



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Sciences et de La Technologies Filière: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En: Réseaux Electrique

Par: SENIGRA ALmontasser Bellah

Thème

Commande par logique floue d'un moteur à courant
continu pour le pompage photovoltaïque

Devant le jury composé de:

Mr.	Président
Mr.	Examineur
Mr. SERHOUD Hicham	Encadreur

2024-2025

Remerciements

Je rends grâce au Dieu tout-puissant. Pour nous accorder la détermination et le courage nécessaires à la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers mon superviseur, le **Dr Hicham Serhoud**, pour sa patience et ses précieux conseils. Nous remercions nos parents pour leur appui.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à tous nos amis qui m'ont soutenu, de manière directe ou indirecte, dans l'accomplissement de ce projet.

Résumé

Ce mémoire présente une conception et une simulation d'un système simple de pompage d'eau photovoltaïque qui utilise un suiveur de point de puissance maximale (MPPT), un convertisseur élévateur DC-DC et un moteur à courant continu avec pompe . L'objectif principal de ce mémoire est 'intégration d'un moteur à courant continu (MCC) avec une commande par logique floue, La simulation vise à démontrer que cette approche de commande permet d'atteindre une régulation plus précise et robuste.

Mots de clés: Générateur, photovoltaïque, convertisseurs DC-DC, MPPT, Fuzzy Logic , moteur à courant continu- pompe .

ملخص:

هدفنا في هذه الرسالة: دراسة التحكم في MPPT عن طريق التحكم الضبابي لضخ المياه بالطاقة الشمسية ، ودراسة نمذجة ومحاكاة النظام الكهروضوئي المتصل بالحمل الكهربائي وعرض النتائج ونتائج المحاكاة لمحولات DC-DC . لقد أجرينا دراسة عامة للمولد الكهروضوئي وتشغيله بأقصى طاقته باستخدام محول تعزيز DC-DC يتم التحكم فيه بواسطة خوارزمية MPPT من النوع 'P&O' ، تهدف المحاكاة إلى إثبات أن التحكم الضبابي في المحرك يتيح تحقيق تنظيم أكثر دقة ومثانة

الكلمات الدالة : المولد، الكهروضوئية، محولات DC-DC ، MPPT نوع « P&O » ، التحكم الضبابي – ضخ المياه بمحرك تيار مستمر

Abstract :

This thesis presents a design and simulation of a simple photovoltaic water pumping system that uses a maximum power point tracker (MPPT), a DC-DC boost converter, and a DC motor with pump. The main objective of this thesis is the integration of a DC motor with fuzzy logic control. The simulation aims to demonstrate that this control approach allows achieving more precise and robust regulation.

Keywords :

Generator photovoltaic , DC-DC converters , MPPT , Fuzzy Logic , DC pump motor

Introduction générale	8
Chapitre I :Généralité sur le système de Photovoltaïque	4
1.1. Introduction.....	26
I.2 Historique :	26
I.3. Généralités sur l'énergie solaire	27
I.3.1. Rayonnement solaire	28
I.3.1.1. Rayonnement direct.....	30
I.3.1.2. Rayonnement diffus.....	30
I.3.1.3. Rayonnement réfléchi.....	30
I.4. Système photovoltaïque.....	30
I.4.1 Modules (Panneaux) photovoltaïques	32
I.4.1.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés	32
I.4.2 Générateur photovoltaïque	33
I.5. Cellule photovoltaïque.....	33
I.5.1. Définition de la cellule photovoltaïque	33
I.5.2. Principe de fonctionnement	34
I.5.3 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques.....	35
I.5.3.1 Cellules amorphes :	35
I.5.3.2 Cellules monocristallines :	35
I.5.3.3 Cellules polycristallines :	35
1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	36
1.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :	37
1.6.1.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :	37
1.6.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}):	38
1.6.1.3. La puissance maximale :	38
1.6.1.4. Facteur de forme FF :	38
1.6.1.5. L'efficacité (rendement) de la conversion :	39
1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	39
I.7.1 Avantages :	39
I.7.2 Inconvénients :	39
1.8. Modèle de simulation :	40
1.8.1. Influence de l'éclairement:	41
1.8.2. Influence de la température :	42

1.9. Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque :	44
1.9 Conclusion	45
Chapitre II :Poursuite du point de puissance maximale	46
2.1. Introduction:	27
2.2. Convertisseurs DC/DC: 2.2.1. Définition:	27
2.2.2. Convertisseurs survolteur (Boost Converter):	28
2.2.3. Modèle mathématique équivalent:	29
2.2.4. Modèle approximé du convertisseur Boost :	29
2.3. Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC :	28
2.3.1. Avantages du convertisseur « BOOST »:	30
2.4. Définition de l'MPPT :	30
2.4.2. Classification des MPPT:	33
2.4.3. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :	33
2.5. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche:	35
2.5.1. Méthodes indirectes :	35
2.5.2. Méthode directe :	35
2.6. Recherche du point de puissance maximale (MPPT):	36
2.6.1. Premières commandes MPPT:	36
2.6.2. Principe:	36
2.6.3. Types de commande MPPT:	38
2.6.4 Commande MPPT par la méthode « Incrément des conductances » :	40
2.6.5 Avantages et inconvénients d'IC:	42
2.8. Conclusion:	46
Chapitre III :_COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU	48
3.1. Lessystèmesdepompagephotovoltaïque:	67
3.2.1. Principe de la logique floue:	71
3.3. Algorithmes basés sur la logique floue (LF) [12,13] :	71
3.3.1. La fuzzification:	72
3.3.2. Inférence floue:	73
3.3.3. La défuzzification:	74
3.4.Résultats de simulation de la méthode MPPT flou :	74
3.4.1 Fonctionnement sous les températures et éclairements variable: خطأ! الإشارة المرجعية غير معروفة.	
Conclusion générale	82

Annexes.....	82
Conclusion générale.....	82
Annexes.....	82
RéférencesAnnexes.....	82
Références.....	82
Références.....	82

Liste des figures

Figure I. 1Le soleil source de l'énergie solaire [3].	28
Figure I. 2Composants du rayonnement solaire [15]......	29
Figure I. 3Types de rayonnements solaires reçus au sol.	30
Figure I. 4 Structure d'une source solaire photovoltaïque (cellule, module et panneau PV).	31
Figure I. 5 Panneaux photovoltaïque	32
Figure I. 6 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.	34
Figure I. 7 Principaux types de cellules	35
Figure I. 8Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	36
Figure I. 9 Schéma de simulation du module PV de type «de KC200GT ».	41
Figure I. 10 Effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension.	41
Figure I. 11Effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension.	42
Figure I. 12Effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension.	43
Figure I. 13Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension.	43
Figure II. 1Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	28
Figure II. 2Circuit électrique de base du hacheur survolteur.	29
Figure II. 3Allure des variables dynamiques IL.	27
Figure II. 4Caractéristique de la tension et du courant de le hacheur survolteur.	28
Figure II. 5 Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.....	28
Figure II. 6 Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC.....	29
Figure II. 7 Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC.....	29
Figure II. 8 variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.....	29
Figure II. 9Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.	32
Figure II. 10Principe de la commande MPPT.....	33
Figure II. 11 Principe de la première commande MPPT numérique.	36
Figure II. 12Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.	37
Figure II. 13 Relation entre la puissance et le rapport cyclique [28].	38
Figure II. 14Illustration de la méthode IC	40
Figure II. 15 schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).	42
Figure II. 16 Schéma bloc d'un photovoltaïque munis de la MPPT.	43
Figure II. 17Variation de éclairement	44

Figure II. 18	Variation de la température.	44
Figure II. 19	Caractéristiques P (t) d'un système PV.....	45
Figure II. 20	Caractéristiques v (t) d'un système PV.....	45
Figure II. 21	Caractéristiques i (t) d'un système PV.....	45
Figure II. 22	Caractéristiques p (v) d'un système PV.....	45
Figure II. 23	Caractéristiques i (v) d'un système PV.....	46
Figure III. 1	Les systèmes de pompage photovoltaïque	67
Figure III. 2	Schéma électrique d'une MCC à excitations séparée.	68
Figure III. 3	Principe de commande par Hystérésis.....	70
Figure III. 4	Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue.....	72
Figure III. 5	Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue.....	72
Figure III. 6	Les fonctions d'appartenance des entrées.E et CE	73
Figure III. 7	Les fonctions d'appartenance de la sortie.	73
Figure III. 8	simulation du contrôleur flou du vitesse	75
Figure III. 9	Schéma générale du contrôleur flou.	75
Figure III. 10	Schéma bloc d'une croupe de Moto-pompe avec régulateur PI.....	76
Figure III. 11	Schéma bloc d'une croupe de Moto-pompe avec régulateur flou.....	76
Figure III. 12	Variation de l'éclairement.....	77
Figure III. 13	Variation de la température.....	77
Figure III. 14	La Puissance du PV en fonction de la tension.....	78
Figure III. 15	La Puissance du PV	78
Figure III. 16	La Tension du PV	79
Figure III. 17	courant du PV	79
Figure III. 18	Variation de Vitesse de rotation du moteur.....	80
Figure III. 19	zoom variation de Vitesse de rotation du moteur	80
Figure III. 20	La Tension du MCC.	81

Liste des tableaux

Tableau I. 1	caractéristique le modèle photovoltaïque de KC200GT.	40
Tableau II. 1	Fiche technique de KC200GT aux conditions STC	43
Tableau II. 2	Les paramètres du convertisseur.....	44
Tableau III. 1	Règles du contrôleur à logique floue.....	74

Introduction générale

INTRODUCTION

L'énergie représente aujourd'hui l'un des défis majeurs de l'humanité. Face à l'épuisement progressif des réserves mondiales d'hydrocarbures fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon), à une demande énergétique en constante augmentation et aux préoccupations environnementales croissantes liées à la pollution, les énergies renouvelables connaissent un regain d'intérêt considérable. Ces sources d'énergie alternatives - solaire, marine, éolienne et autres - offrent des solutions respectueuses de l'environnement et durables pour répondre aux besoins énergétiques futurs.

L'énergie solaire photovoltaïque figure parmi les sources d'énergie renouvelables les plus employées. Elle se base sur la transformation directe de l'énergie solaire en électricité par le biais de l'effet photovoltaïque. Les panneaux solaires (PV) ont la faculté de convertir les photons en électrons. Ainsi, l'énergie se présente sous forme de courant continu et peut être utilisée directement. Le rendement des systèmes PV peut être optimisé grâce à des solutions recourant à des méthodes de recherche du point de puissance maximale (connues sous le nom de techniques MPPT), compte tenu des propriétés électriques fortement non linéaires des cellules photovoltaïques et de leurs configurations.

Les systèmes de pompage photovoltaïques (PV) représentent une solution énergétique durable pour l'approvisionnement en eau, particulièrement dans les zones rurales et isolées. L'intégration d'un moteur à courant continu (MCC) avec une commande par logique floue constitue une approche innovante pour optimiser les performances et l'efficacité énergétique de ces systèmes.

Ce travail de recherche s'articule autour de plusieurs axes méthodologiques :

Chapitre 1 : Présentation des concepts fondamentaux des systèmes photovoltaïques, incluant les principes physiques, les technologies disponibles et les caractéristiques générales des installations PV.

Chapitre 2 : Étude approfondie des convertisseurs de puissance DC/DC, élément crucial pour l'interface entre les panneaux photovoltaïques et les charges. Ce chapitre couvre également la méthodologie de dimensionnement de ces convertisseurs pour optimiser les performances du système avec MPPT.

Chapitre 3 : Analyse comparative des deux algorithmes de contrôle (PI et logique floue) appliqué au système de pompage photovoltaïques équipés de

INTRODUCTION

moteurs à courant continu. Cette partie examine les performances relatives des différentes approches et leurs applications pratiques.

Chapitre I :
Généralité sur le système
Photovoltaïque

1.1. Introduction

Le soleil constitue une source d'énergie inépuisable, capable de couvrir largement les besoins croissants en consommation énergétique. Son rayonnement, disponible partout à la surface de la planète, peut être exploité efficacement grâce à l'utilisation des cellules photovoltaïques. Le terme *photovoltaïque* provient du grec *photos* (lumière) et de l'unité de tension électrique *volt*, en référence au physicien Alessandro Volta [1].

L'effet photovoltaïque fut mis en évidence dès 1839 par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel, tandis que la première véritable cellule photovoltaïque fut développée au début de l'année 1954. Cependant, ce n'est qu'au début des années 1970 que les premiers générateurs photovoltaïques commencèrent à être employés pour l'alimentation énergétique des habitations situées en zones isolées, ainsi que pour certains équipements de télécommunications [2].

Depuis lors, les avancées réalisées dans le domaine des énergies renouvelables ont contribué à renforcer la fiabilité des systèmes photovoltaïques, tout en favorisant l'adoption de concepts respectueux de l'environnement. Ces progrès leur ont conféré une place de plus en plus centrale dans les systèmes de production d'énergie électrique.

I.2 Historique :

Bien que les principes théoriques de l'effet photovoltaïque aient été établis dès le début du siècle, ce n'est qu'en 1954, dans les laboratoires Bell Telephone du New Jersey, qu'une première cellule efficace a été développée. Depuis la seconde moitié du siècle dernier, l'exploitation de la purification des monocristaux de silicium A a vu le jour.

En 1956, Loferski publia des tables de conversion de rendement pour divers matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque. Puis, au début des années 1970, les recherches menées sur les cellules en monocristaux d'arséniure de gallium (GaAs) permirent d'atteindre un rendement de 20 % en laboratoire. Toutefois, ce rendement se révélait nettement inférieur lorsque la production passait à une échelle industrielle.

Parallèlement, des essais furent réalisés sur des cellules constituées de deux couches : l'une en sulfure de cadmium (CdS) et l'autre en sulfure de cuivre (Cu₂S). Ces dispositifs avaient l'avantage d'exiger peu de matière active et de présenter une fabrication relativement simple. Néanmoins, leur rendement limité ne permettait pas une exploitation industrielle. Dans les années 1970, les cellules en silicium dominèrent le marché et, en 1999, elles représentaient déjà 12 % des parts mondiales [3].

Par la suite, l'apparition des matériaux polycristallins offrit une alternative de fabrication plus économique, bien que leur rendement demeurât encore faible. Plus récemment, des cellules en silicium amorphe furent commercialisées, principalement destinées à des appareils de faible puissance tels que les calculatrices, montres électroniques ou radios portatives.

Les premières applications concrètes de l'électricité photovoltaïque se firent dans le domaine spatial, où elle servait à alimenter les équipements de commande, de mesure et de transmission de données à bord des satellites. Plus tard, la production industrielle de panneaux destinés à des usages domestiques terrestres débuta. Si, au début des années 1980, ces panneaux n'étaient pas encore compétitifs pour une production massive, ils permirent néanmoins l'électrification de sites isolés.

Aujourd'hui encore, les efforts de recherche pour améliorer le rendement et réduire les coûts de production se poursuivent activement, bien que seules quelques entreprises au niveau mondial disposent des moyens financiers nécessaires pour supporter de tels investissements [4][5].

I.3. Généralités sur l'énergie solaire

Le soleil constitue une source d'énergie pratiquement inépuisable, fournissant à la surface terrestre un rayonnement [6-7] qui équivaut, chaque année, à près de 8400 fois la consommation énergétique mondiale. En moyenne, la puissance instantanée reçue est d'environ 1 kilowatt-crête par mètre carré (kWc/m²), répartie sur l'ensemble du spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge [8].

À titre d'illustration, les déserts de la planète reçoivent, en seulement six heures, davantage d'énergie solaire que l'humanité n'en consomme en une année

entière. Cette ressource considérable peut être exploitée par différents procédés, principalement :

- **L'énergie solaire thermique** : elle repose sur la production de chaleur à l'aide de capteurs solaires sombres. Cette chaleur peut être utilisée directement ou servir à générer de la vapeur, laquelle est ensuite convertie en électricité à travers une turbine.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : elle permet de produire directement de l'électricité à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux photovoltaïques. Cette technologie est déjà largement utilisée à travers le monde, notamment dans les pays ou régions dépourvus de ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon.

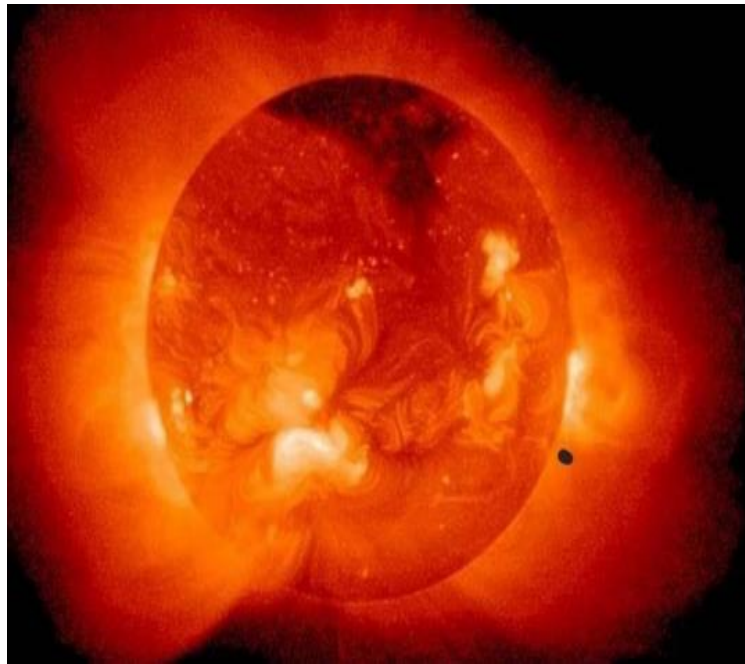


Figure I. 1 Le soleil source de l'énergie solaire [9].

I.3.1. Rayonnement solaire

Le soleil, étoile parmi des milliards d'autres, possède un diamètre d'environ 1 390 000 km, soit près de cinquante fois celui de la Terre. Sa composition est estimée à 80 % d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1 % d'un mélange regroupant près de cent éléments chimiques connus. Depuis les travaux de Langevin et Perrin, qui, en s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, avancèrent il y a une soixantaine d'années l'hypothèse que la puissance solaire provenait de la fusion nucléaire, il est

désormais admis que le soleil agit comme une gigantesque « bombe thermonucléaire » transformant chaque seconde environ 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. Ce processus, qui se déroule dans le noyau à une température avoisinant 25 millions de degrés Celsius, engendre une perte de masse de près de 4 millions de tonnes par seconde, dissipée sous forme de rayonnement.

La lumière solaire se propage à une vitesse de 300 000 km/s, atteignant la Terre en environ 8 minutes. Son spectre, après traversée de l'atmosphère, présente un maximum d'intensité pour une longueur d'onde proche de 0,5 μm . La température équivalente de corps noir à la surface du soleil est évaluée à 5 780 K [10][11].

