

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POLITIQUE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ AHMED DRAIA-ADRAR
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE MASTER

Master_2 : Commande Electrique

Préparés par étudiant

Mellouki Youssouf & Ghorfi Abd El Djebar

Thème

**Modélisation et commande d'un système photovoltaïque
connecte au réseau électrique**

➤ **Devant le jury composé de :**

Dr. Saidi Ahmed

Dr. Makhloufi.S

Dr. Bourbaai.W

Encadreur

Examineur

President

2020/2021



شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): حور عبد البار

المشرف على مذكرة الماستر.

الموسومة ب: Modélisation et comm d'un système photovoltaïque connecte au réseau électrique

من إنجاز الطالب(ة): صلوحي يوسف

و الطالب(ة): غرفي عبد الجبار

كلية: العلوم التكنولوجية


القسم: علوم تكنولوجيا

التخصص: بحر علم كهربائي

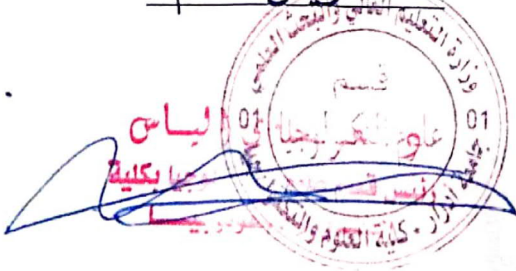
تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
ويامكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF).

- امضاء المشرف (مساعد مشرف)


A. Hamouzi

مساعد رئيس القسم:-



شكر وتقدير

قال تعالى (ومن يشكر فأنا يشكر لنفسه) {لقمان:12}

وقال رسوله الكريم: "من لم يشكر الناس، لم يشكر الله عز وجل"

أحمد الله تعالى حمدا كثيرا طيبا مباركة ملئ السماوات والأرض على ما أكرمني به من إتمام هذه الدراسة والبحث التي أرجو أن تنال رضاه والذي سبحانه وتعالى أمدني وأعانني بالقوة والشجاعة حتى أتمكن من إنهاء هذا العمل.

ثم أتوجه بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى كل من:

♥ الدكتور سعيدي أحمد، حفظه الله وأطال في عمره، لتفضله الكريم بالإشراف

على هذه الدراسة، وتكرمه بنصحي وتوجيهي حتى إتمام هذه الدراسة.

♥ وإلى أستاذة تخصص علوم وتكنولوجيا جامعة أدرار ونخص بالذكر منهم

أستاذة تخصص إلكترو تقني وأستاذة تخصص تحكم كهربائي.

♥ وأود أيضا أن أشكر بحرارة جميع الذين ساعدوني من قريب أو من بعيد على

إنجاز هذه الدراسة.

Dedicates

Mon Dieu, la nuit n'est bonne qu'avec ta reconnaissance
et le jour seulement avec ton obéissance. Et c'est
seulement bon de se souvenir de toi. Et l'au-delà n'est
bon que pour ton pardon.

Et c'est bon de te voir.

Dieu pour ses saints

Qui a reçu le message et a donné l'honnêteté... Et
conseiller la nation... Au prophète de la miséricorde et la
lumière des deux mondes

Sedna Muhammad, prie-le

À Shaikhi, mon maître et mon parrain, à qui est Kalgith,
si le bien du peuple tombe, si le peuple est absent, si le
peuple l'attend, et s'il part, sa piste reste à Shaikhi Sidna
Alali Muhammad, connu sous le nom de Moulay Al Hajj,
et à son fils Sidi Alali, Moulay, Jorah, pour le bien.

À mes chers parents, qui m'ont connu les alphabets de
l'existence et de la vie et qui m'ont béni de leur amour et
de leur bonté envers moi et qui ont fait leurs efforts pour
m'élever, m'éduquer et surmonter les difficultés de la vie.

Et à tous les membres de ma famille, ma famille et tous
ceux qui ont droit à l'utérus.

RESUME

Résumé :

Ce travail et la recherche présente un système de génération photovoltaïque connecté au réseau électrique triphasé avec l'ajout d'un filtre pour améliorer la qualité énergétique.

Le but de cette recherche est de modélisation et la commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique par un convertisseur DC/DC de type BOOST et un convertisseur DC/AC.

On a fait une modélisation du champ PV, de le hacheur DC/DC et de l'onduleur DC/AC à trois niveaux, Et nous avons commande le convertisseur DC/DC en utilisant deux technologies de la technologie MPPT, qui sont la logique floue et la conductance Incrémentale (IncCond), à travers les résultats, nous avons fait la différence entre eux, et qui est le meilleur, qui est la logique floue, où il y a moins de perturbation et le temps de transition.

MOTS-CLES : convertisseur DC/DC, réseau électrique, technologie commande MPPT, conductance Incrémentale (IncCond), logique floue, fuzzy.

المخلص:

يعرض هذا العمل والبحث نظام توليد ضوئي متصل بالشبكة الكهربائية الثلاثية مع إضافة مرشح لتحسين نوعية الطاقة، والغاية من هذا البحث هي النمذجة والتحكم في شبكة الطاقة الشمسية الموصولة بشبكة كهربائية بواسطة المحول DC/DC نوع BOOST ومحول DC/AC .

تم العمل بنمذجة توليد ضوئي PV ومحول DC/DC ومحول DC/AC الثلاثية وقمنا بالتحكم في محول DC/DC باستعمال تقنيتين من تقنيات MPPT وهما المنطق الغامض وأسلوب التوصيل التدريجي (IncCond) ومن خلال النتائج استخلصنا الفرق بينهما ومنَ هي الأفضل والتي هي المنطق الغامض حيث أنه ينقص التشوهات وزمن الانتقال. الكلمات المفتاحية: محول مستمر/مستمر، شبكة كهربائية، تقنية تحكم MPPT، موصل تدريجي، المنطق الغامض، محاكاة للجزء الغامض في الماطلاب.

Abstract :

This work and research present a photovoltaic generation system connected to the three-phase power grid with the addition of a filter to improve energy quality.

The aim of this research is to model and control a photovoltaic system connected to the electricity grid by a DC/DC converter of type BOOST and a DC/AC converter.

We modeled the PV field, the DC/DC chopper and the three-level DC/AC inverter, and we controlled the DC/DC converter using two technologies of MPPT technology, which are fuzzy logic and incremental conductance (IncCond), through the results, we have distinguished between them, and who is the best, who is the fuzzy logic, where there is less disruption and the transition time.

KEYWORDS: DC/DC converter, power grid, MPPT control technology, incremental conductance (IncCond), fuzzy logic

Table des matières

Liste De Figure

Liste de tableaux

INTRODUCTION GENERALE..... 1

Chapitre I :

État de l'art des systèmes énergétique

I.1 INTRODUCTION : 4

I.2. HISTORIQUE : 4

 1.2.3. HISTORIQUE D'ENERGIE RENOUVELABLES : 5

I.3. LA TRANSITION ENERGETIQUE : 5

 I.3.1. LES ENERGIES FOSSILES : 5

 I.3.2. GAZ NATUREL : 6

 I.3.3. LE CHARBON : 7

I.4. LES ENERGIES RENOUVELABLES : 7

 I.4.1. L'ENERGIE HYDRAULIQUE : 7

 I.4.2. L'ENERGIE EOLIENNE : 7

 I.4.3. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE OU THERMIQUE : 8

 I.4.4. LA GEOTHERMIE..... 9

 I.4.5. LA BIOMASSE : 9

I.5. LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES : 10

 I.5.1. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUES : 10

 I.5.1.1. *Rayonnement direct* : 11

 I.5.1.2. *Rayonnement diffus*: 11

 I.5.1.3. *Rayonnement réfléchi*: 11

 I.5.1.4. *Rayonnement global* : 11

 I.5.2. LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES : 11

 I.5.2.1. *Description de la cellule* : 11

 I.5.2.2. *Types des cellules photovoltaïques* : 11

 I.5.3. ASSOCIATION D'UN CELLULE PV : 12

 I.5.3.1. *Influence de l'association série des cellules PV* : 12

 I.5.3.2. *Influence de l'association parallèle des cellules PV* : 13

 I.5.3.3. *Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV* : 13

 I.5.4. TYPES D'UN SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : 14

 I.5.4.1. *Système autonome* : 14

 I.5.4.2. *Système hybride* : 15

 I.5.4.3. *Système raccordé au réseau électrique* : 16

| | |
|--|----|
| I.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV : | 17 |
| I.6.1. AVANTAGES : | 17 |
| I.6.2. INCONVENIENTS : | 17 |
| I.7. LA PRODUCTION D'ELECTRICITE D'ORIGINE RENOUVELABLE DANS LE MONDE ET EN ALGERIE : | 18 |
| I.8. POTENTIEL ENERGETIQUE EN MONDES ET EN ALGERIE : | 19 |
| I.9 LA SITUATION ENERGETIQUE D'ENERGIE SOLAIRE EN ALGERIE : | 21 |
| I.10. LA FUTUR DE L'ENERGIE SOLAIRE EN ALGERIE : | 22 |
| I.11. CONCLUSION : | 23 |

Chapitre II :

Modélisation et commande de système photovoltaïque

| | |
|--|----|
| II.1. INTRODUCTION : | 25 |
| II.2. MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE : | 25 |
| II.2.1. MODEL IDEAL : | 25 |
| II.2.2. MODELE D'UN PANNEAU A UNE DIODE AVEC RESISTANCE SHUNT ET RESISTANCE SERIE | 26 |
| II.2.3. MODELE A DEUX DIODES (A DEUX EXPONENTIELLES) : | 28 |
| II.3 CARACTERISTIQUE I(V) ET P(V) DU MODULE AUX CONDITIONS STC (25°C, 1000W/M2) : | 29 |
| II.4. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE L'ECLAIREMENT : | 29 |
| II.4.1. INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT: | 29 |
| II.4.2. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE : | 30 |
| II.5. LES CONVERTISSEURS DC-DC (HACHEURS) : | 31 |
| II.5.1. DEFINITION : | 31 |
| II.5.2. LES TYPE DE HACHURES : | 32 |
| II.5.2.1. Hacheur Buck : | 32 |
| II.5.2.2. Hacheur boost : | 33 |
| II.5.2.3. Hacheur Buck-Boost : | 34 |
| II.6. CONVERTISSEUR DC-AC (ONDULEUR) : | 35 |
| III.6.1. DEFINITION : | 35 |
| II.6.2. STRUCTURE D'ONDULEUR : | 36 |
| II.6.4. CLASSIFICATION DES ONDULEURS : | 37 |
| II.7. COMMANDE MPPT : | 39 |
| II.7.3.2. Algorithme Perturbation & Observation (P&O) : | 43 |
| II.7.4 LA COMMANDE MPPT A L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : | 45 |
| II.7.4.1. La commande MPPT floue : | 45 |
| II.7.4.2. Neurone formel : | 48 |

| | |
|------------------------------|----|
| II.8 CONCLUSION | 52 |
|------------------------------|----|

Chapitre III :

Simulation et résultats

| | |
|---|----|
| III.1. INTRODUCTION : | 54 |
| III.2. DESCRIPTION DE SYSTEMES : | 54 |
| III.3. PARAMETRER DE SYSTEME : | 55 |
| III.3.1. LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU GENERATEUR PV : | 55 |
| III.3.2 LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE CONVERTISSEUR HACHEUR (BOOST) : | 55 |
| III.3.3. LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'ONDULEUR : | 56 |
| III.3.4. LES CARACTERISTIQUES DE RESEAUX ELECTRIQUES : | 56 |
| III.4. SIMULATION DE RESEAUX : | 56 |
| III.5. SIMULATION DU SYSTEME GLOBAL : | 57 |
| III.6. SIMULATION DU SYSTEME PV CONNECTE EN RESEAUX PAR LA | |
| COMMANDE MPPT : | 59 |
| III.6.1. COMMANDE CLASSIQUE PAR METHODE DE CONDUCTANCE INCREMENTALE (INCCOND) : | 59 |
| III.6.2. COMMANDE MPPT A L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PAR METHODE LOGIQUE FLOUE : | 62 |
| III.6.3. LA VISUALISATION DES DEUX ENTREES DONNEES PAR DES FONCTIONS D'APPARTENANCE | |
| TRIANGULAIRES ET LA SORTIE : | 62 |
| III.6.4. TABLEAU DE REGLE : | 63 |
| III.6.5. DISCUSSION DES RESULTATS : | 66 |
| III.7. COMPARAI LA TENSION ENTRE DEUX METHODES : | 66 |
| III.7.1. DISCUSSION DES RESULTATS : | 67 |
| III.8. CONCLUSION : | 68 |
| CONCLUSION GENERALE : | 70 |

Liste de figure

| | |
|---|----|
| FIGURE (I.1) : ASSOCIATION D'UN MODULE SOLAIRE EN SERIE | 13 |
| FIGURE (I.2) : ASSOCIATION D'UN MODULE SOLAIRE PARALLELE..... | 13 |
| FIGURE (I.3) : ASSOCIATION MIX D'UN MODULE SOLAIRE..... | 13 |
| FIGURE (I.4) : EXEMPLE D'UN SYSTEME PV AUTONOME SANS BATTERIE | 14 |
| FIGURE (I.5) : EXEMPLE D'UN SYSTEME PV AUTONOME AVEC BATTERIE..... | 15 |
| FIGURE (I.6) : EXEMPLE D'UN SYSTEME PV HYBRIDE | 15 |
| FIGURE (I.7) : LES DEUX TYPES D'INSTALLATIONS EXISTANTES POUR L'INJECTION DE LA PRODUCTION SOLAIRE..... | 16 |
| FIGURE (I.8). REPARTITION DE L'ENSOLEILLEMENT ANNUEL MONDIAL [22]..... | 20 |
| FIGURE (I.9): IRRADIATION GLOBALE JOURNALIERE REÇUE SUR UN PLAN HORIZONTAL [25]..... | 21 |
| FIGURE (I.10) : IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE REÇUE SUR PLAN INCLINE A LA LATITUDE DU LIEU (MOYENNE ANNUELLE). | 22 |
| FIGURE (II.1) : SCHEMA ELECTRIQUE IDEAL D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE. . | 25 |
| FIGURE (II.2) : SCHEMA PHOTOVOLTAÏQUE D'UN MODULE A UNE DIODE. | 27 |
| FIGURE (II.3) : MODELE ELECTRIQUE A DEUX DIODES AVEC RESISTANCE SHUNT DE LA CELLULE PV..... | 28 |
| FIGURE (II.4) : CARACTERISTIQUE $I=F(V)$ DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE..... | 29 |
| FIGURE (II.5) : CARACTERISTIQUE $P=F(V)$ DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE..... | 29 |
| FIGURE (II.6) : EFFET DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE $IPV (VPV)$. | 30 |
| FIGURE (II.7) : EFFET DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE $PPV (VPV)$. | 30 |
| FIGURE (II.8) : EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE $IPV (VPV)$ | 30 |
| FIGURE (II.9) : EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE $PPV (VPV)$ | 31 |
| FIGURE (II.10) : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN TYPE D'ALIMENTATION A DECOUPAGE..... | 32 |
| FIGURE (II.11) : SYMBOLE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC..... | 32 |
| FIGURE (II.12) : SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BUCK..... | 33 |
| FIGURE (II.13) : CHRONOGRAMMES DE COURANT ET TENSION D'UN HACHEUR BUCK..... | 33 |
| FIGURE (II.14) : SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BOOST | 34 |

LISTE DE FI FIGURE

| | |
|---|----|
| FIGURE (II.15) : CHRONOGRAMMES DE COURANT ET TENSION D'UN HACHEUR BOOST | 34 |
| FIGURE (II.16) : SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BUCK- BOOST..... | 35 |
| FIGURE (II.17) : CHRONOGRAMMES DE COURANT ET TENSION D'UN HACHEUR BUCK-BOOST..... | 35 |
| FIGURE (II.18) : STRUCTURE D'UN ONDULEUR TRIPHASEE..... | 36 |
| FIGURE (II.19) : SCHEMA DE SIMULATION D'UNE COMMANDE MLI | 37 |
| FIGURE (II.20) : STRUCTURE DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE. | 37 |
| FIGURE (II.22) CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE AVEC CONVERTISSEUR STATIQUE CONTROLE PAR UNE COMMANDE MPPT | 40 |
| FIGURE (II.23) : ALGORITHME D'INCREMENTATION DE LA CONDUCTANCE | 43 |
| FIGURE (II.24) : ALGORITHME PERTUB OBSERVE (P&O) | 44 |
| FIGURE (II. 25) : DIFFERENTES FORMES DE FONCTIONS D'APPARTENANCE | 46 |
| FIGURE (II. 26) : STRUCTURE GENERALE D'UN SYSTEME BASE SUR LA LOGIQUE FLOUE | 47 |
| FIGURE (II.27) : MISE EN CORRESPONDANCE NEURONE BIOLOGIQUE/NEURONE ARTIFICIEL | 48 |
| FIGURE (II.28) : REPRESENTATION MATRICIELLE D'UN NEURONE ARTIFICIEL | 49 |
| FIGURE (II.29) : RESEAU NON BOUCLE..... | 50 |
| FIGURE (II.30) : RESEAU BOUCLE..... | 50 |
| FIGURE (III.1) SCHEMA D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE RELIE AU RESEAU ELECTRIQUE | 55 |
| FIGURE (III.2) : SCHEMA BLOCK DE RESEAUX..... | 57 |
| | 58 |
| FIGURE (III.3) : SCHEMA MATLAB SIMULINK D'UN SYSTEME GLOBA..... | 58 |
| FIGURE (III.4) : SCHEMAS BLOC DE LA COMMANDE MPPT DE CONDUCTANCE INCREMENTALE (INCCOND) | 59 |
| FIGURE (III.5) : IRRADIATION D'UN GENERATEUR PV | 59 |
| FIGURE (III.6) : LA PUISSANCE D'UN GENERATEUR PV PAR LA METHODE (INCCOND) | 59 |
| FIGURE (III.7) : LA TENSION EXTERIEURE EN PV PAR LA METHODE (INCCOND).... | 60 |
| FIGURE (III.8) : RAPPORT CYCLIQUE COMMANDE EN HACHEUR | 60 |
| FIGURE (III.9) : LA TENSION EXTERIEURE EN HACHEUR PAR LA METHODE (INCCOND) | 60 |

LISTE DE FIGURE

| | |
|---|----|
| FIGURE (III.10) : LE COURANT INJECTE EN RESEAUX PAR LA METHODE (INCCOND) | 61 |
| FIGURE (III.11) : LA TENSION INJECTE EN RESEAUX PAR LA METHODE (INCCOND) | 61 |
| FIGURE (III.12) : LA PUISSANCE INTERIEURE EN RESEAUX PAR LA METHODE (INCCOND) | 61 |
| FIGURE (III.13):SCHEMA DE MPPT DE LOGIQUE FLOUE | 62 |
| FIGURE (III.14) : TENSION D'UN GENERATEUR PV PAR LOGIQUE FLOUE | 64 |
| FIGURE (III.15) : PUISSANCE D'UN GENERATEUR PV PAR LOGIQUE FLOUE | 64 |
| FIGURE (III.16) : TENSION EXTERIEURE D'UNE SORTIE EN HACHEUR PAR LOGIQUE FLOUE | 65 |
| FIGURE (III.17) : LE COURANT INJECTE EN RESEAUX PAR LOGIQUE FLOUE | 65 |
| FIGURE (III.18) : LA TENSION INJECTE EN RESEAUX PAR LOGIQUE FLOUE | 65 |
| FIGURE (III.19) : PUISSANCE INJECTE EN RESEAUX PAR LOGIQUE FLOUE | 66 |
| FIGURE (III.20) : LA PUISSANCE ENTRE DE METHODE CONDUCTANCE INCREMENTALE (INCCOND) ET LOGIQUE FLOUE | 66 |

Liste de tableau

| | |
|---|-----------|
| TABLEAU (I.1) : RESERVES MONDIALE DES ENERGIES FOSSILES [19]..... | 19 |
| TABLEAU (II.1) : RECAPITULATIF DES METHODES UTILISEES : [38]..... | 42 |
| TABLEAU (III.1) : CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU GPV PHOTOVOLTAÏQUE | 55 |
| TABLEAU (III.2) : LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE CONVERTISSEUR HACHEUR (BOOST)..... | 56 |
| TABLEAU (III.3) : LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'ONDULEUR..... | 56 |
| TABLEAU (III.4) : LES CARACTERISTIQUE DE RESEAUX ELECTRIQUE..... | 56 |
| TABLEAU (III.5) :LES REGLE | 63 |
| TABLEAU(III.6):FONCTIONS D'APPARTENANCE | 63 |
| TABLEAU (III.7) : COMPARAISON DES TECHNIQUES MPPT (IC) ET (LF)..... | 67 |

Introduction générale

Dans les temps anciens, l'homme utilisait l'énergie pour vivre et coexister, et pour produire cette énergie il utilisait du bois et des animaux, Après cela, un autre type de source d'énergie a été découvert, qui sont les sources d'énergie fossile (pétrole - gaz naturel - charbon) et l'homme a utilisé cette énergie dans de nombreux domaines tels que l'industrie et la production de carburant. Elle est même devenue la principale source de production d'énergie. Et a eu de nombreux dommages sur terre, mer et air, présentant un danger pour les humains, les animaux et les plantes, et en raison de l'utilisation excessive de ces sources, leur niveau a commencé à diminuer. Par conséquent, nous avons dû trouver des sources d'énergie respectueuses de l'environnement et renouvelable.

Les scientifiques ont découvert un autre type d'énergie, l'énergie renouvelable, qui a plusieurs types d'énergie (solaire, éolienne, nucléaire, etc.). Ce type d'énergie n'est pas pollué et respectueux de l'environnement.

L'énergie solaire est divisée en plusieurs sections (géothermie, etc.) et notre thème est l'énergie solaire photovoltaïque, qui est basée sur les rayons solaires pour produire de l'électricité utilisable par les consommateurs.

L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

À l'échelle nationale, le photovoltaïque solaire est peu utilisé en raison de son coût élevé et très élevé. bien qu'il existe de grandes zones dans le sud de l'Algérie qui nous permettent de créer des centres solaires photovoltaïques, mais elles ne sont pas exploitées.

Dans cette note, nous parlerons de photovoltaïque solaire sous le titre Commande du système photovoltaïque connecté au réseau.

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires A cet effet, nous avons structuré notre travail en trois chapitres comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art des systèmes énergétiques et en particulier le système solaire photovoltaïque. Nous présenterons aussi le potentiel solaire ainsi que la future de l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une généralité sur les systèmes photovoltaïques, la construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque, principe de fonctionnement et la modélisation mathématique d'un système. On a aussi

dédié à l'étude des différents types de convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC), vont être détaillés. En suite une partie a été consacrée à la description de la commande MPPT classique et avancer, leurs avantages et inconvénients, ses applications et leurs diagrammes de fonctionnement.

- Dans le dernier chapitre, nous présenterons notre global systèmes qui réalise une installation photovoltaïque connecté au réseau de distribution qui contient des sous-réseaux de transport (5km et 12km) et des charges linéaire avant de présenter les résultats de simulation par MATLAB-SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque (Sun Power SPR- 305-WHT), convertisseur survolteur, onduleur triphasé a trois niveaux et commande MPPT à base de deux méthodes différents). Et on a fait une comparaison entre les résultats obtenus mettent en évidence l'avantage de l'approche Floue par rapport à la méthode Incrémental de conductance (IncCond).

Enfin, on terminera notre mémoire avec une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

Chapitre I :

État de l'art des systèmes énergétique

I.1 Introduction :

Les énergies fossiles désignent la production d'énergie obtenue par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Ces combustibles sont composés d'atomes de carbone et d'hydrogène, récupérés sous forme gazeuse (méthane dans le gaz naturel), liquide (pétrole) ou solide (charbon). Ils sont donc qualifiés d'hydrocarbures.

