

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département d'Électronique

Laboratoire des Dispositifs de Communication et de

Conversion Photovoltaïque



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique



Thèse de Doctorat en

Électronique

Présentée par :

Mme OBEIDI née Gül Filiz TCHOKETCH KEBIR

Magister en Électronique, ENP

Contribution à la commande et à l'optimisation de l'énergie dans un système photovoltaïque

Soutenue devant le jury composé de :

Président	M. Mourad HADDADI	Professeur	ENP
Directeur de thèse	M. Chérif LARBES	Professeur	ENP
Co-Directeur de thèse	M. Adrian ILINCA	Professeur	UQAR - Canada
Examineur	M. Mohamed Salah AIT CHEIKH	Professeur	ENP
Examineur	M. Ali MALEK	Directeur de Recherche	CDER
Examineur	Mme. Linda BARAZANE	Professeur	USTHB
Examineur	Mme. Linda HASSAINE	Maitre de recherche	CDER

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique
Département d'Électronique
Laboratoire des Dispositifs de Communication et de
Conversion Photovoltaïque



Thèse de Doctorat en

Électronique

Présentée par :

Mme OBEIDI née Gül Filiz TCHOKETCH KEBIR

Magister en Électronique, ENP

Contribution à la commande et à l'optimisation de l'énergie dans un système photovoltaïque

Composition du Jury :

Président	M. Mourad HADDADI	Professeur	ENP
Directeur de thèse	M. Chérif LARBES	Professeur	ENP
Co-Directeur de thèse	M. Adrian ILINCA	Professeur	UQAR - Canada
Examineur	M. Mohamed Salah AIT CHEIKH	Professeur	ENP
Examineur	M. Ali MALEK	Directeur de Recherche	CDER
Examineur	Mme. Linda BARAZANE	Professeur	USTHB
Examineur	Mme. Linda HASSAINE	Maitre de recherche	CDER

ENP 2020

الخلاصة: نستخدم إستراتيجية تتبع نقطة الحد الأقصى للقوة MPPT بشكل عام لتعظيم القدرة التي تنتجها المولدات الكهروضوئية . في هذا العمل، اقترحنا طريقة تحكم بواسطة أسلوب المنطق الضبابي في أبسط قاعدتها والذي قدم أداءا عاليا جدا للحصول على أقصى قدر من التتبع لطاقة المخرج، وقد اعطي سرعة قصوى للسعي لاستخراج أقصى طاقة، استقرار جيد ومتانة. استخدمنا وحدة تحكم ضبابي على أساس اختيار خاص لمجموعة من المداخل والمخارج. يستند اختيار المداخل والمخارج، بالإضافة إلى القواعد الغامضة، إلى مبادئ التحليل الرياضي لخصائص المشتق من أجل إيجاد الذروة. بالإضافة إلى ذلك، أظهرنا أنه يمكننا الحصول على أفضل النتائج والاستجابات للوحدة الكهروضوئية باستعمال أبسط نموذج ضبابي ممكن باستخدام 3 مجموعات فقط من المتغيرات اللغوية المركبة لدوال المجموعات التحتية الضبابية للمداخل والمخارج للنظام الكهروضوئي . ثم نقارن هذه الوحدة قوية التحكم مع وحدة التحكم التقليدية (إز عاج ومراقبة). باستخدام Matlab-Simulink®. لمحاكاة سلوك النموذجين، يتم التحليل حسب سيناريوهات مختلفة لظروف مناخية ثابتة أو متغيرة.

كلمات البحث: تحكم المنطق الضبابي، MPPT : تتبع نقطة الطاقة القصوى، النظام الكهروضوئي، محول مستمر مستمر .

Abstract: The Maximum Power Point Tracking (MPPT) strategy is commonly used to maximize the produced power from photovoltaic generators. In this work, we proposed a control method with a fuzzy logic approach in its simplest base that offers significantly high performance to get a maximum power output tracking, which entails a maximum speed of power achievement, a good stability, and a high robustness. We use a fuzzy controller, which is based on a special choice of a combination of inputs and outputs. The choice of inputs and outputs, as well as fuzzy rules, was based on the principles of mathematical analysis of the derived functions (slope) for the purpose of finding the optimum. Also, we have proved that we can achieve the best results and answers from the system photovoltaic (PV) with the simplest fuzzy model possible by using only 3 sets of linguistic variables to decompose the membership functions of the inputs and outputs of the fuzzy controller. We compare this powerful controller with conventional perturb and observe (P&O) controllers. Then, we make use of a Matlab-Simulink® model to simulate the behavior of the PV generator and power converter, voltage, and current, using both the P&O and our fuzzy logic-based controller. Relative performances are analyzed and compared under different scenarios for fixed or varied climatic conditions.

Keywords: Fuzzy logic controller; MPPT: maximum power point tracking; photovoltaic system; step-up boost converter

Résumé : La stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) est couramment utilisée pour maximiser la puissance produite par les générateurs photovoltaïques. Dans ce travail, nous avons proposé une méthode de contrôle avec l'approche de logique floue dans sa base la plus simple offrant des performances très élevées pour obtenir un suivi maximal de la puissance de sortie, ce qui donne une vitesse maximale de la poursuite de la puissance maximale, une bonne stabilité et une grande robustesse. Nous utilisons un contrôleur Flou basé sur un choix spécial d'une combinaison d'entrées et de sorties. Le choix des entrées et des sorties, ainsi que des règles floues, était basé sur les principes de l'analyse mathématique des fonctions dérivées (la pente) dans le but de trouver l'optimum. En outre, nous avons prouvé que nous pouvions obtenir les meilleurs résultats et réponses du système photovoltaïque (PV) avec le modèle flou le plus simple possible en utilisant seulement 3 ensembles de variables linguistiques pour décomposer les fonctions d'appartenance des entrées et des sorties du contrôleur flou. Nous comparons ce puissant contrôleur avec le contrôleur conventionnel perturber et observer (P & O). Nous utilisons ensuite Matlab-Simulink® pour simuler le comportement du modèle de générateur PV et du convertisseur de puissance, de la tension et du courant, en utilisant à la fois P & O et notre contrôleur basé sur la logique floue. Les performances relatives sont analysées et comparées selon différents scénarios pour des conditions climatiques fixes ou variées.

Mots-clés : Contrôleur logique floue; MPPT: suivi du point de puissance maximale; système photovoltaïque; convertisseur Boost.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à Monsieur le Professeur **Chérif LARBES**, mon directeur de thèse au Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque (LDCCP), du Département d'Électronique, à l'École Nationale Polytechnique (ENP), pour avoir dirigé ce travail, pour ses qualités scientifiques et humaines, sa disponibilité, tout au long de ces années, malgré ses nombreuses et lourdes obligations et responsabilités. Qu'il trouve ici tout mon respect, ma reconnaissance et ma profonde gratitude.

Il m'est particulièrement agréable de pouvoir exprimer mes vifs et sincères remerciements à mon codirecteur de recherche, Monsieur **Adrian ILINCA** Professeur et directeur du Laboratoire de Recherches en Énergies Éoliennes (LREE), à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), qui m'a accueilli au sein de son laboratoire et ma fourni de l'aide sur tous les niveaux. C'est grâce à lui que j'ai pu concilier avec bonheur recherche théorique et appliquée pendant cette thèse.

Au Président du jury, Monsieur **Mourad HADDADI**, Professeur et Directeur du Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque, à l'École Nationale Polytechnique, pour avoir accepté d'être président de jury et pour sa disponibilité malgré ses nombreuses occupations. Avec toute ma gratitude et ma reconnaissance.

Aux autres membres du jury, les Professeurs M. **Mohamed Salah AIT CHEIKH** (Professeur à l'ENP), M. **Ali MALEK** (Directeur de Recherche au CDER), Mme. **Linda BARAZANE** (Professeur à l'USTHB) et Mme. **Linda HASSAINE** (Maitre de recherche au CDER), pour avoir fait partie de mon jury de thèse, accepté de lire et d'évaluer mon travail.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

TABLE DES MATIERES

Liste des Tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	15
Chapitre 1: Les systèmes photovoltaïques	18
1.1 Introduction	18
1.2 Ressource et rayonnement solaire.....	18
1.3 L'effet photovoltaïque.....	20
1.3.1 Module et champ photovoltaïque.....	22
1.3.2 Le champ de modules photovoltaïques.....	23
1.3.3 Implantation du champ de modules	24
1.3.4 Technologies de Production de cellules et de modules photovoltaïques.....	24
1.3.5 Normes et spécifications concernant les modules photovoltaïques.....	26
1.3.6 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque	27
1.4 Contrôle de l'énergie ou extraction de l'énergie maximale du système PV	30
1.5 Architecture PV-MPPT	32
1.6 Convertisseur continu-continu (DC/DC) (Hacheur).....	34
1.6.1 Hacheur survolteur « Boost converter »	36
1.6.1.1 Analyse d'un convertisseur élévateur.....	37
1.7 Stockage de l'énergie	40
1.7.1 Batterie	40
1.7.2 Les types de batterie.....	41
1.7.3 Modèle mathématique des batteries au plomb.....	44
1.8 Applications des systèmes photovoltaïques.....	47

1.8.1 Installations autonomes	47
1.8.2 Installations hybrides	48
1.8.3 Installations couplés au réseau basse tension.....	50
1.8.4 Installations fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque).....	53
1.9 Conclusion.....	55
Chapitre 2 : État de l'art des méthodes MPPT	57
2.1 Introduction.....	57
2.2 Principe de base de la recherche du MPPT.....	57
2.3 Différentes techniques d'extraction d'énergie maximale	61
2.3.1 Méthodes conventionnels.....	62
2.3.1.a Algorithme de Perturb & Observe (P&O).....	62
2.3.1.b Méthode Incremental Conductance (IC)	64
2.3.1.c Méthode de la tension de circuit ouvert (V_{co})	66
2.3.1.d Méthode du courant de court-circuit (I_{cc}).....	67
2.3.2 Méthodes intelligentes (Soft computing).....	68
2.3.2.a Algorithmes basés sur la logique floue (LF).....	69
2.3.2.b Contrôleur MPPT à base de réseaux de neurones artificiels (RNA).....	71
2.3.3 Contrôleur MPPT à base de méthodes d'intelligence artificielles	72
2.3.3.a Méthodes basées sur les algorithmes évolutionnaires	73
2.3.3.b Méthodes basées sur les algorithmes à base d'essaim	75
2.3.4 Contrôleur MPPT à base de méthodes hybrides	82
2.3.4.a Méthodes basées sur les systèmes neuro-flous (NF)	82
2.3.4.b Méthodes basées sur la logique floue combiné avec les algorithmes généétiques.....	85
2.4 Critères de sélection des commandes MPPT	86
2.5 Conclusion	87

Chapitre 3: Régulation par logique floue	89
3.1 Introduction	89
3.2 Bases générales de la théorie de la logique floue.....	90
3.2.1 Introduction à la logique floue.....	90
3.2.2 Théorie des ensembles flous	91
3.2.3 Variables linguistiques.....	93
3.2.4 Les différentes formes pour les fonctions d'appartenance	94
3.2.5 Opérations sur les ensembles flous.....	96
3.3 Relations floues	98
3.4 Composition floue	99
3.5 L'inférence floue	101
3.5.1. Règle floue	101
3.5.2 Raisonnement et prise de décision	102
3.6 La commande/régulation par logique floue	103
3.6.1 Introduction.....	103
3.6.2 Mise en œuvre d'un régulateur flou.....	103
3.6.3 Fuzzification des entrées	104
3.6.4 Base de règles et méthodes d'inférence.....	105
3.6.5 Défuzzification.....	112
3.6.6 Choix des différents paramètres d'un régulateur flou	113
3.6.7 Différents types de régulateur flou.....	115
3.7 Conclusion.....	116
Chapitre 4: Contrôleur MPPT à base de logique floue avec simulations et discussions	118
4.1 Introduction.....	118
4.2. I/ Contrôleur MPPT à base de logique floue	118

4.2. I/ 1. Méthodologie	118
4.2. I/ 2. Configuration du contrôleur flou	118
4.2. I/ 3. Fuzzification	119
4.2. I/ 4. La méthode d'inférence	121
4.2. I/5 Défuzzification.....	122
4.2. I/6 Extraire le PPM en utilisant les méthodes Perturb et Observe (P & O) et Floue.....	123
4.2. I/7 Modèles Simulink de simulation des contrôleurs comparée	124
4.2. II/ Simulations et discussions	125
4.2. II/ 1. Introduction.....	125
4.2. II/ 2. Modèle de simulation du système photovoltaïque	125
4.2. II/ 3. Résultats de simulation pour des conditions climatiques fixes	126
4.2. II/ 4. Résultats de la simulation pour les conditions climatiques changeantes	128
4.2. II/ 4.1. Résultats de simulation pour une température fixe à 25 ° C et une augmentation rapide de l'insolation de 500 Wm-2 à 1100 Wm-2	128
4.2. II/4.2. Résultats de la simulation pour une température fixe à 25 ° C et une augmentation lente de l'éclairement solaire de 500 Wm-2 à 650 Wm-2	129
4.2. II/ 4.3. Résultats de la simulation pour un ensoleillement fixe à 1000 Wm-2 et une diminution rapide de la température de 40 ° C à 10 ° C.....	130
4.2. II/ 4.4. Résultats de simulation pour une insolation fixe à 1 000 Wm-2 et une augmentation lente de la température de 25 ° C à 30 ° C	132
4.2. II/ 5. Conclusion	133
CONCLUSION GENERALE	135
Bibliographies.....	138

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Technologies de production de cellules photovoltaïques.....	25
Tableau 1-2 Différents convertisseurs DC-DC utilisés dans les applications solaires.....	35
Tableau 2-1 Tableau comparatif des caractéristiques de MPPT.....	86
Tableau 3-1 Résumé des implications les plus utilisées.....	101
Tableau 3-2 Exemple de matrice d'inférence.....	106

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion d'air masse AM.....	19
Figure 1.2 Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air mass.....	20
Figure 1.3 L'effet photovoltaïque.....	21
Figure 1.4 Branchement des diodes Bypass et de blocage avec les cellules solaires.....	23
Figure 1.5 Processus de fabrication de modules PV.....	26
Figure 1.6 Modèle électrique de circuit d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.....	27
Figure 1.7 Association des cellules PV en série.....	29
Figure 1.8 Association des cellules PV en parallèles.....	30
Figure 1.9 Variation du PPM en fonction de l'irradiation et de la température.....	31
Figure 1.10 Effet de charge sur la caractéristique photovoltaïque I-V.....	32
Figure 1.11 Architecture PV-MPPT.....	33
Figure 1.12 Changement de direction du rapport cyclique D pour le suivi du PPM.....	34
Figure 1.13 Schéma de principe du hacheur.....	34
Figure 1.14 Tension de sortie $v_o(t)$ du convertisseur C-C idéal.....	35
Figure 1.15 Circuit du convertisseur Boost idéal.....	36
Figure 1.16 Schéma électrique d'un convertisseur élévateur (Boost).....	37
Figure 1.17 Schéma équivalent d'un convertisseur élévateur à l'état ON.....	37
Figure 1.18 Schéma de base d'un convertisseur Boost a l'état OFF.....	38
Figure 1.19 Formes d'ondes du courant et de la tension dans un hacheur élévateur.....	39
Figure 1.20 Variation du rapport de transformation en fonction du rapport cyclique D pour un convertisseur Boost.....	40

Figure 1.21 Principe de stockage sous forme d'hydrogène.....	42
Figure 1.22 Principe de stockage au Li-Ion.....	43
Figure 1.23 principe de stockage à circulation.....	44
Figure 1.24 Modèle équivalent de la batterie.....	45
Figure 1.25 Systèmes PV autonomes.....	48
Figure 1.26 Systèmes hybrides PV éoliens.....	49
Figure 1.27 Système PV couplés aux réseaux (à injection directe et autonome).....	51
Figure 1.28 Système PV couplés aux réseaux (à injection pure).....	52
Figure 1.29 Système de pompage photovoltaïque.....	54
Figure 2.1 Association d'un GPV muni d'un algorithme MPPT avec le convertisseur DC-DC...	57
Figure 2.2 Illustrations des effets des différents convertisseurs DC-DC sur MPPT: a) Buck, b) Boost, c) Buck-Boost.....	60
Figure 2.3 Classification des différentes méthodes MPPT.....	61
Figure 2.4 Principe d'algorithme P&O.....	62
Figure 2.5 Organigramme de l'algorithme de Perturber & Observer « P&O ».....	63
Figure 2.6 Organigramme du contrôleur IC.....	65
Figure 2.7 Organigramme du contrôleur de la tension de circuit ouvert (V_{co}).....	66
Figure 2.8 Organigramme du contrôleur du courant de court-circuit (I_{cc})	67
Figure 2.9 Classification des méthodes MPPT intelligentes selon	69
Figure 2.10 Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue.....	70
Figure 2.11 Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue.....	71
Figure 2.12 Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur les réseaux de neurones.....	72
Figure 2.13 Principe de base des algorithmes évolutionnaires.....	73
Figure 2.14 Algorithme Génétique de base.....	74
Figure 2.15 Effet d'ombrage sur le point PPM des caractéristiques I-V et P-V.....	75

Figure 2.16 Inspiration de l’algorithme PSO lors de migration des oiseaux.....	76
Figure 2.17 Principe de PSO.....	78
Figure 2.18 Déplacement des fourmis lors de la recherche de nourriture.....	79
Figure 2.19 Principe de déplacement des abeilles.....	80
Figure 2.20 Principe de l’Algorithme de colonie d’abeilles.....	81
Figure 2.21 Principe de l’Algorithme de meutes de loups gris	82
Figure 2.22 Mise en œuvre du contrôleur MPPT à base de Neuro Floue ANFIS sur la logique..	84
Figure 2.23 Mise en œuvre du contrôleur MPPT à base de la méthode floue optimisé par les Algorithmes Génétiques.....	85
Figure 2.24 Classification des critères de sélection des contrôleurs MPPT	87
Figure 3.1 Degrés d’appartenance à la classe -jeune-.....	91
Figure 3.2 Fonctions d’appartenances de T (pression).....	94
Figure 3.3 Cas triangulaire.....	94
Figure 3.4 Cas trapézoïdal.....	94
Figure 3.5 Fonction d’appartenance en cloche.....	95
Figure 3.6 Diagramme pour interpréter la composition sup – star.....	99
Figure 3.7 Diagramme pour multiples relations floues.....	100
Figure 3.8 Diagramme interprétant la composition sup – star quand la première relation est un ensemble flou.....	100
Figure 3.9 Schéma de principe de la régulation floue.....	104
Figure 3.10 Fuzzification continue avec trois fonctions d'appartenance.....	105
Figure 3.11 ET (a,b), $f(a,b)=\min(a,b)$	109
Figure 3.12 ET (a,b), $f(a,b)=a.b$	109
Figure 3.13 Et (a,b)= $\min(a,b)$, logique de Godel.....	109
Figure 3.14 Obtention de pour un régulateur à deux règles avec : , implication booléenne:	110
Figure 3.15 Défuzzification de la sortie floue.....	113

Figure 3.16 Régulateur flou basé sur la logique floue.....	114
Figure 4.1 Configuration du contrôleur Flou.....	119
Figure 4.2 Fonctions d'appartenance des deux entrées: Input1, input2 et la sortie output, avec trois ensembles de variables linguistiques.....	120
Figure 4.3 Décisions de règles floues proposées.....	122
Figure 4.4 Composition max-min pour le calcul de la sortie ΔD	122
Figure 4.5 Organigramme de l'algorithme MPPT Perturb and Observe (P & O) utilisé.....	123
Figure 4.6 Représentation Simulink du système global PV avec un contrôleur à logique floue.....	124
Figure 4.7 Détails des sous-systèmes MPPT du contrôleur P & O.....	124
Figure 4.8 Résultats de la simulation pour des conditions climatiques fixes : insolation $S = 1000W / m^2$ et température $T = 25 ^\circ C$	127
Figure 4.9 Résultats de la simulation avec une augmentation rapide de l'éclairement solaire à $t = 30$ s de $S = 500W / m^2$ à $S = 1100W / m^2$ à température constante $T = 25 ^\circ C$	129
Figure 4.10 Résultats de la simulation avec une augmentation lente de $S = 500W / m^2$ ($t = 20$ s) à $S = 650W / m^2$ ($t = 80s$) à température constante $T = 25 ^\circ C$	130
Figure 4.11 Résultats de la simulation avec une diminution rapide de la température à $t = 30$ s de $T = 40 ^\circ C$ à $T = 10 ^\circ C$, avec un ensoleillement constant de $S = 1000 W / m^2$	131
Figure 4.12 Résultats de la simulation avec une augmentation lente de la température de $T = 25 ^\circ C$ ($t = 20$ s) à $T = 30 ^\circ C$ ($t = 80$ s), avec un ensoleillement fixe de $S = 1000W/m^2$	132

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PV Photovoltaïque.

MPPT poursuite du point de puissance maximale.

MPP Point de puissance maximale.

P & O Perturber et Observer.

q Charge électronique.

k constante de Boltzman.

E_g énergie de bande interdite du semi-conducteur.

R_s résistance en série.

R_p résistance en parallèle.

D Rapport Cyclique.

I_{sc} Courant de court-circuit.

V_{oc} tension circuit ouvert.

V tension d'entrée.

I courant de sortie.

I_{RS} courant de saturation inverse

I_s Courant de saturation

PWM Pulse Width Modulation

S insolation/ irradiation

T température.

P-V caractéristique photovoltaïque P (V).

I-V caractéristique photovoltaïque I (V).

Z nombre de cellules photovoltaïques connectées en série.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La conversion de l'énergie solaire à l'aide des générateurs photovoltaïques (PV) a connu un développement accéléré ces dernières années, aussi bien pour les petites que les grandes installations.

Cette source d'énergie propre, silencieuse et nécessitant que peu d'entretien, a connu le plus fort taux de croissance parmi les énergies renouvelables au niveau des réductions de leurs prix.

Son développement ultérieur nécessite donc de l'amélioration au niveau de l'efficacité de la conversion d'Énergie et au niveau du coût de tous les composants.

L'énergie électrique extraite par les générateurs photovoltaïques dépend d'une équation complexe reliant le rayonnement solaire, la température et la résistance totale du circuit, ce qui entraîne une variation non linéaire de la puissance de sortie P en fonction de la tension V du circuit sous la forme $P = f(V)$ [1-3]. On peut observer qu'il existe un point unique, dans des conditions d'insolation (le rayonnement solaire) et de température donnée, dans lequel le générateur PV produit une puissance maximale appelée PPM (Point de Puissance Maximale). Ce PPM est atteint lorsque le changement du taux de variation de la puissance en fonction de la tension est égal à zéro. La relation non linéaire entre la puissance produite par le générateur PV et les conditions environnementales rend l'efficacité de la conversion des générateurs solaires relativement faible, de sorte que l'optimisation de l'extraction de la puissance devient un élément clé de la conversion de l'énergie solaire [4, 5].

Les systèmes photovoltaïques sont généralement connectés à des convertisseurs statiques (C-C) pilotés par des contrôleurs programmés qui analysent en permanence la puissance fournie par le générateur solaire. Ces contrôleurs MPPT ajustent les paramètres pour extraire le maximum d'énergie quelles que soient la charge et les conditions atmosphériques [6]. Les méthodes MPPT décrites dans les différentes publications utilisent différentes techniques et algorithmes dont les performances diffèrent largement, telles que la vitesse de convergence, la complexité de la mise en œuvre, la précision et, surtout, le coût de la mise en œuvre de l'ensemble de la configuration [7].

Ce travail se concentre sur le développement d'une méthode d'analyse mathématique couplée logique floue, en tant que technique de suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracker : MPPT) appliqué sur un régulateur intelligent à base de logique floue, en cherchant pour lui la forme la plus simple qui peut exister pour le concevoir, et qui peut donner de meilleurs et d'excellents résultats dans un système photovoltaïque afin d'augmenter la puissance extraite par le générateur photovoltaïque [8].

Cette thèse est organisée comme suit :

Le premier chapitre est réservé à l'étude du système photovoltaïque ; en commençant par une présentation du panneau photovoltaïque, nous expliquons ensuite toutes les parties constituant l'architecture et le fonctionnement d'un système PV-MPPT. Ainsi que tous détails concernant l'exploitation de l'énergie maximale des systèmes PV.

Dans le deuxième chapitre un état de l'art des techniques MPPT est élaboré.

On donne les notions de bases de la théorie des ensembles flous, dans le troisième chapitre. Nous présentons ensuite les différentes parties composant un régulateur flou.

Dans le but d'améliorer les performances de la technique de poursuite MPPT (qui sont : la vitesse de convergence, la précision, la facilité de mise en œuvre et le coût réduit), nous avons développé dans le quatrième chapitre, notre méthode de contrôle utilisant la logique floue qui a été appliquée à un convertisseur élévateur (Boost) destiné pour les générateurs PV. On présente ainsi le contrôleur MPPT classique le plus populaire basé sur l'algorithme P & O. Ces deux techniques d'extraction de maximum d'énergie ont été étudiées et analysées par simulation à l'aide de Matlab-Simulink® dans la deuxième partie de ce chapitre. Une comparaison des performances des deux méthodes est également présentée.

Une conclusion sur les résultats obtenus et les perspectives de ce travail finalise cette thèse.

Chapitre 1

Les systèmes photovoltaïques

Chapitre 1: Les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

L'évolution des systèmes photovoltaïques nécessite l'amélioration de leurs performances et la réduction des coûts de l'ensemble de tout le système photovoltaïque. Les modules photovoltaïques ont un point de fonctionnement de puissance maximale qui dépend des conditions environnementales comme l'intensité de la lumière, la température du module photovoltaïque et la charge. Pour exploiter le maximum de l'énergie solaire, la puissance de sortie d'un système photovoltaïque doit être maximisée par l'amélioration de ces performances, ceci se fait par l'implémentation d'un contrôleur qui adapte la puissance et qui fait poursuivre automatiquement le système au point de puissance maximale délivrée par le panneau solaire sous toutes les conditions.

Dans ce premier chapitre nous rassemblant toutes explications concernant chaque partie constituant un système PV, ainsi que tous détails concernant l'exploitation de l'énergie maximale des systèmes PV.

1.2 Ressource et rayonnement solaire

Considéré dans l'Antiquité comme un Dieu, le soleil aujourd'hui se réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il faut la capter, la transformer et la stocker. Le soleil, notre plus grande source d'énergie, une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre, émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm [9]. Ce rayonnement est composé de grains de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante [10].

$$E_p = \frac{h.c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre en traversant l'atmosphère. Ceci est dû essentiellement à l'absorption partielle du rayonnement par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Le flux énergétique reçu au sol ne dépasse pas 1 000 W/m^2 [11]. Ce flux est fonction de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Pour tenir compte de la position relative du soleil qui

modifie l'épaisseur de l'atmosphère traversée, on introduit un coefficient AM appelé nombre d'air masse [9]. La figure 1.1 ci-dessous illustre ce principe.

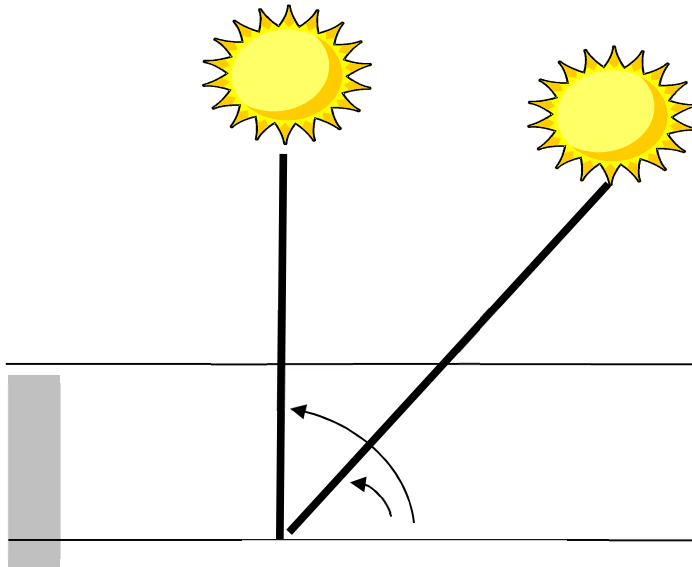


Figure 1.1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion d'air masse AM.

Le nombre d'air masse est obtenu de la relation suivante :

$$AM = \frac{1}{\sin h} \quad (1.2)$$

Avec : h ($^{\circ}$) l'élévation du soleil sur l'horizon.

Ainsi lorsque le soleil est au zénith ($h=90^{\circ}$), on dit que l'on a les conditions AM1. Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2. Cependant quand $h=48^{\circ}$, les conditions seront AM1.5. Hors atmosphère et à haute altitude, on définit les conditions AM0.

Le concept de nombre d'air masse caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (par exemple $1\,353\text{ W/m}^2$ pour AM0); d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques

[12]. La figure 1.2 ci-dessous montre le spectre solaire relevé dans plusieurs conditions selon différentes valeurs d'air mass.

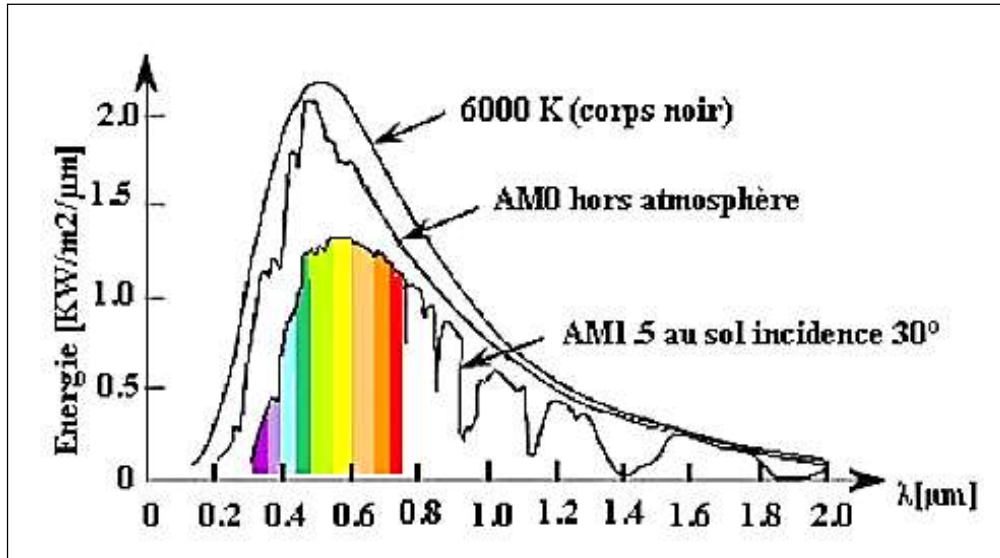


Figure 1.2 Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air mass.

Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de $1\ 000\ \text{W/m}^2$ et une température de 25°C . Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) [9].

1.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.

Pour fabriquer des cellules photovoltaïques on utilise des matériaux aux propriétés particulières : les semi-conducteurs, car ils absorbent facilement la lumière et permettent de générer un champ électrique et une tension électrique. Ce champ électrique va être obtenu par la superposition de deux couches dopées d'un semi-conducteur, en générale du Silicium dopé, c'est-à-dire dans lesquels on a introduit des éléments perturbateurs appelé impuretés, qui améliore la conductivité électrique. L'une des couches de Silicium est ainsi dopée en atome de phosphore. Le phosphore est un atome qui possède plus d'électrons sur son périphérique que le silicium. L'un de ses électrons ne participe pas aux liaisons est donc libre de se déplacer. Le dopage introduit dans

cette couche des atomes susceptibles de libérer des électrons mobiles, on parle de couche N, car la charge mobile est négative.

L'autre couche du semi-conducteur est dopée au Bore déficitaire en électrons. Le Bore est un atome qui possède moins d'électrons sur son périphérique que le Silicium, il lui manque un électron pour la réalisation des liaisons. Le Bore va donc capter un électron dans le reste du matériau, cet électron laisse derrière lui un trou d'électron qui est mobile et de charge positive. Le dopage introduit dans cette couche des atomes susceptibles de libérer des trous mobiles. On parle de couche P car dans la charge mobile il est positif.

