

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Electrotechnique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الكروتقني
المرجع: 2011/

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences
Spécialité : Electricité industrielle

**Control Flou Génétique d'un Système
Photovoltaïque Connecté au Réseau
Electrique**

Présentée par: **Tkouti Nacira**
Soutenue publiquement le 01/07/2019
Devant le jury composé de :

BOUALLEGA Rebhi
MOUSSI Ammar

Professeur. Président.
Professeur. Directeur de mémoire

université de Biskra
université de Biskra

RAHMANI Lazhar
AZOUI Boubaker.

Professeur. examinateur
Professeur. examinateur

université de Sétif
université de Batna

Remerciements

J'exprime mes profonds remerciements à mon rapporteur de thèse, Professeur Moussi Ammar pour son aide, son patience et son encouragement tout au long de ce travail.

Je suis très reconnaissante envers Monsieur Bouallega Rebhi professeur à l'université de Biskra d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude à monsieur Rahmani Lazhar, professeur à l'université de Stif, Monsieur Azoui Boubaker Professeur à l'université de Batna, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou loin au parachèvement de ce travail de thèse, soit par leur savoir scientifique ou par leur amitié.

Dédicaces

Je dédie cette thèse

A mon très cher père

A ma très chère mère

A mon mari

A mes enfants

A toute ma famille,

A tous mes collègues.

ملخص

تمتلك الطاقة الشمسية الكهروضوئية نموا مشهودا في العقد الماضي و في الوقت الحاضر اثبتت انظمة الطاقة الكهروضوئية انها طرق فعالة لمصادر الطاقة المتجددة مع الحد الادنى من الاثار البيئية و نظرا لهذه الفوائد البيئية و الاقتصادية تم نشر الانظمة الكهروضوئية بشكل واسع كنوع من موارد الطاقة الموزعة في انظمة توليد التوزيع او الشبكات الصغيرة وتمتلك خوارزميات تتبع نقطة الطاقة العظمى دورا مهما لتلعبه لادائها المثالي في هذه الانظمة كما تمت دراسة و محاكاة المتحكم المقترح باستخدام برنامج ماتلاب وذلك باستعمال كل من الخوارزميات الجينية والمنطق المبهم و قد اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها قدرة فائقة للطريقة المقترحة في تتبع نقطة الطاقة العظمى تحت التغير السريع في الظروف الجوية كالحرارة والاشعاع.

كلمات المفاتيح مولد فوطوضوي, نظام متصل بالشبكة الكهربائية, المنطق المبهم, الخوارزميات الجينية.

Abstract

The implementation of a fuzzy logic controller for the control of a line commutated inverter in a photovoltaic grid connected system, in which the design is performed automatically by means of genetic algorithm. The control system has the objective of extracting the maximum available solar power from the photovoltaic energy system and transferring this power to utility. Simulation results verify the superior performance of genetic fuzzy controller and its robustness in spite of climatic conditions.

Keys words: fuzzy controller, genetic algorithm, grid connection, maximum power point tracking, photovoltaic energy.

Résumé

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de dix années, un taux de croissance très élevé, Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux diminutions de l'effet de serre et leur bénéfice économique. La technique MPPT joue un grand rôle traduit évidemment par d'importantes innovations technologiques et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

L'objectif principal du travail se porte sur une étude comparative de trois méthodes de poursuite du point de puissance maximal : MPPT par la méthode de Perturb & Observ, MPPT par le contrôleur flou FLC et MPPT par le contrôleur flou optimisé par les algorithmes génétiques OFLC. Les résultats ainsi obtenus, sous différentes conditions climatiques, montrent une nette amélioration des performances de contrôle MPPT d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique en utilisant le contrôleur flou optimisé.

Mots clés

Générateur Photovoltaïque, Réseau Electrique, Contrôleur Flou, Optimisation, Algorithmes Génétiques.

Table des matières

| Table des matières | |
|--|------|
| Remerciement | I |
| Dédicace | II |
| ملخص | III |
| Abstract | IV |
| Résumé | V |
| Table des matières | VI |
| Liste des tableaux | IX |
| Liste des figures | X |
| Liste de symboles | XIII |
| Introduction General | 01 |
| Chapitre 1: Le Photovoltaïque et les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électriques | |
| 1.1 Introduction | 04 |
| 1.2 Cellule photovoltaïque | 05 |
| 1.3 Types des cellules | 06 |
| 1.4 Rendement de conversion des cellules photovoltaïques | 08 |
| 1.5 Installations PV connectées au réseau électrique | 08 |
| 1.6 Types de structures d'un système photovoltaïque | 09 |
| 1.6.1 Structure PV connectée directement au réseau | 09 |
| 1.6.2 Structure PV a bus continu en intermédiaire | 10 |
| 1.6.2.1 Structure avec hacheur et onduleur | 10 |
| 1.6.2.2 Structure avec un convertisseur de type fly-back | 11 |
| 1.6.2.3 Structure avec un convertisseur forward | 11 |
| 1.7 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique | 12 |
| 1.7.1 Onduleur central | 12 |
| 1.7.2 Onduleurs strings | 13 |
| 1.7.3 Onduleurs intégrés aux panneaux | 14 |
| 1.7.4 Hacheur modulaire parallèle | 15 |
| 1.7.5 Hacheur modulaire série | 16 |
| 1.8 Electronique de puissance | 17 |
| 1.8.1 Principaux types d'onduleurs rencontrés | 17 |
| 1.8.2 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau | 21 |
| 1.9 Méthodes de recherche du point de puissance maximale | 21 |
| 1.10 Conclusion | 24 |
| Chapitre 2 : Modélisation du Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique | |
| 2.1 Introduction | 25 |
| 2.2 Modélisation de la chaîne de production | 26 |
| 2.2.1 Modèle simplifié | 26 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| 2.2.2 Modèle d'une diode | 27 |
| 2.2.3 Modèle deux diodes | 29 |
| 2.3 Générateur photovoltaïque | 30 |
| 2.3.1 Influence de l'éclairement et la température | 30 |
| 2.4 L'onduleur (line commutated inverter) | 32 |
| 2.5 Modélisation du réseau basse tension | 33 |
| 2.5.1 Modèle mathématique | 35 |
| 2.6 Transformateur | 35 |
| 2.7 Conclusion | 36 |
| Chapitre 3 : Application des Techniques d'Intelligence Artificielle | |
| 3.1 Commande en logique floue | 37 |
| 3.1.1 Introduction | 37 |
| 3.1.2. Ensembles flous | 38 |
| 3.1.3 Variables linguistiques | 39 |
| 3.1.4 Inférences et opérateurs | 40 |
| 3.1.5 Structure interne d'un système flou | 41 |
| 3.2 Algorithmes génétique | 43 |
| 3.2.1 Introduction | 43 |
| 3.2.2 Population Initiale | 44 |
| 3.2.3 Le codage | 44 |
| 3.2.3.1 Codage binaire | 45 |
| 3.2.3.2 Codage réel | 45 |
| 3.2.3.3 Codage en base n | 46 |
| 3.3 Opérateur de sélection | 46 |
| 3.3.1 Sélection Proportionnelle | 46 |
| 3.3.2 La méthode RWS(Roulette Wheel Selection) | 46 |
| 3.3.3 La méthode SUS (Stochastic Universal Simpling) | 47 |
| 3.3.4 Sélection par rang | 47 |
| 3.4 Les Opérateur de Variation(Reproduction | 48 |
| 3.4.1 Opérateur de croisement | 48 |
| 3.4.2 Opérateur de mutation | 50 |
| 3.5 Fonction d'évaluation | 51 |
| 3.6 Test d'arrêt | 51 |
| 3.7 Conclusion | 51 |
| Chapitre 4: Conception d'un contrôleur flou par un algorithme Génétique pour la poursuite du MPP | |
| 4.1 Introduction | 53 |
| 4.2 Description du système | 54 |
| 4.3 Influence Météorologique sur la puissance du générateur photovoltaïque | 56 |
| 4.3.1 Influence de l'éclairement | 58 |
| 4.3.1.1 Commande MPPT type P&O et FLOU | 61 |
| 4.3.1.1.1 Résultats de Simulation | 62 |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 4.3.1.2 Application des Algorithmes Génétiques | 65 |
| 4.3.1.2.1 Résultats de simulation | 69 |
| 4.3.2 Influence de la température | 69 |
| 4.3.2.1 Comparaison entre la commande floue et celle P&O | 70 |
| 4.3.2.2 Procédure Génétique | 74 |
| 4.3.3 Influence simultanée de la température et l'éclairage | 75 |
| 4.3.3.1 Résultats obtenus | 76 |
| 4.4 Interprétation des résultats | 77 |
| 4.5 Conclusion | 79 |
| Conclusion Générale et Perspectives | 82 |
| Bibliographie | 90 |
| Annexe | |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 4.1 Codage de la base des règles..... | 62 |
| Tableau 4.2 Décodage de la base des règles..... | 63 |
| Tableau 4.3 Base des règles finale pour l'éclairement $E=100\text{W}/\text{m}^2$ | 65 |
| Tableau 4.4 Base des règles finale pour une température $T=25^\circ\text{C}$ | 70 |

Liste des figures

Chapitre 1:

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 Spectre solaire..... | 5 |
| Figure 1.2 Jonction PN dans une cellule photovoltaïque..... | 6 |
| Figure 1.3 Types des cellules | 6 |
| Figure 1.4 Schéma synoptique de la structure à convertisseur unique..... | 10 |
| Figure 1.5 Schéma de la structure avec hacheur et onduleur | 11 |
| Figure 1.6 Schéma de la structure avec un convertisseur de type fly-back | 11 |
| Figure 1.7 Schéma de la structure avec convertisseur forward..... | 12 |
| Figure 1.8 Onduleur central..... | 13 |
| Figure 1.9 Onduleurs strings | 14 |
| Figure 1.10 Onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques..... | 14 |
| Figure 1.11 La topologie hacheur modulaire parallèle | 15 |
| Figure 1.12 La topologie hacheur modulaire série | 16 |
| Figure 1.13 Circuits utilisant des thyristors | 18 |
| Figure 1.14 Circuit simple utilisant un pont de transistors | 18 |
| Figure 1.15 Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur | 18 |
| Figure 1.16 Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence | 19 |
| Figure 1.17. Circuit à 4 étages avec montage push pull..... | 20 |
| Figure 1.18 Onduleur sans transformateur dit « à topologie de Karschny | 20 |
| Figure 1.19. Organigramme de l'algorithme de la commande P&O | 23 |

Chapitre 2:

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 Système étudié..... | 26 |
| Figure 2.2 Modèle simplifié d'une cellule PV..... | 27 |
| Figure 2.3 Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode..... | 28 |
| Figure 2.4 Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle de deux diodes | 29 |
| Figure 2.5 Influence de l'éclairement..... | 31 |
| Figure 2.6 Influence de la température..... | 31 |
| Figure 2.7 Influence de la température et l'éclairement simultanément..... | 32 |
| Figure 2.8 Onduleur triphasé à thyristors..... | 32 |
| Figure 2.9 Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique..... | 34 |
| Figure 2.10 Système de tensions triphasé équilibré..... | 35 |

Liste des figures

Chapitre 3 :

| | |
|---|----|
| Figure 3.1 Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous..... | 38 |
| Figure 3.2 – Différents types de fonctions d'appartenance utilisées..... | 39 |
| Figure 3.3 – Variable linguistique..... | 40 |
| Figure 3.4 Structure interne d'un système flou..... | 41 |
| Figure 3.5 Structure d'un chromosome | 45 |
| Figure 3.6 Modèle de la roulette | 47 |
| Figure 3.7 Méthode SUS..... | 47 |
| Figure 3.8 Croisement avec un point de crossover | 49 |
| Figure 3.9 Croisement avec 2 points de crossover..... | 49 |
| Figure 3.10 Croisement uniforme..... | 50 |
| Figure 3.11 Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne..... | 50 |

Chapitre 4 :

| | |
|---|----|
| Figure 4.1. Schéma du système étudié | 54 |
| Figure 4.2. Caractéristique puissance-tension du générateur PV pour différents niveaux de l'éclairement à température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$). | 56 |
| Figure 4.3 Structure de base du contrôleur flou..... | 59 |
| Figure 4. 4. Fonctions d'appartenances correspondantes aux variables d'entrées et de sortie..... | 60 |
| Figure 4.5 Comparaison des réponses entre la méthode P&O et le contrôleur flou..... | 61 |
| Figure4.6 Puissance de sortie pour une variation brusque de l'éclairement de $200\text{W}/\text{m}^2$ à $400\text{W}/\text{m}^2$ | 61 |
| Figure. 4. 7 Schéma de control du système..... | 62 |
| Figure4. 8. Algorithme génétique utilisé dans la simulation..... | 64 |
| Figure 4. 9 Puissance de sortie..... | 65 |
| Figure4. 10 Comparaison entre la puissance de référence et celle de sortie | 65 |
| Figure4.11 Puissance de sortie en fonction des alphas optimaux | 66 |
| Figure4.12 Alphas optimaux | 66 |
| Figure 4.13 Signal d'erreur | 66 |
| Figure4. 14 Rapport des puissances | 66 |
| Figure4.15 Variation de puissance en fonction du nombre d'itérations pour un $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ | 67 |
| Figure4.16 Variation de l'erreur en fonction du nombre d'itérations pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ | 67 |
| Figure4.17. Eclairement vari de $200\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$ | 67 |
| Figure4.18 Comparaison entre FLC et P&O pour variations de l'éclairement de $200\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$ | 68 |
| Figure4.19 Puissance de sortie pour une variation brusque de l'éclairement de $200\text{W}/\text{m}^2$ à $400\text{W}/\text{m}^2$ | 68 |
| Figure4. 20 Caractéristique puissance-tension du générateur PV pour différents niveaux de température à $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ | 69 |
| Figure4. 21 Comparaison entre la commande P&O et le contrôleur flou pour une | |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| température de 105C° à 25C° | 70 |
| Figure4.22 Puissance de sortie | 71 |
| Figure4.23 Comparaison entre la puissance de référence et celle de sortie | 71 |
| Figure4.24 Puissance de sortie en fonction des alphas optimaux | 71 |
| Figure4.25 Alphas optimaux | 71 |
| Figure4. 26 Rapport des puissances | 72 |
| Figure4. 27 Signal d'erreur | 72 |
| Figure4.28 Variation de puissance en fonction du nombre d'itérations pour une T=25C° | 72 |
| Figure4.29 L'erreur pour T=25C°..... | 72 |
| Figure 4. 30 Température | 73 |
| Figure 4. 31 Comparaison entre FLC et FLCO à température variable (65°C à 25°C) | 73 |
| Figure4. 32. Caractéristique puissance-tension du générateur PV pour différents niveaux de température et de l'éclairement | 74 |
| Figure 4. 33. Puissance de sortie en 3D | 75 |
| Figure 4. 34 Variation du courant optimal du générateur PV en fonction de l'éclairement et la température..... | 75 |
| Figure 4. 35Variation de la tension optimale en fonction de l'éclairement et la température | 76 |

Liste des Symboles

| | |
|--|---------------------|
| E : Eclaircement | (W/m ²) |
| I_D : Courant inverse de diode | (A) |
| I₀ : Courant de saturation de diode, dépendant de la température | (A) |
| I_{Light} : Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation | (A) |
| R_{SH} : Résistance en parallèle | (Ω) |
| R_s : Résistance en série | (Ω) |
| V_{PV} : Tension aux bornes de la cellule | (V) |
| I_{PV} : Courant fourni par la cellule | |
| m : Indice du matériau (compris entre 1 et 2 selon de la technologie) | |
| q : Charge d'électron | (coulomb) |
| V_{op} : Tension optimale | (V) |
| I_{op} : Courant optimum | (A) |
| K : Coefficient de Boltzmann | (J/ °K) |
| T : Température ambiante | [°K] |
| α : Coefficient de variation du courant en fonction de la température | (% / °c) |
| β : Coefficient de variation de la tension en fonction de la température | (% / °c) |
| N_p : Nombre de modules en parallèle | |
| N_s : Nombre de modules en série | |
| n_p : Nombre de cellules en parallèle | |
| n_s : Nombre de cellules en série | |
| V_{ref} : Tension de référence du générateur photovoltaïque | (V) |
| P_{out} : Puissance de sortie de l'onduleur | (W) |
| P_{ref} : Puissance de référence du générateur photovoltaïque | (W) |
| E : Signal d'erreur | (W) |
| k : Instant du temps | (s) |
| ΔE : Variation de l'erreur | (W) |
| V_I : Tension à l'entrée de l'onduleur | (V) |
| I_O : Courant à la sortie de l'onduleur | (A) |
| I_s : Courant à l'entrée de l'onduleur | (A) |

Introduction générale

La production d'énergie reste stratégique sur le long terme, ainsi, la consommation énergétique mondiale augmente d'environ 2% par an alors que l'on est confronté à une réduction des ressources primaires fossiles. Par ailleurs, concernant les émissions de gaz à effet de serre, il est admis comme étant un risque majeur concernant l'avenir de notre planète. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains [1], elle a trouvé un vaste champ d'application notamment dans : l'alimentation des systèmes de télécommunication, l'alimentation domestique des habitations isolées, les systèmes de pompage, les centrales électriques hybrides et l'injection dans les réseaux de distribution d'électricité [2].

La production d'électricité peut être aussi obtenue directement par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au moyen de photopiles. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, commence à se développer dans de grandes proportions, notamment à grâce à la baisse des coûts des équipements mis en œuvre [3].

Le contrôle intelligent a fait l'objet d'une intense activité de recherche tant du point de vue expérimental que théorique. Cette attention particulière est due à sa capacité de résoudre les problèmes de contrôle des procédés industriels complexes, qui sont généralement liés à la modélisation, l'adaptation aux changements dans l'environnement, la robustesse vis-à-vis les perturbations externes, l'optimisation des performances du système ainsi que l'extraction, la structuration et la représentation des connaissances.

L'utilisation de la commande floue est particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis, voir inexistant, du système à commander ou

Introduction générale

lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités. Contrairement aux approches classiques qui se basent en grande partie sur un modèle mathématique, la commande par logique floue, repose sur une collection de règles linguistiques de la forme " Si . . . Alors " qui traduisent la stratégie de contrôle d'un opérateur humain [4].

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes de recherche inspirés des mécanismes de l'évolution naturelle des êtres vivants et de la génétique. Par analogie à la génétique, ces algorithmes cherchent à partir d'une population initiale les meilleurs individus. Pour constituer les parents appropriés donnant naissance à des meilleures descendance Enfants, parmi lesquelles seront tirée les solutions acceptables du problème traité [5].

Au cours de ces dernières années, la combinaison de ces techniques a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs. Plusieurs hybridations ont été alors proposées dont les plus rencontrées sont: Algorithme Génétique /Contrôleur flou (AG/CF) et Réseau de neurones/Contrôleur flou (RN/CF). La première combinaison (AG/CF) vise à la conception des CF par algorithmes génétiques. Karr et Gentry (1993) utilisent un algorithme génétique standard (codage binaire, opérateurs de croisement et de mutation simples) pour l'optimisation des paramètres des fonctions d'appartenance. L'objectif principal été alors d'utilisé Les algorithmes évolutionnaires comme une approche complémentaire afin d'optimiser la connaissance extraite par notre classifieur floue avec un minimum de règles et de partitions floues tout en gardant la performance à un niveau satisfaisant [4].

L'objectif du présent travail est de développer un contrôleur à base de la logique floue, dont la base des règles est optimisée par un algorithme génétique, pour commander un onduleur connecté au réseau électrique dans un système photovoltaïque. Cela, sans avoir besoin ni d'un modèle mathématique exacte dans le contrôle ni d'un expert humain pour générer les règles de contrôle.

Le présent travail est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on présente une description des systèmes photovoltaïques et surtout ceux qui sont connecté au réseau électrique. Dans le deuxième chapitre on présente une modélisation du système étudié. Le troisième présentera les concepts de base des ensembles flous et de la logique floue suivit par une description générale du contrôleur à base de la logique floue. Ainsi une description des algorithmes génétiques qui sont devenues un outil très puissant d'optimisation en plus leur rôle complémentaire à celui des contrôleurs flous, qui sont devenus inséparables l'un de l'autre.

Introduction générale

Un quatrième chapitre qui présente la combinaison flou-génétique et les résultats de simulation effectuée et leur interprétation.

Nous achevons notre thèse par une conclusion générale qui montre si les objectifs préfixés ont été atteints. Aucune investigation ne manque de perspectives, alors dans notre cas ils existent plusieurs. Finalement, on trouve une bibliographie non exhaustive qui cite les principales sources d'informations utilisées.

Chapitre 1

Le photovoltaïque et les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique

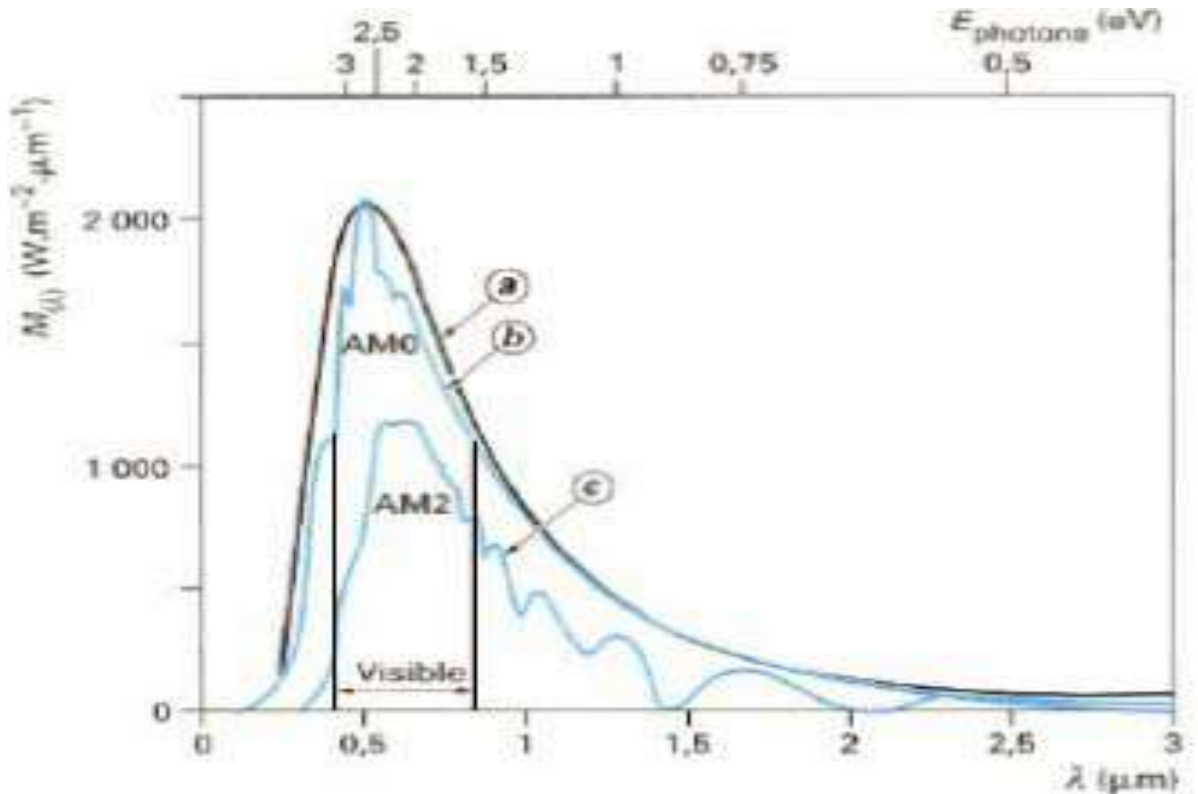
1. 1 INTRODUCTION

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle même, à la relation suivante:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière. D'après la relation (1.1), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que le montre la figure 1.1. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en

atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [6].



a- théorique du corps noir, b- hors atmosphère, c- au sol (soleil à 30° par rapport à l'horizon).

Figure 1.1 : Spectre solaire [6]

1. 2 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise [7].

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de

potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [7].

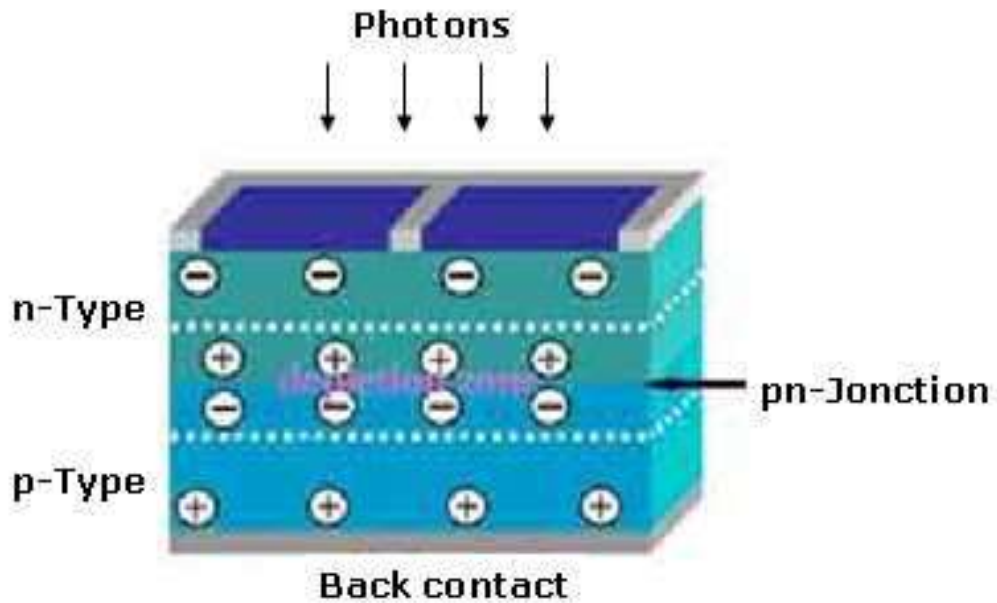


Figure 1. 2 : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque [7]

1. 3 TYPES DES CELLULES

Un panneau solaire est un assemblage des cellules. Il existe plusieurs types de cellules.

La figure 1.3 présente trois types de cellule [8] :

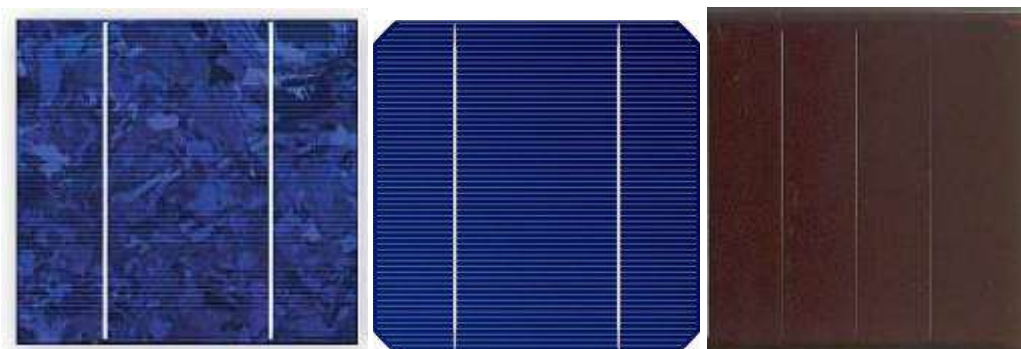


Figure 1.3 : Type de cellule (a) monocrystalline; (b) poly-cristalline; et (c) amorphes [8]

➤ Cellules monocristallines

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

➤ Cellules poly-cristallines

- Coût de production moins élevé ;
- Procédé nécessitant moins d'énergie ;
- Efficacité 11-13%.

➤ Cellules amorphes

- Coût de production bien plus bas ;
- Efficacité plus bas 8-10%
- Durée de vie plus faible.

➤ Cellules nanocristallines

- Une des dernières générations de photopiles ;
- Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;
- Efficacité global de 10,4%
- Procédé et coût de production encore plus bas.