Issues de la méthanisation de plantes et d'êtres vivants morts et enfouis dans les sous-sols depuis des millions d'années (100 à 300 millions d'années en moyenne), les énergies fossiles sont considérées comme des énergies non renouvelables à une échelle de temps humaine : en effet, une fois utilisées, plusieurs millions d'années sont à nouveau nécessaires à leur reconstitution.

Malgré cela, les énergies fossiles représentent à l'heure actuelle une part très importante du mix énergétique mondial. Les économies modernes sont pour l'instant dépendantes des hydrocarbures, en particulier dans le domaine des transports.

Le principal défi de la transition énergétique consiste à réussir à diminuer progressivement la part des énergies fossiles dans le mix énergétique, pour augmenter la part des énergies renouvelables tout en regagnant une indépendance énergétique. Une transition envisageable uniquement en diminuant la consommation globale d'énergie, dans la mesure où les énergies renouvelables n'ont pour l'instant pas la capacité de pouvoir remplacer la consommation massive d'énergies fossiles.

I.2. Historique :

Durant toute l'Antiquité, le Moyen-Age et jusqu'au **19** siècle, si on fait abstraction de la force humaine, notamment à travers l'esclavage, l'énergie mondiale consommée par l'humanité provient à plus de 95% du bois. Elle est utilisée pour se chauffer, cuisiner, s'éclairer, cuire les poteries et forger les métaux. Mais avec l'utilisation massive du charbon de bois pour la métallurgie, la ressource à commencer à s'épuiser dans certaines régions. Les hommes se sont alors tournés vers une nouvelle source d'énergie : le charbon (bois fossilisé). [42]

I.2.1. La révolution industrielle grâce à l'énergie :

A la fin du **18** siècle, le couple charbon- vapeur donne le coup d'envoi à la Révolution industrielle. En 1769, James Watt a inventé une machine à vapeur qui utilisait la vapeur d'eau comme source d'énergie après avoir brûlé du bois pour produire de la vapeur. L'énergie devient ainsi disponible en plus grande quantité sur un même lieu. Il est alors possible de faire fonctionner de nombreuses machines-outils, de faire avancer une locomotive, des bateaux à vapeur...

-Plus tard, l'humain a été guidé par l'utilisation du pétrole comme source d'énergie, C'est alors que, depuis Edwin Drake premier puits a été foré en 1859 en Pennsylvanie, États-Unis d'Amérique. [42]

-En 1896, la radioactivité naturelle est découverte sur des sels d'uranium par le physicien Henri Becquerel.

-Dès le début du 20^e siècle, l'utilisation du gaz, du pétrole et de l'électricité change radicalement le mode de vie des pays riches. Cela modifie également la vie de nombreux hommes dans les pays qui possèdent des mines ou des gisements dans leurs sous-sols. L'innovation et la recherche se poursuivent, Les premières centrales nucléaires ouvrent dans les années 1950. [42]

1.2.3. Historique d'énergie renouvelables :

La découverte de l'effet photovoltaïque a été réalisée par A.-E. Becquerel en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. Cet effet est étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870 avec des rendements de l'ordre de 1%, ce matériau est adopté rapidement par les photographes comme luxmètre. [42]

Quelques dates importantes dans l'histoire de la photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- Lem" et "Heweliusz ", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITE, décolleront en 2013 l'Université de Delaware.[42]

I.3. La transition énergétique :

I.3.1. Les énergies fossiles :

Les énergies fossiles continuent à représenter une part importante du mix énergétique pour plusieurs raisons. Leur particularité demeure leur praticité : les hydrocarbures sont d'excellents carburants, facilement stockables et utilisables. [1]

Les énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel ont différents avantages et inconvénients qui leur sont propres :

- Comparé à d'autres énergies fossiles, le charbon est plutôt bien réparti sur la planète et est présent en très grande quantité. Son coût d'exploitation est cependant élevé et sa combustion génère d'importantes émissions de gaz carbonique. [1]
- Le pétrole permet de produire un très grand nombre de produits dérivés (plastique, essence, gaz méthane et propane...) jouant un rôle central dans l'économie mondiale. Celui-ci est en revanche très polluant, de sa phase d'extraction à sa consommation, et de plus en plus cher à cause de sa raréfaction. Malheureusement, peu d'alternatives permettent aujourd'hui de pouvoir se passer de pétrole étant donné l'étendue de ses usages. [1]
- Le gaz naturel est très facilement exploitable et moins polluant par rapport aux autres énergies fossiles. Il est aussi possible de produire du bio méthane à partir de la biomasse, ce qui en fait alors une énergie renouvelable. Mais il ne peut à lui seul remplacer les autres énergies fossiles. [1]

I.3.2. Gaz naturel :

Le gaz naturel est utilisé dans de nombreuses centrales électriques comme combustible pour la combustion, les centrales au gaz naturel bénéficient d'une construction facile et d'une production efficace d'électricité, et la combustion du gaz naturel produit moins d'oxydes d'azote, de soufre et d'autres émissions polluantes par rapport aux produits de combustion du charbon, et les centrales au gaz naturel sont divisées en deux types comme suit : [2]

- **Station-service simple** : (Anglais : Simple Cycle Gas Plant) Son principe de fonctionnement n'est pas différent d'une centrale au charbon, mais elle utilise le gaz naturel comme combustible pour produire de l'électricité.
- **Station d'essence installée** : (Anglais : Combined Cycle Plant) La station d'essence installée se compose de deux unités : une unité de gaz et une unité de vapeur, dont l'idée est de tirer parti de l'énergie produite par gaz de température sortant de l'unité de gaz pour produire des quantités supplémentaires de vapeur d'eau nécessaires pour faire fonctionner la turbine à vapeur par l'unité de récupération de puissance (Anglais : Heat Recovery Steam Génération), ce qui augmente la capacité de production d'énergie de la turbine, a une efficacité élevée jusqu'à 60% par rapport à un cycle simple jusqu'à 34%. [2]

I.3.3. Le charbon :

Le charbon est l'un des combustibles fossiles les plus abondants et les moins chers au monde, Le charbon est extrait dans des mines souterraines et à ciel ouvert. En général, il ne nécessite pas un traitement poussé : hormis la séparation des impuretés, il suffit de le trier et de l'utiliser. Les exportations de charbon se font généralement par voie ferroviaire.[2]

I.4. Les énergies renouvelables :

Il n'est pour l'instant pas possible de se passer à grande échelle des énergies fossiles. Dans le cadre de la transition énergétique, l'objectif est davantage de chercher à diminuer la consommation énergétique globale afin de la remplacer progressivement par des énergies renouvelables.

I.4.1. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est bien connue au Québec. L'énergie issue de sources hydrauliques est produite grâce au déplacement de l'eau qui entraîne des turbines électriques. Elle est responsable de près de 95 % de la production de l'électricité consommée dans la province. La société d'État Hydro-Québec joue un rôle important dans le développement économique et dans la création d'emploi à travers plusieurs régions. Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, l'hydroélectricité possède l'un des meilleurs bilans d'émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables des changements climatiques. Cette forme d'énergie présente également un excellent rendement de l'investissement énergétique puisqu'il se situe entre 170 et 280. Cette donnée représente le ratio entre la quantité d'énergie produite pendant la durée de vie normale d'une centrale et l'énergie qui a été requise pour la construire, l'entretenir et l'alimenter.

L'énergie marémotrice constitue aussi une forme d'énergie hydraulique. Il existe déjà des centrales marémotrices dans le monde et plusieurs projets tentent d'évaluer le potentiel de l'utilisation d'hydroliennes pour produire de l'électricité. L'installation de turbines immergées dans l'eau comporte des avantages et des inconvénients. D'abord, comme l'eau est beaucoup plus dense que l'air et les débits d'eau plus réguliers que le vent, le potentiel de puissance des hydroliennes est beaucoup plus élevé que celui des éoliennes pour la même surface d'hélice. Néanmoins, leurs impacts sur la faune marine ne sont pas encore très bien connus. Elles créent également des zones de turbulences qui pourraient modifier la sédimentation. [2]

I.4.2. L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable.

Elle est utilisée de trois manières :

- Avec conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour faire tourner la meule d'un moulin.[3]
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) : pompage de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail).[3]
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage de l'énergie.[3]

I.4.3. L'énergie solaire photovoltaïque ou thermique :

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil. [4]

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires. [4]

L'énergie solaire est ainsi à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire. [4]

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- Le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité
- Le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité. [4]

De nombreux programmes de recherche sont en cours afin d'améliorer les rendements des nouvelles technologies d'exploitation de l'énergie solaire.[4]

I.4.4. La géothermie

L'énergie géothermique est la forme d'énergie due à la chaleur endogène de la Terre. Les volcans, sources thermales et geysers illustrent la présence de chaleur emmagasinée dans la croûte terrestre et qui se dirige vers l'extérieur par le biais de fluides vecteurs tels que l'eau et la vapeur.

La température, à l'intérieur de notre planète, augmente avec la profondeur selon un gradient géothermique de 3°C par 100 m, même si des zones atteignent des gradients géothermiques anormaux avec des flux de chaleur supérieurs (9-12°C par 100 m). [5]

En moyenne, la chaleur terrestre calculée est égale à 0,06 W/m² donc, en considérant toute la superficie, on arrive à des valeurs de 30 000 milliards de W. Cette énergie thermique, par unité de temps et de surface constitue le flux géothermique et est exprimée en HFU (Heat Flow Unit, soit une micro calorie par centimètre carré par seconde, ce qui équivaut à dire que la terre, en une seconde, disperse une micro calorie par centimètre carré). [5]

L'exploitation de l'énergie géothermique consiste en l'utilisation de la chaleur contenue dans des roches relativement proche de la surface, où elle arrive en se propageant depuis des zones plus profondes de la terre. Pour atteindre la superficie, la chaleur a besoin d'un vecteur fluide (eau ou vapeur), naturel ou injecté, qui doit pouvoir s'infiltrer en grande quantité dans des roches poreuses et perméables. Ces roches doivent être à leur tour protégées par des roches imperméables qui empêchent ou limitent la dispersion des fluides et de la chaleur. [5]

Dans un système géothermique, l'eau pénètre dans le sous-sol à travers des roches perméables formant des nappes souterraines et, par effet de la chaleur transmise aux roches par une fonte (une masse magmatique), elle se réchauffe jusqu'à atteindre des températures de plusieurs centaines de degrés. Le fluide (eau et/ou vapeur) dans ces conditions remonte le long des failles et des fractures en donnant lieu aux manifestations géothermiques. Le fluide capté de cette manière, après plusieurs traitements, est envoyé vers les installations d'utilisation (production d'énergie électrique ou utilisations directes).[5]

Une centrale géo thermoélectrique diffère de celle traditionnelle thermoélectrique par les appareils nécessaires au traitement du fluide naturel provenant du sous-sol et par l'extraction des gaz non condensables (surtout CO₂) toujours présents dans la vapeur.[5]

I.4.5. La biomasse :

Dans le domaine de l'énergie, la biomasse est la matière organique d'origine végétale (microalgues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons), utilisable comme énergie. L'énergie peut être extraite par combustion directe (ex : énergie du bois), ou par

combustion après un processus de transformation de la matière première, par exemple la méthanisation (biogaz, ou sa version épurée le biométhane) ou d'autres transformations chimiques (dont la pyrolyse, la carbonisation hydrothermale et les méthodes de production de biocarburants ou « agrocarburants »), On parle alors de bioénergie. [3]

Cette énergie intéresse à nouveau les pays riches confrontés au changement climatique et à la perspective d'une crise des ressources en hydrocarbures fossiles ou uranium. Elle répond à des enjeux et objectifs de développement durable et potentiellement d'économie circulaire ; substituer la biomasse aux énergies fossiles contribue en effet à réduire les émissions de gaz à effet de serre, voire à restaurer certains puits de carbone (semi-naturels dans le cas des boisements et haies exploités). [3]

L'énergie biomasse comprend le bois, les biocarburants (issus de végétaux comme le colza ou la betterave) ou encore le biogaz. Cette énergie est produite par la combustion ou la métabolisation de matières organiques. [3]

I.5. Les systèmes photovoltaïques :

I.5.1. L'effet photovoltaïques :

L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique à travers d'un capteur constitué de matériaux sensible à l'énergie contenue dans les photons. [6]

Il se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. [6]

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie E_{ph} par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. [6]

Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. [6]

Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Chacun une énergie E_{ph} écrit sous forme la relation suivante :

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : est la constante de Planck,

c : est la vitesse de la lumière

λ : sa longueur d'onde.

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

I.5.1.1. Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.[7]

.I.5.1.2 Rayonnement diffus :

«C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions) dans l'atmosphère [7].

.I.5.1.3 Rayonnement réfléchi:

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...).

Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo(ϵ) avec $0 \leq \epsilon \leq 1$. [7]

I.5.1.4. Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffus et réfléchi.[7]

I.5.2. Les cellules photovoltaïques :

I.5.2.1. Description de lacellule:

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite, les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. [13]

Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (AsGa), Tellure de cadmium (CdTe). [13]

I.5.2.2. Types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules à un rendement et un cout qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. [9]

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

- **Les cellules monocristallines :**

Elles sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, donc très "pures", mais aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en générale octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).[10]

- C'est la première génération de photopiles ;
- Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ;
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ;
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

- **Les cellules poly-cristallines :**

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Les cellules sont en générale de forme rectangulaire et sont bleu nuit avec des reflets.[10]

- Coût de production moins élevé ;
- Procédé nécessitant moins d'énergie ;
- Rendement 11-13% (18% en Labo).

- **Les cellules amorphes :**

Elles sont produites à partir d'un "gaz de silicium" qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.[10]

La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples.

- Coût de production bien plus bas ;
- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) ;
- Durée de vie plus faible.

I.5.3. Association des cellules PV :

I.5.3.1. Influence de l'association série des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). [11]

Un module de 36 cellules en série (Type GTO136 - 80/2) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association

en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. [11]

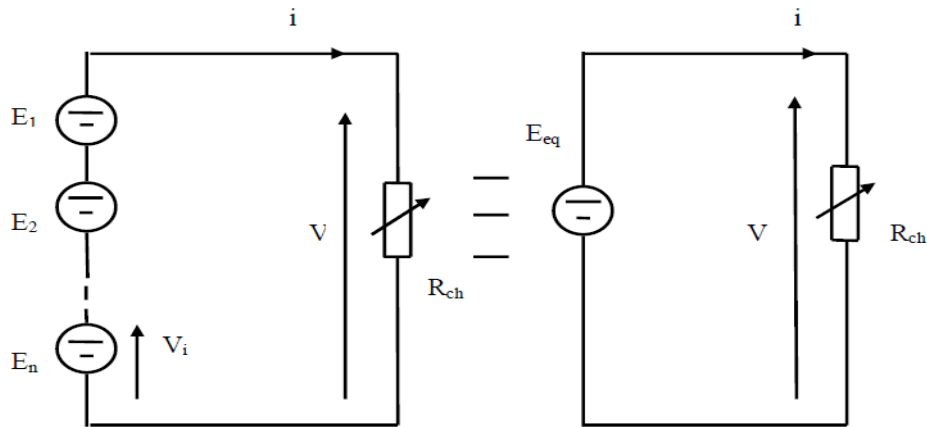


Figure (I.1) : Association d'un module solaire en série

I.5.3.2. Influence de l'association parallèle des cellules PV :

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule.

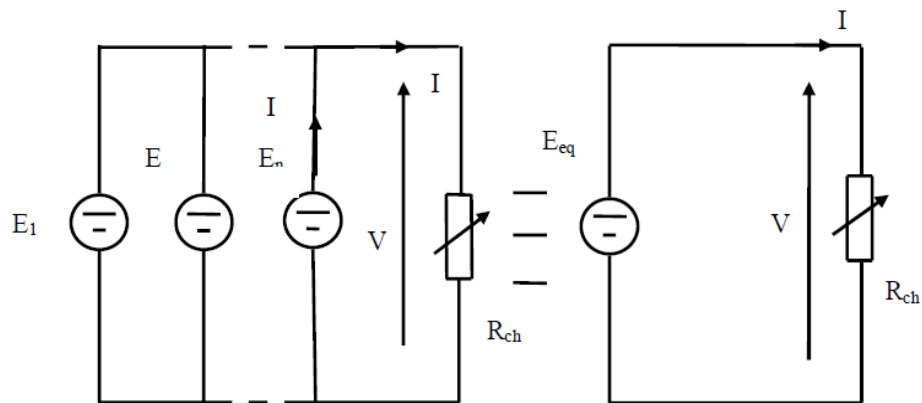


Figure (I.2) : Association d'un module solaire parallèle

I.5.3.3. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [11].

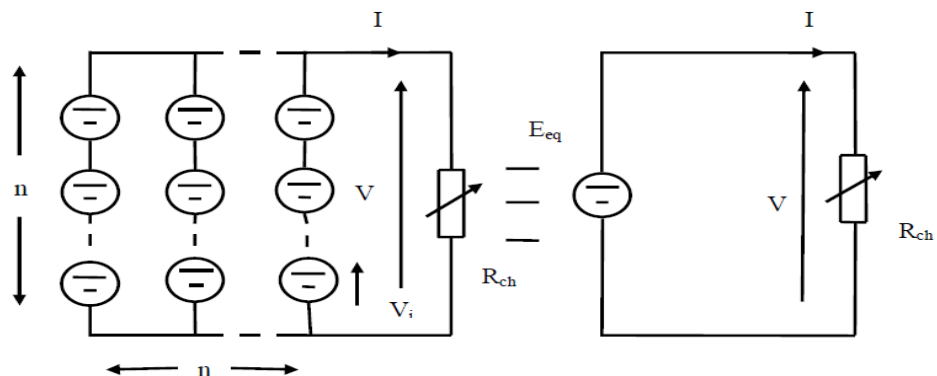


Figure (I.3) : Association mixte d'un module solaire

I.5.4. Types des systèmes solaires photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

I.5.4.1. Système autonome :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types [12]

I.5.4.1.1. Système autonome sans batterie :

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

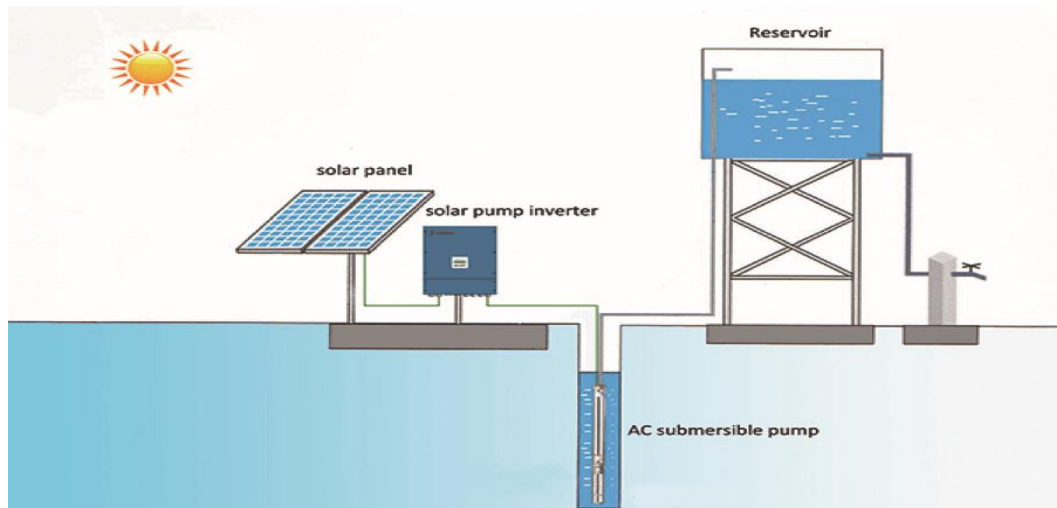


Figure (I.4) : Exemple d'un système PV autonome sans batterie

I.5.4.1.2. Système autonome avec batterie :

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).

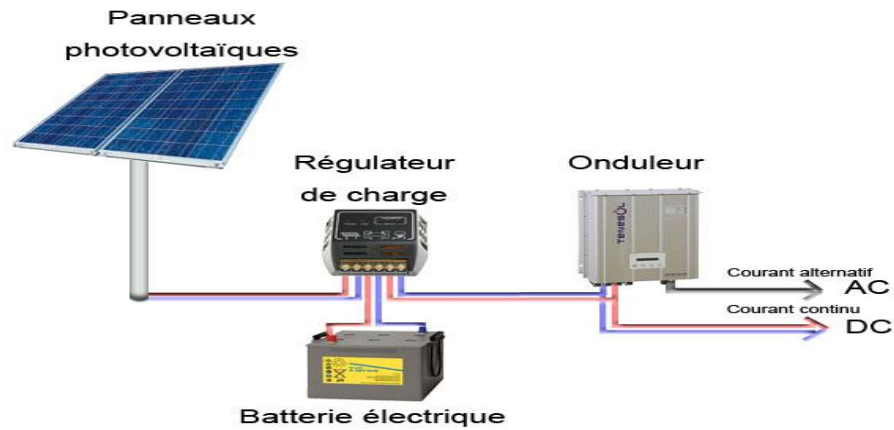


Figure (I.5) : Exemple d'un système PV autonome avec batterie

I.5.4.2. Système hybride :

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [13, 14].