Les électrons et les trous se déplacent par diffusion dans ces deux couches. Au voisinage de leur interface, la diffusion entraîne une recombinaison entre les trous et les électrons. Les électrons et les trous mobiles s'annulent. Ce phénomène produit une zone non neutre électriquement d'atome de phosphore chargé positivement et une zone non neutre électriquement d'atome de Bore chargé négativement. On obtient ainsi un champ électrique au sein du semi-conducteur et cette région est appelé jonction PN. Ce champ électrique s'accompagne de l'apparition d'une différence de potentiel électrique entre la zone N et la zone P (Figure1.3).

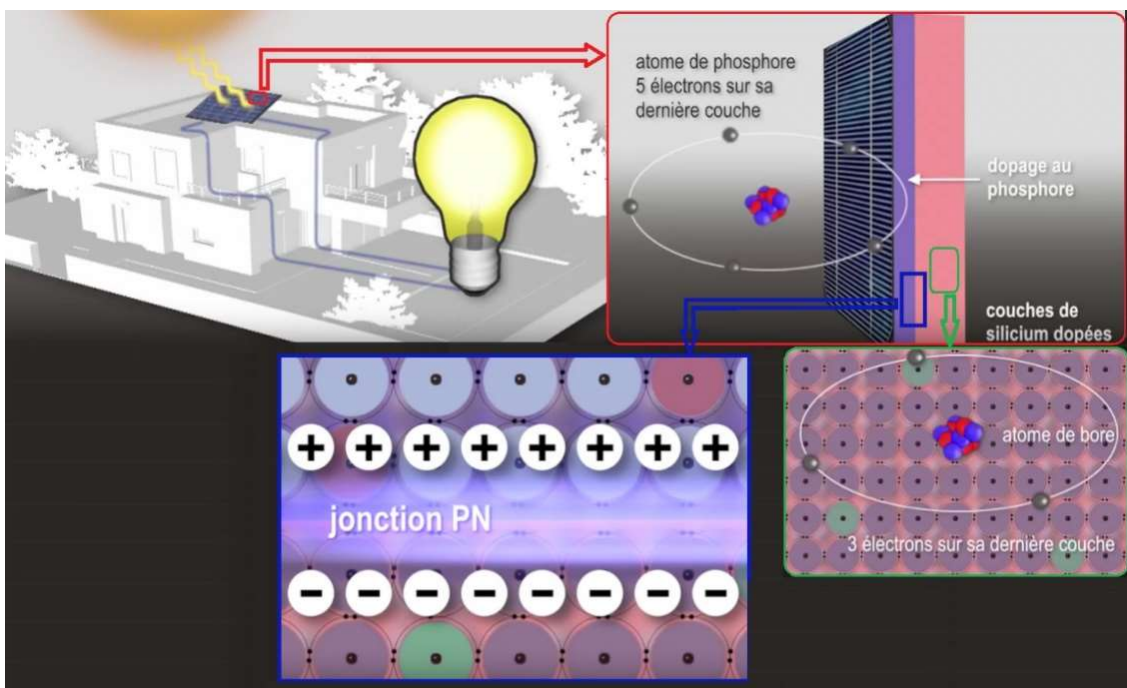


Figure 1.3 L'effet photovoltaïque.

Lorsque les rayons solaires frappent une cellule PV sur laquelle on a disposé deux bornes, les photons de la lumière transmettent leurs énergies aux électrons qui sont arrachés des atomes dans lesquelles ils laissent des trous. Les électrons et les trous ainsi formés, vont avoir tendance à se recombiner, mais lorsque le phénomène a lieu dans ou au voisinage de la jonction PN, le champ électrique va au contraire contribuer à séparer les charges positives et négatives. Les électrons sont repoussés vers la couche N, les trous vers la couche P. Les électrons cherchent à se combiner avec les trous, sont alors obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous, créons ainsi un courant électrique continu qu'on appelle le Photo-courant. Les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN que l'on appelle Photo-tension.

Le produit des deux (Photo-courant*Photo-tension=Puissance-électrique) égale à la puissance électrique délivrée par la cellule qui convertit ainsi directement une partie de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le rapport entre l'énergie de la lumière et l'énergie électrique est appelé le rendement de conversion de la cellule.

1.3.1 Module et champ photovoltaïque

Les cellules sont connectées en séries en soudant le contact avant de chaque cellule au contact arrière de la suivante. Ces ensembles de cellules sont encapsulés dans des modules étanches qui les protègent de l'humidité, des chocs et des nuisances : il s'agit du module photovoltaïque. La face avant du module est généralement en verre et la face arrière en Tedlar. Des modules bi-verre (deux faces en verre) existent, essentiellement pour l'intégration aux bâtiments. Le nombre de cellules qui composent le module dépend de la tension et de la puissance que le module doit avoir. Généralement les modules fournissent une tension de 12 ou 24 volts. Sur le marché, il existe principalement des modules ayant une puissance crête de 10Wc jusqu'à 110Wc. L'association de plusieurs modules constitue un panneau photovoltaïque. Pour les gros générateurs, le panneau est également appelé "champ photovoltaïque".

Lorsqu'une ou plusieurs cellules sont ombrées par un quelconque objet ou lorsqu'il existe des défaillances de quelques-unes, ces cellules deviennent des consommatrices de puissance et non des génératrices ce qui cause des pertes d'énergie. Pour remédier à ce problème on prend quelques cellules voisines et on les shunte par une diode en parallèle appelée '*diode Bypass*'. Ces diodes éviteront que le courant passe à travers ces cellules lorsque leur tension tombe au-dessous de la

tension de seuil de la diode. On place aussi une diode en série avec le panneau pour éviter le retour de courant des autres panneaux lorsqu'un panneau est mal ensoleillé, (Figure 1.4).

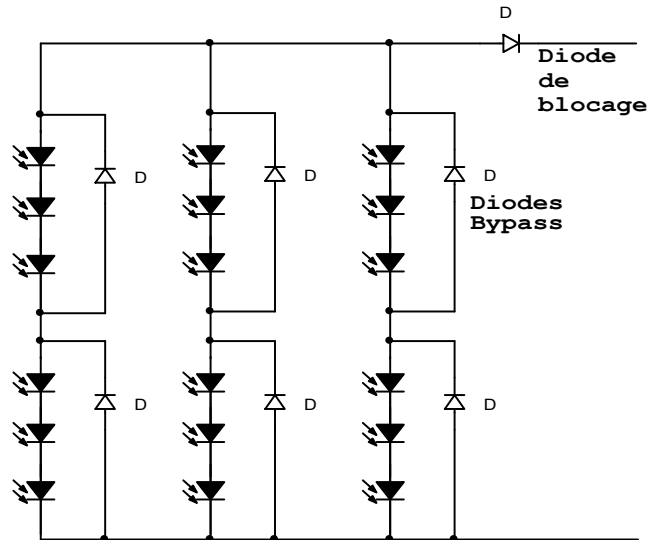


Figure 1.4 Branchement des diodes Bypass et de blocage avec les cellules solaires.

Les principales caractéristiques d'un module sont :

- **Puissance crête:** la puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement, la puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de $1\ 000\ \text{W/m}^2$ et pour une température de jonction de la cellule de 25°C .

- **Rendement:** le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum que l'on appelle le point de puissance maximale.

- **Caractéristique courant - tension d'un module :** le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules.

1.3.2 Le champ de modules photovoltaïques

Afin de former un champ de modules PV, les modules peuvent être montés en série ou en parallèle ou en série-parallèle.

- En série :**
 - Les tensions s'ajoutent
 - Le courant reste celui d'un seul module
- En parallèle :**
 - La tension reste constante
 - Les courants de chaque module s'ajoutent
- En série/parallèle**
 - Pour obtenir la tension et le courant (donc la puissance) souhaités.

1.3.3 Implantation du champ de modules

Pour choisir l'implantation du panneau solaire, quatre éléments sont à considérer:

- **L'orientation du champ de modules:** favoriser au maximum une orientation Sud dans l'hémisphère Nord.
- **L'inclinaison des modules:** en fonction de la période de fonctionnement de l'installation, il faudra favoriser soit le fonctionnement été (inclinaison de 30° sur l'horizontale) soit le fonctionnement hiver (inclinaison de 60°) soit faire un compromis (inclinaison de 45°).
- **L'ombre portée sur le champ de modules:** un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.
- **La distance module – batteries :** en courant continu basse tension, les chutes de tension peuvent être importantes. Une distance importante entre les modules et la batterie peut rendre nécessaire la pose de câble de sections importantes (10 ou 16 mm² voire plus). Il faut donc limiter au maximum la distance entre le champ de modules et les usagers ou utilisateurs en courant continu.

1.3.4 Technologies de Production de cellules et de modules photovoltaïques

Il existe essentiellement quatre technologies de cellules photovoltaïques présentées ci-après :

Tableau 1.1 Technologies de production de cellules photovoltaïques.

Silicium multi-cristallin	<ul style="list-style-type: none"> • 50% du marché mondial • rendement des cellules commercialisées : 12 à 14% • moins cher que le monocristallin • application : modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (relié au réseau ou en sites isolés)
Silicium monocristallin	<ul style="list-style-type: none"> • 35% du marché mondial • procédé de fabrication bien maîtrisé • rendement des cellules commercialisées : 14 à 16% • très bonne tenue de l'efficacité sur la durée • matière première largement disponible • matériau sans influence sur l'environnement • faible coefficient d'absorption : utilisé en couche épaisses, il nécessite de grandes quantités de matériau • application : modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faible puissance, espace
Silicium amorphe	<ul style="list-style-type: none"> • 9% du marché mondial • dépôts de couches minces sur du verre • rendement des cellules commercialisées : 6 à 8% • application : appareils de faibles puissance, production d'énergie embarquée (calculatrices, montres,...), modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment).
Couches minces	<ul style="list-style-type: none"> • technologie émergente • rendements inférieur au silicium cristallin mais les coûts sont potentiellement inférieurs (cette technologie nécessite moins de matériaux semi – conducteurs). • application : modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment).

Le composant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque est un semi-conducteur. Le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui dans l'industrie photovoltaïque

est le silicium. La fabrication des cellules photovoltaïques à base de silicium passe selon les étapes ci-dessous :

1. La silice: matière première d'une cellule photovoltaïque.
2. Extraction purification du silicium photovoltaïque.
3. Obtention des lingots de silicium.
4. Obtention des wafers photovoltaïques.
5. Le dopage et jonction P-N.

La figure 1.5 suivante résume le processus de fabrication de cellule PV :



Figure 1.5 Processus de fabrication de modules PV.

1.3.5 Normes et spécifications concernant les modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques doivent être conformes aux conditions d'homologation définies dans les normes CEI (Commission Électrotechnique Internationale) 1215 et CEI 1646. Les modules doivent notamment pouvoir supporter les conditions ambiantes suivantes :

- Température : de -40°C à + 85°C,
- Humidité : jusqu'à 100% d'humidité relative,
- Vent : jusqu'à 190 km/heure,
- Grêlons : diamètre inférieur à 25 mm,
- Atmosphère salée.

Ils doivent pouvoir être installés sans cadre pour l'intégration en toiture par exemple.

Les fabricants assurent régulièrement une garantie de 10 ans sur la production d'énergie de leurs modules. Une baisse de 10% au cours de ces 10 années est anormale.

1.3.6 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

Le modèle de cellule photovoltaïque réelle le plus sophistiqué et le plus répandu [13, 14], composé de deux diodes, est illustré par le circuit équivalent de la Figure 1.6 :

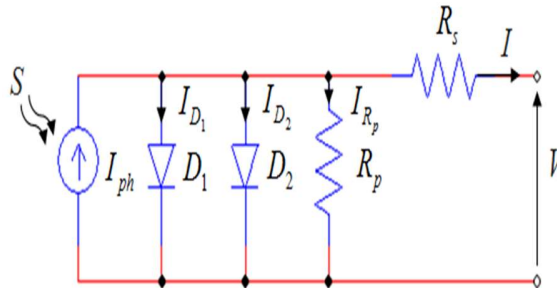


Figure 1.6 Modèle électrique de circuit d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.

L'équation (1.3) exprime la relation mathématique du courant de sortie du circuit en termes de paramètres du circuit équivalent [15] :

$$I = S \cdot I_{ph}(T) - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.3)$$

Où :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}|_{(T=298K)} \left[1 + (T - 298) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (1.4)$$

$$I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.5)$$

$$I_{s2} = K_2 T^2 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.6)$$

I et V sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque, S est l'éclairement solaire (l'insolation) et T la température absolue en Kelvin, $I_{ph}(T)$ Le photo-courant généré, I_{s1} et I_{s2} sont les courants de saturation des diodes, n_1 et n_2 les facteurs de pureté de la diode, R_s et R_p sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle. E_g est la bande d'énergie du semi-conducteur, q ($1,602 \cdot 10^{-19} \cdot C$) est la charge élémentaire constante, k est la constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23} J/K$), $K_1 = 1.2 A/cm^2 K^3$ et $K_2 = 2.9 \times 10^5 A/cm^2 K^{5/2}$.

L'équation (1.3) conduit à une équation généralisée de l'ensemble du module photovoltaïque avec z nombre de cellules photovoltaïques connectées en série [14, 16] :

$$I = S \cdot I_{ph}(T) - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IzR_s)}{zn_1kT}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IzR_s)}{zn_2kT}} - 1 \right] - \frac{V + IzR_s}{zR_p} \quad (1.7)$$

Ces modules alors peuvent être encore arrangés en série ou en parallèle pour réaliser la tension et les valeurs de courant désirés pour le système au complet.

➤ Association en série :

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (1.8) ci-après résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$\begin{aligned} V_{cos} &= N_s \cdot V_{co} \\ I_{ccs} &= I_{cc} \end{aligned} \quad (1.8)$$

La figure 1.7 ci-dessous montre l'effet d'association en série de plusieurs cellules sur la caractéristique $I-V$.

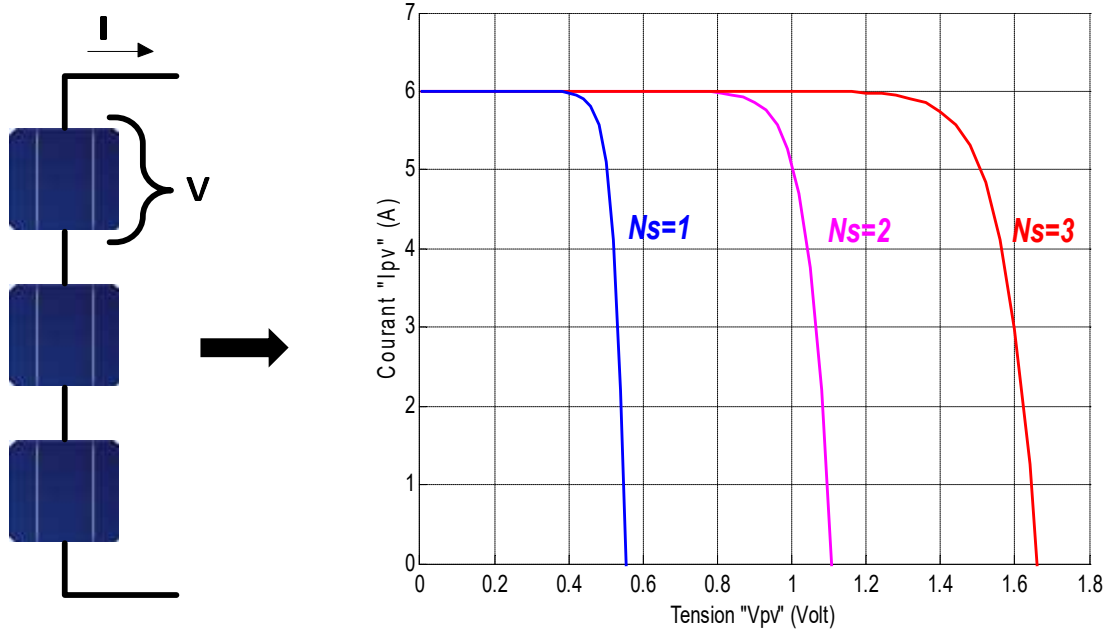


Figure 1.7 Association des cellules PV en série.

➤ **Association en parallèle :**

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules permet d'accroître le courant de sortie du générateur photovoltaïque. Les cellules sont soumises donc à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (1.9) ci-dessous résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

$$\begin{aligned}
 I_{ccp} &= N_p \cdot I_{cc} \\
 V_{cop} &= V_{co}
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

La figure 1.8 ci-après montre l'effet d'association en parallèle de plusieurs cellules sur la caractéristique $I-V$.

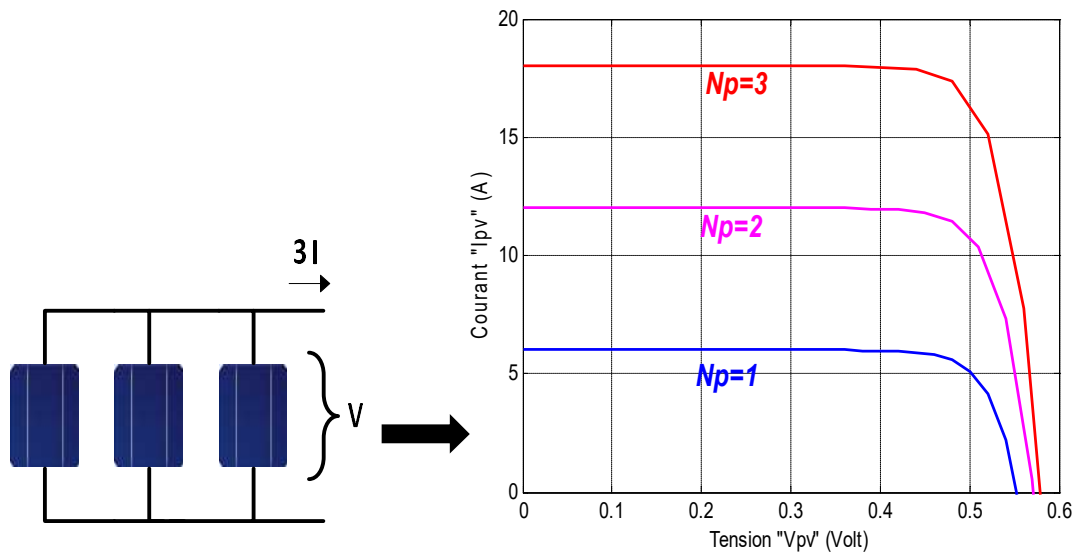


Figure 1.8 Association des cellules PV en parallèles.

La mise en série et/ou en parallèle de cellules PV permet alors d'augmenter le courant et/ou la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

1.4 Contrôle de l'énergie ou extraction de l'énergie maximale du système PV

L'énergie électrique extraite par les générateurs photovoltaïques dépend donc d'une équation complexe reliant le rayonnement solaire, la température et la résistance totale du circuit, ce qui entraîne une variation non linéaire de la puissance de sortie P en fonction de la tension V du circuit sous la forme $P = f(V)$ [10, 14, 16, 17]. On peut observer qu'il existe un point unique, dans des conditions d'insolation (le rayonnement solaire) et de température donnée, dans lequel le générateur PV produit une puissance maximale appelée PPM (Point de Puissance Maximal). Ce PPM est atteint lorsque le changement du taux de variation de la puissance en fonction de la tension est égal à zéro. La relation non linéaire entre la puissance produite par le générateur PV et les conditions environnementales rend l'efficacité de la conversion des générateurs solaires relativement faible, de sorte que l'optimisation de l'extraction de la puissance devient un élément clé et nécessaire pour la conversion de l'énergie solaire [11, 5]. Dans le cas où l'on considère la puissance de sortie photovoltaïque par rapport à la tension du générateur solaire et sous des irradiances avec des températures variables, nous notons qu'il existe un point unique permettant de récolter la puissance maximale (Figure 1.7) [2].

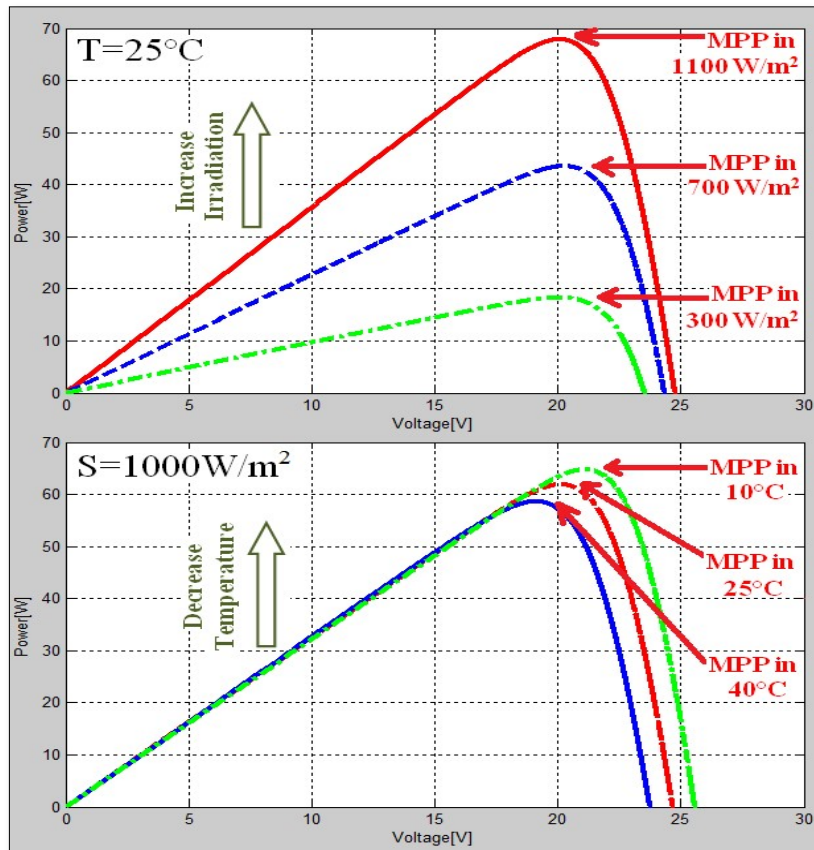


Figure 1.9 Variation du PPM en fonction de l'irradiation et de la température.

Une analyse du suivi du point de puissance maximale PPM similaire peut être réalisée en considérant une courbe $I-V$ comme illustré dans la Figure 1.10 ci-dessous. Si nous considérons une insolation S , une température T et une charge résistive variable R_i . La cellule solaire fournit un courant de court-circuit I_{sc} et une tension de circuit ouvert V_{oc} . Nous notons qu'il existe un PPM qui peut être identifié à partir de la courbe $I-V$. Quelle que soit l'approche choisie, $I-V$, $P-V$ ou $P-I$, le suivi de la variation de I en fonction de V nous permet d'identifier le point de puissance maximale à partir d'un générateur PV (Figure 1.8) [1, 4].

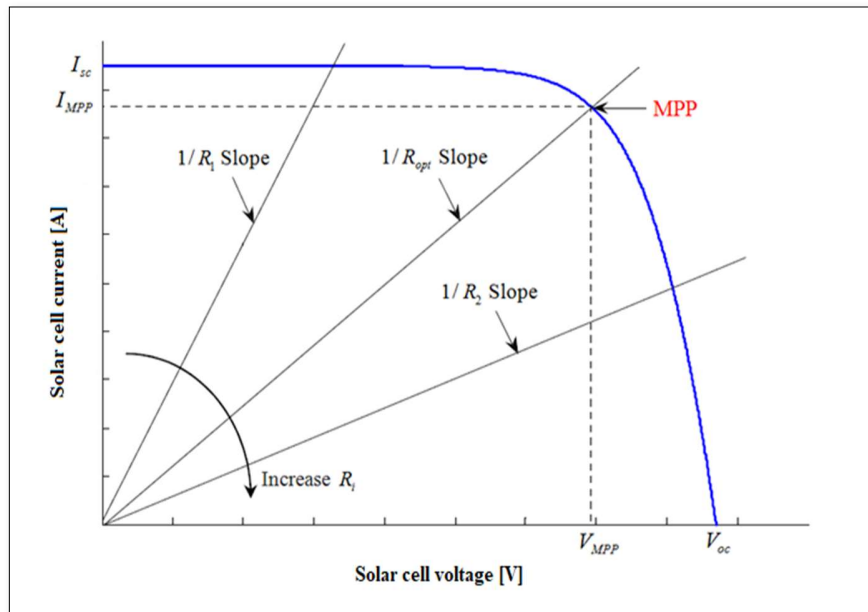


Figure 1.10 Effet de charge sur la caractéristique photovoltaïque $I-V$.

Les systèmes photovoltaïques sont généralement connectés à des convertisseurs statiques (C-C) pilotés par des contrôleurs programmés qui analysent en permanence la puissance fournie par le générateur solaire. Ces contrôleurs MPPT ajustent les paramètres pour extraire le maximum d'énergie quelles que soient la charge et les conditions atmosphériques [6]. Les méthodes MPPT décrites dans les différents travaux et publications utilisent différentes techniques et algorithmes dont les performances diffèrent largement, telles que la vitesse de convergence, la complexité de la mise en œuvre, la précision et, surtout, le coût de la mise en œuvre de l'ensemble de la configuration [7].

1.5 Architecture PV-MPPT

Pour forcer le générateur PV à fonctionner dans sa région PPM en fonction de l'irradiation incidente et de la température, il est nécessaire d'inclure un dispositif MPPT (Maximum Power Point Tracking) entre le module PV et la charge (Figure 1.6). Le dispositif MPPT consiste en un convertisseur continu-continu.

Le transducteur capte les valeurs instantanées du courant I et de la tension V du générateur photovoltaïque, qui sont utilisées par les entrées du circuit informatique pour le calcul des entrées du contrôleur de logique floue. La sortie de contrôle doit être injectée dans un autre circuit de calcul

pour calculer le rapport cyclique D qui sera utilisé à la fin par le Drive gate (circuit de commande de gachette) pour contrôler directement le Mosfet du convertisseur boost (Figure 1.11).

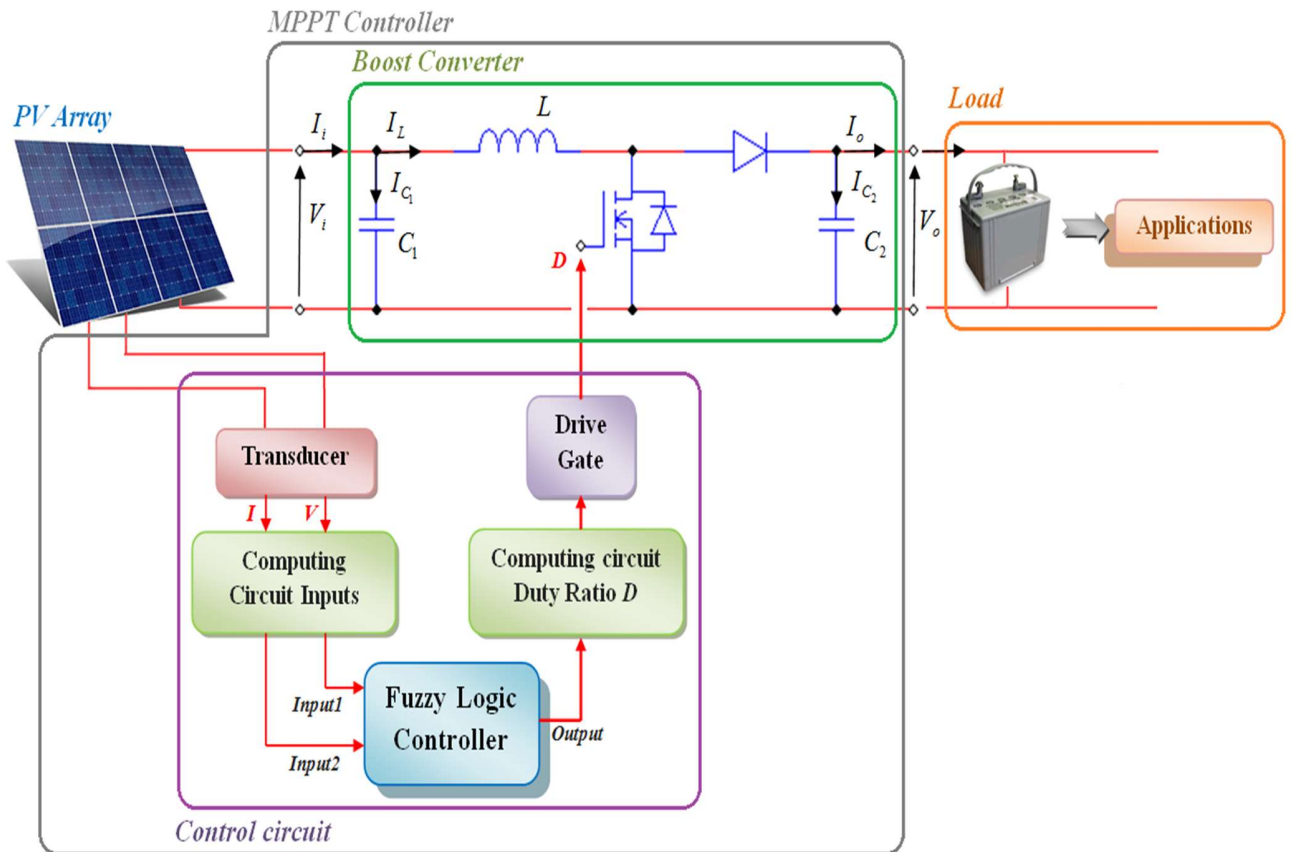


Figure 1.11 Architecture PV-MPPT.

Le convertisseur continu-continu est inclus entre le groupe photovoltaïque et l'unité de stockage d'énergie (charge) afin d'ajuster la tension du groupe solaire avec la tension de la batterie. Si le rapport cyclique D du convertisseur est modifié par un circuit de commande pour ajuster en permanence la tension de fonctionnement du panneau solaire à son point de puissance maximale, cela signifie qu'il fonctionne comme un dispositif de suivi du point de puissance maximale MPPT (Figure 1.12).

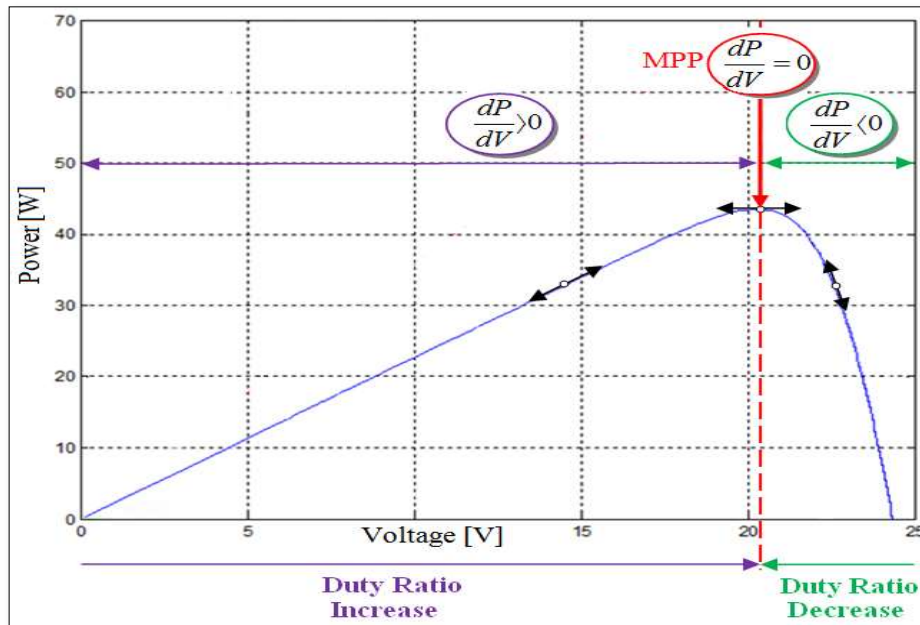


Figure 1.12 Changement de direction du rapport cyclique D pour le suivi du PPM.

1.6 Convertisseur continu-continu (DC/DC) (Hacheur)

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. La Figure 1.13 rappelle le schéma de principe du hacheur.

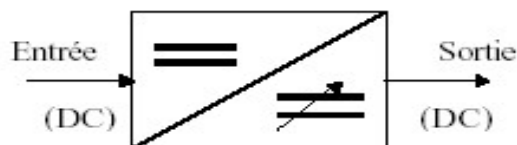


Figure 1.13 Schéma de principe du hacheur.

