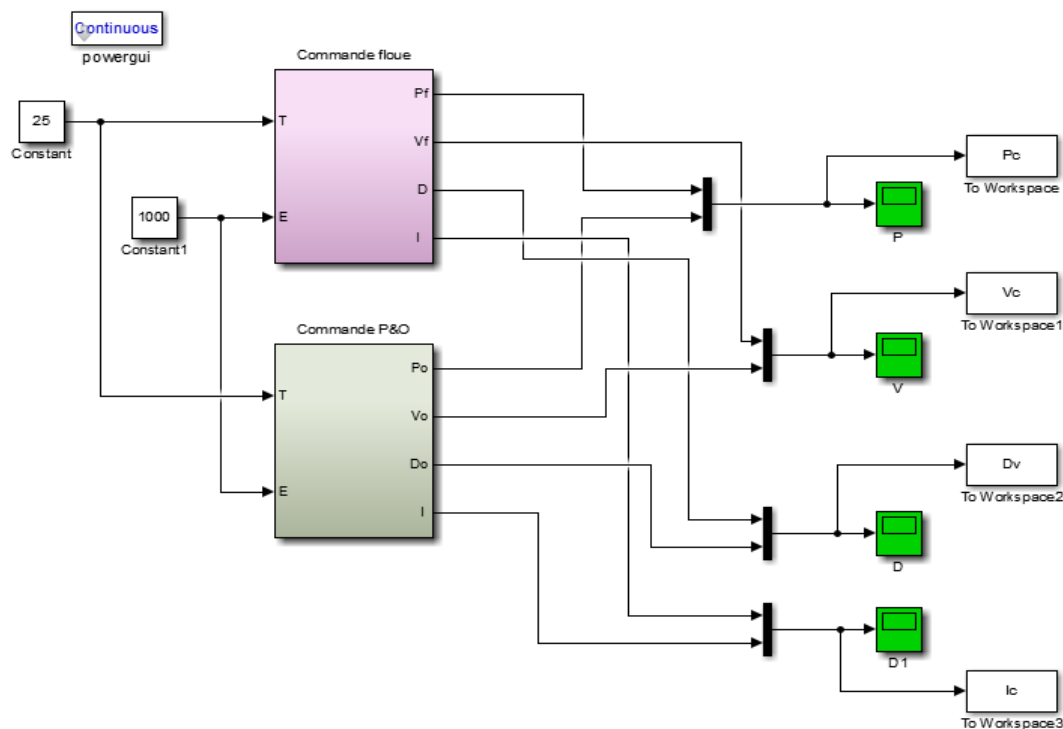


Figure III.22. Modèle « SIMULINK » du commande flou et P&O.

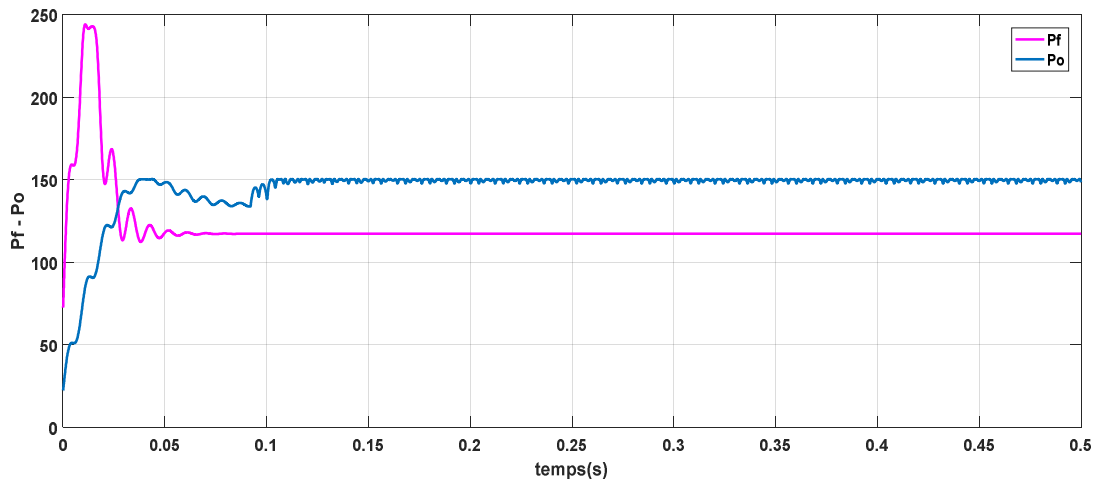


Figure.III.23. Caractéristique $P(t)$.