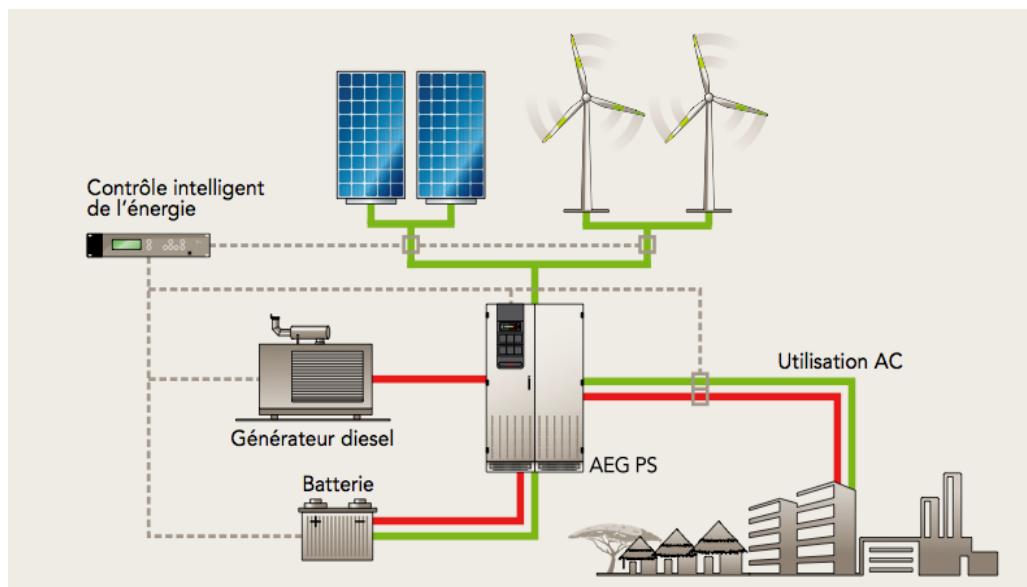


Figure (I.6) : Exemple d'un système PV hybride

I.5.4.3. Système raccordé au réseau électrique :

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même. La Figure 1.7 montre les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire : [15]

I.5.4.3. 1. Injection de la totalité de la production :

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

I.5.4.3. 2. Injection du surplus de production :

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

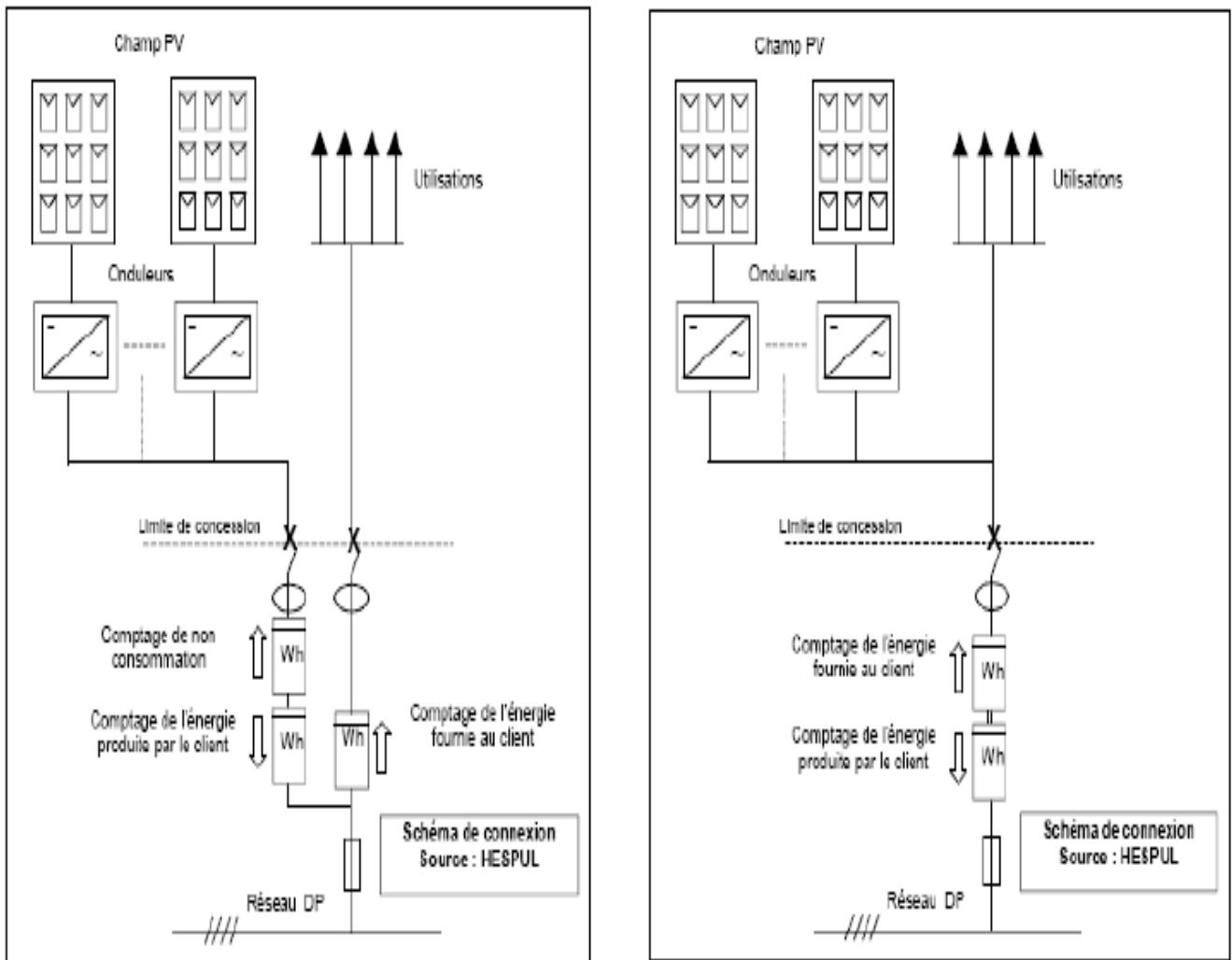


Figure (I.7) : Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire

I.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

I.6.1. Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [16].

I.6.2. Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [16].

I.7. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et en Algérie :

- **Eu monde :**

Actuellement, la production d'énergie la plus renouvelable produite dans les centrales hydroélectriques par les grands barrages, là où il existe des endroits appropriés pour les construire sur les rivières et les plans d'eau, et les techniques de production d'énergie éolienne et solaire sont largement utilisées dans les pays développés et certains pays en développement; Récemment, les sources d'électricité renouvelables sont devenues monnaie courante, et de nombreux pays ont élaboré des plans pour accroître leur production d'énergie renouvelable afin de couvrir les besoins en énergie de 20 % de leur consommation en 2020. La plupart des chefs d'État sont convenus de lutter contre le réchauffement planétaire en réduisant les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère au cours des prochaines années, conformément au protocole de Kyoto, afin d'éviter les menaces majeures que la pollution et l'épuisement des combustibles fossiles font peser sur le changement climatique, ainsi que les risques sociaux et politiques des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire. [18]

La production d'énergie renouvelable peut être lue de plusieurs façons. Selon la taille de l'énergie produite par les pays en proportion de leur population, les pays scandinaves, en plus du Canada, de l'Islande et de la Nouvelle-Zélande, sont à l'avant-garde des utilisateurs d'énergie renouvelable. . Parmi les grandes économies mondiales, l'Allemagne est à l'avant-garde de la production d'énergie renouvelable en proportion de sa population et se classe au troisième rang des énergies renouvelables totales produites après la Chine et les États-Unis. [18]

Plus récemment, le commerce des énergies renouvelables est un type d'entreprise qui intervient dans la transformation et la promotion des énergies renouvelables en sources de revenus. Bien qu'il existe de nombreux obstacles non techniques à la diffusion généralisée des énergies renouvelables, tels que le coût initial élevé des investissements et d'autres, quelque 65 pays envisagent d'investir dans les énergies renouvelables, et ont travaillé sur des politiques visant à développer et à encourager les investissements dans les énergies renouvelables telles que la stimulation et la nutrition électrique. [18]

Malgré un intérêt accru pour les énergies renouvelables ces dernières années au Moyen-Orient et une baisse des prix du pétrole, les investissements dans les énergies renouvelables dans les pays arabes ont diminué de 8% au cours des deux dernières années, en dépit des initiatives des pays pétroliers du Golfe arabe, en particulier en Arabie saoudite, où le secteur privé saoudien a commencé à injecter des sommes importantes dans le secteur des énergies renouvelables. Mais paradoxalement, les trois marchés d'énergie renouvelable les plus actifs en Afrique du Nord et au Moyen-Orient sont le Maroc, l'Égypte et la Jordanie, avec plus de 15 milliards de dollars pour les

années 2015 à 2019.[18]

- **En Algérie :**

L'Algérie est sur la voie des énergies renouvelables pour développer des solutions globales et durables aux obstacles environnementaux et aux problèmes de protection de l'énergie fossile.

Cette option stratégique est motivée par l'énorme potentiel de l'énergie solaire. Cette énergie est le pilier principal du programme, qui consacre une part importante à l'énergie solaire thermique et solaire photovoltaïque. [17]

À moyen terme, cette énergie devrait atteindre une grande partie de la production nationale d'électricité. [17]

Malgré sa capacité relativement faible, le programme n'exclut pas l'énergie éolienne, considérée comme la deuxième énergie renouvelable qui représentera environ 3 % de la production d'électricité en 2030, selon les prévisions. [17]

L'Algérie prévoit également de développer des modules expérimentaux pour tester diverses technologies telles que la biomasse, la géothermie et les technologies de dessalement de l'eau salée par différents secteurs d'énergie renouvelable.[17]

I.8. Potentiel énergétique en mondes et en Algérie :

- **En mondes :**

La terre dispose d'un potentiel énergétique naturel diversifié, tel que les énergies renouvelables (Soleil, vent, marées motrices, eau du barrage, bio énergie, etc..) et non renouvelables (Pétrole, gaz, charbon, etc...). Le pétrole brut, le charbon et le gaz sont actuellement les principales ressources pour l'approvisionnement énergétique mondial. La taille des réserves de combustibles fossiles est un dilemme lorsqu'on sait que ces réserves sont en diminution rapide. Cette problématique est fondamentale et cruciale pour l'avenir de l'humanité, une sensibilisation à l'échelle planétaire a été menée afin de trouver une solution à cette situation. Les réserves mondiales de charbon, de gaz et de pétrole prouvées en décembre 2012 (Rapport Reserve / Production) sont environ 109, 55,7 et 52,9 ans, respectivement (**Tableau I.1**) [19].

Tableau (I.1) : Réserves mondiale des énergies fossiles [19]

| Ressource | Reserve / Production (R / P) |
|-----------|------------------------------|
| Pétrole | 52,9 ans |
| Gaz | 55,7 ans |
| Charbon | 109 ans |

Concernent le potentiel énergétique renouvelable, le soleil libère d'énormes quantités d'énergies depuis 5 milliards d'années, qui traversent une distance d'environ 150 Gm pour atteindre la surface de la Terre, avec une puissance moyenne d'environ 1000 W/m^2 [20, 21]. Autant dire qu'à l'échelle humaine, l'énergie solaire est inépuisable. Cependant cette énergie solaire est inégalement répartie à la surface de la Terre, comme illustré par la **figure (I.8)**, et sujette à des variations saisonnières. [22]

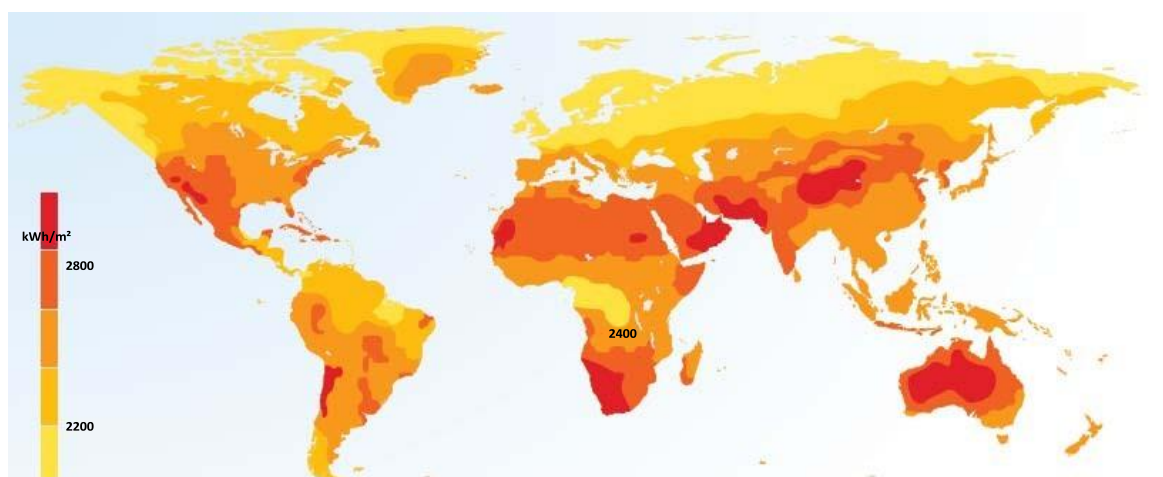


Figure (I.8). Répartition de l'ensoleillement annuel mondial [22]

Au final, l'énergie solaire qui arrive sur la Terre est 10000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population. Près de l'équateur, l'ensoleillement annuel peut atteindre $2300 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$.

- **En Algérie :**

Les réserves prouvées de l'Algérie en matière de gaz et de pétrole en 2012 étaient respectivement de 55,3 et 20 ans selon le rapport R/P, sachant que les productions de 2012 du gaz et du pétrole sont respectivement de l'ordre de 73,4 Mtep et 73 Million tonne [19]. Donc, si on prend le gaz naturel qui est actuellement le moyen principal de la production d'électricité en Algérie (12 % de la production du gaz), la durée de 55 ans est relativement courte comparativement à la croissance de la demande en énergie électrique. Cela nous incite donc à passer rapidement et d'une manière efficace à l'industrialisation des autres types de ressources énergétiques et d'explorer toutes les voies pour préserver les ressources fossiles et rationaliser la consommation avec une utilisation plus responsable de l'énergie.

En matière d'énergies renouvelables, l'Algérie dispose d'un potentiel énergétique solaire dépassant les 5 milliards GWh/an. La **figure I.9** donne un aperçu sur la distribution de l'irradiation globale journalière sur le plan horizontal pour les mois de décembre et juillet.

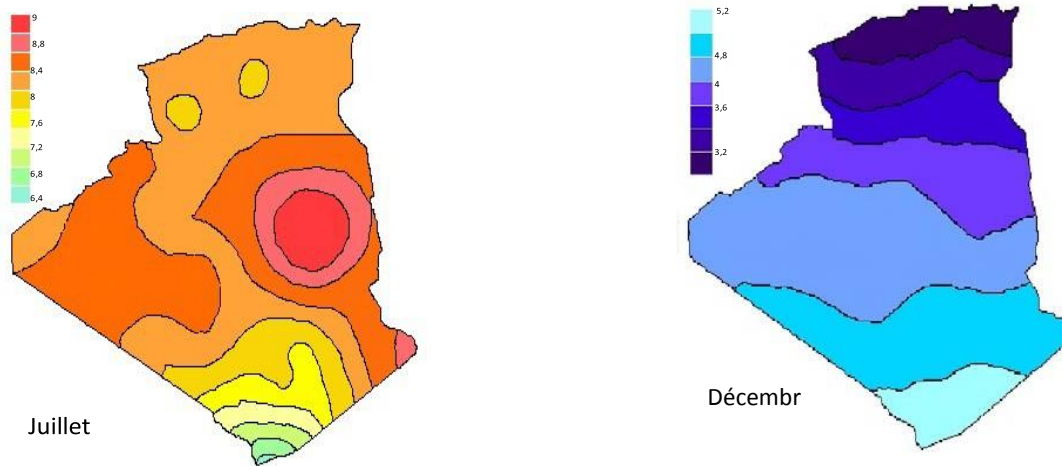


Figure (I.9): Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal [25]

La moyenne annuelle de la durée d'ensoleillement variant de 2250 heures dans le nord à 3600 heures dans le Sahara avec un potentiel énergétique respectif de 1700 à 2650 kWh/m²/an [23, 24]. Cette énergie varie selon les régions entre 2,4 et 5,2 kWh/m²/j au mois de décembre alors qu'au mois de juillet elle varie entre 4,8 et 9 kWh/m²/j [25]. Ces valeurs varient tout au long de l'année en fonction des saisons avec évidemment un maximum en été. Par exemple au mois de décembre à Ghardaïa, les valeurs d'ensoleillements varient entre 3,2 et 4 kWh/m²/jour. Au mois de juillet ces valeurs peuvent atteindre jusqu'au 8,4 kWh/m²/jour [25]. L'Algérie possède de larges étendues de territoires disponibles pour une valorisation du potentiel solaire de près de 2 millions de km² dont une très grande partie est désertique. [23]

I.9 La situation énergétique d'énergie solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement.

Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7kWh/m²/jour [26].

Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m²/jour
- Au Sud : 7,2 kWh/m²/jour

La **figure (I.10)** montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.

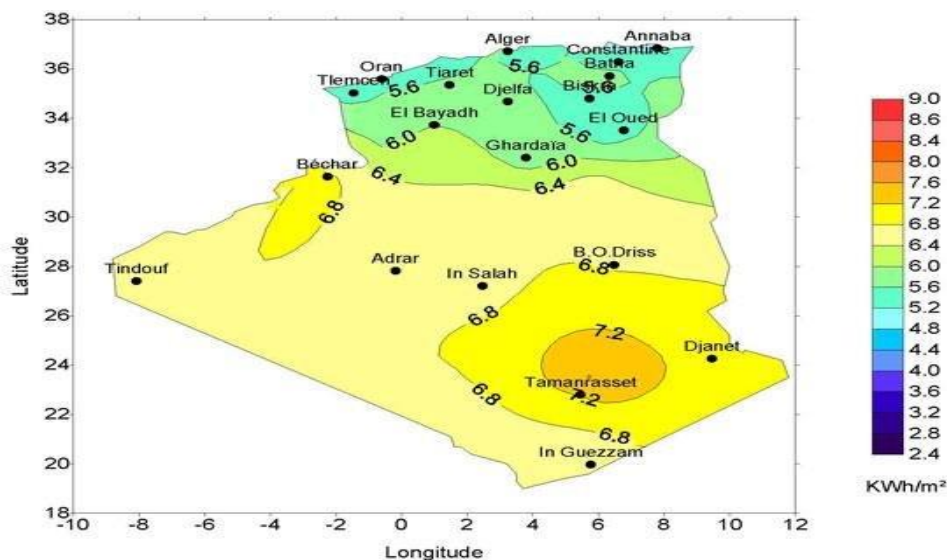


Figure (I.10) : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne annuelle).

I.10. Le futur de l'énergie solaire en Algérie :

L'Algérie s'emploie à étendre le développement de grands projets solaires dans le pays avec un potentiel prometteur dans ce domaine, qui contribuera à réduire la dépendance aux combustibles fossiles pour la production d'électricité, réduisant ainsi les émissions de carbone, et améliorer la capacité d'exportation du pays pour le pétrole et le gaz naturel. L'Algérie aspire à produire plus de 13000 mégawatts d'électricité par le biais de l'énergie solaire d'ici 2030 et, à cette fin, doit développer des mécanismes de participation du secteur privé aux projets d'énergie renouvelable, modifier les règles d'appel d'offres et s'ouvrir aux partenaires étrangers et aux institutions internationales d'énergies renouvelables afin de bénéficier de leur expertise et de leurs opportunités de financement.[27]

L'Algérie s'est fixé un objectif de production d'au moins 22000 mégawatts d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables d'ici 2030, dont au moins 13000 mégawatts de photovoltaïque solaire, soit plus de la moitié des énergies supplémentaires prévues, contribuera au total à 27 % de sa capacité énergétique d'ici 2030.[27]

En particulier, le gouvernement cherche à exploiter son potentiel solaire prometteur pour atteindre l'objectif précédent. Selon les estimations du gouvernement, le taux de rayonnement solaire sur le territoire algérien varie de 2000 à 3900 heures par an, et l'équivalent de 5,1 kilowatts par heure à 6,6 kilowatts par heure, ce qui rend la production d'électricité solaire commercialement et invasivement viable.[27]

Compte tenu de ce potentiel, l'Algérie développe à l'avenir des projets solaires de grande envergure, notamment le projet Tavok1, qui comprendra plusieurs centrales solaires d'une capacité de production combinée d'environ 4 gigawatts, l'un des plus grands projets prometteurs

de l'avenir. Ces dernières années, elle a déjà commencé à mettre en œuvre des projets avec des capacités de production limitées et moyennes dans certaines parties du pays et une capacité approchant les 450 mégawatts, et vise également à ajouter une nouvelle capacité d'environ 1000 mégawatts d'énergie solaire avant la fin de 2021.[27]

I.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude historique sur l'énergie électrique et ses méthodes de production, des méthodes fossiles aux méthodes renouvelables, et une étude sur les transformations énergétiques (énergie fossile, énergie renouvelable),

Puis nous avons fait une étude du système photovoltaïque et aussi étudié dans cette partie la cellule solaire, ses types, ses méthodes de liaison (séquençage, branchement, mélange) et les types de système photovoltaïque, et nous avons étudié les avantages et les inconvénients du système photovoltaïque.

Nous avons également examiné la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et en Algérie, puis nous avons parlé du potentiel énergétique dans le monde et en Algérie, puis de situation de l'énergie solaire en Algérie, et aussi de future de l'énergie solaire en Algérie.

Chapitre II :

Modélisation et commande de système photovoltaïque

II.1. Introduction :

La modélisation est une étape charnière avant la simulation de tout système. Celle-ci consiste en la mise en équation du dit système en se basant sur les relations physico-chimiques, électriques et mécaniques qui régissent le phénomène décrit, ce qui rend la modélisation impossible en cas d'ignorance du modèle ou de l'un de ses paramètres.

En vue de simuler notre système nous procéderons dans ce qui suit à la modélisation de tous les éléments afin de comprendre le comportement électrique de chacun et déduire ainsi les caractéristiques de notre système.

Notons au passage que la commande de notre système doit être aussi prise avec beaucoup d'intérêt vue son importance sur le fonctionnement de notre système.

II.2. Modélisation du panneau photovoltaïque :

Il existe plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque, dans ce chapitre on va présenter quelques-uns.

II.2.1. Model idéal :

Le panneau photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (II.1) il se compose d'un générateur de courant et d'une diode parallèle.

Le courant I_{PV} généré par la cellule s'écrit alors.

Après la loi des nœuds on obtient alors :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_d \quad (II.1)$$

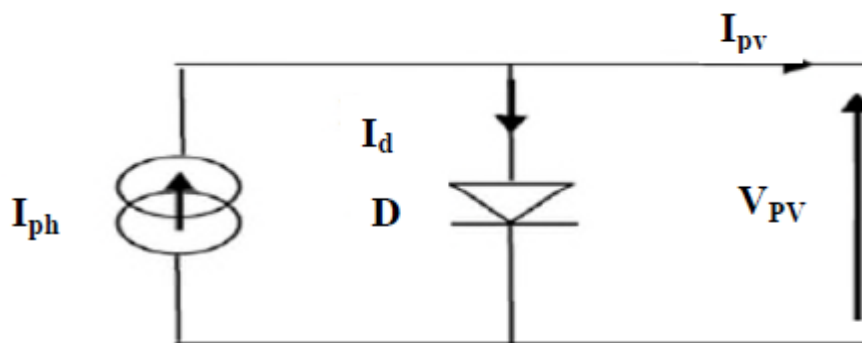


Figure (II.1) : Schéma électrique idéal d'un module photovoltaïque.

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

$$V_{pv} = V_d \quad (II.2)$$

V_d : La tension aux bornes de la diode.

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

$$I_d = I_0 * [e^{\frac{P*V_{PV}}{AKT}} - 1] \quad (II.3)$$

I_0 : Courant de saturation de la diode, qui est exprimé comme suit :

$$I_0 = I_0(T_i) * \left(\frac{T}{T_i}\right)^{\frac{s}{n}} * e^{\left(\frac{-q*Eg}{A*K\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_i}\right)}\right)} \quad (\text{II.4})$$

Et

$$I_0(t_1) = \frac{I_{SC}(T_1)}{e^{\frac{P*V_{OC}(T_1)}{AKT} - 1}} \quad (\text{II.5})$$

Avec

Eg : Tension de seuil de la diode (1.12 eV).

Isc : Courant de court-circuit.

Voc : Tension de circuit ouvert.

q : Charge électrique qui est égale à 1.6×10^{-19} C.

K : Constante de Boltzmann ($K=1.3854 \times 10^{-23}$ J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

(KT/q) : Représente le potentiel thermique.

T1 : Température à l'instant T1.

T2 : Température à l'instant T2.

Iph : Courant photonique de la diode qui est donné par la relation suivante :

Avec :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) * (1 + K_0 * (T - T_1)) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$K_0 = \frac{I_{SC}(T_2)I_{SC} - I_{SC}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (\text{II.7})$$

D'après les relations (II.1) et (II.3) on obtient :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_0 * \left[e^{\frac{P*V_{PV}}{AKT}} - 1\right] \quad (\text{II.8})$$

Ce qui implique :

$$I_{PV} = I_{ph}(T_1) * (1 + K_0 * (T - T_1)) - I_0 * \left[e^{\frac{P*V_{PV}}{AKT}} - 1\right] \quad (\text{II.9})$$

II.2.2. Modèle d'un panneau à une diode avec résistance shunt et résistance série :

Le schéma équivalent du module photovoltaïque réel tient compte d'effets résistifs ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D), une source de courant (Iph) caractérisant le Photocourant, une résistance série (Rs) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (Rsh) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (Rs).

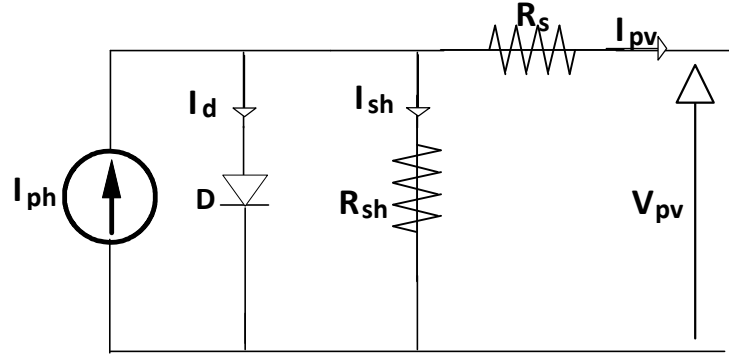


Figure (II.2) : Schéma photovoltaïque d'un module à une diode.