Le convertisseur de commutation C-C comprend des condensateurs, des inductances et des commutateurs, dans le cas idéal tous ces appareils consomment très peu d'énergie, ce qui explique l'efficacité des convertisseurs à commutation C-C [18, 19]. Un transistor à effet de champ à semi-conducteur à oxyde métallique (MOSFET) est utilisé comme dispositif à semi-conducteur à commutation car il est facile de le contrôler en utilisant un signal de modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM) généré par le contrôleur. Pendant le fonctionnement du convertisseur, le commutateur sera synchronisé à une fréquence f constante avec un temps de fermeture DT et une

valeur de temps d'ouverture $(1 - D) T$, où T est la période de commutation et D le rapport cyclique de l'interrupteur ($D \in]0,1[$) (Figure 1.14).

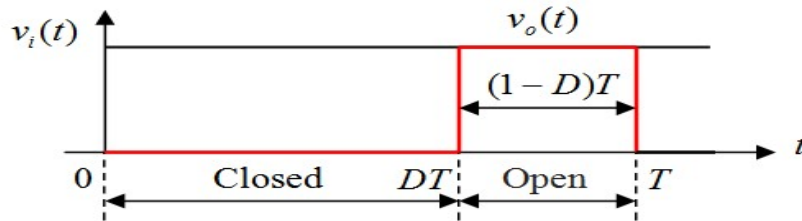


Figure 1.14 Tension de sortie $v_o(t)$ du convertisseur C-C idéal.

Les hacheurs sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour la recherche du MPPT [7]. Cependant il existe différents types de convertisseurs DC-DC utilisés fréquemment dans de telles applications à savoir : Buck où Série « abaisseur », Boost où parallèle « élévateur » ou buck-boost « Série-parallèle », mélange entre les deux précédents. Le tableau 1.3 représente ces différents types de convertisseurs DC-DC.

Tableau 1.2 Différents convertisseurs DC-DC utilisés dans les applications solaires.

Type	Fonction	Rapport de transformation $M(D)$
<i>Série (Buck)</i>	Abaisseur	D
<i>Parallèle (Boost)</i>	Elévateur	$\frac{1}{1 - D}$
<i>Série-parallèle (Buck-boost)</i>	Abaisseur Elévateur	$\frac{D}{1 - D}$

Dans ce qui suit nous nous concentrerons sur l'étude d'un convertisseur DC-DC de type élévateur (Boost Converter), choisit pour notre étude.

1.6.1 Hacheur survolteur « Boost converter »

Le convertisseur élévateur Boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, est donné par la Figure 1.15.

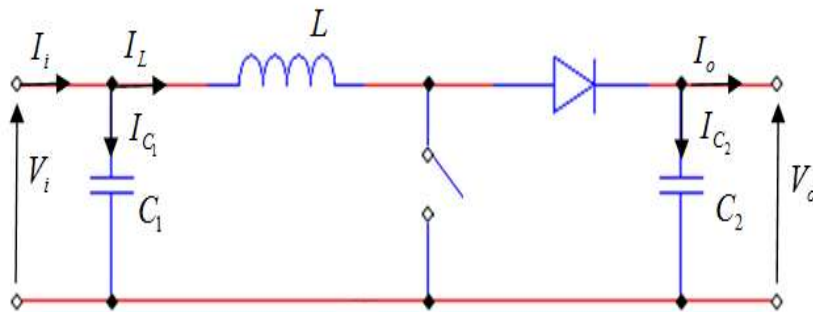


Figure 1.15 Circuit du convertisseur Boost idéal.

Les équations mathématiques du convertisseur élévateur Boost utilisé dans Matlab-Simulink sont les suivantes :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \quad (1.10)$$

$$I_L = I_i - C_1 \frac{dV_i}{dt} \quad (1.11)$$

$$I_o = (1-D)I_L - C_2 \frac{dV_o}{dt} \quad (1.12)$$

$$V_i = (1-D)V_o + L \frac{dI_L}{dt} \quad (1.13)$$

D'après l'équation (1.11), il est clair qu'une augmentation du rapport cyclique D entraîne une augmentation de la tension de sortie du convertisseur élévateur et inversement. De ce fait, le dispositif MPPT contrôle instantanément la diminution et l'augmentation du rapport cyclique D , afin de pousser le point de fonctionnement vers le PPM (Figure 1.7).

1.6.1.1 Analyse d'un convertisseur élévateur

Le schéma électrique basique d'un hacheur élévateur est représenté sur la figure 1.16 ci-après. La tension de sortie d'un convertisseur élévateur doit être toujours supérieure à la tension d'entrée [20,23].

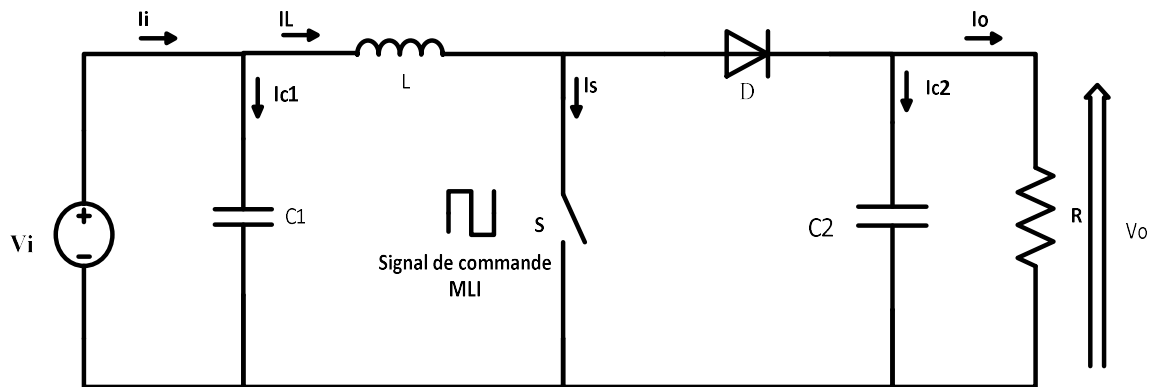


Figure 1.16 Schéma électrique d'un convertisseur élévateur (Boost).

Le fonctionnement d'un convertisseur élévateur peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

➤ L'état ON:

Quand l'interrupteur S est à l'état on, le schéma du Boost se réduit au schéma équivalent donné par la figure 1.17 ci-après :

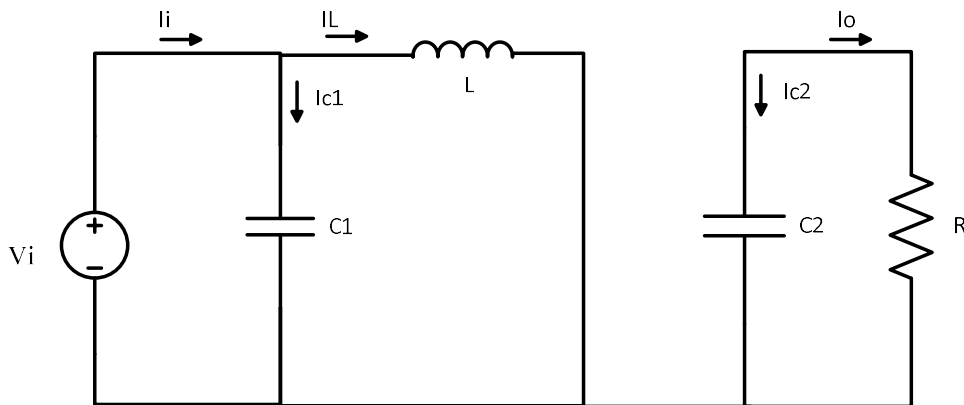


Figure 1.17 Schéma équivalent d'un convertisseur élévateur à l'état ON.

Les équations de cette phase de fonctionnement sont données par :

$$I_{c1} = I_i - I_L \quad (1.14)$$

$$V_L = V_i = V_{C1} \quad (1.15)$$

$$I_{C2} = -I_o = -\frac{V_o}{R} \quad (1.16)$$

➤ L'état OFF

Quand l'interrupteur se met à l'état OFF, le schéma du BOOST sera le suivant :

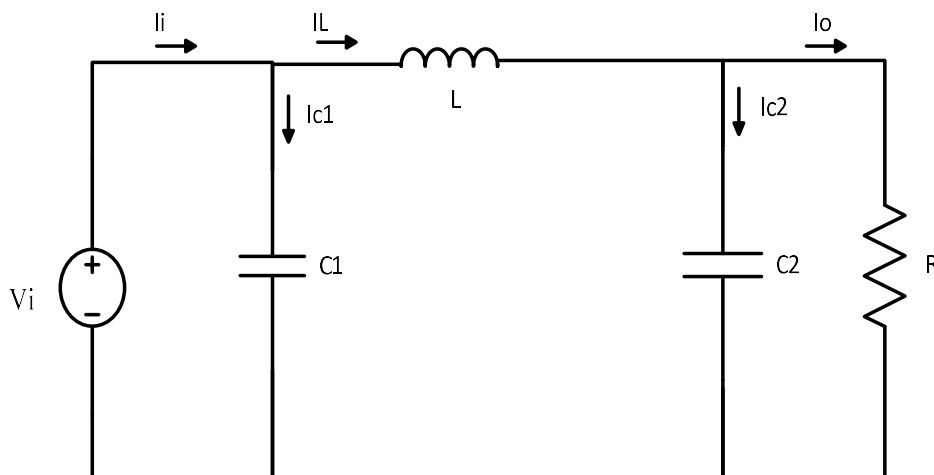


Figure 1.18 Schéma de base d'un convertisseur Boost a l'état OFF.

Dans cette phase de fonctionnement on aura les équations suivantes :

$$V_L = V_i - V_o \quad (1.17)$$

$$I_{C1} = I_i - i_L \quad (1.18)$$

$$I_{C2} = I_L - I_o \quad (1.19)$$

Dans l'analyse que nous adopterons, il est considéré uniquement le mode de conduction continu (le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais) [20,23]. La figure 1.19 ci-après montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost en mode de conduction continu

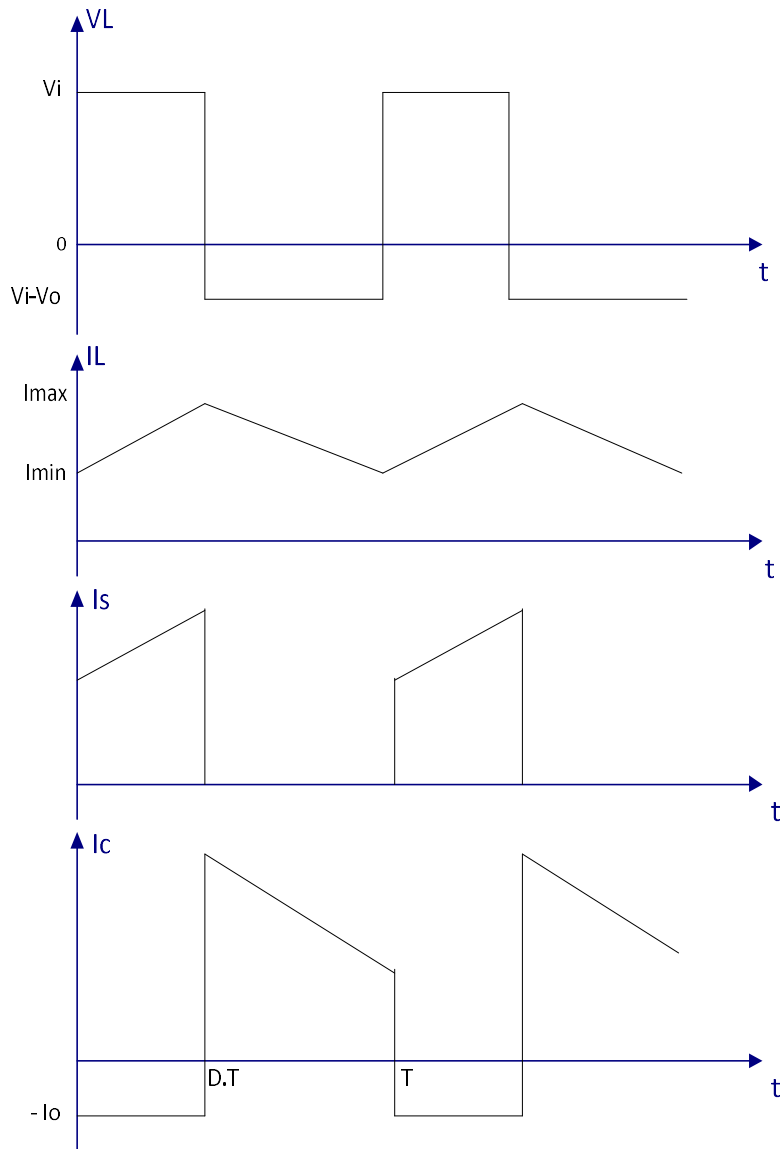


Figure 1.19 Formes d'ondes du courant et de la tension dans un hacheur élévateur.

D étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit, est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Les valeurs moyennes sont obtenues en appliquant la relation suivante :

$$x(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{D.T} x(\tau) d\tau + \int_{D.T}^T x(\tau) d\tau \right) \quad (1.20)$$

D'où la tension et le courant moyen sont donnés par les équations ci-après :

$$V_o = \frac{V_i}{(1 - D)} \quad (1.21)$$

$$I_o = \frac{I_i}{(1 - D)} \quad (1.22)$$

Le rapport de transformation d'un Boost est, en appelant D le rapport cyclique (rapport du temps pendant lequel le transistor est fermé, à la période de hachage) [22]:

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (1.23)$$

La figure 1.20 ci-après montre l'évolution du rapport de transformation d'un hacheur Boost en fonction du rapport cyclique [23].

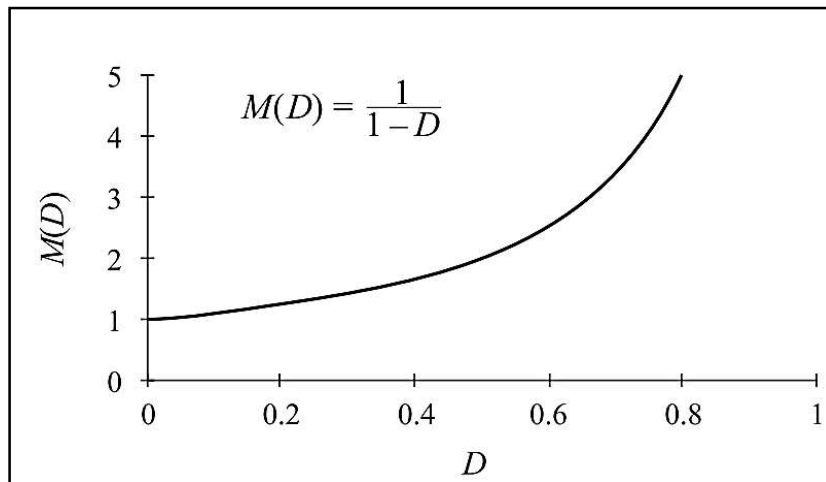


Figure 1.20 Variation du rapport de transformation en fonction du rapport cyclique D pour un convertisseur Boost.

On voit que cette variation est non linéaire. On remarque aussi que la valeur du rapport est toujours supérieure à 1, ceci montre bien que le convertisseur Boost est un élévateur de tension [23].

1.7 Stockage de l'énergie

1.7.1 Batterie

Le stockage de l'énergie produite se fera dans des batteries. Il existe de nombreux types de batteries, chacune d'entre elles ayant été conçue pour un usage particulier. Elles sont définies par un ensemble de caractéristiques : tension nominale, capacité de stockage, aptitude au cyclage, tenue en décharge profonde, taux d'autodécharge, variation avec la température, maintenance, prix, etc.

Pour l'usage spécifique du photovoltaïque, une batterie doit remplir les conditions suivantes [12] : un nombre de cycles de charge et de décharge élevé sans altération, une faible autodécharge, un rendement électrique élevé et une maintenance légère.

1.7.2 Les types de batterie

Il est globalement possible de séparer les batteries en les types suivants:

- **Les batteries au plomb (Pb) :** étanches, à plaques plane minces, à plaques plane épaisses, à plaques tubulaire.
- **Les batteries au cadmium-nickel (Cd-Ni) :**

Les batteries étanches au cadmium-nickel supportent sans problème des décharges profondes (100 %), contrairement aux batteries au plomb qui ne doivent jamais être déchargées à plus de 50-80 % selon leur type. On recommande même pour les batteries au cadmium-nickel, une décharge complète périodique à des fins de maintenance. Leur prix est par contre beaucoup plus élevé que pour les batteries au plomb. Pour les systèmes photovoltaïques, on préconise d'utiliser des batteries au plomb à plaque tubulaires.

- **Les batteries à hydrogène : (Stockage sous forme d'hydrogène)**

Les trois étapes du processus de stockage par le vecteur hydrogène sont : l'électrolyse de l'eau, le stockage de l'hydrogène produit et la pile à combustible [24].

- Tout d'abord la production d'hydrogène lors des périodes creuses grâce à la décomposition de l'eau par électrolyse. L'apport d'électricité permet à l'électrolyseur de décomposer l'eau H_2O en oxygène et hydrogène. ($H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$).

- Ensuite l'hydrogène est stocké dans un réservoir sous forme gazeuse, liquide ou solide.

- Il est enfin retransformé dans une pile à combustible. Selon la réaction inverse de l'électrolyse, l'hydrogène s'associe avec l'oxygène (les ions traversent une membrane tandis que les électrons circulent dans un circuit créant un courant électrique), la réaction ne rejette que de l'eau et de la chaleur (Figure 1.21).

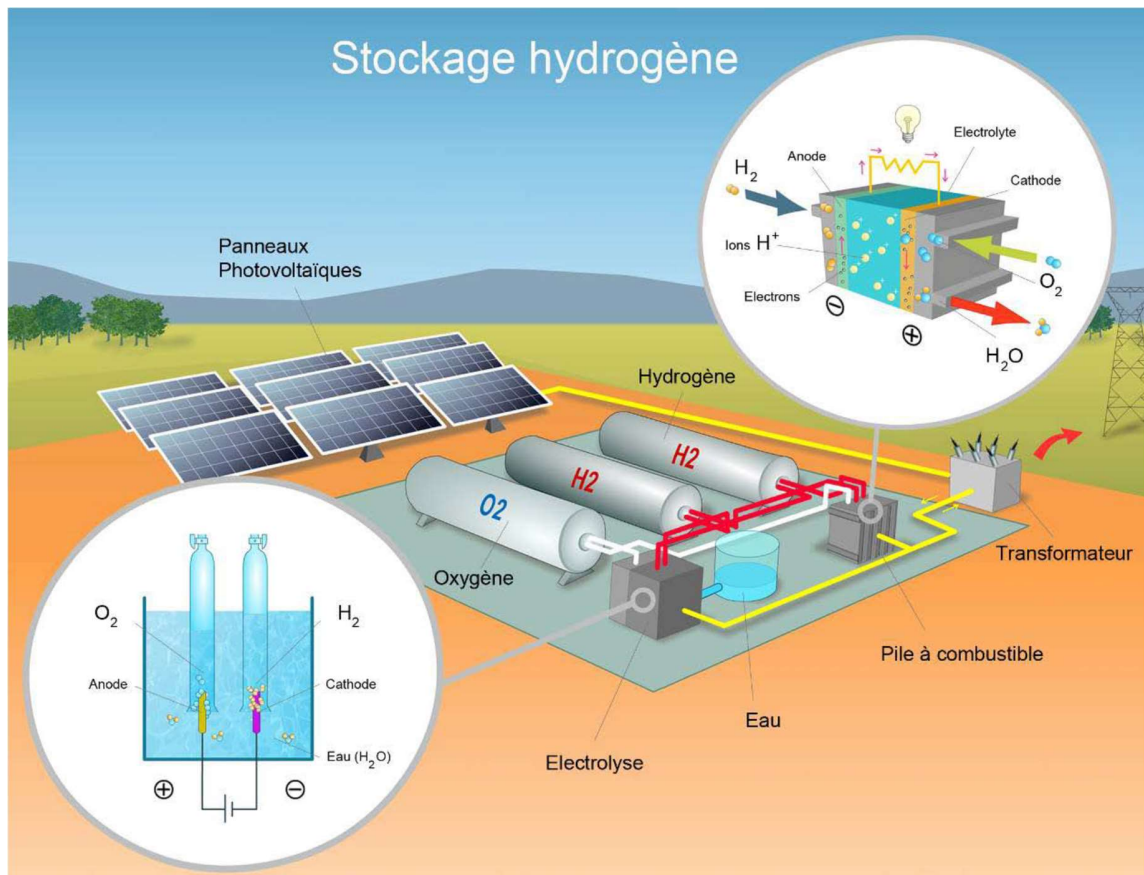


Figure 1.21 Principe de stockage sous forme d'hydrogène.

- **Les Batterie au Lithium-ion (Li-Ion)**

La batterie est un assemblage d'accumulateurs qui stocke l'énergie électrique issue de la circulation des ions entre deux électrodes à travers un électrolyte, et des électrons qui se déplacent à travers un circuit extérieur. Il existe différentes batteries selon les matériaux utilisés pour la conception de l'anode, de la cathode et de l'électrolyte. Dans le cas des batteries Lithium-ion, l'état de charge consiste en une réaction d'oxydation dans l'électrode positive (cathode) qui va libérer des ions Li^+ dans l'électrolyte. Une réaction de réduction va ensuite avoir lieu au niveau de l'électrode négative (anode), recombinant les ions Li^+ avec les électrons qui ont traversé le circuit extérieur. En mode décharge, c'est la réaction inverse qui a lieu. Cette réaction est réversible et donc reproductible sur un nombre limité de cycles (Figure 1.22) [24].

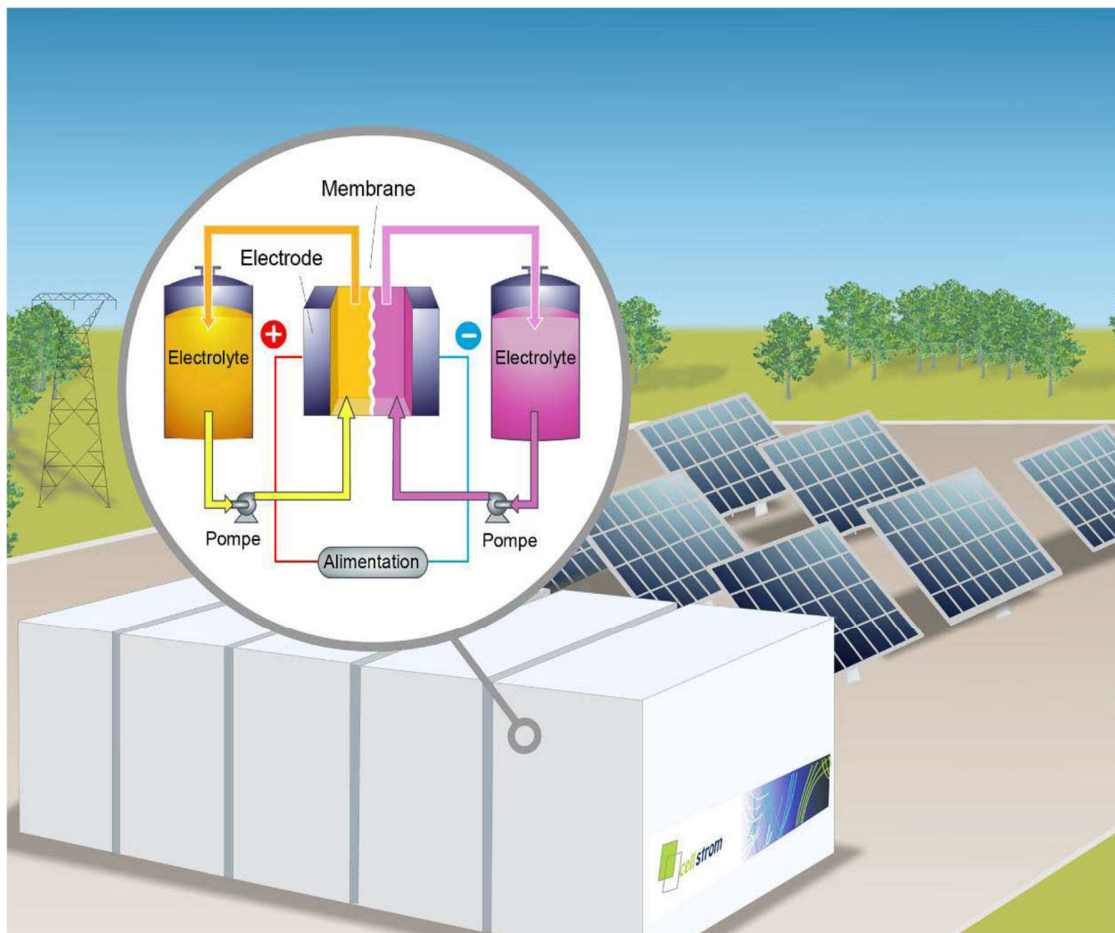


Figure 1.22 Principe de stockage au Li-Ion.

- **Batterie à circulation ou « Redox-Flow »**

Le principe repose sur une réaction d'oxydation et une réaction de réduction au niveau de chacune des électrodes (Figure 1.23) [24]. La spécificité de la batterie redox-flow vient du fait que les réactifs sont en solution dans un électrolyte différent pour l'anode et la cathode, ils sont donc stockés dans deux réservoirs séparés et circulent dans deux demi-cellules. Ces dernières sont séparées par une membrane semi-perméable qui autorise le passage des ions communs aux deux électrolytes. Des pompes assurent la circulation des électrolytes afin de renouveler chaque réactif à la surface de l'électrode correspondante. Le principal avantage de cette technologie repose sur le fait que la séparation électrolyte/cellule électrochimique permet un découplage entre la puissance disponible (dimensionnement de la cellule électrochimique) et la capacité énergétique du système (taille du réservoir d'électrolyte).

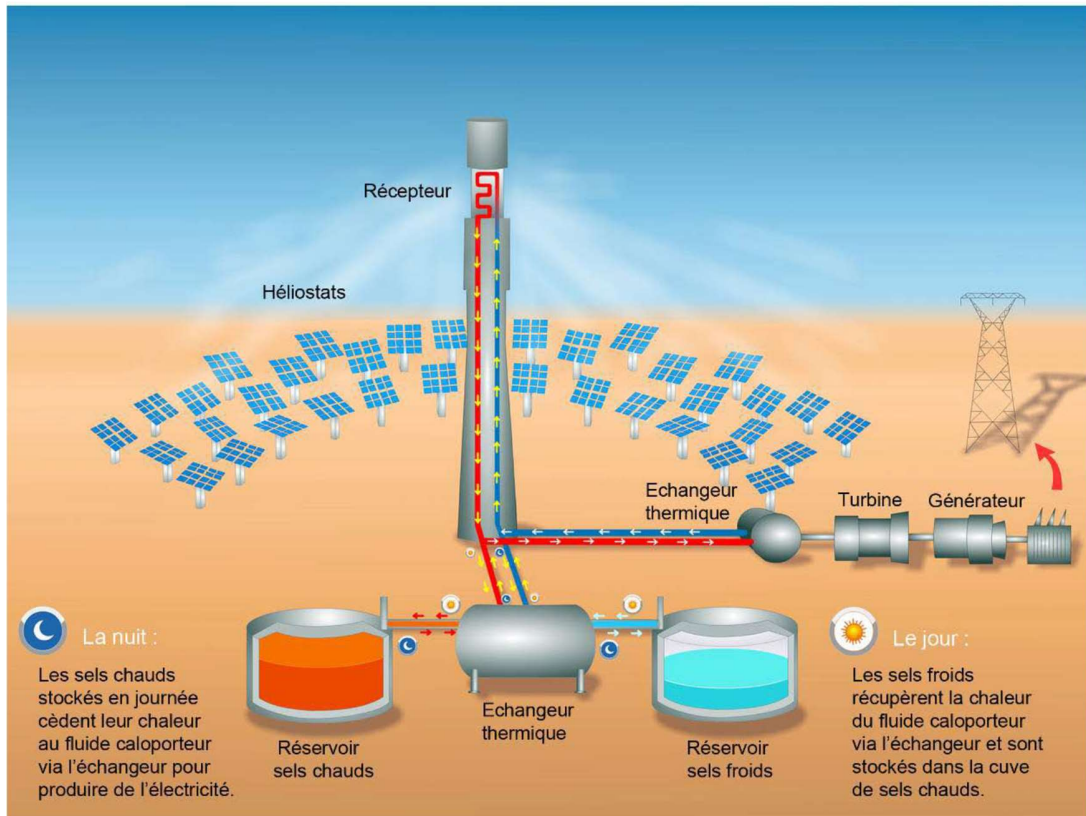


Figure 1.23 principe de stockage à circulation.

- **Les batteries gel** : c'est une batterie étanche et ne nécessite pas d'entretien. Elle résiste au gel et possède une excellente durée de vie [24].

Vu que nous utiliserons dans notre travail des batteries au plomb, dans ce qui suit on va étudier en détail le modèle mathématique des batteries au plomb.

1.7.3 Modèle mathématique des batteries au plomb

Dans la littérature [25], des auteurs ont utilisé le modèle représenté sur la Figure 1.24. Ce modèle décrit le comportement primaire d'une batterie correctement, mais n'explique pas les propriétés lentement changeantes d'une batterie telles que l'augmentation et la diminution de la tension de fonctionnement provoquée par le processus de la charge et de la décharge.

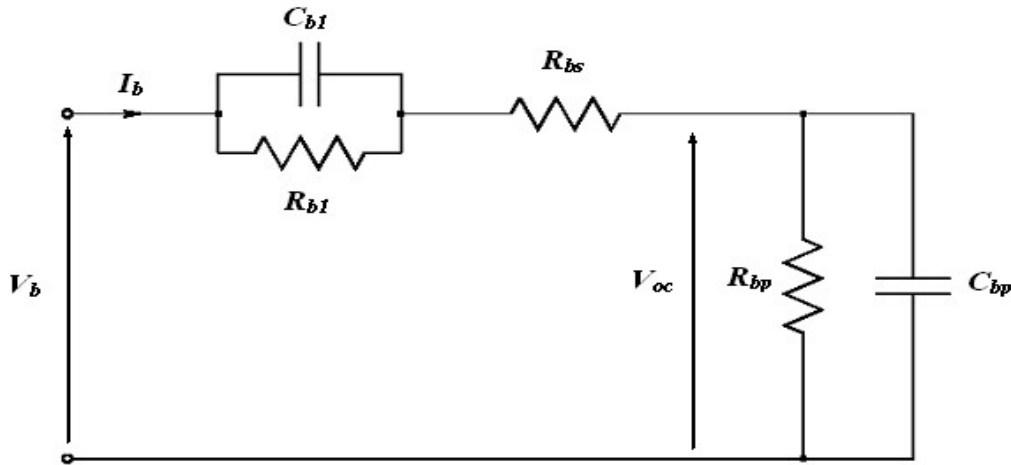


Figure 1.24 Modèle équivalent de la batterie.

Ce modèle inclut les composants équivalents pour toutes les caractéristiques de fonctionnement principales d'une batterie plomb-acide :

La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur C_{bp} et sa valeur est donnée par l'expression générale de l'énergie :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_c^2, \quad (1.24)$$

Avec : C la capacité et V_c la tension du condensateur.

A la différence d'un condensateur, la tension d'une batterie ne sera pas égale à zéro à son plus bas état de charge. C'est équivalent à un condensateur ayant un niveau minimum de charge égal à l'énergie $E_{c,\min}$. La capacité entièrement chargée de la batterie est représentée par un niveau maximum de charge $E_{c,\max}$. Ceci est indiqué par l'équation suivante [25]:

$$E_b = E_{c,\max} - E_{c,\min} = \frac{1}{2} C V_{\max}^2 - \frac{1}{2} C V_{\min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{\max}^2 - V_{\min}^2), \quad (1.25)$$

L'énergie E_b est donnée par le constructeur de la batterie directement en kilowatt par heure (kWh). Les tensions V_{\max} et V_{\min} sont la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après (1.24) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2} \quad (1.26)$$

Où : C_{bp} est la capacité de la charge de la batterie.