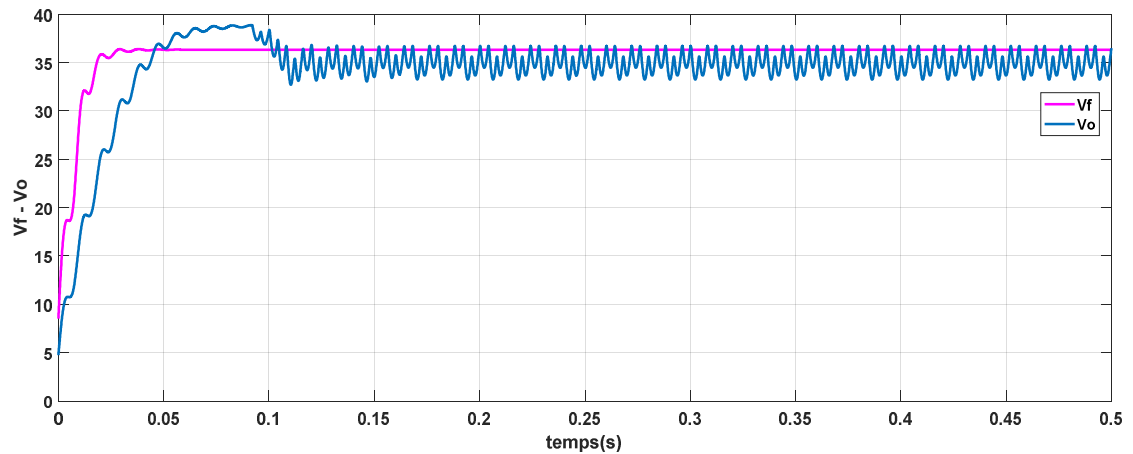


Figure.III.24. Caractéristique $V(t)$.

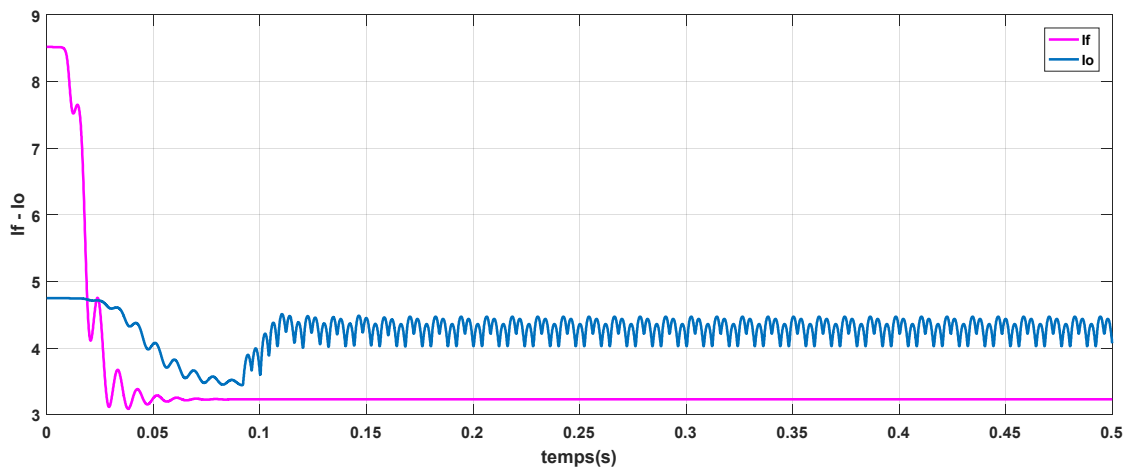


Figure.III.25. Caractéristique $I(t)$.

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

Résultats de la simulation

La puissance de sortie du module PV et du convertisseur avec deux techniques MPPT différentes est obtenue dans MATLAB / Simulink à un rayonnement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . Les résultats de la simulation montrent la mise en œuvre de la logique floue et de la technique P&O sur le suivi du point de puissance maximale est donnée sur la figure [III.23]. Les variations de tension correspondantes dans VMPP et VO pour ces convertisseurs sont représentées sur la figure [III.24].

III.5.2. Fonctionnement avec conditions environnementales changeantes

III.5.2.1. Fonctionnement sous ensoleillement variable

Afin d'évaluer le temps de réponse des deux mécanismes de poursuite, ces derniers sont soumis à des variations des conditions de l'ensoleillement. Pour voir le comportement du système face aux changements de l'éclairement on va lui faire subir les tests suivants :