Quelques paramètres caractéristiques du soleil et de sa relation avec la Terre peuvent être résumés ainsi :

- **Diamètre du soleil (D_s)** : $1,39 \times 10^9$ m
- **Diamètre de la Terre (D_t)** : $1,27 \times 10^7$ m
- **Distance moyenne Soleil–Terre (L_{ts})** : $1,5 \times 10^{11}$ m [30]

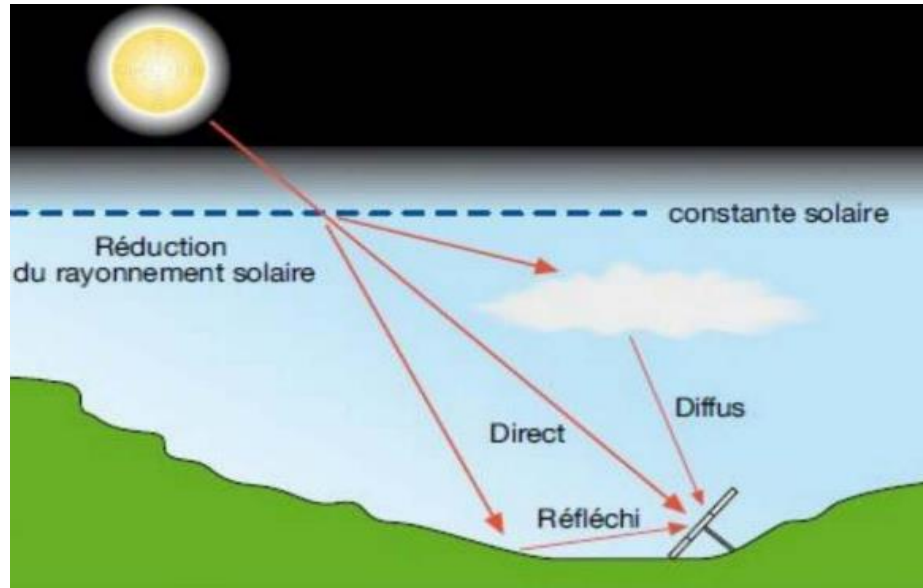


Figure I. 2 Composants du rayonnement solaire [12].

I.3.1.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct correspond au flux solaire constitué de rayons parallèles provenant du disque solaire, atteignant la surface terrestre sans avoir subi de diffusion préalable par l'atmosphère [12].

I.3.1.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus désigne la fraction du rayonnement solaire qui, avant d'atteindre le sol, a été dispersée et réfractée à plusieurs reprises dans l'atmosphère, sous l'effet des molécules d'air, des aérosols et des particules en suspension [13].

I.3.1.3. Rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi est la part de l'énergie solaire qui est renvoyée par la surface terrestre ou par les objets qui s'y trouvent. Ce phénomène, appelé albédo, est particulièrement marqué lorsque le sol est fortement réfléchissant, comme dans le cas de l'eau ou de la neige [14].

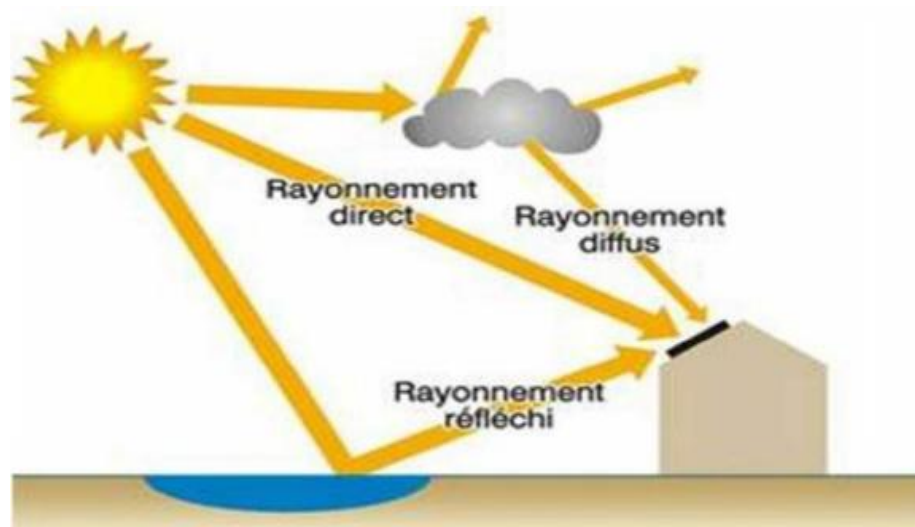


Figure I. 3 Types de rayonnements solaires reçus au sol.

I.4. Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un dispositif de production et d'alimentation électrique constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque, formé d'un ou de plusieurs panneaux solaires.

L'élément de base est la cellule photovoltaïque (PV), qui représente un générateur de très faible puissance. Une cellule d'environ 150 cm² fournit typiquement une puissance de l'ordre de 2,3 Watt-crête (Wc) sous une tension approximative de 0,5 Volt. Cette puissance limitée demeure insuffisante pour répondre aux besoins de la plupart des applications photovoltaïques, qu'elles soient domestiques ou industrielles.

Pour obtenir une tension et une puissance adaptées à l'alimentation des récepteurs, plusieurs cellules photovoltaïques sont assemblées en série afin de constituer un module. Les modules peuvent ensuite être connectés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux solaires, lesquels, interconnectés entre eux, constituent un champ photovoltaïque [15].

La Figure 1.4 illustre la structure d'une cellule, d'un module et d'un panneau photovoltaïque.

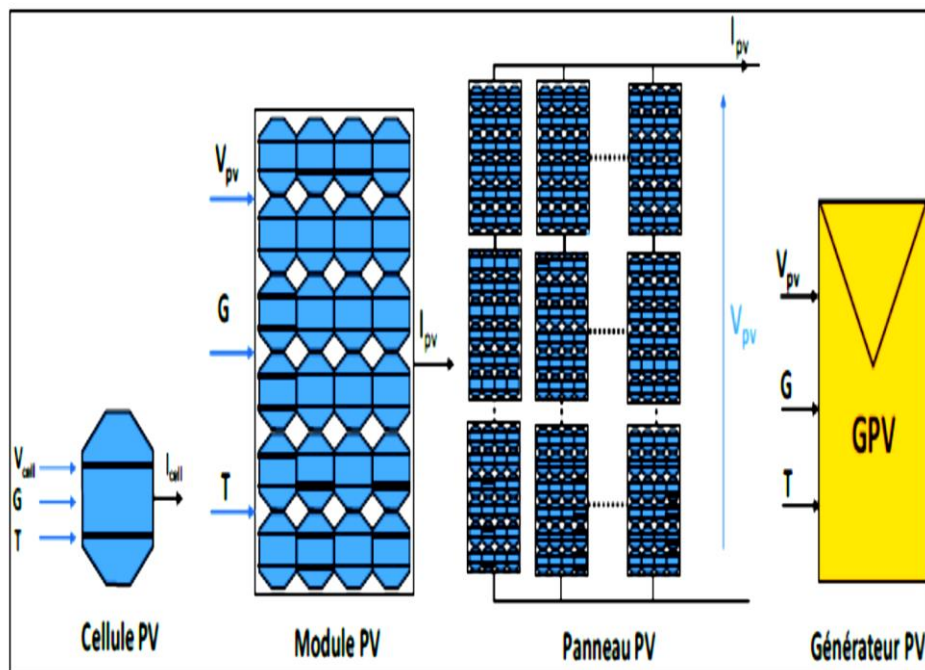


Figure I. 4 Structure d'une source solaire photovoltaïque (cellule, module et panneau PV).

I.4.1 Modules (Panneaux) photovoltaïques

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules élémentaires interconnectées, formant des chaînes pouvant être exploitées directement. Il assure principalement deux fonctions essentielles :

- **Première fonction** : adapter les cellules de base de manière à obtenir les caractéristiques courant-tension requises pour l'application. Les modules peuvent ainsi être connectés en série afin d'augmenter la tension de fonctionnement, ou en parallèle pour accroître le courant fourni.
- **Deuxième fonction** : protéger les cellules contre les agressions de l'environnement extérieur et assurer une durée de vie prolongée. Les chaînes cellulaires sont généralement encapsulées dans de l'EVA (éthylène-acétate de vinyle), qui constitue une barrière efficace contre les rayons UV et l'humidité. La face avant du module est protégée par un verre trempé, offrant à la fois une haute transmission lumineuse et une bonne résistance mécanique, tandis que la face arrière est recouverte d'un film de Tedlar ou de polyéthylène. Enfin, l'ensemble est intégré dans un cadre métallique robuste, garantissant une stabilité mécanique élevée.



Figure I. 5 Panneaux photovoltaïque

I.4.1.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés

Le panneau Kyocera Solar KC200GT présente les caractéristiques électriques et mécaniques:

- Puissance maximale (P_{max}) : 200 W
- Tension en puissance maximale (V_{mp}) : 26,3 V
- Courant en puissance maximale (I_{mp}) : 7,61 A

- Courant de court-circuit (I_{sc}) : 8,21 A
- Tension en circuit ouvert (V_{oc}) : 32,9 V
- Nombre de cellules par module : 54

I.4.2 Générateur photovoltaïque

En fonction du contexte, le terme photovoltaïque peut désigner aussi bien les modules ou panneaux photovoltaïques que l'ensemble du système de production d'énergie solaire. Dans la suite de ce travail, l'expression « générateur solaire » sera utilisée pour désigner les modules ou panneaux photovoltaïques.

Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules PV interconnectés en série et/ou en parallèle afin d'augmenter la puissance fournie.

- La connexion en série permet d'augmenter la tension, celle-ci étant égale à la somme des tensions de chaque cellule.
- La connexion en parallèle, quant à elle, a pour effet d'accroître le courant.

Ces configurations assurent que le générateur photovoltaïque puisse répondre efficacement aux besoins énergétiques, sous condition d'un éclairage homogène et d'une température uniforme des cellules.

I.5. Cellule photovoltaïque

I.5.1. Définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est un composant électronique capable de convertir directement la lumière en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

La puissance produite est proportionnelle à l'intensité du rayonnement lumineux incident et dépend étroitement du rendement de conversion de la cellule. Celle-ci fournit une tension continue et laisse circuler un courant électrique dès qu'elle est reliée à une charge, qu'il s'agisse généralement d'un onduleur ou parfois d'une batterie électrique.

I.5.2. Principe de fonctionnement

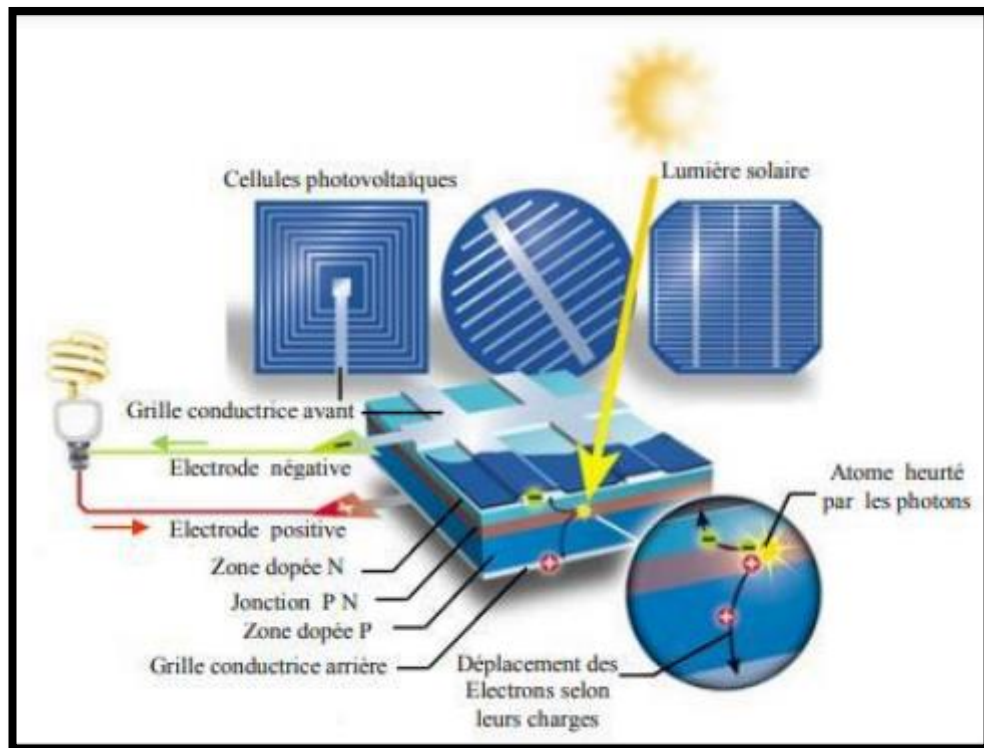


Figure I. 6 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

L'effet photovoltaïque, exploité dans les cellules solaires, permet de convertir directement l'énergie lumineuse du rayonnement solaire en électricité. Ce phénomène repose sur la génération et le transport de charges électriques positives et négatives au sein d'un matériau semi-conducteur soumis à la lumière.

Ce matériau est constitué de deux zones distinctes :

- une zone dopée de type N, caractérisée par un excès d'électrons,
- et une zone dopée de type P, marquée par un déficit en électrons.

Lorsque ces deux régions sont mises en contact, les électrons excédentaires du matériau de type N diffusent vers le matériau de type P. Ainsi, la zone initialement dopée N acquiert une charge positive, tandis que la zone dopée P devient chargée négativement.

Cette redistribution des charges engendre la formation d'un champ électrique interne, qui repousse les électrons vers la région N et attire les trous vers la région P. Il en résulte la création d'une jonction PN, élément fondamental du fonctionnement des cellules photovoltaïques.

I.5.3 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs catégories de cellules solaires à base de silicium, qui constitue le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans leur fabrication [16]. Ces cellules se distinguent principalement par leur rendement énergétique et par leur coût de production.

I.5.3.1 Cellules amorphes :

Les cellules en silicium amorphe (Figure I-8.a) se caractérisent par l'absence de structure cristalline ordonnée. Bien que leur efficacité et leur productivité soient nettement inférieures à celles des autres technologies, leur coût reste relativement bas. Elles trouvent principalement leur application dans les dispositifs de faible consommation, tels que les calculatrices solaires.

I.5.3.2 Cellules monocristallines :

Les cellules en silicium monocristallin (Figure I-8.b) figurent parmi les plus performantes. Elles présentent les rendements de conversion les plus élevés, ce qui en fait un choix privilégié pour les installations nécessitant une grande efficacité énergétique.

I.5.3.3 Cellules polycristallines :

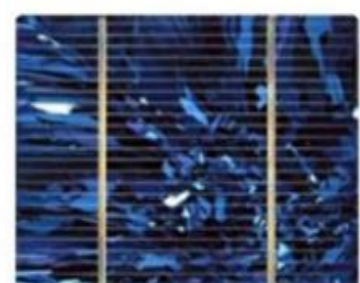
Les cellules en silicium polycristallin (Figure I-8.c) se distinguent par une conception plus simple que celle des cellules monocristallines. Leur fabrication est moins coûteuse, mais elles affichent des rendements énergétiques inférieurs.



(a) Cellule amorphe



(b) Cellule monocristalline



(c) Cellule poly-cristalline

Figure I. 7 Principaux types de cellules

Tableau 1. 1 Rendement des types de silicium

Types	Rendement
Monocristallin	13 à 17%
Poly-cristallin	11 à 15%
Amorphe	6 à 10%

1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (1.8) illustre le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque soumise à un éclairage. Ce modèle est représenté par un générateur de courant **I_{ph}** connecté en parallèle avec une diode, auquel s'ajoutent deux résistances parasites influençant la caractéristique **I = f(V)** de la cellule.

- **La résistance série (R_s)** : elle correspond à la résistance interne de la cellule. Elle est principalement déterminée par la résistivité du semi-conducteur utilisé, la résistance de contact des grilles collectrices ainsi que par la résistivité propre de ces dernières [16].
- **La résistance de shunt (R_p)** : elle résulte d'un courant de fuite au niveau de la jonction. Sa valeur dépend essentiellement de la qualité de la réalisation technologique de la jonction.

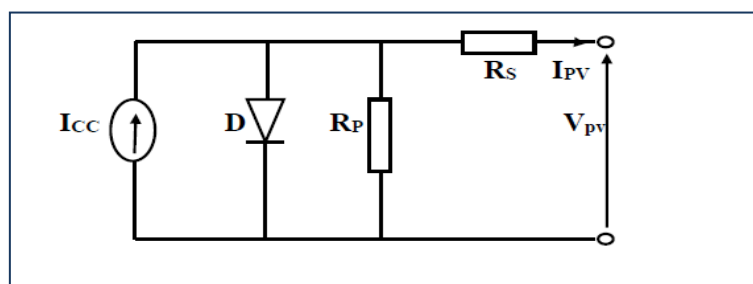


Figure 1. 8 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (1.2)$$

Où :

V_{pv} : Tension de sortie de la cellule(V).

I_{pv} : Courant de sortie de la cellule(A).

I_{ph} : Courant photo-générer ou photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation de la diode (A).

q : Charge d'électron $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (c).

K : Constant de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k).

T : Température absolue de fonctionnement de la jonction (k°).

n : Facteur d'idéalité de la diode ($n \in [1, 3]$).

R_s : Résistance série(Ω).

R_p : Résistance parallèle(Ω).

1.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque peuvent effectivement être déterminés à partir des courbes courant-tension (I-V) ou de l'équation caractéristique.

1.6.1.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photoc-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.3), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc} R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{I_{cc} R_s}{R_p} \right) \quad (1.3)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le

Terme $I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(I_{cc}R_s)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} L'expression approchée du courant de courtcircuit

$$\text{est alors: } I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement

$$I_{cc} = I_{ph}.$$

1.6.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}):

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{qV_{pv}}{nkt}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (1.4)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à

$$V_{co} = VT \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (1.5)$$

1.6.1.3. La puissance maximale :

C'est la capacité maximale de puissance électrique que peut générer le module, associée à une tension et à un courant maximaux lorsqu'on se réfère à la puissance maximale dans les conditions standardisées d'ensoleillement STC (25°) et un éclairage de 1000w/m² ; on désigne cela comme puissance crête, exprimée en watts-crête.

1.6.1.4. Facteur de forme FF :

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{CC} , V_{CO}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.6)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le **FF** des valeurs d'ordre **0.7** à **0.85**. Le facteur de forme **FF** diminue si la température augmente.

1.6.1.5. L'efficacité (rendement) de la conversion :

Il s'agit du rapport entre la puissance électrique maximale pouvant être obtenue et la puissance de rayonnement incident sur la surface X de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot G_a} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (1.7)$$

Avec P_{inc} est déterminé en multipliant l'éclairement par la surface totale des photopiles. Ce paramètre indique l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité.

1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent de nombreux atouts, mais comportent également certaines limites [18].

1.7.1 Avantages :

- **Fiabilité élevée** : les installations photovoltaïques sont robustes et durables.
- **Potentiel illimité** : à titre d'exemple, couvrir seulement 5 % de la surface des déserts suffirait à satisfaire les besoins énergétiques mondiaux.
- **Modularité** : la structure des panneaux photovoltaïques permet une conception flexible, adaptée à différents besoins énergétiques.
- **Respect de l'environnement** : cette technologie est silencieuse, propre et n'entraîne pas de perturbations sur l'écosystème.
- **Réduction des émissions polluantes** : l'exploitation de l'énergie solaire permet de limiter le recours aux énergies fossiles ou nucléaires, réduisant ainsi les gaz à effet de serre et la production de déchets radioactifs.

1.7.2 Inconvénients :

- **Coût de fabrication élevé** : la production des modules photovoltaïques nécessite une technologie avancée et des investissements importants.
- **Rendement limité** : l'efficacité réelle de conversion reste faible ; pour une cellule en silicium cristallin, le rendement théorique maximal est de 28 %.

- **Adaptation nécessaire** : l'énergie produite par un générateur photovoltaïque est continue et de faible tension (<30 V). Or, la majorité des appareils électriques fonctionnent en courant alternatif (220–230 V), ce qui impose l'utilisation d'un onduleur.
- **Problématique du stockage** : lorsque l'énergie doit être stockée dans des batteries, le coût global du système augmente. La performance reste toutefois stable si les batteries et les régulateurs sont correctement dimensionnés.
- **Dépendance aux conditions climatiques** : la puissance produite diminue significativement en cas de couverture nuageuse ou de faible ensoleillement.

1.8. Modèle de simulation :

Nous avons employé MATLAB comme instrument de test et de simulation pour mener à bien cette modélisation [17]. Le tableau (1.1) présente les caractéristiques du modèle photovoltaïque KC200GT que nous avons sélectionné pour cette étude.