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{bs} et R_{b1} en série. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs} tandis que la résistance R_{b1} représente la diffusion d'électrolyte. Ceci représente la tension du circuit ouvert de la batterie dès qu'une charge sera reliée. De même on peut observer un saut soudain de tension avec l'application d'un courant de remplissage. En utilisant la notation indiquée sur la figure 1.21 on peut exprimer la tension de batterie V_b en fonction de la tension de batterie en circuit ouvert et les autres composants R_{b1} , R_{bs} et C_{b1} avec la constante de temps $\tau = R_{b1}C_{b1}$.

$$V_b = V_{oc} + R_{b1} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) i_b + R_{bs} \cdot i_b \quad (1.27)$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est la décharge spontanée, représentée par la résistance R_{bp} parallèle avec condensateur principal C_{bp} . Elle est provoquée par électrolyse de l'eau aux tensions élevées et par la fuite lente à travers les bornes de batterie aux basses tensions [26,27]. Le circuit sur la Figure 1.24 décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée.

Ce circuit exprime l'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide par :

$$Z(s) = R_{bs} + (R_{b1} \parallel C_{b1}) + (R_{bp} \parallel C_{bp}) = R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1} \cdot C_{b1} s + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp} \cdot C_{bp} \cdot s + 1} \quad (1.28)$$

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (1.30)$$

Les coefficients a_i et b_j sont employés pour représenter les différents composants :

$$\begin{aligned}
a_2 &= R_{bs}R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp}, \\
a_1 &= R_{bs}R_{b1}C_{b1} + R_{bs}R_{bp}C_{bp} + R_{b1}R_{bp}C_{bp} + R_{bp}R_{b1}C_{b1}, \\
a_0 &= R_{bs} + R_{b1} + R_{bp}, \\
b_2 &= R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp}, \\
b_1 &= R_{b1}C_{b1} + R_{bp}C_{bp}, \\
b_0 &= 1.
\end{aligned} \tag{1.31}$$

1.8 Applications des systèmes photovoltaïques

Les principales applications des systèmes photovoltaïques peuvent être énumérées ci-après.

1.8.1 Installations autonomes

Une installation photovoltaïque autonome (figure 1.25) est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Une tel installation doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée dans des

batteries [27, 28]. Cette installation se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur.

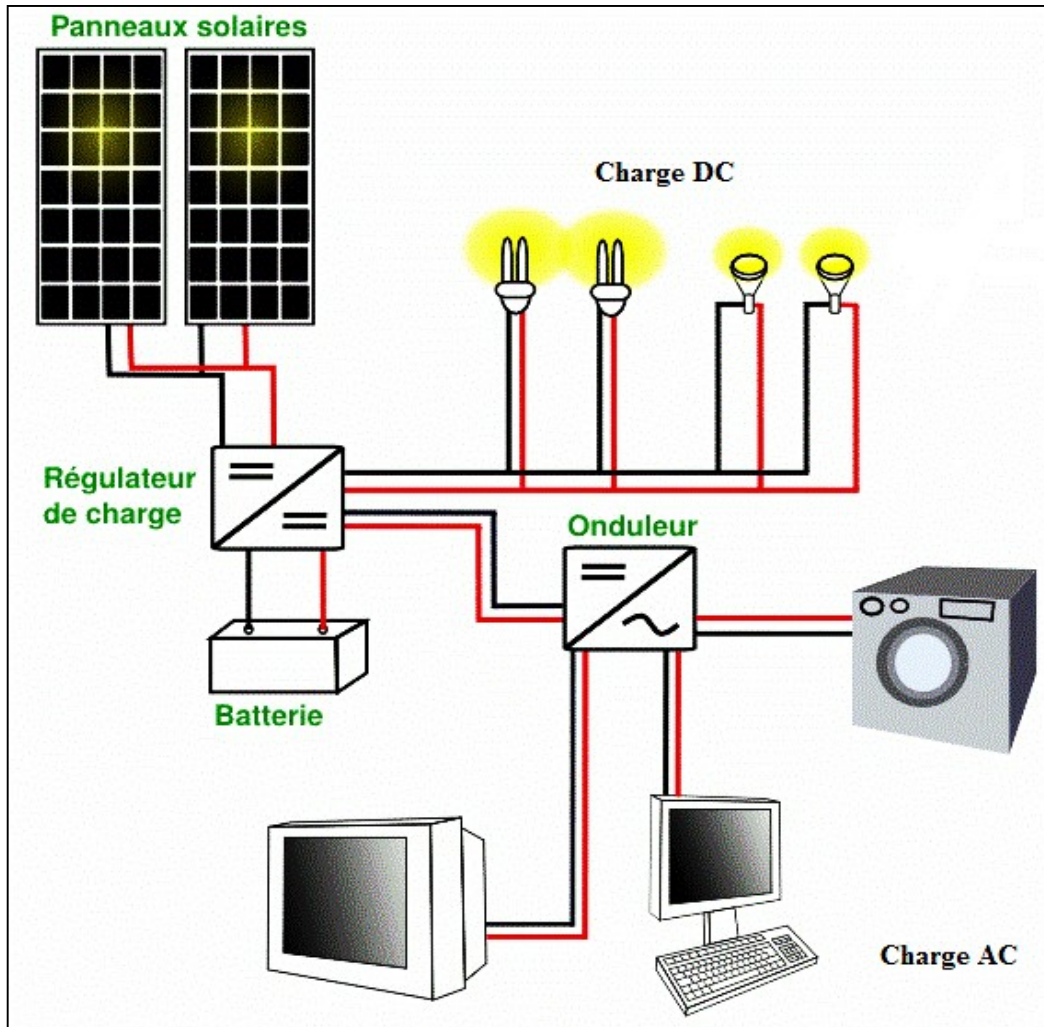


Figure 1.25 Systèmes PV autonomes.

1.8.2 Installations hybrides

Les systèmes hybrides (figure 1.26) consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Les systèmes hybrides fonctionnent tels

que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y'a du vent) [29].

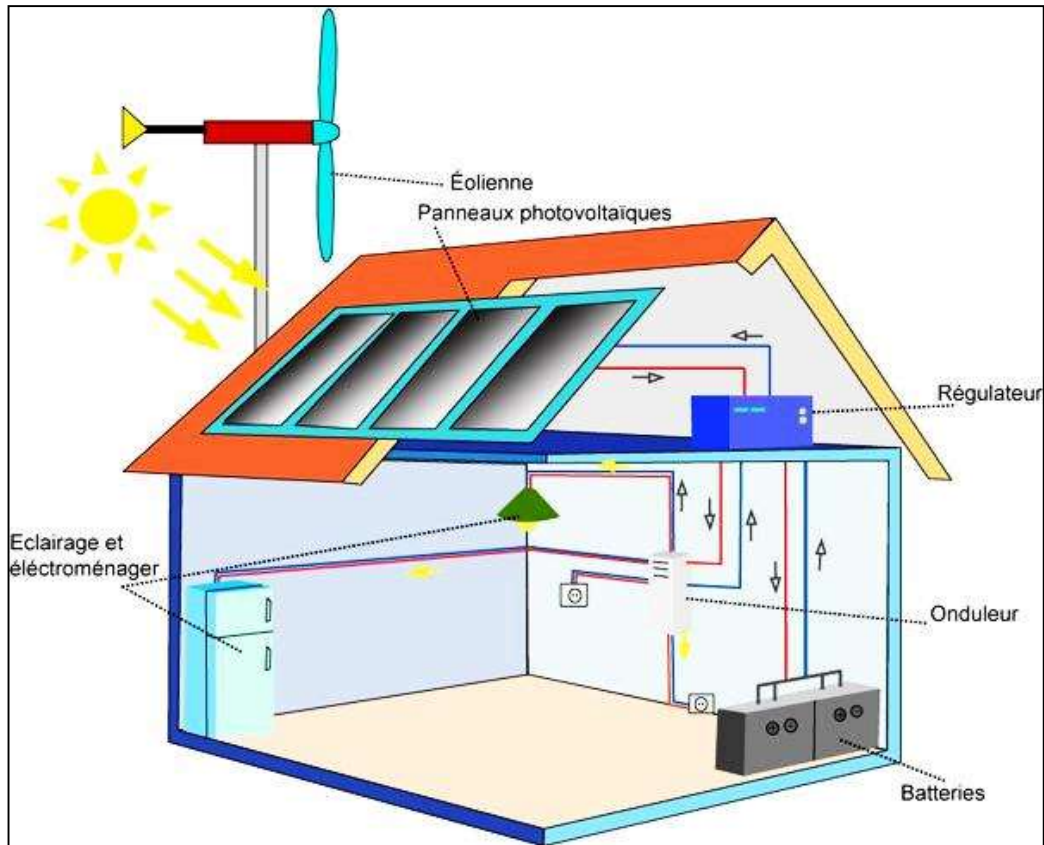


Figure 1.26 Systèmes hybrides PV éoliens.

1.8.3 Installations couplés au réseau basse tension

Les installations raccordées au réseau électrique constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire [30, 31]. Ces installations se composent de modules solaires interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordé au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré et produit un courant alternatif conforme à celui du réseau électrique (230V, 50Hz).

Suivant l'effet recherché, le générateur photovoltaïque raccordé au réseau se décline selon deux variantes [32]:

- La première, l'installation de connexion sécurisée (figure 1.24) permet à la fois une production directe mais aussi autonome d'énergie. Elle fournit ainsi de l'électricité au producteur en toute

occasion et permet d'injecter sur le réseau de distribution une partie ou l'intégralité de sa production [32].

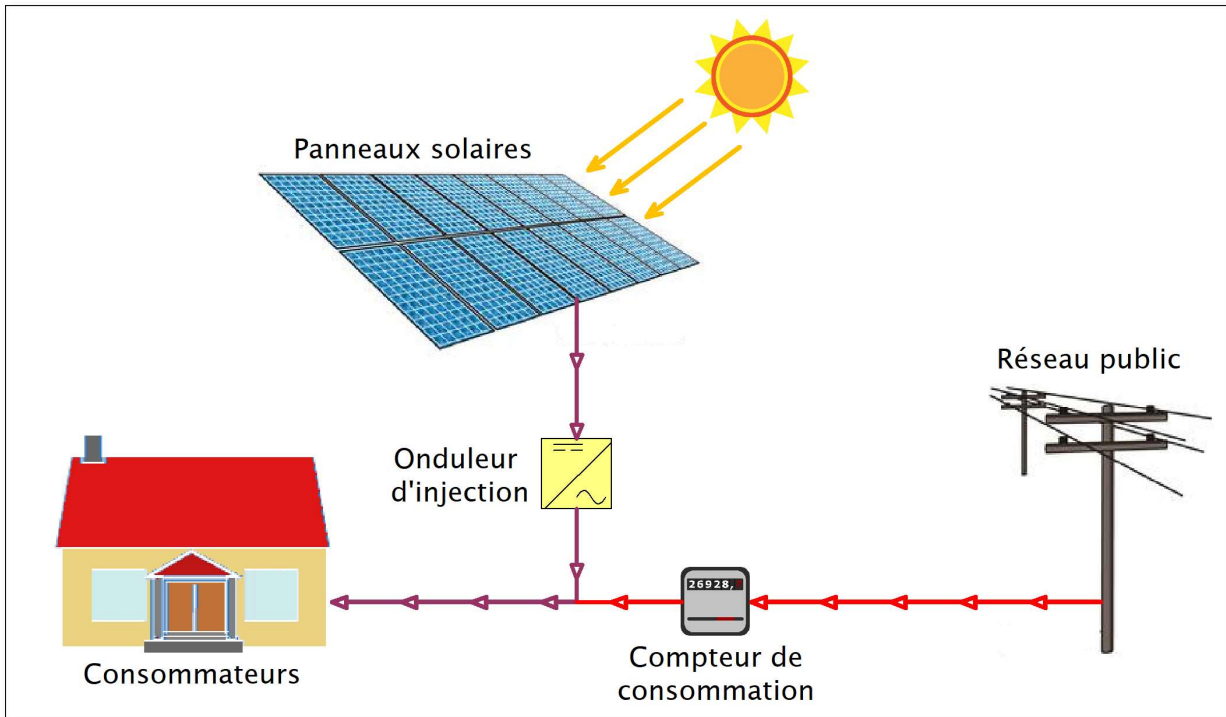


Figure 1.27 Système PV couplés aux réseaux (à injection directe et autonome).

La deuxième, l'installation de connexion pure (figure 1.28), permet une production d'énergie « au fil du soleil ». Elle fournit ainsi de l'électricité au réseau de distribution [32].

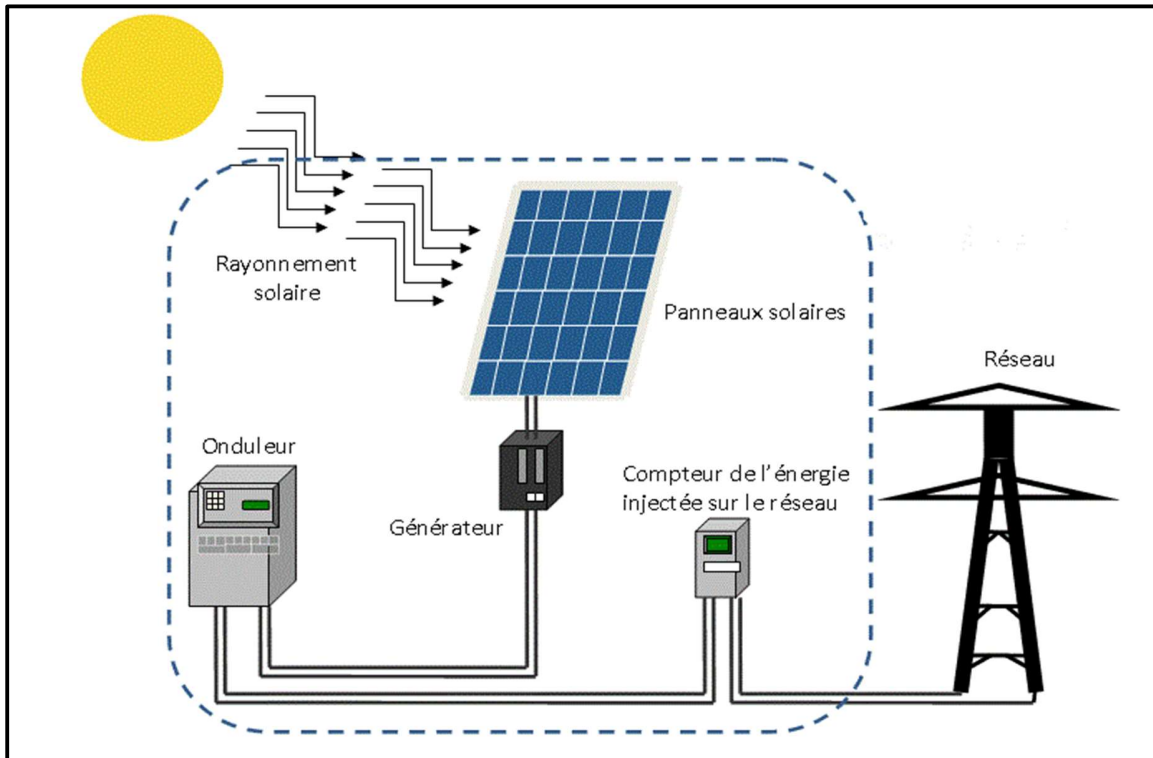


Figure 1.28 Système PV couplés aux réseaux (à injection pure).

1.8.4 Installations fonctionnant au fil du soleil (Pompage photovoltaïque)

Les systèmes PV sont utilisés efficacement dans le monde pour le pompage de l'eau. L'énergie solaire est convertie en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Le moteur qui alimente les pompes transforme le courant continu produit par les modules solaires en un courant alternatif

pour actionner le groupe moteur-pompe. L'eau pompée d'un puits sera stockée dans un réservoir [33, 34]. La figure 1.29 suivante montre une installation d'un système de pompage d'eau.

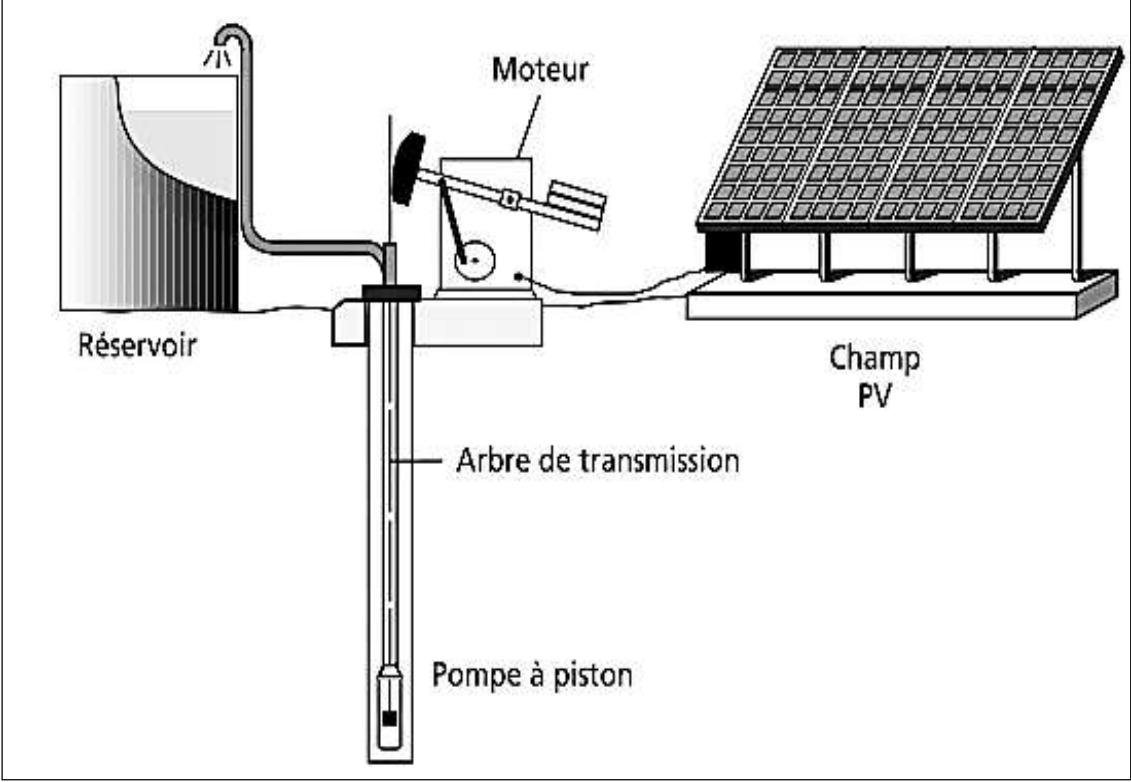


Figure 1.29 Système de pompage photovoltaïque.

1.9 Conclusion

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie élégante, propre, silencieuse et qui présente un grand nombre d'avantages. Notons son intégration facile à l'habitat, l'absence de pièces mécaniques mouvantes qui réduit l'entretien et leur fiabilité exprimé par la durée de vie d'environ 25 ans qui mène au besoin de son utilisation dans le domaine des applications spatiales et en sites isolés comme les stations de télécommunication et les systèmes de navigation en mer. Notons aussi le caractère modulaire des panneaux et champs photovoltaïques qui permettent un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes PV peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt. De plus leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, ils ne nécessitent pas de transport, combustible ou encore du personnel hautement spécialisé. Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités supérieures sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace dans le cas des installations de grandes dimensions. Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients mineurs, citons : La fabrication du module photovoltaïque qui relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Aussi le rendement réel de conversion qui est faible par rapport à d'autres sources d'énergies comme l'énergie fossile par exemple. Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

Chapitre 2

État de l'art des méthodes MPPT

Chapitre 2: État de l'art des méthodes MPPT

2.1 Introduction

Du chapitre précédant on a vu que le générateur PV peut fonctionner à son maximum en un seul point nommé point de puissance maximale (PPM) qui dépend de plusieurs paramètres : de l'ensoleillement et de la température. A cause du coût relativement onéreux de ce genre de systèmes, il est primordial d'extraire le maximum de puissance du générateur PV moyennant des mécanismes de poursuite (Tracking) connu par techniques MPPT, qui permettent de maintenir en permanence la puissance générée à son niveau maximal. Depuis l'apparition de la première chaîne de conversion PV dotée d'un contrôleur MPPT en 1968, les chercheurs n'ont cessé de se concurrencer entre eux afin de créer de nouvelles approches de poursuite et extraction optimale de la puissance PV générée. Dans ce sens, un détail sur les différentes méthodes développées dans la littérature est élaboré dans ce qui suit.

2.2 Principe de base de la recherche du MPPT

Le schéma d'association d'un convertisseur DC-DC muni d'un algorithme de recherche MPPT à un GPV est montré dans la figure 2.1 ci-après.

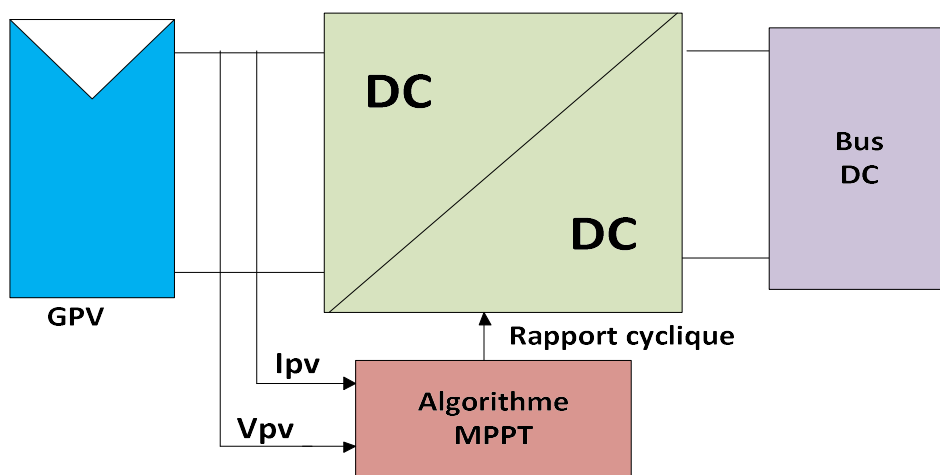
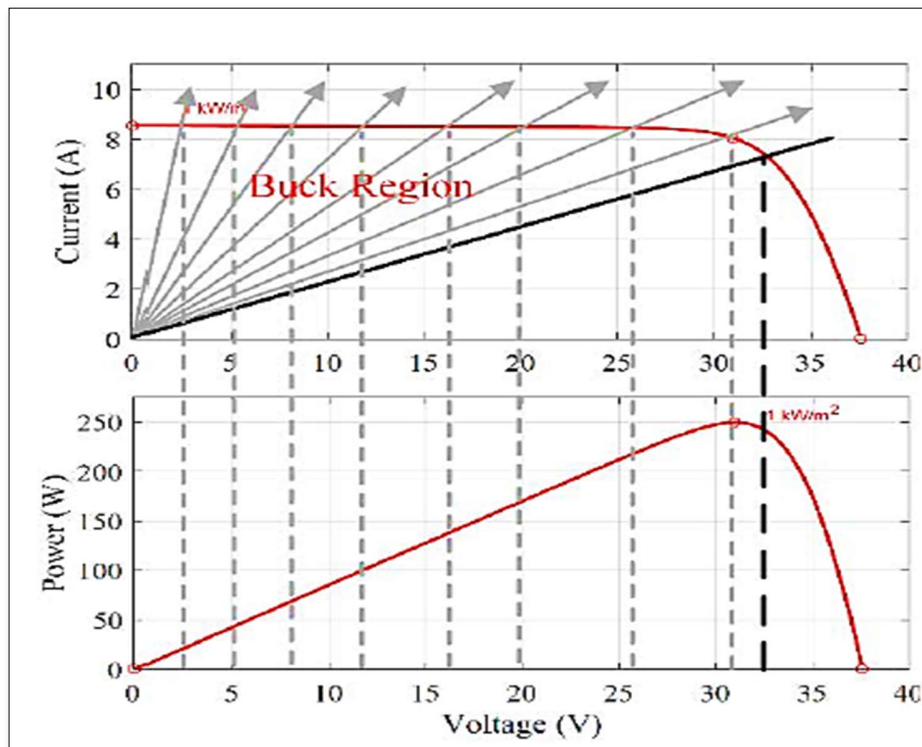
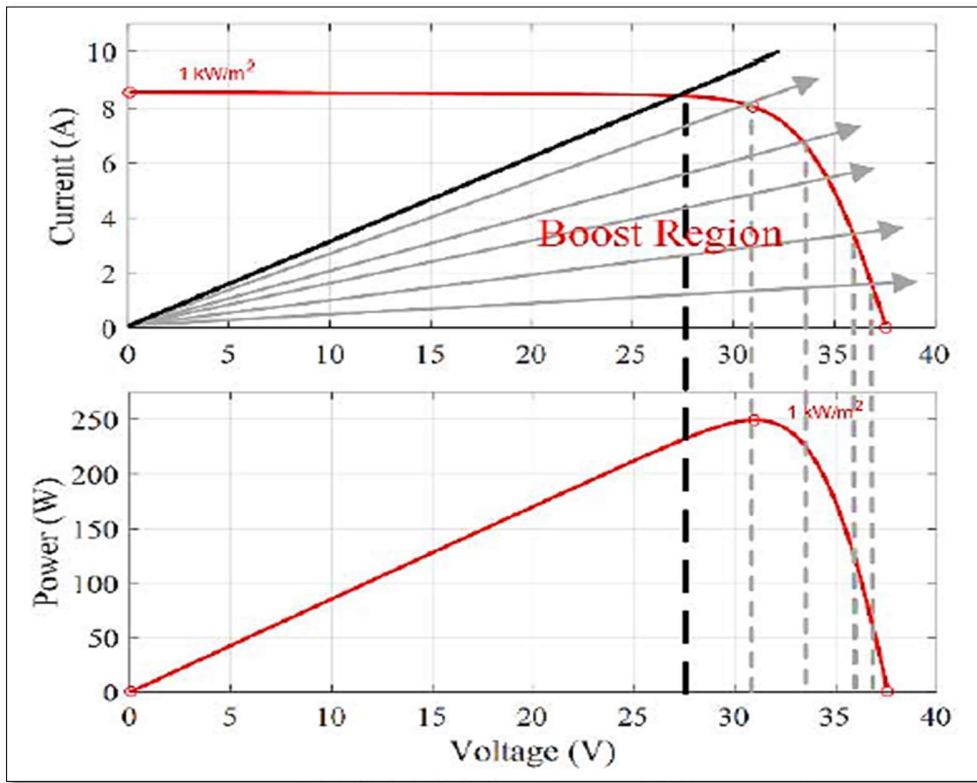


Figure 2.1 Association d'un GPV muni d'un algorithme MPPT avec le convertisseur DC-DC.

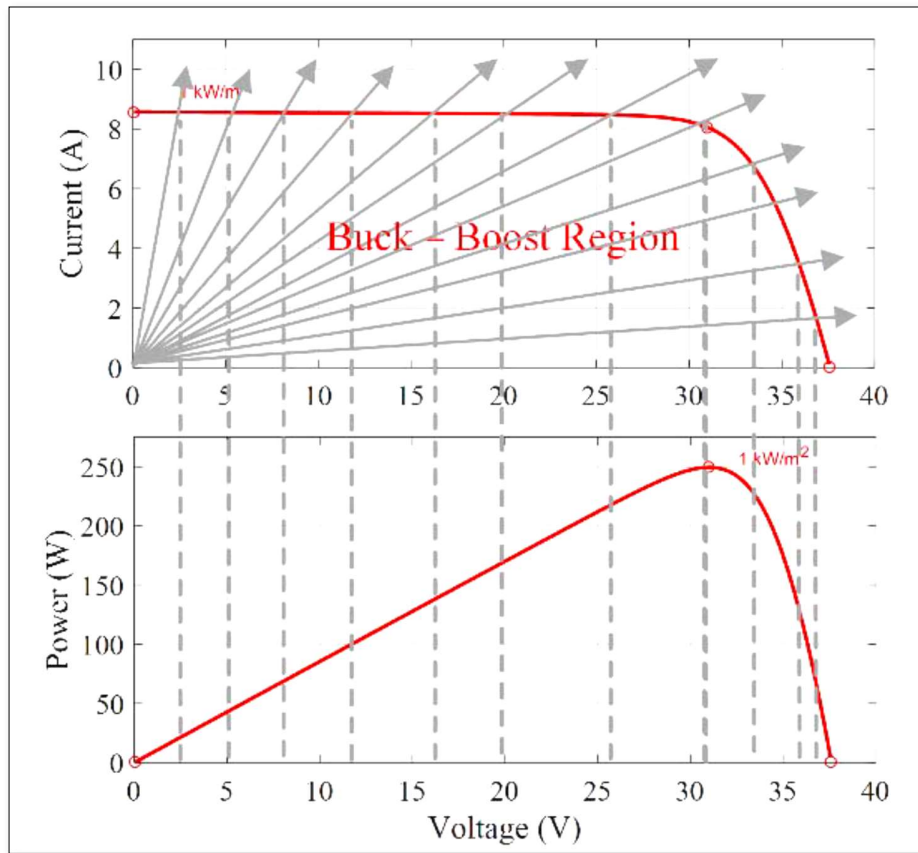
Comme présenté sur la figure 2.1 ci-haut, la commande MPPT est associée à un quadripôle qui permet de faire une adaptation entre le GPV et le bus continu. Figure 2.2 montre les différents convertisseurs DC-DC (buck, boost, buck-boost) et leurs effets sur les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ des GPV [35].



a)



b)



c)

Figure 2.2. Illustrations des effets des différents convertisseurs DC-DC sur MPPT: a) Buck, b) Boost, c) Buck-Boost.

Dans notre étude un élévateur (Boost) est choisi pour que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_m) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement au bus continu.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les fluctuations atmosphériques. Dans ce qui suit nous allons voir les différentes techniques MPPT existantes dans la littérature.

2.3 Différentes techniques d'extraction d'énergie maximale

Plusieurs méthodes MPPT existent dans la littérature [35-48], ceux conventionnels, ceux intelligents et ceux hybrides (Figure 2.3).

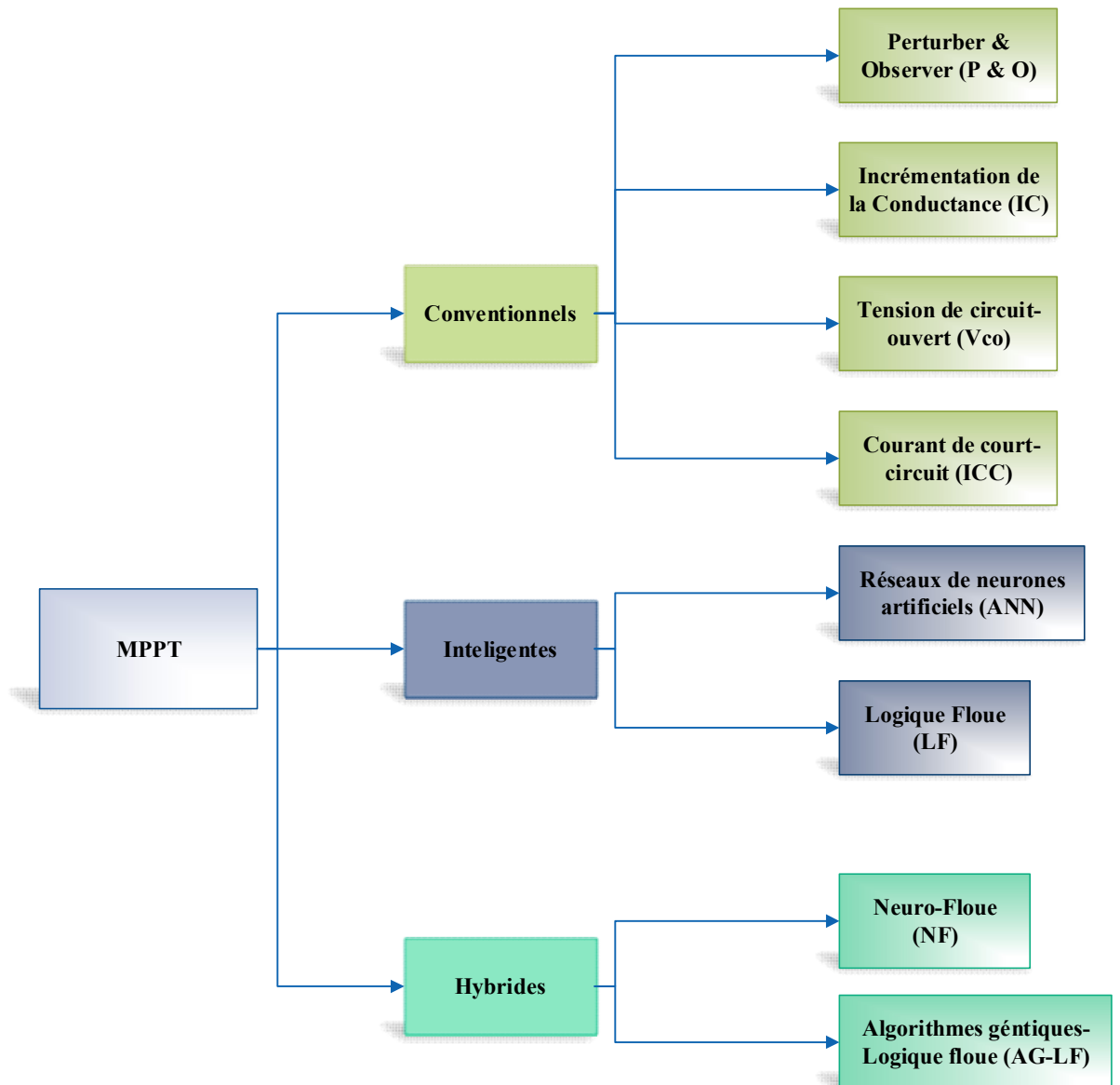


Figure 2.3 Classification des différentes méthodes MPPT.