Les performances d'efficacité énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces [8].

1.4 RENDEMENT DE CONVERSION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Le rendement correspond au rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par les cellules PV et la quantité d'énergie solaire reçue. Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'un panneau solaire photovoltaïque, noté η_{pv} , est alors défini selon l'équation suivante [7]:

$$\eta = \frac{P_{pv}}{G.A_{eff}} \quad (1.2)$$

Où

P_{pv} : Puissance électrique délivrée par le panneau PV (W)

A_{eff} : Surface effective du panneau PV (m²)

G : Irradiation, autrement nommée puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m²).

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté η_{pvmax} est défini selon l'équation suivante [7] :

$$\eta_{pvmax} = \frac{P_{max}}{G.I_{eff}} \quad (1.3)$$

Où P_{max} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau.

Pour choisir les cellules, il est important de déterminer les avantages et inconvénients liés à chaque produit. Pour cela, le paragraphe suivant présente les principales technologies photovoltaïques existantes.

1.5 INSTALLATIONS PV CONNECTEES AU RESEAU ELECTRIQUE

Les applications photovoltaïques les plus valorisantes actuellement sont les installations PV destinées à alimenter le réseau électrique public. Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de dix années, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an [9].

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution d'électricité, se traduit évidemment par d'importantes innovations technologiques et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et de développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des

paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ de modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur.

Certains aspects peuvent apporter des améliorations significatives dans la conception et la réalisation pratique des onduleurs connectés au réseau, à savoir le contrôle de la puissance, le contrôle du facteur de puissance, la réduction du taux de la distorsion harmonique, l'élimination de la composante continue du courant injecté au réseau et surtout l'utilisation du contrôle digital [9].

Les onduleurs connectés au réseau doivent répondre aux exigences suivantes:

1. Assurer une connexion optimale à partir des modules photovoltaïques, tout en prenant soin du fonctionnement de l'onduleur.
2. Améliorer le rendement du contrôle de l'onduleur connecté par rapport aux techniques obtenues actuellement dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.
3. Améliorer la qualité de la puissance électrique générée et injectée.

1.6 TYPES DE STRUCTURES D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Il existe deux types de structures photovoltaïques connectées au réseau électrique.

- Les structures à connexion directe au réseau : cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux d'exemples.

- Les structures à bus continu en intermédiaire. Le générateur est connecté a un bus continu en intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulé. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de se dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue de générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable [10].

1.6.1 Structure PV connectée directement au réseau

La figure 1.4 montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connectée aux modules photovoltaïques. La tension en sortie de ce dernier est

transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré [10].

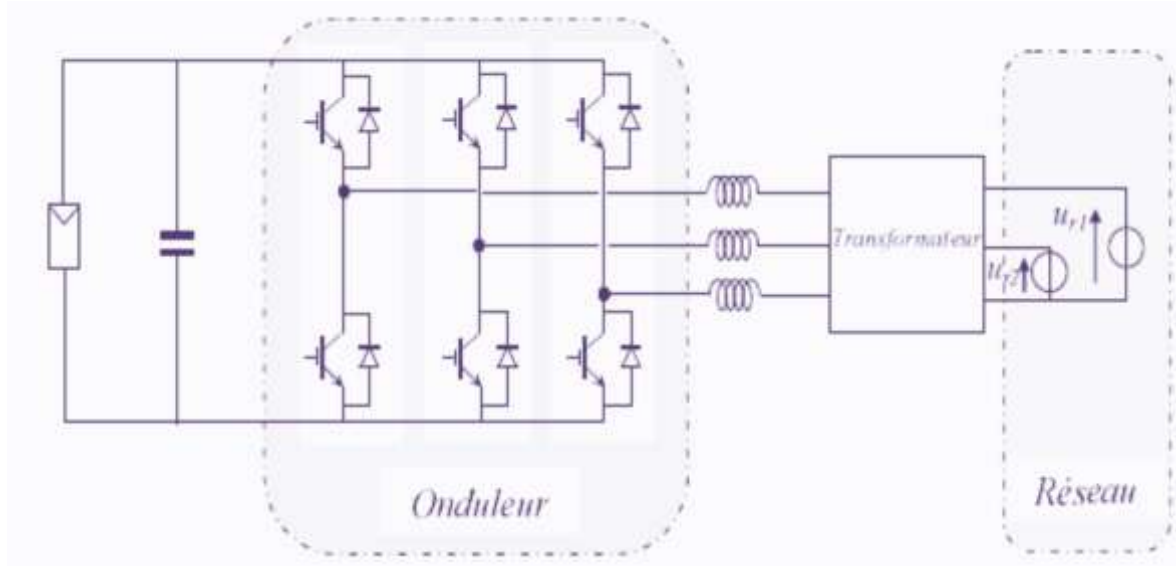


Figure 1.4 : Schéma synoptique de la structure à convertisseur unique [10]

Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité des personnels. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes joules.

1.6.2 Structure PV à bus continu en intermédiaire

Ils existent plusieurs architectures de ce type

1.6.2.1 Structure avec hacheur et onduleur

La figure 1.5 représente un hacheur qui élève la tension en sortie de module PV et un onduleur pour la conversion de la tension direct en tension alternatif et un transformateur pour élever la tension à la tension désirée (tension du réseau) et pour s'assurer l'isolation entre la partie « production » et la partie « utilisation ». L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome [10].

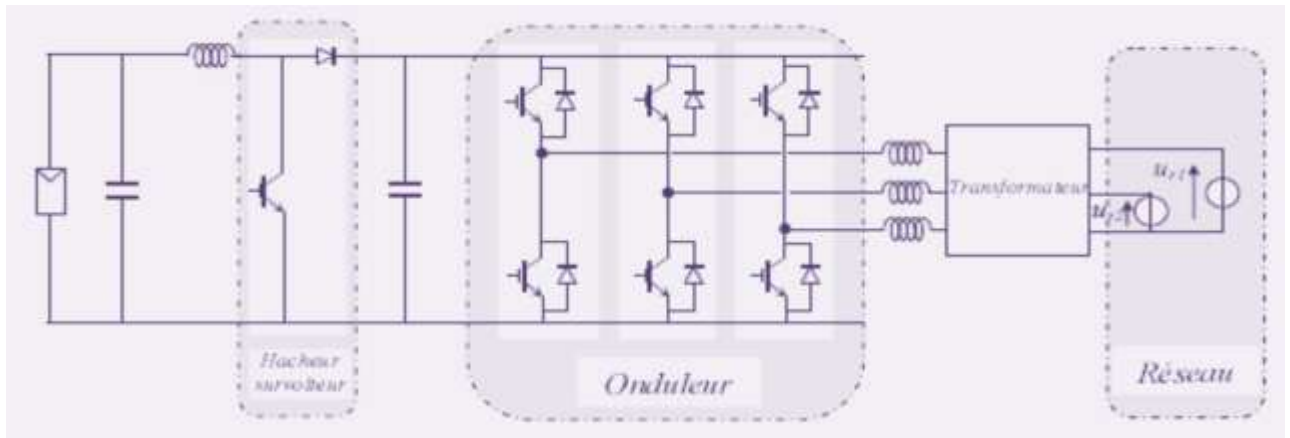


Figure 1.5 : Schéma de la structure avec hacheur et onduleur [10]

1.6.2.2 Structure avec un convertisseur de type fly-back

La figure 1.6 en montre l'utilisation d'un convertisseur fly-back, qui sert à élever la tension DC au niveau désiré. La caractéristique principale du fly-back est le transformateur qui assure deux rôles :

transformateur et inductance de couplage au réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qu'il augmente le coût de l'installation.

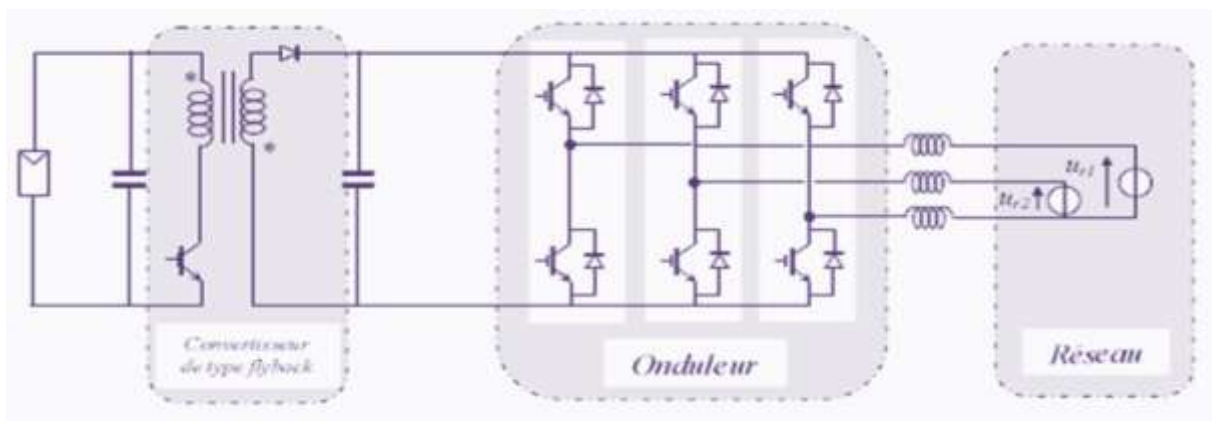


Figure 1.6 : Schéma de la structure avec un convertisseur de type fly-back [10]

1.6.2.3 Structure avec un convertisseur forward

La figure 1.7 présente un convertisseur forward qui est capable d'élever la tension cela simplifier la conversion DC\AC. L'utilisation d'un transformateur pour la connexion n'est plus nécessaire, la conversion continu-alternatif se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralise. La tension élevée qui traverse le bus est réduite la sécurité des personnels d'entretien, la capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module.

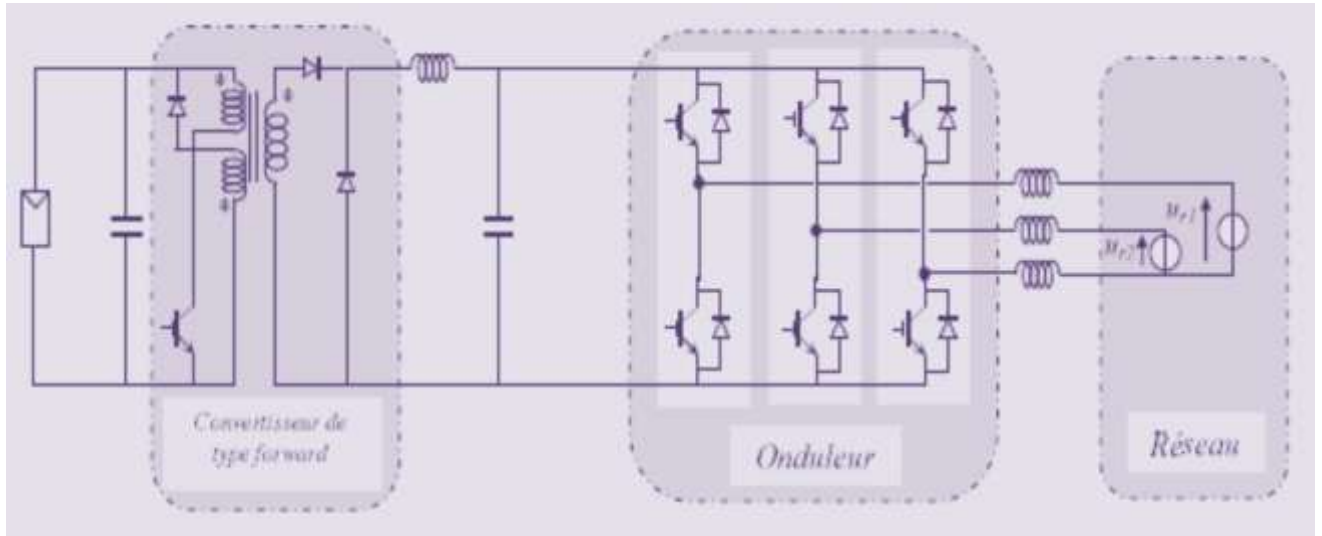


Figure 1.7 : Schéma de la structure avec convertisseur forward [10]

1.7 TOPOLOGIES DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES CONNECTES AU RESEAU ELECTRIQUE

Il existe différentes topologies de gestion de ces systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un générateur photovoltaïque 'GPV' raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès réalisés dans le développement des onduleurs dédiés au photovoltaïque ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les modules solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (230 V/400V – 50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre, l'alimentation en cas de problèmes survenant, soit du réseau, soit de l'installation [11].

1.7.1 Onduleur central

La topologie la plus ancienne et la plus classique est composée d'un seul onduleur réalisant l'interface entre le réseau et le champ photovoltaïque, où des chaînes de modules (ou "string") sont connectées en parallèle (Figure 1.12). Ce montage est généralement utilisé

pour des installations de grandes puissances (20-400 kW) dans lesquelles des protections anti-retour de courant sont implantées par rangée [6, 11, 12, 13].

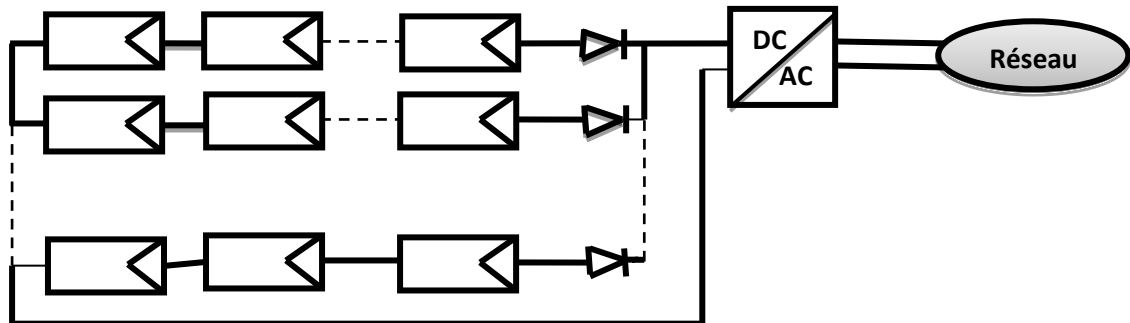


Figure 1.8 ; Onduleur central [6, 11, 12, 13]

L'avantage de la topologie « onduleur central » est sa simplicité de mise en œuvre: un seul onduleur connecté au champ photovoltaïque est nécessaire. De plus, l'onduleur central demande un faible coût d'investissement tout en permettant une maintenance simple. La simplicité du montage permet également un meilleur rendement de la conversion de la tension. En effet, la mise en série de plusieurs modules permet d'obtenir un rapport de transformation faible, ce qui augmente le rendement du convertisseur.

Par contre, ce montage présente plusieurs défauts:

- pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules)
- pertes et risques électriques dans le câblage DC
- aucune évolutivité
- aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur

Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance.

1.7.2 Onduleurs strings

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure 1.13). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM.

Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne

puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente [6, 11, 12, 13].

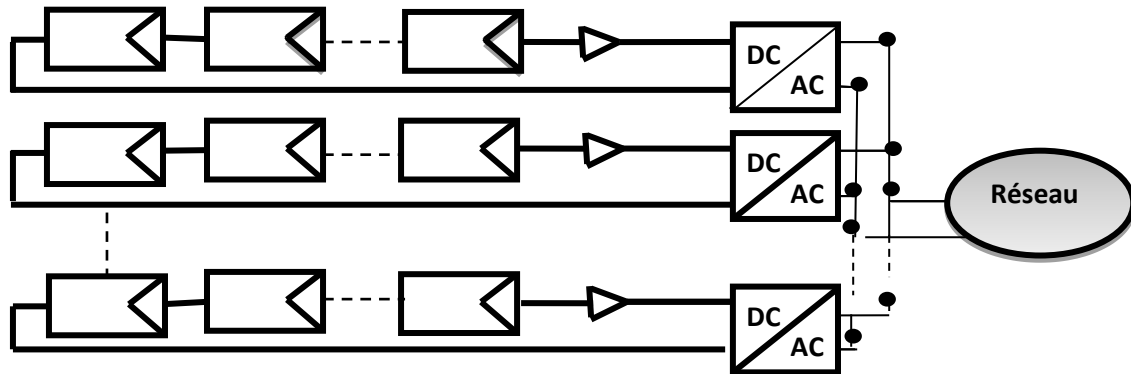


Figure 1.9 : Onduleurs strings [6, 11, 12, 13]

1.7.3 Onduleurs intégrés aux panneaux

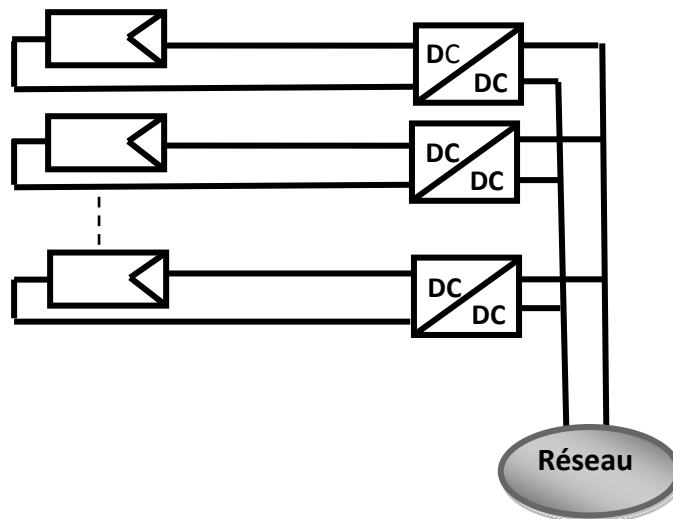


Figure. 1.10 : Onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques [6, 11, 12, 13]

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure 1.14), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent.

Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.

Récemment, on a vu apparaître un nouveau concept hybride se basant sur les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes citées précédemment. Habituellement, les onduleurs strings et intégrés sont reconnus pour leur meilleure réponse aux variations d'ensoleillement et aux inhomogénéités lumineuses mais aussi pour leur facilité d'installation. D'autre part, l'onduleur central est souvent moins cher en terme d'équipement électronique qui est, somme toute, très modeste, il dispose d'un meilleur rendement et est, en plus, plus fiable. Les dernières données correspondant aux onduleurs intégrés aux panneaux s'affranchissent en grande partie des problèmes d'ombrage et optimisent la production d'un GPV de façon remarquable. Il reste encore pas mal de développement technologique pour les rendre aussi fiables que les onduleurs centralisés [6, 11, 12].

1.7.4 Hacheur modulaire parallèle

Une évolution de la topologie hacheur « rangée » est la topologie hacheur modulaire parallèle présentée sur la Figure 1-11. Le hacheur n'est plus connecté à une chaîne de modules PV mais directement à la sortie du module PV. Cette évolution garde tous les avantages du hacheur « rangée », tout en augmentant le niveau de discrétisation du MPPT. Ainsi ce n'est plus une chaîne de modules PV qui fonctionne à son MPPT mais chaque module PV. Un gain de productivité est donc à attendre par rapport au hacheur « rangée ». De plus, cette discrétisation plus importante permet une surveillance (monitoring) plus fine et une détection des défauts plus rapide.

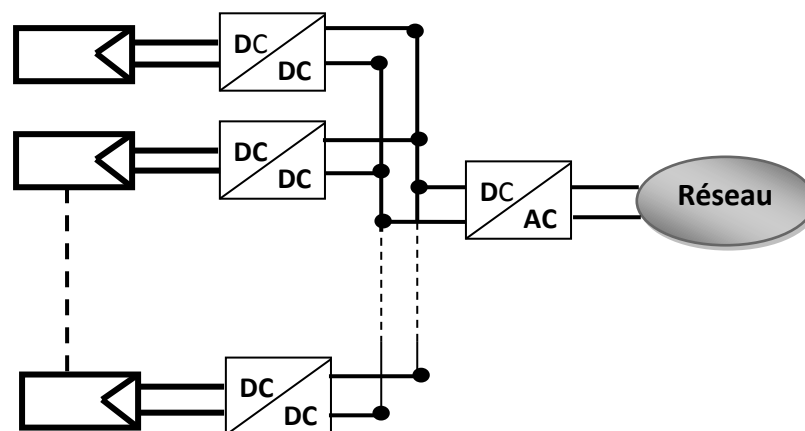


Figure 1.11 : La topologie hacheur modulaire parallèle [6, 12, 13]

Le principal point dur de cette structure est le grand rapport d'élévation entre la tension de sortie du module PV et la tension nécessaire à l'injection sur le réseau de distribution. En effet, pour un hacheur non isolé plus le rapport d'élévation est élevé plus les pertes sont importantes. Lorsque ce rapport est trop important (>8 en général), il est nécessaire d'avoir recours à des structures isolées ou à des cascades de convertisseurs. Dans le cas présent, le rapport d'élévation nécessaire est proche de 10, ce qui limite le rendement du hacheur et pénalise cette topologie. Le chapitre II est consacré à l'étude de cette topologie et à la réalisation d'un prototype sans isolation permettant d'obtenir un rendement compétitif [6, 12].

1.7.5 Hacheur modulaire série

Une des solutions pour diminuer le rapport d'élévation des hacheurs nécessaires à la topologie hacheur modulaire parallèle est de mettre la sortie des hacheurs en série. Ainsi le rapport d'élévation est d'autant diminué que le nombre de hacheurs en série est augmenté. Cette topologie dénommée hacheur modulaire série est présentée sur la Figure 1-12.

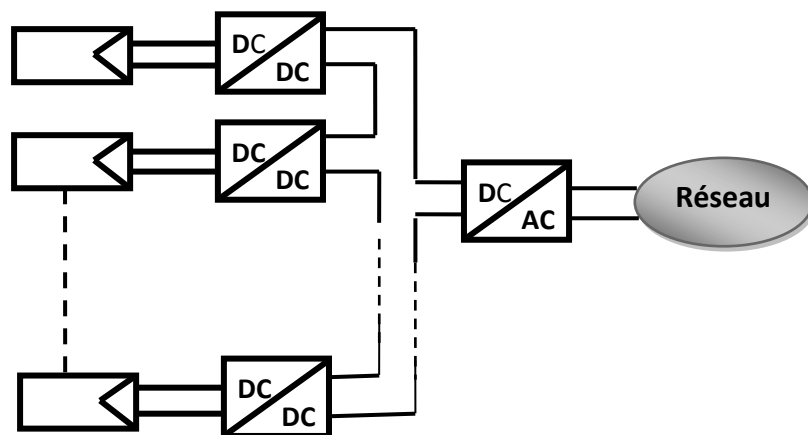


Figure 1-12 : La topologie hacheur modulaire série [6, 12]

Cette topologie garde tous les avantages de la topologie précédente tout en diminuant le rapport d'élévation des hacheurs et permet ainsi d'augmenter le rendement. En revanche, la mise en série des hacheurs implique une dépendance des points de fonctionnement des uns par rapport aux autres et complexifie les lois de commandes et le dimensionnement de la structure [6, 12].

1.8 ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

L'électronique de puissance est au cœur du système PV et peut avoir des impacts très importants sur le productible, la sécurité et sur la qualité de l'énergie produite. C'est l'électronique de puissance qui réalise l'interface entre les différents éléments du système. Comme dit plus haut, plusieurs concepts d'architecture de champs coexistent selon la puissance et selon les technologies disponibles. Ces architectures de champs vont influencer fortement la conception de l'électronique de puissance [12].

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC/DC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système [14].

La première caractéristique d'une chaîne de convertisseurs est la présence ou non d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Cette isolation peut se faire à haute fréquence ou à la fréquence du réseau [14, 15].

La seconde caractéristique différenciant les chaînes de conversion est le nombre d'étages. Deux types de conversion sont possibles, soit la conversion du courant continu en courant alternatif se fait en une seule étape, soit un étage de conversion DC/DC est nécessaire pour augmenter la tension avant de la transformer en tension alternative. La dernière caractéristique d'une chaîne de conversion est son nombre de phases, mono ou triphasé.

Les principaux problèmes auxquels l'électronique de puissance doit faire face sont : la puissance fluctuante côté continu (pour les installations monophasées), la maximisation du productible en cas d'ensoleillement non homogène (problème d'ombrage par exemple), la fiabilité (utilisation de condensateurs électrolytiques ayant de piètres performances au vieillissement lorsqu'ils sont contraints thermiquement) et le rendement [12].

1.8.1 Principaux types d'onduleurs rencontrés

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser conversion d'énergie électrique :

- Le montage le plus simple (figure 1.1 3) est composé de thyristors. Cette technologie était utilisée dans les premiers onduleurs PV (et est encore disponible en monophasé et triphasé) Peu cher, il présente cependant un courant de sortie plus ou moins rectangulaire induisant de la puissance réactive et des harmoniques qui affectent le rendement de l'onduleur et peuvent perturber le réseau.

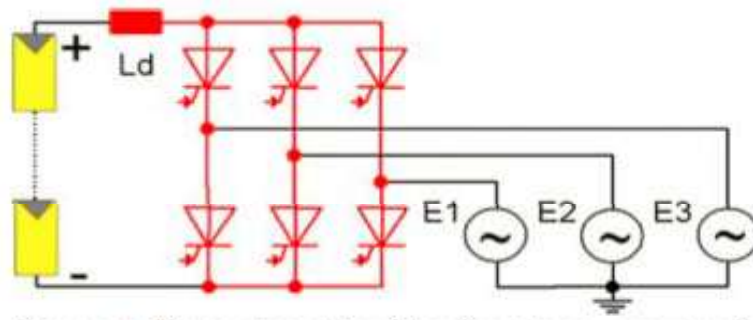


Figure 1.13 : Circuits utilisant des thyristors [14]

- La figure 1.14 présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance L_d située avant le transformateur (ou L_{ac} sur les autres schémas) afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

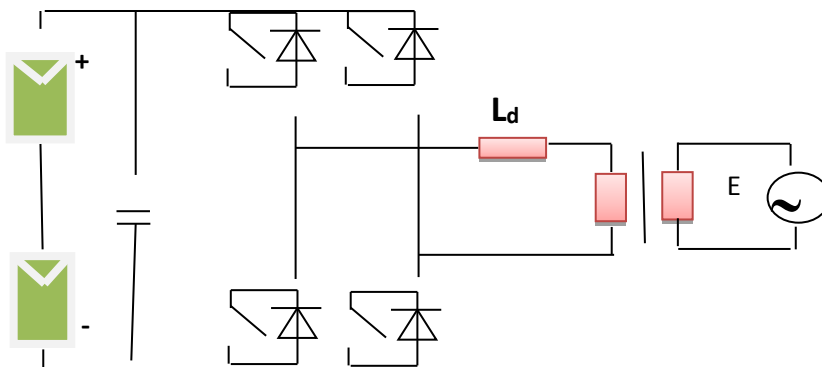


Figure 1.14 : Circuit simple utilisant un pont de transistors [14]

- Pour travailler sur une gamme de tensions d'entrée plus large, un convertisseur élévateur (« boost ») peut être rajouté (en vert) en entrée du pont (figure 1.15).