Tableau I. 1 caractéristique le modèle photovoltaïque de KC200GT.

Nombre de cellule en série par panneau (Ns)	54
Puissance maximale (P_max)	200.143 W
Courant de court-circuit (I_cc)	8.21 A
Tension de circuit ouvert (v_co)	32.9 V
Courant au point de MPP (I_op)	7.61 A
Tension au point de MPP (v_op)	26.3 V

Pour augmenter la puissance de sortie, les modules PV sont associés dans le panneau. les modules peuvent être agencés en série, en parallèle ou une combinaison des deux ; c'est précisément ce que nous faisons dans notre situation (NS=2, NP=3).

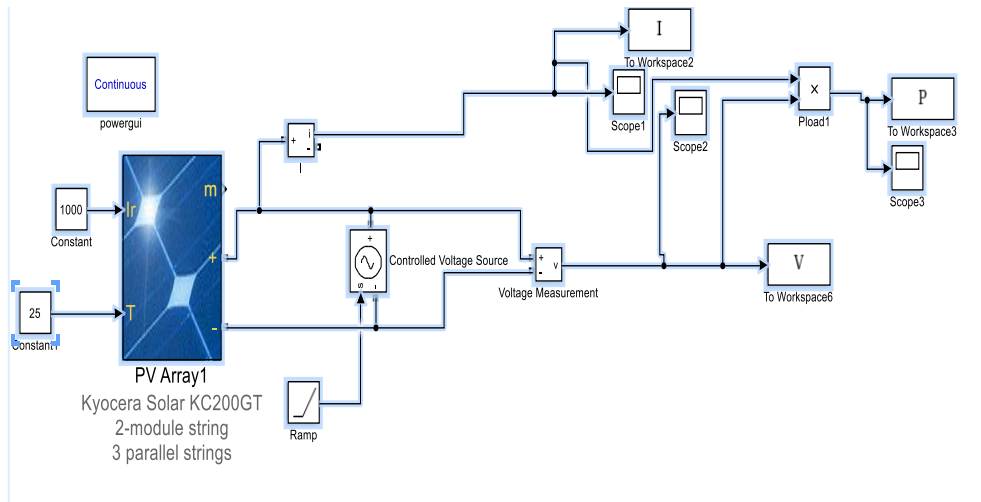


Figure I. 9 Schéma de simulation du module PV de type «de KC200GT ».

- ✓ Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température à $T=25^{\circ}$ et on a fait varier l'éclairement dans une gamme de $[400, 1000]W/m^2$.

Les caractéristiques-V et P-V sont donnés par la figure (1.10) et la figure (1.11).

1.8.1. Influence de l'éclairement:

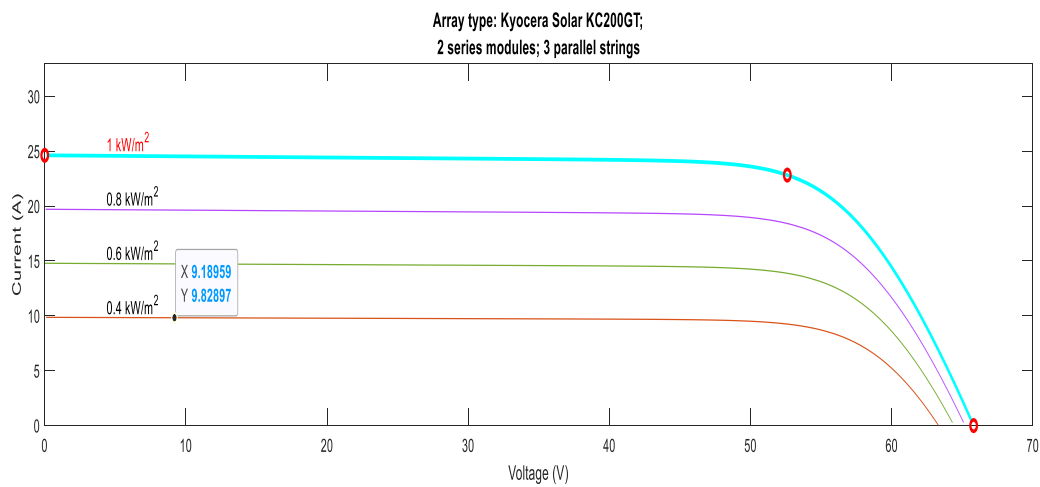


Figure I. 10 Effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension.

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure (1.10) représente la caractéristique courant-tension d'un panneau en fonction de l'éclairement, à une température constante. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

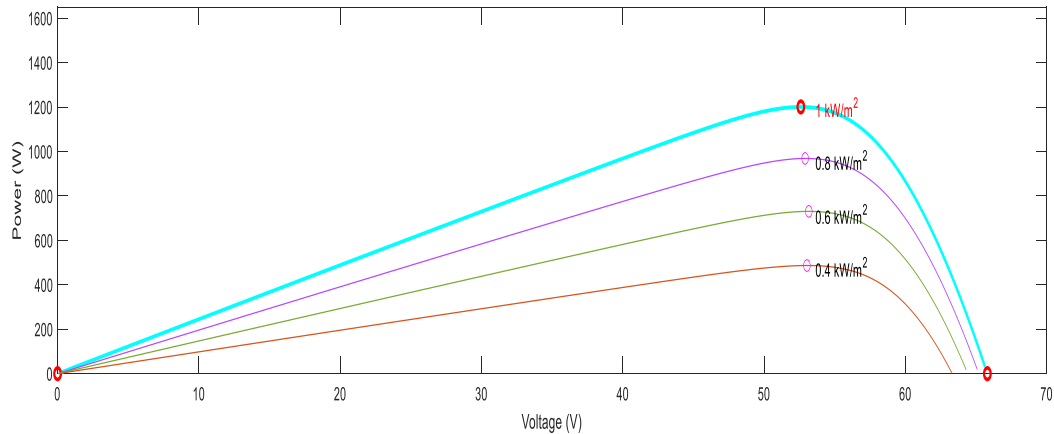


Figure 1. 11 Effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension.

La figure (1.11) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

1.8.2. Influence de la température :

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule (**T_c**) est toujours plus élevée que la température ambiante (**T_a**).

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (1.8)$$

Avec

E_m : Eclairement moyenne (W/m²).

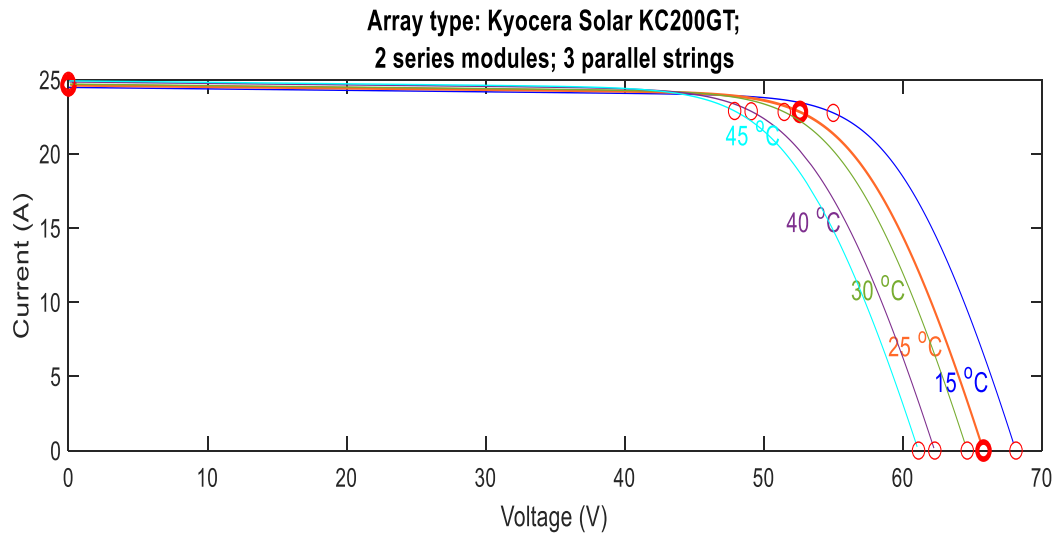


Figure I. 12 Effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension.

La figure (1.12), montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

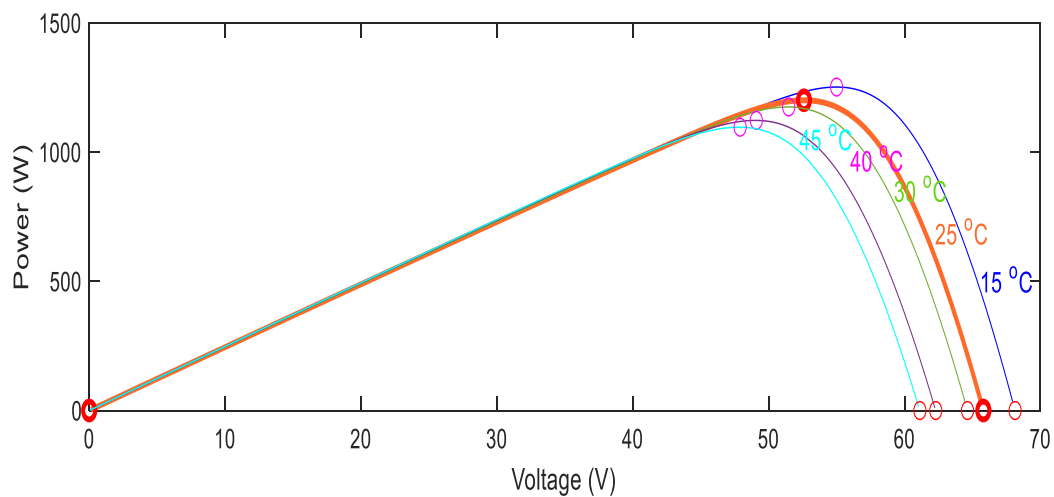


Figure I. 13 Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension.

La figure (1.13) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

1.9. Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque :

- Les systèmes photovoltaïques présentent plusieurs bénéfices tout en comportant certains désavantages [17] :

- **Les avantages :**
 - ✓ La haute fiabilité.
 - ✓ Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
 - ✓ le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
 - ✓ Le produit final de la technologie photovoltaïque est écologique puisqu'il est non polluant, silencieux et n'occasionne aucune perturbation à l'environnement.
 - ✓ L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.

- **Les inconvénients :**
 - ✓ Le processus de fabrication du module photovoltaïque nécessite une technologie avancée et exige des investissements coûteux.
 - ✓ L'efficacité de conversion d'un module est relativement faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
 - ✓ De nombreux dispositifs commercialisés sur le marché opèrent sous une tension alternative de 220 à 230 V. En effet, l'énergie produite par le générateur photovoltaïque est unidirectionnelle et de faible tension (<30V), elle nécessite donc une conversion via 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.

- ✓ Lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises (comme en présence de nuages), la puissance est diminuée

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les notions générales relatives aux systèmes photovoltaïques, en abordant successivement la cellule solaire, le module photovoltaïque et le panneau solaire. Nous avons expliqué le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ses différents types. Par la suite, nous avons présenté la structure des panneaux photovoltaïques, de même que les divers types de systèmes photovoltaïques destinés à l'habitat .

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des convertisseurs statiques de type DC/DC, appelés hacheurs, ainsi qu'aux techniques de commande MPPT.

Chapitre II :
Poursuite du point de
puissance maximale

2.1. Introduction:

Afin d'améliorer le rendement des panneaux solaires et d'exploiter au mieux leur potentiel, il est indispensable d'optimiser la conception de l'ensemble des composants du système photovoltaïque. Cette optimisation concerne également les convertisseurs DC/DC, qui jouent un rôle d'interface entre le générateur photovoltaïque et la charge. Leur objectif principal est de permettre une extraction continue de la puissance maximale en maintenant le générateur au point de puissance optimale (MPP), et ce, sans pertes dans le transfert d'énergie. Cette tâche est assurée par un contrôleur MPPT, qui garantit un fonctionnement efficace même en présence de variations de charge ou de conditions atmosphériques fluctuantes (ensoleillement et température).

Depuis les années 1970, de nombreuses techniques de commande MPPT ont été proposées. Elles vont des approches les plus simples, fondées sur la mesure directe de la tension et du courant, jusqu'à des méthodes plus sophistiquées exploitant des algorithmes dédiés pour localiser le MPP du générateur photovoltaïque. Parmi les plus répandues figure la technique de l'Incrément de la Conductance (Inc Cond) [19].

2.2. Convertisseurs DC/DC:

2.2.1. Définition:

Dans le domaine de la conversion de puissance, il est primordial de maintenir un rendement élevé afin de limiter les pertes énergétiques et d'éviter les échauffements excessifs des composants électroniques. Pour atteindre cet objectif, l'ensemble du processus de conversion doit s'appuyer principalement sur les composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) ainsi que sur les dispositifs de commutation. Le choix de ces commutateurs dépend du niveau de puissance à gérer. En général, les MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) sont privilégiés pour des applications de faible à moyenne puissance (quelques kilowatts), tandis que les IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) sont plus adaptés aux niveaux de puissance plus élevés. Quant aux thyristors, ils restent couramment employés et largement acceptés dans les applications de très haute puissance [20].

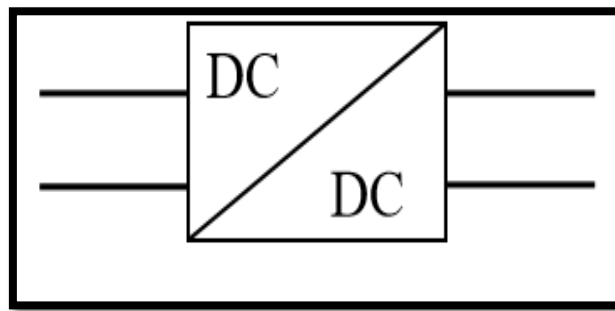


Figure II. 1 Symbole d'un convertisseur DC-DC.

2.2.2. Convertisseurs survolteur (Boost Converter):

Le convertisseur **Boost**, également appelé *élevateur de tension*, est largement utilisé dans les systèmes électroniques de puissance, notamment lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension d'entrée pour l'adapter aux exigences de la charge. Son principe de fonctionnement repose sur deux phases principales de commutation, illustrées dans le schéma de la figure (2.3).

Dans la première phase, lorsque l'interrupteur (transistor S) est fermé pendant une durée égale à (αT) , le courant circulant dans l'inductance (L) augmente progressivement. Au cours de cette période, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme de champ magnétique, agissant comme un réservoir temporaire. Plus la durée de conduction est longue, plus l'énergie stockée dans l'inductance est importante.

Dans la deuxième phase, lorsque le transistor (S) s'ouvre, l'inductance tend à maintenir le courant qui la traverse (principe de la loi de Lenz). Pour s'opposer à la diminution du courant (IL), elle génère une tension additionnelle qui vient s'ajouter à la tension de la source d'entrée. Cette tension combinée est alors appliquée à la charge (R) par l'intermédiaire de la diode (D), qui assure le passage unidirectionnel du courant. Ainsi, la tension de sortie obtenue est supérieure à la tension d'entrée, ce qui justifie l'appellation *élevateur de tension*.

Ce fonctionnement cyclique, alternant entre stockage et restitution d'énergie, confère au convertisseur Boost une grande efficacité dans l'adaptation de la tension aux besoins spécifiques des systèmes, en particulier dans les applications

photovoltaïques où la tension générée par les modules doit être ajustée pour atteindre le point de puissance maximale. [20]

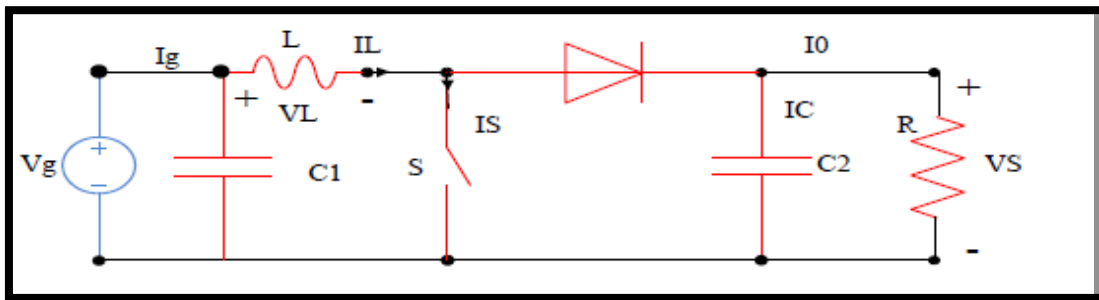


Figure II. 2Circuit électrique de base du hacheur boost.

2.2.3. Modèle mathématique équivalent:

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

Fonctionnement donne :

Pour la première période αT_s :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_g(t)}{dt} = i_1(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = +V_g(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)T_s$

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_g(t)}{dt} = i_g(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_g(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

2.2.4. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations fondamentales (Équ. 2.1) et (Équ. 2.2) décrivent le comportement du convertisseur Boost durant les deux phases de fonctionnement, à savoir pendant l'intervalle αT_s (interrupteur fermé) et pendant l'intervalle $(1-\alpha)T_s$ (interrupteur ouvert). Le convertisseur oscille de manière périodique et à une fréquence de commutation relativement élevée entre ces deux états, ce qui rend nécessaire l'élaboration d'un modèle dynamique global capable de représenter son fonctionnement moyen.

Afin de simplifier l'analyse, on adopte une représentation dynamique approximée, valable sur une période complète de commutation. L'idée consiste à considérer que l'évolution des variables dynamiques principales, telles que le courant dans l'inductance (IL) et la tension aux bornes du condensateur (VC), présente une variation de forme quasi-linéaire sur chaque intervalle de temps. En d'autres termes, la croissance ou la décroissance de ces grandeurs peut être assimilée à une fonction exponentielle approchée par un développement limité de premier ordre ($e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$, avec $\varepsilon \ll 1$). Grâce à cette approximation, la dérivée des grandeurs dynamiques peut être considérée comme constante sur chaque intervalle de commutation.

Cette hypothèse permet de linéariser le comportement du convertisseur et de construire un modèle mathématique simplifié, souvent appelé **modèle moyen en conduction continue (CCM – Continuous Conduction Mode)**. Ce modèle est largement utilisé car il rend possible l'étude analytique et la conception des systèmes de commande (tels que les algorithmes MPPT), tout en offrant une précision suffisante pour prédire les performances globales du convertisseur.

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

$$\left\langle \frac{dx}{dy} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dy(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dy(1-\alpha) T_s} (1-\alpha) T_s \quad (2.3)$$

ou $\left\langle \frac{dx}{dy} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T_s . Cette relation est valide si

$$\frac{dx}{dy(\alpha T_s)} \text{ et } \frac{dx}{dy(1-\alpha) T_s} \quad (2.4)$$

sont constants sur les périodes 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 $C1R_g$, $C2 Z$, L/RL [21].

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de Lacapacité est de forme linéaire comme le montre la (Fig.2.4)

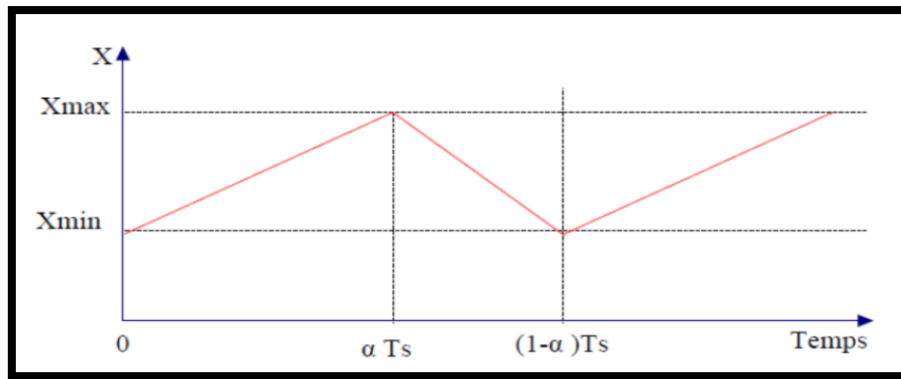


Figure II. 3Allure des variables dynamiques i_L .