2.3.1 Méthodes conventionnels

Un nombre important d'algorithmes de commande MPPT analogiques et numériques ont été élaborées dans la littérature [35, 37, 48]. Les premiers contrôleurs MPPT à être développés sont issus des méthodes conventionnelles. Ces derniers sont subdivisés en deux grandes catégories : les *méthodes indirectes* (MI) et les *méthodes directes* (MD).

Dans ce qui suit, nous rappelons le principe de certains des algorithmes de suivi MPPT les plus populaires :

2.3.1.a Méthode de Perturber & Observer (P&O)

C'est la méthode de poursuite du point de puissance maximale (PPM) la plus utilisée en raison de sa simplicité algorithmique et sa facilité d'implémentation. Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation (augmentation ou diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance de sortie mesurée ($P_{pv}=V_{pv}.I_{pv}$) [38, 39]. Comme le montre la figure 2.4 ci-dessous.

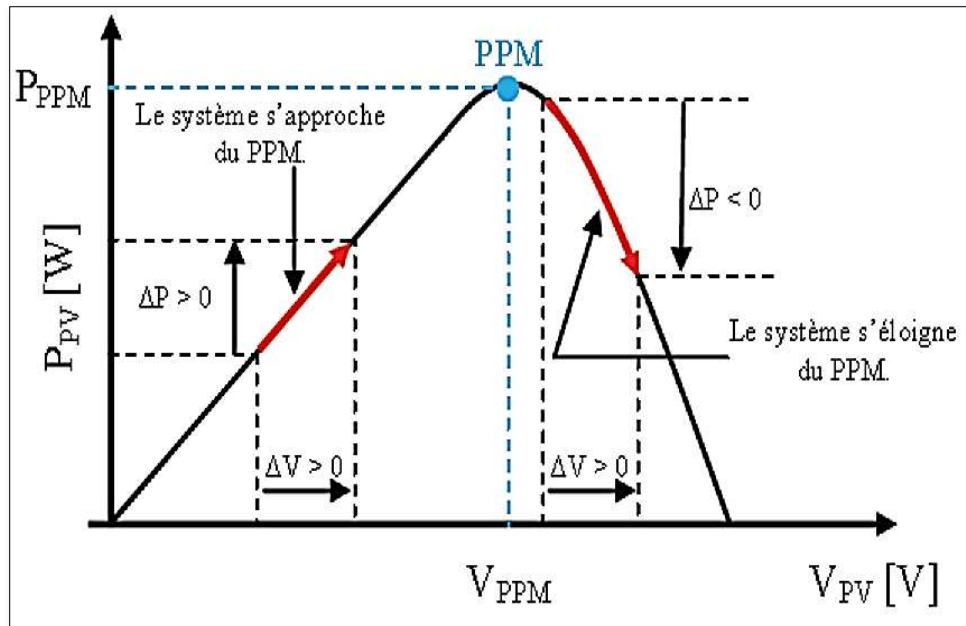


Figure 2.4 Principe d'algorithme P&O.

Cependant si la puissance actuelle P_{pv} est plus grande que la précédente P_{old} , alors la perturbation est maintenue dans la même direction, sinon la perturbation est inversée. La figure 2.5 ci-après donne l'organigramme de cet algorithme [35].

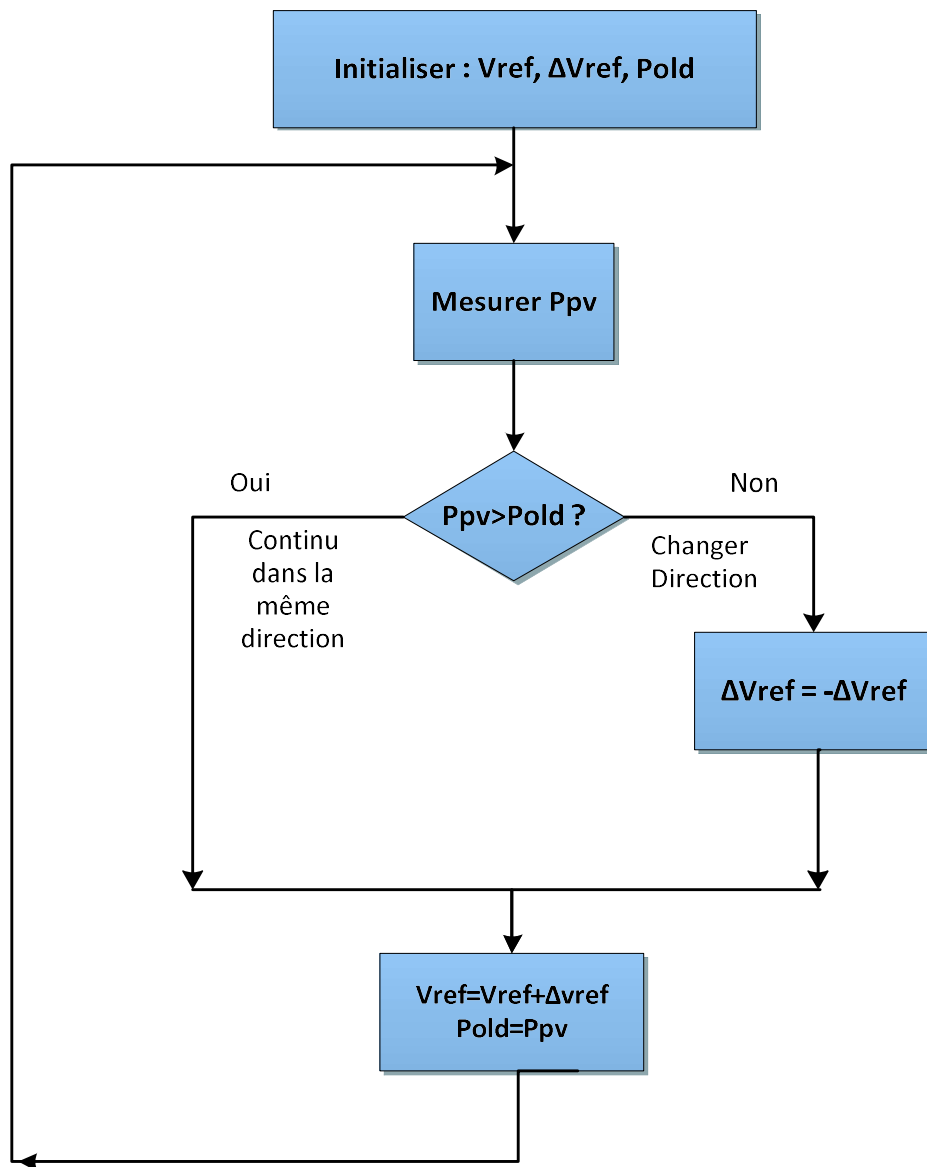


Figure 2.5 Organigramme de l'algorithme de Perturber & Observer « P&O ».

Le principe de cet algorithme P&O [14-16] : est de calculer la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k suite à une perturbation effectuée sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le

rapport cyclique D . Puis on la compare à la précédente de l'instant $(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du PPM et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PPM. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

2.3.1.b Méthode Incrémentation de la Conductance (IC) [17-19] :

Pour répondre aux inconvénients de la méthode P&O, une autre méthode MPPT dite à incrémentation de conductance (IC) [38-40] a été développée en 1995. Cette dernière est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de la puissance du panneau est nulle au PPM, positive à gauche et négative à droite [41].

Cela se traduit par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ Au PPM.} \quad (2.1)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ À gauche du PPM.} \quad (2.2)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ À droite du PPM.} \quad (2.3)$$

L'organigramme de la méthode IC est illustré par la figure 2.6 ci-après.

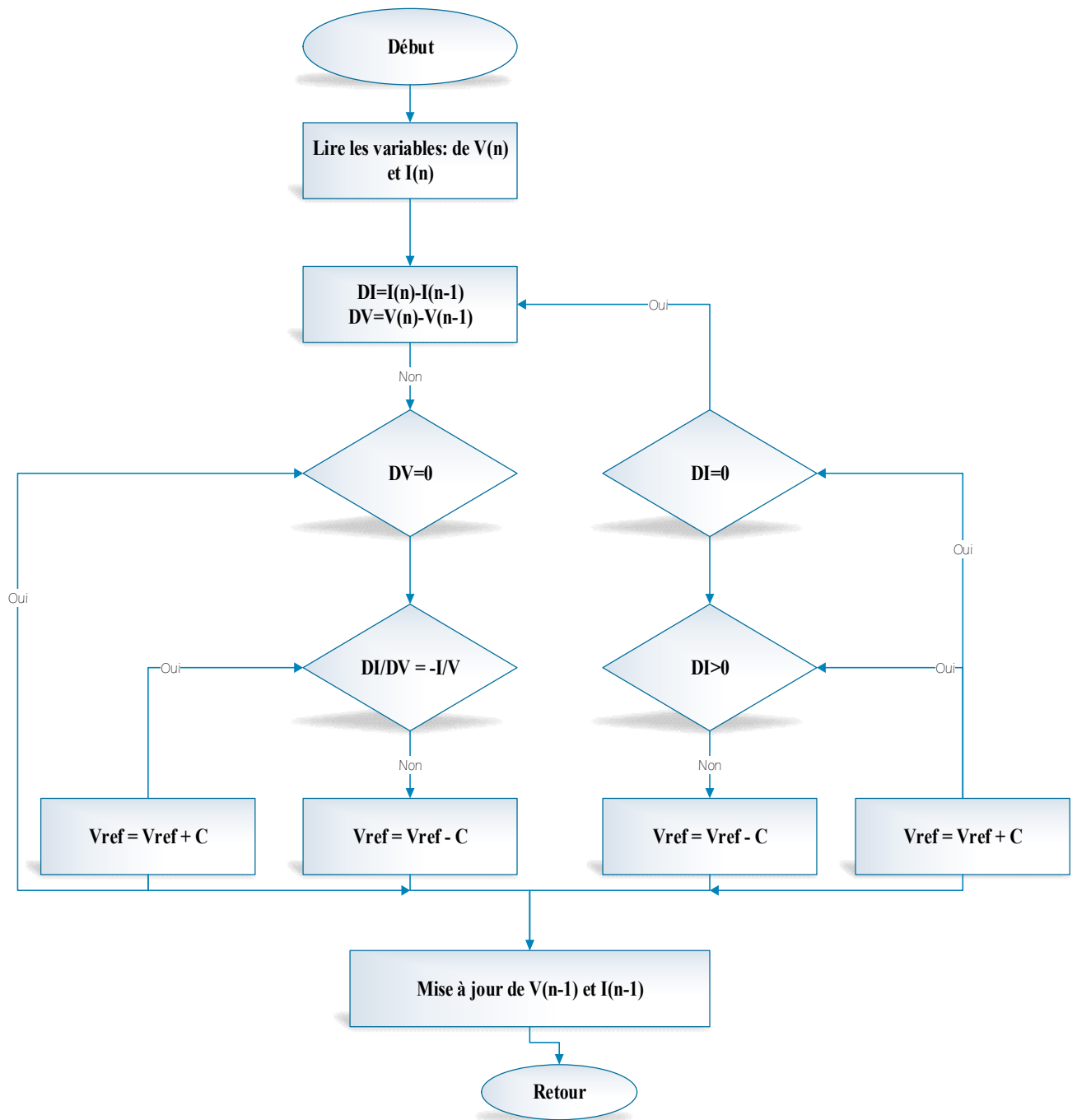


Figure 2.6 Organigramme du contrôleur IC.

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ sur l'incrément de la conductance dG pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Si dG est supérieur à l'opposé de la conductance $-G$, on diminue le rapport

cyclique. Par contre, si dG est inférieur à $-G$, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM.

2.3.1.c Méthode de la tension de circuit ouvert (V_{co}) :

Cette méthode est basée sur la relation : $V_{PPM}=k.V_{CO}$. Où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV. Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension V_{CO} (Figure 2.7) [35, 37]. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du PPM en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. En agissant cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale.

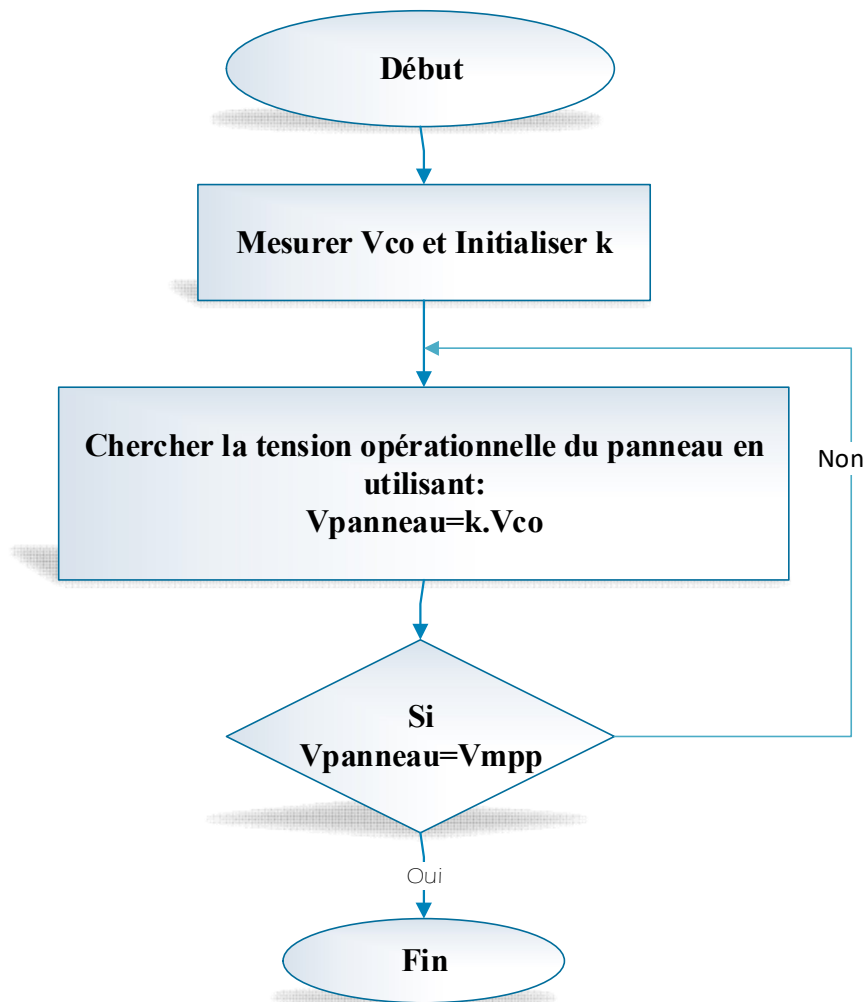


Figure 2.7 Organigramme du contrôleur de la tension de circuit ouvert (V_{co}) [41].

2.3.1.d Méthode du courant de court-circuit (I_{cc}) [7, 20]:

Cette technique est basée sur la relation : $I_{PPM} = k \cdot I_{CC}$ Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV (Figure 2.8) [35, 37]. Le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal, on changeant le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

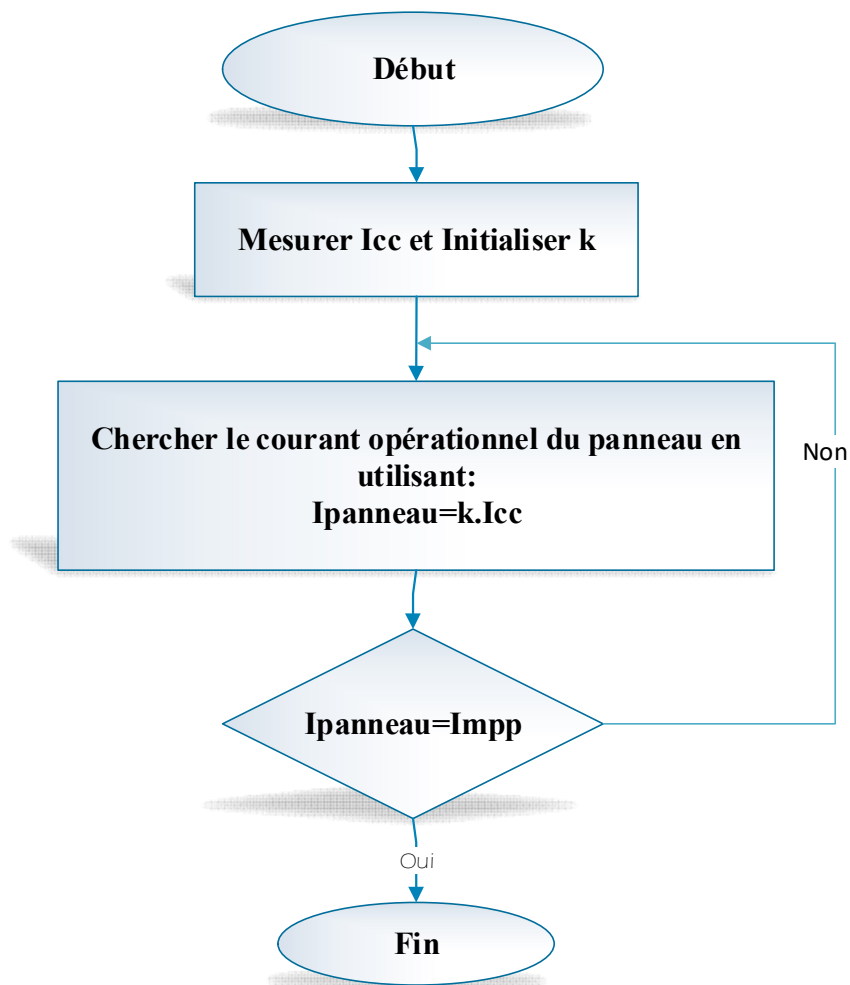


Figure 2.8 Organigramme du contrôleur du courant de court-circuit (I_{cc}) [41].

2.3.2 Méthodes intelligentes (Soft Computing)

De plus en plus, ces dernières années, comme alternative aux méthodes conventionnelles, on assiste à l'utilisation des méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA) [40, 44, 48]. Ces dernières, peuvent être regroupées en trois grandes classes (Figure 2.9) : celles qui se basent sur les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN), celles qui s'appuient sur la Logique Floue (LF) et enfin, celles qui reposent sur la combinaison de plusieurs méthodes intelligentes à savoir : les méthodes hybrides.

Il est à signaler que le terme "*Soft Computing*" se réfère à un ensemble de techniques de calcul (computational techniques) utilisées dans plusieurs domaines, notamment, *l'ingénierie, le traitement d'images, la robotique...etc* [48].

Parmi les autres techniques MPPT, on compte les algorithmes MPPT inspirés de nouvelles technologies et inspirés par la nature et la structure biologique, parmi lesquels on peut citer : «Algorithmes génétiques (AG)» [25, 26], et les «méthodes hybrides» [6, 24, 29].

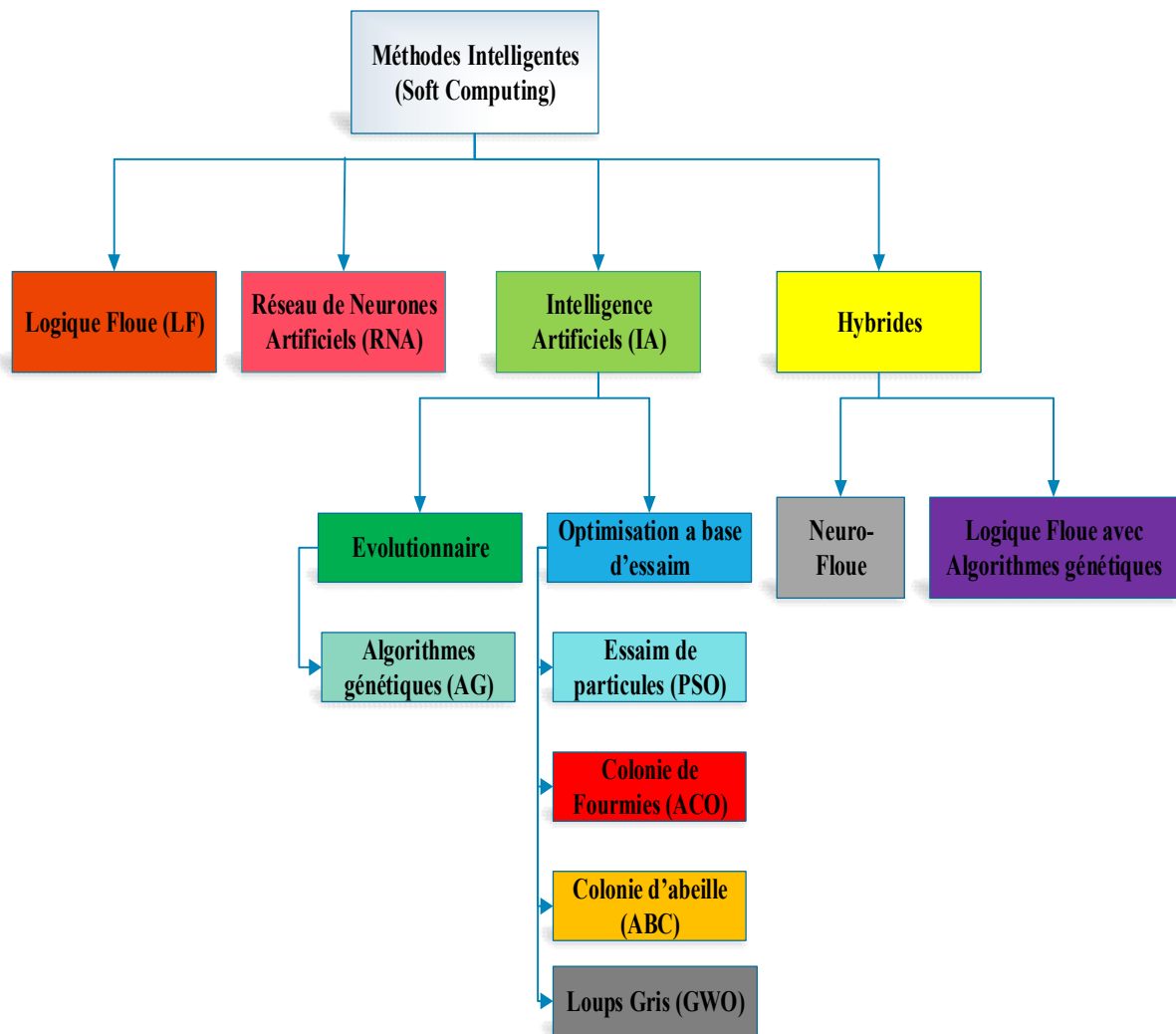


Figure 2.9 Classification des méthodes MPPT intelligentes selon [26, 27,29].

2.3.2.a Algorithmes basés sur la logique floue (LF) [1, 5, 8] :

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

De manière générale, le principe du contrôleur utilisant la logique floue se base sur deux variables d'entrées (figure 2.10) qui sont l'erreur (E), sa variation (ΔE) et une variable en sortie (ΔD),

correspondant à la variation du rapport cyclique qui pilote le signal de commande du convertisseur statique pour la recherche du PPM [8].

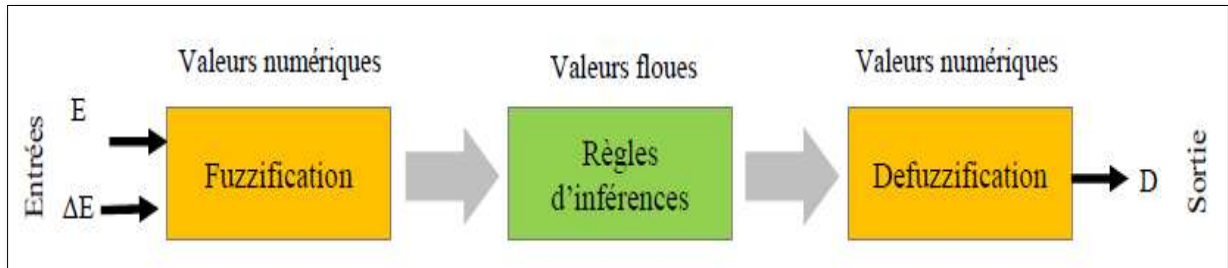


Figure 2.10 Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue.

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (2.4)$$

$$CE = E(k) - E(k - 1) \quad (2.5)$$

$$\Delta D = (\sum_{k=1}^m P(k) * w_k) / \sum_{k=1}^m w_k \quad (2.6)$$

La figure 2.11 ci-dessous illustre l'implémentation du contrôleur MPPT à base de logique floue. Le contrôleur flou se compose de trois blocs de traitement consécutifs : le premier bloc est celui de la **fuzzification** qui permet le passage du domaine réel au domaine flou ; le deuxième est consacré aux **règles d'inférences** alors que le dernier est réservé à l'opération de **defuzzification** permettant le retour au domaine réel.

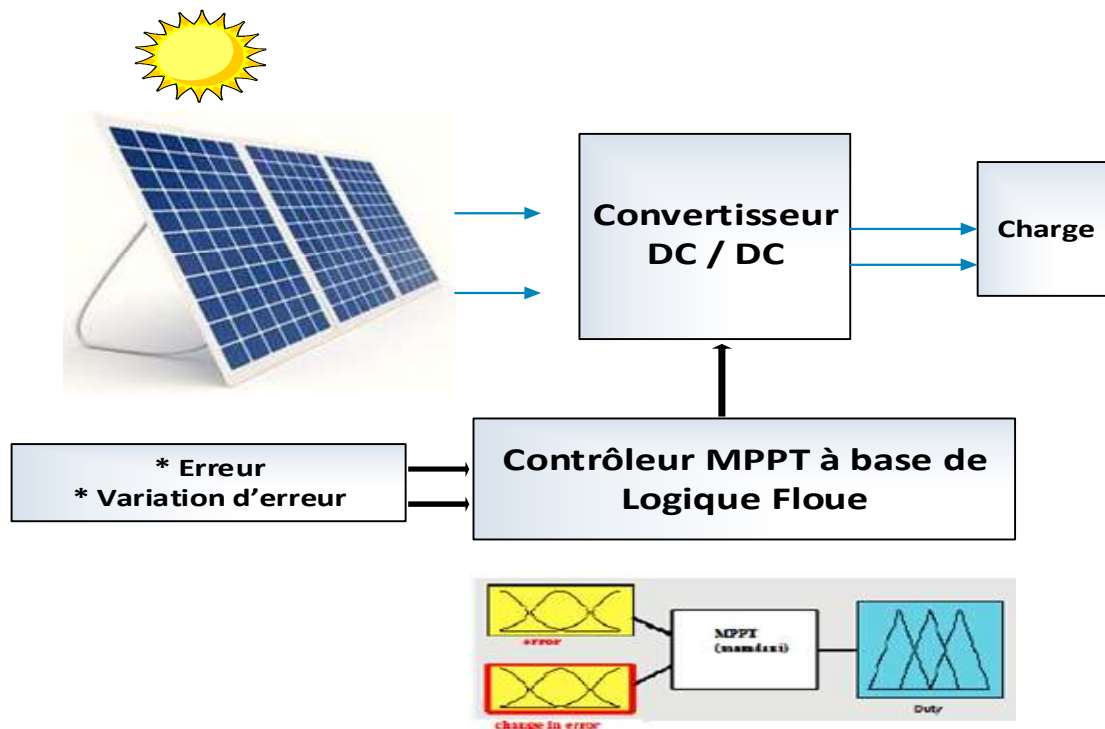


Figure 2.11 Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue.

2.3.2.b Contrôleur MPPT à base de réseaux de neurones artificiels (RNA)

Ces méthodes fonctionnent à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Grâce à leurs performances, ces algorithmes ont été appliqués pour le control et la recherche du PPM. Ces derniers se sont avérés efficaces pour localiser le point de puissance maximale réduisant le nombre d'itérations et des oscillations autour du PPM. Généralement, le type de réseaux de neurones utilisé pour l'élaboration de contrôleur MPPT se compose de trois couches Une *couche d'entrée*, une *couche cachée*, et une *couche en sortie* [48].

Dans la majorité des contrôleurs développés et cités dans le cadre de l'optimisation de puissance à base de ces méthodes, les variables d'entrée du réseau de neurones sont les paramètres du module PV : la tension V_{oc} , le courant I_{sc} , la température et l'éclairement. La variable de sortie étant le rapport cyclique utilisé pour forcer le convertisseur de puissance à fonctionner autour du PPM. La figure 2.12 ci-dessous illustre l'implémentation d'un contrôleur MPPT à base de réseaux de neurones.

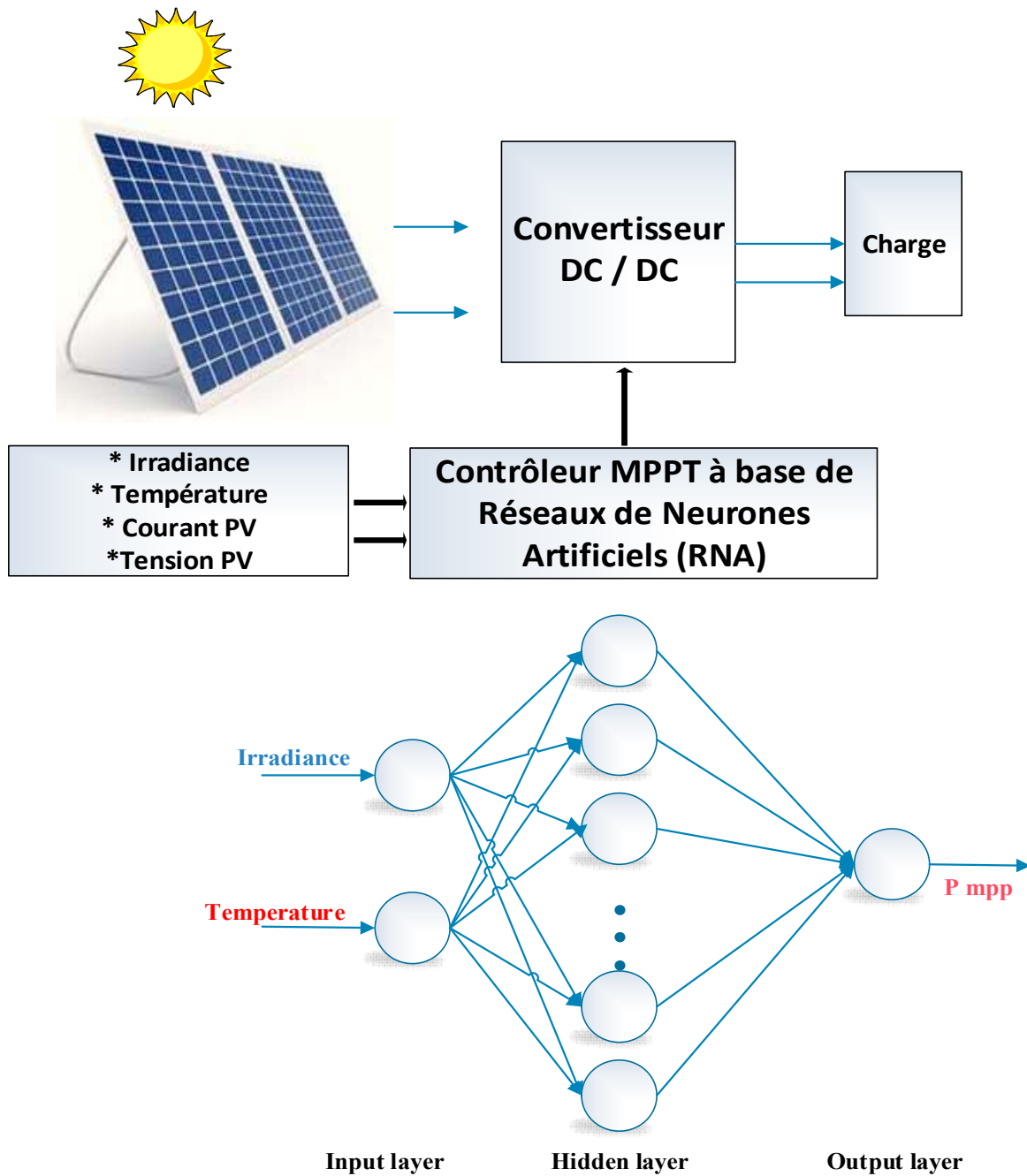


Figure 2.12 Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur les réseaux de neurones.