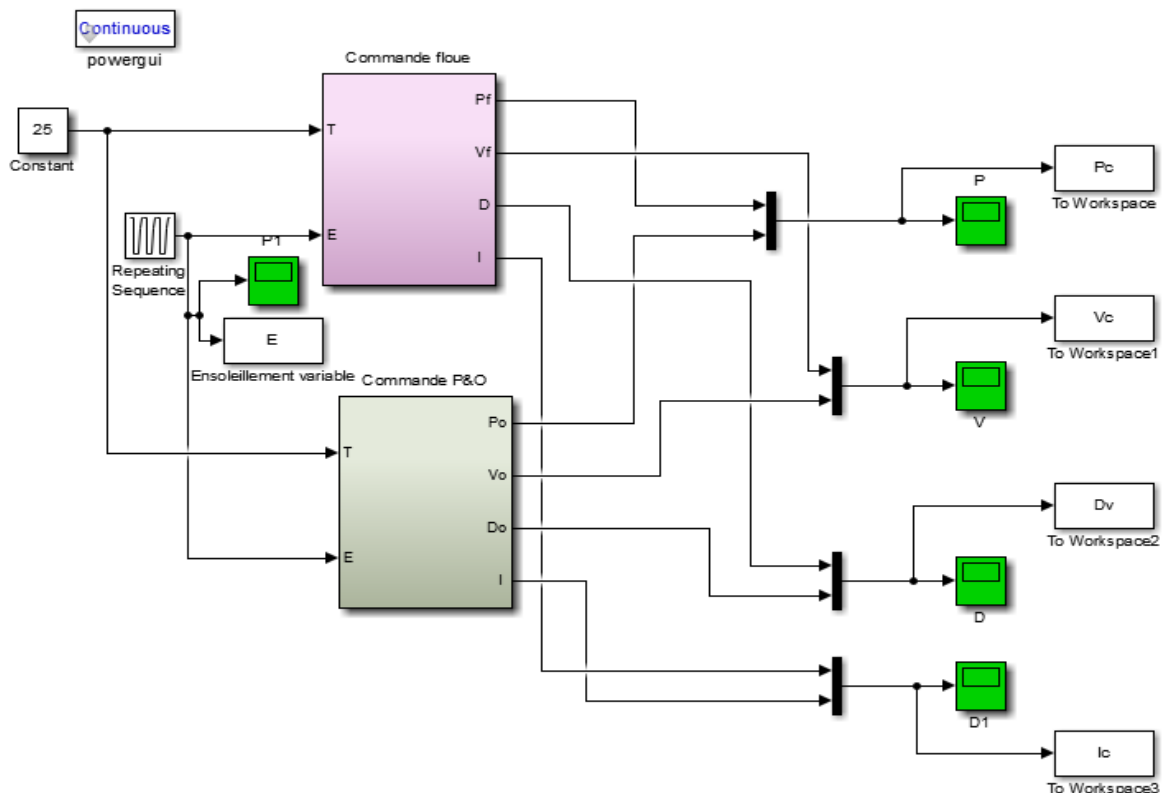


Figure III.26. Modèle « SIMULINK » la commande floue et P&O sous ensoleillement variable.

- Sous une augmentation rapide de l'ensoleillement de 100 à 1000 W/m^2 et la température de cellules a été maintenue à une valeur constante de 25°C . Dans ces conditions de fonctionnement la commande floue devient plus significatif. Ce cas est observé dans les stations mobiles (Exemple : véhicule solaire) lors de changement brusque de l'angle d'incidence des rayons solaires.

- Sous des changements lents d'ensoleillement, (exemple : pour des stations fixes lors de variation de l'insolation tout au long de la journée, ou bien le passage des nuages...).

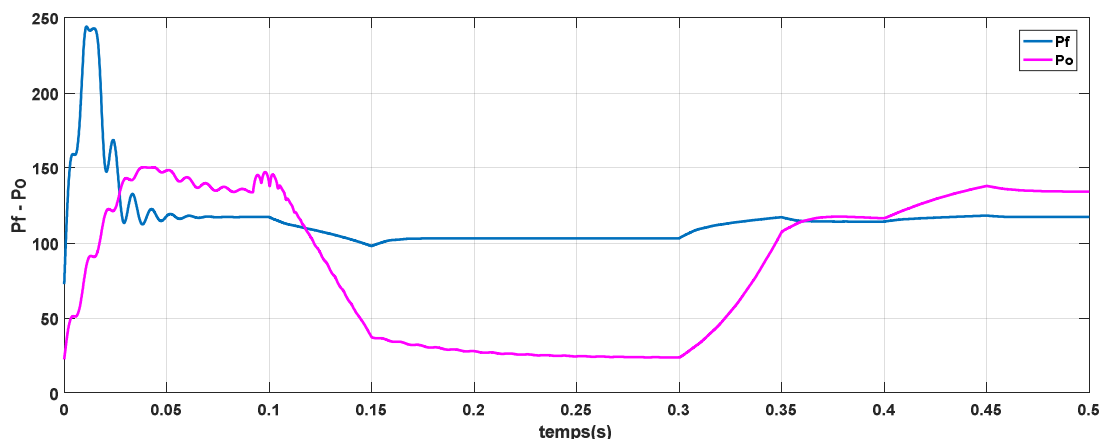


Figure III.27. Comparaison des divers signaux MPPT pour la variation $P(t)$ sous une Ensoleillement variable.

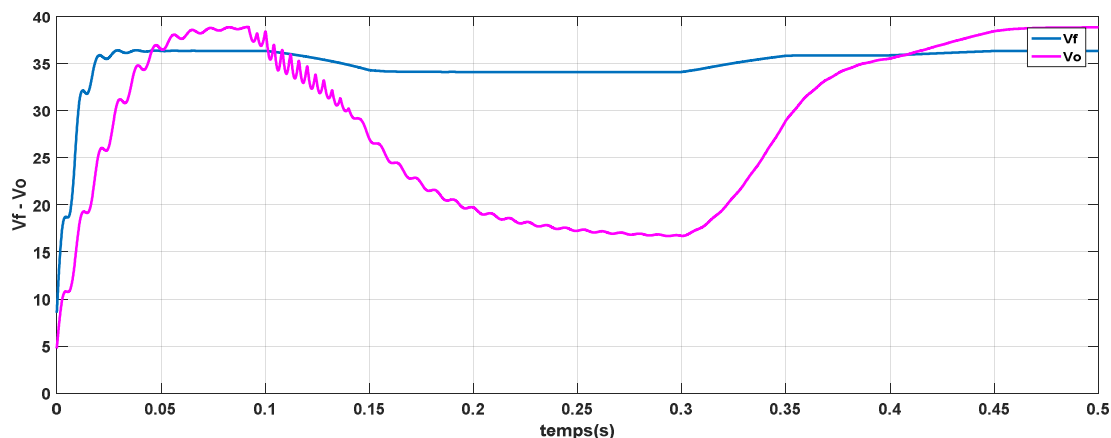


Figure III.28. Comparaison des divers signaux MPPT pour la variation $V(t)$ sous une Ensoleillement variable.