En appliquant la relation (2.4) sur les systèmes d'équations (2.2) et (2.3), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [22] :

$$\begin{cases} i_L = i_g - C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} \\ i_0 = (1 - d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_g = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - d)V_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Comme l'illustre la figure (2.5), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est en position **on**, le courant traversant l'inductance du hacheur croît de manière linéaire, tandis que la diode (D) demeure bloquée (**off**). Durant cette phase, l'inductance accumule de l'énergie sous forme de champ magnétique.

À l'inverse, lorsque le transistor (S) passe en position **off**, l'énergie stockée dans l'inductance est restituée au circuit de charge (RC). Dans ce cas, la diode (D) devient conductrice, permettant ainsi le transfert de l'énergie vers la charge.

Les caractéristiques de la tension et du courant appliqués à la charge, dans le cas d'un fonctionnement en conduction continue du convertisseur Boost, sont représentées dans la figure (2.5). Elles illustrent les variations cycliques de ces grandeurs en fonction des deux états de commutation.

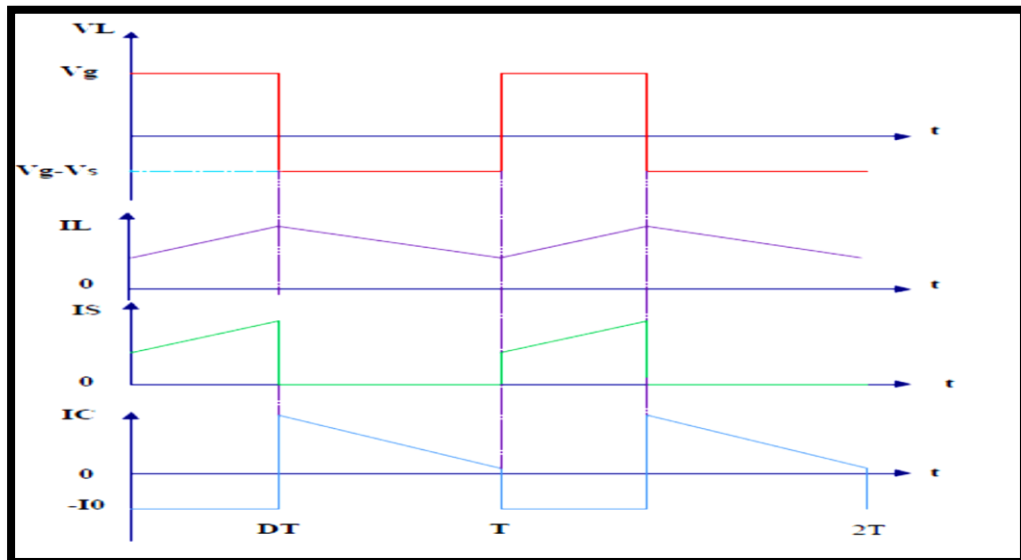


Figure II.4 Caractéristique de la tension et du courant de le hacheur survolteur.

2.3. Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC :

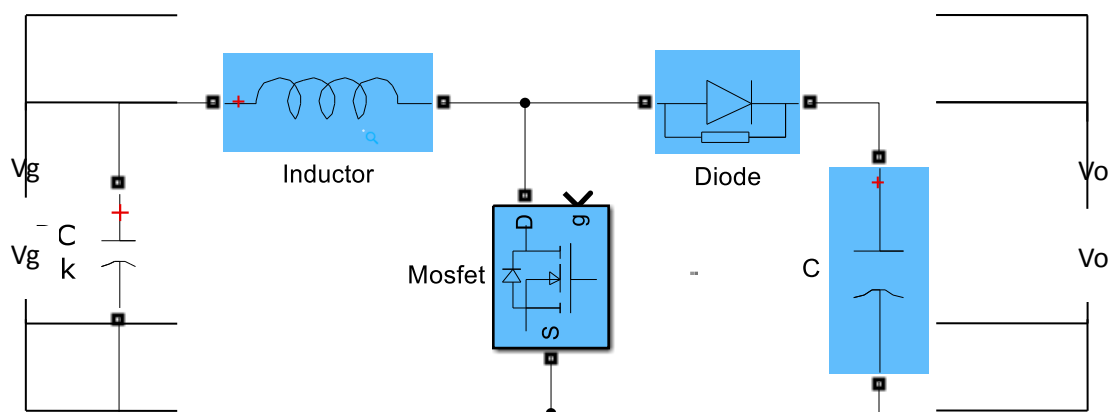


Figure II. 5 Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.

Les valeurs des paramètres du convertisseur DC-DC: Résistance (R_h) = 1Ω , Inductance (L_h) = $4 \text{ e-}4 \text{ H}$, Capacitance (C_h) = $1200 \text{ e-}6 \text{ F}$,Diode: Résistance (R_{on}) = 0.001Ω , Tension directe (V_D) = 0.8 V , Résistance d'amortissement (R_a) = 500Ω , Capacité d'amortissement (C_A) = $250\text{e-}9 \text{ F}$, Mosfet : FET Résistance (R_{on}) = 0.1Ω , Interne diode résistance (R_d) = 0.01Ω , RLC: Résistance (R) = 120Ω , Tension nominale $V_n = 50 \text{ Vrms}$

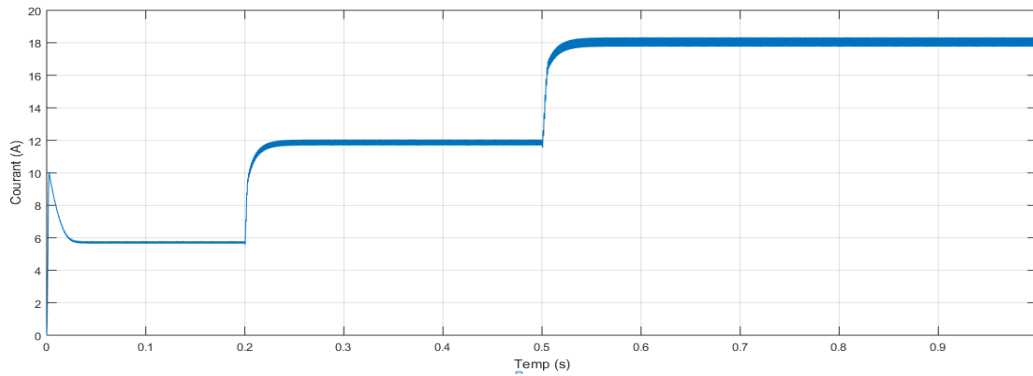


Figure II. 6 Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC.

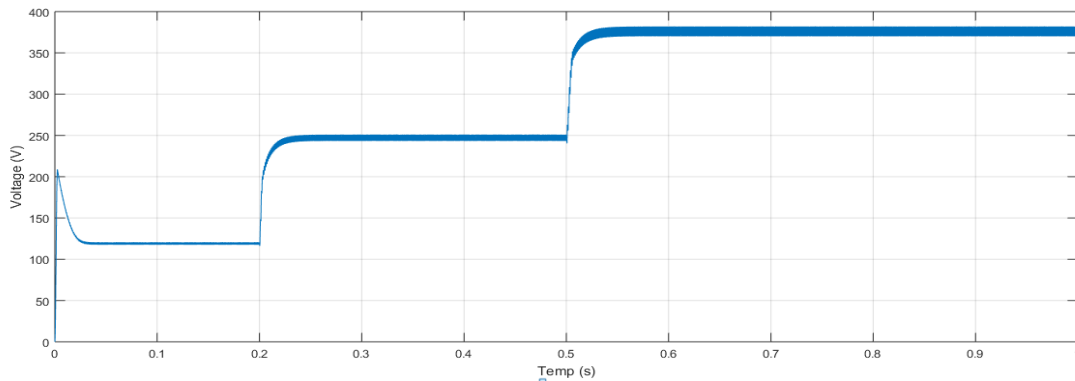


Figure II. 7 Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC.

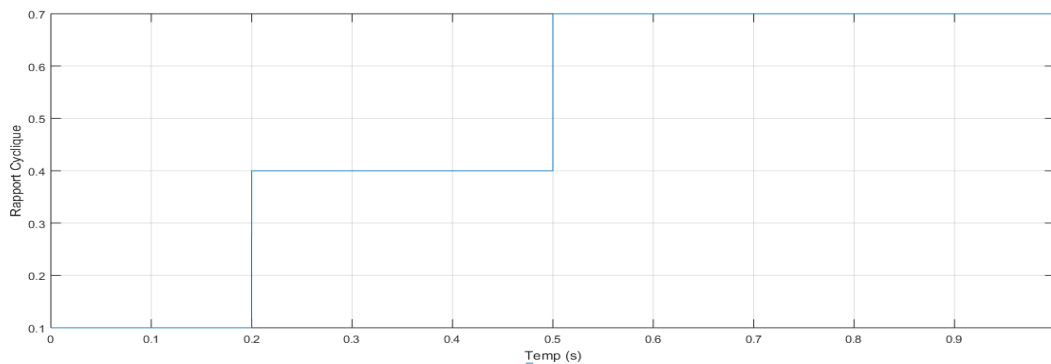


Figure II. 8 variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.

Les figures (2.7) et (2.8) présentent les résultats expérimentaux obtenus pour un convertisseur Boost soumis à une variation paramétrique du rapport cyclique, telle qu'illustrée par la figure (2.9). On observe, dans un premier temps, une légère oscillation transitoire au démarrage, d'une durée d'environ 0,01 seconde, avant que le système ne revienne à sa valeur nominale et se stabilise. Ces résultats mettent également en évidence la relation directe entre le rapport cyclique et les grandeurs de

sortie : en effet, une augmentation du rapport cyclique entraîne simultanément une élévation du niveau de courant et de la tension délivrés par le convertisseur.

2.3.1. Avantages du convertisseur « BOOST »:

Un convertisseur **Boost** est utilisé lorsqu'il est nécessaire d'élever la tension fournie par une source continue. Dans de nombreux systèmes alimentés par des batteries d'accumulateurs, plusieurs éléments sont généralement connectés en série afin d'obtenir un niveau de tension suffisant. Toutefois, la contrainte d'espace disponible ne permet pas toujours d'intégrer un nombre élevé d'accumulateurs. Dans ce contexte, le convertisseur Boost constitue une solution efficace, puisqu'il permet d'augmenter la tension délivrée par les batteries et, par conséquent, de réduire le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre la valeur de tension souhaitée. Les systèmes photovoltaïques représentent un exemple typique d'application de ce type de convertisseur [21].

2.4. Définition de l'MPPT :

La technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) représente une stratégie de commande avancée qui vise à exploiter au mieux le potentiel des générateurs électriques à caractère non linéaire, tels que les panneaux photovoltaïques. Son principe repose sur l'adaptation dynamique du point de fonctionnement du générateur afin de garantir, en permanence, une production correspondant à la puissance maximale disponible. Cette optimisation est essentielle, car la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque varie en fonction de plusieurs facteurs externes, notamment l'ensoleillement et la température ambiante. Sans un système de poursuite du point de puissance maximale, une grande partie de l'énergie produite pourrait être perdue, réduisant ainsi le rendement global du système. C'est pourquoi les techniques MPPT constituent une composante incontournable dans la conception des systèmes de conversion d'énergie renouvelable modernes.

En pratique, les systèmes MPPT sont le plus souvent associés aux générateurs photovoltaïques et éoliens, où les conditions environnementales sont en constante évolution. Le rôle du contrôleur MPPT est de piloter le convertisseur statique placé entre le générateur et la charge, en ajustant en temps réel les paramètres de fonctionnement afin que la puissance transférée reste toujours maximale. Dans le cas

des systèmes photovoltaïques, cela signifie que le contrôleur adapte le rapport cyclique du convertisseur DC/DC (comme le Boost) pour maintenir le générateur au niveau de tension et de courant correspondant au point de puissance optimale. Ainsi, quelle que soit la variation des conditions atmosphériques ou des caractéristiques de la charge, le système peut garantir un rendement énergétique élevé et une exploitation optimale des ressources renouvelables disponibles [23].

2.4.1. Principe de la commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associée à un étage intermédiaire d'adaptation, a pour objectif d'exploiter un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à ce qu'il fournisse en permanence la puissance maximale dont il est capable. En effet, les caractéristiques électriques d'un GPV dépendent fortement des conditions météorologiques, notamment de l'irradiation solaire et de la température. Or, ces paramètres varient continuellement au cours de la journée et selon l'environnement, entraînant des modifications du point de fonctionnement optimal. Grâce à la commande MPPT, le convertisseur statique ajuste dynamiquement le rapport cyclique de commutation, permettant ainsi au système de suivre en temps réel les fluctuations et de se maintenir au **point de puissance maximale (VPPM, IPPM)**. Cela garantit non seulement un rendement énergétique élevé, mais également une exploitation plus efficace des modules solaires, en minimisant les pertes et en optimisant la production d'électricité renouvelable.

La chaîne de conversion photovoltaïque est donc conçue de manière à intégrer un convertisseur statique (CS), piloté directement par l'algorithme MPPT. Ce dernier joue le rôle de superviseur intelligent, en régulant les échanges entre le générateur photovoltaïque et la charge, et en assurant une adaptation optimale entre les grandeurs d'entrée et de sortie. Le schéma de principe, illustré par la figure (2.10), met en évidence cette architecture typique : le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC/DC, lequel est commandé par une stratégie MPPT afin de maximiser le transfert d'énergie vers la charge ou le réseau. Une telle configuration constitue aujourd'hui la base des systèmes photovoltaïques modernes, car elle permet de tirer parti des ressources solaires même dans des conditions climatiques instables, assurant ainsi la fiabilité et la durabilité du système [24].

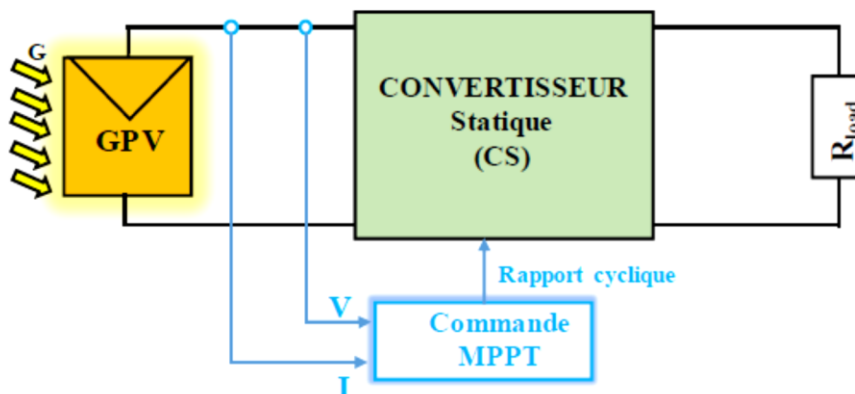


Figure II. 9 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande **MPPT** agit en modifiant le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique adapté, de manière à extraire la puissance maximale que le générateur photovoltaïque (GPV) est en mesure de fournir. Le principe repose sur le suivi en temps réel des caractéristiques électriques du GPV, qui sont fortement influencées par les variations de l'irradiation solaire et de la température ambiante. En ajustant continuellement le rapport cyclique, le contrôleur MPPT déplace le point de fonctionnement du convertisseur afin de l'aligner sur le **point de puissance maximale (MPP)**. Ce mécanisme assure que, quelles que soient les conditions de fonctionnement, le système photovoltaïque exploite toujours au mieux son potentiel énergétique.

L'algorithme MPPT utilisé pour atteindre ce point peut être de complexité variable, allant des approches simples basées sur la perturbation et l'observation, jusqu'à des méthodes plus sophistiquées exploitant des techniques adaptatives ou intelligentes. Dans la plupart des cas, ces algorithmes s'appuient sur l'analyse de l'évolution des paramètres électriques d'entrée du convertisseur — principalement la tension (V) et le courant (I) du GPV, et par conséquent la puissance instantanée produite. En ajustant progressivement le rapport cyclique en fonction de ces grandeurs, le système converge vers le MPP et s'y stabilise, comme l'illustre la figure (2.11). Ainsi, le rôle de l'algorithme est essentiel pour garantir une exploitation optimale de l'énergie photovoltaïque et une meilleure efficacité du système global.

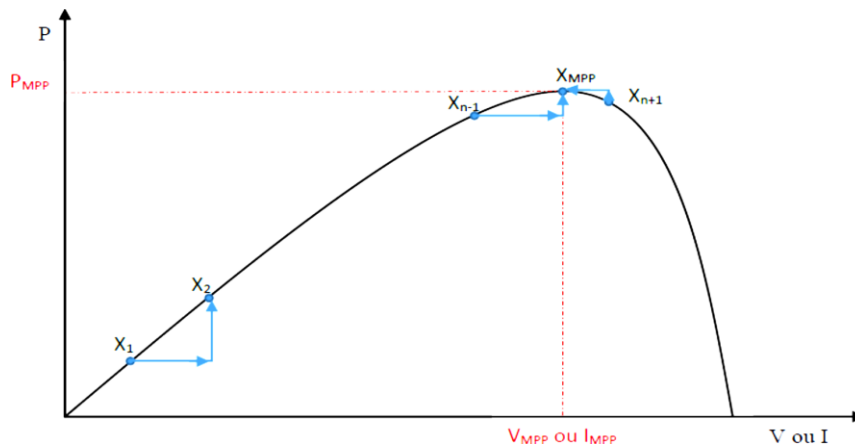


Figure II. 10 Principe de la commande MPPT.

2.4.2. Classification des MPPT:

De manière générale, les stratégies de commande MPPT peuvent être classées en fonction du mode d'implémentation électronique adopté, qu'il soit analogique, numérique ou encore hybride combinant les deux approches. Toutefois, une classification plus pertinente et plus couramment utilisée repose non pas uniquement sur l'aspect technologique de l'implémentation, mais sur la méthode de recherche du point de puissance maximale qu'elles mettent en œuvre ainsi que sur la nature des paramètres d'entrée exploités par l'algorithme de commande MPPT [24].

2.4.3. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS**

Il existe une variété de techniques de commande MPPT visant à rechercher le point de puissance maximale (PPM) en fonction de l'évolution de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (GPV). Parmi les plus connues figurent la méthode de Perturb and Observe (P&O) ainsi que l'algorithme de l'incrément de conductance, qui exploitent directement la valeur de la puissance fournie par le GPV pour définir et appliquer une action de contrôle adaptée au suivi du PPM.

D'autres approches reposent sur l'établissement de relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le PPM (tension optimale VOPT et courant optimal IOPT) et les paramètres caractéristiques du module photovoltaïque, tels que la tension en circuit ouvert (VOC) et le courant de court-circuit (ICC). À cela s'ajoutent des techniques plus récentes inspirées de l'intelligence artificielle, notamment celles fondées sur les réseaux de neurones artificiels. Dans ces dernières, le système peut s'appuyer soit sur une importante mémoire informatique stockant un

ensemble de scénarios possibles, soit sur des modèles plus approximatifs capables de donner une estimation efficace du PPM.

L'ensemble de ces commandes se distingue principalement par leur précision et leur rapidité de réaction, ce qui en fait des solutions performantes pour optimiser l'extraction de puissance dans les systèmes photovoltaïques [24].