2.3.3 Contrôleur MPPT à base de méthodes d'intelligence artificielles

De plus en plus, ces dernières années, comme alternative aux méthodes conventionnelles, on assiste à l'utilisation des méthodes basées sur l'intelligence artificielle (MIA) [48].

2.3.3.a Méthodes basées sur les algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires (*evolutionary algorithms* en anglais), sont une famille d'algorithmes dont le principe s'inspire de la théorie de l'évolution (sélection, reproduction, mutation, évaluation, nouvelle population) pour résoudre des problèmes divers (Figure 2.13) [49]. Ce sont des méthodes de calcul bio-inspirées. L'idée est de faire évoluer un ensemble de solutions à un problème donné, dans l'optique de trouver les meilleurs résultats. Ce sont des algorithmes dits stochastiques, car ils utilisent itérativement des processus aléatoires. Parmi ces algorithmes on retrouve les algorithmes génétiques qui sont détaillé ci-suivant.

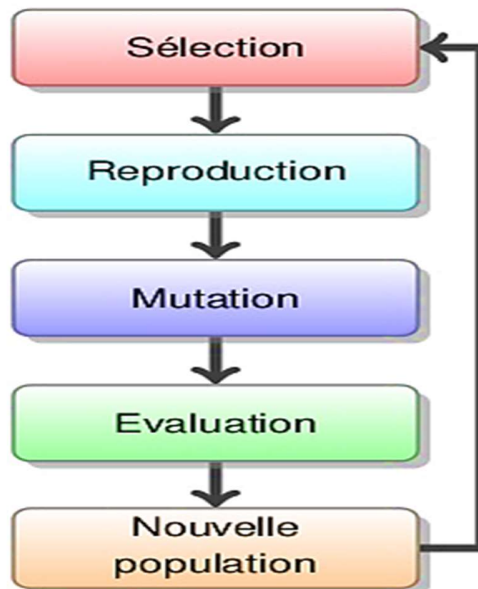


Figure 2.13 Principe de base des algorithmes évolutionnaires.

- **Algorithmes génétiques (AG) :**

Les algorithmes génétiques (AG) ont été initialement développés par John Holland (1975) [48]. Ils comptent parmi les approches issues des méthodes évolutionnaires utilisées pour résoudre les différents problèmes d'optimisations dans le domaine des énergies renouvelables. Plus particulièrement pour la poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes PV.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc [26]. 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.
2. Un mécanisme de génération de la population initiale.
3. Une fonction à optimiser.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer 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.

Le fonctionnement des algorithmes génétiques par la figure suivante (Figure 2.14) :

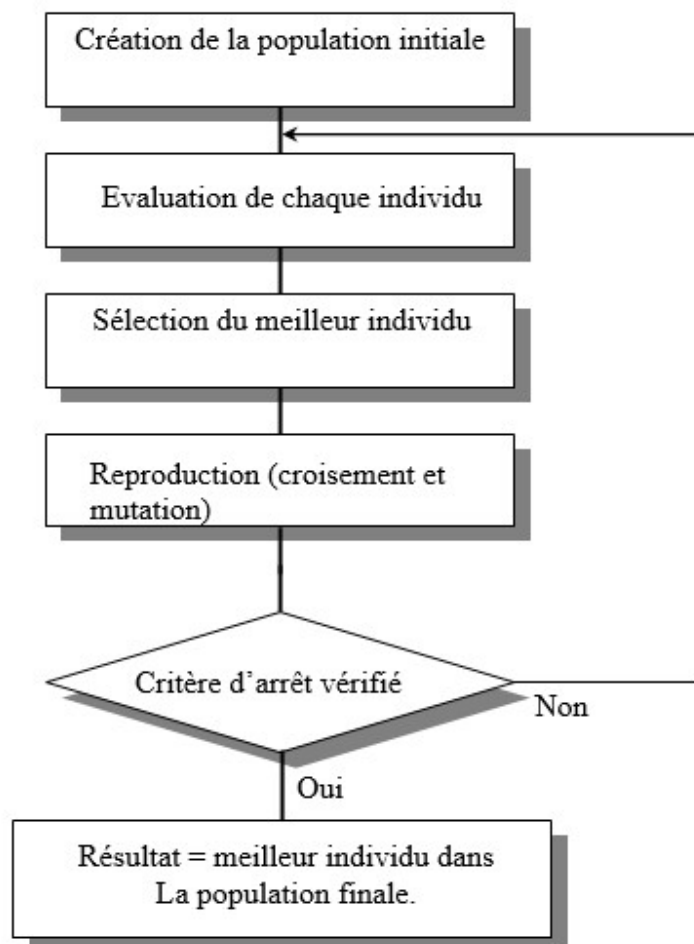


Figure 2.14 Algorithme Génétique de base.

2.3.3.b Méthodes basées sur les algorithmes à base d'essaim :

Dans la nature, plusieurs espèces sont caractérisées par le comportement social. Les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux, et les troupes d'animaux terrestres, sont le résultat du besoin biologique qui leur pousse à vivre en groupe. Ce comportement est également une des principales caractéristiques des insectes sociaux (abeilles, fourmis...). De ces principes-là, les chercheurs se sont inspirés pour développer des méthodes basées sur les comportements de ces animaux, et ont donné naissance à ce que l'on appelle par Méta-heuristique. Ce mot concerne toutes les méthodes qui modélisent l'interaction des agents (animaux) qui sont en mesure de s'auto-organiser. Elles représentent des méthodes de résolution de problèmes combinatoires qui consistent à répéter certains processus jusqu'à obtenir la solution optimale. Ces méthodes ont la possibilité de retrouver la solution optimale globale. Dans cet ordre rentre la problématique de la commande optimale MPPT, sous ombrage. L'ombrage fait que la caractéristique $P-V$ ait plusieurs points optimaux locaux et un seul point optimal global, (Figure 2.15).

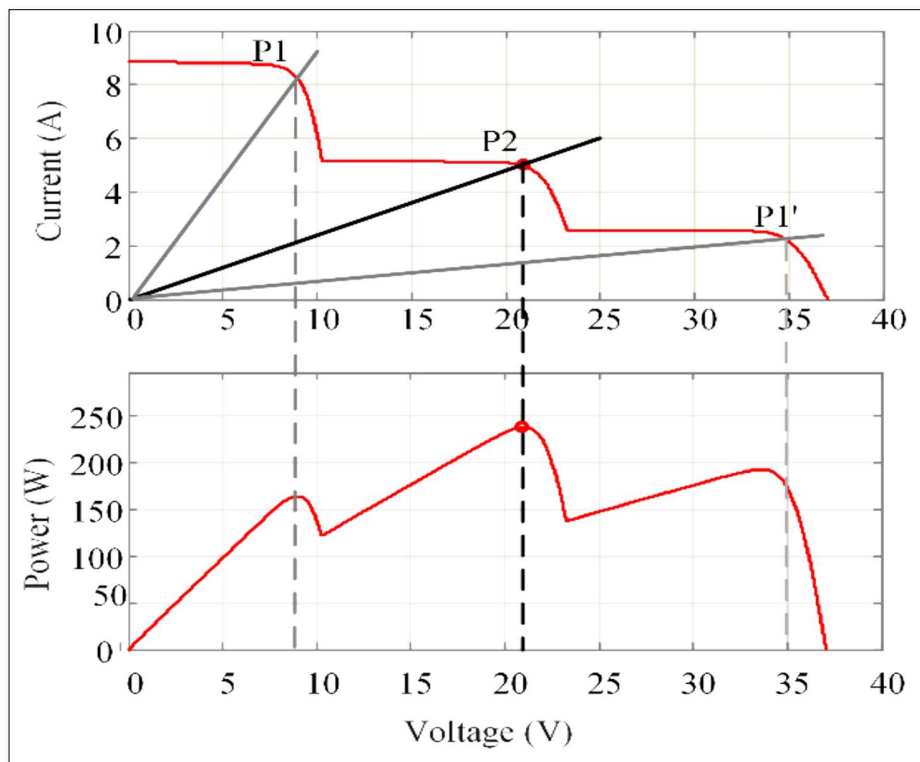


Figure 2.15 Effet d'ombrage sur le point PPM des caractéristiques $I-V$ et $P-V$.

- **Algorithmes d'essaim de particules (PSO)**

Cette méthode se base sur la collaboration des individus (oiseux) entre eux : chaque particule se déplace et à chaque itération, la plus proche de l'optimum communique aux autres sa position pour qu'elles modifient leur trajectoire [50]. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents puisse posséder une organisation globale complexe. Cette méthode se base sur la **collaboration** des oiseaux entre eux, chaque particule se **déplace** et la plus **proche** de l'optimum **communique** aux autres sa position pour qu'elles **modifient** leur trajectoire (Figure 2.16).

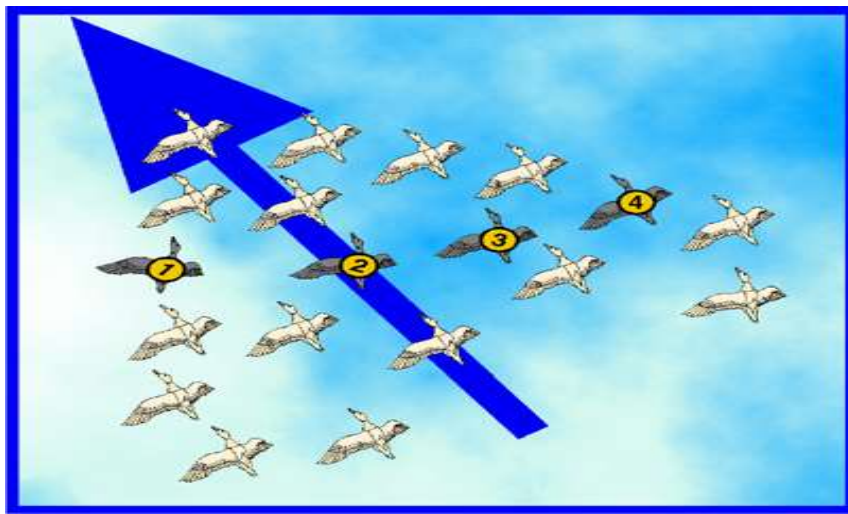


Figure 2.16 Inspiration de l'algorithme PSO lors de migration des oiseaux.

Pour appliquer la PSO il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objectif à optimiser. Le principe de l'algorithme est de déplacer ces particules afin qu'elles trouvent l'optimum. Chacune de ces particules est dotée :

- D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.
- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale. A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure position (déplacement égoïste) mais aussi la meilleure position de son voisinage (déplacement panurgien).

Dans les faits, on calcule la nouvelle vitesse à partir de la formule suivante :

$$V_{k+1} = C_1 * V_k + C_2 * (best_{particule} - position_{particule}) + C_3 * (best_{voisin} - position_{particule}) \quad (2.7)$$

Où :

V_{k+1} et V_k sont les vitesses de la particule aux itérations k et $k+1$.

- $best_{particule}$ est la meilleure position de la particule.
- $best_{voisin}$ est la meilleure position de son voisinage à l'itération k .
- $position_{particule}$ est la position de la particule à l'itération k .
- c_1, c_2, c_3 sont des coefficients fixés, c_2 est généré aléatoirement à chaque itération et, en général, $c_3 = c_2$.

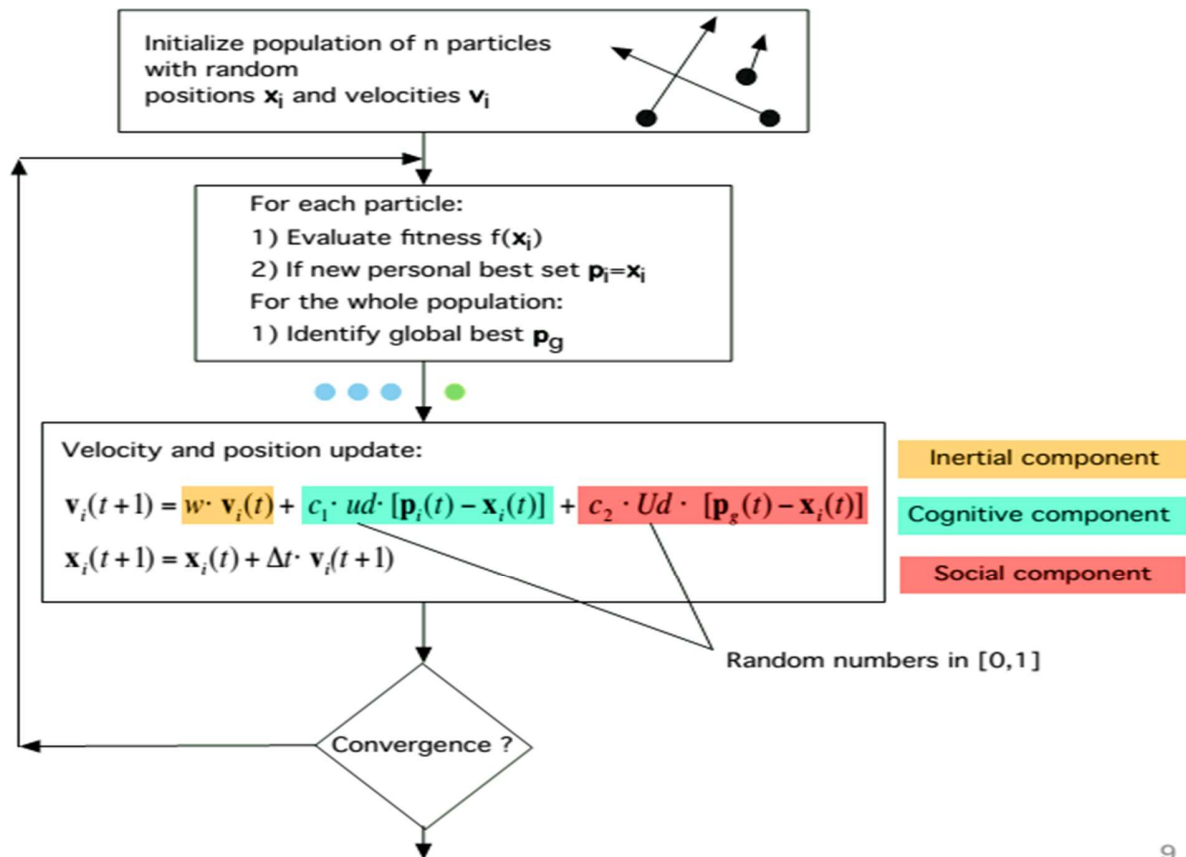
On peut ensuite déterminer la position suivante de la particule grâce à la vitesse que l'on vient de calculer :

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1} \quad (2.8)$$

Où :

- X_k est la position de la particule à l'itération k .
 - On génère X_0 et V_0 au début de cet algorithme.
- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.

Le principe de cet algorithme est représenté dans l'organigramme de la figure 2.17 suivante.



9

Figure 2.17 Principe de PSO.

A tout instant, chaque particule connait :

- Sa meilleure position visitée. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées.
- La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnement optimal.
- La valeur qu'elle donne à la fonction objectif car à chaque itération il faut une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

- **Algorithmes de colonie de fourmis (ACO)**

L'algorithme de colonie de fourmis (ACO) a été développé par *Marco Dorigo*. L'algorithme est une méthode bio inspirée consistante et effective s'inspirant principalement du comportement des fourmis lors de la recherche de la nourriture [48]. Cette approche s'inspire du comportement des fourmis qui **recherche** le plus court **chemin** entre leur colonie et une source de nourriture (Figure 2.18).

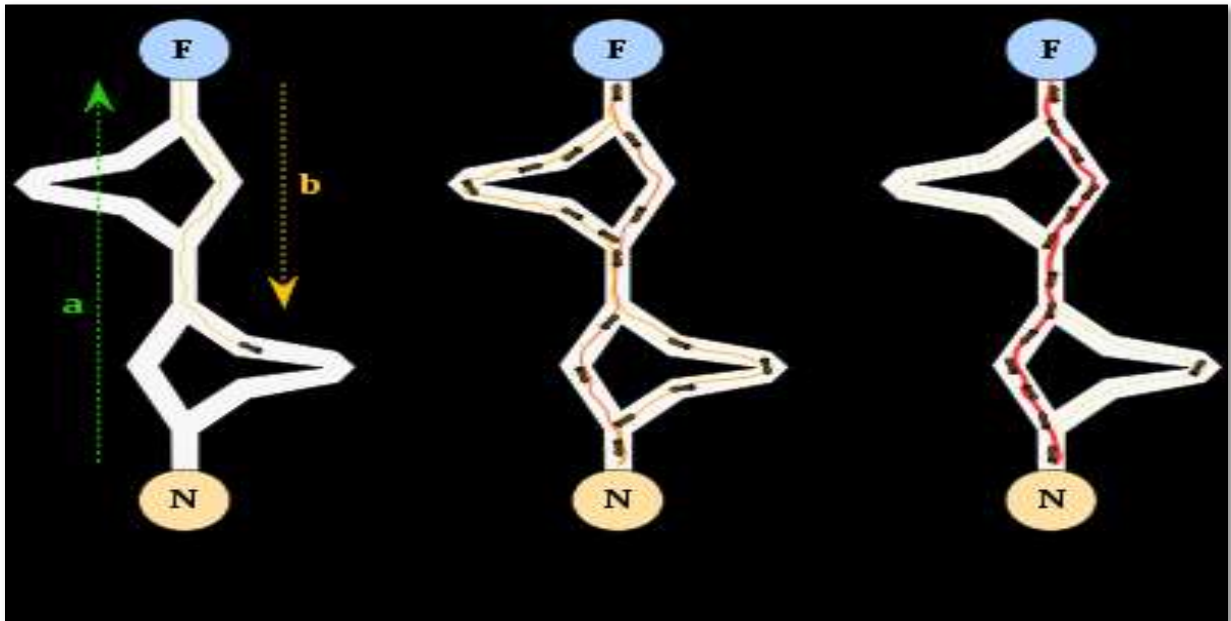


Figure 2.18 Déplacement des fourmis lors de la recherche de nourriture.

L'algorithme est bien adapté pour l'optimisation des problèmes non linéaires tels que le control MPPT. Dans ce cas, la fonction objective correspond à la puissance à maximiser et le rapport cyclique comme variable de contrôle.

- **Algorithmes de colonies d'abeilles (ABC)**

Dans cette méthode, les abeilles artificielles représentent des agents qui en collaborant les unes avec les autres, résolvent des problèmes complexes d'optimisation combinatoire. Dans cet algorithme, l'emplacement de la source de nourriture représente la solution possible au problème, et la quantité du nectar de cette source correspond à une valeur objective dite **fitness** [48, 51].

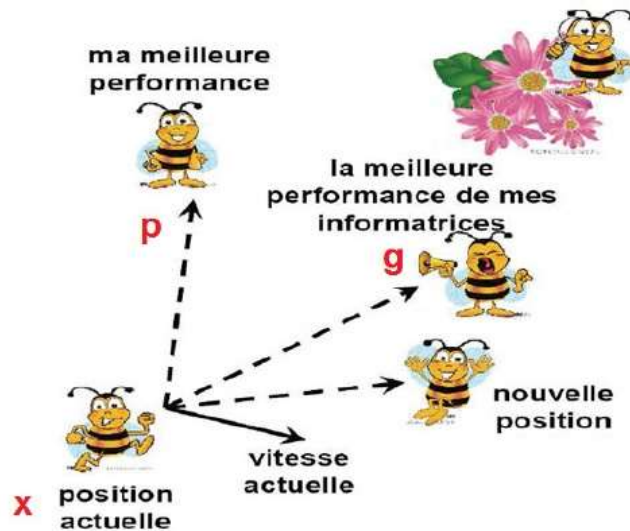


Figure 2.19 Principe de déplacement des abeilles.

Les butineuses sont attribués aux différentes sources de nourriture de façon à maximiser l'apport total de nectar. La colonie doit **optimiser** l'efficacité globale de la collecte. La répartition des abeilles est donc en fonction de nombreux facteurs tels que la quantité du nectar et la distance entre la source de nourriture et la ruche. Ce problème est similaire à la répartition des serveurs d'hébergement web, qui était en fait un des premiers problèmes résolus en utilisant les algorithmes d'abeilles par NAKRANI et TOVEY en 2004.

L'Abeille : **insecte sociale**, très **organisée** et très **sérieuse** dans leur travaux. Grâce à son **intelligence**, les chercheurs ont développé une méthode qui est basé sur la création d'un système multi-agent (les **abeilles artificielles** représentent les agents) qui en collaborant les unes avec les autres [52].

Cette méthode a la capacité, grâce à l'échange d'informations et le processus de recrutement d'intensifier la recherche dans les régions prometteuses de l'espace de solutions.

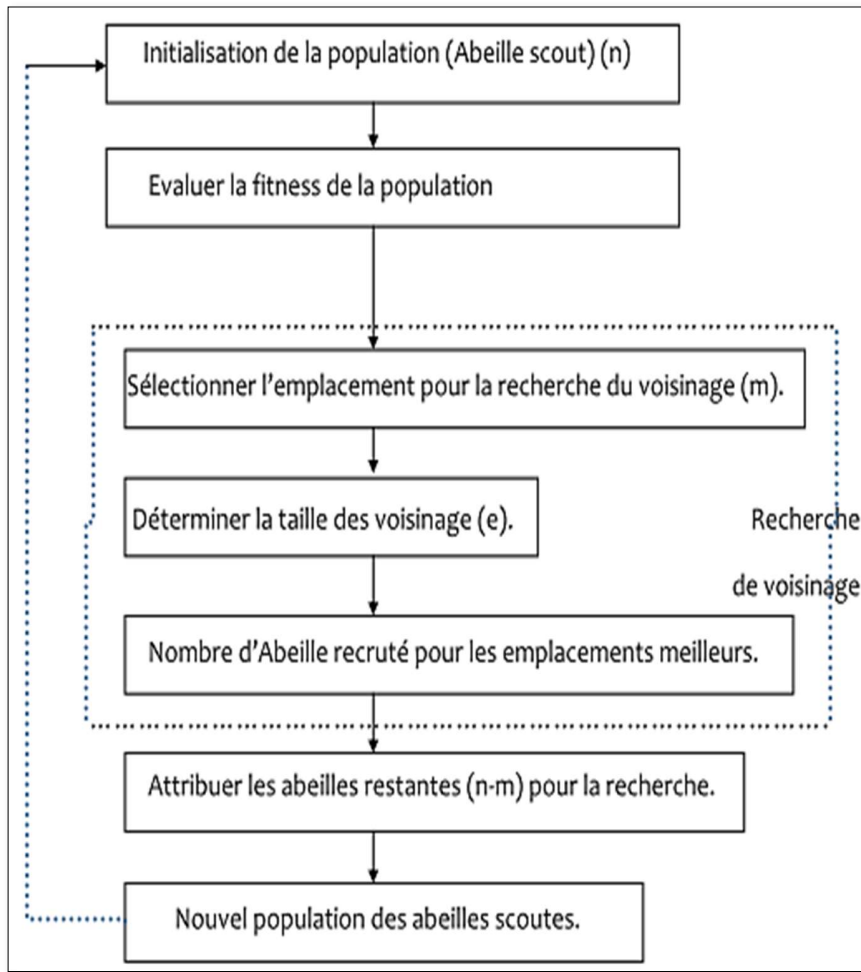


Figure 2.20 Principe de l'Algorithme de colonie d'abeilles.

Dans le cas de l'optimisation de puissance d'un système PV, l'emplacement de la source de nourriture représente la solution possible au problème, dans ce cas, cela correspond à la valeur du rapport cyclique du convertisseur statique, et la quantité du nectar de cette source correspond à une valeur objective dite *fitness* de chaque solution (rapport cyclique) c.a.d. la puissance $P=I.V$.

- **Algorithmes de meute de loups gris (GWO)**

L'algorithme d'optimisation de la meute de loups, ou en anglais Gray Wolf Optimisation algorithm GWO est une proposition récente développée par *Mirjalili* et al. En 2014 [53].

L'algorithme est inspiré par l'optimisation de la technique d'attaque utilisée par les loups gris pendant la chasse. Il imite la hiérarchie de leadership et le mécanisme de chasse des loups gris dans la nature.

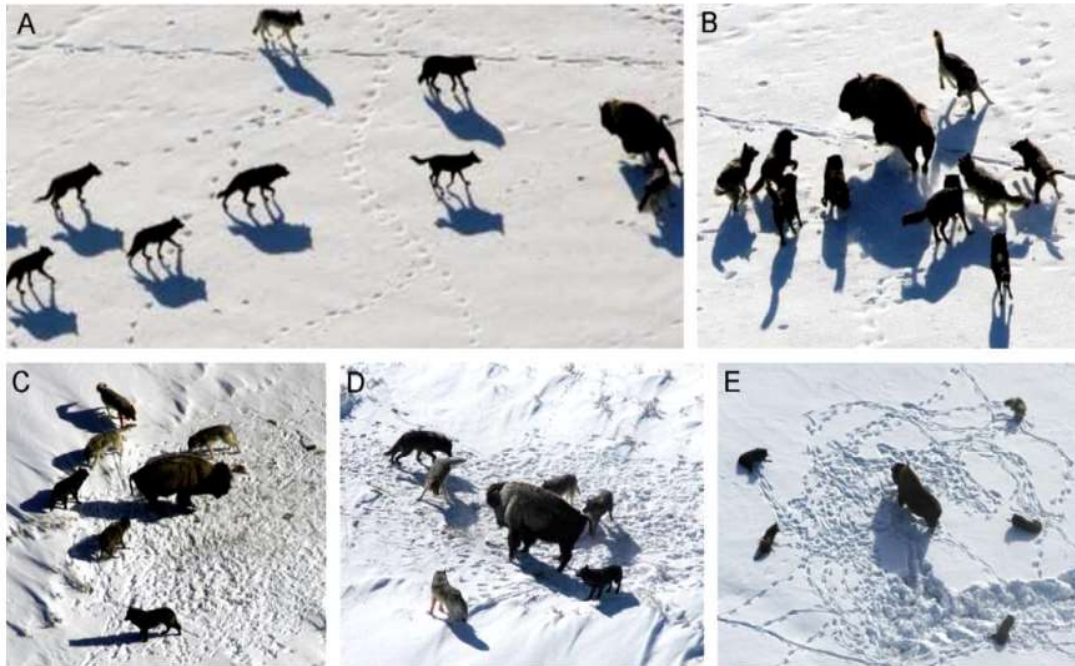


Figure 2.21 Principe de l'Algorithme de meutes de loups gris [54].

Comme l'illustre la figure ci-dessous, il y a essentiellement trois étapes pour l'algorithme GWO, à savoir la chasse, recherche de proie (repérage) en formant un groupe, puis en encerclant la proie et enfin l'attaque de la proie.

2.3.4 Contrôleur MPPT à base de méthodes hybrides

Les systèmes intelligents hybrides combinent plusieurs méthodes intelligentes. L'application de celles-ci dans le domaine de l'optimisation de puissance dans les systèmes PV a montré de bonnes performances [48]. Parmi ces dernières, nous pouvons citer :

2.3.4.a Méthodes basées sur les systèmes neuro-flous (NF)

Ces méthodes d'optimisation basée sur le système *neuro-flou* combinent les concepts de deux paradigmes : les réseaux de neurones artificiels et la logique floue. Ces derniers mettent à profit les

deux méthodes : à savoir la capacité d'apprentissage de la première, la lisibilité et la souplesse de la seconde.

Un système neuro-flou est donc un réseau neuronal multicouche avec des paramètres flous. Ainsi, le contrôleur neuro-flou est constitué de deux entrées (E) et (ΔE), et d'une seule sortie (D), qui représentent respectivement l'erreur, la variation d'erreur et le rapport cyclique qui pilote le signal de commande du convertisseur statique pour la recherche du point de puissance maximale.

La figure 2.13 ci-dessous illustre l'implémentation du contrôleur MPPT à base de la méthode neuro floue.

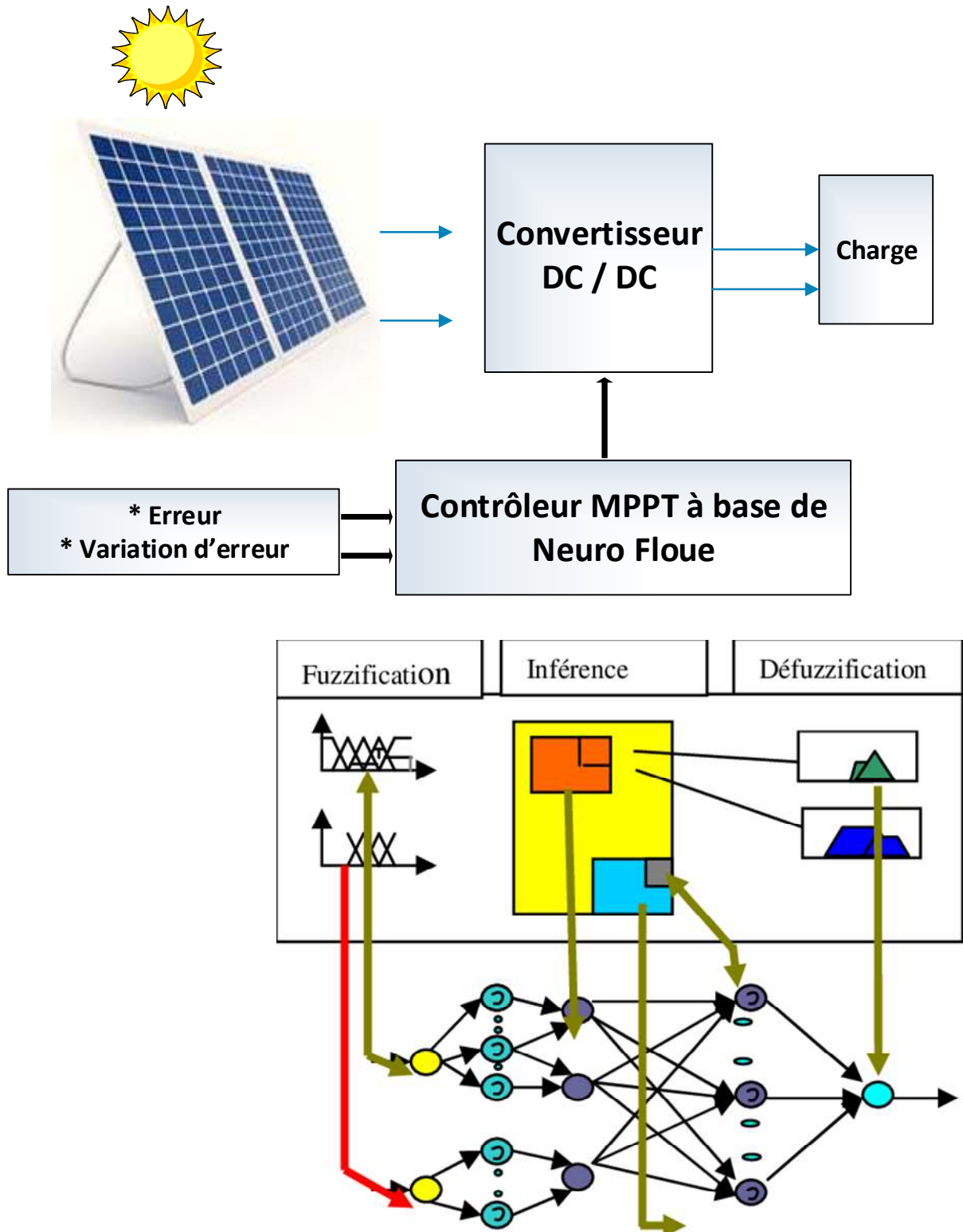


Figure 2.22 Mise en œuvre du contrôleur MPPT à base de Neuro Floue ANFIS sur la logique.