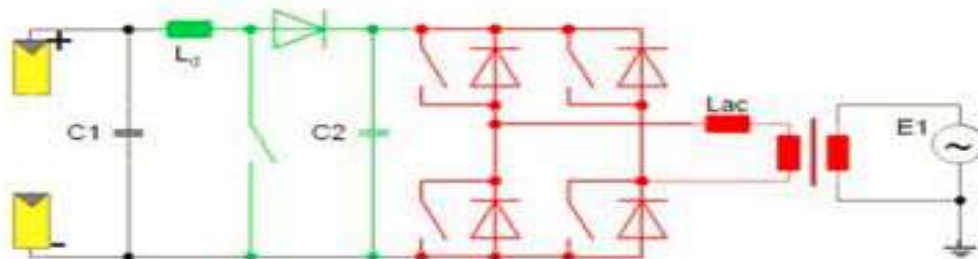


Figure 1.15 : Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur [14]

- Le montage de la figure 1.16 comprend 3 étages différents. Il est composé d'un transformateur haute fréquence (en bleu) qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur. À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur (en vert) permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

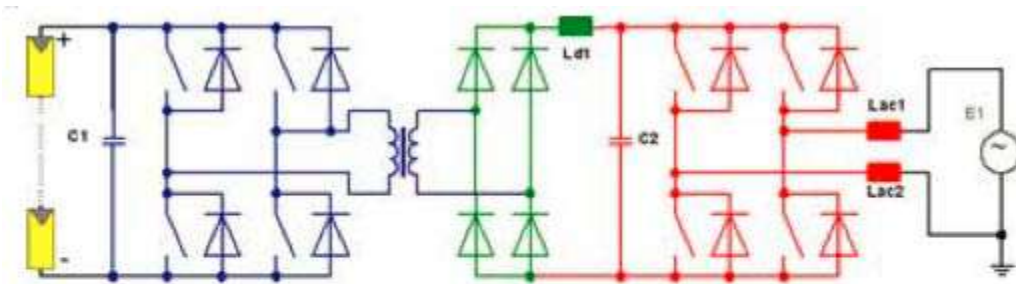


Figure 1.16 : Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence [14]

- Le montage de la figure 1.17 est constitué de 4 étages. Ce circuit nécessite le contrôle de 7 interrupteurs contre 8 pour celui de la figure 1.16.

Il est composé d'un convertisseur abaisseur de tension, d'un montage dit « pushpull » suivi d'un redresseur, et d'un pont de sortie.

La partie « convertisseur abaisseur + transformateur push pull » permet d'adapter la tension d'entrée. Elle permet à l'onduleur d'avoir une plus large gamme de tensions d'entrée possible donc une plus grande flexibilité d'association avec les modules PV. Le redresseur « redresse » la tension en sortie du push pull, et le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

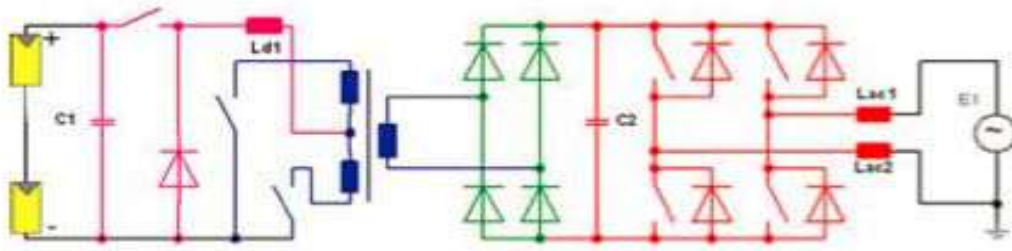


Figure 1.17 : Circuit à 4 étages avec montage push pull [14]

- Enfin, le montage de la figure 1.18 représente un exemple simple de la technologie des onduleurs sans transformateur. En éliminant le transformateur, générateur de pertes importantes dans le circuit lors de la conversion de puissance, on peut augmenter le rendement.

Il faut cependant prendre en compte les problèmes de compatibilité électromagnétique que le transformateur permettait d'éliminer par isolation galvanique.

Dans ce circuit, S1 (pour les courants positifs et négatifs) et S2 (pour les courants positifs) sont commandés en haute fréquence et les autres interrupteurs en 50Hz (fréquence du réseau). Pour des tensions d'entrée plus grandes, S1 peut être contrôlé seul en haute fréquence et les 4 autres en 50Hz pour former un convertisseur abaisseur et un convertisseur push pull.

Dans les 2 cas, le désavantage de ce montage est la très forte tension appliquée aux bornes des interrupteurs

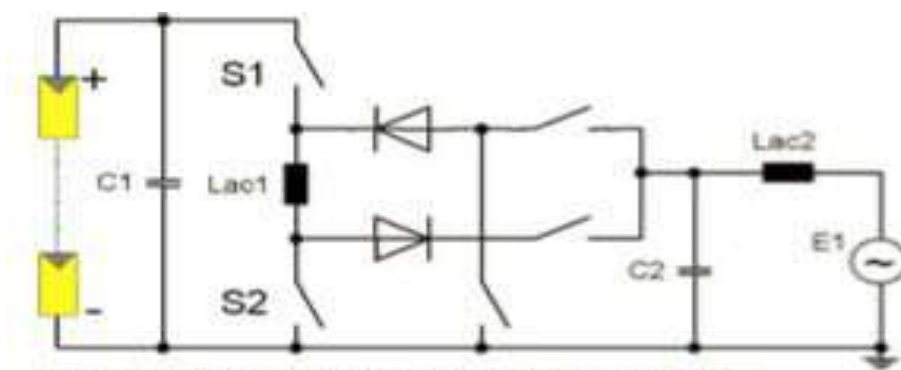


Figure 1.18 : Onduleur sans transformateur dit « à topologie de Karschny [14]

1.8.2 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont [16] :

- Temps de réponse
- Facteur de puissance
- Commande de fréquence
- Rendement harmonique
- Synchronisation
- Contribution de courant de défaut
- Injection du courant continu
- Protection

1.9 METHODES DE RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

Pour que le module solaire photovoltaïque fournisse sa puissance maximale, de nombreux chercheurs se concentrent sur les algorithmes MPPT pour extraire la puissance maximale dans des conditions climatiques différentes, en particulier lorsque la température et l'éclairement solaire changent de façon soudaine, en tenant compte de son impact sur le système global [17].

L'unité de régulation de l'onduleur assure un fonctionnement du générateur PV au point de fonctionnement optimal (point de puissance maximale ou MPP) pour garantir une production de puissance électrique maximale.

Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale d'un champ de modules (Maximum Power Point Tracking), dont l'efficacité et la rapidité varient. Les deux méthodes les plus couramment rencontrées sont celles dites du Hill-Climbing et du P&O (Perturb and Observe). Ces deux méthodes fonctionnent sur le même principe qui consiste à perturber le fonctionnement du système et à analyser ensuite comment le système réagit à cette perturbation : modification du rapport cyclique de hachage pour la méthode de Hill-Climbing, modification de la tension aux bornes du champ de modules photovoltaïques pour la méthode P&O. Le fait de modifier le rendement de conversion de l'onduleur perturbe le courant continu issu des modules et par conséquent la tension à leurs bornes et la puissance instantanée délivrée.

Ces deux méthodes sont donc basées sur le contrôle de la puissance instantanée délivrée par le champ de modules PV en fonction de variations de la tension continue aux bornes du champ PV [14].

Comme nous allons utiliser la méthode P&O Dans notre étude on va décrire cette méthode par détaille :

- **Commande MPPT perturber et observer P&O**

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} ou le courant I_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, l'incrément positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. Donc c'est suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. Ces méthodes, aujourd'hui largement utilisées à cause de leur facilité d'implémentation, Ne nécessite aucune connaissance à priori des caractéristiques du générateur PV, relativement facile à manipuler [17].

Toutefois, on constate que cette technique présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de la perturbation.

La figure 1.21 représente l'algorithme classique associé à cette commande

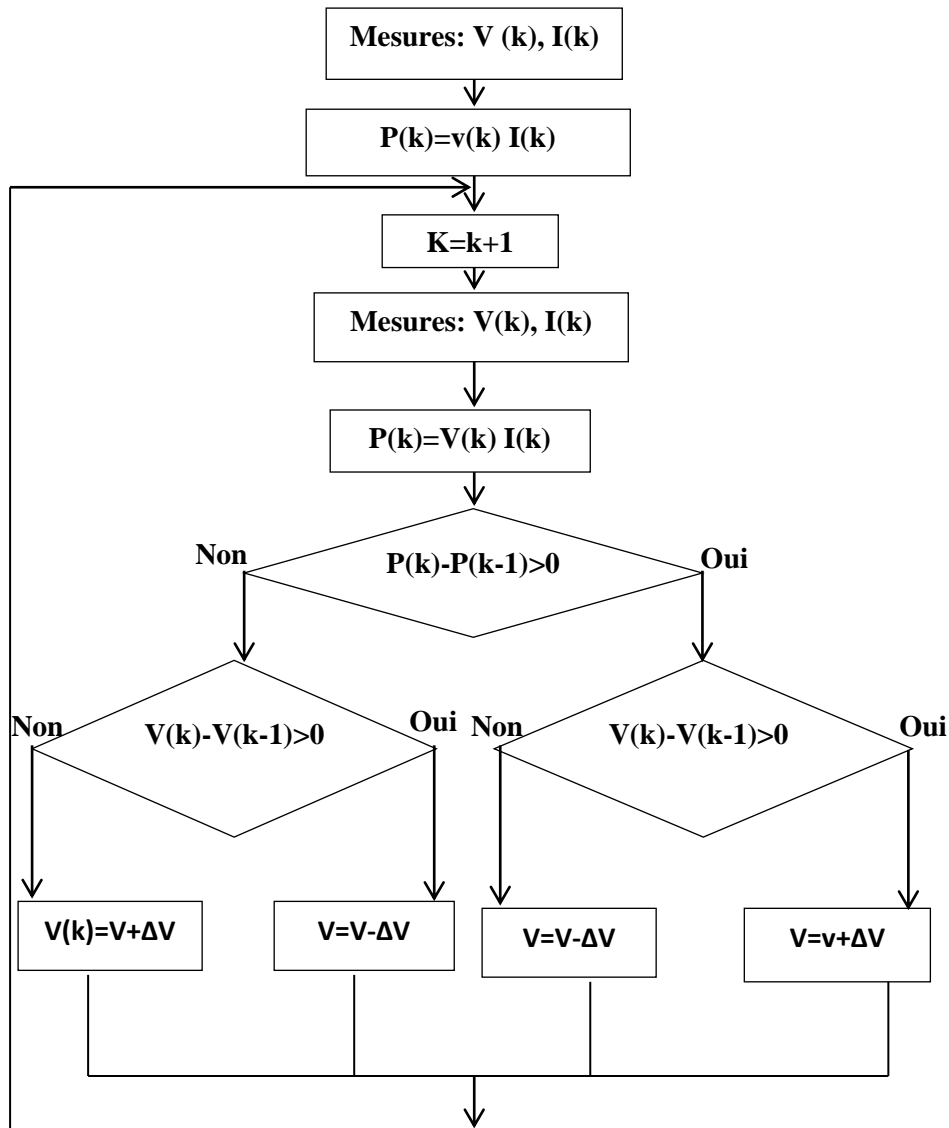


Figure : 1.19 Organigramme de l'algorithme de la commande P&O

Parmi les autres méthodes de recherche du point de puissance maximale, on retiendra [18] :

La méthode IncCond (Incremental Conductance) qui consiste à comparer la

conductance incrémentale $\Delta I/\Delta U$ et de la comparer au rapport $-I/U$: $\Delta I/\Delta U = -I/U$ au MPP, $> -I/U$ à gauche du MPP et $< -I/U$ à droite du MPP.

- La méthode dite de la tension de circuit ouvert fractionnaire (Fractional Open-Circuit Voltage), basée sur la proportionnalité entre la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la tension au point de puissance maximale (V_{mpp}).

- La méthode dite du courant de court-circuit fractionnaire (Fractional Short-Circuit Current) basée sur la proportionnalité entre le courant de court-circuit (I_{cc}) et le courant au point de puissance maximale (I_{mpp}).
- Le contrôle du MPP à base de logique floue (Fuzzy Logic Control).
- Le contrôle du MPP à base de réseaux neuronaux (Neural Network).
- La méthode RCC (Ripple Correlation Control) qui consiste en l'analyse des interférences causées par l'onduleur sur la tension et le courant du champ de modules PV[].
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep) qui permet de calculer périodiquement la caractéristique tension-courant du champ de modules PV et d'en déterminer le MPP.
- La méthode de contrôle de la tension aux bornes du condensateur d'entrée de l'onduleur (DC Link Capacitor Droop Control).
- La méthode d'optimisation de la puissance de sortie de l'onduleur (Load Current or Load Voltage Maximization) basée sur le fait que si la puissance de sortie de l'onduleur est maximale, alors le champ de modules PV fonctionne à son MPP.
- La méthode du contrôle dP/dV ou dP/dI (dP/dV or dP/dI Feedback Control) qui consiste à analyser la pente de la courbe Puissance-Tension du champ de modules PV (nulle au point de puissance maximale, positive avant le MPP et négative après).

1.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons d'abord procédé à une description générale du domaine photovoltaïque, les caractéristiques des cellules PV et leur modélisation. Nous avons ensuite présenté les différentes topologies de champs PV utilisées ou étudiées pour la connexion d'une centrale PV sur le réseau de distribution, et nous avons comparé ces différentes topologies en termes de rendement de fonctionnalités et de robustesse. Ces comparaisons montrent qu'actuellement la tendance forte est de discrétiser de plus en plus l'électronique de puissance pour assurer le fonctionnement d'un plus grand nombre de cellules PV à leur point de puissance maximale. Enfin, nous avons procédé à une étude bibliographique des convertisseurs dédiés au photovoltaïque. La modélisation du système étudié sera le sujet du chapitre prochain.

Chapitre 2

Modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique

2.1 INTRODUCTION

La modélisation mathématique des phénomènes physique d'origine photovoltaïque est primordiale, permet de caractériser le comportement d'un système photovoltaïque, depuis les organes de captation jusqu'aux organes de restitution de l'énergie, afin d'établir une relation directe entre les différents composants du système et d'introniser un rapport entre l'énergie produite par l'installation et la demande énergétique et de prévoir les caractéristiques de chaque partie du système en fonction des données météorologiques.

On a vu dans le chapitre précédent que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'irradiation ainsi que de la température. Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit génère une certaine tension et courant de fonctionnement. Pour que le module fourni sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-AC contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT). Le système photovoltaïque connecté au réseau

électrique est l'association d'un ensemble de sous-systèmes interconnectés qui sont représentés par la figure 2.1:

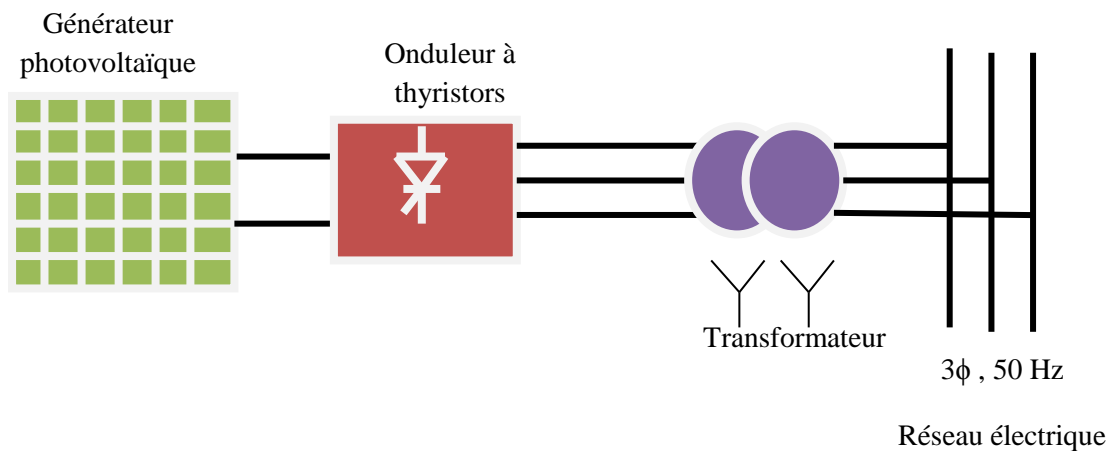


Figure 2.1 : Système étudié

Il est constitué de :

- Générateur Photovoltaïque
- Onduleur à thyristors (line commutated inverter)
- Transformateur
- Réseau électrique

2.2 MODELISATION DE LA CHAINE DE PRODUCTION

MODÉLISATION COURANT TENSION D'UNE CELLULE SOLAIRE

La modélisation de l'unité de base du système de conversion photovoltaïque, c'est-à-dire la cellule solaire est présentée par sa caractéristique I-V.

2.2.1 Modèle simplifié

La cellule sera modélisée par une source du courant I_{ph} en parallèle avec une diode et pour optimiser la modélisation de quelques phénomènes au niveau de la cellule, le modèle comme le montre la figure 2.2 contient une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques [19].

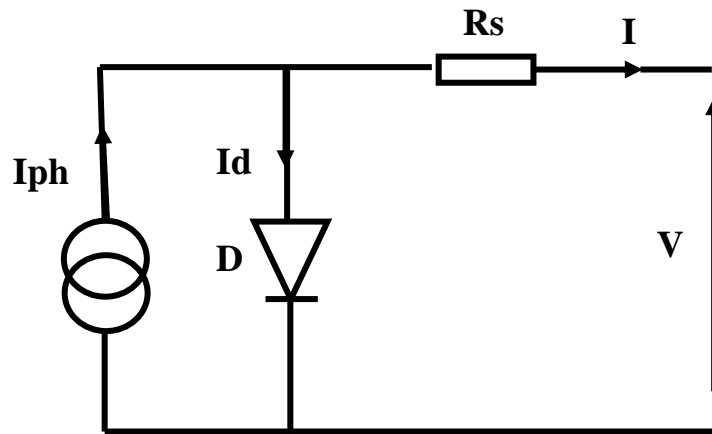


Figure 2.2: Modèle simplifié d'une cellule PV [19]

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des noeuds, le courant résultant I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

Avec :

I_{ph} : constant pour un ensoleillement donné.

2.2.2 Modèle d'une diode

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est idéalisé par une diode de jonction P-N par une source de courant I_{ph} , une résistance série R_s modélise les pertes par effet joule, qui sont dues à une série de résistances causée par la résistivité du matériau semi-conducteur, par les résistances de contact des électrodes et par la résistance de la grille collectrice et le courant collecté par le bus, la valeur habituelle de cette résistance est très petite de quelque dixième d'ohms, reflète directement la qualité de fabrication des cellules PV et une résistance parallèle R_p représente les pertes internes, ou le courant de fuite à travers la diode de Shockley. En d'autres termes Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photo-courant, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. En employant la loi du Kirchhoff au circuit équivalent ci-dessous Figure 2.3 pour trouver le rapport entre le courant de sortie I et la tension de sortie V aux bornes de la résistance de charge R_c [20]:

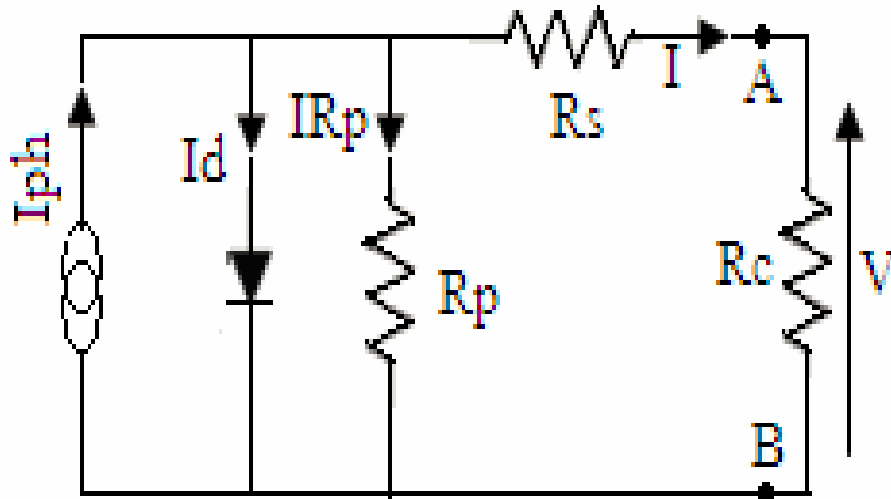


Figure 2.3 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode [20]

L'équation suivante fournit la relation entre le courant I et la tension V , [21, 22, 23, 24, 25] :

$$I = I_{phc} - I_{sc} \left[\exp \left(\frac{V + R_{sc}I}{ac} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_{sc}I}{R_{pc}} \quad (2.2)$$

I_{sc} (A) : le courant d'obscurité des porteurs minoritaires (saturation).

I_{phc} : le photo-courant généré par la cellule PV.

$ac = \frac{AKTV}{q}$ (volts), présente le potentiel thermique.

q : la charge électrique élémentaire $1.607 \cdot 10^{-19}$ C

A : coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.

K : constante de Boltzmann = $1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : est la température en degré Kelvin

R_{sc} : Résistance série (Ω).

R_{pc} : Résistance parallèle (shunts) (Ω).

2.2.3 Modèle deux diodes

Dans ce modèle une diode supplémentaire est mise en parallèle au circuit du modèle simple d'une diode Figure 2.4. Cette diode est incluse pour fournir une courbe caractéristique I-V bien plus précise, qui prend en compte la différence dans l'écoulement du courant aux basses valeurs courantes dues à la recombinaison de charges dans la région de la zone de charge d'espace du semi-conducteur. Alors la diode D1 modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion. Par contre la diode D2 modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace [20, 26].

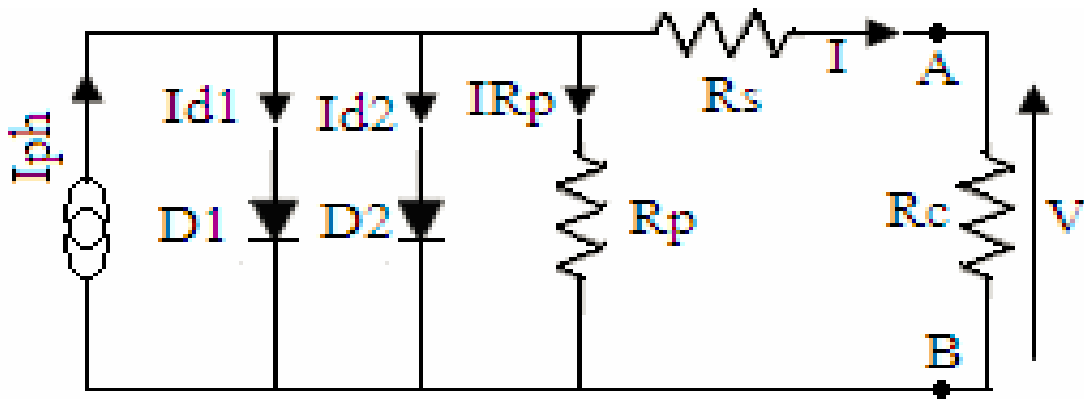


Figure 2.4: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle de deux diodes [20, 26]

Le courant délivré à la charge sous une tension V est donné par la relation [20, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left[\frac{V + R_{sc} I}{ac1} \right] - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left[\frac{V + R_{sc} I}{ac2} \right] - 1 \right] - \frac{V + R_{sc} I}{R_{pc}} \quad (2.3)$$

Ce modèle à deux diodes est plus exact que le modèle simple d'une diode mais en raison de la difficulté de la résolution de l'équation du courant, le modèle simple d'une diode est préféré.

I_{s1} (A) : courant d'obscurité de la première diode.

I_{s2} (A) : courant d'obscurité de la deuxième diode.

$ac1 = \frac{A_1 K T V}{q}$ (volts) la tension thermique au niveau de la diode D1.

$ac2 = \frac{A_2 K T V}{q}$ (volts) la tension thermique au niveau de la diode D2.

$A1$: Coefficient d'idéalité de la diode D1.

A2 : Coefficient d'idéalité de la diode D2.

2.3 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV)

Le générateur photovoltaïque peut être modélisée par une matrice formée de N_s modules séries et de N_p rangées en parallèles, dont la caractéristique courant-tension peut être régit par [33] :

$$I_g = I_{scg} - I_{og} \left[\exp\left(\frac{V + R_{sg} \cdot I}{V_{thg}}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$I_{scg} = N_p \cdot I_{sc} \quad (2.5)$$

$$I_{og} = N_p \cdot I_0 \quad (2.6)$$

$$V_{thg} = N_s \cdot V_{th} \quad (2.7)$$

$$R_{sg} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \quad (2.8)$$

La tension thermique V_{th} et le courant I_0 sont respectivement identifiés par [16, 17, 20] :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc}}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}}\right)} \quad (2.9)$$

$$I_0 = (I_{sc} - I_{op}) \exp\left(-\frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{V_{th}}\right) \quad (2.10)$$

2.3.1 Influence de l'éclairement et la température

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Les figures 2.5, 2.6, 2.7 donnent l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque.