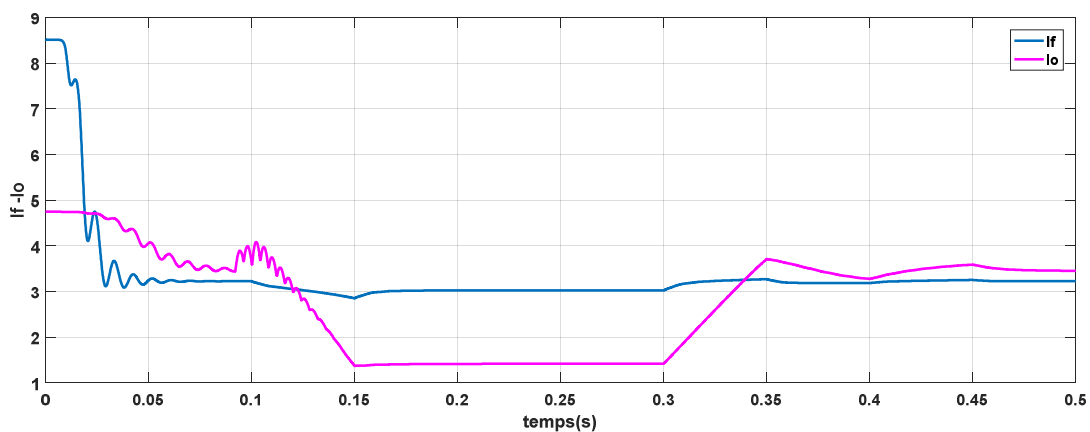


Figure III.29. Comparaison des divers signaux MPPT pour la variation $I(t)$ sous une Ensoleillement variable.

On voit que la MPPT floue, dans ce cas, est plus rapide avec une faible oscillation autour du MPP.

III.5.2.2. Fonctionnement sous température variable

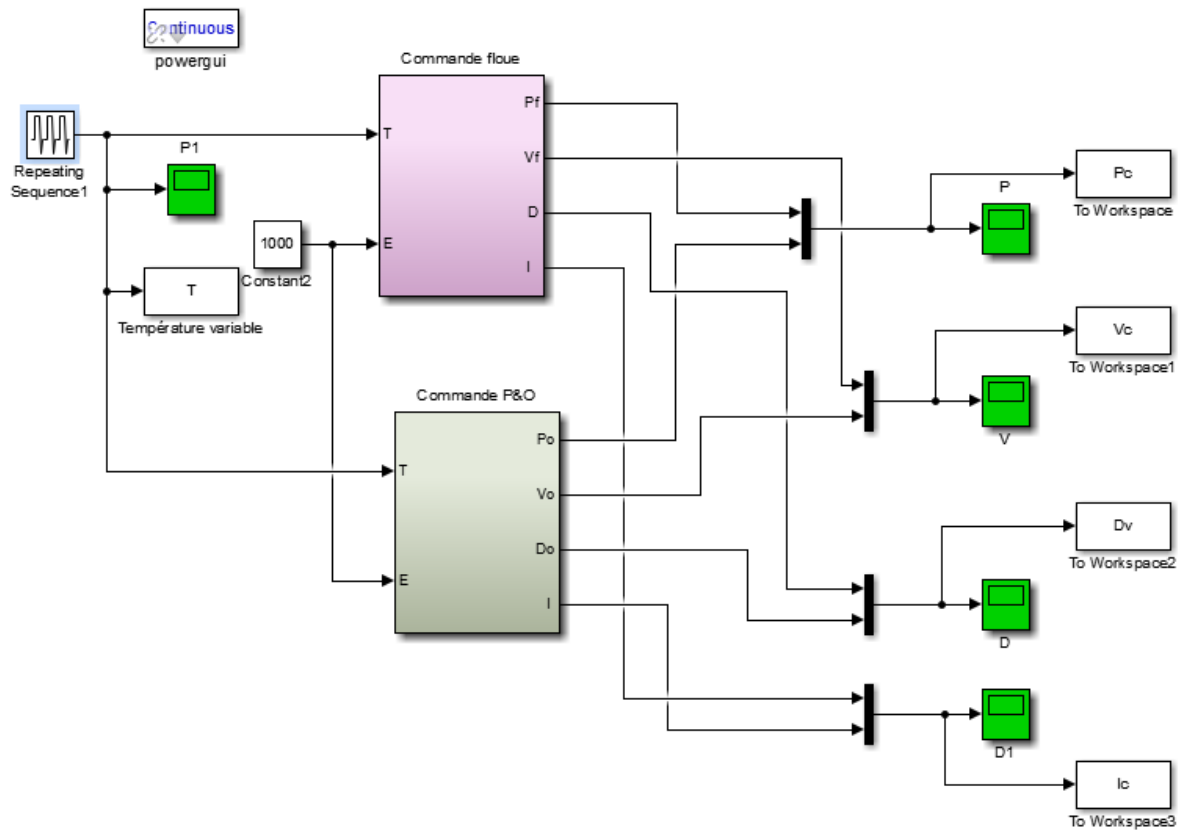


Figure III.30. Modèle « SIMULINK » la commande floue et P&O sous température variable.