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature scientifique, on retrouve également une catégorie d'algorithmes MPPT fondés sur l'exploitation des paramètres de sortie des convertisseurs statiques (CS). Parmi ces approches, on distingue notamment les commandes basées sur la maximisation du courant de sortie, particulièrement adaptées lorsque la charge connectée au système se comporte essentiellement comme une résistance pure. Ce type de stratégie cherche à ajuster le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque de façon à fournir le maximum de puissance électrique en optimisant directement le courant livré à la charge.

Cependant, dans la pratique, l'efficacité de ces algorithmes repose fortement sur la qualité et le rendement de l'étage de conversion. En effet, dans tous les systèmes basés sur les paramètres de sortie, la puissance maximale (P_{max}) n'est pas déterminée directement, mais plutôt approximée à travers les performances globales du convertisseur. Ainsi, plus le rendement du convertisseur est élevé, plus cette approximation s'avère fidèle à la réalité. À l'inverse, des pertes significatives dans l'étage de conversion peuvent entraîner un écart non négligeable entre la puissance réellement disponible et celle estimée par le système de commande.

Il convient également de souligner que la plupart de ces systèmes ne reposent que sur un seul capteur, ce qui les rend, par leur conception même, peu précis par rapport aux algorithmes qui exploitent simultanément plusieurs grandeurs électriques (tension, courant, puissance). En outre, leur développement initial a été principalement orienté vers des applications spatiales, où les contraintes de poids, de fiabilité et de simplicité étaient prioritaires par rapport à la précision absolue de suivi du point de puissance maximale. Cette orientation explique leur adoption limitée dans les systèmes photovoltaïques terrestres de grande envergure, malgré leur simplicité et leur faible coût de mise en œuvre [24].

2.5. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche:

2.5.1. Méthodes indirectes :

Dans le cadre des méthodes indirectes, on fait généralement appel à des bases de données regroupant les caractéristiques physiques du panneau photovoltaïque (PV) afin de générer les signaux de commande adaptés selon les conditions climatiques variables, telles que la température ou le niveau d'ensoleillement. Parmi ces approches, exclusivement réservées aux systèmes photovoltaïques, figurent la méthode de la tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) fondées sur l'intelligence artificielle (IA).

L'un des principaux atouts de ces méthodes réside dans leur simplicité de mise en œuvre, ce qui les rend particulièrement adaptées aux systèmes à faible coût et de précision limitée. De plus, elles sont généralement privilégiées dans des environnements où les conditions climatiques demeurent relativement stables, c'est-à-dire dans des zones géographiques caractérisées par une faible variabilité de l'irradiation solaire et de la température. Néanmoins, cette simplicité s'accompagne souvent de limites en termes de performance et de réactivité, ce qui peut restreindre leur utilisation dans des contextes nécessitant un suivi plus précis et dynamique du point de puissance maximale [25].

2.5.2. Méthode directe :

Dans le cadre des méthodes indirectes, on fait généralement appel à des bases de données regroupant les caractéristiques physiques du panneau photovoltaïque (PV) afin de générer les signaux de commande adaptés selon les conditions climatiques variables, telles que la température ou le niveau d'ensoleillement. Parmi ces approches, exclusivement réservées aux systèmes photovoltaïques, figurent la méthode de la tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) fondées sur l'intelligence artificielle (IA).

L'un des principaux atouts de ces méthodes réside dans leur simplicité de mise en œuvre, ce qui les rend particulièrement adaptées aux systèmes à faible coût et de précision limitée. De plus, elles sont généralement privilégiées dans des

environnements où les conditions climatiques demeurent relativement stables, c'est-à-dire dans des zones géographiques caractérisées par une faible variabilité de l'irradiation solaire et de la température. Néanmoins, cette simplicité s'accompagne souvent de limites en termes de performance et de réactivité, ce qui peut restreindre leur utilisation dans des contextes nécessitant un suivi plus précis et dynamique du point de puissance maximale [26].

2.6. Recherche du point de puissance maximale (MPPT):

2.6.1. Premières commandes MPPT:

En janvier 1968, A.F. Boehringer fut le premier à publier une loi de commande MPPT spécifiquement adaptée à une source d'énergie renouvelable photovoltaïque. Cette commande, fondée sur un algorithme de régulation adaptatif, avait pour objectif de maintenir en permanence le système au point de puissance maximale (MPP). Le principe de la méthode repose sur les mesures instantanées du courant délivré par le panneau (I_{pv}) et de la tension correspondante (V_{pv}). À partir de ces grandeurs, la puissance est calculée à un instant

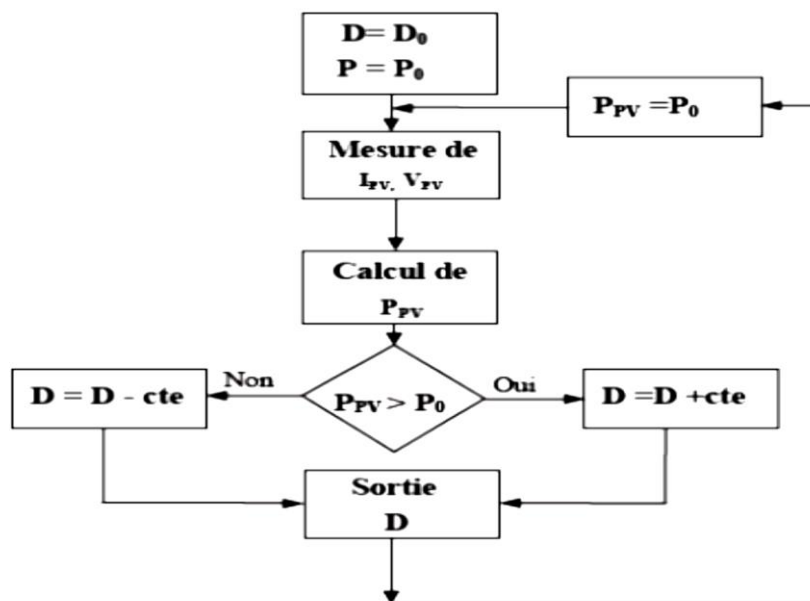


Figure II. 11 Principe de la première commande MPPT numérique.

2.6.2. Principe:

Afin de garantir que le système photovoltaïque fonctionne en permanence au niveau de ses points de puissance maximale, il est nécessaire de recourir à des lois de

commande spécifiques conçues à cet effet. Dans la littérature scientifique, cette stratégie est connue sous l'appellation « Recherche du Point de Puissance Maximale » ou Maximum Power Point Tracking (MPPT) en anglais. Le principe fondamental de ces commandes consiste à identifier et à suivre le point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une adaptation optimale entre le générateur photovoltaïque et sa charge, de manière à permettre un transfert efficace et complet de la puissance disponible.

La figure (2.13) illustre une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire intégrant un système de commande MPPT. Dans cette configuration, le contrôleur MPPT est associé à un convertisseur statique qui joue le rôle d'interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge. Ce dispositif permet de régler en continu le fonctionnement du système de sorte que la puissance produite corresponde à sa valeur maximale et soit directement transférée vers la charge, garantissant ainsi un rendement énergétique optimal et une exploitation efficace de la ressource solaire.

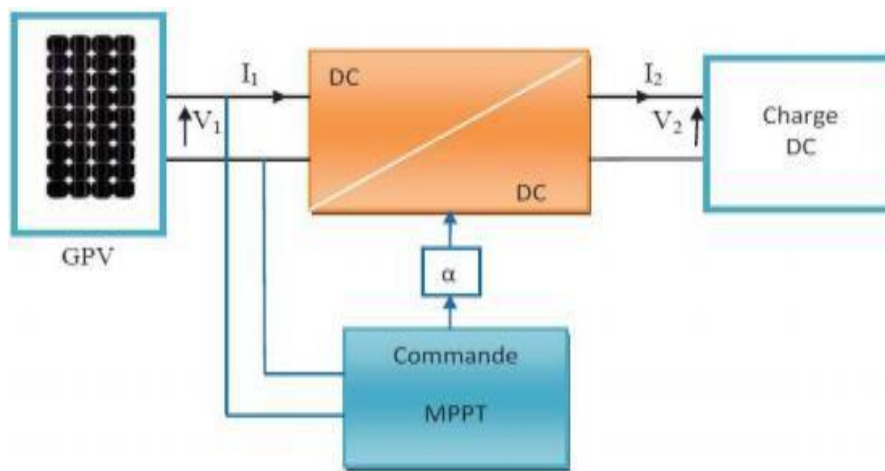


Figure II. 12 *Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.*

La technique de commande repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique afin de ramener en permanence le point de fonctionnement du générateur vers sa valeur optimale, et ce, indépendamment des fluctuations météorologiques ou des variations soudaines de la charge [27].

2.6.3. Types de commande MPPT:

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de recherche du point de puissance maximale, on présente dans ce qui suit les trois méthodes les plus utilisées dans la littérature.

- **Principe de la méthode Hill Climbing:**

La méthode de commande dite Hill Climbing repose sur l'introduction volontaire d'une perturbation du rapport cyclique, entraînant simultanément une variation de la tension. Cette perturbation provoque alors un déplacement du point de fonctionnement le long de la caractéristique reliant la puissance au rapport cyclique du générateur photovoltaïque [28], tel qu'illustré par la figure (2.14).

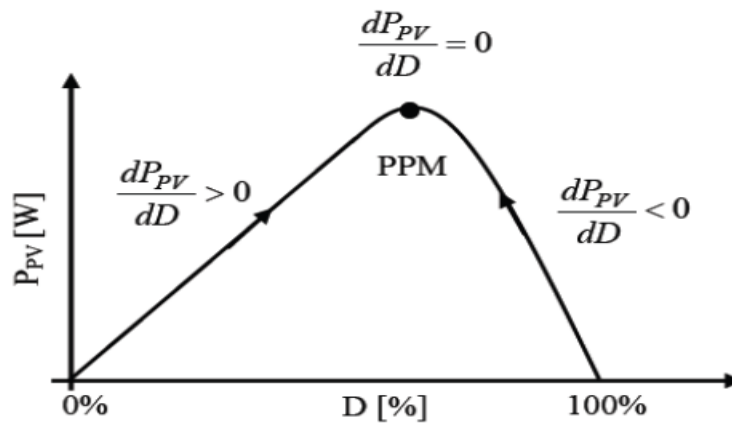


Figure II. 13 Relation entre la puissance et le rapport cyclique [28].

Lorsque l'incrément positive du rapport cyclique entraîne une augmentation de la puissance extraite, on en conclut que le point de fonctionnement se situe à gauche du point de puissance maximale (PPM) ; dans ce cas, le sens de la perturbation est conservé [28]. À l'inverse, si l'augmentation du rapport cyclique provoque une diminution de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM, et il convient alors d'inverser le sens de la perturbation.[28]

Dans cette approche, la variable sloop prend la valeur (+1) ou (-1) selon la direction de recherche permettant d'augmenter la puissance, tandis que a représente la variable d'incrément du rapport cyclique.[28]

L'un des principaux avantages de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne requiert pas la connaissance préalable des caractéristiques réelles de courant et de

tension du générateur photovoltaïque, ce qui la rend particulièrement simple et adaptable dans des conditions pratiques.

- **Principe de la méthode ‘Perturb and Observe:**

La méthode Perturb and Observe (P&O) est l’une des approches les plus utilisées pour la recherche du point de puissance maximale (PPM), principalement en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût de calcul [26]. Comme son nom l’indique, cette technique repose sur un principe simple : introduire une petite perturbation au niveau de la tension de sortie du module photovoltaïque, puis observer la réaction du système en termes de puissance délivrée.

Concrètement, lorsque la perturbation appliquée entraîne une augmentation de la puissance extraite, l’algorithme en déduit que le système se rapproche du PPM et continue donc dans la même direction de variation. En revanche, si la perturbation provoque une diminution de la puissance, cela signifie que le fonctionnement s’éloigne du PPM, et la direction de la perturbation est alors inversée [26].

Cette approche itérative permet au système de suivre dynamiquement le PPM, même en présence de variations progressives des conditions d’ensoleillement ou de température. Toutefois, elle présente certaines limites, notamment des oscillations permanentes autour du point optimal, qui peuvent engendrer de légères pertes énergétiques. Malgré cela, sa robustesse et sa facilité d’implémentation expliquent largement son adoption dans de nombreux systèmes photovoltaïques, en particulier ceux de petite et moyenne puissance.

- **Principe des commandes « Incrément des conductances » (IncCond) :**

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par :

$$\mathbf{G} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.6)$$

$$d\mathbf{G} = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.7)$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d’écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

En utilisant la relation (2.8), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.8)$$

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long [28].

2.6.4 Commande MPPT par la méthode « Incrément des conductances » :

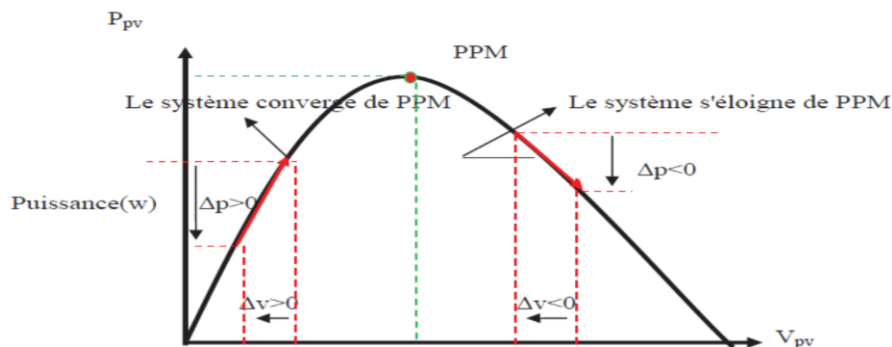


Figure II. 14 Illustration de la méthode IC .

La perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction. Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

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. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP [23] [24].

La figure (II.16) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Selon cet algorithme, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à des instants successifs d'échantillonnage, et pouvoir calculer l'erreur de tension et de puissance :

$$\Delta V = V_{pvk} - V_{pvk-1} \quad (2.9)$$

$$\Delta P = P_{pvk} - P_{pvk-1} \quad (2.10)$$

La méthode de l'Incrémentation de la Conductance (IC) est aujourd'hui très répandue grâce à sa simplicité de mise en œuvre et à son efficacité relative dans le suivi du point de puissance maximale (PPM). Toutefois, malgré ces avantages, elle présente certaines limites importantes. En effet, cette méthode entraîne généralement des oscillations autour du PPM une fois que le régime établi est atteint, ce qui engendre des pertes d'énergie et réduit légèrement le rendement global du système.

Le principe de cette commande repose sur une recherche périodique et répétée du PPM, ce qui impose au générateur de fonctionner en oscillant continuellement autour du point optimal. Ces oscillations peuvent certes être réduites en diminuant l'amplitude de la perturbation appliquée, mais cela se fait au détriment de la vitesse de convergence : plus l'incrément est petit, plus le système met du temps à retrouver le MPP en cas de variation brutale des conditions météorologiques. À l'inverse, un incrément plus grand accélère la recherche du PPM, mais provoque des fluctuations plus marquées autour du point optimal.

Ainsi, la mise en œuvre de la méthode IC nécessite un compromis délicat entre la précision et la rapidité de réponse, ce qui rend son optimisation complexe. Ce défi constitue l'une des principales limites de cette technique, en particulier dans les environnements soumis à des variations rapides d'ensoleillement ou de température,

où un suivi à la fois précis et réactif est indispensable pour maximiser la puissance extraite [29].

2.6.5 Avantages et inconvénients d'IC:

- **Avantage :**

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

- **Inconvénients :**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [29].

III.9: Le bloc de Simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O) :

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O figure (2. 6), en nous basant sur l'organigramme illustré sur la figure.

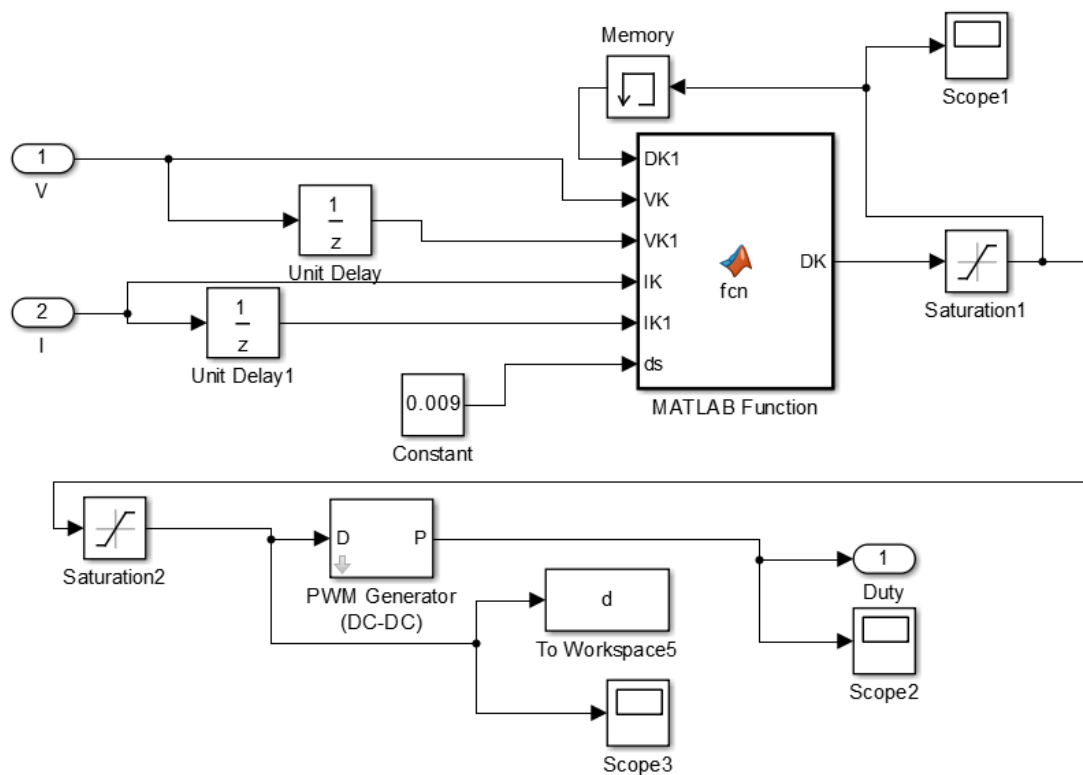


Figure II. 15 schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).

III.10.Simulation d'un

photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :

- **Schéma bloc :**

CHAPITRE II :POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

La figure 2.7 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT .