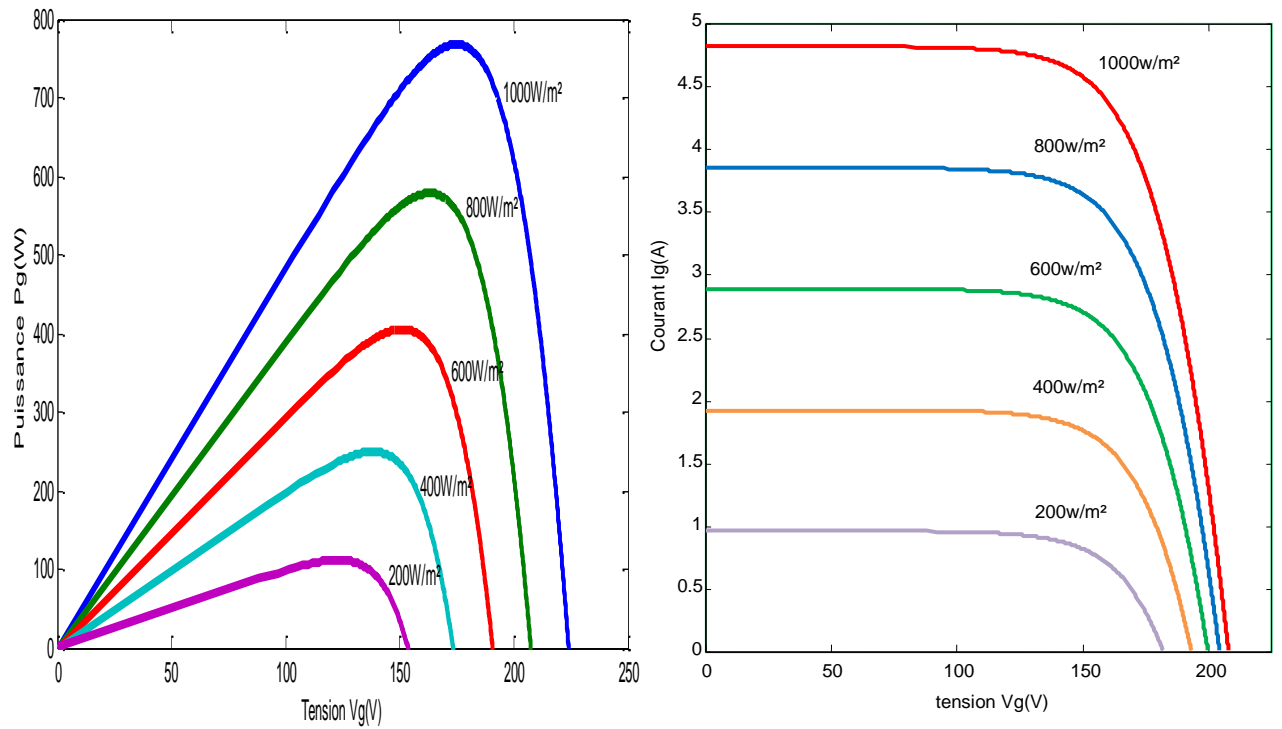


Figure 2.5 : Influence de l'éclairement

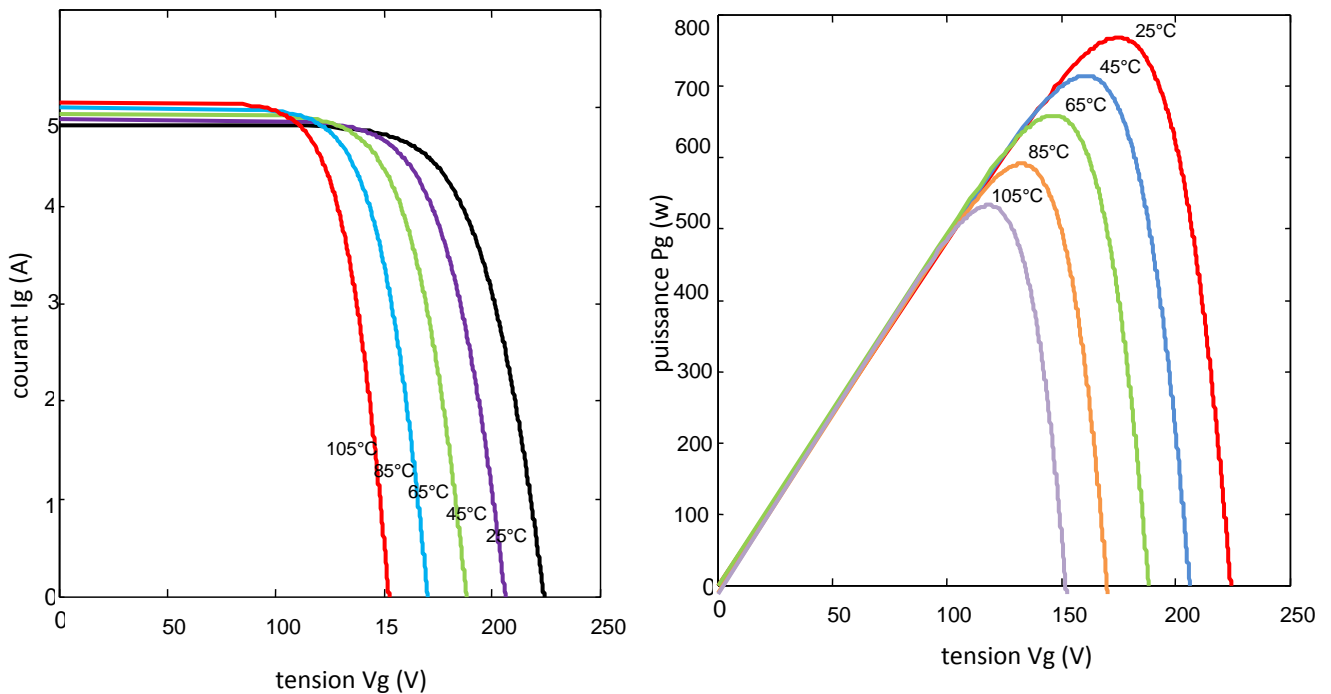


Figure 2.6 : Influence de la température

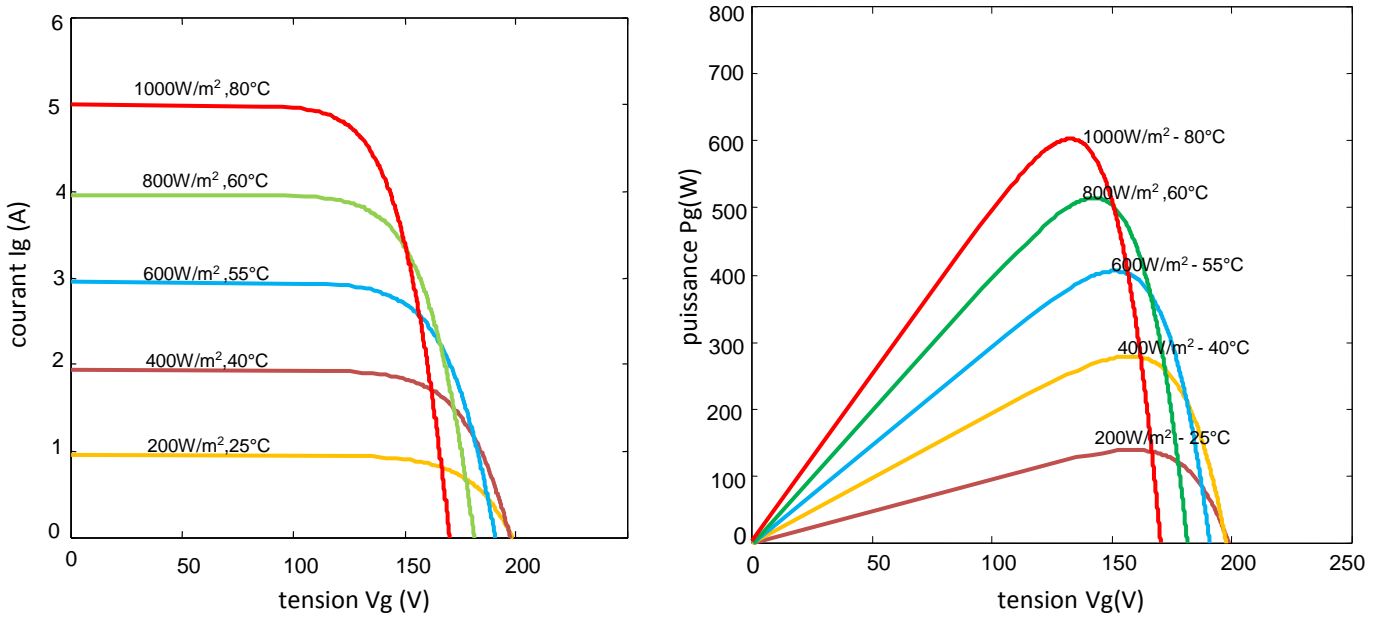


Figure 2.7 : Influence de la température et l'éclairement simultanément

2.4 L'ODULEUR (line commutated inverter LCI)

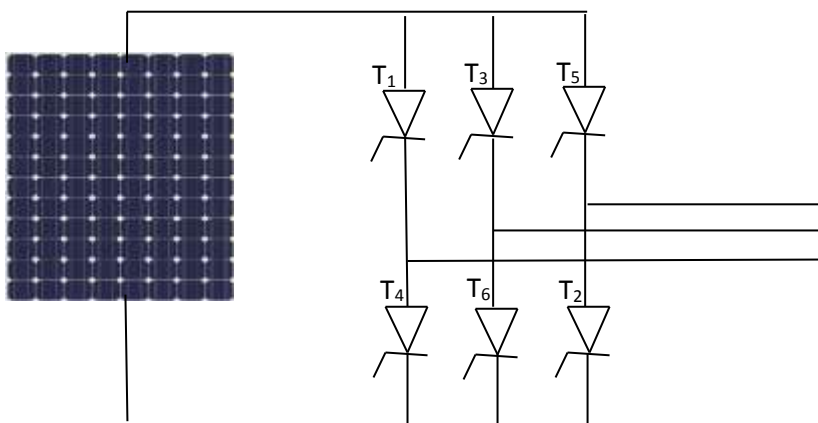


Figure 2.8: Onduleur triphasé à thyristors

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé 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, dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau ce qui permet un fonctionnement en onduleur.

Il est utilisé généralement lorsque une grande capacité et efficacité sont demandés. , l'inconvénient principal il produit à la sortie un courant rectangulaire riche en harmoniques, il nécessite donc des filtres. L'onduleur (LCI) triphasé est montré sur la figure II.2 peut fonctionner comme un redresseur ou bien comme un onduleur. Dans notre cas les thyristors amorcés dans la gamme $[95^\circ \ 165^\circ]$, l'inductance de source L élimine le désamorçage des thyristors.

La tension moyenne du convertisseur en fonction de la tension de ligne V_L et l'angle d'amorçage α :

$$V_I = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi}\right)V_L \cdot \cos(\alpha) \quad (2.11)$$

2.5 MODELISATION DU RESEAU BT

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs figure 2.9 [15].

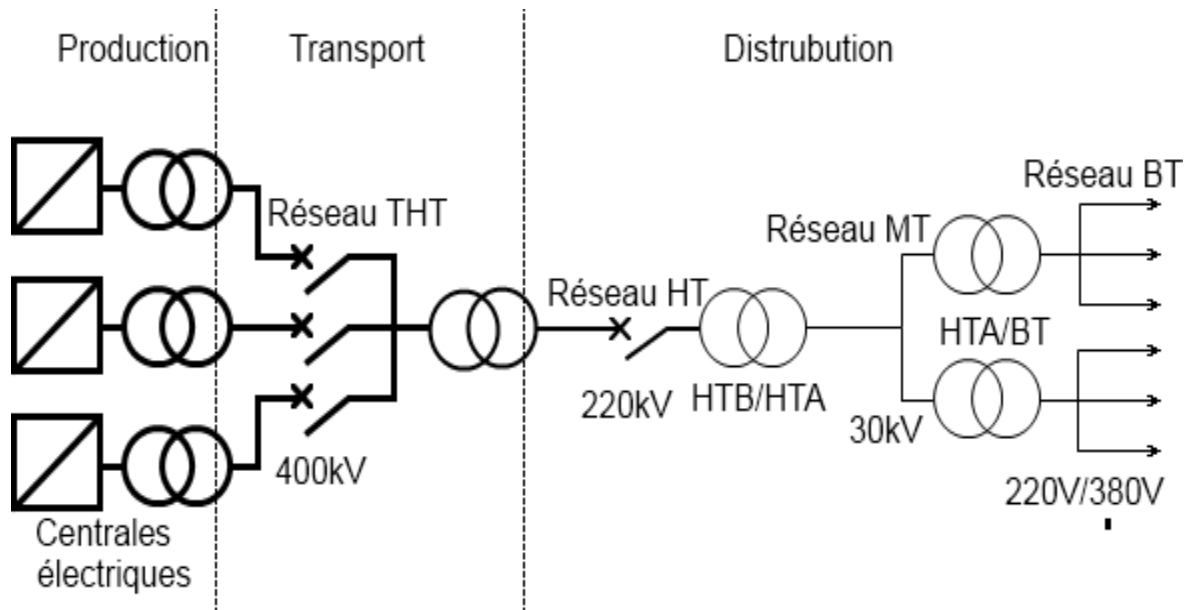


Figure 2.9 : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique

- Les réseaux de transport à très haute tension (THT.400 kV). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.
- Les réseaux de répartition à haute tension (HT, de 60 kV à 220 kV) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.
- Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à moyenne tension (MT, de 5,5 kV à 30 kV) et les réseaux à basse tension (BT, de 110 V à 220 V). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse. Les réseaux basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie

2.5.1 Modèle mathématique

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales même fréquence, déphasées entre elles de $2\pi/3$, et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré [34].

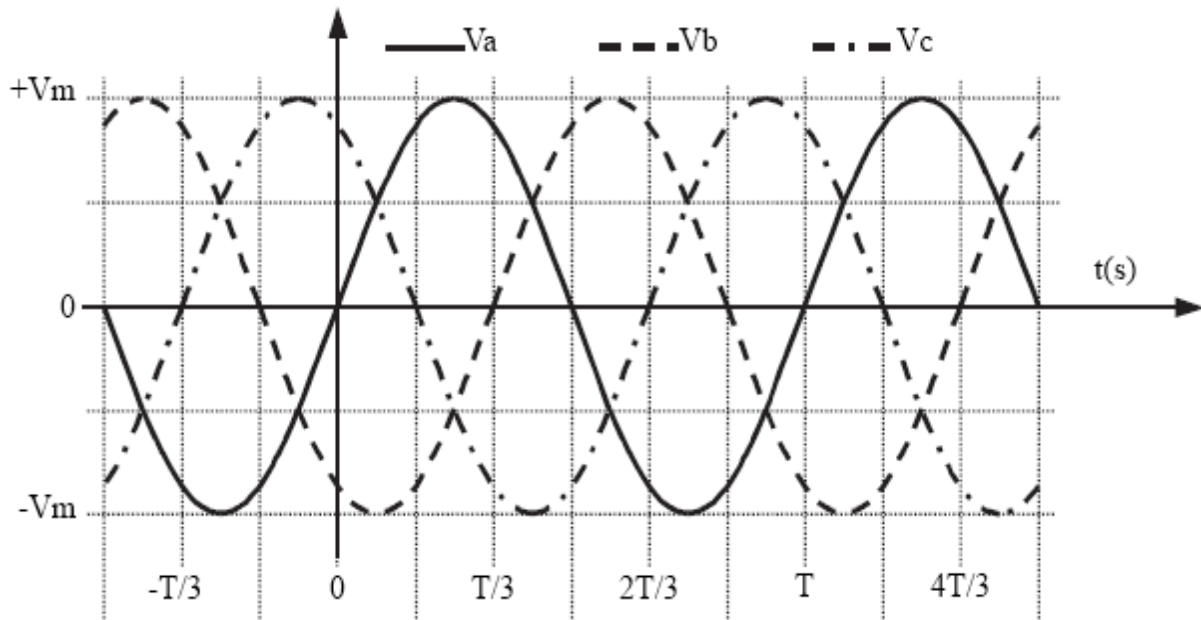


Figure.2.10: Système de tensions triphasé équilibré

Réseau de distribution électrique est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que $(V_a \ V_b \ V_c)$ est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour $(U_{ab} \ U_{bc} \ U_{ca})$. On a:

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases}$$

2.6 TRANSFORMATEUR

Utilisé pour l'isolation entre la partie continue et le réseau électrique, ainsi il élève la tension pour obtenir une tension convenable au réseau électrique.

2.7 CONCLUSION

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, et réseau électrique) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants.

L'application des techniques d'intelligences artificielles pour le contrôle et l'optimisation sera le sujet que porte le prochain chapitre.

Chapitre 3

Application des techniques d'intelligence artificielle

3.1 COMMANDE EN LOGIQUE FLOUE

3.1.1 Introduction

De nos jours, la logique floue (fuzzylogic) est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques. Des retombées technologiques sont d'ores et déjà disponibles, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver, fours à micro-onde), que dans le domaine industriel (classification, aide à la décision, réglage et commande de processus complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils).

Les bases théoriques de la logique floue ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley en Californie. Il a introduit la notion de sous ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises. A cette époque, la théorie de la logique floue

n'a pas été prise au sérieux excepté par quelques experts. Dès 1975, Mamdani et Assilian publient les premiers résultats permettant une exploitation de cette théorie dans des systèmes de réglage. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, ils ont obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type PID. Peu de temps après, en 1977, le danois Ostergaard a appliqué la logique floue à la commande de tubes broyeurs pour la fabrication de ciment. A cette époque, la plupart des études concernant les systèmes de régulation exploitant la logique floue ont été réalisées en Europe. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser largement la logique floue dans des produits industriels et de consommation pour résoudre des problèmes de réglage et de commande [35].

Les 2 concepts principaux de la logique floue

1. Les ensembles et variables flous et opérateurs associés.
2. Prise de décision à partir d'une base de règles SI...ALORS... C'est l'inférence floue.

3.1.2 Ensembles flous

Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U , est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle $[0,1]$ et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A . $\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance [4].

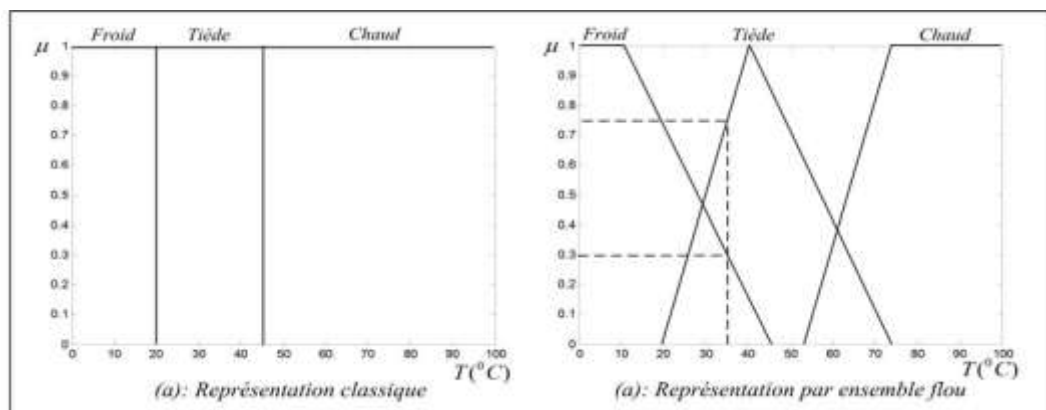


Figure 3.1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous

a) En logique booléenne (Figure 3.1), le degré d'appartenance μ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). Dans ce cas le corps peut être :

- Froid: $\mu_{\text{Froid}} = 1$, $\mu_{\text{Tiède}} = 0$, $\mu_{\text{Chaud}} = 0$
- Tiède: $\mu_{\text{Froid}} = 0$, $\mu_{\text{Tiède}} = 1$, $\mu_{\text{Chaud}} = 0$

– Chaud: $\mu_{\text{Froid}} = 0$, $\mu_{\text{Tide}} = 0$, $\mu_{\text{Chaud}} = 1$

La température du corps ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

b) En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle intermédiaire comprise entre 0 et 1 inclus. Dans ce cas, pour le qualificatif tiède, le corps peut être considéré à la fois, comme froid avec un degré d'appartenance de 0.3 et comme tiède avec un degré d'appartenance de 0.75 (figure 3.1.b).

Pour $T=35\text{ °C}$: $\mu_{\text{froid}}(T) = 0.3$, $\mu_{\text{Tiède}}(T) = 0.75$, $\mu_{\text{Chaud}}(T) = 0$.

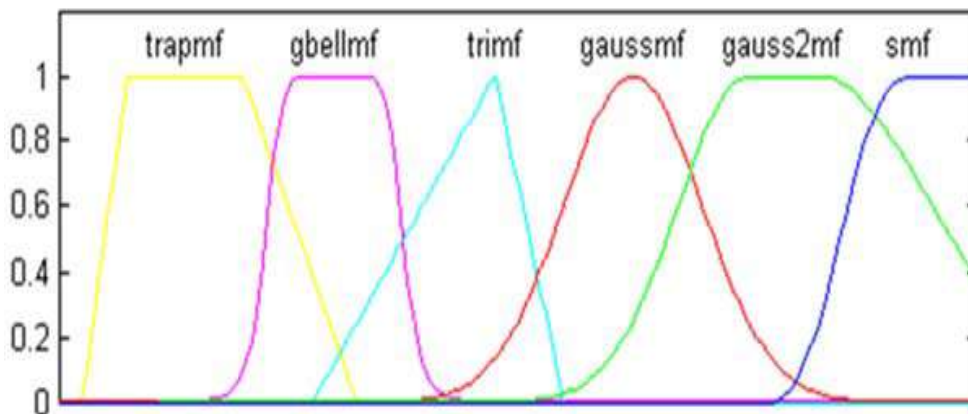


Figure 3.2 : Différents types de fonctions d'appartenance utilisées

L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée. La figure 3.2, illustre les différentes formes de fonctions d'appartenance les plus utilisées. Cependant, dans certaines applications où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on choisira plutôt des fonctions en S (sigmoïde) ou des fonctions de type gaussienne, continuellement dérivables sur leur support.

3.1.3 Variables linguistiques

La notion de variable linguistique permet de modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise est inconnue. Une variable linguistique, ou variable floue, est donc une variable dont les valeurs floues appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots du langage naturel. Ainsi une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques. Le domaine sur lequel ces termes et ces variables sont définis, constitue l'univers de discours. Le découpage de cet univers de discours par les termes flous est appelé une partition floue. Lorsque l'univers de discours est totalement recouvert par les termes flous, et que pour toutes valeurs, la somme des degrés d'appartenance est égale à 1, on parle alors de *partition floue forte* [36].

Une variable linguistique appelée aussi attribut linguistique peut être définie à partir du triplet (X, U, T_X) où x est une variable définie sur l'univers de discours U et $T_X = A_1, A_2, \dots$ est un ensemble composé de sous ensembles flous de U qui caractérise X . On associe souvent à chaque sous ensemble flou de T_X une valeur ou un terme linguistique (étiquette) [4].

La figure 3.3 illustre un exemple de la variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques: petite, moyenne et grande.

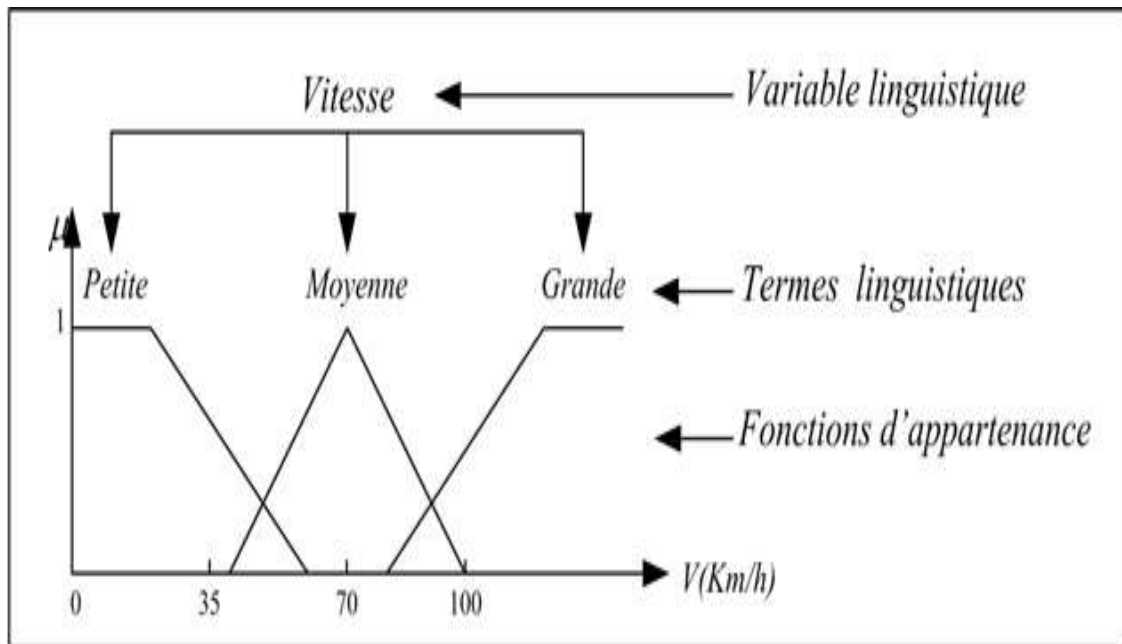


Figure 3.3 : Variable linguistique

3.1.4 Inférences et opérateurs

1.1 Règles d'inférences

Ces règles permettent de relier les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie à l'aide de différents opérateurs. Elles doivent être définies par le concepteur de système de réglage en fonction de son expérience (rôle d'*expert*) et mémorisées dans l'organe de commande. Les règles sont généralement de type :

SI « prédicat » ALORS « conclusion » [37].

Dans la théorie des ensembles classiques, on utilise différentes opérations tel que complément, union, intersection. Les mêmes opérations sont également définies dans la théorie des ensembles flous. Ces opérations ne peuvent pas être définies de la même manière que celles dans les ensembles classiques. Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs. Cependant, les plus répandus sont ceux dit de «Zadeh» décrits ci-dessous [33].

Soient A, B et C des ensembles flous dans U : univers de discours, décrits par leurs fonctions d'appartenance $\mu_A(u)$, $\mu_B(u)$, $\mu_C(u)$ respectivement.

- L'union de A et B, notée par $A \cup B$, est définie par

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max[\mu_A(u), \mu_B(u)]$$

- L'intersection de A et B, noté par $A \cap B$, est définie par

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min[\mu_A(u), \mu_B(u)]$$

- Le complément de A, noté par \bar{A} , définies par:

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

$$\mu_{A \times B \times C}(u_1, u_2, u_3) = \min[\mu_A(u), \mu_B(u), \mu_C(u)]$$

Les opérations minimum, maximum et complémentation à 1 ont été choisies pour définir respectivement l'intersection, l'union et le complément d'ensembles flous Parce qu'ils préservent presque toute la structure de la théorie classique des ensembles [33].

3.1.5 Structure interne d'un système flou

La structure conventionnelle d'un système d'inférence flou (SIF) est présentée par la Figure 1.4 [38].

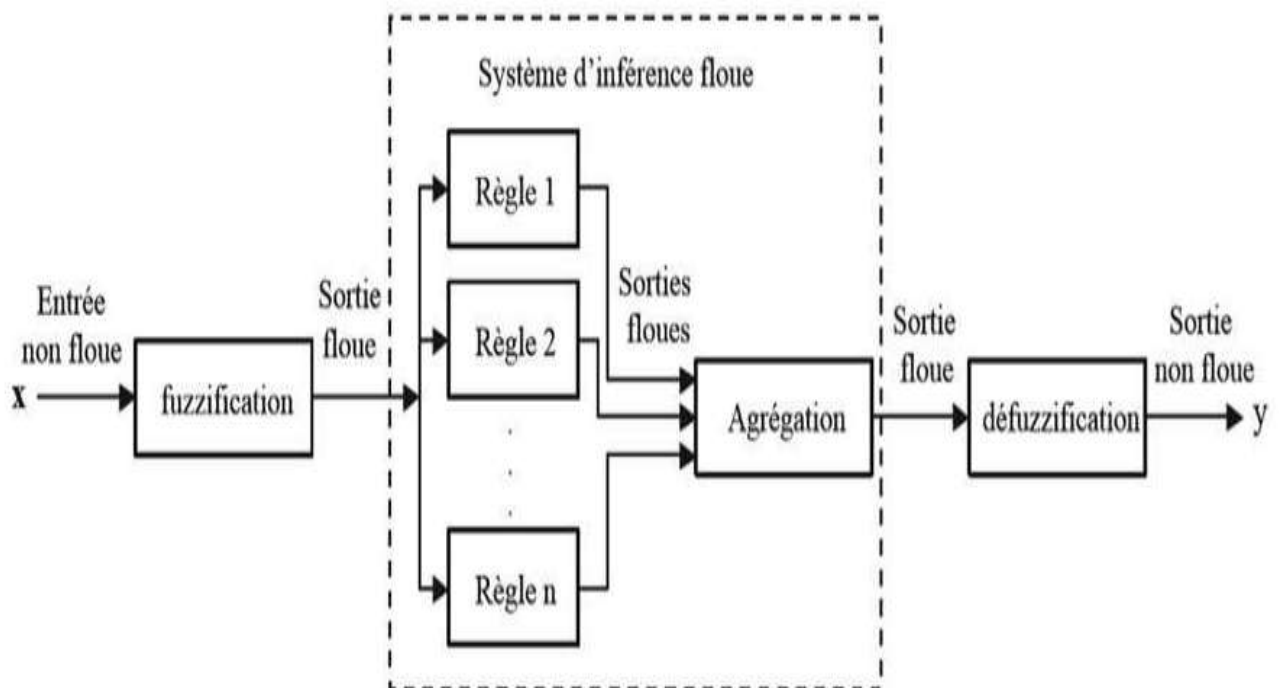


Figure 3.4 : Structure interne d'un système flou [38]

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrées du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont, en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes appliquées au processus. La Mise en échelle (normalisation/dénormalisation) des grandeurs d'entrées/sorties permet d'adapter le traitement des signaux d'entrées/sorties. Par convention, la plage de variation des variables d'entrées/sorties est comprise entre -1 et +1.

Les opérations de normalisation et dénormalisation sont optionnelles [36].

La configuration de base du contrôleur flou comprend quatre parties [4] :

- La base de connaissances.
- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance.
- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

La base de connaissances: elle contient les définitions des fonctions d'appartenance (formes et paramètres) associées aux variables d'entrée/sortie ainsi que l'ensemble des règles floues.

La fuzzification consiste à calculer, pour chaque valeur d'entrée numérique, les degrés d'appartenance aux ensembles flous associés et prédéfinis dans la base de données du système flou. Ce bloc réalise la transformation des entrées numériques en informations symboliques floues utilisables par le mécanisme d'inférence.

Le mécanisme d'inférence consiste d'une part à calculer le degré de vérité des différentes règles du système et d'autre part à associer à chacune de ces règles une valeur de sortie.

Cette valeur de sortie dépend de la partie conclusion des règles qui peut prendre plusieurs formes. Il peut s'agir d'une proposition floue, et l'on parlera dans ce cas de règle de type Mamdani:

Si (.....) Alors Y est B, B ensemble flou

Il faut passer par une étape de « défuzzification » afin d'obtenir la valeur réelle de la commande à appliquer.