2.3.4.b Méthodes basées sur la logique floue combiné avec les algorithmes génétiques

La méthode d'optimisation de la logique floue par des algorithmes génétiques qui, comme son nom l'indique, combine les algorithmes génétiques et la logique floue [26].

Le contrôleur MPPT flou optimisé par les algorithmes génétiques (FL_GA_MPPT) est constitué de deux entrées (E), (ΔE) et d'une sortie (D). Chacune de ces variables est définie par cinq fonctions d'appartenance. La population se compose d'un ensemble d'individus, chacun ayant trois chromosomes : E , ΔE et D tel que rapporté dans [48].

La figure 2.14 ci-dessous illustre l'implémentation du contrôleur MPPT à base de la méthode flou optimisé par les algorithmes génétiques.

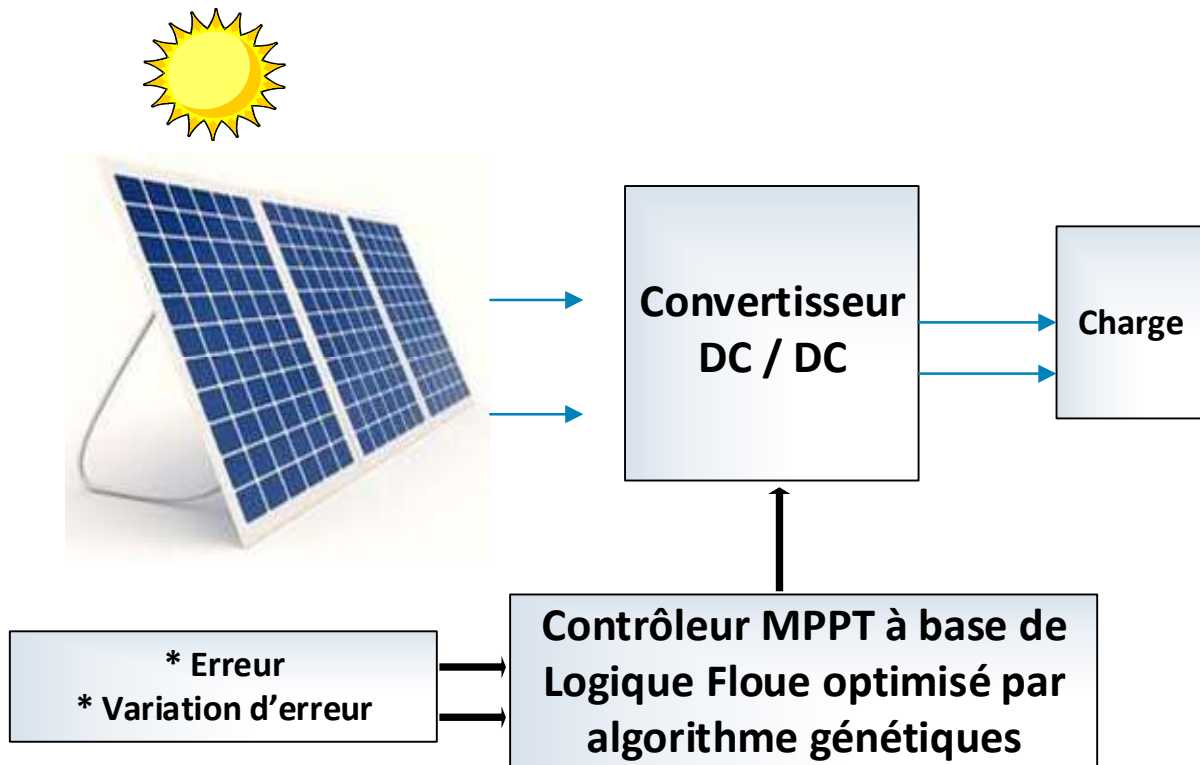


Figure 2.23 Mise en œuvre du contrôleur MPPT à base de la méthode floue optimisé par les Algorithmes Génétiques.

2.4 Critères de sélection des commandes MPPT

Dans les travaux de littérature [5, 55-57], on nous a présenté cette étude comparative dans le Tableau 2.1 entre les méthodes les plus utilisées. En termes de connaissances techniques des paramètres, de la complexité, la rapidité et de la précision des panneaux photovoltaïques. De *flexibilité*, du *nombre de capteurs nécessaires*, de *robustesse*, de *vitesse de convergence*, et de *l'efficacité*.

Tableau 2-1 Tableau comparatif des caractéristiques de MPPT.

Algorithmes MPPT	Perturber & observer (P & O)	Incrémental Conductance (IC)	Méthode de la tension de circuit ouvert (Vco)	Méthode du courant de court-circuit (Icc)	Logique Floue (LF)	Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)	Particule Swarm Optimization (PSO)
Vitesse de Convergence	changeante	changeante	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Rapide
Complexité d'Implémentation	Réduite	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Elevée	Elevée	Moyenne
vrai MPPT	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Paramètres captés	Tension Courant	Tension Courant	Tension	Courant	changeante	changeante	changeante
Rendement (%)	Moyen	Moyen	Réduit	Réduit	Trop Elevé	Trop Elevé	Elevé
Cout	Modéré	Modéré	Bas prix	Bas prix	Chère	Chère	Chère
Stabilité	Instable	Stable	Instable	Instable	Très stable	Très stable	Très stable

La Figure 2.15, ci-après illustre une sélection des principaux critères que les concepteurs doivent prendre en considération pour l'élaboration de contrôleurs MPPT.

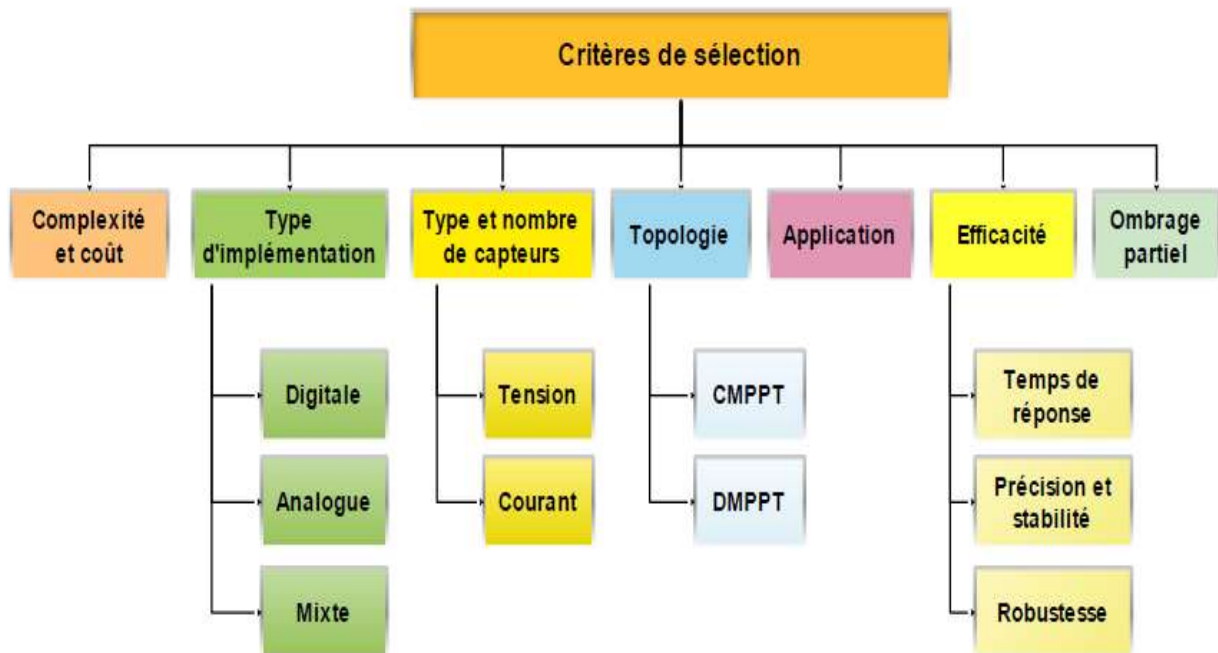


Figure 2.24 Classification des critères de sélection des contrôleurs MPPT [48].

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a revu les différentes méthodes MPPT qui ont été développées dans la littérature, avec un détail sur l'importance de la commande MPPT d'un système PV. De plus, les différents critères de sélection des méthodes MPPT ont été élaborés avec une comparaison entre certaines méthodes. Dans le chapitre qui suit nous allons voir en détail les régulateurs flous afin de les utiliser pour le MPPT par la suite.

Chapitre 3

Régulation par la logique floue

Chapitre 3 : Régulation par la logique floue

3.1 Introduction

Le professeur *Lotfi A. Zadeh* de l'université de Californie à Berkley avait établi les bases théoriques de la logique floue en 1965 [58, 59]. A cette époque, la logique booléenne avec son fonctionnement exact en tout ou rien ayant commencé à se répandre considérablement, la théorie de la logique floue n'a pas suscité beaucoup d'intérêt puisqu'elle permet de traiter des variables non booléennes et donc non exactes dont la valeur peut varier entre 0 et 1. Au début, les domaines d'application de cette théorie étaient non techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, principalement pour compléter les systèmes experts, et pour leur donner la faculté de prise de décision.

Les premières applications au niveau des systèmes de commande apparaissent dès 1974. Le principe de la régulation floue a été expérimenté avec succès sur une turbine à vapeur en 1974, par l'équipe du professeur *E.H. Mamdani*, au *Queen Mary College* de Londres. Ces résultats étaient bientôt confirmés et développés par plusieurs équipes en Europe de l'Ouest dont celle des professeurs *D. Willaeyts* et *N. Malvache* à l'université de Valenciennes, puis ensuite par l'institut de Technologie de Tokyo et de quelques autres universités japonaises [60]. Citons notamment la première application industrielle d'envergure de la société Hitachi, en 1986, après plusieurs années d'études, d'un organe de conduite pour un système de transport ferroviaire à Sendaï, dans le nord du Japon, dont les performances (précision d'arrêt, confort des passagers, énergie consommée) rivalisent avec celles d'un système de commande classique [61]. Depuis les Japonais commencèrent à utiliser la logique floue dans les produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande.

Dans ce chapitre nous allons revoir les bases générales de la théorie de la logique floue ainsi que leur application à la conception des régulateurs, tel que développé par avance dans le travail de mon magister [16].

3.2 Bases générales de la théorie de la logique floue

3.2.1 Introduction à la logique floue

La notion d'ensembles flous provient du constat établi par *Zadeh*, que très souvent on rencontre dans le monde physique des classes d'objets dont les frontières ne sont pas clairement définies, ce constat nous permet de souligner l'opposition existante entre les connaissances linguistiques et les données numériques [62]. Par exemple si on considère le mot « jeune » il est difficile de distinguer le seuil au-delà duquel un homme peut être considéré comme totalement jeune, et au-delà duquel ne sera pas du tout considéré comme jeune.

L'idée c'est qu'au lieu de chercher un seuil unique de décision pour l'appartenance à la classe des âges « jeune », il semble logique de considérer deux seuils $S_1 < S_2$ tel que le terme jeune s'applique parfaitement aux âges plus petits que S_1 (20 ans) et ne s'applique plus du tout au-dessus de S_2 (40 ans). Entre S_1 et S_2 l'appartenance est graduelle. Mathématiquement, si on associe une fonction $\mu_A(x)$ qui exprime le degré d'appartenance de l'élément x à la classe A où :

A est un sous ensemble défini sur un référentiel U (ici, l'échelle des âges humains, $U=[0,120]$), tel que :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq x < S_1 \\ 0 & \text{pour } x > S_2 \\ a & \text{pour } S_1 \leq x \leq S_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Où : $0 < a < 1$

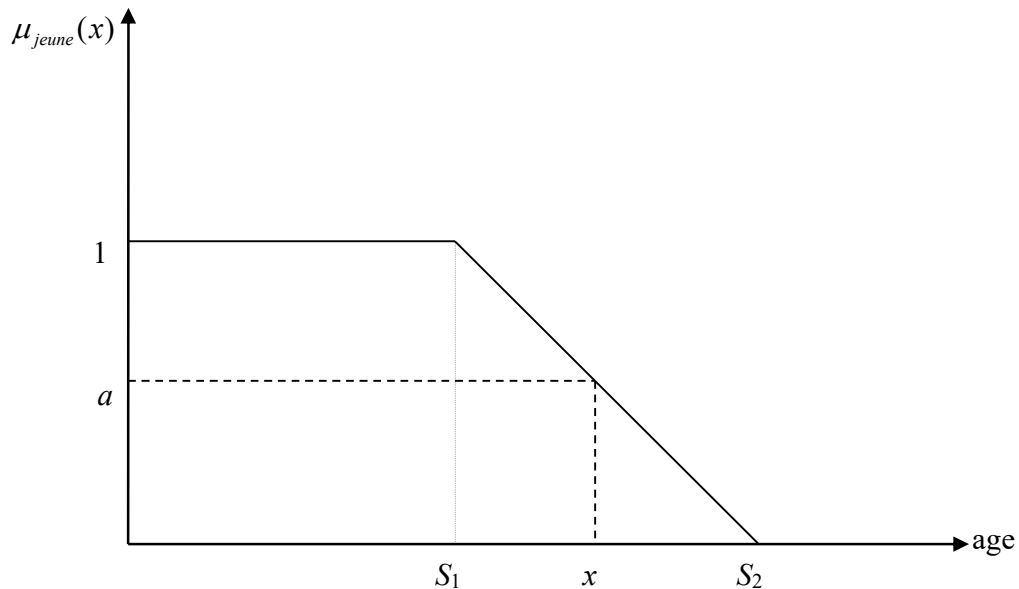


Figure 3.1 Degrés d'appartenance à la classe -jeune-.

Un tel sous-ensemble est appelé un sous ensemble floue et $\mu_A(x)$ est appelé la fonction d'appartenance.

Remarque :

Si $S_1=S_2$ on tombe sur le cas classique ou on considère un seuil unique de décision.

3.2.2 Théorie des ensembles flous

3.2.2.1 Définitions

Un ensemble flou A sur un univers de discours U est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui prend ses valeurs sur l'intervalle $[0,1]$. Un ensemble flou est une généralisation d'un sous ensemble ordinaire ayant une fonction d'appartenance qui prend que les deux valeurs 0 ou 1. La fonction d'appartenance fournit une mesure du degré qu'un élément de U soit un élément d'un sous ensemble flou [58].

En logique floue un élément peut résider dans plusieurs ensembles avec des degrés d'appartenances différents. Ceci ne peut se produire dans la théorie des ensembles ordinaires.

Un ensemble flou A dans U peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées de l'élément générique x et son niveau (degré) d'appartenance :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (3.2)$$

Quand l'univers de discours U est un ensemble continu (Exp : nombres réels), le sous ensemble flou A est écrit comme suit :

$$A = \int_U \mu_A(x) / x \quad (3.3)$$

Quand U est discret, A s'est écrit comme suit :

$$A = \sum_U \mu_A(x) / x \quad (3.4)$$

3.2.2.2 Caractéristiques d'un sous ensemble flou

Les caractéristiques d'un sous ensemble flou A de U les plus utiles pour le décrire sont celles qui montrent à quel point il diffère d'un sous ensemble ordinaire de U [58].

3.2.2.2.1 Support

Le support de A est l'ensemble des éléments de U qui appartiennent, au moins un peu à A .

Définition : Le support de A , noté $\text{supp}(A)$, est la partie de U sur laquelle la fonction d'appartenance de A n'est pas nulle :

$$\text{supp}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (3.5)$$

3.2.2.2.2 Hauteur

La hauteur de A est le plus fort degré avec lequel un élément de U appartient à A .

Définition : La hauteur, noté $h(A)$, du sous ensemble flou A de U est la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance :

$$h(A) = \sup_{x \in U} \mu_A(x) \quad (3.6)$$

On utilise souvent des sous-ensembles flous normalisés, c'est à dire pour lesquels il existe au moins un élément de U appartenant de façon absolue (avec un degré 1) à A .

Définition : Le sous ensemble flou A de U est normalisé si sa hauteur $h(A)$ est égale à 1.

3.2.2.2.3 Noyau

Un ensemble flou normalisé suppose qu'il existe des éléments de U typiques de la propriété à laquelle il est associé. Ce sont les éléments appartenant de façon absolue à A , dont l'ensemble est appelé le noyau de A .

Définition : Le noyau de A , noté $noy(A)$, est l'ensemble des éléments de U pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1 :

$$noy(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \quad (3.7)$$

3.2.2.2.4 Cardinalité

Lorsque U est fini, on caractérise également le sous ensemble flou A de U par sa cardinalité, qui indique le degré global avec lequel les éléments de U appartiennent à A .

Définition : La cardinalité du sous ensemble flou A de U est définie par :

$$|A| = \sum_{x \in U} \mu_A(x) \quad (3.8)$$

Si A est un sous ensemble ordinaire de U , sa hauteur est égale à 1 ; il est normalisé et identique à son support et à son noyau ; sa cardinalité est le nombre d'éléments qui le composent, selon la définition classique.

3.2.3 Variables linguistiques

Une variable linguistique sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue [58, 63].

Définition : Une variable linguistique est un triplet (x, U, T_x) dans lequel x est une variable définie sur un ensemble de référence U . L'ensemble $T_x = \{A_1, A_2, \dots\}$ fini ou infini, contient des sous-ensembles flous de U , utilisable pour caractériser x .

Exemple :

Soit la pression u interprétée comme une variable linguistique. Elle peut être décomposée à l'ensemble des termes suivants :

$T(\text{pression}) = T_u = \{\text{faible}, \text{moyenne}, \text{OK}, \text{forte}, \text{énorme}\}$ où chaque terme T_u est caractérisé par un ensemble flou dans l'univers de discours $U = [100\text{psi}, 100\text{psi}]$. Ces termes peuvent être caractérisés

comme des ensembles flous pour lesquels les fonctions d'appartenance sont illustrées dans la figure 3.2.

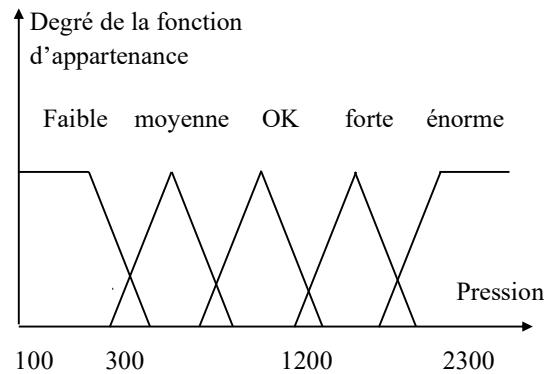


Figure 3.2 Fonctions d'appartenances de T (pression).

Les valeurs mesurées de la pression (x) se situent sur l'axe de pression. Dans cet exemple, une ligne verticale de n'importe quelle valeur mesurée rencontre au plus deux fonctions d'appartenances. Alors, par exemple, $x = 300$ appartient aux ensembles flous 'faible pression' et 'moyenne pression' à des degrés d'appartenances différents.

3.2.4 Les différentes formes pour les fonctions d'appartenance

On utilise souvent des fonctions d'appartenances de formes triangulaires ou trapézoïdales où l'allure est complètement définie par quatre points P_1, P_2, P_3, P_4 , ($P_2=P_3$ dans le cas triangulaire.),[58] (voir figure 3.3 et figure 3.4).

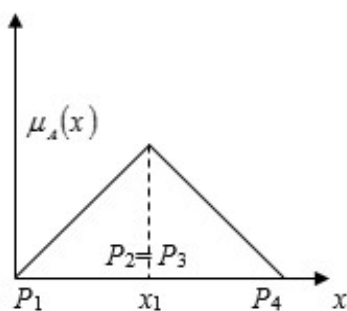


Figure 3.3 Cas triangulaire.

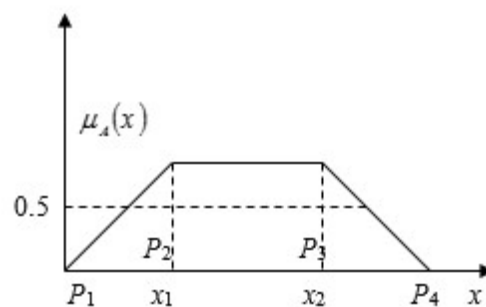


Figure 3.4 Cas trapézoïdal.

Où :

$$\text{Tri}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - x_1|}{2a} & x_1 - 2a \leq x \leq x_1 + 2a \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\text{Trap}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - x_1|}{2a_1} & x_1 - 2a_1 \leq x \leq x_1 \\ 1 & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 - \frac{|x - x_2|}{2a_1} & x_2 \leq x \leq x_2 + 2a_1 \end{cases} \quad (3.10)$$

Où a et a_1 sont des paramètres.

Il existe d'autres formes appelées gaussiennes [58]. A titre d'exemple :

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + ((x - x_0)/a)^2}; \quad x \in]-\infty, +\infty[\quad (3.11)$$

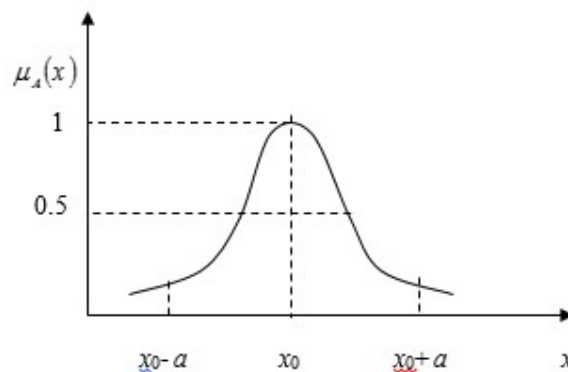


Figure 3.5 Fonction d'appartenance en cloche.

Il est évident que les fonctions d'appartenances sont choisies arbitrairement par l'utilisateur, en se basant sur son expérience, donc les fonctions d'appartenance pour deux utilisateurs sont souvent assez différentes à cause de leurs expériences, observation, perspectives, cultures ...

Une grande résolution est réalisée en utilisant plus de fonctions d'appartenance, ce qui rend la programmation plus complexe.

Les fonctions d'appartenance doivent se chevaucher. Ceci nous permet d'avoir le fait que « un verre peut être partiellement plein et partiellement vide à la fois à des degrés différents ».

3.2.5 Opérations sur les ensembles flous

En logique floue, l'union, l'intersection et la complémentation sont définies en termes de leurs fonctions d'appartenances. Soient les ensembles flous A et B définis par leurs fonctions d'appartenances $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$.

- Une définition de l'union floue mène à la fonction d'appartenance:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.12)$$

- Une définition de l'intersection floue mène à la fonction d'appartenance :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.13)$$

- pour la complémentation on a :

$$\mu_{\bar{B}}(x) = 1 - \mu_B(x) \quad (3.14)$$

Les opérateurs « max » et « min » ne sont pas les seules opérations qui peuvent modéliser l'union et l'intersection floues. *Zadeh* dans son premier article pionnier, a défini deux opérateurs, un pour l'union floue et l'autre pour l'intersection floue [58]:

Union floue : maximum and algebraic sum

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.15)$$

Intersection floue: minimum and algebraic product

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (3.16)$$

Ensuite, et en se basant sur des axiomes, d'autres opérateurs ont été introduits :

- Opérateur 't-conorm' noté \oplus , utilisé pour l'union floue (on dit aussi s-norm).

1. Somme limitée (bounded sum):

$$x \oplus y = \min(1, x + y) \quad (3.17)$$

2. Somme radicale (drastic sum):

$$x \oplus y = \begin{cases} x & \text{si } y = 0 \\ y & \text{si } x = 0 \\ 1 & \text{si } x, y > 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

• Opérateur ‘t-norm’ noté *, utilisé pour l’intersection floue.

1. Produit limité (bounded product)

$$x * y = \max(0, x+y-1) \quad (3.19)$$

2. Produit radical (drastic product) :

$$x * y = \begin{cases} x & \text{si } y = 1 \\ y & \text{si } x = 1 \\ 0 & \text{si } x, y < 1 \end{cases} \quad (3.20)$$

D’où les définitions suivantes :

Définition 1 : Une norme triangulaire (t-norm) est une fonction $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ qui vérifie pour tous μ_A, μ_B et μ_C de $[0,1]$:

$$1) T(\mu_A, \mu_B) = T(\mu_B, \mu_A) \quad (\text{commutativité}) \quad (3.21)$$

$$2) T(\mu_A, T(\mu_B, \mu_C)) = T(T(\mu_A, \mu_B), \mu_C) \quad (\text{associativité}) \quad (2.22)$$

$$3) T(\mu_A, 1) = \mu_A \quad (1 \text{ élément neutre}) \quad (3.23)$$

Cas particulier : l’opérateur $T = \min$ est une norme triangulaire.

Toute t-norm peut servir à définir l’intersection de sous-ensembles flous :

$$\forall x \in U, \mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.24)$$

Définition 2 : Une conorme triangulaire (t-conorm) est une fonction $\perp : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ qui vérifie pour tous μ_A, μ_B et μ_C de $[0,1]$:

$$1) \perp(\mu_A, \mu_B) = \perp(\mu_B, \mu_A) \quad (\text{commutativité}) \quad (3.25)$$

$$2) \perp(\mu_A, \perp(\mu_B, \mu_C)) = \perp(\perp(\mu_A, \mu_B), \mu_C) \quad (\text{associativité}) \quad (3.26)$$

$$3) \perp(\mu_A, 0) = \mu_A \quad (0 \text{ élément neutre}) \quad (3.27)$$

Cas particulier : l'opérateur $\perp = \max$ est une conorme triangulaire.

Toute t-conorm peut servir à définir l'union de sous ensembles flous :

$$\forall x \in U, \mu_{A \cup B}(x) = \perp(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.28)$$

Propriété : Toute t-norm T et toute t-conorm \perp vérifient :

$$T(0,0)=0, T(1,1)=1, \perp(0,0)=0, \perp(1,1)=1 \quad (3.29)$$

3.3 Relations floues

Les relations floues représentent le degré de présence ou d'absence d'une association ou d'intersection entre les éléments de deux ensembles flous ou plus [58].

Citons quelques exemples de relations binaires floues :

- x est beaucoup plus grand que y .
- y est très proche de x .
- z est plus vert que y .
- Le système 1 est moins amorti que le système 2.
- La bande passante du système A est plus large que celle du système B.

Les relations floues jouent un rôle important dans les systèmes à logique floue (FLS).

Soient U et V deux univers de discours. Une relation floue $R(U, V)$ est un sous ensemble flou dans le produit d'espace $U \times V$, cette relation est caractérisée par la fonction d'appartenance $\mu_R(x, y)$ où $x \in U$ et $y \in V$:

$$R(U, V) = \{(x, y), \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in U \times V\} \quad (3.30)$$

La différence entre relation floue et une relation ordinaire est que :

- Pour une relation floue $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$
- Pour une relation ordinaire $\mu_R(x, y) = 0$ ou 1

Puisque les relations floues sont des ensembles flous dans le produit d'espace, les théories des ensembles et les opérations algébriques peuvent être définies pour ces relations en utilisant les opérateurs étudiés précédemment : union floue, intersection et complémentation.

Soient $R(x,y)$ et $S(x,y)$ deux relations floues dans le même produit d'espace $U \times V$ alors l'intersection et l'union de R et S sont définies par :

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y) \quad (3.31)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y) \quad (3.32)$$

Où $*$ est n'importe quelle t-norm, et \oplus est n'importe quelle t-conorm.

3.4. Composition floue

Considérons maintenant la composition des relations floues pour différents produits d'espaces partageant un ensemble commun, Soient $R(U,V)$ et $S(V,W)$ ces relations floues.

Cette composition des relations floues est définie de la même manière que les compositions ordinaires, à l'exception que les ensembles dans ce cas sont des ensembles flous.

On associe à la relation floue R sa fonction caractéristique $\mu_R(x, y) \in [0,1]$, et à la relation S sa fonction $\mu_S(y, z) \in [0,1]$. Quand R et S sont des univers de discours discrets, la composition de R et S notée $R \circ S$ peut être décrite soit par un diagramme sagittal dont chaque branche est étiquetée par la valeur de la fonction caractéristique, ou par une matrice relationnelle dont chaque élément est un nombre appartenant à l'intervalle $[0, 1]$. Si on veut une formulation mathématique de cette composition, on n'a qu'à utiliser la composition sup – star :

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \sup_{y \in V} [\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)] \quad (3.33)$$

Quand U, V et W sont des univers de discours discrets, on remplace l'opération sup par max. On peut utiliser au lieu de la composition sup – star les compositions sup – min ou sup – prod.

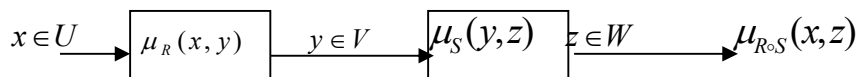


Figure 3.6 Diagramme pour interpréter la composition sup – star.

La figure 3.6 illustre l'interprétation de la composition sup – star.

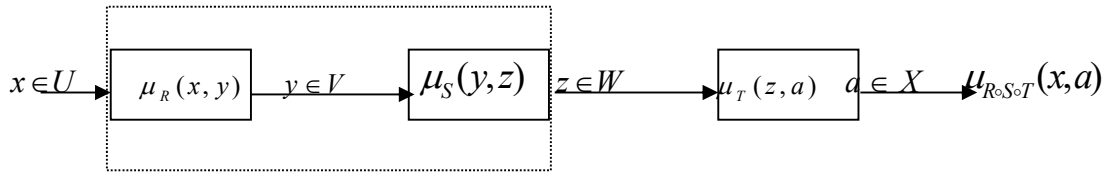


Figure 3.7 Diagramme pour multiples relations floues.

La figure 3.7 représente l'interconnexion de trois relations floues et comment elles peuvent être composées. Premièrement on compose les relations R et S en utilisant la composition sup – star, ensuite le résultant est composé avec la relation T par les compositions sup – star.

Bien sûr on peut commencer par la composition des relations S et T, puis le résultat sera composé avec la relation R. Supposons maintenant que la relation floue R est un ensemble flou, alors $\mu_R(x, y)$ devient $\mu_R(x)$, donc $U=V$ et la figure 3.6 se réduit à la figure 3.7, qui nous indique le sens de « comment un ensemble flou peut activer une relation floue », cette situation est dite : implication floue, cette notion est très importante et surtout dans la conception des systèmes à logique floue (FLS).

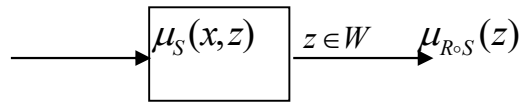


Figure 3.8 Diagramme interprétant la composition sup – star quand la première relation est un ensemble flou.

Puisque $V=U$, $\sup_{y \in V} [\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)] = \sup_{x \in U} [\mu_R(x) * \mu_S(x, z)]$ qui est fonction seulement de la variable z, donc on peut simplifier la notation $\mu_{R o S}(x, z)$ à $\mu_{R o S}(z)$, Alors si R est un ensemble flou :

$$\mu_{R o S}(z) = \sup_{x \in U} [\mu_R(x) * \mu_S(x, z)] \tag{3.34}$$

Pour le cas d'un univers de discours discret, la relation (3.34) est évaluée par les compositions max–min ou max–prod.