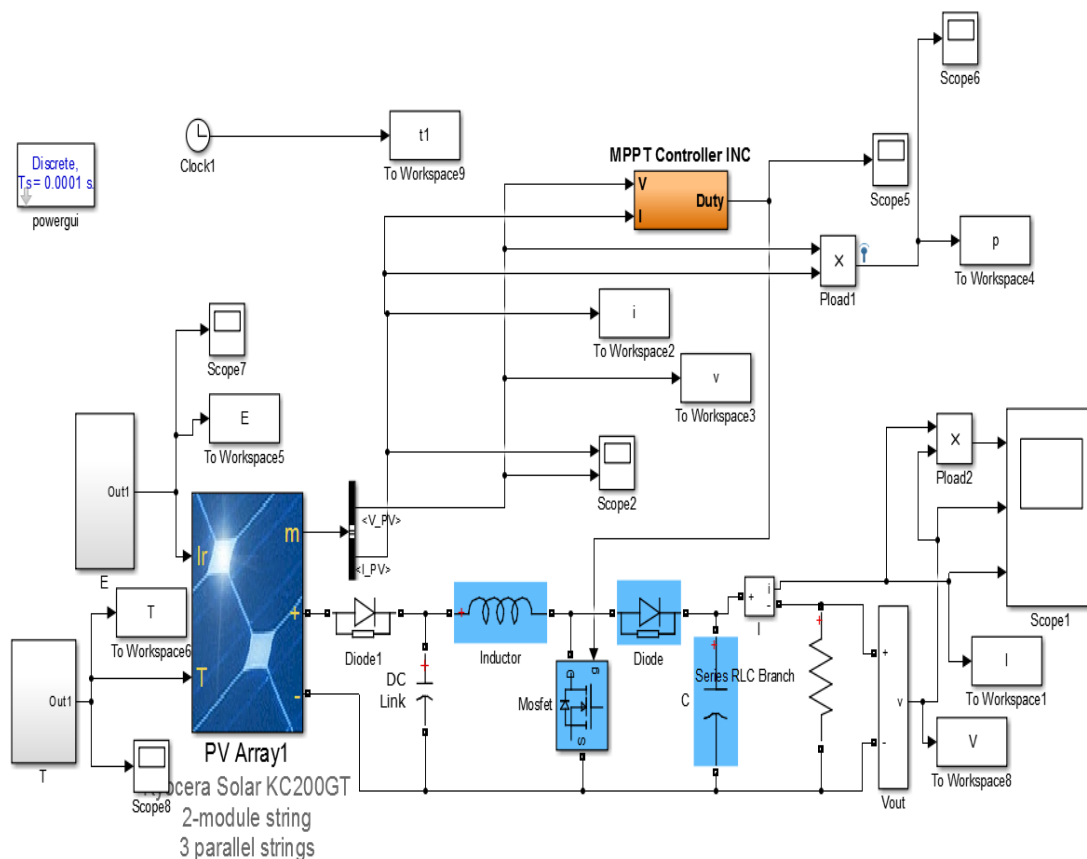


Figure II. 16 Schéma bloc d'un photovoltaïque munis de la MPPT.

- Les caractéristiques utilisées pour le module PV sont données par le Tableau III.2

Nombre de cellule en série par panneau (Ns)	54
Puissance maximale (P_max)	200.143 W
Courant de court-circuit (I_cc)	8.21 A
Tension de circuit ouvert (v_co)	32.9 V
Courant au point de MPP (I_op)	7.61 A
Tension au point de MPP (v_op)	26.3 V
Nombre de panneau en série (Nps)	2
Nombre de panneau en parallèle (Npp)	3

Tableau II. 1Fiche technique de KC200GT aux conditions STC .

• **Commentaire :**

Les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant :

Tableau II. 2 Les paramètres du convertisseur.

Paramètre	Nom	Valeur
L_i	Inductance du convertisseur	4 mH
C_i	Capacité d'entrée	4700 uF
C_o	Capacité de sortie	470 UF
R	Resistance de charge	200Ω

➤ **Commentaire :**

La figure suivante présente allure de puissance en fonction de tension d'un système photovoltaïque (panneau 200w) commandé par un contrôleur **PO** dans une température et éclairements variable.

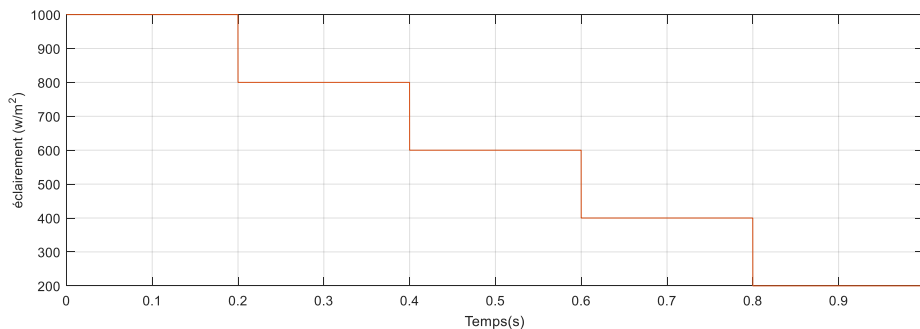


Figure II. 17 Variation d'éclairement.

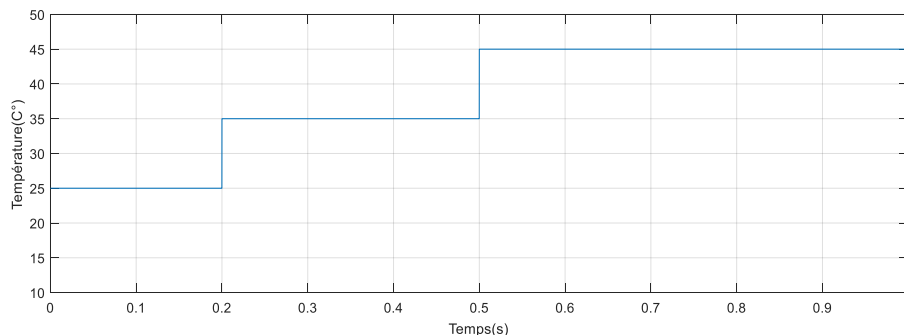


Figure II. 18 Variation de la température.

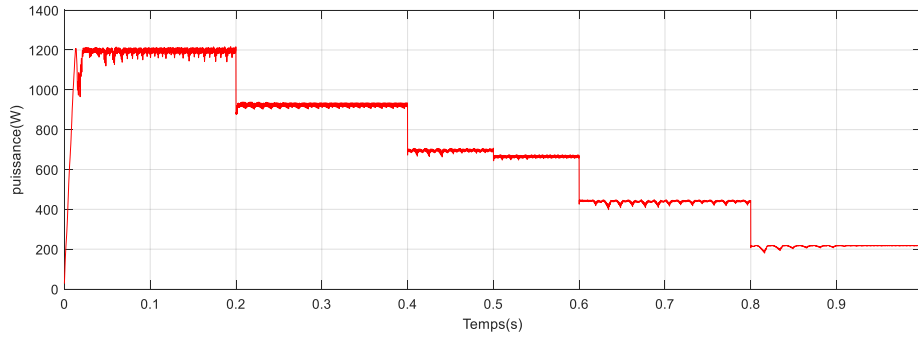


Figure II. 19 puissance $P(t)$ d'un système PV.

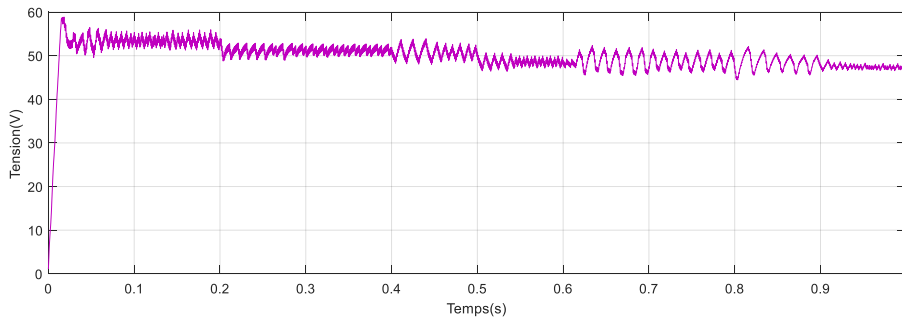


Figure II. 20 tension $v(t)$ d'un système PV.

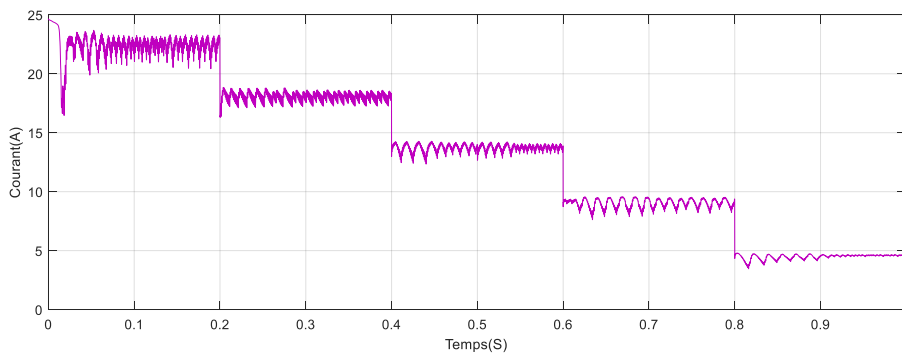


Figure II. 21 courant $i(t)$ d'un système PV.

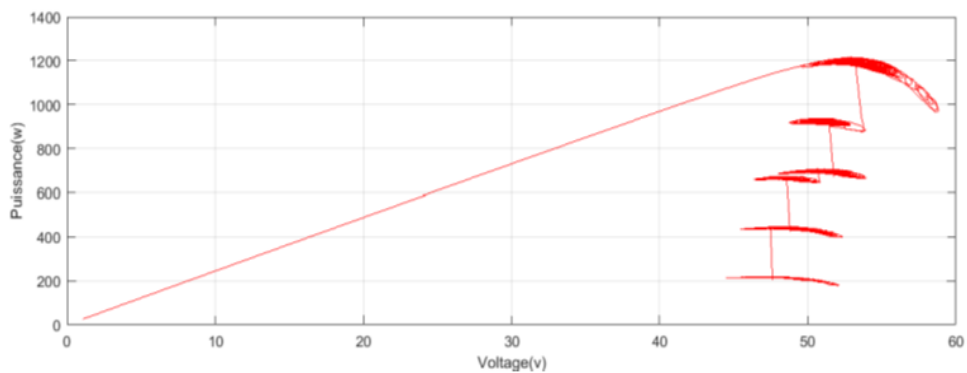


Figure II. 22 Caractéristiques P-V d'un système PV.

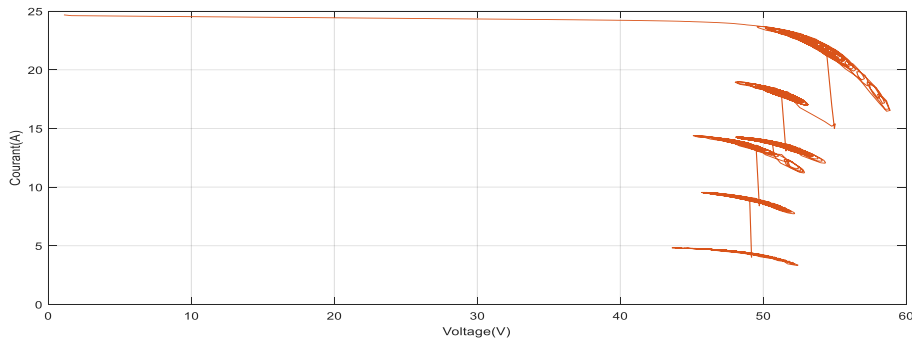


Figure II. 23Caractéristiques I-V d'un système PV.

- ✓ La figure (2.20) illustre la puissance en fonction du temps d'un système photovoltaïque contrôlé par un algorithme de Perturbation et Observation (P&O).
- ✓ Les figures (2.20), (2.21),(2.22) présentent allure de puissance et la tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur PO a température Variable et différents éclairagements :
- ✓ Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité $E=200, 400, 600, 800,1000 \text{ W/m}^2$. À l'instant $t=1s$ avec une température variable ($25,35,45^\circ\text{C}$). Par conséquent, nous constatons dans les figures (2.20, 2.21), le Point de fonctionnement est le stabilise au tour du MPP avec une certaine oscillation qui est causée par l'algorithme de commande [17].

2.8. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude par simulation MPPT par méthode la méthode (P&O) .qui basées sur contreclé de la réaction de puissance, Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Finalement les résultats de simulation pour l'algorithme P&O du système global sont construits sous Sim Power System du *Matlab/Simulink*. Avec succès.

Chapitre III :
COMMANDE MPPT D'UN
SYSTEME DE POMPAGE
PV A BASE D'UN MOTEUR
A COURANT CONTINU

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

3.1. Les systèmes de pompage photovoltaïque:

De nombreuses communautés vivant dans les zones rurales des pays en développement font face à d'importants défis liés au manque d'eau. Ces difficultés se trouvent particulièrement exacerbées dans les régions désertiques. Le manque d'eau dans les terres arides est une problématique cruciale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces régions dépend de la mise en œuvre de solutions appropriées à cette problématique. Le pompage photovoltaïque (PV) constitue une solution parfaite pour assurer l'approvisionnement en eau là où le réseau électrique n'existe pas. [13]

À l'heure actuelle, deux types de systèmes de pompage photovoltaïque sont en usage : ceux avec batteries et ceux sans. La technologie sans batteries présente certains inconvénients, son principal inconvénient étant que le débit d'eau varie en fonction de l'ensoleillement durant la journée. Nous allons réaliser une étude en intégrant des batteries dans le système de pompage photovoltaïque.

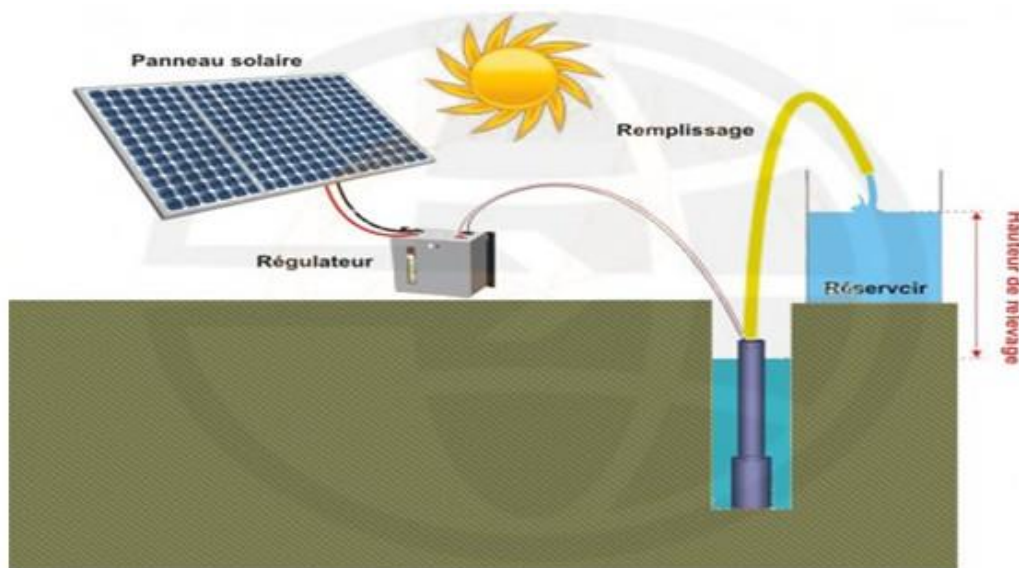


Figure III. 1 Les systèmes de pompage photovoltaïque

3.2. Modélisation de la machine à courant continu:

La modélisation de la machine à courant continu en régime transitoire permet notamment de mettre en évidence certains phénomènes qui apparaissent lors du fonctionnement de la machine tels que : le démarrage, le

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

freinage, la réaction d'induit, la commutation, la variation de la vitesse, ... etc.

Considérons un moteur à courant continu à flux constant obtenu par excitation séparée. Ce type d'excitation nous permet d'obtenir une commande en vitesse relativement simple qui s'opère par action sur la tension de l'induit.

3.3. équation de la machine :

La modélisation de l'ensemble moteur + charge est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et de la relation fondamentale de la dynamique.

Le schéma électrique d'une MCC à excitation indépendante est le suivant:

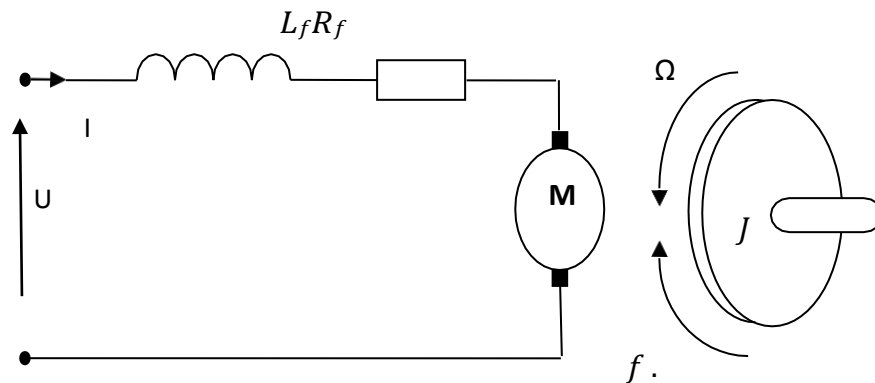


Figure III. 2 Schéma d'une MCC à excitation séparée.

L'indice 'e' correspond à « excitation », l'indice 'a' correspond à « alimentation ».

- Equation de l'inducteur:

$$U_e = R_e \times I_e + \frac{dI_e}{dt} \quad (3.1)$$

Equation de l'induit :

$$E + \frac{dI_a}{dt} \times L_a + I_a \times R_a = U_a$$

(3.2)

Avec Ω vitesse de rotation en rad/s

- Equation du flux:

On réalise une simulation simple où le flux est toujours une fonction linéaire de

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

courant d'excitation et donc on néglige les effets de la saturation :

$$\Phi_e = M_{ea} \times I_e \quad (3.3)$$

- Equation du couple:

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique:

$$P_e = I_a \cdot E = I_a \cdot K \Omega \Phi = C_e \Omega \quad (3.4)$$

- Ce qui donne:

$$C_e = K \cdot I_a \cdot \Phi \quad (3.5)$$

- Equation mécanique

$$C_e - C_r = \sum j \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (3.6)$$

Où c'est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant imposé par la charge, $\sum j$ le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

3.4. Modèle de la pompe :

La pompe est un élément essentiel des systèmes de pompage. Dans notre travail on a utilisé une pompe centrifuge. Son couple de résistance C_r est donné par l'équation suivante :

$$C_r = k \cdot \omega C^2 \quad (3.7)$$

Où k est le coefficient de proportionnalité (Nms² / rad²)

L'équation mécanique du système est :

$$C_m - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.8)$$

Où J est le moment d'inertie du groupe moteur pompe (kg/m²).

3. Commande en courant par hystérésis de la MCC

La réalisation de cette technique, régulation par tout ou rien, consiste à accomplir les deux

étapes suivantes :

- Comparer le courant mesuré avec le courant de référence ce qui produit un signal de commande qui sera le signal d'entrée appliqué au comparateur à hystérésis.

- Fixer une bande dans laquelle le courant peut évoluer. L'atteinte du courant à l'une des

limites provoque le changement du fonctionnement des interrupteurs de telle manière que le

courant ne dépasse pas cette limite et se dirige vers l'autre.

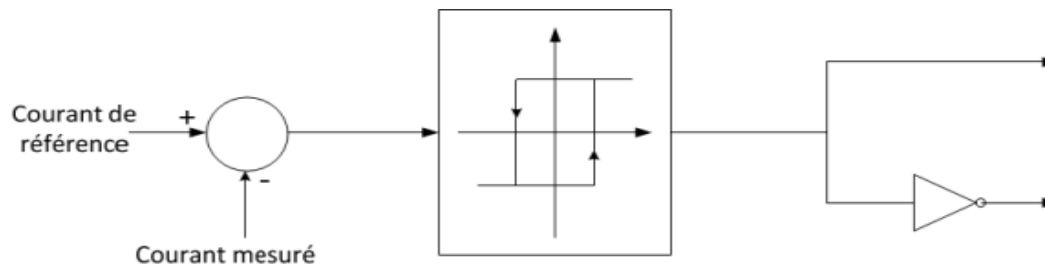


Figure III. 3 Principe de commande par Hystérésis.

3. régulateur de vitesse par régulateur PI

Le régulateur de vitesse ici est action par un douzième hacheur de type série muni d'une commande de la machine. il doit permettre de transformer la tension fixe fournie par le première hacheur à une tension continuellement variable .la commande en vitesse d'une machine à courant continu via un régulateur pi qui généré la courant de référence est la dernier réglé par une régulateur a hystérisés .