Il peut également s'agir d'une fonction réelle des entrées, et l'on parlera dans ce cas de règle de type Sugeno:

Si (.....) Alors $y = f(x_1, x_1, \dots, x_n)$

où x_1, \dots, x_n sont les valeurs réelles des variables d'entrées.

La Défuzzification Les valeurs obtenues lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles flous de la variable de sortie défini une fonction d'appartenance. Il s'agit de convertir cette information en une grandeur physique. Plusieurs façons de faire peuvent être envisagées mais, en pratique, on utilise surtout les deux méthodes suivantes :

- défuzzification par calcul du centre de gravité
- défuzzification par calcul du maximum

3.2 ALGORITHMES GENETIQUE

3.2.1 Introduction

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle¹ : croisements, mutations, sélection, etc. Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne, puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962.

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

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. Le choix du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très employés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs, pour l'optimisation de problèmes à variables continues.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.

Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

3. Une fonction à optimiser. Celle-ci prend ses valeurs dans R^+ et est appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Celle-ci est utilisée pour sélectionner et reproduire les meilleurs individus de la population.

4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.

5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation [39].
Quatre principaux points qui font la différence fondamentale entre ces algorithmes et les autres méthodes :

1. Les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux mêmes.
2. Les algorithmes génétiques travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique.
3. Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
4. Les algorithmes génétiques utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes.

3.2.2 Population initiale

L'AG démarre avec une population composée de N individus dans le codage retenu. Le choix des individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est intéressant que la population soit répartie sur tout l'espace de recherche. Si par contre des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît évident de générer les individus dans un espace particulier afin d'accélérer la convergence. Disposant d'une population initiale souvent non homogène, la diversité de la population doit être entretenue aux cours des générations afin d'explorer le plus largement possible l'espace de recherche. C'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation.

3.2.3 Le codage

Chaque paramètre d'une solution est assimilé à un gène, toutes les valeurs qu'il peut prendre sont les allèles de ce gène. Un chromosome est une suite de gènes, on peut choisir de regrouper les paramètres similaires dans un même chromosome et chaque gène sera repérable par sa position. Chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes [36].

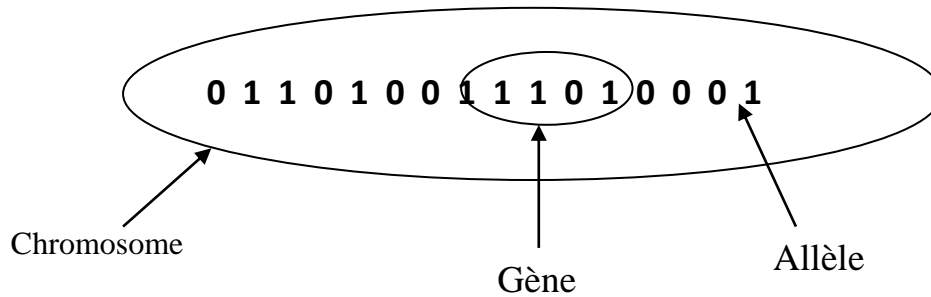


Figure 1. 6 : Structure d'un chromosome

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement :

3.2.3.1 Codage binaire

Ce codage a été le premier à être utilisé dans le domaine des AG. Il présente plusieurs avantages : alphabet minimum $\{0,1\}$, facilité de mise en point d'opérateurs génétiques et existence de fondements théoriques (théorie sur les schémas). Néanmoins ce type de codage présente quelques inconvénients :

1. Les performances de l'algorithme sont dégradées devant les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision numérique. Pour de tels problèmes, les AG basés sur les chaînes binaires ont de faibles performances comme le montre Michalewicz (Michalewicz, 1992).
2. La distance de Hamming entre deux nombres voisins (nombre de bits différents) peut être assez grande dans le codage binaire : l'entier 7 correspond à la chaîne 0111 et la chaîne 1000 correspond à l'entier 8. Or la distance de Hamming entre ces deux chaînes est de 4, ce qui crée bien souvent une convergence, et non pas l'obtention de la valeur optimale [40].

3.2.3.2 Codage réel

Il a le mérite d'être simple. Chaque chromosome est en fait un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome contenant les n variables. Avec ce type de codage, la procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence de l'étape de transcoding (du binaire vers le réel). Les résultats donnés par Michalewicz (Michalewicz, 1992) montrent que la représentation réelle aboutit souvent à une meilleure précision et un gain important en termes de temps d'exécution [40].

3.2.3.3 Codage en base n

Dans ce type de codage, les gènes constituant un chromosome sont des chiffres exprimés dans une base de numération n , ce qui permet de représenter n valeurs discrètes.

L'AG démarre avec une population composée de N individus dans le codage retenu. Le choix des individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est intéressant que la population soit répartie sur tout l'espace de recherche. Si par contre des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît évident de générer les individus dans un espace particulier afin d'accélérer la convergence. Disposant d'une population initiale souvent non homogène, la diversité de la population doit être entretenue aux cours des générations afin d'explorer le plus largement possible l'espace de recherche. C'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation [40].

3.3 OPERATEURS DE SELECTION

La sélection est un processus qui consiste à choisir parmi tous les individus de la population ceux qui vont participer à la construction d'une nouvelle génération où ce choix est basé essentiellement sur la valeur de la fonction d'adaptation de chaque individu. Un membre ayant une grande valeur de la fonction objectif aura plus de chance d'être sélectionné pour participer à la reproduction de la prochaine génération [33]. La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. Il existe plusieurs méthodes de sélection, dont on cite quelques unes :

3.3.1 Sélection proportionnelle

Ce type de sélection a été conçu à l'origine par J.Holland. Le nombre espéré de sélection d'un individu est proportionnelle à sa fitness, un individu ayant une forte valeur d'adaptation à alors plus de chance à être sélectionner, pour mettre en évidence cette méthode de sélection, deux techniques sont définit :

3.3.2 La méthode RWS (Roulette Wheel Selection)

La méthode RWS s'inspire des roulettes de casino (voir figure 3.6), à chaque individu on associe un secteur d'une roue, l'angle du secteur est proportionnel a la qualité de l'individu, on fait tourné la roue, l'individu sélectionné est désigné par l'arrêt de la bille sur sa case [41].



Fig.3.6 Modèle de la roulette

3.3.3 La méthode SUS (Stochastic Universal Simpling)

On considère un segment de droite partitionné en autant de zones qu'il y a d'individu dans la population, chaque zone étant proportionnel à la performance. On place sur ces zones des points équidistants, un individu est sélectionné s'il possède au moins un point sur ça zone [41].

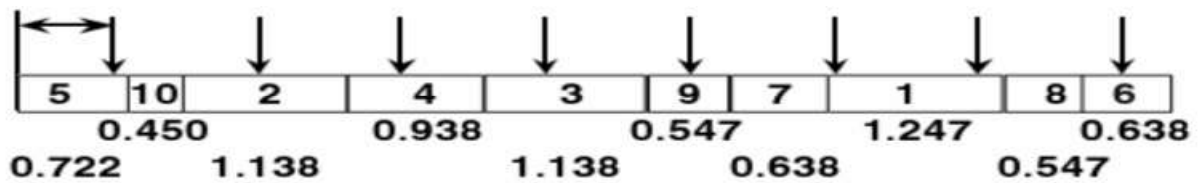


Figure 3.7 : Méthode SUS

3.3.4 Sélection par rang

Pour ce type de sélection on associe à chaque individu un rang proportionnellement à leur qualité. Les individus de moins bonne qualité obtiennent un rang faible (à partir de 1), Le rang N est attribué au meilleur individu (N étant la taille de la population). La suite de la méthode consiste uniquement en l'implémentation d'une roulette basée sur les rangs des individus. L'angle de chaque secteur de la roue sera proportionnel au rang de l'individu qu'il représente [41].

3.4 OPERATEURS DE VARIATION (REPRODUCTION)

Les opérateurs de variations sont classés en deux catégories :

- Les opérateurs de croisement, qui utilisent plusieurs parents (souvent deux) pour créer un ou plusieurs descendants.
- Les opérateurs de mutation qui transforme un seul individu.

Ces deux opérateurs permettent de créer de nouveaux individus dans une population qui héritent des caractéristiques d'individus parents, ils doivent être capables d'assurer deux fonctionnalités importantes durant la recherche d'un optimum :

- Une bonne exploration de l'espace de recherche, afin d'en découvrir les régions qui ont de grandes chances de contenir les optimums globaux.
- Une bonne exploitation de ces régions afin de découvrir les optimums avec la précision requise.

3.4.1 Opérateur de croisement

L'étape de sélection a permis de choisir parmi une population les individus les plus aptes à se reproduire. Ensuite, ces individus sont regroupés par paires qui constitueront les parents de la génération suivante. Durant l'étape de reproduction, les chaînes binaires qui caractérisent deux parents sont utilisées pour créer les chaînes binaires qui caractérisent deux enfants. Deux modes de reproduction sont envisageables : soit les enfants sont génétiquement identiques à leurs parents (conservation du matériel génétique), soit les enfants sont créés par un croisement des chromosomes des parents (modification du matériel génétique).

L'opération de croisement est essentielle, car elle permet d'obtenir de nouveaux individus, distincts de ceux déjà existants, et donc d'explorer tout un espace de recherche. Dans un algorithme génétique standard, on définit ainsi un deuxième paramètre de fonctionnement : *la probabilité de croisement* p_c , qui permet de choisir entre une conservation ou une modification des chromosomes. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0.5 et 0.9 [40].

- **Croisement en un point**

La population courante est divisée en deux sous populations de même taille ($N/2$) et chaque couple formé par un membre provenant de chaque sous population participe à un croisement avec une probabilité p_c . Si le croisement a eu lieu entre deux chromosomes parents (ch_1 et ch_2), constitués de l gènes, on tire aléatoirement une position de chacun des parents. On échange ensuite les deux sous chaînes terminales de chacun des chromosomes, ce qui produit deux enfants ch_{11} et ch_{22} comme indiqué sur la figure 3.8.

On peut noter que le nombre de points de croisements ainsi que la probabilité de croisement p_c permettent d'introduire plus ou moins de diversité. En effet, plus le nombre de points de croisements sera grand et plus la probabilité de croisement sera élevée plus il y aura d'échange de segments, donc d'échange de paramètres, d'information, et plus le nombre de points de croisements sera petit et plus la probabilité de croisement sera faible, moins le croisement apportera de diversité [36].

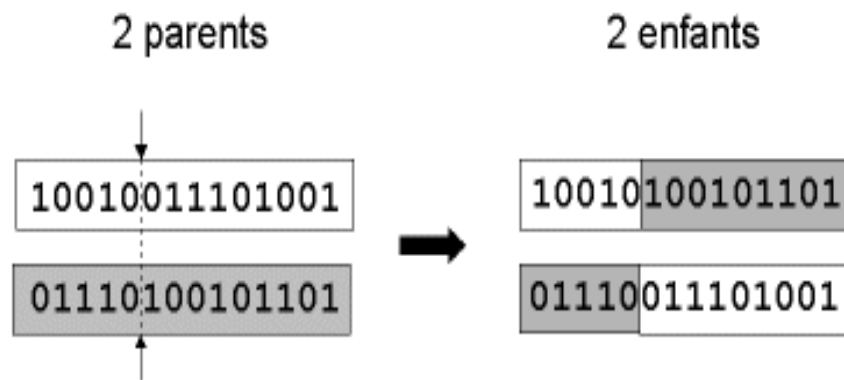


Figure 3.8 : Croisement avec un point de crossover [42]

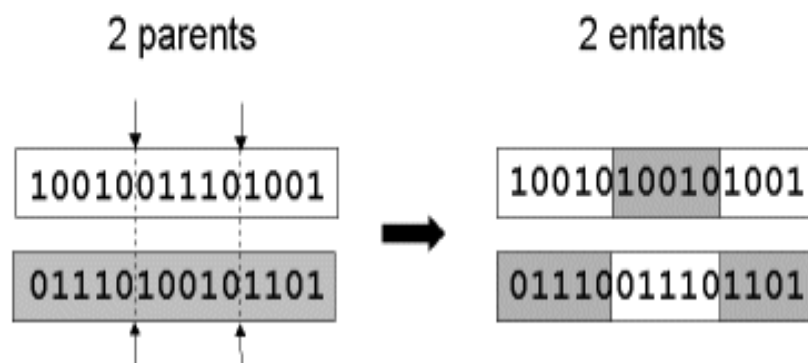


Figure 3.9 : Croisement avec 2 points de crossover [43]

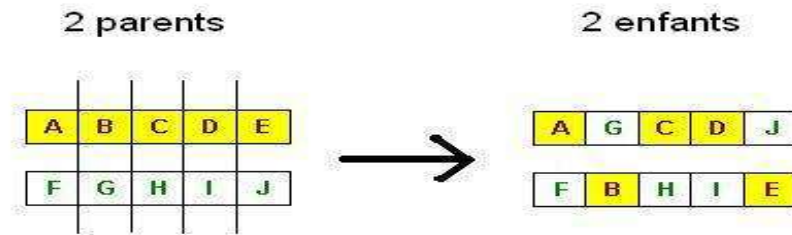


Figure 3.10 : Croisement uniforme [42]

- **Croisement uniforme**

Il consiste à définir de manière aléatoire un "masque", c'est-à-dire une chaîne de bits de même longueur que les chromosomes des parents sur lesquels il sera appliqué. Ce masque est destiné à savoir, pour chaque locus, de quel parent le premier fils devra hériter du gène s'y trouvant; si face à un locus le masque présente un 0, le fils héritera le gène s'y trouvant du parent #1, s'il présente un 1 il en héritera du parent #2. La création du fils #2 se fait de manière symétrique : si pour un gène donné le masque indique que le fils #1 devra recevoir celui-ci du parent #1 alors le fils #2 le recevra du parent #2, et si le fils #1 le reçoit du parent #2 alors le fils #2 le recevra du parent #1 [36].

3.4.2 Opérateur de mutation

Une mutation consiste simplement en l'inversion d'un bit se trouvant en un locus bien particulier avec une probabilité P_m très faible. L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de la population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur" ; il introduit du "bruit" au sein de la population [36].

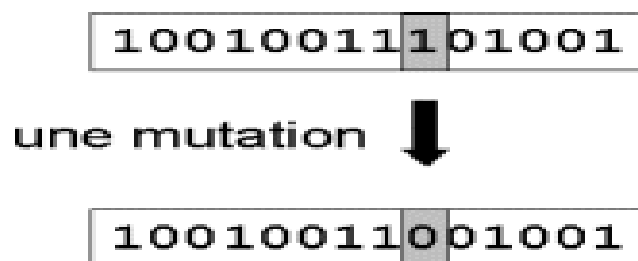


Figure 3.11 : Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne

3.5 FONCTION D'EVALUATION

Un algorithme génétique nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir des grandeurs à optimiser.

Nous la nommerons fonction d'adaptation f (ou fitness function en terminologie anglosaxonne). Elle est souvent exprimée par la composition de deux fonctions g et h [4]:

$$f = g \circ h \quad (3.1)$$

avec:

\circ : loi de composition de fonctions

g : fonction de transformation, pouvant être linéaire, exponentielle, logarithmique, etc. . . .

h : fonction objectif ou de coût, elle dépend de l'objectif

3.6 TEST D'ARRÊT

Le test d'arrêt joue un rôle primordial dans le jugement de la qualité des individus. Son but est de nous assurer l'optimalité, de la solution finale obtenue par l'algorithme génétique. Les critères d'arrêts sont de deux natures :

1. Arrêt après un nombre fixé a priori de générations. C'est la solution retenue lorsqu'une durée maximale de temps de calcul est imposée.
2. Arrêt lorsque la population cesse d'évoluer ou n'évolue plus suffisamment. Nous sommes alors en présence d'une population homogène dont on peut penser qu'elle se situe à la proximité de l'optimum. Ce test d'arrêt reste le plus objectif et le plus utilisé. Il est à noter qu'aucune certitude concernant la bonne convergence de l'algorithme n'est assurée. Comme dans toute procédure d'optimisation l'arrêt est arbitraire, et la solution en temps fini ne constitue qu'une approximation de l'optimum.. Après avoir une idée générale sur la notion ou bien le mode de fonctionnement des algorithmes génétiques, dans ce qui suit nous allons présenter quelques approches qui se trouve dans la littérature abordant le thème de l'hybridation des algorithmes génétiques avec les classifieurs flous [41].

3.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrit la structure d'un contrôleur flou et l'intérêt de cette approche dans le domaine de contrôle de processus. Cette approche permet de tenir compte à la fois des connaissances d'un expert humain et de l'incertitude et de l'imprécision des données traitées par le contrôleur. Ainsi nous avons décrit le principe des algorithmes

génétiques, qui permettent d'explorer de façon très efficace l'espace des solutions possibles d'un problème.

Chapitre 4

Conception d'un contrôleur flou par un algorithme génétique pour la poursuite du MPP et résultats de simulation

4.1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, les contrôleurs flous permettent de piloter des systèmes complexes ou difficilement modélisables en utilisant une méthode de raisonnement de type «si 'condition' alors 'action'». Récemment, des auteurs ont prouvé qu'il est possible de reproduire le fonctionnement de n'importe quel contrôleur continu standard – avec une précision arbitraire – grâce à un contrôleur flou. Pourtant, lorsque le système à commander est connu de façon imprécise, la conception du contrôleur flou n'est pas chose triviale.

Le fonctionnement d'un contrôleur flou dépend principalement des caractéristiques de trois sous-systèmes : la fuzzification, les règles floues et la défuzzification. La phase de fuzzification est parfaitement spécifiée lorsque sont définies les fonctions d'appartenance des termes linguistiques décrivant les entrées. Les règles floues sont issues d'une analyse des connaissances fournies par un expert humain et de certaines caractéristiques du système

commandé. La méthode utilisée pour la défuzzification doit permettre de transformer une fonction d'appartenance en une valeur de commande envoyée au système.

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

1. La base de règles floues est bien définie et leurs fonctions de stratégies sont optimisées par l'AG
2. Les fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrées et de sorties sont fixées et l'AG est utilisé pour l'optimisation des conclusions des règles floues.
3. Les fonctions d'appartenance et les règles floues associées sont optimisées simultanément.

Dans ce contexte le présent travail présente l'application des algorithmes génétiques pour générer la base de règles du contrôleur flou pour la poursuite de la puissance maximale du générateur photovoltaïque à la sortie de l'onduleur qui est connecté au réseau électrique dans les conditions météorologiques perturbatrices qui sont la température et l'éclairement.

4. 2 DESCRIPTION DU SYSTEME

Le système utilisé dans ce travail est décrit par la fig. IV.1 suivante :

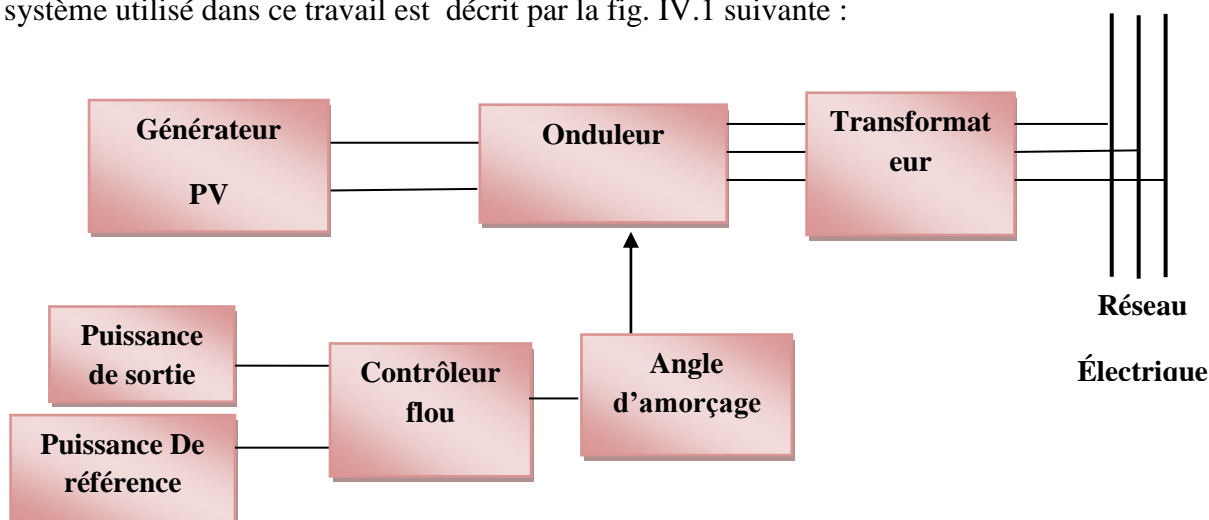


Figure 4.1 : Schéma du système étudié

Le générateur photovoltaïque est interconnecté au réseau électrique à travers une liaison continue qui consiste d'un redresseur qui fonctionne en régime onduleur (Line Commutated Inverter). En littérature, cette configuration est connue sous le nom d'onduleur non autonome, dont la forme la plus simple est celle d'un redresseur à thyristors à 6 impulsions. Dans ce cas, le réseau d'alimentation impose l'allure de la tension de sortie ainsi que la fréquence de commutation. Pour un redresseur à 6 impulsions, cette fréquence est de 300 HZ. De plus, pour assurer un tel mode de conversion, l'angle d'amorçage des interrupteurs varie dans la gamme $[95^\circ-165^\circ]$ dans le cas idéal si on néglige le phénomène d'empiètement.

L'adaptation de l'équation (2.1) à d'autres niveaux d'éclairements et de températures peut être obtenue par le modèle de SANDSTROM. Ce modèle fait translater un point de référence (I_{ref} , V_{ref}) à un nouveau point (I , V) via les équations (4.1) à (4.5) :

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (4.1)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (4.2)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (4.3)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (4.4)$$

$$\Delta I = \alpha (E / E_{ref}) \Delta T + (E / E_{ref} - 1) I_{sc}^2 \quad (4.5)$$

4.3 INFLUENCE METEOROLOGIQUE SUR LA PUISSANCE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

4.3.1 Influence de l'éclairement

Pour un changement d'éclairement et une température constante la caractéristique puissance-tension est donnée sur la fig. 4.2 où on constate pour chaque courbe qu'il y a un point particulier où la puissance est maximale.

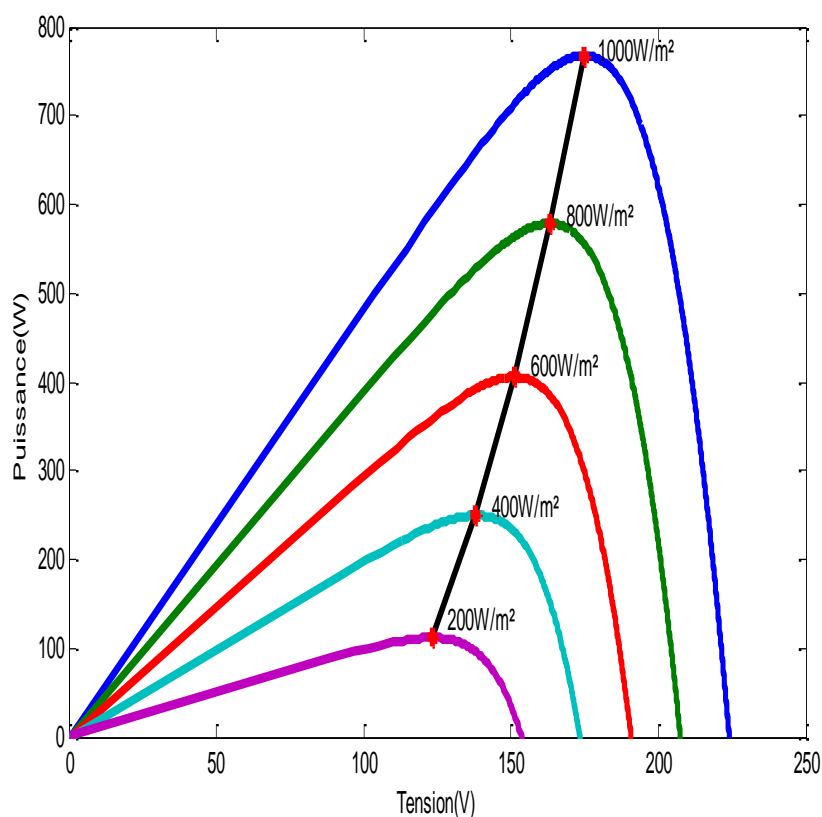


Figure 4.2 : Caractéristique puissance-tension du générateur PV pour différents niveaux de l'éclairement à température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$)

La puissance de référence est donnée par :

$$P_{ref} = A_0 + A_1 E + A_2 E^2 \quad (4.6)$$

Où A_0 , A_1 , A_2 sont des coefficients d'interpolation élaborés en utilisant la méthode de moindre carré

$$P_{ref} = 0.0002E^2 + 0.5633E - 9.6795 \quad (4.7)$$

La tension à l'entrée de l'onduleur est liée à l'angle d'amorçage par l'équation suivante :

$$V_I = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi}\right)V \cdot \cos(\alpha) \quad (4.8)$$

La tension V_L est la tension alternative maximale à la sortie de l'onduleur est liée à la tension du réseau V_s par le rapport de transformation du transformateur, tel que:

$$V_L = N_o V_s \quad (N_o = 1) \quad (4.9)$$

Le courant à la sortie de l'onduleur est donné par :

$$I_o = \frac{I_s \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (4.10)$$

La puissance à l'entrée de l'onduleur est donnée par :

$$P_{sor} = VI \cdot I_s \quad (4.11)$$

$$I_s = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\right)I_o \quad (4.12)$$

$$I_o = P_{ref}/V_s \quad (4.13)$$

4.3.1.1 Commandes MPPT types P&O 'perturber et observer' et floue

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Dans cette partie, nous avons étudié et analysé, en modélisant et en simulant sous Matlab et C++ sous environnement builder le fonctionnement d'un système photovoltaïque, dont la charge est adaptée par l'intermédiaire d'un onduleur. La régulation est assurée par deux types de commande MPPT : La commande classique "Perturb and Observ" et une commande découlant de l'intelligence artificielle floue.

Nous évaluons l'efficacité des deux commandes "P&O" et "Flou " en comparant leur vitesse de convergence et leur stabilité apportée vis-à-vis du PPM au niveau des caractéristiques $P-V$ fournies par la caractéristique du panneau PV.

Les performances de ces méthodes sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge.