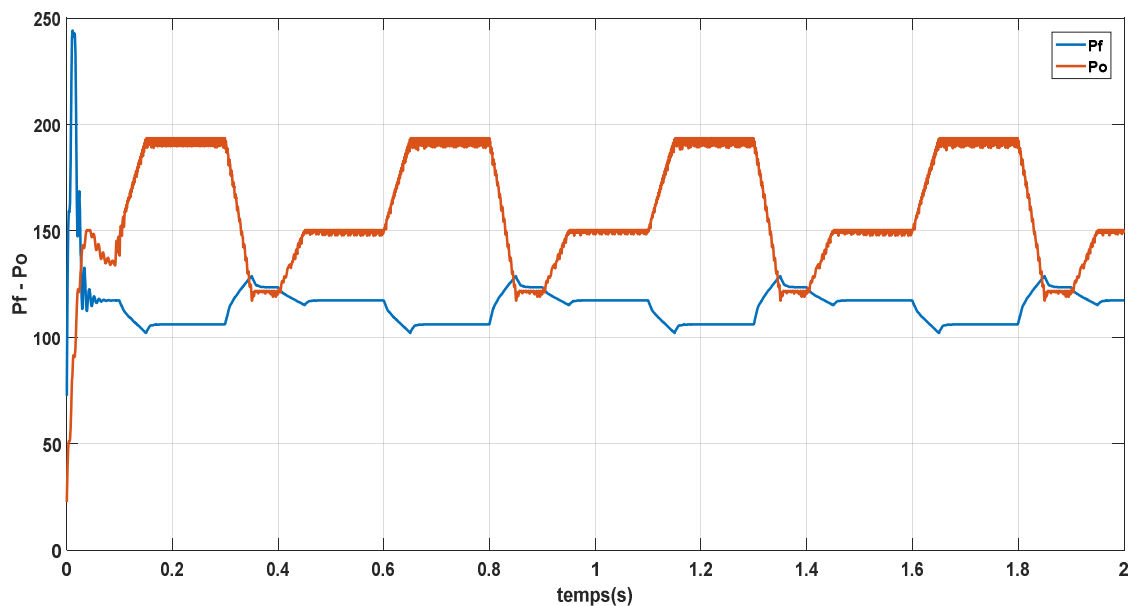


Figure III.31. Puissance $P(t)$ pour les divers algorithmes MPPT sous la température variable.

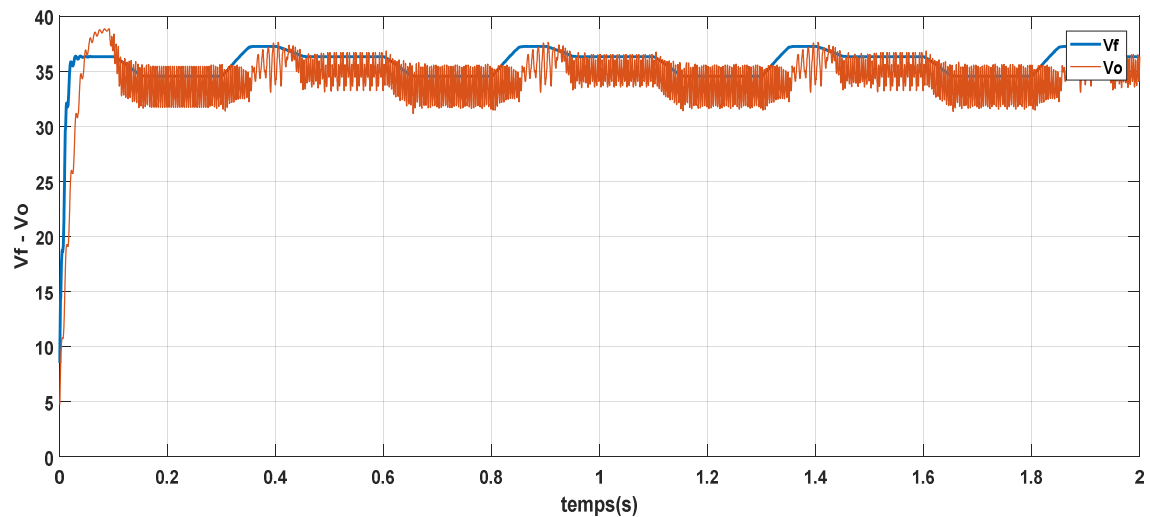


Figure III.32. Tension $V(t)$ pour les divers algorithmes MPPT sous la température variable.