Le courant de sortie du module photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.10})$$

Avec **I_{ph}**, **I_d**, **I_{sh}** et **I_{pv}** sont respectivement le courant photonique, le courant de la diode, courant de résistance shunt et le courant de fonctionnement ou (courant délivrer par le module), qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules.

Le courant **I_{ph}** est directement dépendant du rayonnement solaire **E** et de la température de la cellule **T_j**, est donné par la relation suivante

$$I_{Ph} = P_1 * E_1 [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_j - T_{ref})] \quad (\text{II.11})$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T_a + E \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

NOCT : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : Température ambiante.

Et Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q * (v + R * I_{Ph})}{A * n_s * K * T_j} - 1 \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

I_{sat} : Courant de saturation.

K : Constante de Boltzmann ($K = 1.3854 * 10^{-23}$ J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

I_{ph} : Courant photonique de la diode.

q : Charge de l'électron $e = 1.6 * 10^{-19}$ coulomb.

T_j : Température de la cellule en (Kelvin).

n_s : Nombre de cellule en série dans un module.

Isat Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température, il est donné par la relation suivante :

$$I_{sat} = P_4 * T_J^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k*T_J}\right) \quad (\text{II.14})$$

Le courant de résistance shunt et calculé par :

$$I_{Sh} = \frac{V_{PV} + R_S * I_{PV}}{R_{Sh}} \quad (\text{II.15})$$

Le courant du module est calculé par (II.13) (II. 15) :

$$I_{PV} = I_{Ph}(E, T) - I_d(V, I_{PV}, T_J) - I_{Sh}(V) \quad (\text{II.16})$$

$$I_{PV} = I_{Ph} - P_1 * E_1 [1 + P_2(E - E_{ref}) + P_3(T_J - T_{ref}) - P_4 * T_J^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k*T_J}\right) * \left[\exp\left(\frac{q*(v+R*I_{Ph})}{A*n_s*K*T_J} - 1\right)\right] - \frac{V_{PV} + R_S * I_{PV}}{R_{Sh}} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

A : facteur d'idéalité de la jonction.

E_{ref}: Irradiation ou ensoleillement de référence 1000 W/m²

T_{ref} : Température de référence 25 °C.

II.2.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) :

Le module photovoltaïque est représenté par le circuit électrique suivant (figure, II.3), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

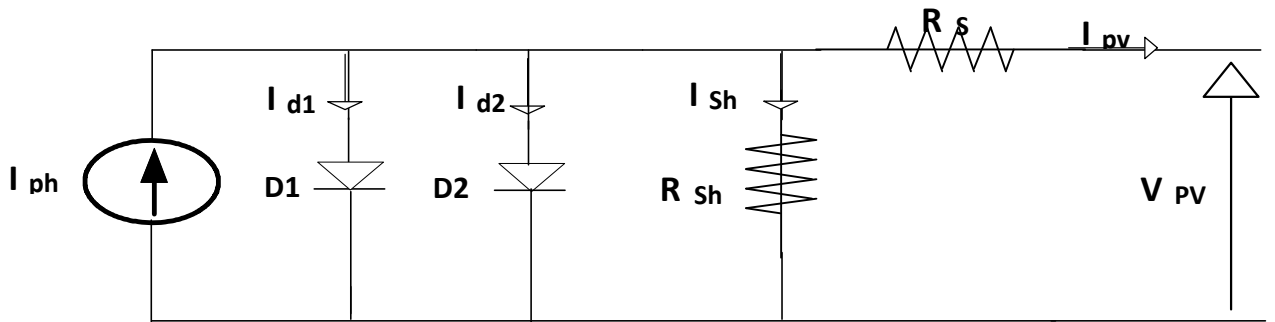


Figure (II.3) : Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV.

Après la loi des mailles on trouve :

$$I_{PV} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (\text{II.18})$$

D'où :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_{01} * \left[e^{p * \frac{(V_{PV} + R_S * I_{Ph})}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} * \left[e^{p * \frac{(V_{PV} + R_S * I_{Ph})}{AKT}} - 1 \right] - \left[\frac{V_{PV} + R_S * I_{PV}}{R_{Sh}} \right] \quad (\text{II.19})$$

I_{01} : Courant de saturation de la diode 1

I_{02} : Courant de saturation de la diode 2.

II.3 Caractéristique I(V) et P(V) du module aux conditions STC (25°C, 1000W/m²) :

Les figures (II.4) et (II.5) Nous donnent sous (Matlab/Simulink), les caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du module photovoltaïque dans les conditions standards $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

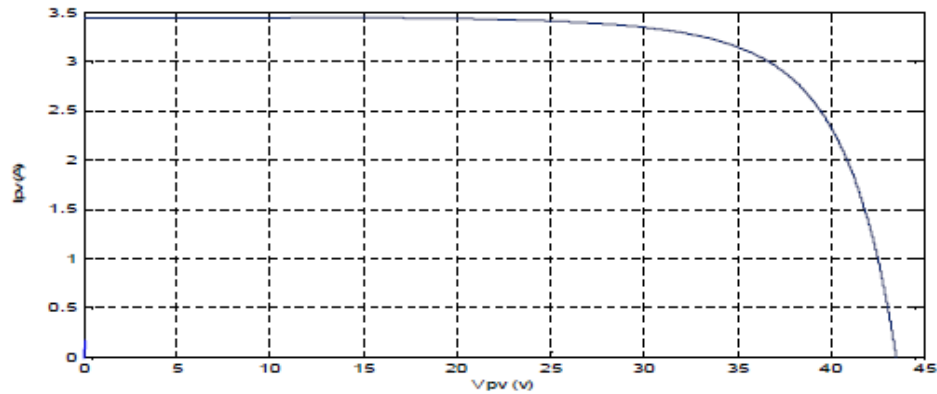


Figure (II.4) : Caractéristique $I=f(V)$ du module photovoltaïque

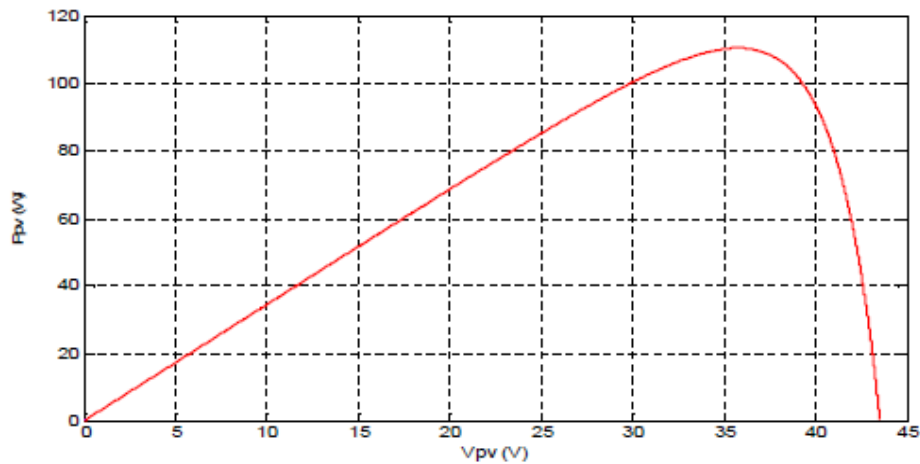


Figure (II.5) : Caractéristique $P=f(V)$ du module photovoltaïque

On remarque que dans un premier temps la tension augmente, le courant quant à lui reste stable. Dans un second temps, le courant baisse légèrement et la tension augmente peu (nous sommes dans la zone du point de puissance maximal PPM) dans un troisième temps, le courant baisse fortement et la tension augmente très peu.

II.4. Influence de la température et de l'éclairement :

II.4.1. Influence de l'éclairement:

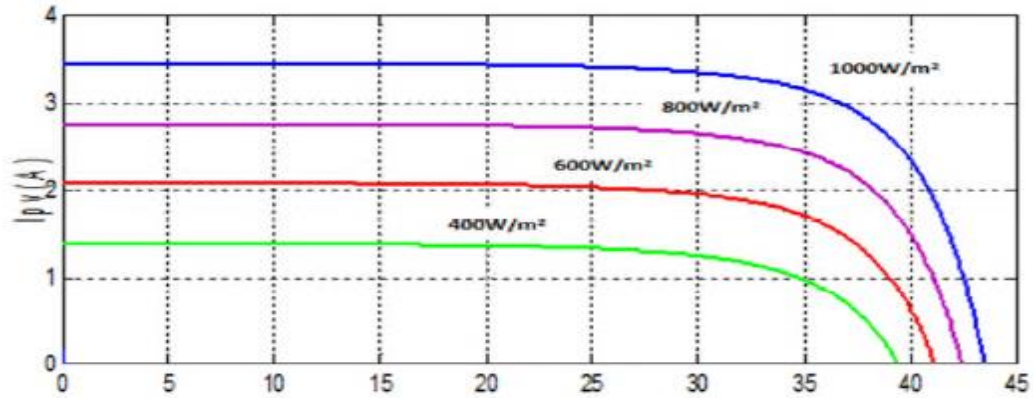


Figure (II.6) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

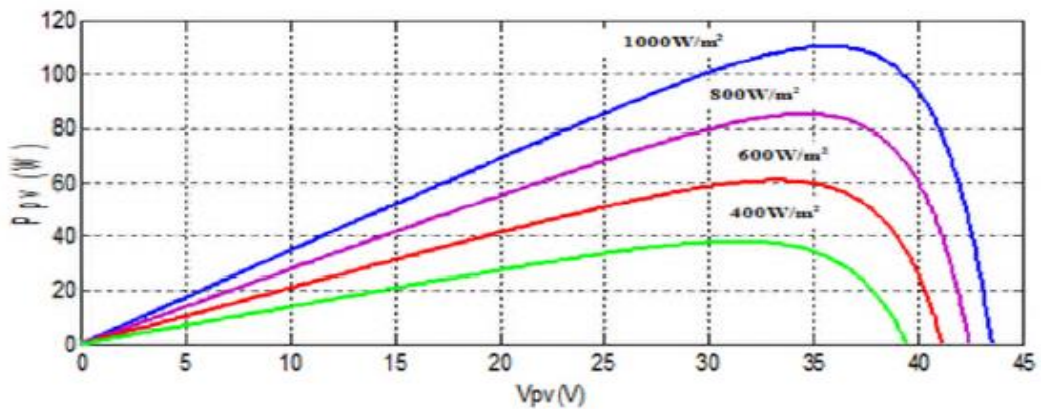


Figure (II.7) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

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

II.4.2. Influence de la température :

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 50°C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (II.8)

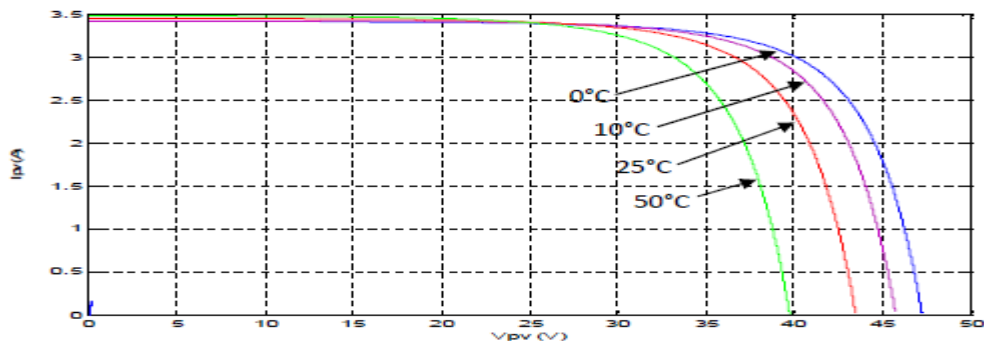


Figure (II.8) : Effet de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

On remarque que la tension en circuit ouvert baisse assez légèrement avec l'augmentation de la température. Par contre cette dernière a une influence négligeable sur le courant de court-circuit.

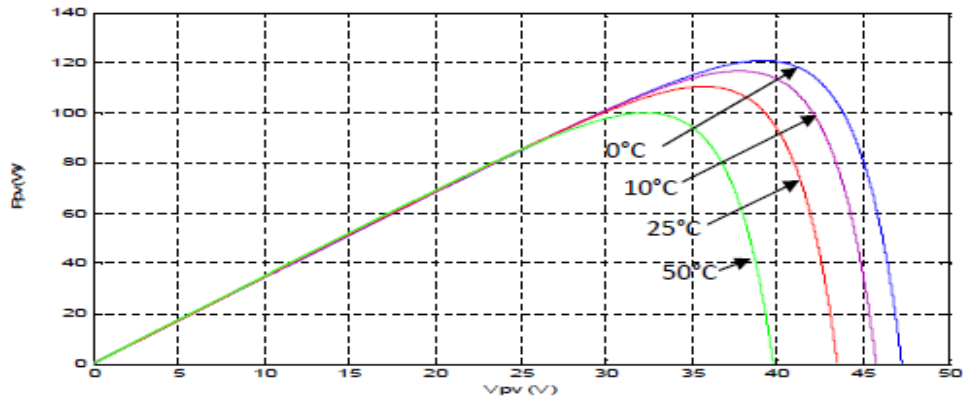


Figure (II.9) : Effet de la température sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}).

A partir des deux **figures (II.7)** ainsi que **(II.9)**, on peut observer que la caractéristique P_{pv} (V_{pv}) change considérablement avec la variation du niveau d'ensoleillement ; alors que le changement est assez négligeable lors de la variation de la température. Ceci s'explique par le fait que le courant varie considérablement avec la variation de l'irradiation ; alors que la tension varie peu. Par contre, cette dernière varie beaucoup, quand la température varie.

II.5. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

II.5.1. Définition :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.[28]

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

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

Dans une alimentation à découpage (**Figure II.10**), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

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

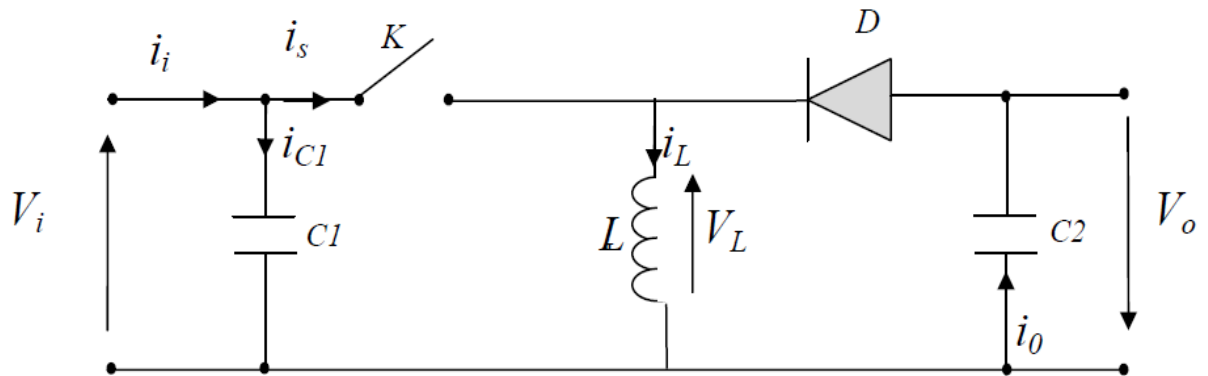


Figure (II.10) : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

II.5.2. Les type de hachures :

Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur (ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost)

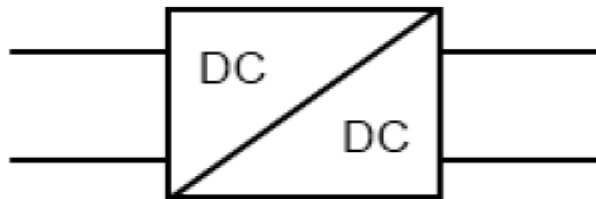


Figure (II.11) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.5.2.1. Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [29].

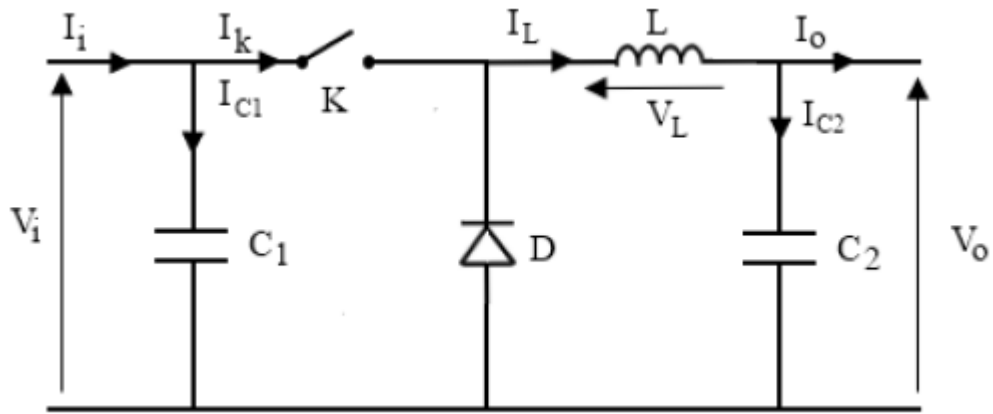


Figure (II.12) : Schéma électrique d'un hacheur buck

II.5.2.1.1. Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, αT la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = 1/T$ La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $T \in [\alpha T; T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle.[30]

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (figure.II.13) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle :[30]

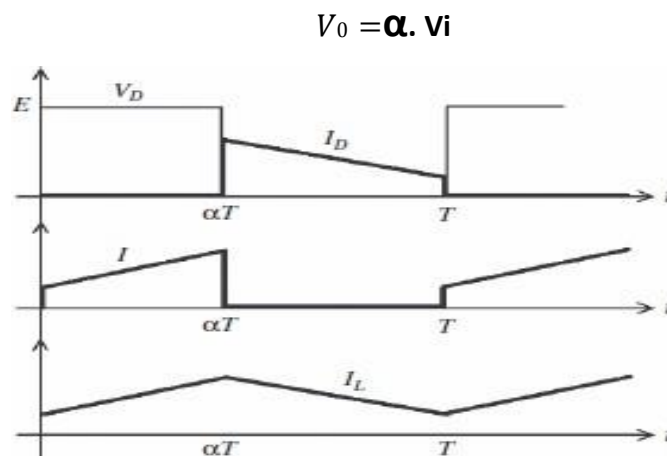


Figure (II.13) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

II.5.2.2. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées

(au blocage et à l'amorçage).

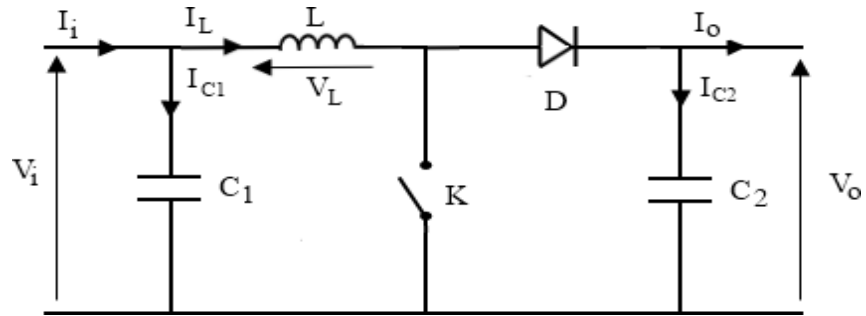


Figure (II.14) : Schéma électrique d'un hacheur boost

II.5.2.2.1. Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, αT le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $T \in [\alpha T ; T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_s = V_k$ En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [29] :

$$V_i = (1 - \alpha) V_o$$

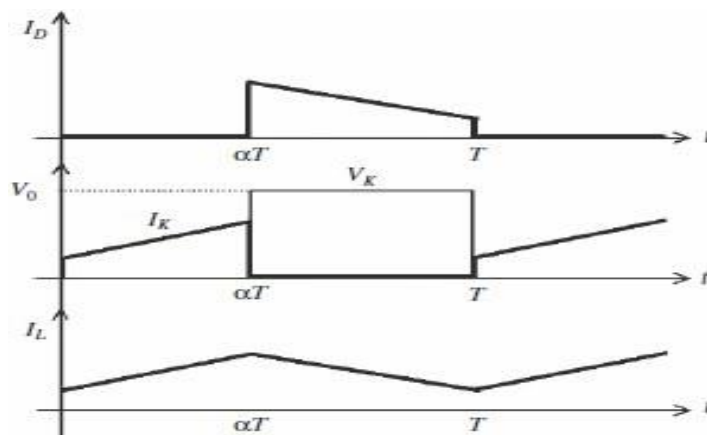


Figure (II.15) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

II.5.2.3. Hacheur Buck-Boost :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée ; son schéma de base est illustré par la figure (II.16) [28]

:

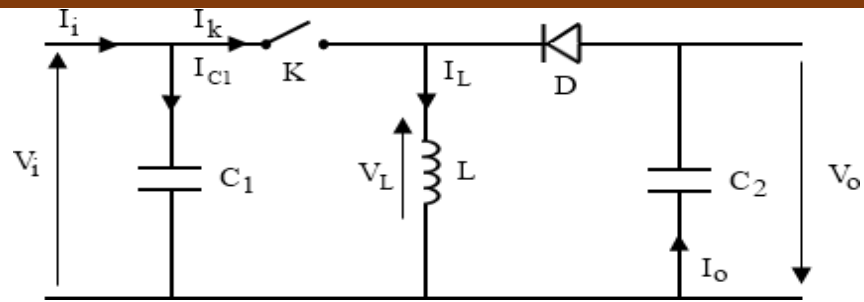


Figure (II.16) : Schéma électrique d'un hacheur buck-boost

II.5.2.3.1 Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure (figure. II.17). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_i . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à $-V_0$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que [30] :

$$V_i \cdot \alpha T_e = V_0(1-\alpha) T$$

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur buck.

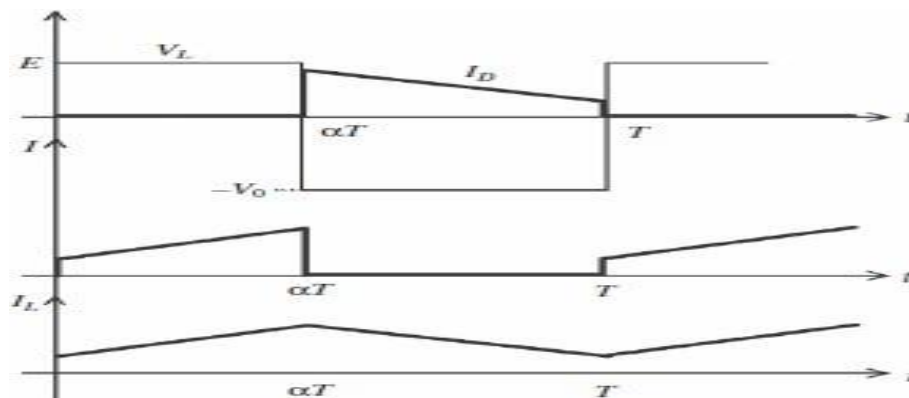


Figure (II.17) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost

II.6. Convertisseur DC-AC (onduleur) :

III.6.1. Définition :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu généré par le générateur PV en courant alternatif. Il utilise des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances [31].