- **Contrôleur flou FLC**

Le régulateur "Floue" proposé pour l'optimisation du système, est représenté par la Figure . Il reçoit comme entrées : l'erreur et la variation de l'erreur du système ($E(k)$, $\Delta E(k)$). A la sortie, il y'a génération de la variation de l'angle d'amorçage commandant le l'onduleur non autonome DC-AC.

$$\text{L'erreur } e(K) = P_{ref}(K) - P_{sor}(K) \quad (4.14)$$

$$\text{Changement de l'erreur } \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.15)$$

$$\text{Changement du signal de commande } \Delta \alpha(k) = \alpha(k) - \alpha(k-1) \quad (4.16)$$

k: instant du temps

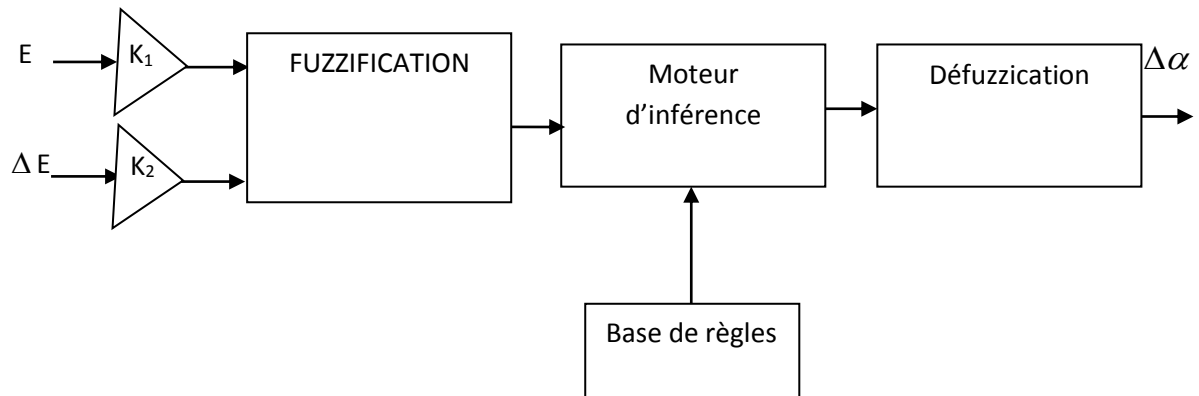


Figure 4.3 : Structure de base du contrôleur flou

Le contrôleur flou présenté sur la Figure 7, il est caractérisé par :

- Deux entrées ; l'erreur E et sa variation ΔE ainsi qu'une seule sortie $\Delta\alpha$.
- Des facteurs d'échelle $K1$ et $K2$ (de -1 à 1), pour la normalisation des entrées, associés à l'erreur et à sa variation.
- L'univers de discours découpé en trois classes pour E et sept classes pour ΔE et $\Delta\alpha$.
- Les fonctions d'appartenances de types triangulaires, Tel que les signes NG, NM, NP, EZ, Z, PP, PM, PG désignent respectivement négatif grand, négatif moyen, négatif petit, environ zéro, positif petit, positif moyen, positif grand.
- L'implication de Takagi-Sugeno pour l'inférence.
- La méthode moyenne pondérée pour le calcul de la sortie.

Chapitre 4: Conception d'un Contrôleur Flou par un Algorithme Génétique pour la Poursuite du MPP et Résultats de Simulation

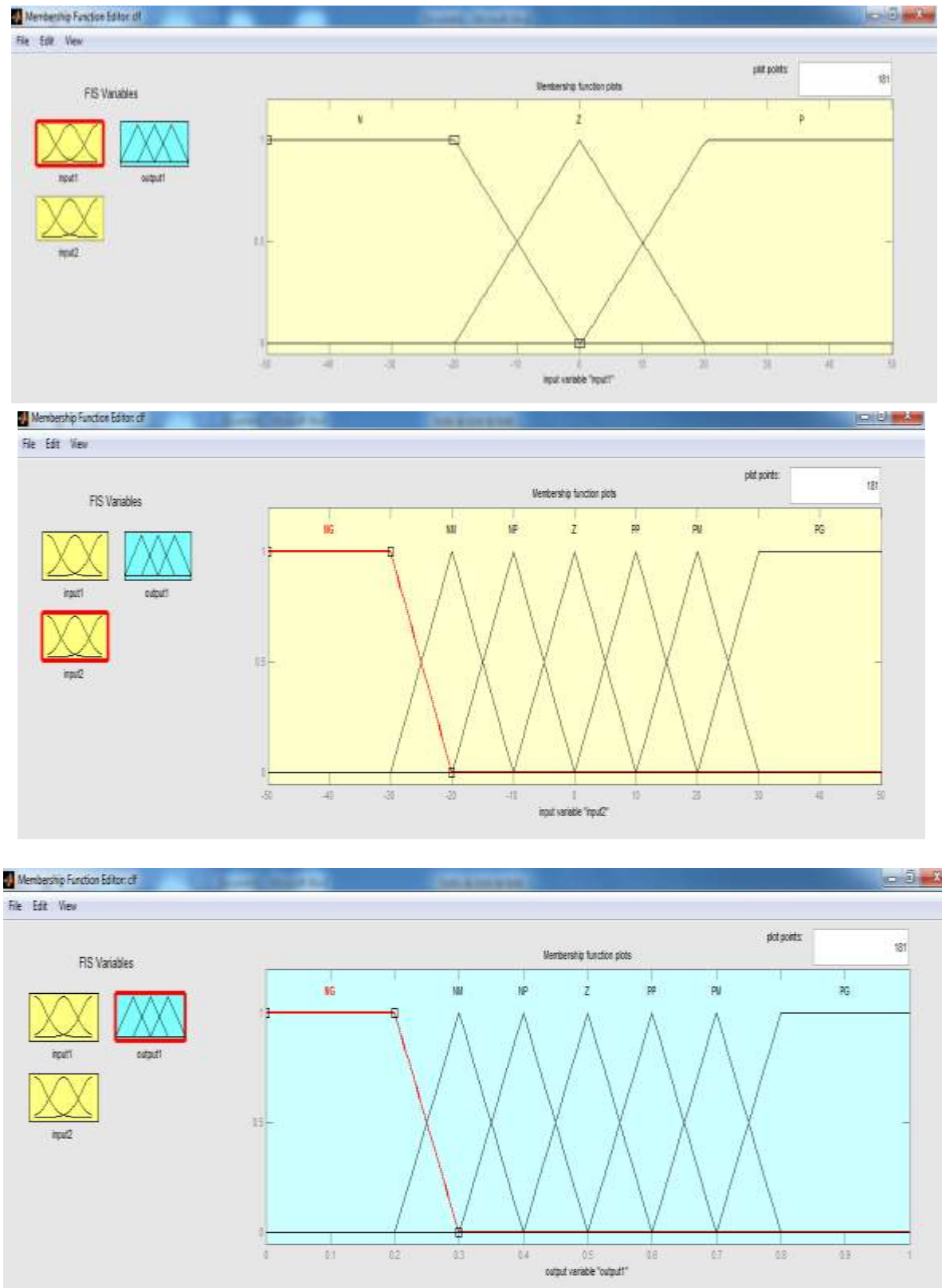


Figure 4. 4 : Fonctions d'appartenances correspondantes aux variables d'entrées et de sortie

4.3.1.1.1 Résultats de simulation

Figure 4.6 montre une comparaison entre le FLC et la méthode P&O

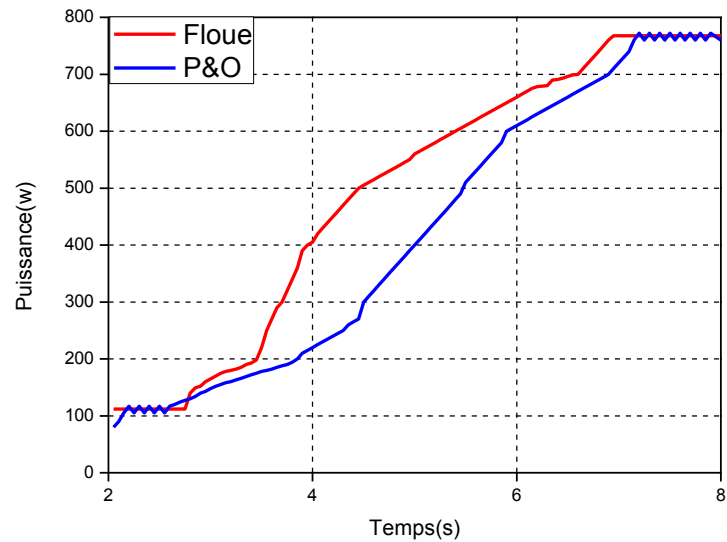


Figure 4.5 : Comparaison des réponses entre la méthode P&O et le contrôleur flou

Pour une variation brusque de l'éclairement on a :

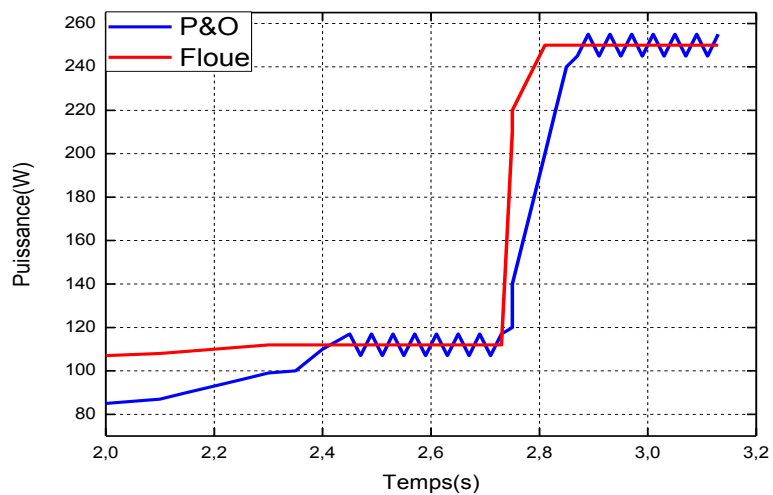


Figure 4.6 : Puissance de sortie pour une variation brusque de l'éclairement de 200W/m² à 400W/m²

4.3.1.2 Application des algorithmes génétiques

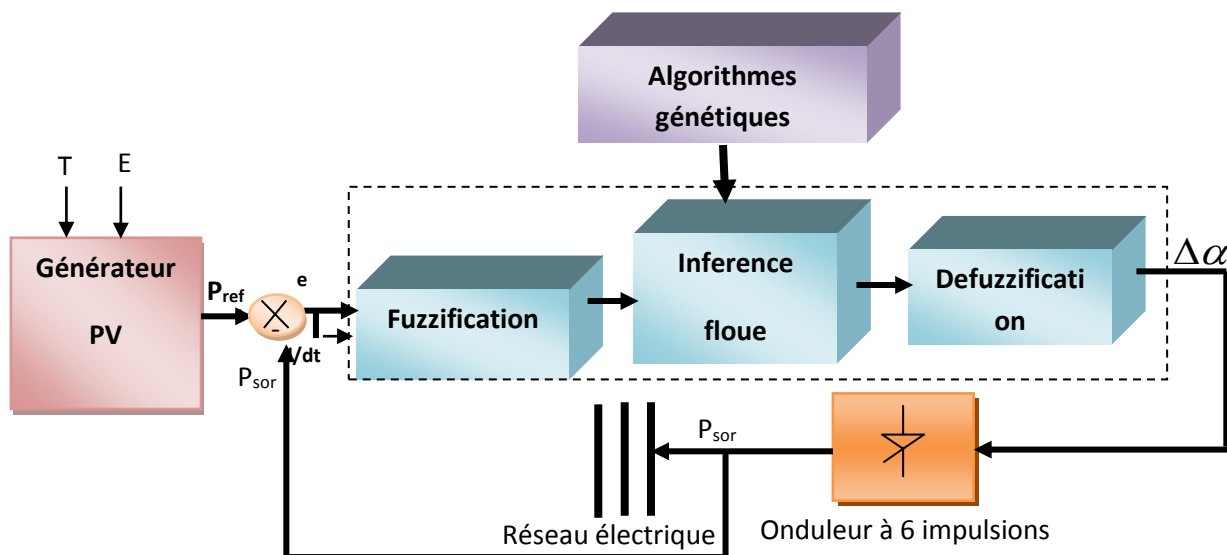


Figure. 4. 7 : Schéma de control du système

- **Procédure génétique**

Dans cette section on décrit la procédure de générer la base de règles utilisées dans ce travail, avec des fonctions d'appartenances précédemment définies.

✓ **Codage**

Le codage utilisé est un codage réel. Les règles sont codées par des nombres entiers (de 1 à 7) qui représentent le signe des fonctions d'appartenances qui apparait dans la partie conséquente de la règle. Le chromosome qui représente l'ensemble de base des règles a la taille de 21 (lchrom=21) et représenté sur le tableau. 4.1.

Chromosome [i, j]

i=1,.....,21

j=1,....., 60

Tableau 4. 1 : Codage de la base des règles

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---|----------------|---|---|---|---|---|---|----|-----|----|----|-----------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | ... | 20 | 21 | | |
| 1 | 3 | 5 | 2 | 4 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | ... | 2 | 6 | | |
| R ₁ | | R ₂ | | | | | | | | | | | R ₂₁ | |

✓ **Décodage**

Comme on a déjà mentionné, les allèles réservés à la base des règles floues correspondent aux ensembles ^{POP} flous de la partie conclusion (conséquence) de ces règles. Cette correspondance qui définit le décodage de la base des règles est explicitement décrite dans le tableau 4. 2.

Tableau 4. 2 : Décodage de la base des règles

| Allèle (chrom[i], i=1, 2,...,21) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Ensemble flou | NG | NM | NP | ZE | PP | PM | PG |

✓ **Paramètres de l'algorithme génétique**

- **Population initiale**

La population initiale est générée aléatoirement. Elle est formée par un ensemble limité de chromosomes codés comme il est indiqué précédemment. tel que max pop = 60.

- **Fonction d'objectif**

La fonction fitness est définie par le minimum d'erreur qui correspond à la meilleure base des règles. Erreur de poursuite :

$$E = fitness(e, \Delta e) = eval(FLC)$$

- **Condition d'arrêt**

Dans ce travail on a utilisé le nombre maximal de générations comme une condition d'arrêt tel que max gen=100.

- **Opérateurs génétiques**

On a utilisé dans ce travail le crossover à un point tel que $P_c=0.8$, mutation standard $P_m=0.03$, la sélection par roue de lotterie

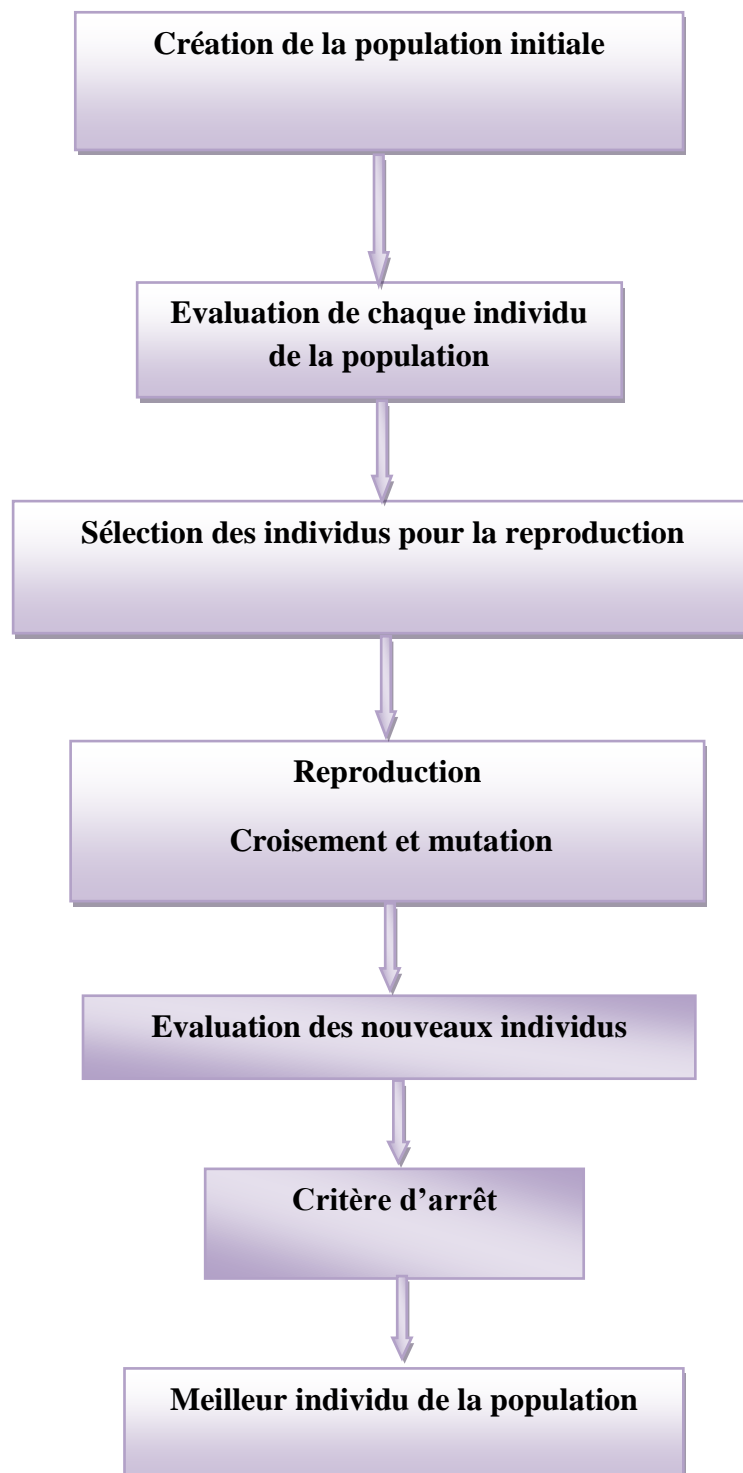


Figure 4. 8 : Algorithme génétique utilisé dans la simulation

4.3.1.2.1 Résultats de simulation

La trajectoire à poursuivre est représentée sur la fig.4.2 elle est décrite par l'équation. Dans notre cas on a pris pour chaque éclairement une base de règles à une température constante 25°C, par exemple pour $E=100\text{W/m}^2$, on a la base des règles suivante :

Tableau 4. 3 : Base des règles finale pour l'éclairement $E=1000\text{W/m}^2$

| E | N | Z | P |
|------------|----|----|----|
| Δe | | | |
| NG | NM | PM | PM |
| NM | ZE | PG | NP |
| NP | NP | PP | NP |
| ZE | ZE | NG | NG |
| PP | ZE | NG | NM |
| PM | ZE | PP | NM |
| PG | PM | NP | PM |

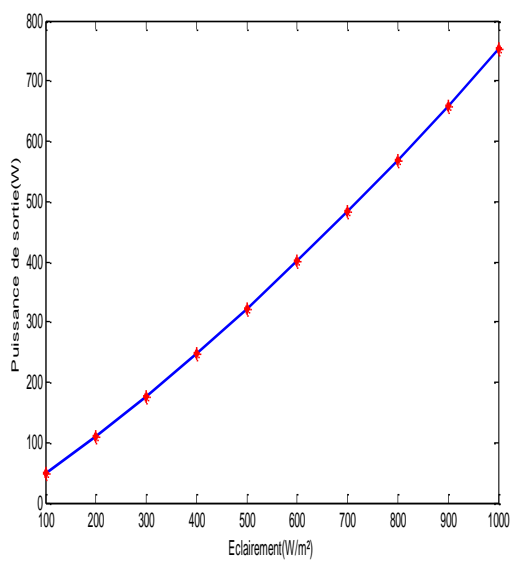


Figure 4. 9 : Puissance de sortie

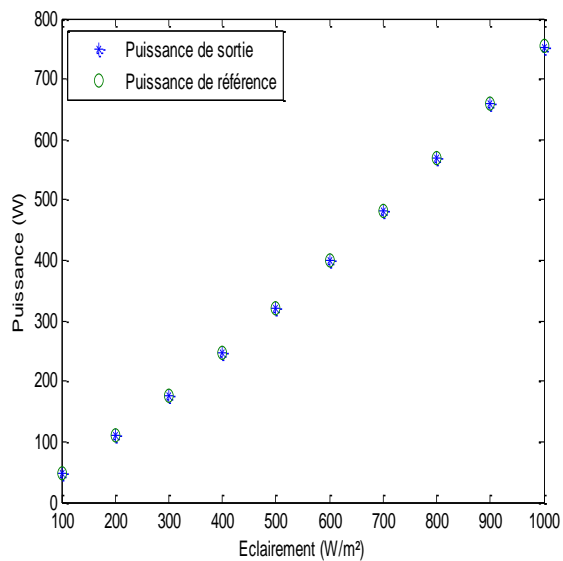


Figure 4. 10 : Comparaison entre la puissance de référence et celle de sortie

Chapitre 4: Conception d'un Contrôleur Flou par un Algorithme Génétique pour la Poursuite du MPP et Résultats de Simulation

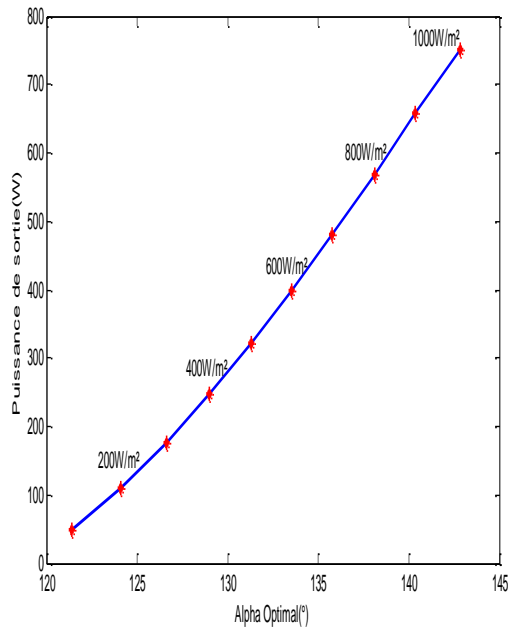


Figure 4.11 : Puissance de sortie en fonction des alphas optimaux

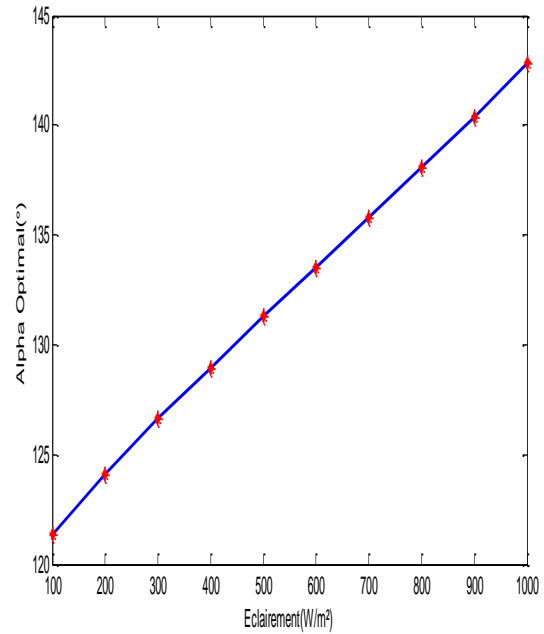


Figure 4.12 : Alphas optimaux

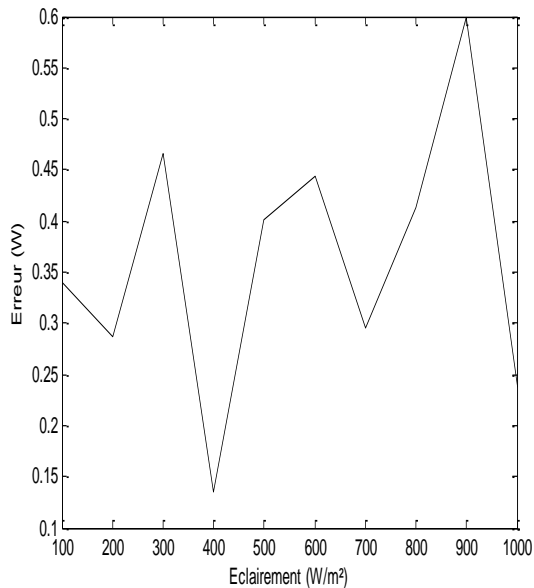


Figure 4.13 : Signal d'erreur

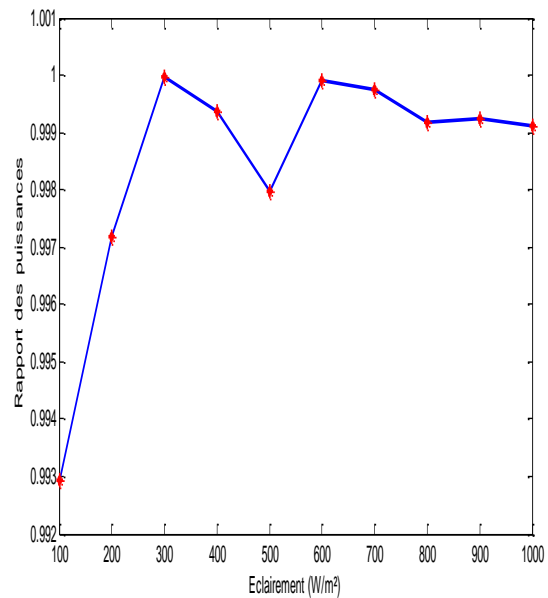


Figure 4.14 : Rapport des puissances

Chapitre 4: Conception d'un Contrôleur Flou par un Algorithme Génétique pour la Poursuite du MPP et Résultats de Simulation

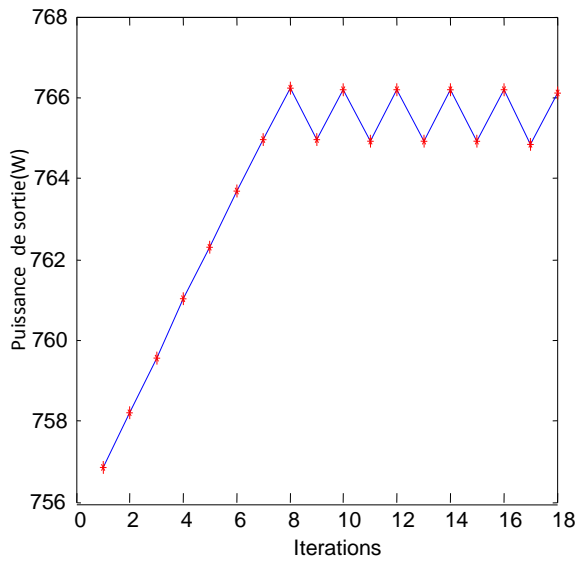


Figure 4.15 : Variation de puissance en fonction du nombre d'itérations pour un $E=1000W/m^2$

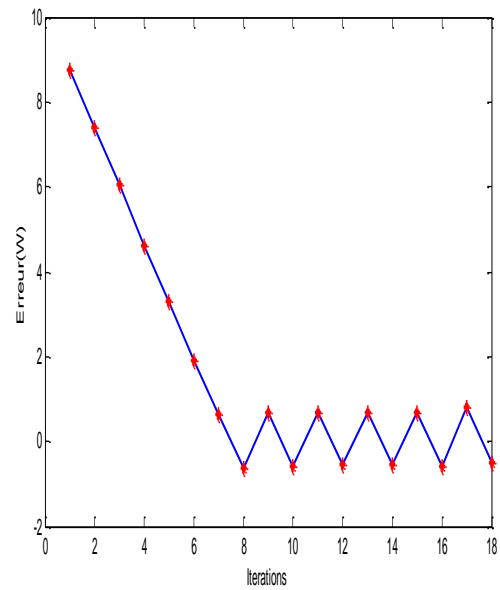


Figure 4.16 : Variation de l'erreur en fonction du nombre d'itérations pour $E=1000W/m^2$

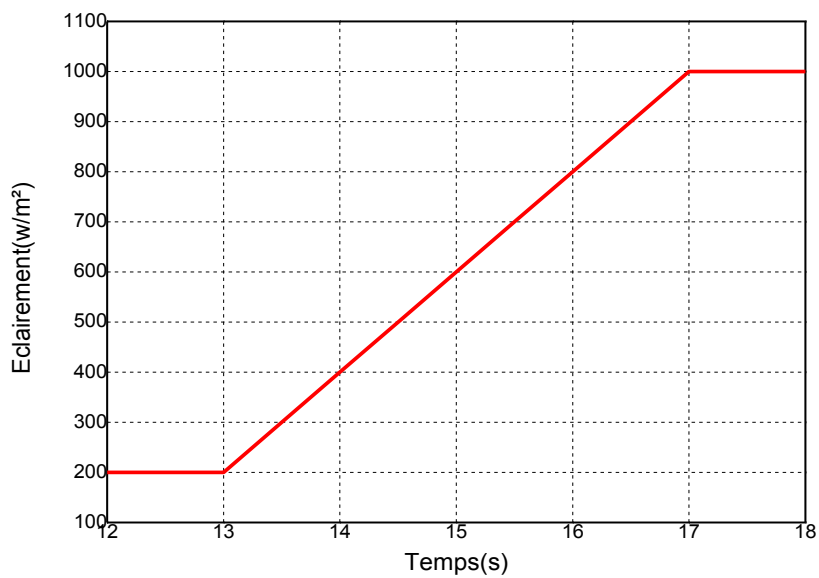


Figure 4.17 : Eclairement vari de $200W/m^2$ à $1000W/m^2$

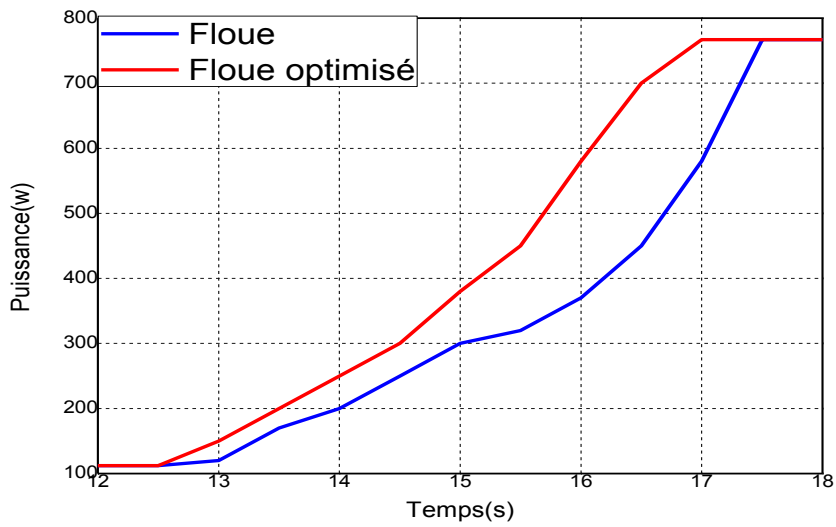


Figure 4.18 : Comparaison entre FLC et P&O pour variations de l'éclairement de 200W/m^2
à 1000W/m^2

Pour une variation brusque de l'éclairement on a :

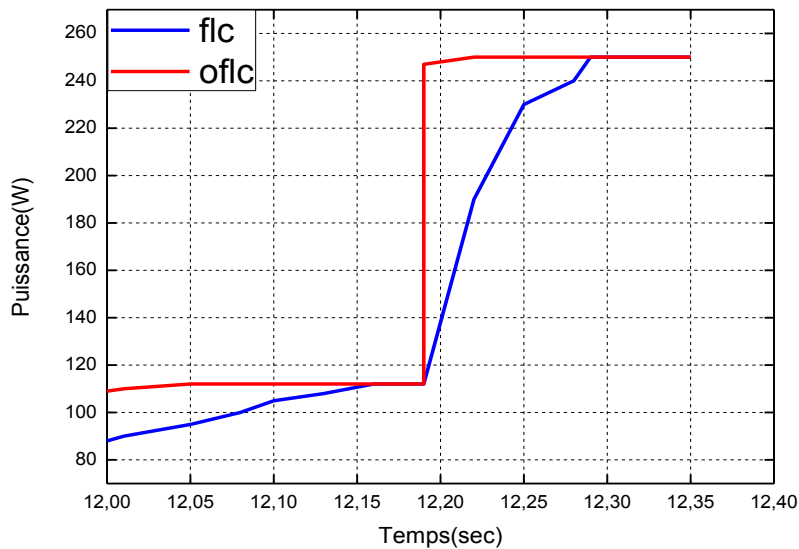


Figure 4.19 : Puissance de sortie pour une variation brusque de l'éclairement de 200W/m^2 à 400W/m^2

4.3.2 Influence de la température

La figure 4.18 montre la caractéristique puissance-température et les points qui correspondent aux puissances maximales.