3.2. REGULATEUR DE VITESSE PAR LOGIQUE R FLOUE

La logique floue est une extension de la logique booléenne, technique de traitement des connaissances imprécises fondée sur des termes linguistiques. Elle offre une méthode pour transformer une instruction linguistique basée sur le raisonnement humain en une commande automatique, en intégrant la notion de degré dans l'évaluation d'une condition. Cela permet à une condition d'exister sous divers

états, qu'ils soient vrais ou faux. Par conséquent, la logique floue offre un certain degré de flexibilité qui facilite la prise en compte de certaines incertitudes et imprécisions, nous donnant ainsi la capacité de contrôler des systèmes complexes dont les informations sont formulées de manière vague et imprécise.

L'un des avantages de la logique floue pour modéliser le raisonnement humain réside dans le fait que les règles sont exprimées en langage naturel [13].

3.2.1. Principe de la logique floue:

La logique floue repose sur la description d'un phénomène généralement marqué par des termes vagues tels que : chaud, froid. Vite, lentement. Grand, de taille moyenne, petit. Valeur maximale et minimale. Positive, zéro, négative... etc. Les composants fondamentaux de la théorie de la logique floue comprennent : les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance [14].

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 $\Delta\alpha$ (variation du courant). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique .

3.3. Algorithmes de la logique floue

Des techniques de contrôle basées sur la logique floue ont récemment été introduites car elles offrent l'avantage d'un contrôle robuste et ne nécessitent pas une connaissance exacte du modèle mathématique du système. De plus, ces techniques basées sur la logique floue améliorent les performances (vitesse de convergence, précision, facilité de mise en œuvre et faible coût).

De manière générale, le principe du contrôleur utilisant la logique floue se base sur deux variables d'entrées (figure 3.1) qui sont l'erreur (E), sa variation (CE) et une variable en sortie (ΔD), correspondant à la variation du courant du moteur qui pilote le signal de commande du convertisseur statique pour la recherche la vitesse correspondant [32].

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU



Figure III. 4 Structure du contrôleur de vitesse à base logique floue.

Le contrôleur flou se compose de trois blocs de traitement consécutifs : le premier bloc est celui de la fuzzification qui permet le passage du domaine réel au domaine flou ; le deuxième est consacré aux règles d'inférences alors que le dernier est réservé à l'opération de defuzzification permettant le retour au domaine réel [13]. Pour contrôler un moteur à courant continu (CC) qui actionne une pompe à l'aide de la logique floue, il faut d'abord déterminer les variables d'entrée et de sortie du système, concevoir des fonctions d'appartenance pour les variables linguistiques (ex: "vitesse lente", "débit faible"), définir les règles floues basées sur des connaissances expertes pour ajuster la puissance du moteur en fonction de la demande de la pompe.

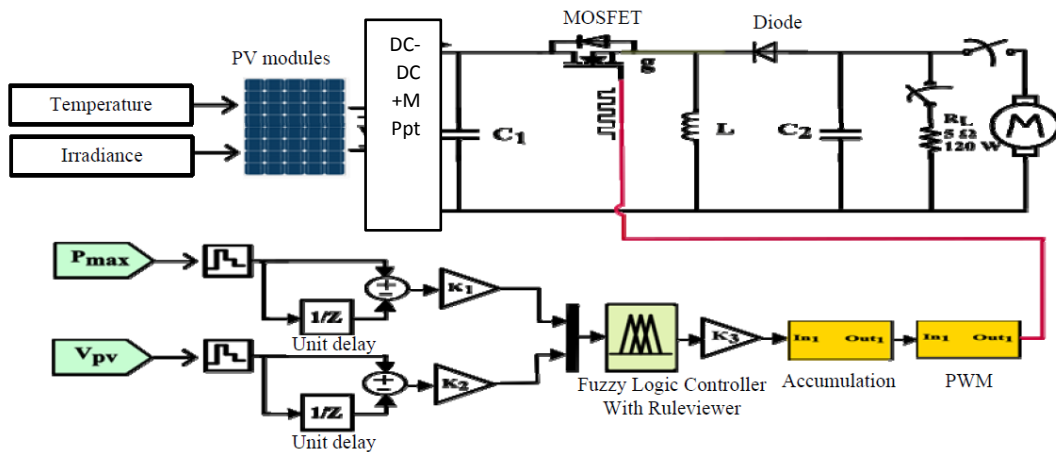


Figure III. 5 Mise en œuvre du contrôleur flou de la MCC.

3.3.1. La fuzzification:

La fuzzification permet de transformer les variables réelles en variables floues. Les variables d'entrée du régulateur flou proposée sont : l'erreur de la vitesse (E) et la variation de l'erreur (CE). Et le sorte . À un instant d'échantillonnage k , ces variables sont exprimées comme suit: [32,33]

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

$$E(k) = w(k) - w_{ref}(k) \quad (3.1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (3.2)$$

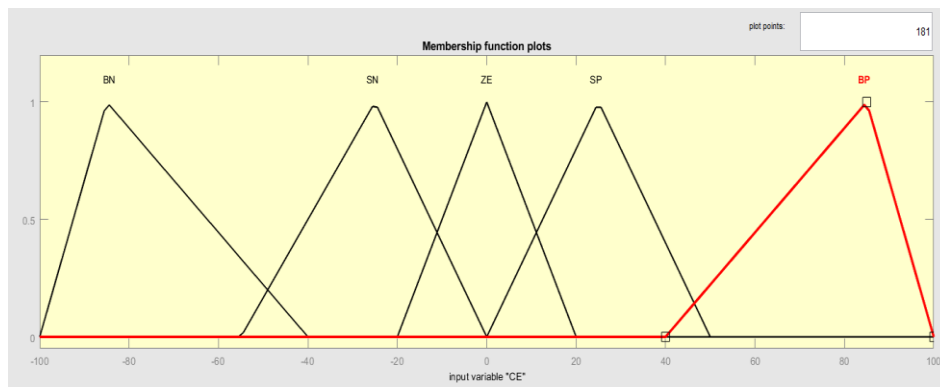
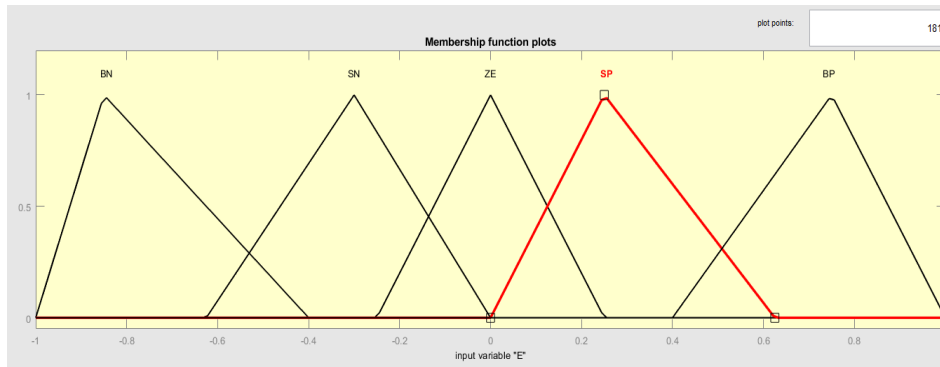


Figure III. 6 Les fonctions d'appartenance des entrées *E* et *CE*

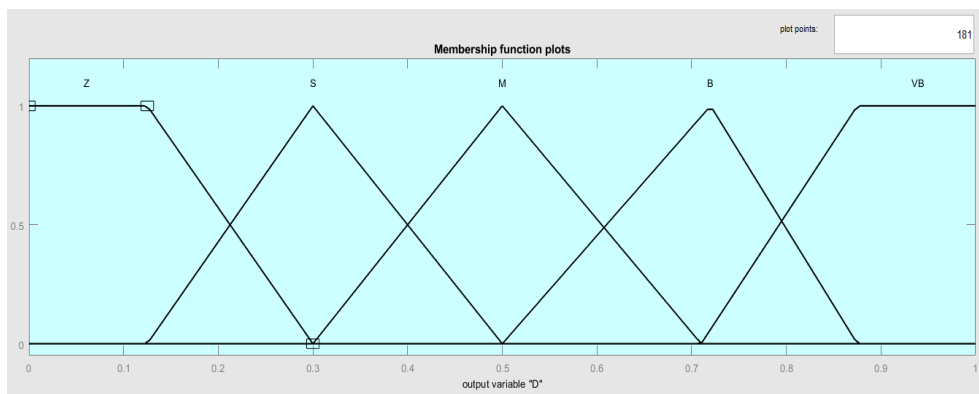


Figure III. 7 Les fonctions d'appartenance de la sortie.

3.3.2. Inférence floue:

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence (Tableau (3.1)).

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

Finalement, en defuzzification, on convertit les sous-ensembles flous de sortie en une valeur numérique [31].

CE	E				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	Z	Z	Z	B	M
NS	Z	Z	S	M	B
Z	Z	S	M	B	VB
PS	S	M	B	VB	VB
PB	M	B	VB	VB	VB

Tableau III. 1 Règles du contrôleur à logique floue.

3.3.3. La défuzzification:

C'est l'étape finale de la logique floue. Suite au processus d'inférence, la sortie du contrôleur se présente sous forme de courbes de variables linguistiques. On utilise par la suite des techniques de défuzzification pour déterminer et traduire les variables linguistiques en une valeur numérique. Dans cette étude, nous appliquons la technique du centre de gravité [14], qui définit la réponse du contrôleur comme étant la valeur du centre de gravité du dernier sous-groupe flou combiné.

3.4. Résultats de simulation de la méthode de logique floue :

La méthode flou, est une technique intelligente utilisée pour contrôler le vitesse du à courant continu (CC) en utilisant des règles linguistiques et des raisonnements Nous allons Le régulateur de type Mamdani, nous avons réalisé quelque modification pour le calcul de E et CE, ainsi que l'adaptation de la sortie du contrôleur qui est la variation du rapport cyclique.

La Figure (3.8) illustre le schéma bloc de la commande MPPT flou sous Simulation.

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

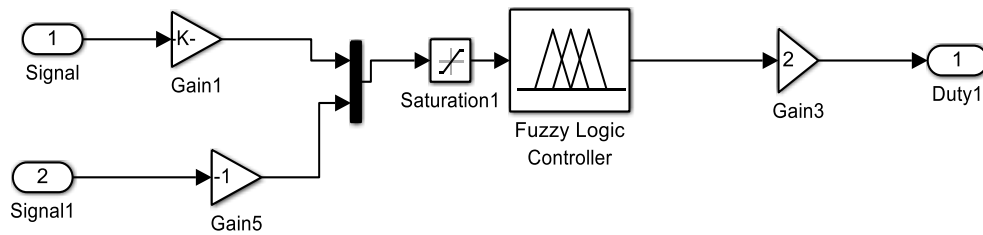


Figure III. 8 simulation du contrôleur flou de la vitesse.

Après avoir dimensionné tous les éléments du contrôleur flou nous allons l'intégrer dans notre système grâce à la Toolbox -Fuzzy de Simulation .

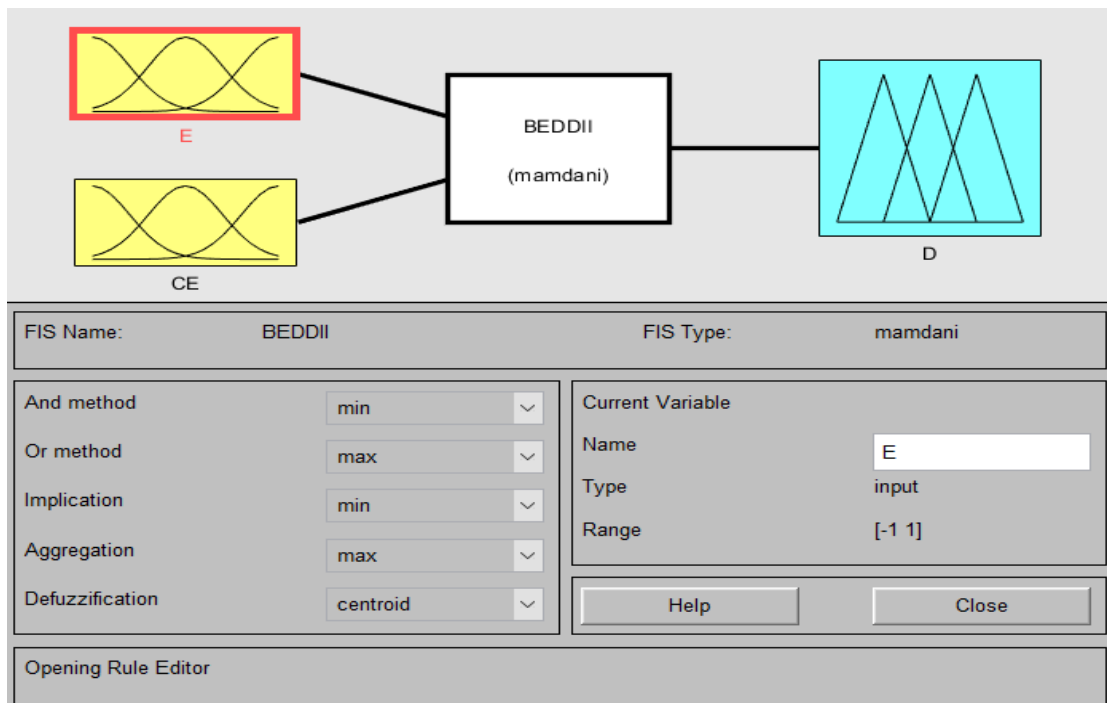


Figure III. 9 Schéma générale du contrôleur flou.

Pour évaluer la robustesse du contrôleur Flou face des différentes conditions environnementales on effectue une variation de températures et éclairagements .

Plusieurs essais de simulation sous Simulink/Matlab sont effectués en vue de mettre en évidence les performances du système de commande

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

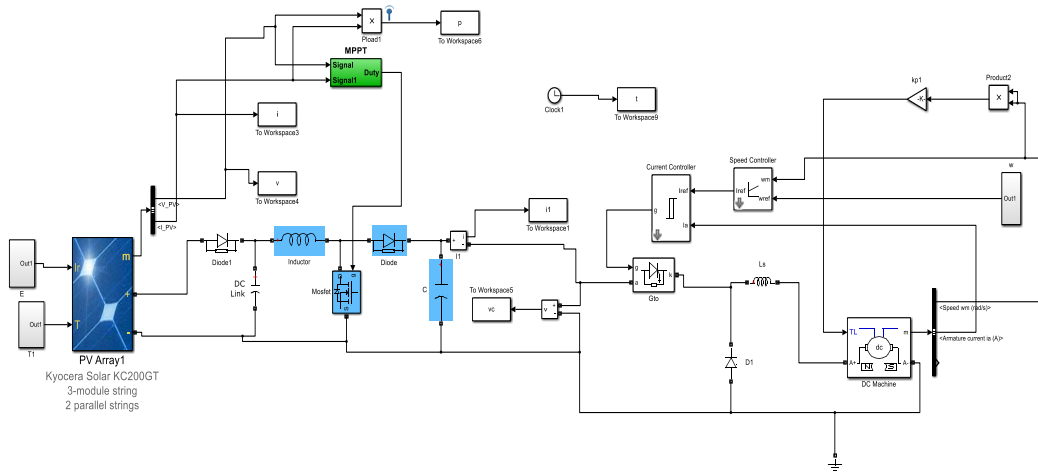


Figure III. 10 Schéma bloc du système de pompage PV-DC motor avec régulateur PI sous Simulink

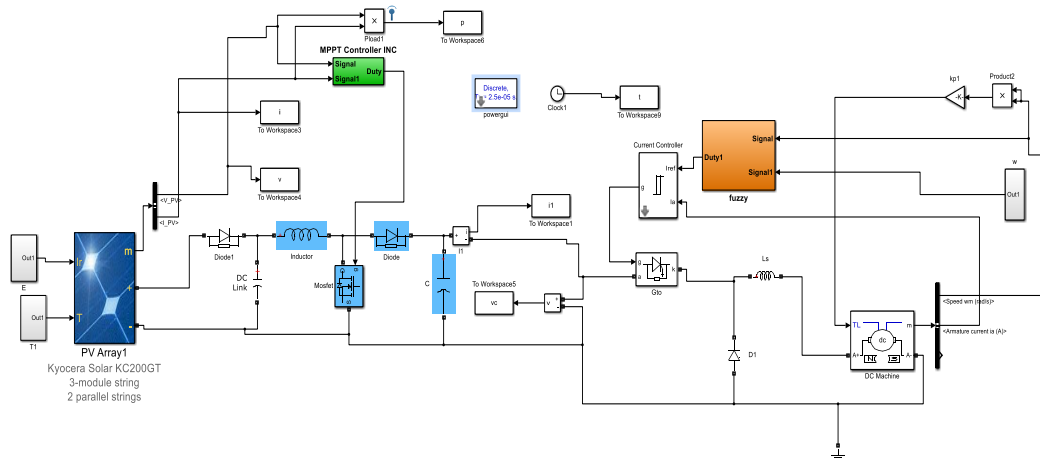


Figure III. 11 Schéma bloc du système de pompage PV-DC motor avec régulateur flou sous Simulink.

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

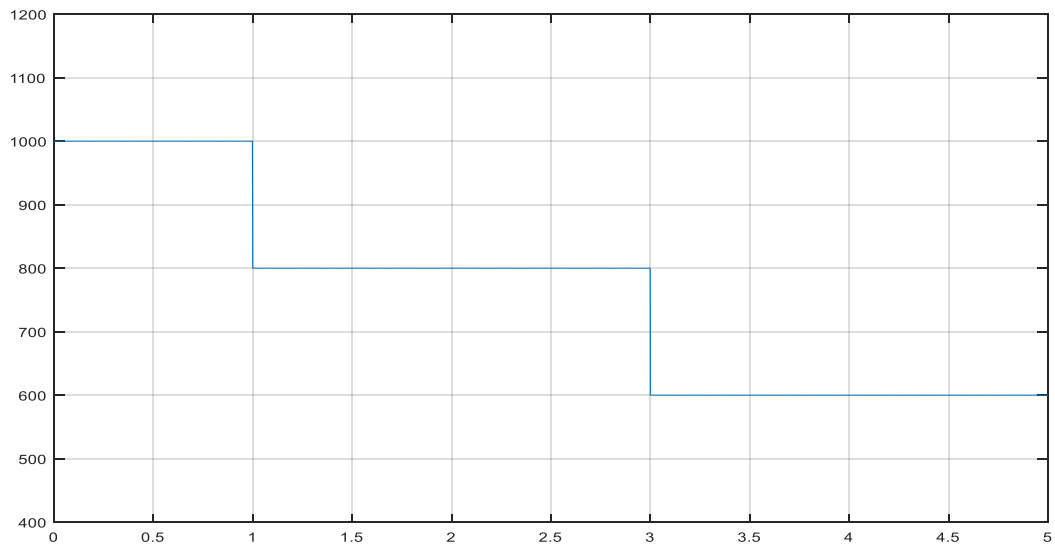


Figure III. 12 Variation de l'éclairement.