Les onduleurs sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables

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

II.6.2. Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle.[32]

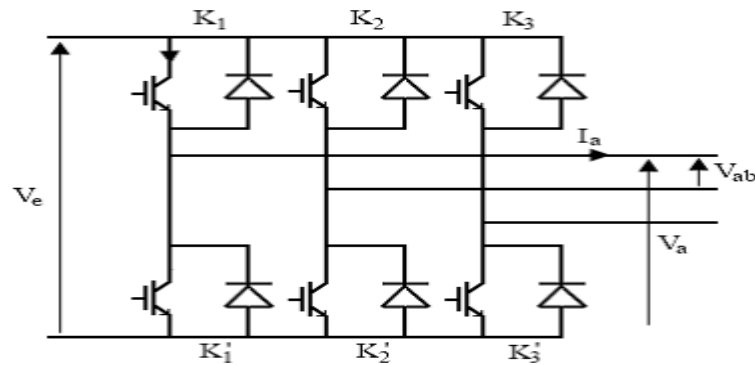


Figure (II.18) : Structure d'un onduleur triphasé

II.6.3. Principe de fonctionnement :

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique (adjacente), Décalée (disjointe), MLI...). Les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie, et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

- **Commande plein onde :**

Deux thyristors d'un même bras sont commandés à 180° de décalage. Les thyristors de deux bras voisins sont commandés à 120° de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont E , 0 ou $-E$ volts, la durée d'un niveau non nul étant de 120° par alternance. [33]

- **Commande MLI :**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant [34].

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse [34].

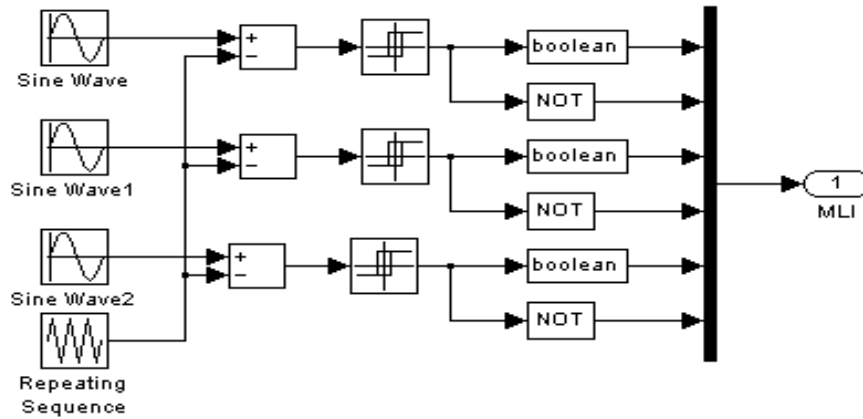


Figure (II.19) : Schéma de simulation d'une commande MLI

II.6.4. Classification des onduleurs :

Les onduleurs sont classés :

- **Selon le mode de commutation :**
 - Les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.
 - Les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.
- **Selon la nature de la source continue :**
 - Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal.
 - Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale.

II.6.5. Modélisation de L'onduleur :

La figure II.20 suivantes représentent la modélisation de l'onduleur de tension triphasé

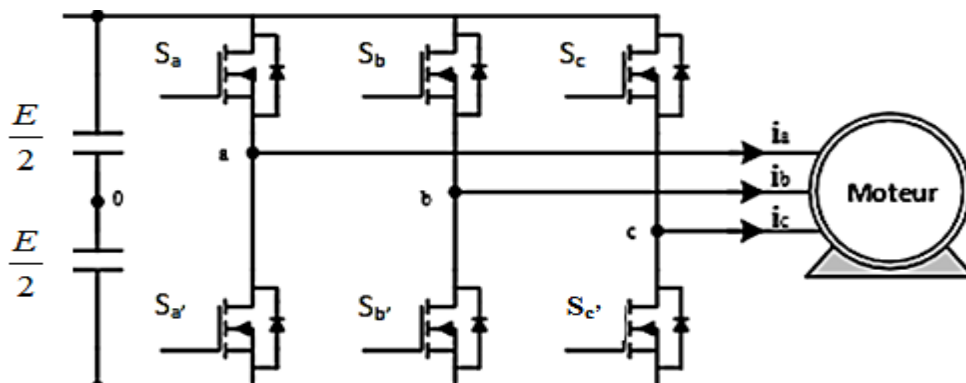


Figure (II.20) : Structure de l'onduleur de tension triphasé.

L'état des interrupteurs, supposées parfaites, peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i avec $i = a, b, c$.

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i = 1$;
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i = 0$;

Les tensions simples appliquées aux trois phases statoriques sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif « o » [36] :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases}$$

Par addition on a :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on}$$

Le système de la tension triphasée :

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} = 0$$

D'où, on obtient :

$$V_{on} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$$

En remplaçant l'équation (2.36) dans le système d'équation (2.33), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2.V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2.V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2.V_{co}) \end{cases}$$

Après arrangement les équations des deux systèmes on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$V_{ao} = ES_a$$

$$V_{bo} = ES_b$$

$$V_{co} = ES_c$$

Finalement :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

II.7. Commande MPPT :

II.7.1. Maximum Power Point tracking (MPPT) :

II.7.1.1. Introduction :

Pour la meilleure exploitation de diverses ressources des énergies renouvelables, il est important d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques GPV. Le suivi de point de puissance maximale (MPPT) a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques GPV peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP).

II.7.1.2. Principe de fonctionnement :

Le suiveur de point de puissance maximum (MPPT) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (MPPT) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau solaire. Le point de puissance maximale (MPP) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale.

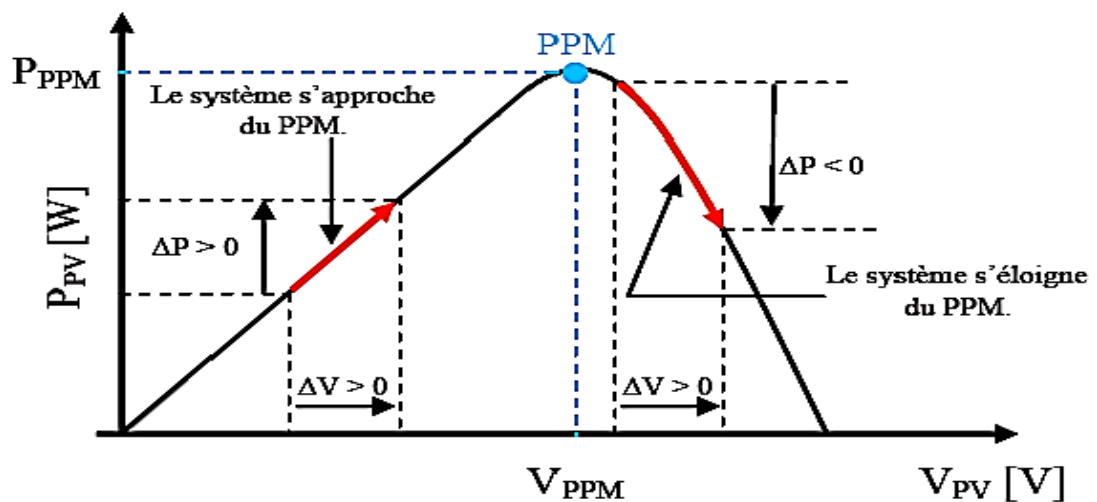


Figure (II.21) : Caractéristique puissance- tension d'un panneau photovoltaïque

L'association d'un convertisseur statique DC / DC, comme illustré à la (Figure.II.14), modifie le point de fonctionnement du panneau à l'aide d'une commande externe afin de maximiser l'énergie transférée de manière permanente. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

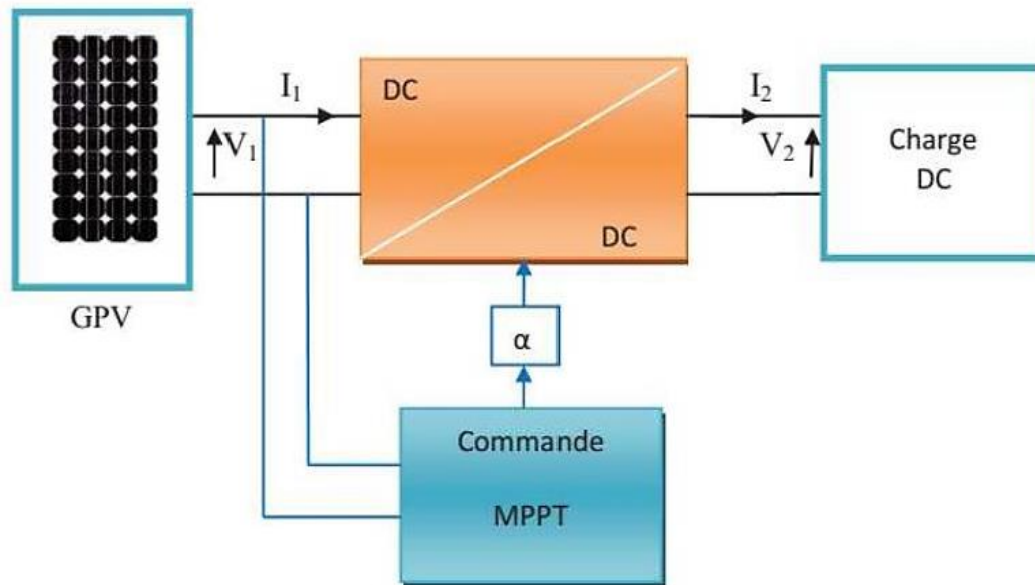


Figure (II.22) Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT

II.7.2. Classification des MPPT :

Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [37].

II.7.2.1. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :

II.7.2.1.1. Méthodes indirectes :

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes PV sont la méthode de tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que la méthode MPPT basée sur l'intelligence artificielle (IA).

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis, devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [37].

II.7.2.1.2. Méthode directe :

Les valeurs instantanées de la tension ou du courant de sortie PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de commande et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du PV. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

II.7.2.2. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée :

II.7.2.2.1. Commande MPPT fonctionnante à partir des paramètres d'entrée du CS :

Ce type de commandes MPPT exécute une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur.[38]

D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

II.7.2.2.2. Commande MPPT fonctionnante à partir des paramètres de sortie du convertisseur :

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du CS. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

On peut voir dans le **tableau (II.1)** les méthodes les plus utilisées :[38]

Tableau (II.1) : récapitulatif des méthodes utilisées : [38]

| Méthode MPPT | type | complexité | Analogique/ numérique | Vitesse de convergence | Paramètres détectés | Efficacité |
|------------------------------|----------|------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|
| Tension de circuit ouvert | Indirect | Faible | Mixte | Moyenne | Tension | Faible (%86=) |
| Courant de court-circuit | Indirect | Moyenne | Mixte | Moyenne | courant | Faible (%89=) |
| (P&O) | direct | Moyenne | Numérique | Rapide | & Tension courant | Haute (%96=) |
| ESC | direct | Moyenne | Numérique | Rapide | & Tension courant | Haute (%97=) |
| IncCond | direct | Moyenne | Mixte | dépond | & Tension courant | Haute |

II.7.3. Les algorithmes MPPT :

II.7.3.1. Méthode de conductance incrémentale (IncCond) :

La méthode de la conductance incrémentielle (IncCond) utilise la pente des caractéristiques de puissance du générateur PV pour suivre le MPP. Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle sur le point MPP, positive pour les valeurs de puissance de sortie inférieure à MPP et négative pour les valeurs de puissance supérieure à MPP.

Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = 1 + V \frac{dI}{dV}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V}$$

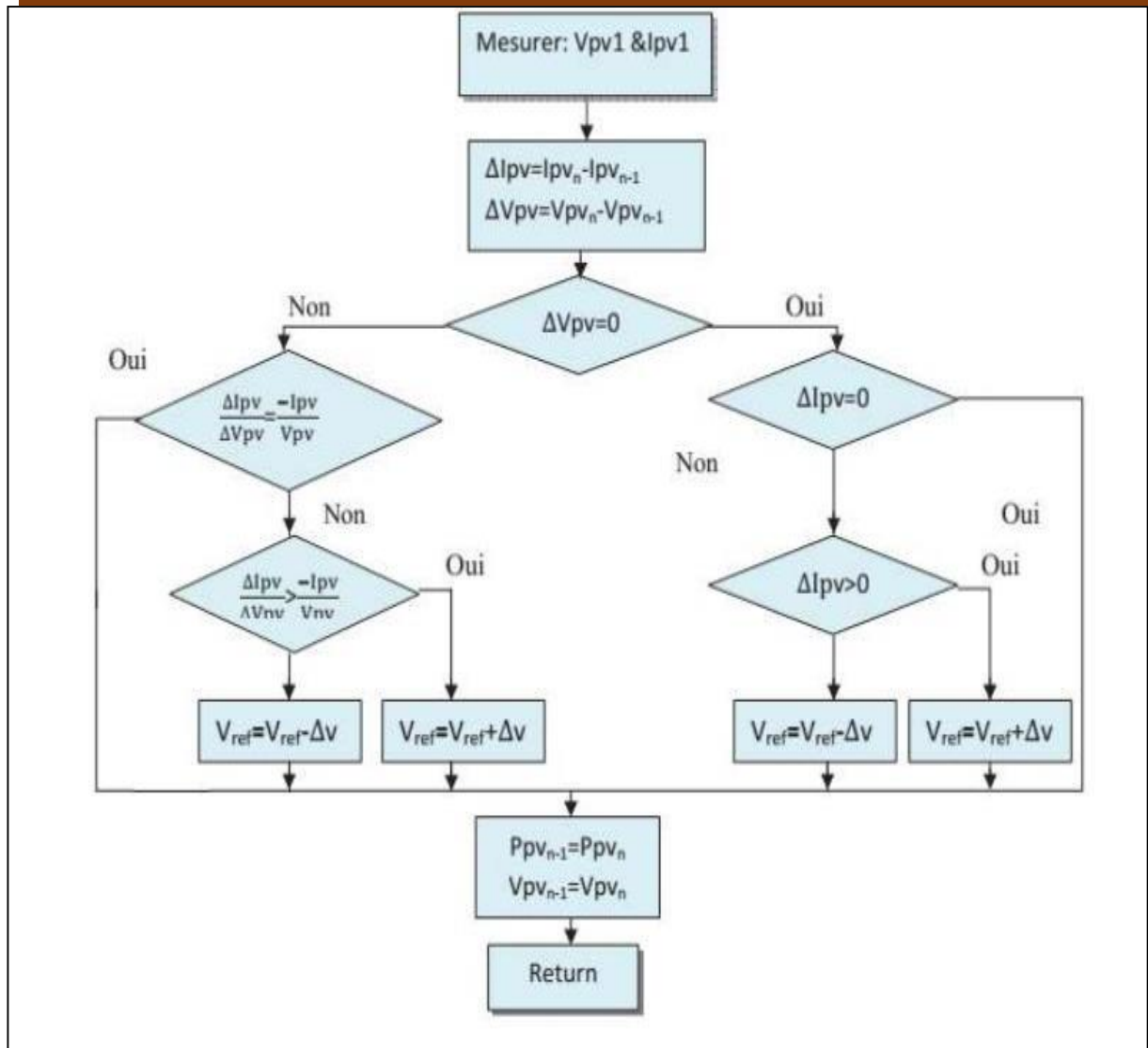


Figure (II.23) : Algorithme d'incrémentation de la conductance

II.7.3.2. Algorithme Perturbation & Observation (P&O) :

Cet algorithme a été considéré par un certain nombre de chercheurs. L'algorithme P&O peut être mise en œuvre en appliquant des perturbations à la tension de référence ou au signal de courant de référence du panneau solaire. L'algorithme P&O est basé sur le calcul de la puissance de sortie PV et de la variation de puissance en échantillonnant à la fois le courant et la tension du PV. Le tracker fonctionne en incrémentant ou décrémentant périodiquement la tension du générateur solaire. Si une perturbation donnée entraîne une augmentation (diminution) de la puissance de sortie du PV, la perturbation ultérieure est générée dans la même direction (opposée). Le rapport cyclique du hacheur est varié et le processus est répété jusqu'à ce que le point de puissance maximum soit atteint.

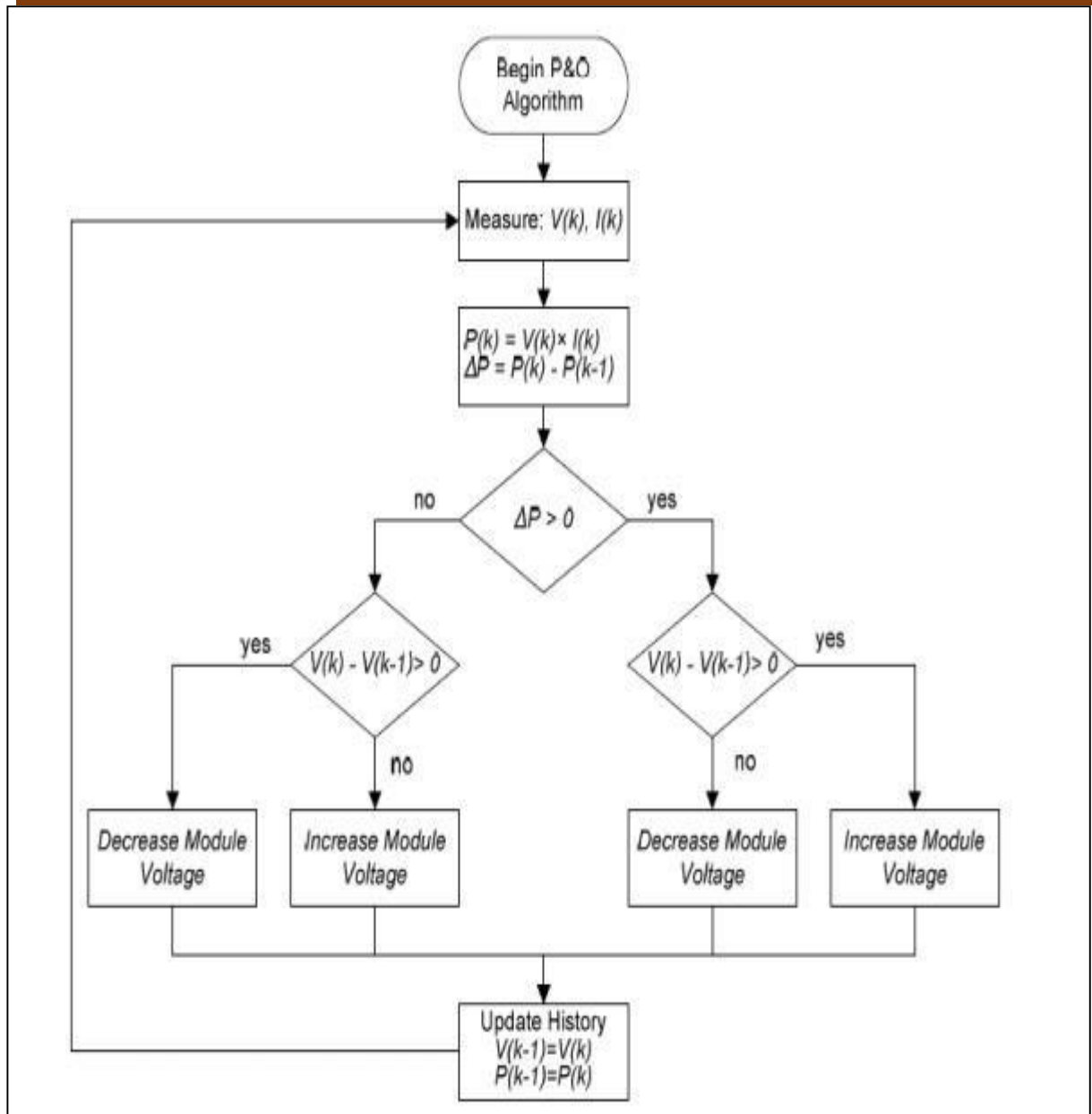


Figure (II.24) : Algorithme Perturb Observe (P&O)

. Tableau (II.2) Tableau comparatif entre les commandes MPPT :[44]

| MPPT | η_{MPPT} | Avantages | Inconvenient |
|----------------|---------------|--|---|
| P&O | 81.5%-96.5% | <ul style="list-style-type: none"> -Une structure simple. -Implémentation facile. -Peu de paramètres de mesure. | <ul style="list-style-type: none"> - Présente des oscillations Autour du MPP. -Perte occasionnelle de la recherche -Du MPP lors du Changement rapide des conditions Climatiques. |

| | | | |
|----------------------|-------------|---|--|
| IncCond | 89.9%-98.2% | - Il n'y a pas de pertes par Rapport au MPP. -Ne présente pas de Risques de divergence par Rapport au MPP. | -Le temps d'exécution de L'algorithme est plus long car il est plus, complexes. |
| Hill Climbing | 95.5%-99.1% | -Simple à mettre en oeuvre. | - Des oscillations autour du MPP en régime établi. -Perte occasionnelle de la recherche du MPP lors du -changement rapide des conditions climatiques. |

II.7.4 La commande MPPT à l'intelligence artificielle :

II.7.4.1. La commande MPPT floue :

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification. [39]

III.7.4.1.1 Principe de la logique floue :

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative...etc. Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance.

III.7.4.1.2 Variables linguistiques et ensembles flous

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir ; (grand, petit, positif, négatif, etc. ...). Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que : $\{x, T(x), U, G, M\}$

Où :

x : est le nom de la variable,

$T(x)$: est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x ,

U : est l'univers du discours associé avec la valeur de base,

G : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x ,

M : est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

III.7.4.1.3 Fonctions d'appartenance :

Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. En général la forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application, et peut être triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche comme le montre la **Figure (II.25)**.

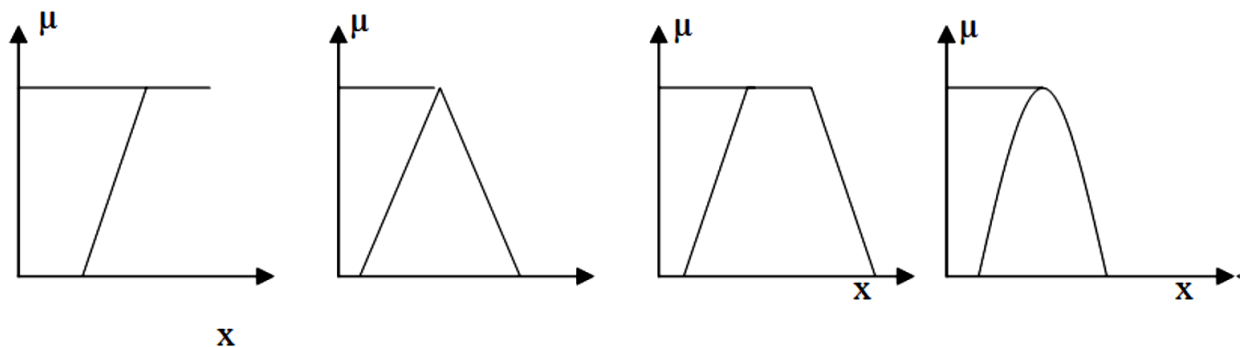


Figure (II. 25) : Différentes formes de fonctions d'appartenance

II.7.4.1.4 Règles linguistiques :

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

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

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue. Il y a plusieurs formes de Si...alors ...la forme générale est :

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

II.7.4.1.5 Structure générale d'un système flou :

Le système à base de la logique floue est composé de trois blocs principaux **Figure (II.26)**.

Fuzzification, inférence et Défuzzification.

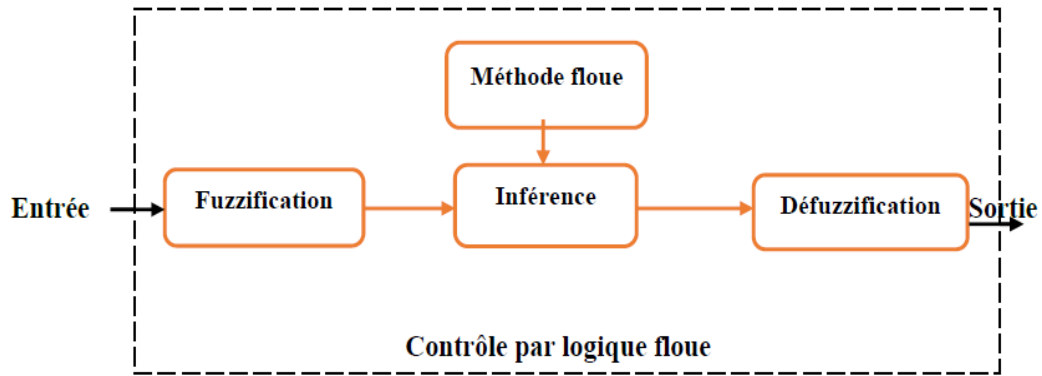


Figure (II. 26) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue

II.7.4.1.5.1. Fuzzification :

L'objectif de la fuzzification est de définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables qui permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues.