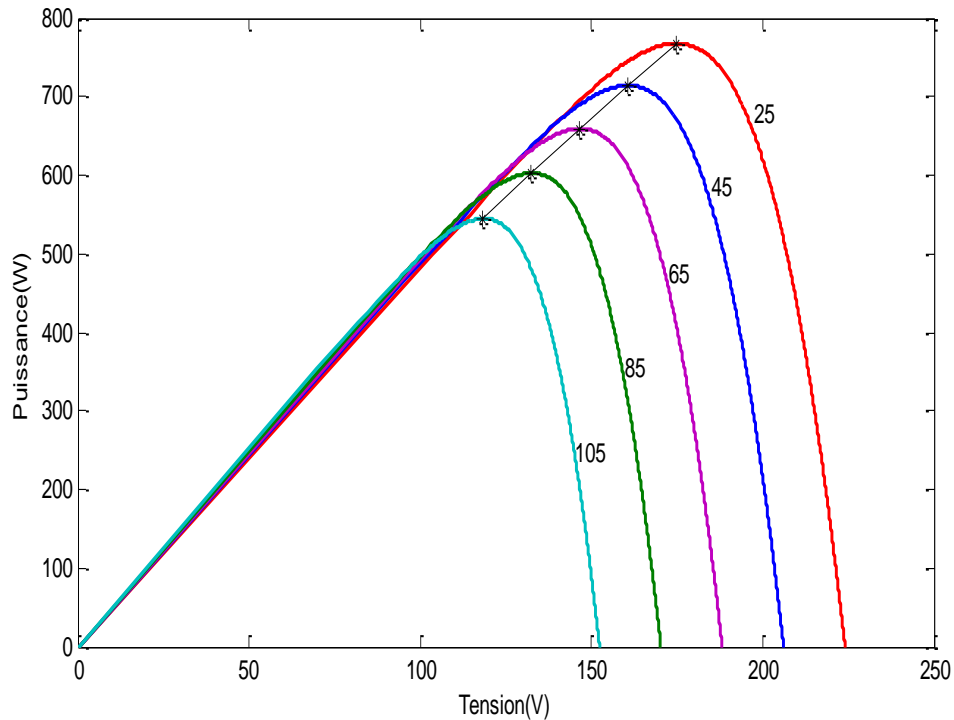


Figure 4. 20 : Caractéristique puissance-tension du générateur PV pour différents niveaux de température à $E=1000W/m^2$

Comme la variable contrôlable dans ce cas est la puissance photovoltaïque qui devrait être variée en fonction de la température à un éclairement constant $E=1000w/m^2$, la puissance maximale dans ce cas est donnée par :

$$P_{ref} = -0.0019T^2 - 2.5465T + 832.6288 \quad (4. 17)$$

4.3.2.1 Comparaison entre la Commande floue et celle P&O

Pour un éclairement constant et changement rapide de la température on a la figure 4.21.

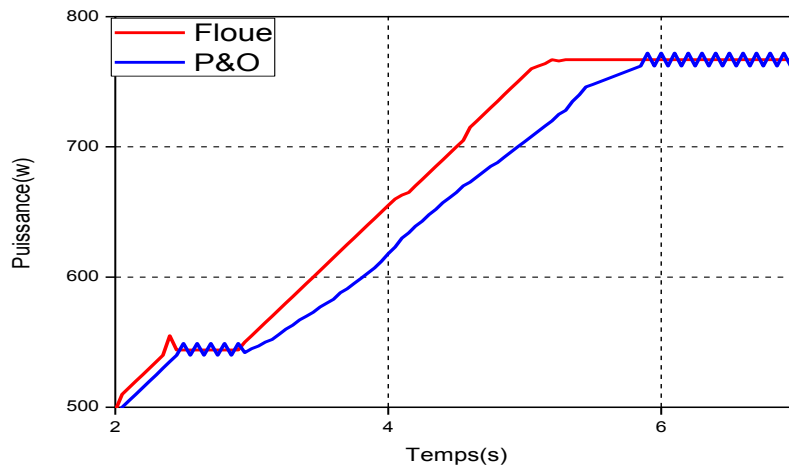


Figure 4. 21 : Comparaison entre la commande P&O et le contrôleur flou pour une température de 105C° à 25C°

4.3.2.2 Procédure génétique

➤ Résultats obtenus

Pour chaque température on a une base des règles pour un éclairage fixe $E=1000W/m^2$, par exemple pour $T=25^{\circ}C$ on a la base des règles montrée sur le tableau 4.4

Tableau 4. 4 : Base des règles finale pour une température $T=25^{\circ}C$

| e | N | Z | P |
|------------|----|----|----|
| Δe | | | |
| NG | PP | Z | PP |
| NM | PM | NM | Z |
| NP | PP | NG | NG |
| ZE | NP | NG | NG |
| PP | NM | Z | PM |
| PM | NM | NM | PM |
| PG | Z | NG | PG |

Chapitre 4: Conception d'un Contrôleur Flou par un Algorithme Génétique pour la Poursuite du MPP et Résultats de Simulation

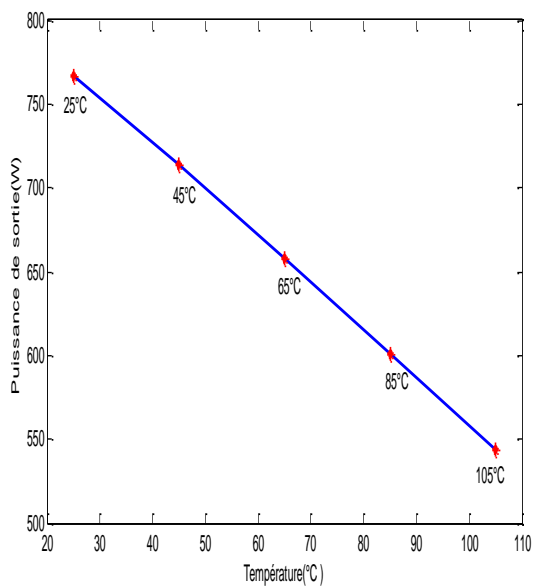


Figure 4.22 : Puissance de sortie

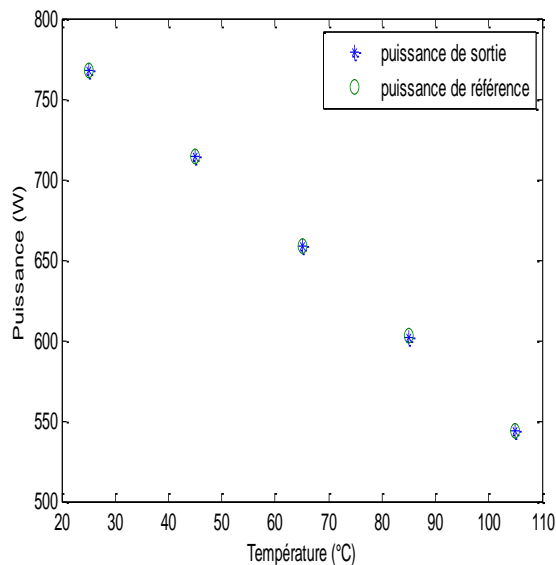


Figure 4.23 : Comparaison entre la puissance de référence et celle de sortie

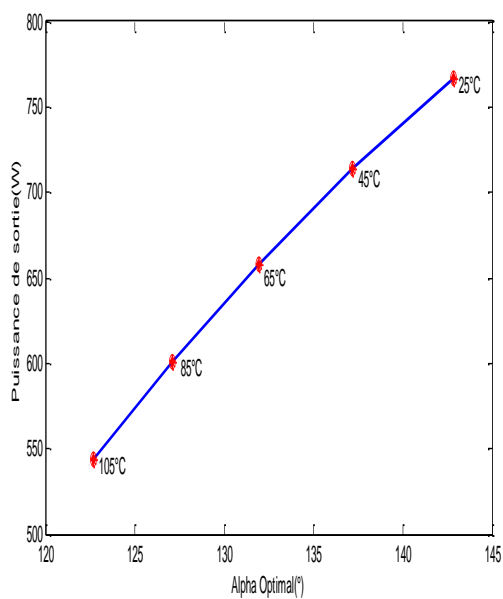


Figure 4.24 : Puissance de sortie en fonction des alphas optimaux

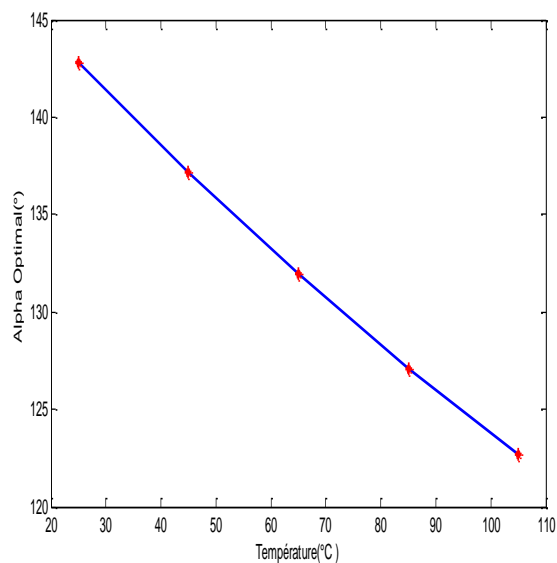


Figure 4.25 : Alphas optimaux

Chapitre 4: Conception d'un Contrôleur Flou par un Algorithme Génétique pour la Poursuite du MPP et Résultats de Simulation

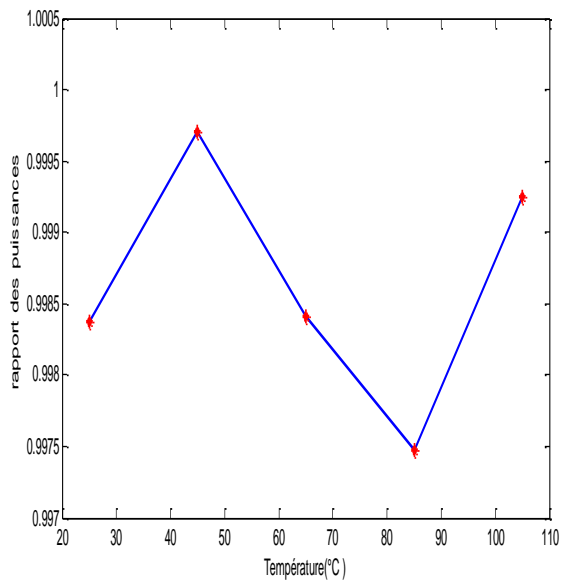


Figure 4. 26 : Rapport des puissances

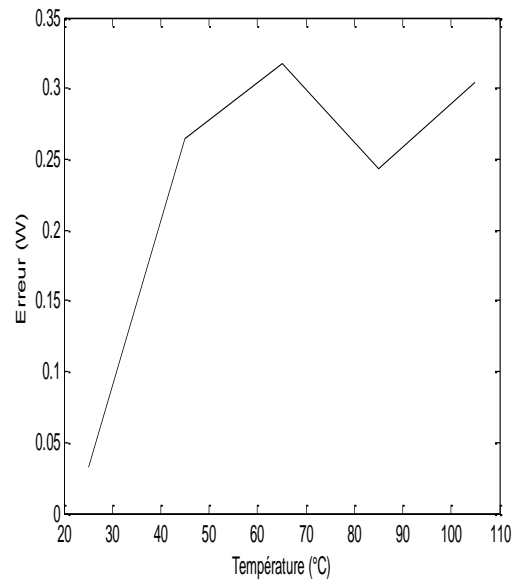


Figure 4. 27 : Signal d'erreur

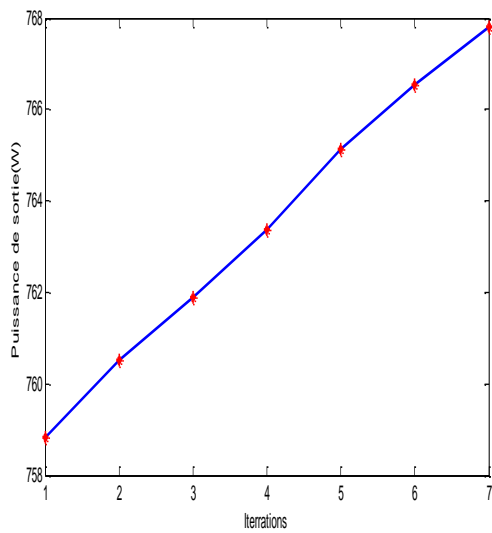


Figure 4.28 : Variation de puissance en fonction du nombre d'itérations pour une $T=25C^{\circ}$

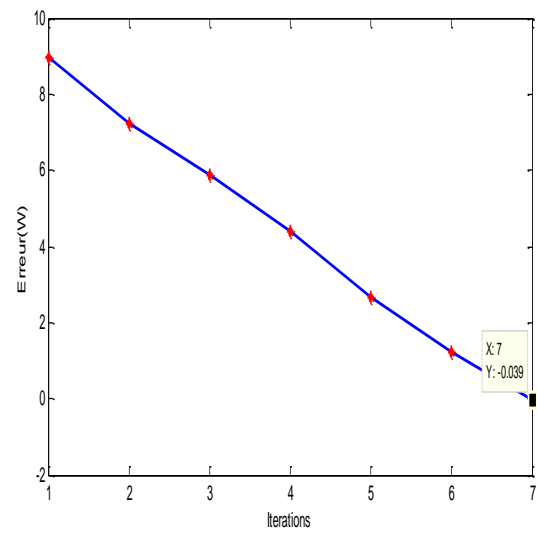


Figure 4.29 : L'erreur pour $T=25C^{\circ}$

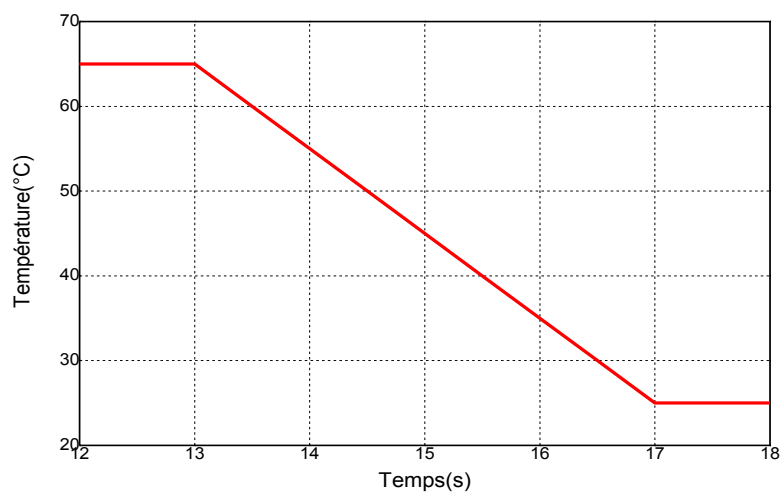


Figure 4. 30 : Température

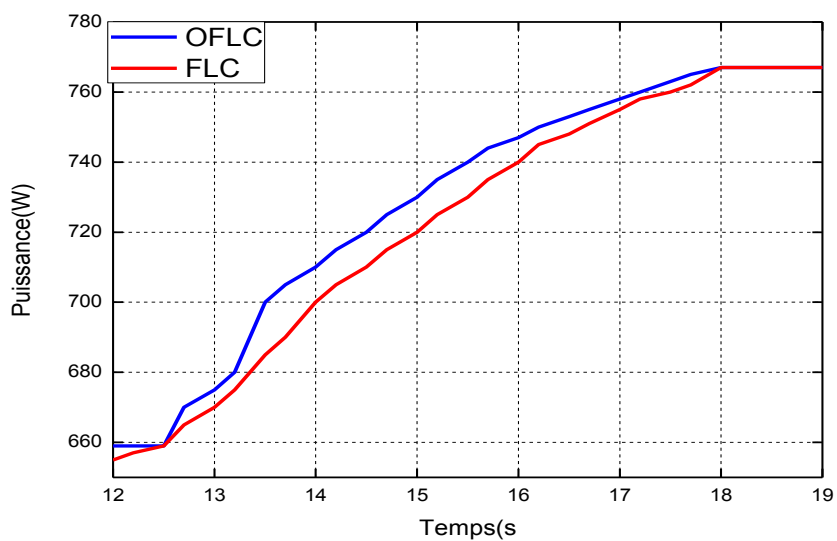


Figure 4. 31 : Comparaison entre FLC et FLCO à température variable (65°C à 25°C)

4.3.3 Influence simultanée de la température et l'éclairement

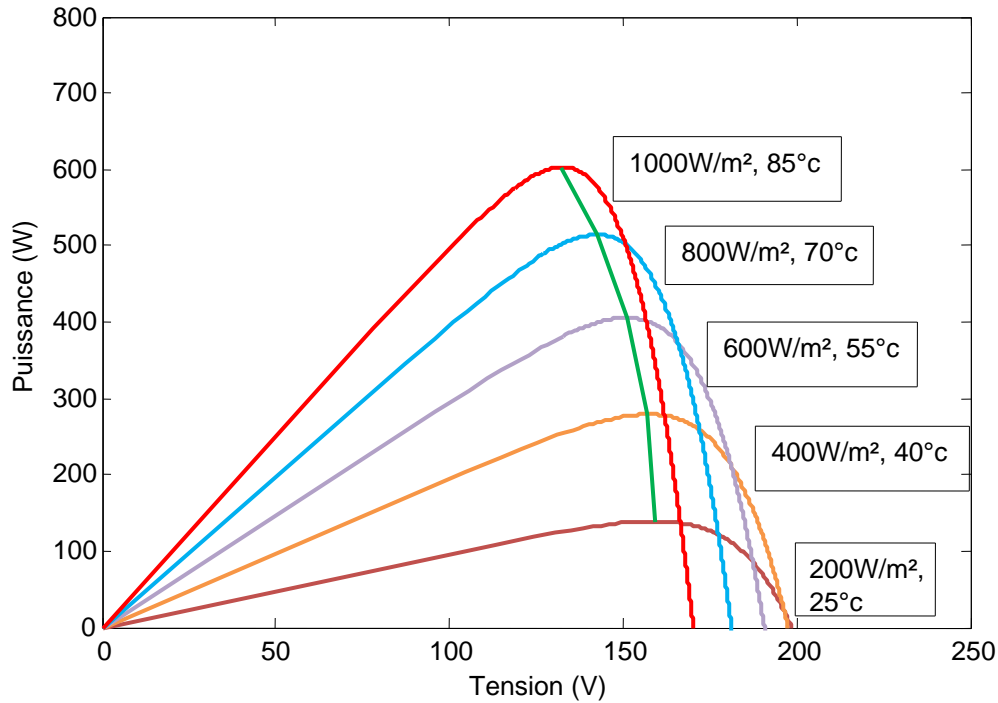


Figure 4. 33 : Caractéristique puissance-tension du générateur PV pour différents niveaux de température et de l'éclairement

Dans ce cas la puissance de référence est exprimée par :

$$P(T,E) = -26.3651 + 0.7T + 0.81E - 4.84 \times 10^{-4} T^2 + 5.12 \times 10^{-5} E^2 - 0.0036TE \quad (4.18)$$

4.3.3.1 Résultats obtenus

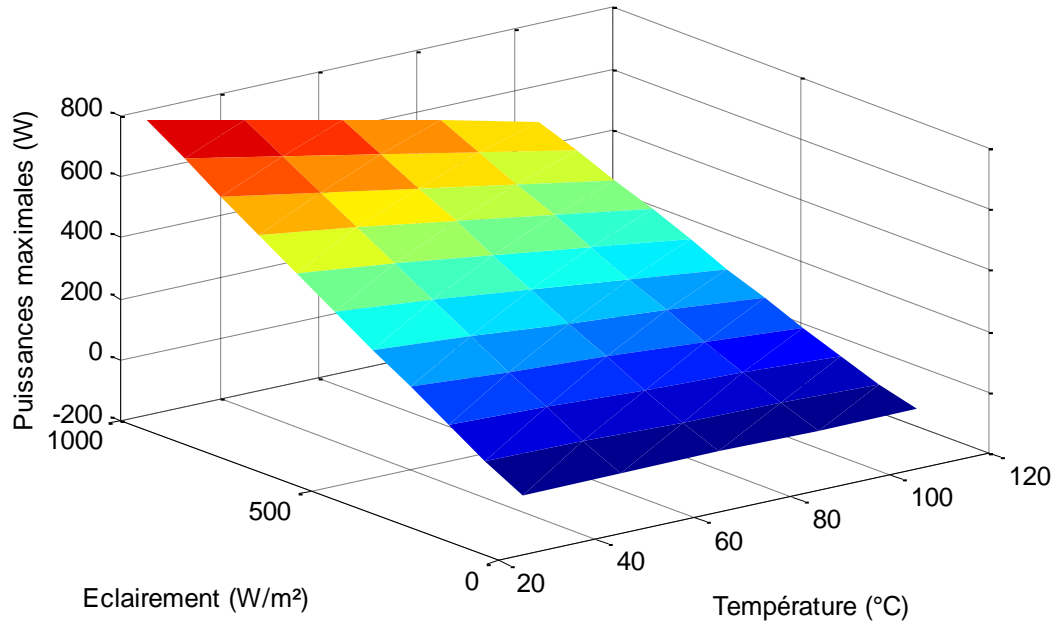


Figure 4. 34 : Puissance de sortie en 3D

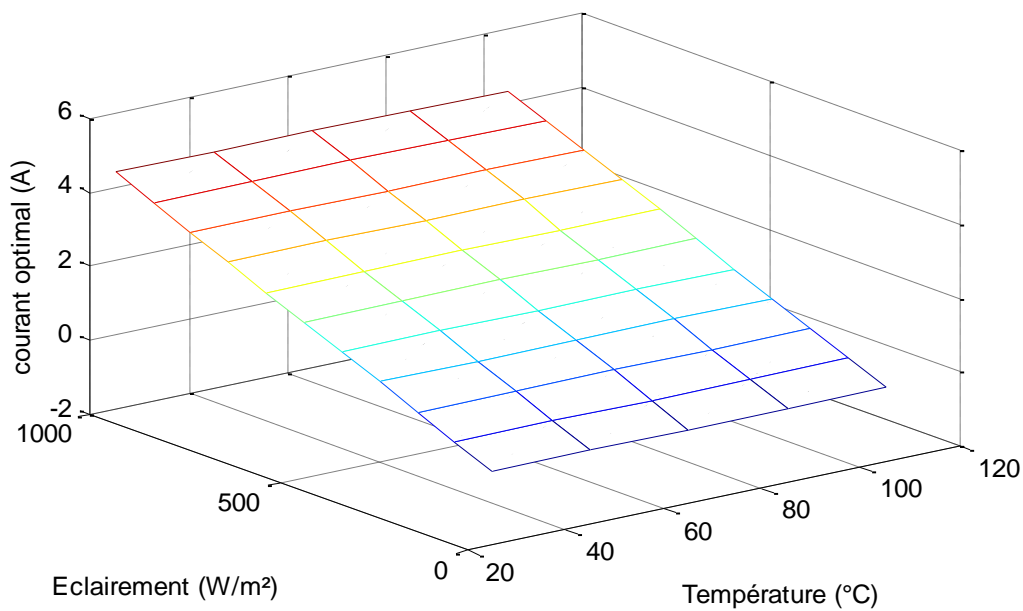


Figure 4. 35 : Variation du courant optimal du générateur PV en fonction de l'éclairement et la température

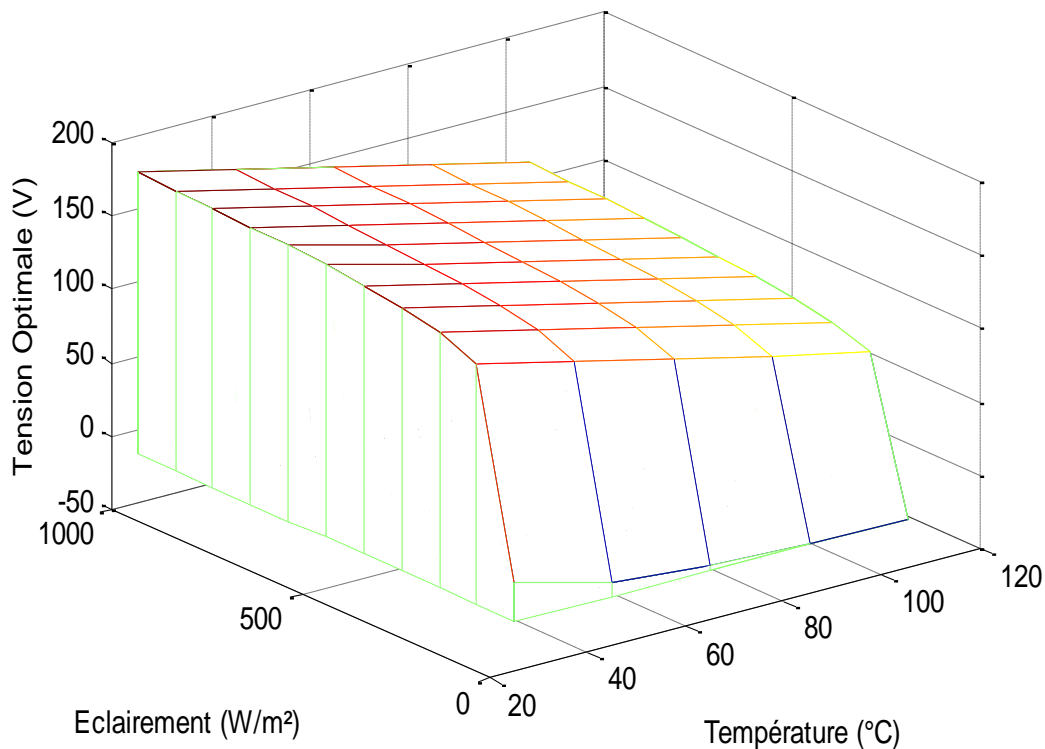


Figure 4.36 : Variation de la tension optimale en fonction de l'éclairement et la température

4.4 INTERPRETATION DES RESULTATS

Nous déduisons les remarques et les interprétations ci-dessous, concernant le comportement du système PV vis-à-vis des deux contrôleurs MPPT types "P&O" et "Flou" :

- Pour ces deux contrôleurs, nous remarquons l'effet de l'augmentation de la puissance produite par le système PV, causé par une diminution de la température T si est l'éclairement est fixe, ou encore causé par une augmentation de l'éclairement si la température est fixe.
- Dans les deux cas, le temps de convergence ou temps de réponse du contrôleur "Flou" est plus rapide que celui du contrôleur "P&O".
- Le contrôleur "P&O" présente des oscillations autour du PPM, tandis que le contrôleur "Flou" reste assez stable

- Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande assez difficile à optimiser

Pour le cas de l'application de la procédure génétique Il est clair que les deux courbes de la puissance de référence et celle de la sortie sont similaires ce qui assure l'utilisation complète de la puissance photovoltaïque pour toutes variations des conditions climatiques dans les trois cas. Ce qui prouve l'efficacité des algorithmes génétiques pour l'amélioration des contrôleurs flous.