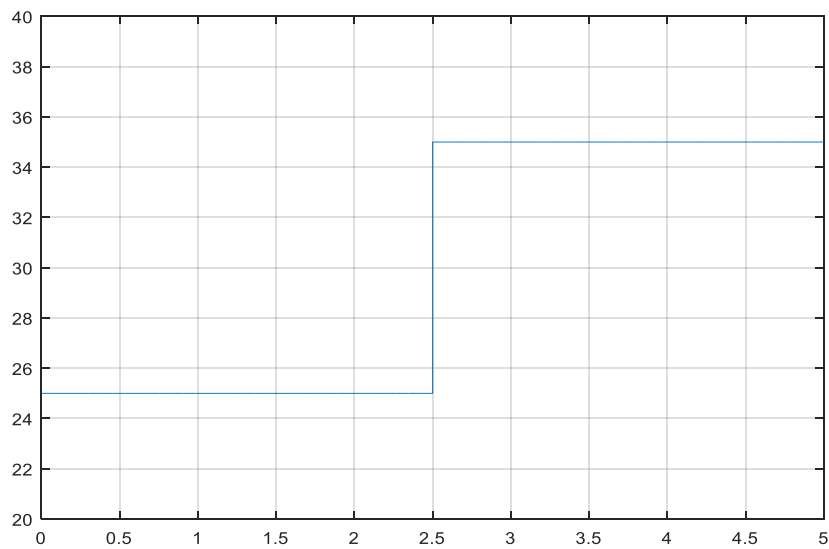


Figure III. 13 Variation de la température

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

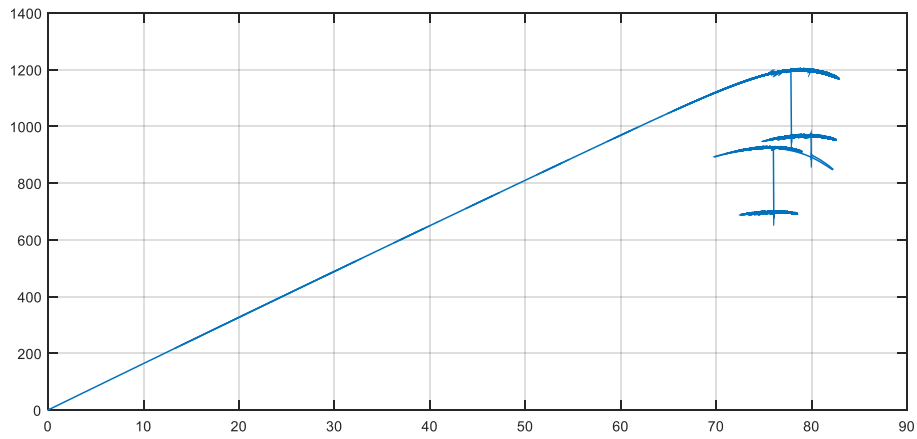


Figure III. 14 La Puissance du PV en fonction de la tension

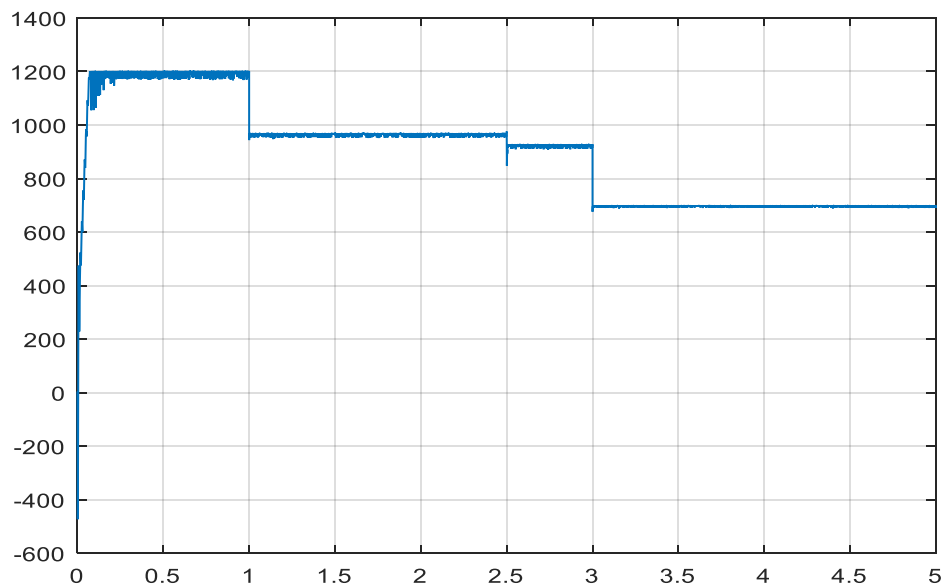


Figure III. 15 La Puissance du PV

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

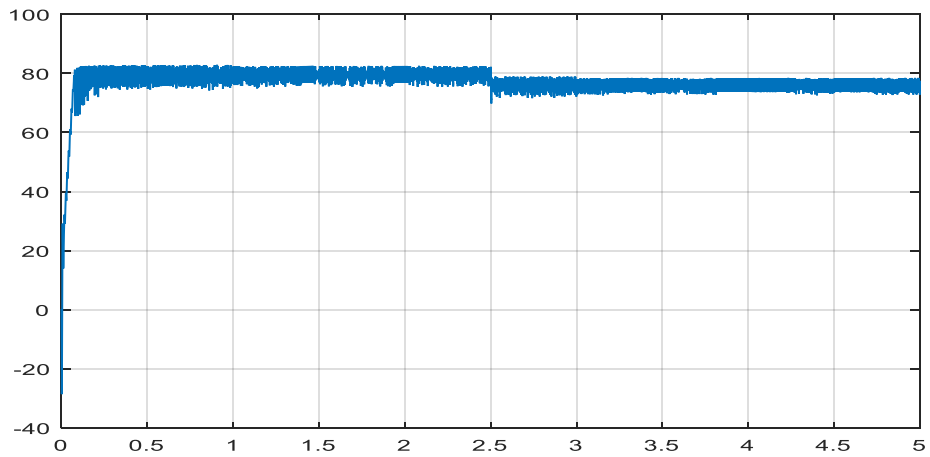


Figure III. 16 La Tension du PV

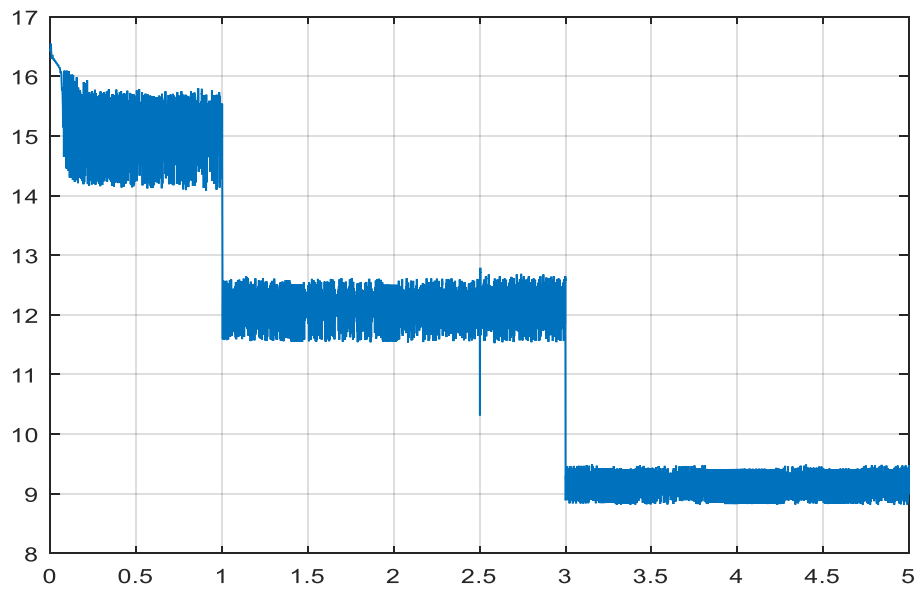


Figure III. 17 courant du PV

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV A BASE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU

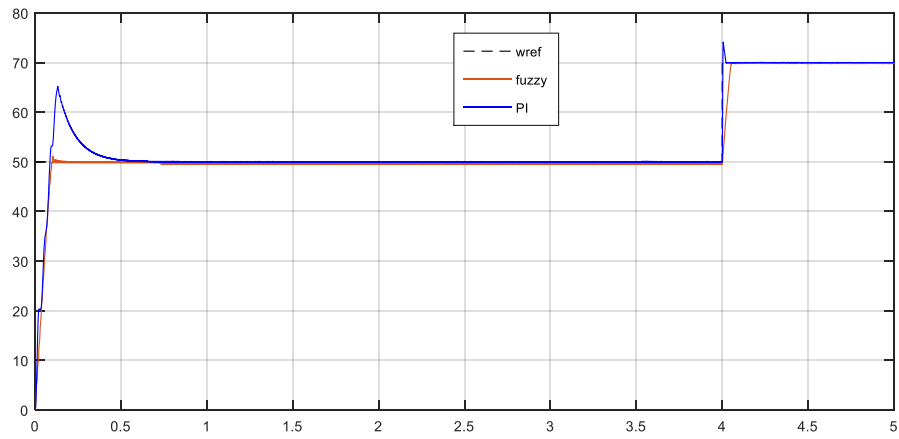


Figure III. 18 Variation de Vitesse de rotation du moteur

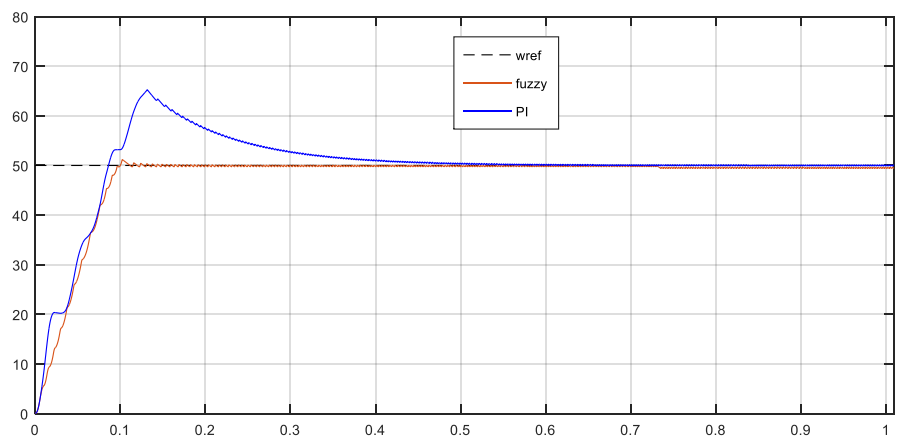


Figure III. 19 zoom variation de Vitesse de rotation du moteur

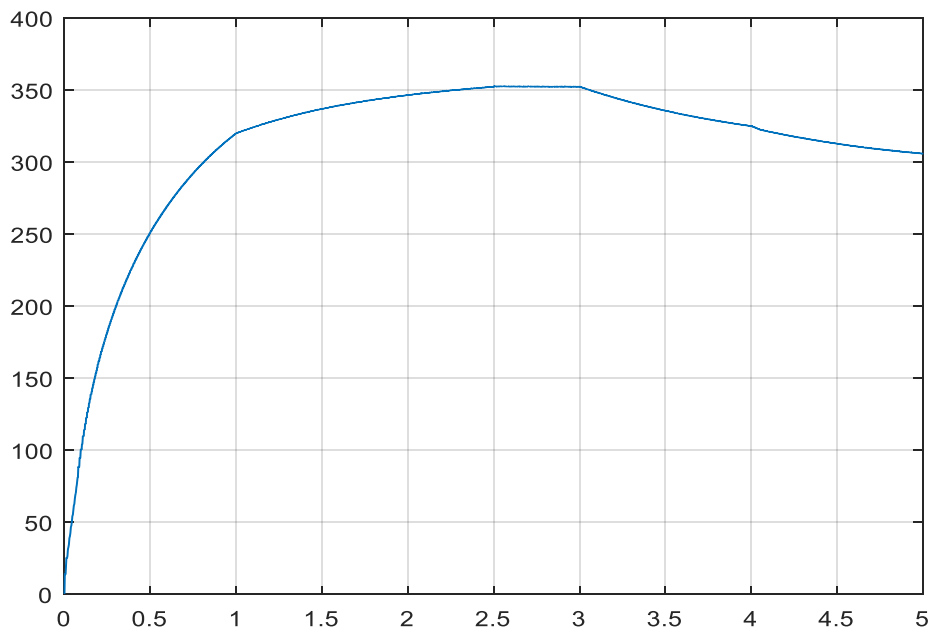


Figure III. 20 La Tension du MCC.

Interprétation :

Les résultats obtenus ont montré des performances très acceptables, se traduisant par des comportements excellents, aussi bien en poursuite, qu'en régulation, avec une réponse rapide lors de la variation des consignes. D'après les résultats le régulateur -flou a montré de bonnes performances vis-à-vis le temps de réponse du système à contrôler et le régulateur flou doit-il contrôler directement la vitesse du moteur

La variation de l'éclairement dans le temps affecte la rapidité du moteur, qui est lié à la tension idéale et par conséquent aux performances de la pompe (hauteur et débit).

Une augmentation de la température conduit à une baisse de la puissance et de la tension du panneau solaire.

Les différents résultats obtenus par simulation montrent la robustesse du régulateur utilisé vis-à-vis des perturbations. D'autre part la poursuite en vitesse est sans dépassement et sans erreur statique acceptable.

IV.8 . CONCLUSION :

Dans ce dernier chapitre, nous avons validé par simulation la chaîne de pompage complète. Ce qui nous a permis de conclure que:

- La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement.
- La tension à la sortie du hacheur BOOST est la seule grandeur qui permet la commande de la vitesse du moteur à courant continu.
- En commandant la vitesse, on peut contrôler le débit et la hauteur manométrique totale du système de pompage.

La commande par logique floue des systèmes de pompage photovoltaïque avec moteur à courant continu représente une solution technologique avancée qui combine:

- **Efficacité énergétique maximisée** grâce au MPPT
- **Robustesse** face aux variations environnementales
- **Simplicité d'implémentation** comparée aux systèmes complexes

Cette approche constitue une référence technique pour les applications de pompage solaire autonome, particulièrement adaptée aux régions à fort ensoleillement et aux besoins en eau décentralisés.

Conclusion générale

Le but de ce travail est l'étude de la commande de vitesse des moteurs pour les applications de pompage autonomes (solaire). Nous avons validé par simulation la chaîne de pompage complète. Composée d'un moteur à courant continu et pompe centrifuge, via un convertisseur DC/DC de type Boost. Ce qui nous a permis de conclure que:

La puissance maximale est obtenue de plus, l'approche de contrôle annule les effets des perturbations causées par les variations des conditions environnementales. Réguler la vitesse du moteur à courant continu alimenté par des panneaux solaires photovoltaïques peut être contrôlée avec un contrôle précis et un bon rendement à vitesse variable. Deux régulations ont été proposées dans le but d'effectuer une poursuite de consigne : une commande par logique floue (FLC) et une commande à l'aide d'un régulateur (PI). La comparaison entre ces deux régulations a démontré que le régulateur flou présente de meilleurs résultats que le régulateur PI.

Annexes

Tableau 1: Les paramètres du convertisseur électrique 'Boost' sont donnés par le tableau suivant

Paramètre	Nom	Valeur
L_i	Inductance du convertisseur	3,5 mH
C_i	Capacité d'entrée	4700 μ F
C_o	Capacité de sortie	470 μ F

Tableau 2: Paramètres du groupe moteur DC avec une -pompe centrifuge

Table II

Armature resistance (R_a)	1.254 (Ω)
Armature inductance (L_a)	3.49 (mH)
Back-emf constant ($K_b = K_e$)	0.333 (V.sec/rad)
Viscous friction coefficient (B)	0.0008 (N.m.sec/rad)
Moment of inertia (J)	0.004 (Kg/m ²)
Armature voltage (V_a)	135 (V)
Pump constant (K_p)	1.9×10^{-5} (N.m. (sec/rad) ²)

Références

- [1] R. CHENI, L. ZAROOUR, E. MATAGNE, T. KERBACHE, "Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque", article de science et technologie B- N°26, décembre (2007), 49-54.
- [2] M. Berrera, A. Dolara, R. Faranda, and S. Leva, "Experimental test of seven widely-adopted MPPT algorithm," IEEE Bucharest Power Tech Conference 2009, pp. 1 - 8.
- [3] Aashoor, F. A. O., & Robinson, F. V. P. (2013, September). Maximum power point tracking of photovoltaic water pumping system using fuzzy logic controller. In *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [4] Hasan, M., Alhazmi, W. H., & Zakri, W. (2022). A fuzzy rule based control algorithm for MPPT to drive the brushless dc motor based water pump. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 42(2), 1003-1014.
- [5] Errouha, M., Derouich, A., Motahhir, S., Zamzoum, O., El Ouanjli, N., & El Ghzizal, A. (2019). Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller. *Energy Reports*, 5, 853-865
- [6] M. Dietschy, «Les cellules photovoltaïques», cours classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux Année 2004-2005.
- [7] Miqui, S., El Ougli, A., Tidhaf, B., & Rabhi, A. (2014, November). Application of fuzzy logic on a PV water pumping system. In *3rd international symposium on environmental friendly energies and applications (EFEA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Akpama, E., Effiong, E., & Ezenwosu, R. (2021). Simulink design of a DC motor control for water pump using fuzzy logic. In *2nd International Conference on Electrical Power Engineering* (pp. 16-19).
- [9] Aashoor, F. A. O., & Robinson, F. V. P. (2013, September). Maximum power point tracking of photovoltaic water pumping system using fuzzy logic controller. In *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [10] Hasan, M., Alhazmi, W. H., & Zakri, W. (2022). A fuzzy rule based control algorithm for MPPT to drive the brushless dc motor based water pump. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 42(2), 1003-1014
- [11] Belgacem, A., Miloud, Y., Mostefai, M., & Belgacem, F. (2022). Fuzzy logic direct torque control of induction motor for photovoltaic water pumping system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(3), 1822-1832.
- [12] Apribowo, C. H. B., Maghfiroh, H., & Laksita, A. T. (2019, November). Design Close-Loop Control of BLDC Motor Speed Using Fuzzy Logic Method in Solar Power Water Pump with MATLAB/Simulink. In *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)* (pp. 281-284). IEEE.
- [13] Errouha, M., Motahhir, S., Combe, Q., Derouich, A., & El Ghzizal, A. (2019, November). Fuzzy-PI controller for photovoltaic water pumping systems. In *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1-6). IEEE
- [14] Singh, B., & Kumar, R. (2016). Simple brushless DC motor drive for solar photovoltaic array fed water pumping system. *IET Power Electronics*, 9(7), 1487-1495.

RÉFÉRENCES

- [15] Gali, V., & Amrutha, P. B. (2016, March). Fast dynamic response of SEPIC converter based photovoltaic DC motor drive for water pumping system. In *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [16] Sado, K. A., Hassan, L. H., & Moghavvemi, M. (2018, September). Design of a PV-powered DC water pump system for irrigation: a case study. In *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-6). IEEE
- [17] Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 1084-1099.
- [18] Swamy, C. P., Singh, B., & Singh, B. P. (1995). Dynamic performance of a permanent magnet brushless DC motor powered by a PV array for water pumping. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *36*(2), 187-200.
- [19] Mishra, A. K., & Singh, B. (2017). Solar photovoltaic array dependent dual output converter based water pumping using switched reluctance motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *53*(6), 5615-5623.
- [20] S. ABBOUDA, Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques », thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et université de Sfax, 2015.
- [21] Chihab Reguig, Youcef Omane, Youcef Aliat, , Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques ., mémoire de master, Département Génie Electrique, unv .El-Oued 2021.
- [22] B. Azoui, M. Chabane. “Expérimentation D’un Moteur A Aimants Permanents Sans Balais Collecteur Dans Un Système De Pompage Photovoltaïque”, ICEL2000, U.S.T. Oran, Algeria, pp:378-383.
- [23] D. Saheb-Koussa ; M. Haddadi, “Modélisation d’un générateur photovoltaïque dans l’environnement Matlab ‘’, 4th International Conférence on Computer
- [24] M. R. Khan; A. A. Khan, U. Ghazali, “Speed Control of DC Motor under Varying Load Using PID Controller”. *International Journal of Engineering (IJE)*, vol. 9, no. 3, 2015, pp. 38-48