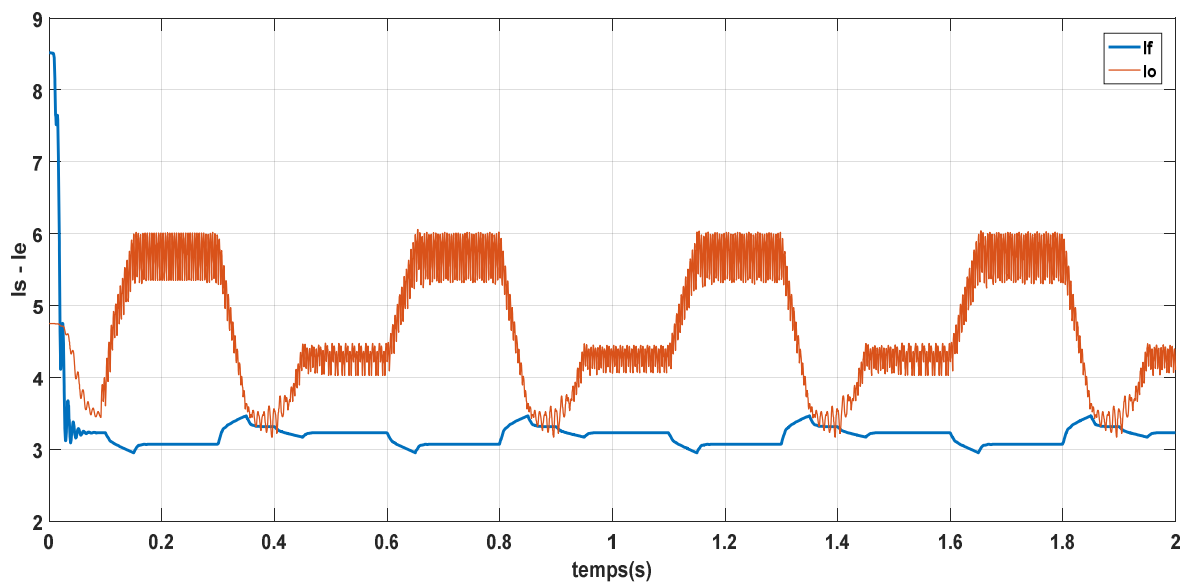


Figure III.33. Courant $I(t)$ pour les divers algorithmes MPPT sous la température variable.

Les figures (III. (31, 32 et 33)) montrent la rapidité de poursuite de la technique MPPT floue, et l'absence des oscillations autour du MPP qui limite les pertes de la puissance. Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'insolation et de température, ont été obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou et (P and O).

Conclusion

Les résultats obtenus avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle perturbation et observation. Ainsi le contrôle par logique flou peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Une étude comparative des différentes commandes proposées (classiques et modernes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par logique floue optimise mieux la puissance de fonctionnement du système.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau. Cependant, cette énergie souffre encore du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de la puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques dans certaines régions. L'optimisation de cette production revient à concevoir un système PV performant capable de faire face aux changements atmosphériques.

Dans ce contexte, nous avons commencé tout d'abord par donner une étude sur la problématique de la production électrique dans le monde, puis nous avons étudié le contexte de l'énergie solaire photovoltaïque dans le chapitre I en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type.

Le deuxième chapitre en deux parties, dans la première partie nous avons La modélisation d'un panneau photovoltaïque sous l'environnement Matlab-Simulink a été présentée en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur DC /DC Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Quant à la partie de commande MPPT, faisant objet de cette étude, elle a été bien détaillée dans la deuxième partie en présentant le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Cette puissance est alors quasiment transférée à la charge en ajustant le rapport cyclique D du signal de commande de l'interface d'énergie d'un convertisseur DC/DC boost.

Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. Nous avons développé les algorithmes les plus utilisés à savoir la méthode P&O et la commande MPPT Flou qui ont été soumises à différents tests avec variation des paramètres atmosphériques (température et irradiation).

Le troisième chapitre nous avons synthétisé le MPPT flou en rappelant les éléments de base relatifs à la théorie de la logique floue, les définitions de base sur les variables linguistiques, les sous-ensembles flous, ainsi les différentes étapes de conception d'un contrôleur flou.

A la fin de ce chapitre et pour une étude plus profonde nous avons fait une étude comparative entre les méthodes délibérés. La commande MPPT soit classique (P&O) ou basée sur le Floue logique permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que les commande MPPT basée sur le Floue logique conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Nous avons constaté que le choix du nombre et la forme des fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous utilisés pour chaque variable linguistique ainsi la répartition de ces valeurs sur l'univers de discours influent explicitement sur les performances du contrôleur. Les gains de normalisations affectent aussi les performances de la réponse du système en régime transitoire. De plus, les gains de sorties du contrôleur jouent un rôle très important dans la stabilité du système et l'élimination de l'erreur en régime permanent.

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire et les commandes MPPT classiques et floue. Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

BIBLIOGRAPHIES

BIBLIOGRAPHIES

- [1] : Kabache Samira, « Implémentation du contrôleur logique flou d'une commande MPPT sur circuit FPGA », Mastère en électronique, (2012,2013).
- [2] : Marc Lajoie, « contrôle MPPT d'un système d'énergie renouvelable à l'aide de la logique flou », mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie, Université de Québec à Rimouski-Mai 2016.
- [3] : Salim Abouda, « contribution à la commande des systèmes photovoltaïques », Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [4] : Nedjma Aouchiche, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », Université de technologie de Belfort-Montbéliard. Le 28 Janvier 2020.
- [5] : Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque.
- [6] : Benadel Faiza, « Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV », Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, Année universitaire : 2015-2016.
- [7] : C.Lerouge « Recherche & industrie photovoltaïque(PV) Etats-Unis », Sciences physique Etats-Unis, 2006.
- [8] : « Planète énergie, décryptages, la cellule photovoltaïque : comment ça marche ? », publié le 02AVR.2019.
- [9] : Mohammed Telidjane, « Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic », Doctorat de l'Université de Lyon, Université Jean Monnet Saint-Etienne.
- [10] : Houiche Chaima, Faid Lemia, « Commande MPPT intelligente d'une classe de systèmes photovoltaïques », Master professionnel, Université Boudiaf-M'Sila, Année universitaire : 2020/2021.
- [11] : Yassine Lasmi, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Magistère en électrotechnique, Université Sétif-1.