Pour la comparaison entre le contrôleur flou et celui optimisé OFLC ce dernier montre plus de performances et plus de robustesse que le Contrôleur FLC du côté de temps de réponse ainsi une diminution des fluctuations dans le régime transitoire ce qui gagne de l'énergie photovoltaïque.

L'efficacité du système qui peut être évaluée par le calcul du rapport de puissance, qui représente la puissance maximale qui peut être générée à la sortie de l'onduleur sous certaines conditions il est donné par:

$$\lambda = \frac{\sum P_{sor}}{\sum P_{ref}} \times 100(\%) \quad (4.19)$$

. $\lambda = 99.99\%$ pour les trois cas, c'est une valeur théorique, on a négligé les pertes de commutations c.à.d. un système idéal.

4.5 CONCLUSION

L'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer de manière considérable et efficace le rendement des installations photovoltaïques sous les variations des conditions climatiques (l'éclairement et la température). Dans ce contexte on a proposé une comparaison des MPPT différentes : MPPT par P&O, MPPT floue et MPPT floue optimisée par algorithmes génétiques.

Premièrement on a fait une comparaison entre le contrôleur P&O et le contrôleur flou où dans les deux cas (variation de l'éclairement à température constante et variation de la température à éclairement constant), le temps de convergence du contrôleur "Flou " est plus rapide que

celui du contrôleur "P&O" ainsi ce dernier présente des oscillations autour du PPM, tandis que le contrôleur "Flou" reste assez stable.

Pour montrer l'efficacité des algorithmes génétiques dans la conception du contrôleur flou on a optimisé la meilleure base de règle sous les différentes conditions climatiques. D'après les résultats obtenus on constate que le contrôleur flou génétique a fait la poursuite du point de puissance maximal avec une haute performance et une rapide réponse lors des changements de l'éclairement ou la température tout en conservant une bonne précision, un robuste control et moins couteux avec une réduction de fluctuations. L'application des algorithmes génétiques a évitée le besoin d'un expert pour trouver la base des règles convenable pour chaque cas, ce qui gagne le temps.

Ce qui montre l'importance et l'intérêt des AG dans l'amélioration des performances du contrôleur flou dans les systèmes PV.

Conclusion Générale et Perspectives

L'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière ; de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau électrique.

La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très importante pour analyser le fonctionnement du système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et de la température. Tout d'abord l'importance d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, ce type de connexion est indispensable pour augmenter le rendement et minimiser les pertes de transfère d'énergie.

Nous avons montré aussi que dans un système PV, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que grâce à des lois de commande spéciale MPPT. On propose le régulateur MPPT comme solution pour optimiser la puissance du générateur photovoltaïque quelques soit le taux de variation de l'éclairement et de la température

D'abord, nous avons étudié et analysé, en modélisant et en simulant le fonctionnement d'un système photovoltaïque, dont la charge est adaptée par l'intermédiaire d'un onduleur. La régulation est assurée par deux types de commande MPPT : La commande classique "Perturb and Observ" et une commande découlant de l'intelligence artificielle flou et les algorithmes

Conclusion générale

génétiques. La dernière approche est utilisée pour développer les bases de règles dans les variations climatiques.

Les comparaisons effectuées entre les deux types de commandes 'Flou' et 'P&O' confirment que l'utilisation du contrôleur "Flou " permet d'un côté, de minimiser le temps de réponse du système de commande. D'un autre côté, il permet d'améliorer le rendement du contrôleur MPPT ce qui a pour objectif de diminuer les fluctuations du régime transitoire. Cela augmente l'efficacité du contrôleur MPPT de type "Flou " et assure une nette amélioration de la stabilité autour du PPM. En plus elle peut être mise en oeuvre dans un microcontrôleur à faible coût.

La conception d'une commande floue optimisée en employant des algorithmes génétiques assurant l'optimisation des différents gains et paramètres des systèmes flous. Ce qui montre l'efficacité des algorithmes génétiques dans la conception des contrôleurs flous pour accomplir un contrôle de poursuite rapide, précis et robuste des convertisseurs statiques. En effet, cette technique constitue un moyen efficace pour exploiter la puissance des contrôleurs flous dans le control des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.

Après les résultats encourageants de la simulation, on peut dire qu'on a dépassé le problème de la recherche de la puissance maximale pour un générateur photovoltaïque dans tous les variations brusques des conditions climatiques telles que l'ensolleiment et la température ces deux paramètres influes directement sur le rendement de la cellule photovoltaïque.

En conclusion, nous pouvons dire que les algorithmes génétiques représentent un outil très puissant pour la conception des contrôleurs intelligents.

Ces travaux ont également dégagés des perspectives à plus long terme.

Perspectives

Dans un travail futur, pour améliorer le fonctionnement du système photovoltaïque du côté rapidité et précision on va optimiser les fonctions d'appartenances, la base de règle et les gains du contrôleur flou en même temps, ce qui change la structure du chromosome.

Aussi il est souhaitable de mener une optimisation jusqu'à sa validation expérimentale. Ceci permettra d'analyser l'impact des incertitudes sur la justesse des résultats et de tester les études de robustesse (réalisées par simulation) qui devraient eu prévoir une information suffisante (et réaliste) de la marge d'erreur.

Bibliographie

- [1] Thi Minh Chau LE 'Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects Contrôle / Commande et rejets des perturbations' Thèse de doctorat à l'Université de Grenoble en Génie électrique, 2012.
- [2] Amar Ouyache Mohamed 'Contribution à l'Optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque' Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Constantine 1, 2014.
- [3] Brahami Imen Souhila 'Optimisation du Fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque par guidage automatique des panneaux Solaires' Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2018.
- [4] Ouahib Guenounou 'Méthodologie de conception de contrôleurs Intelligents par l'approche génétique application à un bioprocédé' Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse 2009.
- [5] Hanaa Hachimi 'Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications' Thèse de Doctorat, spécialité : Optimisation des structures, université Mohammed V Agdal, 2013.
- [6] Makhlouf Messaoud 'Modélisation et Optimisation de systèmes de Production d'énergies renouvelables couplé au réseau' Thèse de Doctorat en science en Electrotechnique 2012.
- [7] Dariga Meekhun 'Réalisation d'un Système de Conversion et de Gestion de l'Energie d'un Système Photovoltaïque pour l'Alimentation des Réseaux des Capteurs sans Fil Autonome pour l'Application Aéronautique' Thèse de Doctorat, Discipline Génie électrique, Université de Toulouse, 2010.
- [8] Xuan-Linh Dang 'Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques /Stockage distribué. Impact de leur intégration à un réseau fragile' Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan 2015.
- [9] Hassaine Linda 'Onduleurs Photovoltaïques Connectés au Réseau Electriques' Recherche et Développement, pp : 8-10.
- [10] Boutlilis Fatima 'Modélisation et simulation des sources de production décentralisées application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique' Thèse de Doctorat en Electrotechnique université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem 2018.
- [11] Petibon Stéphane 'Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l'Energie pour les Applications Photovoltaïques' Thèse de Doctorat Discipline ou Spécialité Génie Electrique Université de Toulouse III, Paul Sabatier, 2009.

Bibliographie

- [12] Stéphane Vighetti 'Systèmes Photovoltaïques Raccordés au Réseau électrique : Choix et Dimensionnement des Etages de Conversion' Thèse de Doctorat Institut National de Grenoble 2010.
- [13] Sabir Ouchen 'Contribution à la commande de puissance dédiée au filtrage actif, associé à une source photovoltaïque' Thèse de Doctorat LMD en Génie Electrique, Université de Biskra, 2017.
- [14] Violaine Didier 'Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques : Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances' HESPUL Aout 2007.
- [15] Thi Minh Chau Li 'Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle/commande et rejet des perturbations' Thèse de Doctorat Université de Grenoble, 2012.
- [16] Abbessen Lyes 'Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.
- [17] Bechouat Mohcene 'Commandes non Linéaires des Systèmes Photovoltaïques' Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université 8 Mai 1945 Guelma, 20017.
- [18] Eram T., Chapman P.L 'Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques', Grainger Center for Electric Machinery and Electromechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [19] Khenfer Riad 'Détection et isolation des défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques' Thèse de Doctorat en sciences, option Automatique, Université Ferhat Abbas Sétif 1.
- [20] Bencherif Mohammed 'Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et Eoliens intégration dans un système hybride basse tension' Thèse de Doctorat en Physique, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen.
- [21] M.U.Siddiqui, M.Abido 'Parameter estimation for five and seven parameter photovoltaic electrical models using evolutionary algorithms applied soft computing' 13 (2013) pp:4608-4621.
- [22] A.Messai, A.Mellit, A.Guessoum, S.A.Kalogirou 'Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation' Solar Energy 85 (2011) pp: 265-277.
- [23] K. Punitha, D. Devaraj, S. Sakthivel 'Development and analysis of adaptive fuzzy controllers for photovoltaic system under varying atmospheric and partial shading condition applied soft computing' 13 (2013) pp: 4320-4332.
- [24] Adel Mellit, Soteris A. Kalogirou 'Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications' A review Progress in energy and combustion science 34 (2008) pp: 534-632.
- [25] Anastasios I.Dounis, Panagiotis Kofinas, Constantine Alafodimos, Dimitrios Tseles 'Adaptive fuzzy gain scheduling PID Controller for maximum power point tracking of photovoltaic system' renewable energy 60 (2013) pp: 202-214.

Bibliographie

- [26] Tomas Mambrini 'Caractérisation des panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies' Thèse de Doctorat, discipline physique, Université Paris-Sud, 2014.
- [27] J.P. Charles, I. Mekkaoui-Alaoui, G. Bordure, and P. Mialhe, 'A critical study of the effectiveness of the single and double exponential models for I-V characterization of solar cells', *Solid-State Electronics*, Vol. 28, No. 8, Aug. 1985, pp. 807-820.
- [28] Mario Pagliaro, Giovanni Palmisano, and Rosaria Ciriminna 'Flexible Solar Cells', WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 208, pp 49-56.
- [29] N. Veissid, D. Bonnet, and H. Richter, 'Experimental investigation of the double exponential model of a solar cell under illuminated conditions: considering the instrumental uncertainties in the current, voltage and temperature values', *Solid-State Electronics*, Vol. 38, No. 11, Nov. 1995, pp. 1937-1943.
- [30] Tony Weir John Twidell, 'Renewable Energy Resources', Taylor & Francis 206, pp 220.
- [31] Jones, C.P Underwood.2002 'A modeling method for building-integrated PV systems', *Solar Energy* 70 (4):349-359.
- [32] Tom Markvart and Luis Castaner, 'Practical Handbook of Photovoltaic: Fundamentals and Applications', ELSEVIER 203, pp 93, 413, 547, 572.
- [33] Terki Amel 'Contrôle flou génétique hybride d'un moteur BLDC dans un système de pompage PV' Thèse de Doctorat Biskra, 2012.
- [34] Guy Chateigner, Michel Boës, "Manuel de génie électrique", Dunod, 2007.
- [35] Wei Wu 'Synthèse d'un Contrôleur Flou par Algorithme Génétique : Application au Réglage Dynamique des Paramètres d'un Système' Thèse de Doctorat de l'université de Lille 1998.
- [36] Talbi Nesrine 'Conception des systèmes d'inférence floue par des approches hybrides : Application pour la commande et la modélisation des systèmes nonlinéaires' Thèse de Doctorat en électronique, université de Constantine 1, 2014.
- [37] Lotfi Baghli 'Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique Floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques' Thèse de Doctorat à l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electric 1999.
- [38] Harrouche Fateh 'Etude comparative de deux méthodes d'optimisation d'un système de classification des défauts mécaniques par la logique floue' Thèse de doctorat en sciences, Ferhat Abbas Sétif 1, 2019.
- [39] Nicolas Durand 'Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion du trafic aérien' Habilitation à diriger des recherches, Ecole doctorale : Informatique et télécommunications, 2004.
- [40] Mokeddem Diab 'Contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes génétiques' Thèse de Doctorat en sciences en électronique, université Ferhat abbas de Sétif, 2010.
- [41] Saidi Mohamed El-Fatih 'Amélioration de la Robustesse d'un Classifieur Flou par Apprentissage' Mémoire de Magister Université de Tlemcen, 2015.

Bibliographie

- [42] Souquet Amédée 'Algorithmes Génétiques' TE de fin Tutorat de Mr Philip Audebaud 2004.
- [43] Stefane Daraban, Dorin Petreus, Cristina Morel 'A novel global MPPT based on genetic algorithms for photovoltaic systems under the influence of partial shading' IEEE 2013.
- [44] Bhubaneswari Parida, S. Iniyar, Ranko Goik 'A review of solar photovoltaic technologies' Renewable Sustainable Energy Reviews 15 (2011), pp:1625-1636.
- [45] Sinergrid Prescriptions 'Techniques spécifiques de raccordement d'installations de production décentralisée fonctionnant en parallèle sur le réseau de distribution' Fédération des Gestionnaires de Réseaux Electriques et Gaz en Belgique.
- [46] Mahdi Rajabi Vincheh, Abbas Kargar, Gholamreza arab markadeh 'A hybrid control method for maximum power point tracking (MPPT) in photovoltaic systems' Arab J Sci Eng (springer1).
- [47] C.Larbes, S.M. Ait Cheikh , T.Obeidi, A.Zergurras 'Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system' Renewable Energy 34(2009) , pp:2093-2100.
- [48] M.Adly, A.H. Besheer 'A meta heuristics search algorithm as a solution for energy transfer maximization in stand-alone photovoltaic systems' Electrical Power and Energy Systems 51 (2013), pp:243-254.
- [49] Protin, L. and S. Astier 'Convertisseurs photovoltaïques' in TI-d3360. 1997, Techniques d'Ingénieur.
- [50] D. Dondi, et al 'Modeling and optimization of a solar energy harvester system for self-powered wireless sensor network' IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2008. 55(7): p. 2759-2766.
- [51] Alonso, C 'Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie'. 2003, Université PAUL SABATIER – Toulouse III.
- [52] G. K. Sing 'Solar power generation by PV(photovoltaic) technology' A Review Energy 53 (2013) pp: 1-13.
- [53] Chawu Li, Xianwen Gaw, Lina Wang, Sunjun Liu 'A novel maximum power point tracking control method with variable weather parameters for photovoltaic systems' Solar Energy 97 (2013) pp: 529-536.
- [54] Chun hua Li, Xin Jian Zhu, Guang-yi Cao, Wan-qi Hu, Sheng SUI, Ming-ruo Hu 'A maximum power point tracker for photovoltaic energy systems based on fuzzy neural networks' Journal of Zhejiang University Science A (2009) 10(2) pp: 263-270.
- [55] G. A. Rampinelli, M. A. A. Teyra, A. Krenzinger and C. W. M. Pried 'Artificial intelligence techniques applied to energetic analysis of photovoltaic systems' IEEE Latin America Transactions Vol. 8, No. 5, September 2010 pp: 512-518.
- [56] Slimane Hadji, Jean Paul Gaubert, Fateh Krim 'Genetic algorithms for maximum power point tracking in photovoltaic systems' IEEE (2011) Power Electronics and Applications (EPE), Proceedings of the 2011-14th European Conference .

Bibliographie

- [57] N. Patcharaprakiti and S. Premrudeepreechacharn, member IEEE 'Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system' IEEE 2002 pp:372-377.
- [58] J.David Irwin, Mohammed. H. R ASHID 'Power Electronic Handbook' University of West Florida Joint and Computer Engineering, copy right 2001 by Academic Press.
- [59] N.Aouchiche and all 'Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation' Revue des Energies Renouvelables Vol 16 N°3 (2013) 485-498.
- [60] Slimane Hadji, Fateh Krim, Jean Paul Gaubert 'Development of an algorithm of maximum power point tracking for photovoltaic systems using genetic algorithm' IEEE 2011 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WOSSPA) pp: 43-46.
- [61] A. Bouilouta, A. Mellit, S.A. Kalogirou 'New MPPT method for a stand alone photovoltaic systems operating under partially shaded conditions' Energy 55 (2013) pp: 1172-1185.
- [62] K. Punitha, D. Devaraj, S. Sakthivel 'Development and analysis of adaptive fuzzy controllers for photovoltaic system under varying atmospheric and partial shading condition' Applied Soft Computing 13 (2013) pp: 4320-4332.
- [63] Shiqiong Zhou, Longyun Kang, Jing Sun, Guifang Guo, Bo Cheng, Binggang Cao, Yiping Tang 'A novel maximum power point tracking algorithms for stand alone photovoltaic system' International Journal of Control, Automation and Systems (2010) 8(6) pp: 1364-1371.
- [64] Rebei Najet, Ben Ghenem Belgacem, Hassnaoui Othman 'Modelling and control of photovoltaic energy conversion connected to the grid' Front Energy 2012,6(1) pp: 35-46.
- [65] Syamsiah Mashohor, Khairulmizam Samsudin, Amirullah M.Noor and Adi Razlan A.Rahmene 'Evaluation of genetic algorithm based solar tracking system for photovoltaic panels' IEEE 2008 pp:269-273.
- [66] G. A. Rampinelli, M. A. A. Teyra, A. Krenzinger and C. W. M. Pried 'Artificial intelligence techniques applied to energetic analysis of photovoltaic systems' IEEE Latin America Transactions Vol. 8, No. 5, September 2010 pp: 512-518.
- [67] Eleonora D'Andrea and Beatrice Lazzarini 'Computational intelligence techniques for solar photovoltaic system applications' IEEE Sustainable Internet and ICT for Sustainability (sustainIT), 2012.
- [68] M. Dahmane, Student member IEEE, J. Bosche, A. El Hajjaji and X. Pierre 'MPPT for photovoltaic conversion systems using genetic algorithm and robust control' American Control Conference 2013 pp: 6596-6600.
- [69] Lance C. C. Fung, member IEEE 'Combined fuzzy-logic and genetic algorithm technique for the scheduling of remote area power system' IEEE 2000 Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27, January, Syngapore, pp: 1069-1074 Vol. 2.
- [70] Suttichai Premrudeepreechacharn, Tongrak Poapornsawan 'Fuzzy logic control of predictive current control for grid connected single phase inverter' IEEE 2000.

Bibliographie

- [71] A. J. Davis, Z. M. Salameh 'Fuzzy logic modeling of a grid-connected wind/photovoltaic system with battery storage' IEEE 2004.
- [72] Noppadol Kuchintung, Chaiboon Kangsajiann and Phaophak Sirisuk, Anatawat Kunakorn 'Grid-connected photovoltaic system with maximum power point tracking using self-organizing fuzzy logic controller' IEEE 2005.
- [73] Bo Yang, Jiande Wu, Xiaodong Lu, Xiangning He, Senior member IEEE 'An Improved DSP-based control strategy with predictive current control fuzzy voltage control for grid-connected voltage source inverters' IEEE 2008.
- [74] Yiwang Wang, Fengwen Cao 'Implementation of a novel fuzzy controller for grid-connected photovoltaic system' IEEE 2009.
- [75] Guohui Zeng, Qizhong Liu 'An Intelligent fuzzy method For MPPT of photovoltaic arrays' Second International Symposium on Computational Intelligence and Design 2009 pp:356-359.
- [76] Subiyanto, A Mohamed, M A Hannan 'Maximum power point tracking in grid connected PV system using a novel fuzzy logic controller' IEEE 2009 pp:349-352.
- [77] F. Bouchafaa, D. Beriber, M. S. Boucherit 'Modeling and control of a grid connected PV generation system' IEEE 2010 18th Mediterranean Conference in Control and Automation' pp: 315-320. Très important
- [78] Venkateshwarlu Kotha 'Maximum power point tracking with fuzzy logic approach for grid connected photovoltaic system' IEEE 2010 5th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIIS 2010 pp: 586-589.
- [79] F. Bouchafaa, D. Beriber, M. S. Boucherit 'Modeling and simulation of a grid connected PV generation system with MPPT fuzzy logic control' IEEE 2010 7th International Multi-Conference on Systems, Signal and Devices.
- [80] Nguyen Gia Minh Thao, Mai Tuan Dat, Tran Cong Binh, Nguyen Huu Phuc 'PID-fuzzy logic hybrid controller for grid-connected photovoltaic inverters' IEEE IFOST 2010 Proceeding pp: 1-5.
- [81] Md. Asiful Islam, A. B. Taludar, Nur Mohammad, P K Shadhu Khan, senior member IEEE 'Maximum power point tracking of photovoltaic arrays in Matlab using fuzzy logic controller' IEEE 2010 Annual IEEE India Conference INDICON.
- [82] Md Ismail Hossain, Shakil Ahamed Khan, Md Shafiullah, Mohammad Jakir Hossain 'Design and implementation of MPPT controlled grid connected photovoltaic system' IEEE 2011 Symposium on Computers & Informatics pp: 284-289.
- [83] B.N. Alajmi, K. H. Ahmed, G. P. Adam, S. J. Fenney and B. W. Williams 'Modular multilevel inverter with maximum power point tracking for grid connected photovoltaic application' IEEE 2011 pp: 2057-2062.
- [84] Chao Ma, Dagui Huang 'Comparative study of PI controller and fuzzy logic controller for three- phase grid-connected inverter' IEEE 2011 International Conference on Mechatronics and Automation pp: 2067-2071.

Bibliographie

- [85] D. Menniti, member IEEE, A. Pennarelli, member IEEE, G. Brusco, member IEEE 'Implementation of a novel fuzzy-logic based MPPT for grid-connected photovoltaic generation system' IEEE 2011 Trondheim power techn.
- [86] Meral Ozarslan Yatak, Omar Faruk Bay 'Fuzzy control of a grid connected three phase two stage photovoltaic system' IEEE 2011 Proceedings of the international Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.
- [87] R. Mechouma, B. Azoui, M. Chaabane 'Three phase grid connected inverter for photovoltaic system' a Review IEEE 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology pp: 37-42.
- [88] T. Ilakkia, G. Vijayagowri, member IEEE 'Hybrid PV/Wind system for reduction of harmonics using artificial intelligence technique' IEEE 2012 International Conference on Advances in Engineering , Science and Management ICAESM pp: 303-308.
- [89] Bader N Alajmi, Khaled H. Ahmed, Senior member IEEE, Grain Philip Adam and Barry W Williams 'Single phase single stage transformer less grid connected PV system' IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 28, NO. 6, June 2013 pp: 2664-2676.
- [90] Tzu-Chi Huang, Yu-Huei Lee, Ming-Jhe Du and all 'A Photovoltaic system with analog maximum power point tracking and grid-synchronous control' 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 pp: LS1d.3-1-LS1d.3-6.
- [91] Nilesh Shah, R. Chudamani 'A Novel algorithm for global peak power point tracking in partially shaded grid-connected PV system' IEEE International Conference on Power and Energy (PEcon) 2012 pp: 558-563.
- [92] Arun Kumar Verma Student member IEEE, Bhim Singh and D. T. Chahani 'Fuzzy logic based MPPT control of grid interfaced PV generating system with improved power quality' IEEE 2012.
- [93] P. Thirumurugan, R. Preethi, B. Sangeetha 'Comparison of closed loop control for three-level and five-level inverter for photovoltaic system' IEEE International Conference on Communication and Single Processing 2013 pp: 240-244.
- [94] Nguyen Gia Minh Thao, Kenko Uchida 'Control the photovoltaic grid-connected system using fuzzy logic and backstepping approach' IEEE 2013.
- [95] E. Kamal, A. Aichouche and Oena Kuzmych 'Robust fuzzy controller for photovoltaic maximum power point tracking' IEEE 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) 2013 pp: 1304-1309.
- [96] Ayaz Ahmad, Dr L Rajaji 'Modeling and design of a novel control algorithm for grid connected photovoltaic (PV) inverter system' IEEE Third International Conference on Advances in Computing and communications 2013 pp: 359-362.
- [97] Nguyen Gia Minh Thao, Kenko Uchida 'Control the active and reactive powers of three phase grid-connected photovoltaic inverters using feedback linearization and fuzzy logic' IEEE 2013 Australian Control Conference pp: 133-140.
- [98] Hamad M S Fahmy, A M and Abdel Geleil M 'Power quality improvement of a single-phase grid-connected PV system with fuzzy MPPT controller' IEEE 2013 pp: 1839-1844.

Bibliographie

[99] S. Vasantharaj, G. Vinodhkumar, M. Sasikumar 'Development of a fuzzy logic based, photovoltaic maximum power point tracking control system using boost converter' IEEE Third International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System (SEISCON) 2012.

[100] Pierre Papet 'Nouveaux concepts pour la réalisation de cellule Photovoltaïque à Contacts Interdigités sur substrats minces en silicium cristallin' Thèse de Doctorat Institut National des sciences Appliquées de Lyon.

Annexe

Pièce d'identité du module AEG-40

Le module AEG-40 est l'élément constitutif de notre générateur photovoltaïque. Il est constitué de 35 cellules carrées au silicium monocristallin, où chaque photopile présente 10 cm de coté. Ce module possède les caractéristiques suivantes fournies par le constructeur à 1000(w/m²) et 25⁰c :

- Puissance crête = 38.4Wp
- Courant de court-circuit = 2.41A.
- Tension à circuit ouvert = 22.4V.
- Courant optimum = 2.2A.
- Tension optimale = 17.45V.
- Résistance série = 0.45Ω.
- Coefficient de variation du courant en fonction de la température = 0.6 % /⁰c.
- Coefficient de variation de la tension en fonction de la température = 0.4 %/ ⁰c.
- np = 2
- ns = 10
- RsG = 0.50 * ns / np
- IshG = 2.41 * np
- VocG = 22.4 * ns
- IopG = 2.2 * np
- VopG = 17.45 * ns