II.7.4.1.5.2 Inférence floue :

Il est mentionné que les inférences floues sont basées sur l'implication floue de type modus ponens généralisé. Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connections « et » et « où ».

Supposons que le système flou a deux entrées x , y et une sortie z et que l'on a défini n règles linguistiques comme suit :

Si $x = A_1$ et $y = B_1$ alors $z = C_1$

Si $x = A_2$ et $y = B_2$ alors $z = C_2$

Si $x = A_n$ et $y = B_n$ alors $z = C_n$

Où x , y et z sont des variables linguistiques qui représentent les variables d'état de processus et variables de contrôle ; A_i , B_i et C_i ($i=1, n$) sont les sous-ensembles flous définis dans les ensembles de référence pour x , y et z respectivement. En toute généralité, n'importe quelle combinaison des opérateurs ou, et et non peut apparaître dans la condition d'une règle, suivant les conditions imposées par le système à régler. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs. On introduit donc la notion de méthodes d'inférence.

Les méthodes les plus utilisées sont :

- Méthode d'inférence max-min
- Méthode d'inférence max-prod
- Méthode d'inférence Somme-prod

II.7.4.1.5.3 Défuzzification :

Le résultat d'une inférence floue est une fonction d'appartenance. C'est un sous-ensemble flou. Un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). De plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale/analogique. Il y a plusieurs méthodes de défuzzification proposée dans la littérature. Il n'y a pas de stratégie systématique pour choisir parmi l'une de ces méthodes. [39]

II.7.4.1.6 Réseaux de neurones artificiels :

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. [40]

II.7.4.2. Neurone formel :

Un neurone est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés les poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie". Un neurone est un opérateur mathématique comme présenté sur la figure.

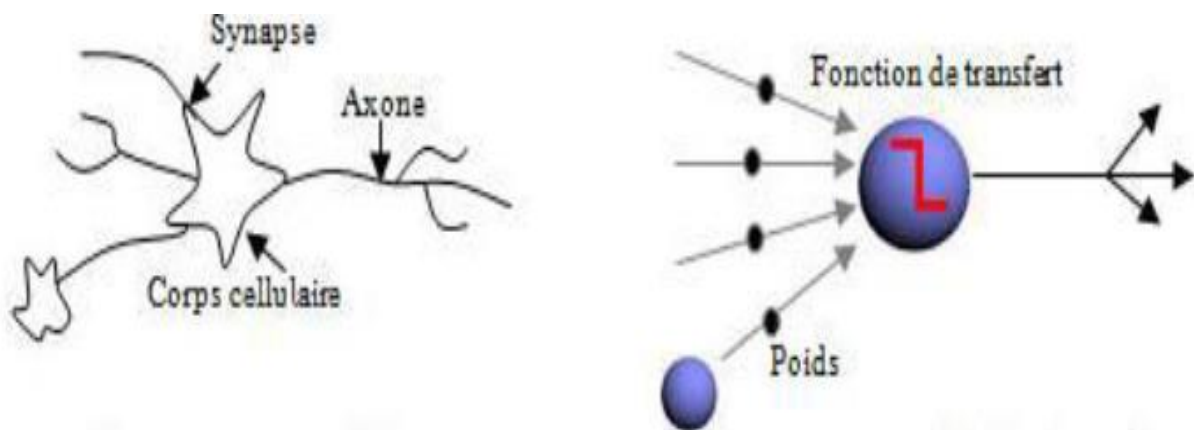


Figure (II.27) : Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel [43]

II.7.4.2.1. Neurone artificiel :

Le neurone formel peut être défini par les paramètres suivants :

X_i : L'information parvenant de neurone i .

$W_{i,j}$: Un poids lié le neurone i et le neurone j .

b : Poids supplémentaire, appelé le biais.

V_j : La somme pondérée des poids $W_{i,j}$ et de x_i :

$$V_j = \sum W_{i,j} X_i$$

g : La fonction d'activation, ou fonction de transfert :

y_j : La sortie de neurone j donnée par : $y_j = g(V_j)$

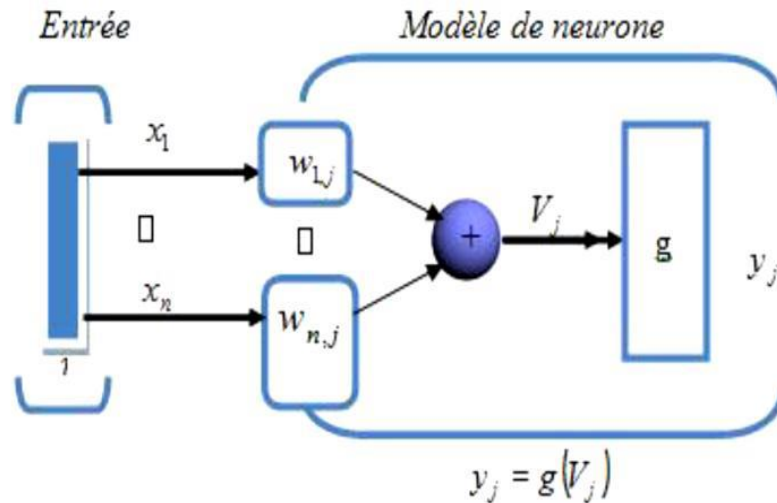


Figure (II.28) : Représentation matricielle d'un neurone artificiel [43]

II.7.4.2.2 Un réseau de neurones artificiel :

Le réseau de neurones artificiel est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones. Il se compose de neurones qui sont interconnectés de façon que la sortie d'un neurone puisse être l'entrée d'un ou plusieurs autres neurones. Ensuite il y a des entrées de l'extérieur et des sorties vers l'extérieur. Rumelhart et al. Donnent 8 composants principaux d'un réseau de neurones :

- Un ensemble de neurones.
- Un état d'activation pour chaque neurone (actif, inactif, ...)
- Une fonction de sortie pour chaque neurone ($f(S)$)
- Un modèle de connectivité entre les neurones (chaque neurone est connecté à tous les autres)
- Une règle de propagation pour propager les valeurs d'entrée à travers le réseau vers les sorties
- Une règle d'activation pour combiner les entrées d'un neurone (très souvent une somme pondérée)
- Une règle d'apprentissage
- Un environnement d'opération (le système d'exploitation, par exemple). [40]

II.7.4.2.3 Architecture des réseaux de neurones :

II.7.4.2.3.1 Les réseaux non bouclés :

Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (feedforward). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Si tous les neurones ne sont pas des organes de sortie, on parle de neurones cachés. [41]

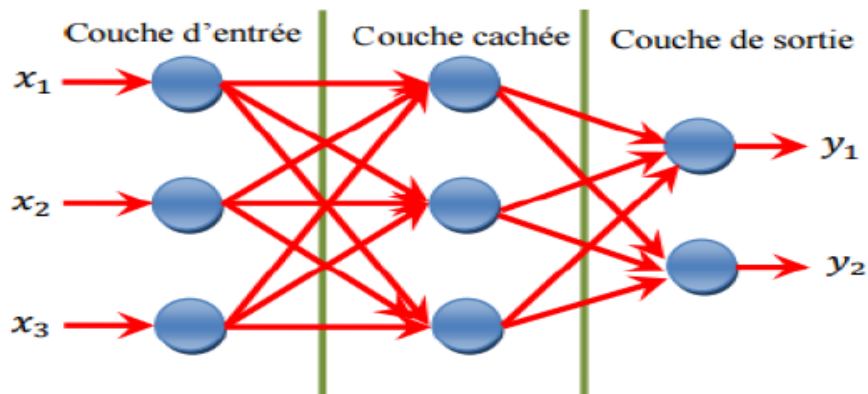


Figure (II.29) : Réseau non bouclé [43]

II.7.4.2.3.2. Réseaux bouclés :

Il s'agit de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network ou récurrent Network).

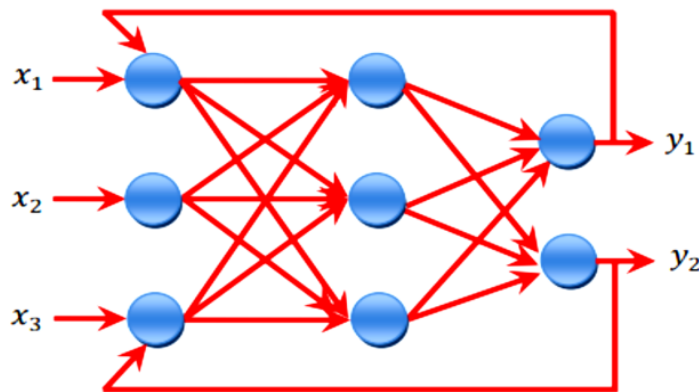


Figure (II.30) : Réseau bouclé [43]

II.7.4.2.4 Perceptron multicouches (MLP) :

II.7.4.2.4.1. Architecture :

Tout type de réseaux de neurones est constitué de cellules (ou neurones), connectées entre elles par des liaisons affectées des poids. Ces liaisons permettent à chaque cellule, de disposer d'un canal pour envoyer et recevoir des signaux en provenance des autres cellules du réseau.

Le réseau artificiel MLP (Multi Layer Perceptron) est composé d'une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées. Les éléments de deux couches adjacentes sont interconnectés par des poids assurant la liaison des différentes couches comme les montres la **Figure (II.31)** Les poids déterminent l'impact sur les cellules qu'elle connecte.

Chaque cellule dispose une entrée, qui lui permet de recevoir l'information des autres cellules, et une fonction d'activation. [35]

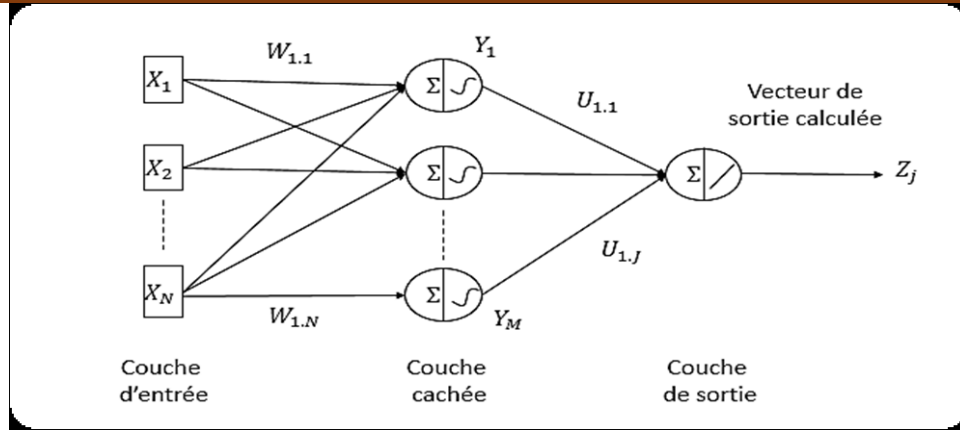


Figure (II.31) : Architecture d'un réseau de neurones artificiels MLP. [43]

W_{nm} : représente les poids reliant la couche d'entrée avec la couche cachée ;

U_{mj} : représente les poids reliant la couche cachée avec celle de la sortie.

Les composants du vecteur d'entrée « X » du MLP seront pondérés par les poids w_{nm} et ensuite transmis à la couche cachée selon les équations suivantes :

$$C_m = \sum_{n=1}^N X_n W_{nm} \quad (\text{II.20})$$

$$y_m = f(C_m) \quad (\text{II.21})$$

Les sorties de la couche cachée seront aussi pondérées par les poids U_{mj} et transmis ensuite à la couche de sortie selon les équations suivantes :

$$O_j = \sum_{m=1}^M y_m u_{jm} \quad (\text{II.22})$$

$$Z_j = g(O_j) \quad (\text{II.23})$$

f et g représentent respectivement les fonctions d'activations des neurones de la couche cachée et celle de la couche de sortie. Pour notre cas, elles sont des fonctions sigmoïdes et linéaires.

La fonction sigmoïde est définie par l'équation :

$$f(x) = 1 / [1 + \exp(-ax)] \quad (\text{II.24})$$

Sa dérivée est :

$$f'(x) = a \cdot f(x)[1 - f(x)] \quad (\text{II.25})$$

II.7.4.2.5. Algorithme d'apprentissage :

L'apprentissage consiste à adapter les valeurs des poids afin d'obtenir le comportement désiré du MLP. Pour cela, on a besoin d'une base de données, constitué d'un vecteur d'entrée et d'un vecteur de sortie approprié. Un algorithme d'apprentissage connu sous le nom d'algorithme de rétropropagation du gradient a été mis en place en 1986 par Rumelhart et al.

Ainsi l'adaptation des poids U_{mj} qui relient la couche cachée à celle de la sortie est donné par :

$$u_{mj}^{(i+1)} = u_{mj}^{(i)} + a_2(t_j - z_j) \cdot g'(o_j)y_m \quad (\text{II.26})$$

La mise à jour des poids w_{nm} reliant la couche d'entrée à la couche cachée est donné par :

$$W_{mn}^{(i+1)} = W_{mn}^{(i)} + \alpha_2 \cdot [\sum_{i=1, j=1}^j (t_j - z_j) \cdot g'(o_j) u_{mj}] (f'(C_m)) X_n \quad (\text{II.27})$$

α_1 et α_2 Sont les pas d'apprentissages.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation des éléments utilisés, commencé la modélisation du système photovoltaïque, Nous avons ensuite étudié les caractéristiques énergétiques des panneaux solaires, puis l'influence de la température et de l'éclairement sur ces caractéristiques.

Puis nous avons modélisé le convertisseur (DC-DC). Et ensuite nous avons fait une étude du convertisseur continu alternatif (DC-AC).

Puis nous avons étudié le command MPPT classique, puis à l'intelligence artificielle (flue neurones).

Chapitre III :

Simulation et résultats

III.1. Introduction :

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

Dans ce chapitre nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique tel que le générateur PV, le hacheur survolteur « boost », l'onduleur et la charge.

Afin de maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée. Dans ce contexte, nous proposons un système de commande MPPT par deux méthodes MPPT pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV.

Ce chapitre, a pour le but de montrer les résultats de simulation d'un panneau photovoltaïque (100KW) dont les deux effets températures, rayonnement puis l'étude de la simulation d'un système photovoltaïque adapté à un hacheur survolteur « boost » avec deux commandes MPPT « Incrémental conductance » et « La logique floue » et comparaison entre les deux méthodes.

III.2. Description de systèmes :

Le système se compose de quatre parties. La première partie est un générateur photovoltaïque qui convertit l'éclairage en énergie électrique et contient sur des caractéristique $I(v)$ et $P(v)$.

Suivi de la partie II, qui est l'expression du convertisseur survolteur hacheur-boost commande par la partie III, qui est la MPPT, qui est divisée en deux types :

- Type I : est classique et a à son tour plusieurs types à partir desquels nous utilisons le type de commande Méthode de conductance incrémentale (IncCond).
- Le type II : est le commande MPPT logique floue.

Et pour la conversion le courant continue en alternatif, nous avons utilisé la quatrième partie, qui est un onduleur, et ensuite, un filtre qui filtre le courant et la tension, et nous les connectons directement à la charge, et ainsi de suite au réseau.

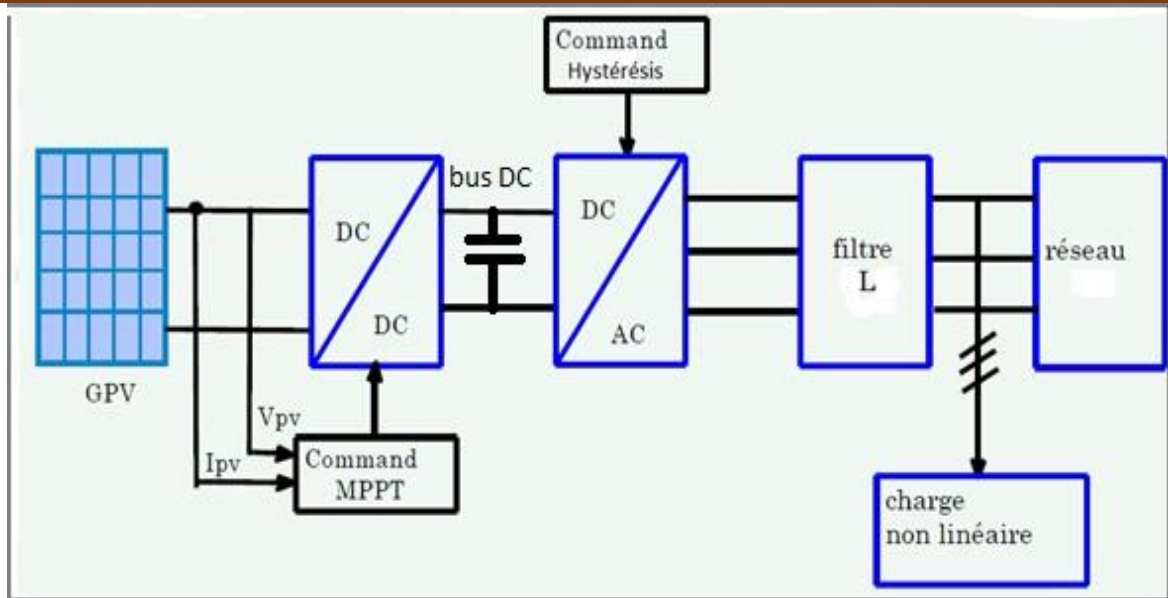


Figure (III.1) Schéma d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique

Et nous avons fait les modèles en utilisant MATLAB, et cela nous a permis d'analyser les performances du système.

III.3. Paramétrer de système :

III.3.1. Les caractéristiques électriques du générateur PV :

| Grandeurs | Valeur |
|-----------------------------------|-------------------|
| Nombre des cellules en séries | 5 |
| Nombre des cellules en parallèles | 66 |
| Courant de court-circuit | 5.96 A |
| Tension de circuit ouvert | 64.2 V |
| Courant optimal | 5.58 A |
| Tension optimal | 54.7 V |
| Résistance série | 0.037998 Ω |
| Résistance parallèle | 993.51 Ω |
| Courant de saturation | 1.1735 e-8 A |
| Courant de phase | 5.9602 A |

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du GPV photovoltaïque

III.3.2 Les caractéristiques électriques de convertisseur hacheur (boost) :

| Grandeurs | Valeur |
|-----------|-----------|
| Capacité | 100 e-6 F |

| | |
|------------|----------------|
| Inductance | 5 e-3 H |
| Résistance | 0.005 Ω |

Tableau (III.2) : Les caractéristiques électriques de convertisseur hacheur (boost)

III.3.3. Les caractéristiques électriques d'onduleur :

| Grandeurs | Valeur |
|----------------------|---------------|
| Le niveaux | 3 niveaux |
| Capacite | Inf |
| Type de Interrupteur | IGBT/ Diode |
| Résistance | 1 e6 Ω |

Tableau (III.3) : Les caractéristiques électriques d'onduleur

III.3.4. Les caractéristiques de réseaux électriques :

Le réseau se compose de deux lignes, dont la première est de 5 km de long et la seconde de 14 km de long, ainsi que deux charges et un groupe diasele.

| Grandeur | Valeur |
|----------------|-------------------|
| Charge (1) | 2 MW |
| Charge (2) | 30 MW – 2 M var |
| Line (1) | 5 Km |
| Line (2) | 14 Km |
| Groupe diazale | 120 KV – 2500 MVA |

Tableau (III.4) : Les caractéristique de réseaux électrique.

III.4. Simulation de réseaux :

Figure (III.2) : illustre le bloc schématique de SIMULINK du réseau.

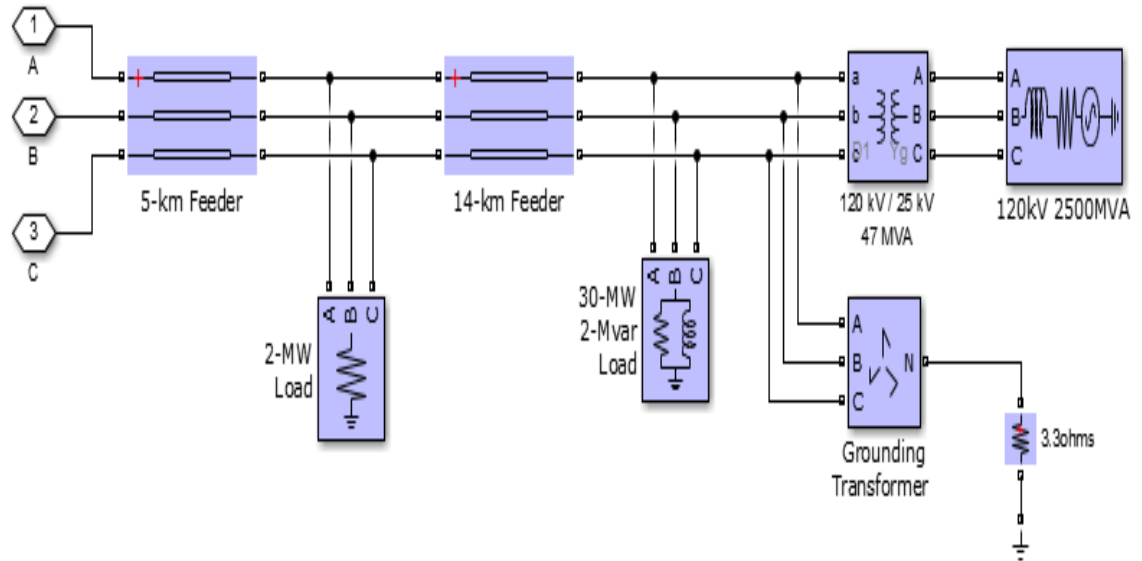


Figure (III.2) : Schéma block de réseaux

III.5. Simulation du système global :

Nous avons procédé à la simulation du système expliqué ci-après, sous une température constante (25°C) et un éclairage variable (condition climatiques).