- [12] :Merahi Réda, « Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïque »,Magister, option :réseau électrique, Université Badji Mokhtar Annaba, Année 2010.
- [13] : Hakoumi Ahmed et Benamar Abdeljalil, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue », Master en Electrotechnique, Université Ahmed Draia Adrar, Année universitaire : 2018-2019.
- [14] :F.Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister d'Electrotechnique, Sétif 2012.
- [15] :J.Ferrieux et f.Forest, « Alimentations a découpage convertisseurs a résonance : principes composants modélisation », Paris, France : dunod, 1999.
- [16] :M.Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », Mémoire de magister, Ecole nationale polytechnique 2006.
- [17] :M. Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Docteur de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [18] :F.E.Tahiri,K.Chikh et M.Khafallah, « Commande MPPT utilisant un contrôleur PI-flou appliqué à un système photovoltaïque autonome ».Revue de l'entrepreneuriat et de l'innovation, Université Hassan II-ENSEM Casablanca, Maroc.
- [19] : Tishan Efram,student Member,and Patrick L.chapman,Senior, « Comparaison photovoltaïque array maximum power point tracking techniques », IEEE transactions on energy conversion,2006.
- [20] : Aamarouayache Mohamed, « Contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », Doctorat en sciences en Electrotechnique option, 2014.
- [21] : Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed,Titraoui Abdessalam, « Etude d'une chaine de conversion photovoltaïque »,diplôme d'ingénieur d'état en génie Electrotechnique, Université de M'Sila,2010.
- [22] :H.BUHLER, « Réglage par logique flou », presse polytechniques et Universitaires-1994.

[23] : Walid,A.B.I, « Commande floue pour l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque »,Doctoral dissertation,Université Mohamed Boudiaf-M'Sila,2019 .

[24] : Toumi Djaafar, «Comparaison de P&O et du contrôleur de logique floue dans MPPT pour applications photovoltaïques (PV) à l'aide de Matlab/Simulink ».Université Echahid Hamma Lakhdar d'el oued,université des sciences et de la technologie.

[25] :K.Khettab, « techniques avancées pour la synthèse et l'amélioration des performances des systèmes de commande adaptative d'ordre fractionnaire pour les processus incertains », Thèse de doctorat,Université de Skikda-2016.

ANNEXE

ANNEXE 1: Installation off grid

Vue du générateur PV utilisé et équipements de photovoltaïque, tels que: (1) la batterie, (2) stabilisateur de tension(MPPT), (3) Convertisseur (DC-AC), (4) Led et (5) le Panneau solaire.



Tableau A.1 : Paramètres du module photovoltaïque GERMAN CELL

Pmax:	150W
Tolerance:	±3%
Vmp:	19.04V
Imp:	7.88A
Voc:	22.55V
Isc:	8.49A
Maximum system voltage:	1000V
Size:	1480*670*35mm
Test condition: 1000W/m ² , AM1.5, 25°C	

ANNEXE 2:



Module Photovoltaïque - 150 Watt

BP 3150

4031E-1 02/04

Le BP 3150 est un module photovoltaïque de 150W particulièrement abouti. Les cellules polycristallines avec couche anti-reflet SiN assurent une meilleure absorption. Une tolérance en puissance plus étroite de 3% garantie une puissance de sortie moyenne plus élevée. Le BP 3150 a été particulièrement conçu pour les applications connectées au réseau, telles que les toitures de grands bâtiments commerciaux, le petit résidentiel et les centrales photovoltaïques de puissance. Ce module offre un rapport qualité-prix de premier ordre grâce à ses 72 cellules à haut rendement et sa feuille de Tedlar arrière blanche.

Performance

Puissance nominale	150W
Rendement module	12%
Tension nominale	24V
Garantie	90% puissance de sortie garantie 12 ans. 80% puissance de sortie garantie 25 ans. Absence de défauts, matériaux et main d'œuvre, garantie 5 ans.

Configuration

BP 3150S	Cadre Universel Clair avec des câbles de sortie et des connecteurs Multicontact (MC) polarisés.
BP 3150U	Cadre Universel Clair et boîte de dérivation robuste

Paramètres d'essai de qualification

Cyclage en température	-40°C à +85°C pour 200 cycles
Tenue chaleur humidité	humidité relative de 85% et de 85°C pour 1000h
Essai de charge statique avant et arrière (par exemple : vent)	2400 Pa
Essai de charge avant (par exemple: neige)	5400 Pa
Test impact grêle	25 mm de diamètre avec une vitesse de 23 m/s à une distance de 1m

Qualité et Sécurité

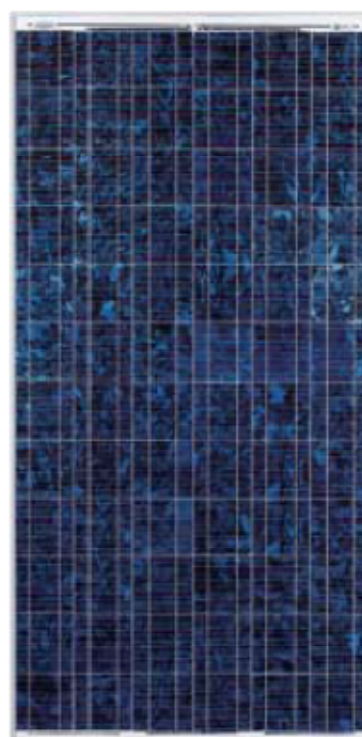
- Construit en usines certifiées ISO 9001 et ISO 14003
- Conforme aux directives de la Communauté européenne 89/33/EEC, 73/23/EEC, 93/68/EEC
- Certifié IEC 61215