Figure (III.3) : illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT de conductance incrémentale (IncCond) et commande MPPT à l'intelligence artificielle par méthode logique floue :

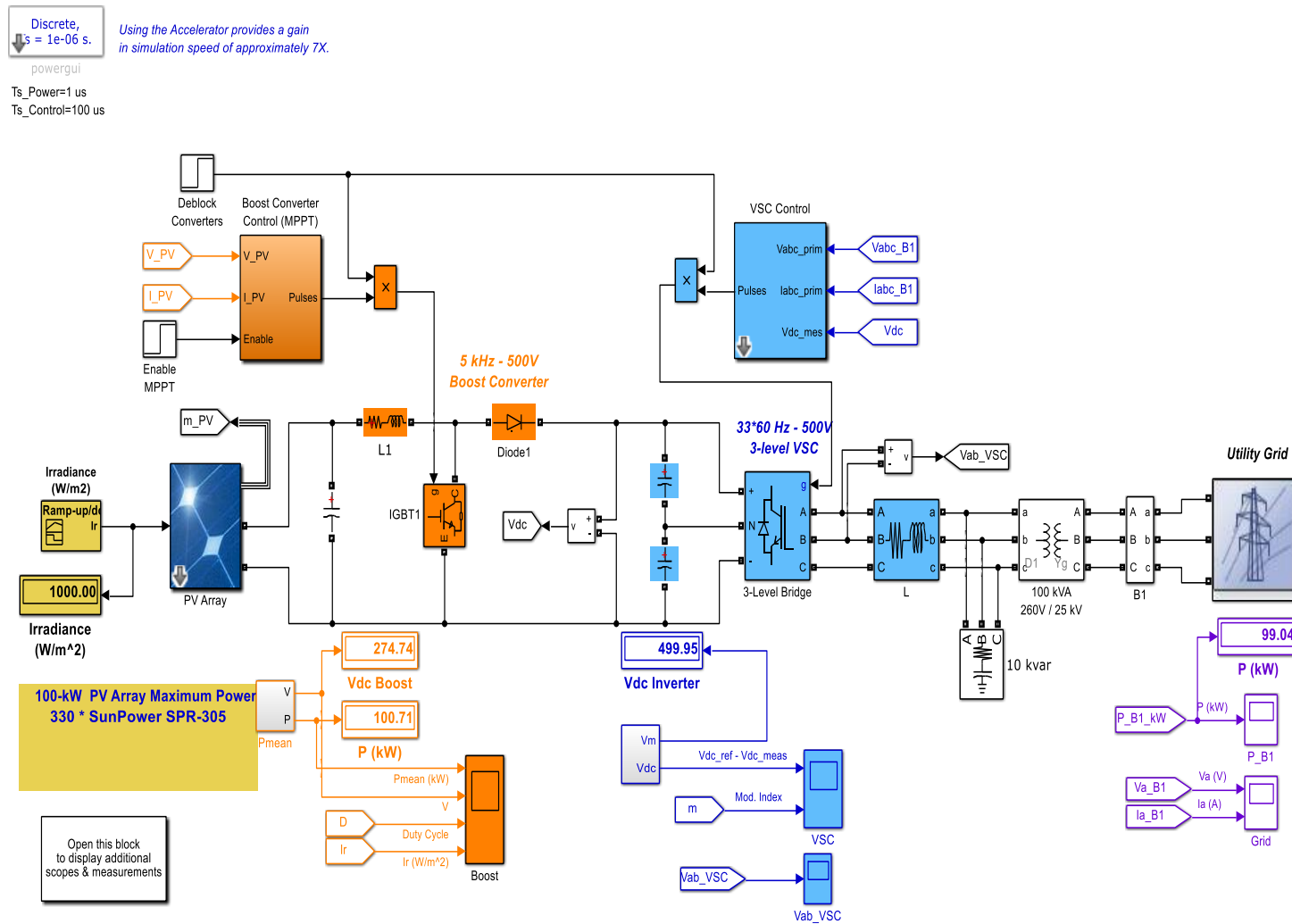


Figure (III.3) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système globa

III.6. Simulation du système PV connecté en réseaux par la commande MPPT :

III.6.1. Commande classique par Méthode de conductance incrémentale (IncCond) :

Figure (III.4) Illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT.

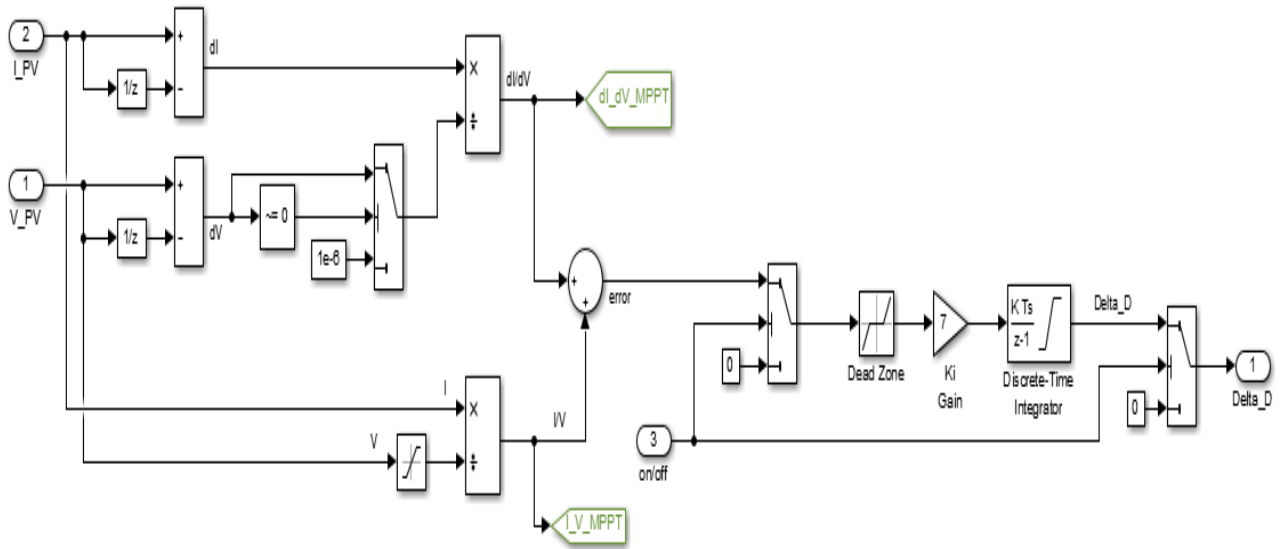


Figure (III.4) : schémas bloc de la commande MPPT de conductance incrémentale (IncCond)

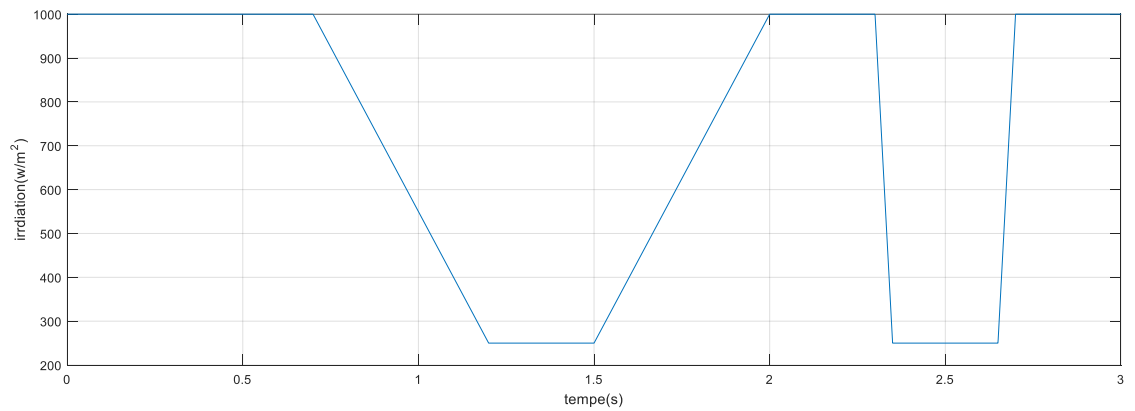


Figure (III.5) : Irradiation d'un générateur PV

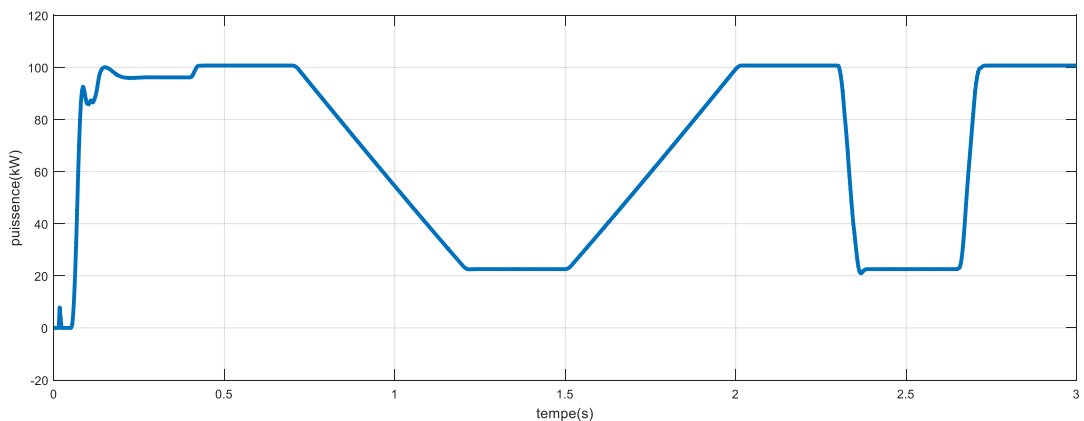


Figure (III.6) : la puissance d'un générateur PV par la méthode (IncCond)

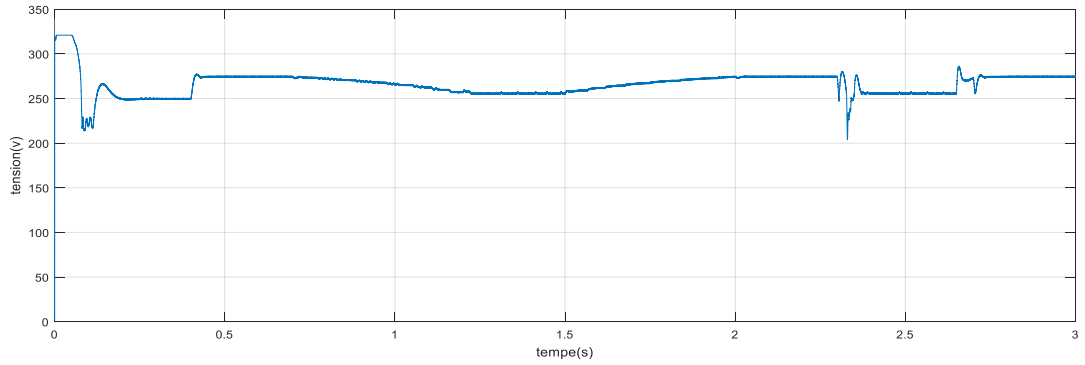


Figure (III.7) : la tension extérieure en PV par la méthode (IncCond)

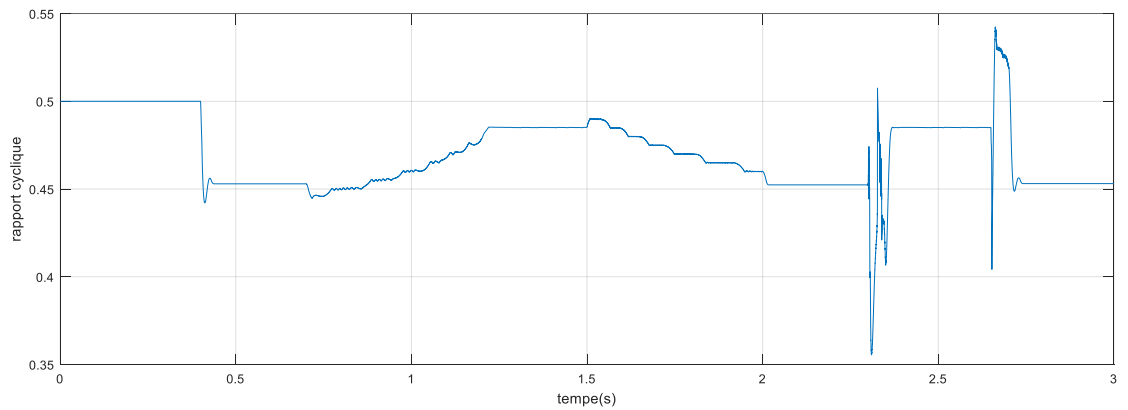


Figure (III.8) : rapport cyclique commande en hacheur

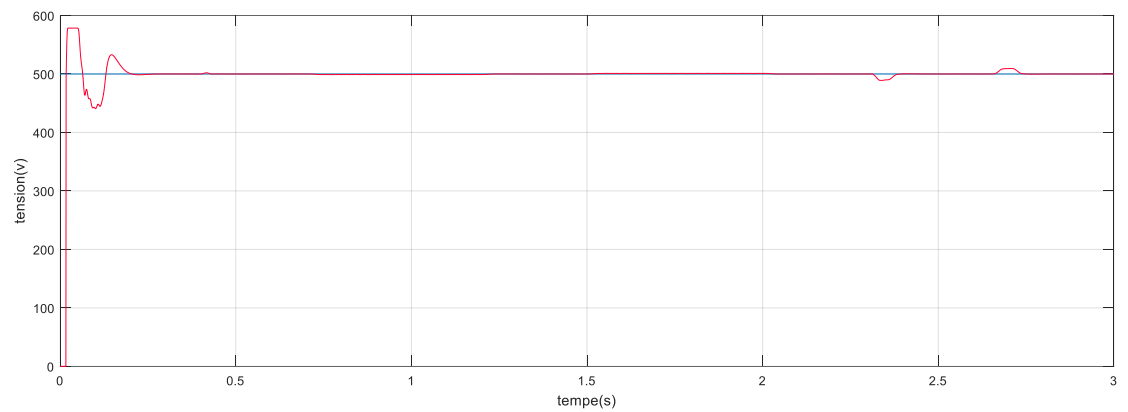


Figure (III.9) : la tension extérieure en hacheur par la méthode (IncCond)

On remarque que Le hacheur survolteur fournie une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

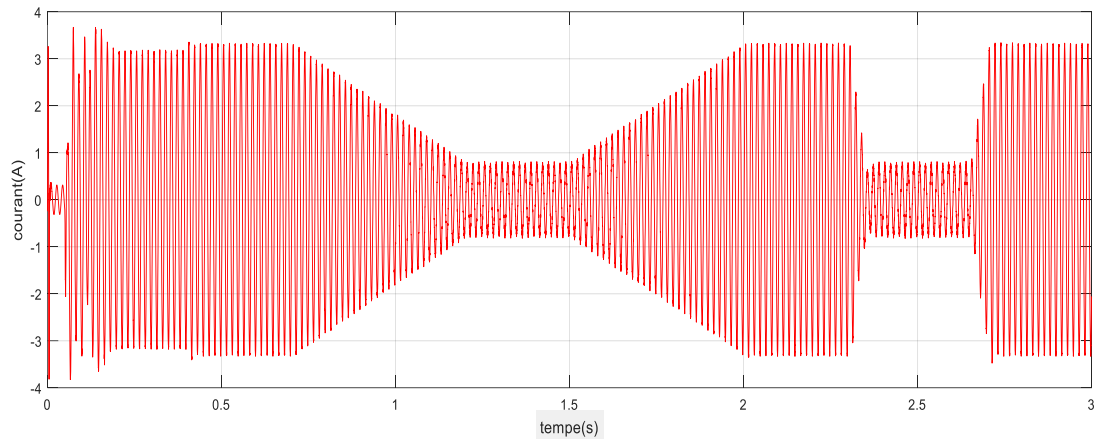


Figure (III.10) : Le courant injecté en réseaux par la méthode (IncCond)

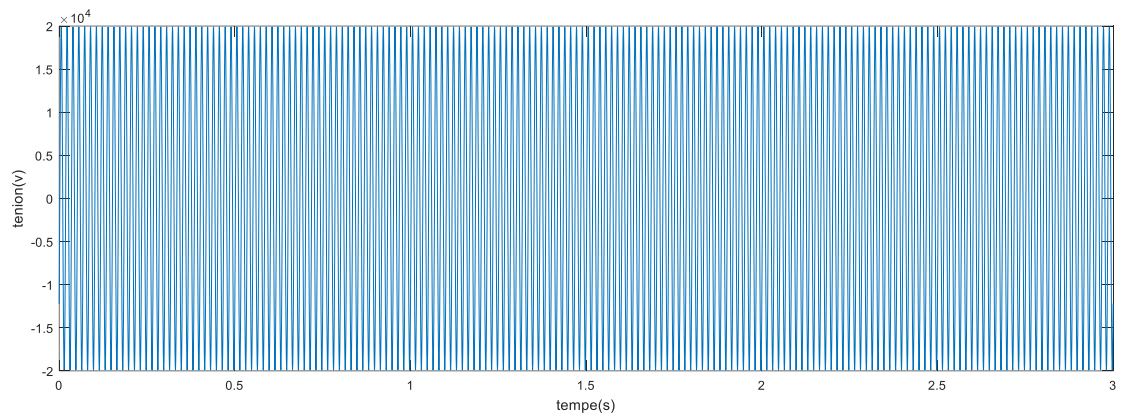


Figure (III.11) : La tension injecté en réseaux par la méthode (IncCond)

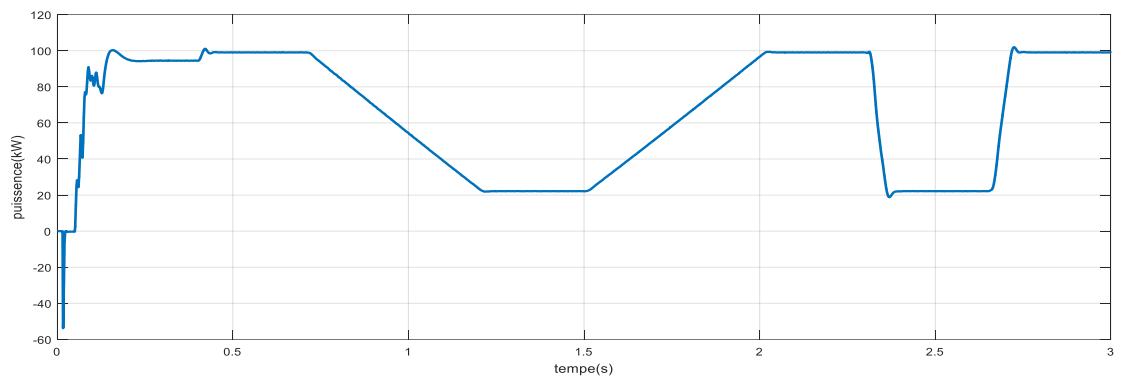


Figure (III.12) : la puissance intérieure en réseaux par la méthode (IncCond)

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « Incrémental de conductance » sont représentés par les figures précédentes. Ces figures représentent la tension, la puissance générées par le générateur photovoltaïque, ainsi que le rapport cyclique D et la tension, le courant à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT par la méthode InC effectuent correctement leurs rôles. Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

On remarque sur les résultats de simulation que l'augmentation progressive de l'éclairement mène l'algorithme IncCond à une mauvaise interprétation. En effet, au fur et à mesure que l'éclairement augmente, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Vu que le MPPT est assez rapide, il arrive après un certain temps à reprendre dans la bonne direction.

III.6.2. Commande MPPT à l'intelligence artificielle par méthode logique floue:

Figure (III.13) : illustre le bloc schématique de SIMULINK Commande MPPT à l'intelligence artificielle par méthode logique floue .

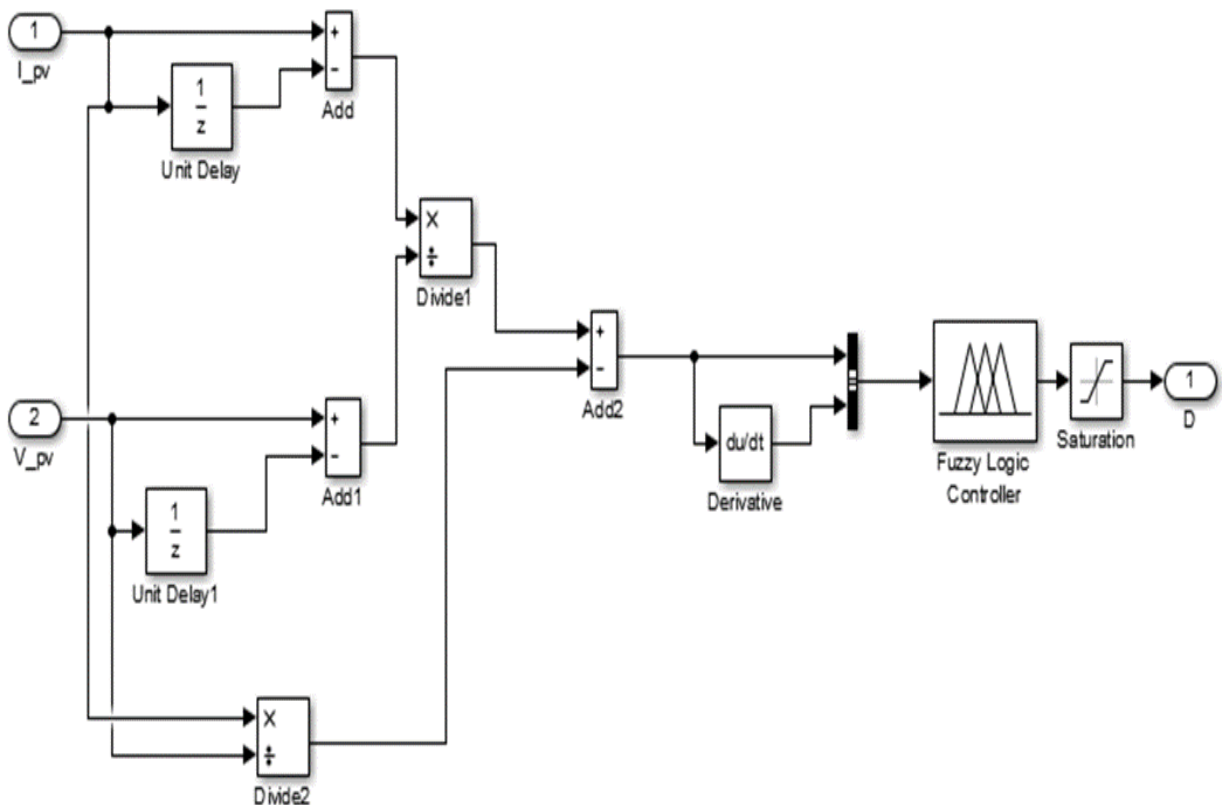
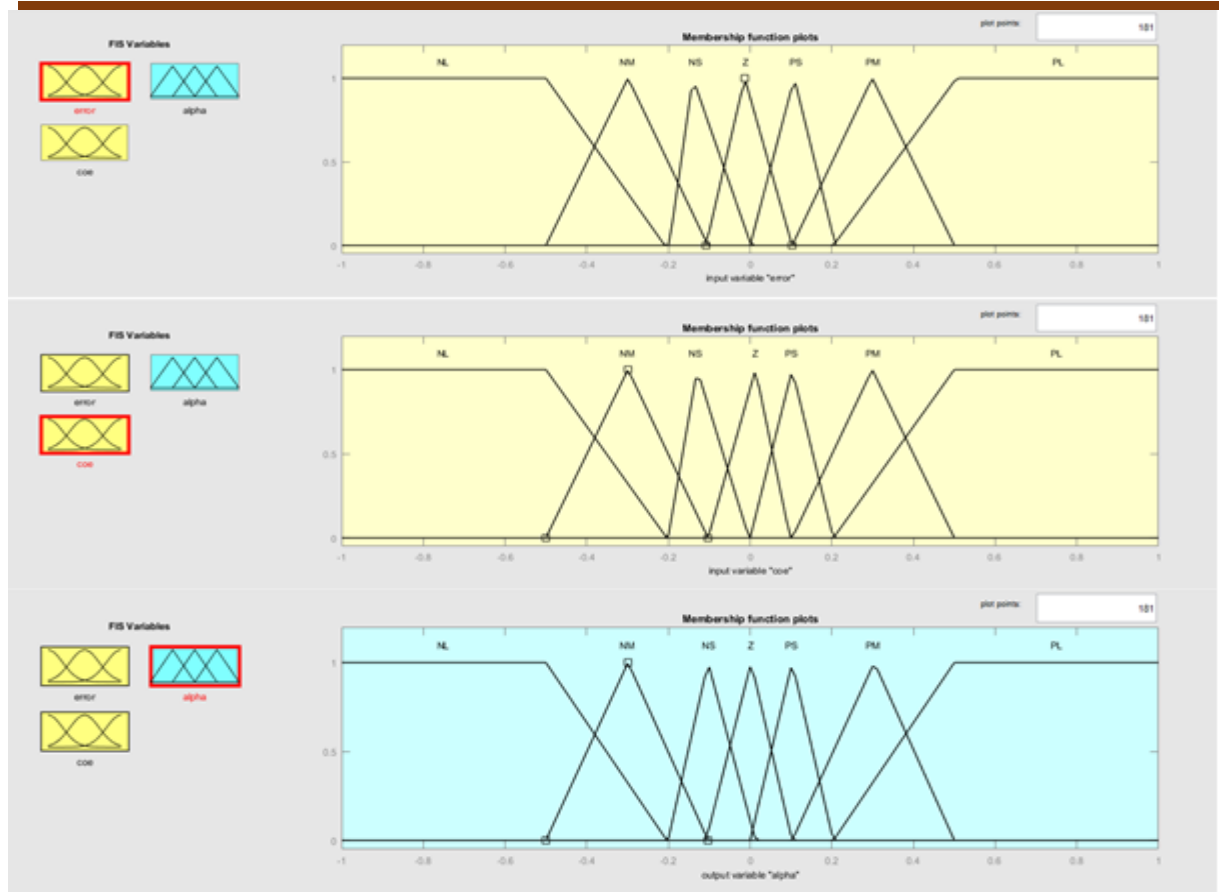


Figure (III.13):schema de MPPT de logique floue

III.6.3. La visualisation des deux entrées données par des fonctions d'appartenance triangulaires et la sortie :



III.6.4. Tableau de règle :

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL |
| NL | PL | PL | PL | PL | NM | Z | Z |
| NM | PL | PL | PL | PM | PS | Z | Z |
| NS | PL | PM | PS | PS | PS | Z | Z |
| Z | PL | PM | PS | Z | NS | NM | NL |
| PS | Z | Z | NM | NS | NS | NM | NL |
| PM | Z | Z | NS | NM | NL | NL | NL |
| PL | Z | Z | NM | NL | NL | NL | NL |

Tableau (III.5) :Les règle

| | | | | | | |
|--------------|-----------------|----------------|------|----------------|-----------------|--------------|
| NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL |
| Negative low | Negative medium | Negative Small | Zéro | Positive small | Positive medium | Positive low |

Tableau(III.6):fonctions d'appartenance

En dernier nous illustrons le graphe de relation entre les 2 entrées et la sortie appelé « graphe de surface », comme sur la figure :

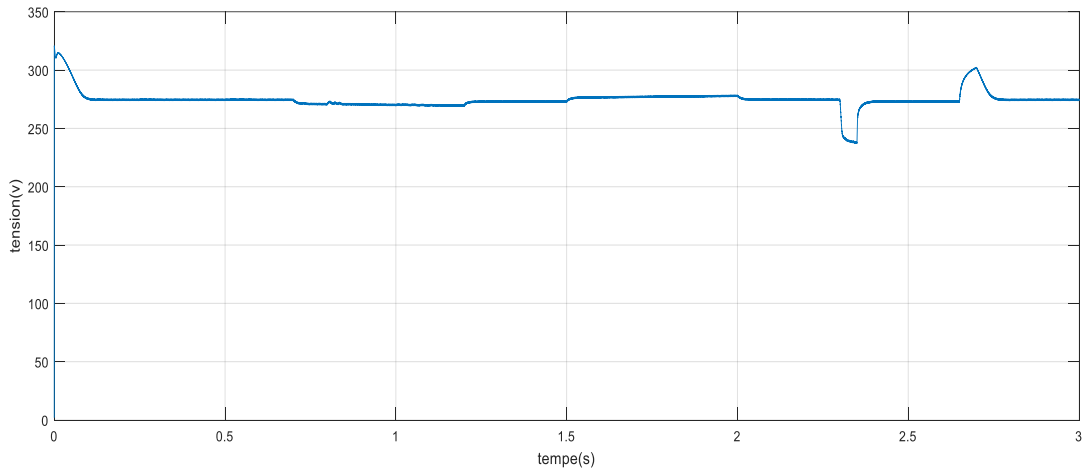
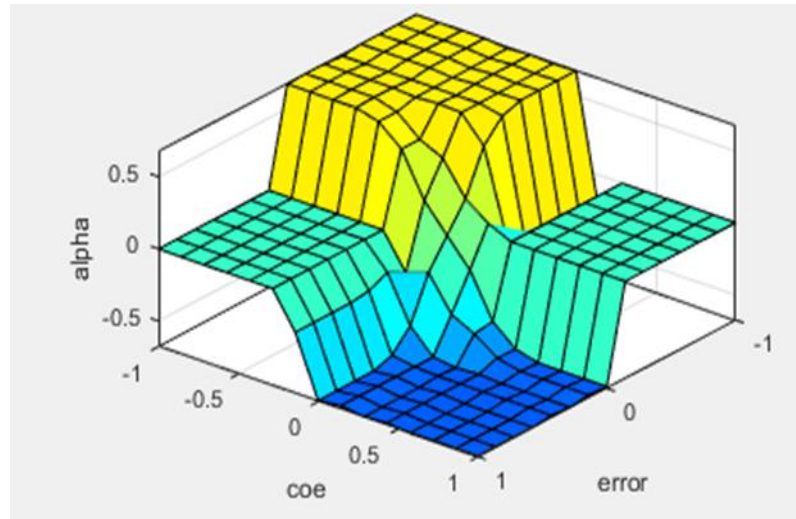


Figure (III.14) : tension d'un générateur PV par logique floue .

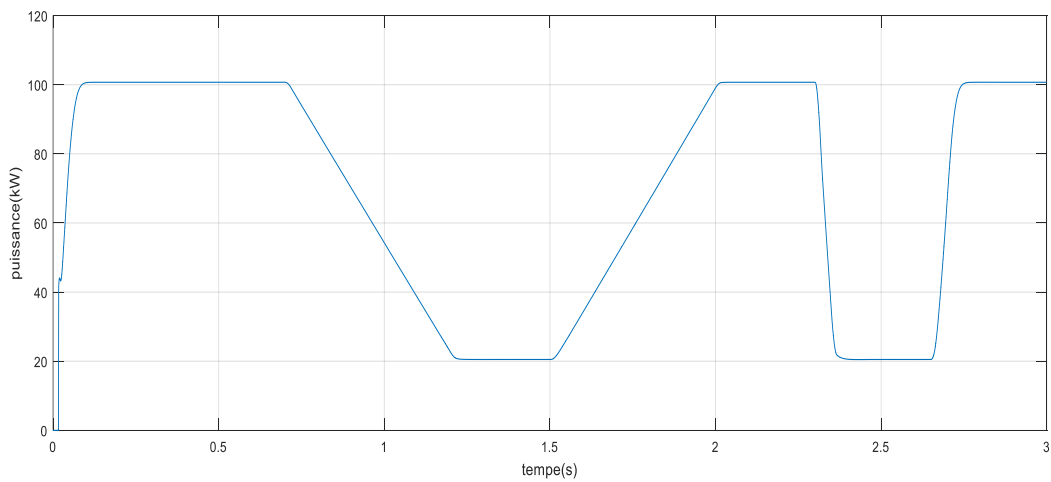


Figure (III.15) : puissance d'un générateur PV par logique floue .

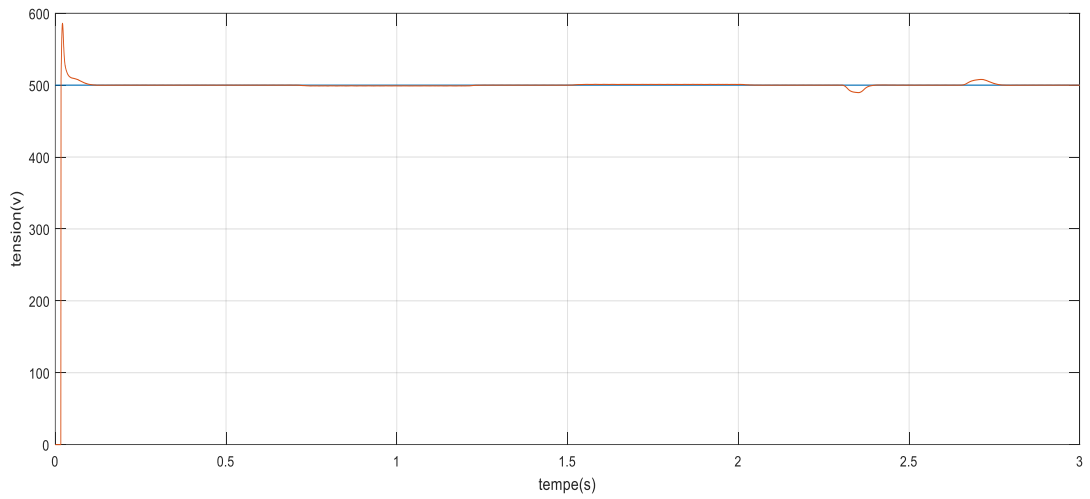


Figure (III.16) : tension extérieure d'une sortie en hacheur par logique floue .

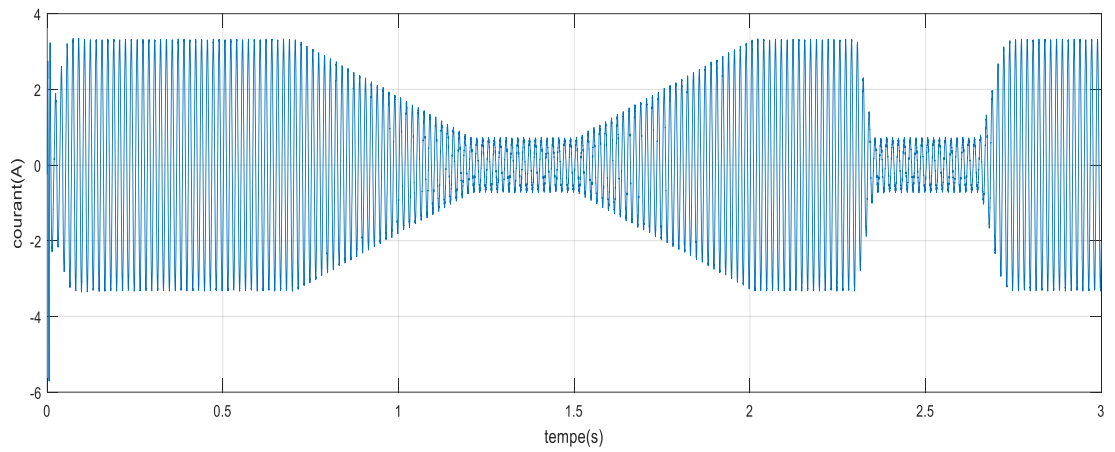


Figure (III.17) : Le courant injecté en réseaux par logique floue .

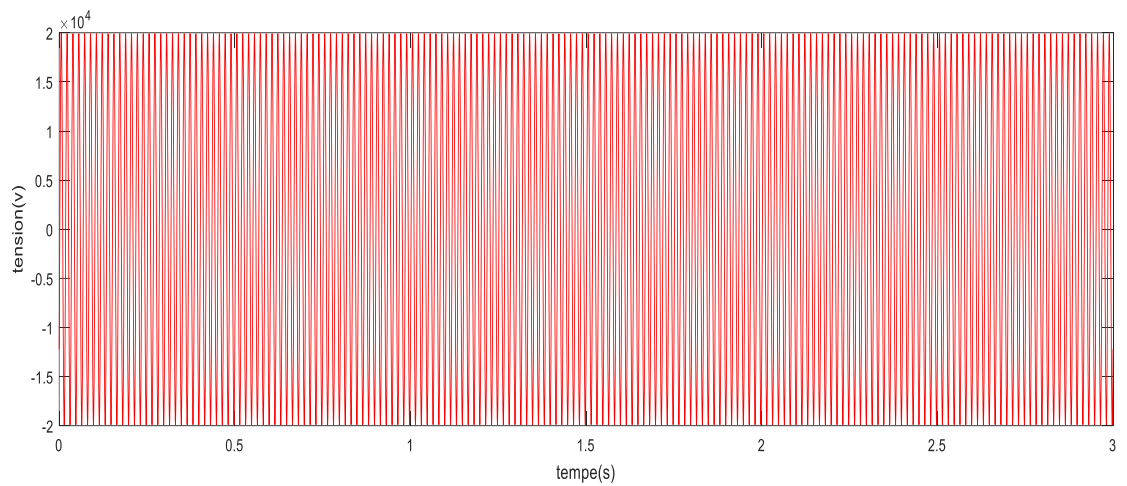


Figure (III.18) : La tension injecté en réseaux par logique floue .

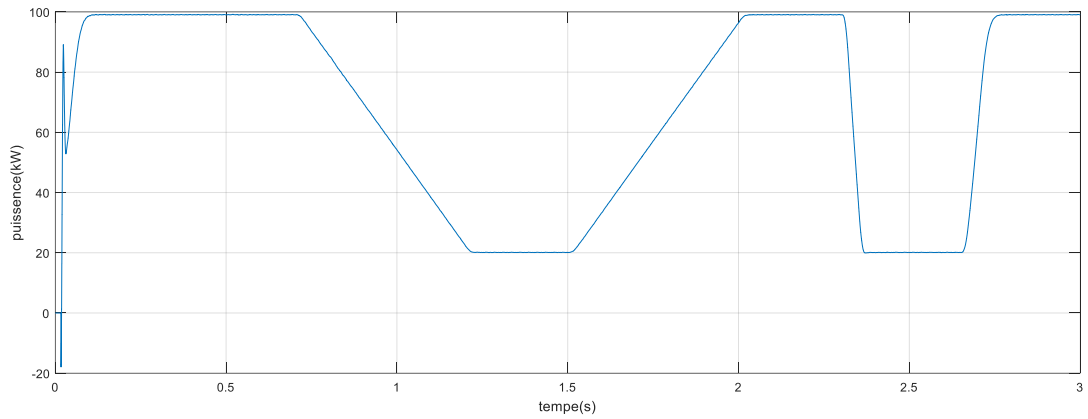


Figure (III.19) : Puissance injecté en réseaux par logique floue .

III.6.5. Discussion des résultats :

Les résultats obtenus avec un Contrôleur flou (technique non conventionnelle) pour différentes valeurs d'éclairement et un constante température sont meilleurs que ceux obtenus avec d'algorithmme de contrôle conventionnel (IncCond). Ainsi le contrôle par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

A partir des figures précédentes on constate bien les avantages de la commande MPPT à base de logique floue, la commande MPPT flou conduit à des meilleures performances, par rapport à la commande MPPT Incrémental de conductance, pour mieux voir la différence entre les deux commandes on fait une étude comparative.

III.7. Comparai entre la puissance par les deux méthodes conductance incrémentale (IncCond) et logique floue :

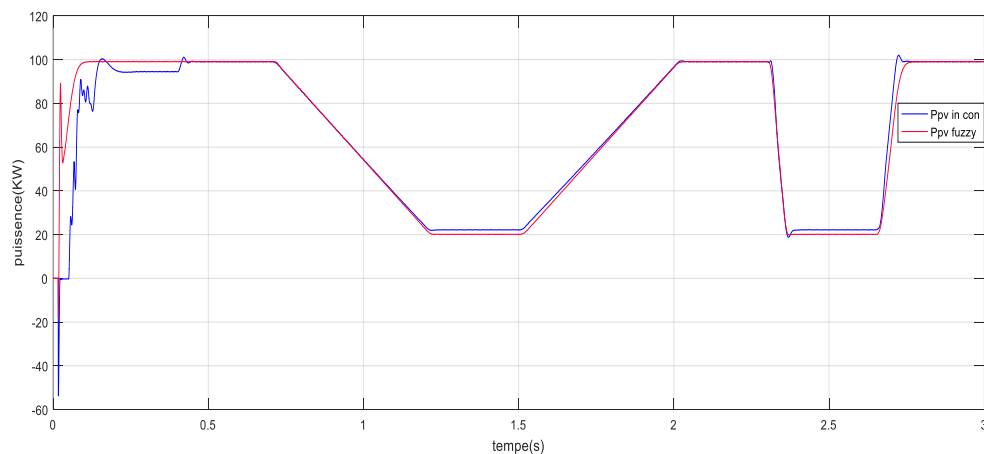


Figure (III.20) : La puissance entre de méthode conductance incrémentale (IncCond) et logique floue

III.7.1. Discussion des résultats :

Il existe une palette très importante de commande MPPT. Dans notre travail on a choisi de mettre en avant deux d'entre elles, nous avons effectué dans cette partie une comparaison des résultats de simulations pour un ensoleillement variable et température fixe, par deux types de commande : la 1ère est la commande à base d'algorithme IncCond (incrémental de conductance) et la 2ème est la commande à base de logique floue. Les figures montrent les courbes de la puissance, la tension du convertisseur DC-DC et de rapport cyclique et de puissance au niveau du réseau.

Après simulation et analyse des différents résultats on arrive à plusieurs conclusions :

- Un générateur photovoltaïque face à une diminution ou bien une augmentation d'ensoleillement a tendance à perdre de la puissance.
- La commande MPPT IncCond permet la poursuite du point de puissance maximum malgré un manque de précision et de rapidité.
- La commande MPPT à base de logique floue permet une poursuite du point de puissance maximum avec beaucoup plus de rapidité et de précision que la commande IncCond ce qui la rend plus avantageuse.
- Le FL fournit un temps de réponse le plus court et suit correctement la variation de l'éclairement.

D'après les résultats énumérés on constate bien que la méthode à base de logique floue est une méthode qui offre un très bon suivi du point de puissance maximum avec un rendement optimal.

| Paramètres | Algorithme LF | Algorithme IC |
|--|---------------|---------------|
| Fiabilité dans les conditions STC | Faible | Faible |
| Suivi avec variation brusque d'ensoleillement | Sans problème | Capable |
| Modèle mathématique | Sans modèle | Sans modèle |
| Fluctuation transitoire | Bien | Mal |
| Erreur statique | Faible | Haute |
| Précision du contrôle | Précise | Précise |
| Efficacité globale | Haute | Moyenne |
| Complexité du système | Moyenne | Facile |

Tableau (III.7) : Comparaison des techniques MPPT (IC) et (LF).

Calcule le rendement par deux méthodes :

Méthode l'incrémentation de la conductance : $\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{95}{100} = \mathbf{0.95}$

Méthode Logique floue : $\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{99}{100} = \mathbf{0.99}$

III.8. Conclusion :

Au cours de notre travail, fait sur le principe de la poursuite du PPM, nous avons analysé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par un convertisseur DC-DC de type hacheur boost, et régulé par une commande MPPT dans une installation photovoltaïque intégré au réseau électrique.

Ce dernier chapitre a été consacré une étude comparative de deux types de méthodes MPPT qui sont : la méthode classique (IC), la méthode basée sur l'intelligence artificielle (FL). Un système PV fonctionne sous une température standard de 25°C et une intensité de l'irradiation solaire variable. Nous avons commencé par une description du modèle choisi. Ce modèle est un système PV de 100 kW raccordé au réseau de distribution. Puis Nous avons données une présentation de la conception et de la simulation d'un contrôleur basé sur des techniques populaires tel que « l'incrémentation de la conductance » et puis la commande « Logique floue ».

À la fin, Les résultats de simulation ont révélé que la commande MPPT Floue présente un rendement supérieur, et offre un meilleur comportement par rapport aux autres méthodes Classique telles que l'IncCond.

Conclusion générale :

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'Uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. Cette demande exige des études dans le but d'améliorer le rendement de cette énergie.

Il y'a plusieurs techniques de recherche du point de puissance maximale MPPT pour améliorer ce rendement tel que Perturber et observer (P&O), l'incrémentation de la conductance (IncCond), et des nouvelles techniques intelligentes basées sur la logique floue, les réseaux de neurones et neuro-floue cette dernière est utilisée avec un grand nombre de règles.

Le travail présenté dans ce mémoire traite la modélisation et simulation, d'un système photovoltaïque qui comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost » et il est commandé de deux façons : méthode MPPT l'incrémentation de la conductance (IncCond) et méthode MPPT des techniques intelligentes basées sur la logique floue et un onduleur triphasé à trois niveaux raccordés au réseau.

A travers les résultats obtenus, on peut dire que :

- La méthode de commande MPPT logique floue a les meilleures performances et le résultat le plus précis par rapport à la commande MPPT l'incrémentation de la conductance (IncCond), car elle diminue les perturbations et le temps de transition.
- Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2 et $T = 25^\circ\text{C}$.
- Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

De cette étude, nous suggérons la poursuite future des simulations de la connexion du photovoltaïque en parallèle avec le réseau dans des situations autres.

De cette étude, nous suggérons un geste significatif de la part des autorités solaires compétentes, car il est plus abondant et plus convivial.

L'évolution des capacités de production photovoltaïque passe par le développement des performances des panneaux solaires surtout en termes de puissances et de sa réduction en face de l'élévation de température.

Références bibliographiques :

- [1] <https://www.boostheat.fr/guides/energie/energie-fossile/>
- [2] <http://fr.scienceaq.com/Energy/100114572.html>
- [3] K. Meriama et S. Ratiba." MODELISATION ET SIMULATION DE LA COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE A BASE DE RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS " Mémoire de Master, Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU. 2018
- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [5] N. Benamrouche et L. Hassaine "ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU " Mémoire de fin d'études, Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU. 2008
- [6] I. Bendjamaa. « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque ». Mémoire de magister, Université Abou-Baker Belkaid- Telemcen, 2011/2012.
- [7] Florent Monestier, "Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques", thèse de Doctorat, Université de Marseille, 10/04/2008
- [8] R. Merahi, « Modélisation d'un diapositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magistère, Université de Annaba 2010.
- [9] Slama Fateh. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abess Sétif Algérie, 2011.
- [10] N. Ahmed. " ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU" Mémoire de Master, Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU. 2015
- [11] W. Bensaci'' Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2011/2012.
- [12] : D.Morales, « Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications », memoire master en électronique, Technology, Université de Aalto Finlande, 2010.

RESUME

- [13] : B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf, consulté janv. 2014
- [14] : F. Kandouli, « Modélisation et commande des machines électriques », Juillet 2007,
- [15] :S. Bellakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010
- [16] I. Bendjamaa ‘‘Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque ‘’
Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [17] <https://www.usthb.dz/ar/page/66>
- [18]<https://ar.wikipedia.org/wiki/>
- [19] BP Statistical Review of World Energy, Juin 2012-2013.
- [20] MULTON B., GERGAUD O., ROBIN G., et al. Consommation d’énergie etressources énergétiques. Technique de l’ingénieur, 2007, p. 1-12.
- [21] GCEP, Stanford University. An Assessment of Solar Energy Conversion Technologies and Research Opportunities, Energy Assessment Analysis. 2006.
- [22] EREC/Greenpeace. Energy[r]evolut ion a sustainable world energy outlook. DLR, Institute of Technical Thermodynamics, Department of Systems Analysis and Technology Assessment, Stuttgart, Germany, 2006.
- [23] GAIRAA K. Valorisation du gisement solaire. Revue du secteur de l’Energie et des Mines N° 12, Novembre 2010, p. 112.
- [24] BROESAMLE H., MANNSTEIN H., SCHILLINGS C., et al. Assessment of solar electricity potentials in north Africa based on satellite data and a geographic information system. Solar Energy, 2001, 70, 1, p. 1–12.
- [25] Atlas solaire préliminaire de l’Algérie, 1998-1999.
- [26]: A. Maafi, « A survey on PV activities in Algérie ». Renewable Energy, 2000
- [27] <https://futureuae.com/ar-AE/Mainpage/Item/5994/>

- [28] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT » Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009
- [29] Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005.
- [30] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008
- [31] N. Mchaliikh et C. Hmada. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.
- [32]. MECHALIKH Med Nadjib, HAMADA Charaf Eddine "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecte au réseau " Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.
- [33] A. Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des ingénieurs-Tome 3 ", 10ème édition, 1980
- [34] Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006
- [35] : Mr. MESSAOUDENE Hichem << Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques>>, Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA, 2013/2014.
- [36] Pr.A. Meroufel, « Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2004.
- [37] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [38] K. Sobaihi “ étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction ” Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [39] : TATI Fethallah et BEN LAMOUDI Oussama <<Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue>>, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.

RESUME

- [40] : EL MOUBARAKI.R, HAITOF.S, KATIBI.S, AREJDAL.A, Hasnaoui.S << Commande MPPT d'un système photovoltaïque par les Réseaux NEURO-FLOUS>>,2014/2015.
- [41] : RAKZA Badreddine et OUANAS Souhila <<MODÉLISATION ET COMMANDE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES>>, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016/2017.
- [42] : Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane <<Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque>>, Mémoire MASTER ACADEMIQUE Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued,2015
- [43] : Zaiem Kamar <<Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit>>, Mémoire MASTER ACADEMIQUE UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2019
- [44]: C. CABAL, « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2008