Les mesures de puissance de module sont calibrés par ESTI sur la base des références radiométriques mondiales (Installation Solaire Européenne d'essai à Ispra, Italie)

Les modules avec cadre sont certifiés par TÜV Rhénanie à titre d'équipement de Classe II (IEC60364) de sûreté pour l'usage dans les systèmes jusqu'à 1000 VCC

Modules avec cadre testés par Underwriter's Laboratories pour la sécurité électrique et la tenue au feu (catégorie tenue au feu C)

Certifiés par Factory Mutual research pour application en sites à risque au NEC Class 1, Division 2, Groupes C & D (BP 3150U)

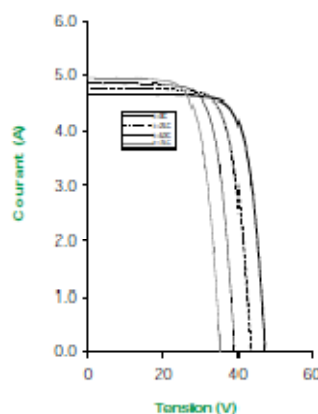


BP 3150S échelle 1:14

Rendement (%)

9-11	11-12	12-13	13-14	14-15
------	-------	-------	-------	-------

BP 3150 Courbes IV

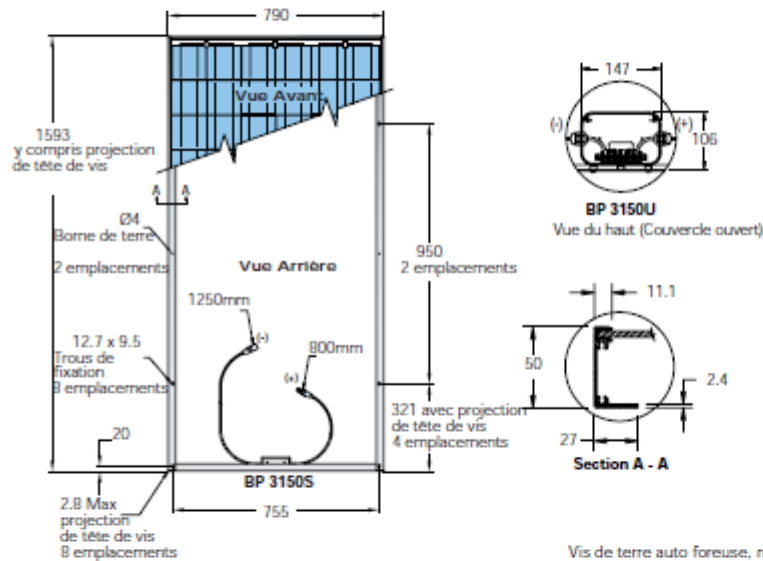




Module Photovoltaïque - 150 Watt BP 3150

4031E-1 02/04

Plan du Module



Vis de terre auto foreuse, notice et garantie inclus avec chaque module.

Caractéristiques Électriques Typiques

BP 3150

Puissance maxi (P _{max})	150W
Minimum garanti P _{max}	146W (BP 3150S); 143W (BP 3150U)
Tension à P _{max} (V _{mp})	34.5V
Courant à P _{max} (I _{mp})	4.35A
Courant de court-circuit (I _{sc})	4.75A
Tension à circuit ouvert (V _{oc})	43.5V
Coefficient de température de I _{sc}	(0.065±0.015)%/K
Coefficient de température de V _{oc}	-(160±10)mV/K
Coefficient de température de la puissance	-(0.5±0.05)%/K
NOCT (Air 20°C; Ensoleillement 0.8kW/m ² ; vitesse de vent 1m/s)	47±2°C
Calibre maxi du fusible série	15A (BP 3150S); 20A (BP 3150U)
Tension maxi du système	600V (régime nominal IEC 61215) 1000V (régime nominal TÜV Rheinland)

Conditions d'essai standard - Irradiance de 1000W/m² à un spectre solaire AM1.5G et une température de 25°C.

Caractéristiques mécaniques

BP 3150S / BP 3150U

Dimensions (mm) (Tolérances globales ±3mm)	1593 x 790 x 50
Poids (kg)	15.0
Cadre	Alliage d'aluminium anodisé clair type 6063T6. Cadre universel argent.
Cellules solaires	72 cellules (125mm x 125mm) configurées géométriquement pour être branchées en série pour une matrice 6 x 12.
Boîte de dérivation (BP 3150U)	Boîte de dérivation IP54 avec bloc raccord de 6 bornes de fixation ; accepte PG 13.5, M20, 13mm conduit ou garniture de câble acceptant des câbles de diamètre de 6 - 12mm. Fils de 2.5 - 10mm ² (B à 14 AWG).
Câbles de sortie (BP 3150S)	Câble RHW AWG# 12 (4mm ²) connecteurs multicontact étanches polarisés en CC; longueur asymétrique 800mm (-) et 800mm (+).
Diodes	Trois diodes de dérivation Schottky 9A, 45V intégrées
Construction	Avant: verre trempé de 3mm à haute transmissivité. Arrière: Tedlar blanc (BP 3150S), Tedlar bleu (BP 3150U); Agent d'encapsulation: EVA.

Votre Distributeur BP Solar:



©BP Solar 2004

Cette publication récapitule la garantie et les caractéristiques de produit qui sont sujettes à modification sans avis préalable.
Imprimé sur papier sans CFC produit sans acide en utilisant des sources durables. 100% recyclable.

www.bpsolar.com