3.5. L'inférence floue

3.5.1. Règle floue

En général, une règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication [58], pour cela considérons la règle floue « si V_1 est A alors V_2 est B » qui est une implication entre deux propositions de variables floues (V_1, U, T_{V1}) et (V_2, U, T_{V2}).

- La proposition « si V_1 est A » est la condition de l'implication.
- La proposition « V_2 est B » est la conclusion de l'implication.
- La valeur de vérité de l'implication est définie par la fonction d'appartenance μ_R d'une relation floue R entre U et V.

○ $\mu_R(x, y) = \phi_{(\mu_A(x), \mu_B(x))}$. ϕ est choisi de sorte que, dans le cas où A et B sont précis, l'implication sera identique à une implication classique.

Les implications floues les plus utilisées sont données par le tableau (Tableau 3.1) [58].

Tableau 3-1 Résumé des implications les plus utilisées.

μ_R	Valeur de vérité	Nom
μ_{RR}	$1 - \mu_A(x) + \mu_A(x)\mu_B(x)$	Reichenbach
μ_{RRW}	$\max(1 - \mu_A(x), \min(\mu_A(x), \mu_B(x)))$	Wilnoth
μ_{RKD}	$\max(1 - \mu_A(x), \mu_B(x))$	Dienes
μ_{RBG}	$\begin{cases} 1 & \text{si } \mu_A \leq \mu_B \\ \mu_B & \text{si non} \end{cases}$	Brown Gödel
μ_{RG}	$\begin{cases} \min(\frac{\mu_A}{\mu_B}, 1) & \text{si } \mu_A \neq 0 \\ 1 & \text{si non} \end{cases}$	Göguen
μ_{RL}	$\min(1 - \mu_A + \mu_B, 1)$	Lukasiewicz
μ_{RM}	$\min(\mu_A, \mu_B)$	Mamdani
μ_{RP}	$\mu_A \mu_B$	Larsen

Remarque : Dans la commande floue on utilise souvent μ_{RM} et μ_{RP} .

3.5.2 Raisonnement et prise de décision

Cela consiste à manipuler et à utiliser les propositions et les règles floues dans le but d'obtenir un résultat. Pour cela on utilise le modèle suivant :

- MPG (modus ponens généralisé) est une image du raisonnement approché, qui nous permet de donner une décision même si les données sont floues, on distingue deux cas :

a) **Cas d'une seule règle** : il correspond à la règle d'inférence suivante :

Règle si x est A alors y est B.

Fait observé x est A'

Conclusion y est B'

Le calcul de B' s'effectue en combinant $\mu_R(x, y)$ et $\mu_A(x)$ de la forme :

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in U} T(\mu_A(x), \mu_R(x, y)) . \quad (3.35)$$

b) **Cas de plusieurs règles** :

Règle si x est A_i alors y est B_i , $i=1, \dots, m$

Fait observé x est A'

Conclusion y est B'

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in U} (T(\mu_A(x), \perp(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)))_{i=1, \dots, m}) \quad (3.36)$$

Où T et \perp sont des t-norme et conorme respectivement.

Le résultat va dépendre de la modélisation de règle (i.e. : fait observé, le choix de μ_R et la prémisse x est A).

Comme nous l'avons vu, la possibilité de réaliser les inférences floues de plusieurs manières prouve la richesse de la théorie des ensembles flous et de la logique floue.

La théorie des ensembles flous trouve son application dans plusieurs domaines, tels que l'informatique, l'automatique, ainsi que dans le domaine de la commande et de la régulation.

3.6 La commande ou régulation par logique floue

3.6.1 Introduction

Depuis ces dernières décennies, l'utilisation de la théorie des ensembles flous dans la modélisation et la commande des systèmes complexes industriels est devenue un outil à part entière.

En l'état actuel, la logique floue est utilisée pour concevoir des régulateurs a des procédés difficilement modélisables et même modélisables.

La régulation floue se distingue d'une régulation classique par le fait que l'approche par logique floue synthétise une loi de commande à partir de l'expertise de l'opérateur humain, alors que les approches classiques de l'automatique consistent à élaborer une loi de commande à partir d'un modèle mathématique du procédé. Tout l'intérêt de la commande floue pour des procédés complexes, difficiles à modéliser, réside donc dans le recueil de l'expertise d'un opérateur humain sachant piloter, ou ayant une bonne connaissance de la commande du procédé. La difficulté réside, évidemment dans l'obtention de cette expertise.

La structure non linéaire du régulateur flou améliore les performances en termes de précision, de stabilité et de robustesse du procédé. Il peut être appliqué en utilisant des modèles classiques, linéaires ou non, ou des modèles flous spécifiques, de type Takagi-Sugeno-Kang (TSK) par exemple [60].

Dans ce qui suit nous présentons rapidement les différentes parties composant un régulateur flou et les différents types de régulateur [58].

3.6.2 Mise en œuvre d'un régulateur flou

La commande floue a les mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande.

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistiques : "faible", "moyen", "élevé" ... et des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variables observées :

"Si l'erreur est positivement grande et la variation de l'erreur est positivement grande alors la variation de la sortie est très négative".

Ces concepts sont basés sur une partie de la théorie des sous-ensembles flous introduite dans la section 2 de ce chapitre.

Un régulateur flou est représenté en général en trois parties [58], comme le montre la figure 3.9. **La fuzzification** permet de passer de variables réelles à des variables floues. Le cœur du régulateur représenté par **les règles** reliant les entrées et les sorties qui est **l'inférence** et enfin **la défuzzification** permet à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie. L'ensemble des entrées du procédé à réguler est noté U (ensemble des actions calculées par le régulateur flou appliqué au procédé commandé), l'ensemble des sorties observées est S , l'ensemble des consignes est C et l'ensemble des entrées du régulateur flou est X (par exemple taille, température, pression, angle, vitesse, humidité, signaux électriques...). L'ensemble des gains de normalisation des entrées GE et les gains de sorties GS du régulateur permettent d'adapter le domaine de définition des différentes variables (par exemple écart de réglage, dérivée approximative d'une grandeur ou d'autres grandeurs internes).

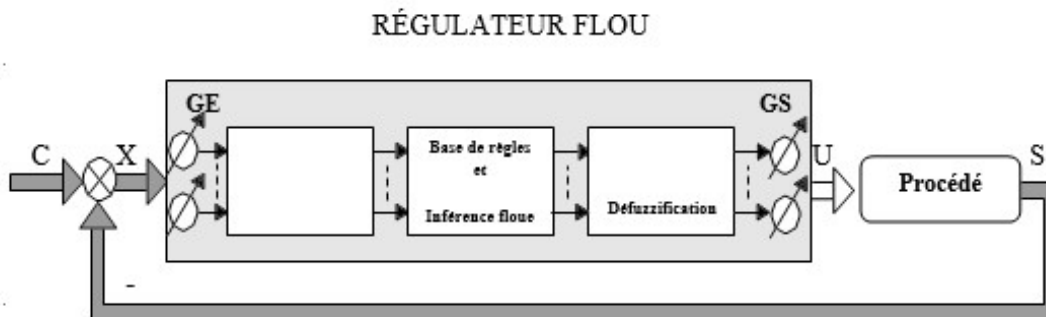


Figure 3.9 Schéma de principe de la régulation floue.

3.6.3 Fuzzification des entrées

L'objectif de la fuzzification est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables floues, c'est-à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour ces différentes variables d'entrée. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes. Les formes trapézoïdales, triangulaires sont les plus couramment utilisées.

Les grandeurs physiques d'entrée X sont réduites à des grandeurs normalisées x dans une plage de variation, souvent $[-1,1]$, appelée univers de discours, qui peut-être soit discret, soit continu.

Bien souvent, cet univers de discours est borné, en appliquant une limitation sur la valeur numérique de $|x| \leq 1$, pour pallier le problème des grandes variations de X . Les gains de normalisation caractérisent les facteurs d'échelle entre x et X .

Dans le cas d'un univers de discours continu, le nombre de valeurs linguistiques (très négatif, négatif, zéro, positif, très positif ...) représenté par des fonctions d'appartenance pour une variable x_1 peut varier par exemple, trois, cinq ou sept. Un exemple de fuzzification continue est illustré dans la figure 3.10 pour une seule variable de x , avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales ; les valeurs linguistiques correspondantes sont caractérisées par des symboles tels que N pour négatif, Z pour zéro, et P pour positif. Ainsi $x_1 = 0.2$ devient après fuzzification le sous-ensemble flou $\bar{x}_1 = (0 \quad 0.8 \quad 0.2)$.

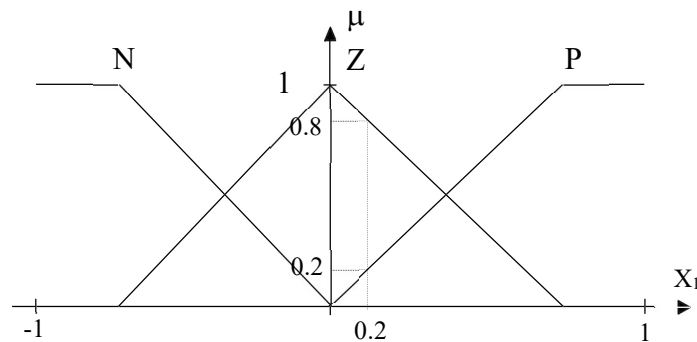


Figure 3.10 Fuzzification continue avec trois fonctions d'appartenance.

En général, les fonctions d'appartenance prennent leur valeur dans l'intervalle $[0 \ 1]$. Le paragraphe suivant traite la deuxième étape qui consiste à établir les règles à partir de ces variables floues, et à les évaluer.

3.6.4 Base de règles et méthodes d'inférence

Tout d'abord, une description linguistique des règles, ainsi que les matrices d'inférences ou matrices des règles sont présentées.

3.6.4.1 Règles floues - matrices d'inférences/des règles

Les règles floues représentent le cœur du régulateur, et permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrée du régulateur aux variables de commande du système.

Un type de règle peut-être par exemple :

Si x_1 est "positif" et x_2 est "zéro" alors u est "négatif"

Où x_1 et x_2 représentent deux variables d'entrée du régulateur telles que : l'écart de réglage, sa variation et u la commande. L'expérience dans l'élaboration de ces règles joue un rôle important. Cependant, la littérature nous donne quelques méthodes qui peuvent être mises en œuvre pour recueillir ces règles, pouvant être classées en deux types d'études.

Dans le cas d'un système classique, où les entrées et sorties du régulateur sont bien définies, il est inutile de passer par une étape d'extraction de connaissances pour les déterminer [38]. En général, le nombre de règles est peu important, de quatre à une vingtaine.

Dans le cas d'un système complexe, ces méthodes sont basées sur le savoir-faire de l'opérateur humain où celui-ci décrit lui-même des stratégies de commande.

Une représentation graphique de l'ensemble des règles, appelée matrice d'inférence ou matrice des règles, couramment utilisée dans la littérature, permet de synthétiser le cœur du régulateur flou.

Le tableau 2.2 représente un exemple de matrice d'inférence pour les deux variables linguistiques d'entrée x_1 et x_2 et la variable floue de sortie u utilisées au paragraphe précédent. Les symboles TP et TN représentent respectivement Très Négatif et Très Positif.

Tableau 3-2 Exemple de matrice d'inférence

		x_2		
		N	Z	P
x_1	N	TP	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	TN

La case en grisé du tableau 2.2 représente la règle :

Si x_1 est "positif" et x_2 est "zéro" alors u est "négatif"

Lorsque toutes les cases de la matrice d'inférence sont remplies (comme pour l'exemple du tableau 2.2), il s'agit de règles d'inférence complètes, dans le cas contraire, de règles d'inférence incomplètes.

Après avoir présenté la manière d'établir les règles du régulateur flou, il est nécessaire d'en déduire alors une sortie.

3.6.4.2 Raisonnement flou

Le raisonnement flou a pour objectif de déterminer en fonction des variables linguistiques d'entrée x , issues de la fuzzification des variables réelles d'entrée X et des règles floues de commande, un ensemble flou de valeurs possibles pour la variable linguistique de sortie u .

Il y a en général deux façons de raisonner. La première est basée sur l'inférence de règles floues, et la deuxième sur la logique floue.

- **Raisonnement basé sur l'inférence de règles floues**

Cette méthode d'inférence est directement issue de celles basées sur les systèmes experts.

Cette façon de raisonner dépend des implications utilisées, de la forme des fonctions d'appartenance et utilise des méta-implications du type :

Si x_I est P alors u est N

Cette méta-implication souvent appelée relation (notée R), peut être représentée par une fonction d'appartenance $\mu_R(x_I, u)$ dépendant des fonctions d'appartenance $\mu_P(x_I)$ et $\mu_N(u)$. Citons quelques modélisations possibles :

$$\mu_R(x_I, u) = \min[\mu_P(x_I), \mu_N(u)] \quad (3.37)$$

$$\mu_R(x_I, u) = \mu_P(x_I) \cdot \mu_N(u) \quad (3.38)$$

$$\mu_R(x_I, u) = \min[1, 1 - \mu_P(x_I) + \mu_N(u)] \quad (3.39)$$

$$\mu_R(x_I, u) = 1 - \mu_P(x_I) + \mu_P(x_I) \cdot \mu_N(u) \quad (3.40)$$

Cependant, cette méta-implication ne peut être utilisée que si x_I est P existant. Or, dans beaucoup de cas, on cherche à déduire des résultats avec un P' qui diffère de P. Pour cela, une extension du modus ponens défini en logique, appelée le modus ponens généralisé proposé par Zadeh, est utilisée pour déterminer une conclusion pour chaque règle en fonction de la prémisse de celle-ci. Ce type d'inférence correspond au schéma suivant:

Si x_1 est P alors u est N
x_1 est P'
u est N'

Le résultat " u est N' " peut alors être obtenu en utilisant une modélisation dépendant d'un opérateur de composition D:

$$\mu_{N'}(u) = \sup(\mu_P(x_1) \circ \mu_R(x_1, u)) \quad (3.41)$$

L'application à la commande se fait de la manière suivante :

Soit la règle de commande R_i : Si x_1 est P et x_2 est Z alors u est N où P, Z et N représentent les valeurs linguistiques floues respectivement définies sur les univers de discours des variables linguistiques x_1, x_2 et u .

Si à un instant t, x_1 et x_2 prennent respectivement les valeurs x_{10} et x_{20} , les valeurs de vérité (ou degré d'appartenance) des deux prédicats " x_1 est P " et " x_2 est Z " seront respectivement égales à $\mu_P(x_{10})$ et $\mu_Z(x_{20})$, et celle de la proposition floue " u est N " sera $\mu_N(u)$.

Ainsi, le résultat de l'inférence, représentant la valeur de vérité de la règle R_i (noté μ_{R_i}), sera fonction des différents degrés d'appartenance cités ci-dessus, ainsi que des opérateurs (ET, f) choisis pour modéliser la conjonction "et" et l'implication "Si ... alors...".

$$\mu_{R_i}(x_{10}, x_{20}, u) = f(ET[\mu_P(x_{10}), \mu_Z(x_{20})], \mu_N(u)) \quad (3.42)$$

Le choix des opérateurs aboutit à des résultats différents, comme le montre les figures 3.11 à 3.13 ($\mu_{R_i}(x_{10}, x_{20}, u)$ est représenté en grisé).

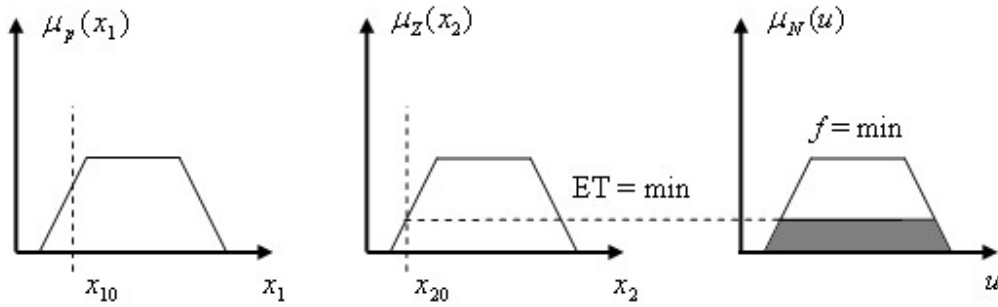


Figure 3.11 ET (a,b), $f(a,b)=\min(a,b)$.

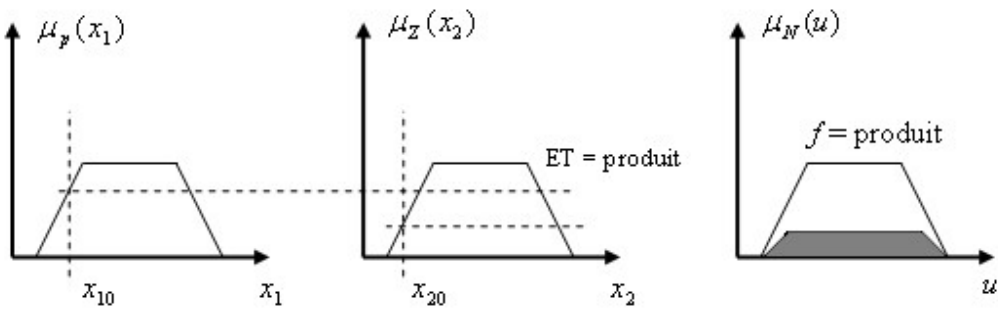


Figure 3.12 ET (a,b), $f(a,b)=a.b$.

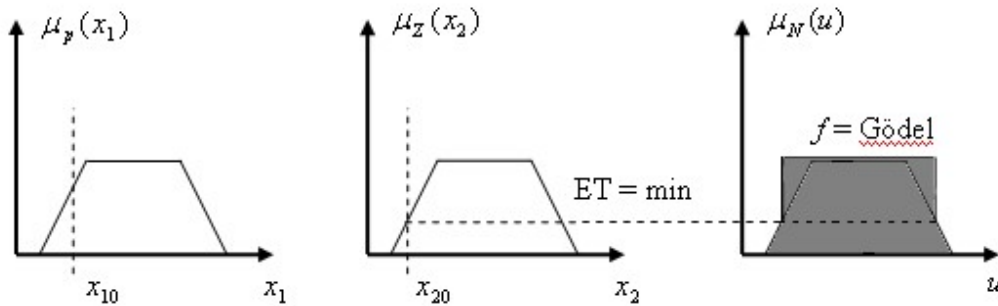


Figure 3.13 Et (a,b)=min(a,b), logique de Gödel.

$$ET(a,b) = \min(a,b), \text{ logique de Gödel : } f(a,b) = \begin{cases} 1 & a \leq b \\ b & \text{si non} \end{cases}$$

Ensuite, après avoir évalué chaque règle, il est nécessaire de reconstruire la sortie globale du régulateur, c'est-à-dire prendre en compte l'ensemble des valeurs de vérité $\mu_{R_i}(x_{10}, x_{20}, u)$ des règles R_i .

Dans ce but, les règles sont connectées par des "Sinon", qui s'interprètent dans le cas où $\mu_{R_i}(x_{10}, x_{20}, u)$ est contenue dans $\mu_N(u)$, par une co-norme triangulaire, dans le cas contraire, une norme triangulaire.

L'inférence sur l'ensemble des n règles du régulateur flou donne donc le résultat suivant :

$$\mu_u(u) = \text{ELSE}_{i=1}^n \mu_{R_i}(x_{10}, x_{20}, u) \tag{3.44}$$

L'obtention de l'ensemble flou u diffère selon le choix du "Sinon". La figure 3.14 permet d'illustrer cette inférence, pour un régulateur à deux règles :

R_1 : Si x_1 est P et x_2 est P alors u est N

R_2 : Si x_1 est N et x_2 est N alors u est P

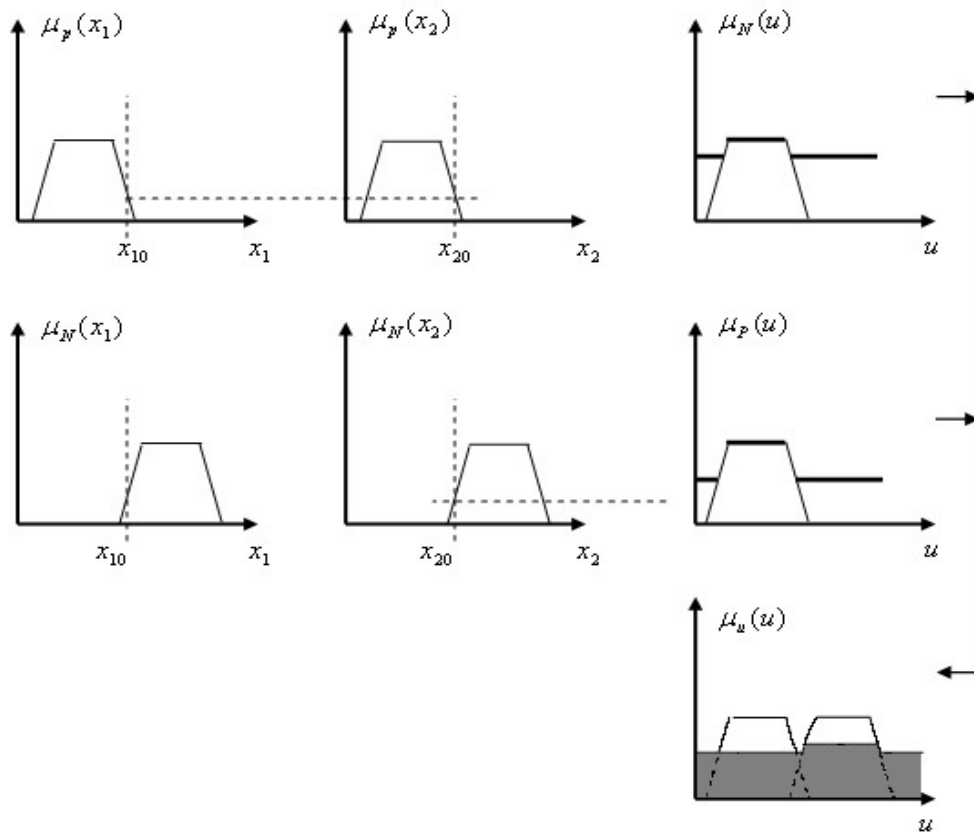


Figure 3.14 Obtention de $\mu_u(u)$ pour un régulateur à deux règles avec : $ET(a, b) = \min(a, b)$, implication booléenne: $f(a, b) = \max(1 - a, b)$, $SINON = \min(a, b)$.

Après avoir présenté la première approche basée sur le raisonnement flou par inférences, la partie suivante présente la seconde qui est basée sur la logique floue.

- **Raisonnement basé sur la logique floue**

Cette seconde approche est issue de la logique floue et plus particulièrement de la logique de *Lukasiewicz*. On parle de modélisation de l'inférence [60].

Contrairement au raisonnement par inférences, où toute combinaison différente des entrées donne une nouvelle règle (même si la valeur linguistique de sortie est identique), le raisonnement fondé sur la logique floue, consiste pour une seule règle à prendre en compte l'ensemble des combinaisons des entrées qui aboutissent à la même valeur linguistique de sortie. Dans ce cas, les prémisses des règles ayant une même conclusion sont liées par un connecteur "ou" pour ne former qu'une seule règle.

À chaque règle R_i , est associé un poids w_i . Ce poids dépend de la prémisse de chaque règle i , mais également des opérateurs "et" et "ou".

Par exemple, les trois règles suivantes au sens de la première méthode :

- Si x_1 est TP et x_2 est TN alors u est N
- Sinon Si x_1 est P et x_2 est N alors u est N
- Sinon Si x_1 est N et x_2 est N alors u est N

Se transforment dans le cas de la régulation par logique floue à une seule règle :

- Si x_1 est TP et x_2 est TN
- ou x_1 est P et x_2 est N
- ou x_1 est N et x_2 est N
- alors u est N

Le poids associé à cette règle est donné par[58] :

$$w_i = OU_l (ET [\mu_{x_{1j}}(x_{10}), \mu_{x_{2k}}(x_{20})]) \quad (3.45)$$

où i est l'indice de la règle, j et k les indices correspondant aux valeurs linguistiques prises en compte pour les variables floues (dans l'exemple : TP, P, N pour x_1 et TN, N pour x_2), et l le nombre

de prédicats de la prémisse connectés par des "ou". La sortie peut se résumer à un ensemble flou comme dans le cas du raisonnement par inférences.

Les sorties issues de l'évaluation des règles sont donc encore floues ; par conséquent une étape de défuzzification est nécessaire, ce qui fait l'objet du paragraphe suivant.

3.6.5 Défuzzification

Cette dernière étape appelée défuzzification consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou.

Dans le cas d'un raisonnement basé sur l'inférence de règles floues, plusieurs algorithmes existent. Mais les deux méthodes les plus utilisées sont le Centre de Gravité (CG) et la Moyenne des Maxima (MM) dont les définitions sont les suivantes :

$$u_{CG}^* = \frac{\int_{-1}^1 u \cdot \mu_u(u) \cdot du}{\int_{-1}^1 \mu_u(u) \cdot du} \quad (3.46)$$

$$u_{MM}^* = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \quad (3.47)$$

Où les u_i sont définis tels que :

$$\mu_u(u_i) = \max_u(\mu_u(u)) \quad (3.48)$$

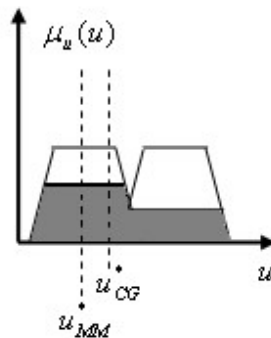


Figure 3.15 Défuzzification de la sortie floue.

La figure 3.15 présente les résultats obtenus par ces deux méthodes, pour un ensemble flou de sortie donné. La défuzzification par Centre de Gravité nécessite un calcul assez important, surtout pour une commande en temps réel. Dans l'autre cas, celui d'un raisonnement basé sur la logique floue, la défuzzification peut s'effectuer de deux manières possibles : sous la forme linéaire (L) ou non linéaire (NL) [63, 64]. Les définitions sont les suivantes :

$$u_L^* = \sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i \quad (3.49)$$

$$u_{NL}^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3.50)$$

Où n représente le nombre de règles.

La présentation des différentes parties d'un régulateur flou étant terminée, le prochain paragraphe traite rapidement de l'influence des différents paramètres des régulateurs.

3.6.6 Choix des différents paramètres d'un régulateur flou

La figure 3.16 résume l'ensemble des paramètres variables dans le cas d'un raisonnement basé sur la logique floue.

L'ensemble des paramètres à régler est très important : nombre et forme des valeurs linguistiques des entrées, nombre et forme des valeurs linguistiques des sorties, choix des différentes logiques, choix de la méthode de défuzzification...

L'analyse de l'influence de ces paramètres n'est évidemment pas une chose facile. Néanmoins, plusieurs études ont tenté en partie de faire varier certains de ces paramètres pour dégager quelques règles.

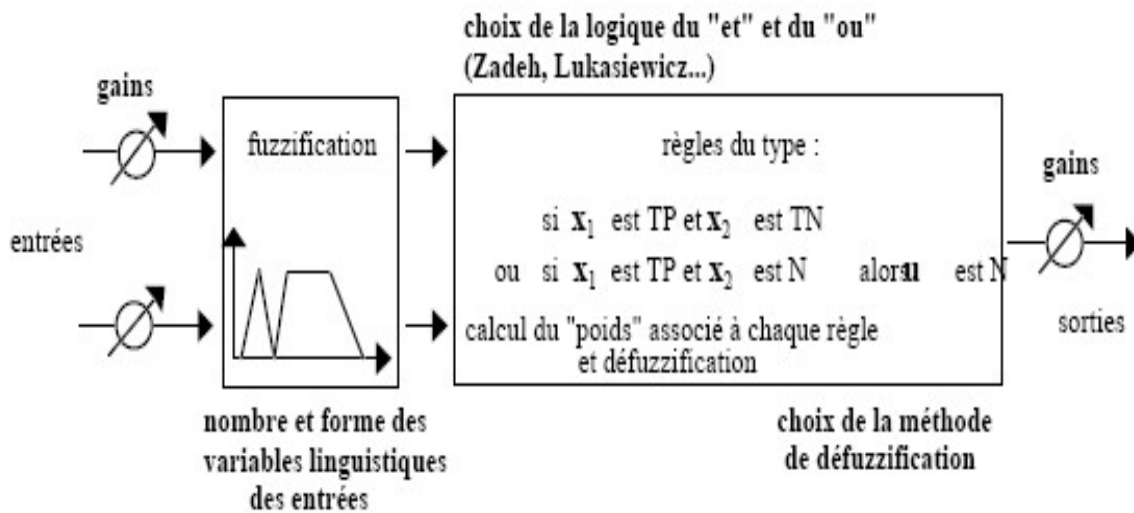


Figure 3.16 Régulateur flou basé sur la logique floue.

Des études concernant les fonctions d'appartenance ont été menées [58, 65, 66], néanmoins la forme et le nombre des fonctions d'appartenance sont très dépendants de l'application et ne peuvent se dissocier de la partie règles floues. Pour le raisonnement flou, il semble qu'à partir du moment où les opérateurs utilisés respectent certaines propriétés, ils ne constituent pas un paramètre primordial du régulateur. Des études ont également été menées concernant les gains de normalisation [38], et là encore les résultats obtenus sont très dépendants des modèles de systèmes utilisés et des autres paramètres du régulateur flou mis en œuvre.

Il faut de plus se méfier de certaines conclusions qui peuvent provenir du fait de l'étude d'un paramètre particulier en laissant les autres invariants. Par exemple, l'implication floue de Kleene-Dienes [45], se révèle catastrophique pour la commande. Il se trouve que l'auteur étudiait l'influence de paramètres dans le cas d'un découpage avec fonctions d'appartenance triangulaires. En remplaçant ces fonctions par des trapèzes à fort recouvrement, ce qui utilise le fait que cette implication prend en compte l'incertitude, les résultats obtenus sont très performants.

Finalement il ressort de ces études un certain nombre de règles de bon sens du type : il faut faire des partitions floues qui prennent en compte des caractéristiques du procédé (non linéarités, bruit...) mais il n'y a pas de résultats définitifs.

3.6.7 Différents types de régulateur flou

Cette classification est basée sur la manière dont la commande du système est obtenue en fonction des différents paramètres d'entrée du régulateur [66].

3.6.7.1 Régulateurs flous à structure PID (RF-P, RF-PD, RF-PI, RF-PID)

Dans cette classe de régulateurs, quatre formes classiques sont distinguées, en fonction de leur équivalence aux régulateurs classiques. Par analogie, la fonction reliant la sortie du régulateur à ses entrées devient non linéaire.

* *Régulateur Flou Proportionnel (RF-P)*

La loi de commande d'un régulateur flou de ce type est proportionnelle à la valeur de l'erreur entre la sortie du système et la consigne ; les règles sont de la forme : Si $e(k)$ est E alors $u(k)$ est U. La loi de commande s'apparente à celle d'un régulateur Proportionnel classique avec un gain non linéaire :

$$u(k) = K_p(k)e(k) \quad (3.51)$$

* *Régulateur Flou Proportionnel Dérivé (RF-PD)*

Pour ce type de régulateur, la commande du système s'obtient en fonction des erreurs et de leurs dérivées premières suivant des règles de la forme : Si $e(k)$ est E et $De(k)$ est DE alors $u(k)$ est U. La loi de commande du régulateur PD classique équivalent est :

$$u(k) = K_p(k)e(k) + K_D(k)(e(k) - e(k-1)) \quad (3.52)$$

* *Régulateur Flou Proportionnel Intégral (RF-PI)*

C'est le plus classique des régulateurs à structure PID utilisés pour des systèmes d'ordre inférieur ou égal à 2. Une règle s'écrit alors sous la forme : Si $e(k)$ est E et $De(k)$ est DE alors $Du(k)$ est DU. Le régulateur PI classique équivalent s'écrivant :

$$\Delta u(k) = K_p(k)(e(k) - e(k-1)) + K_I(k)e(k) \quad (3.53)$$

*** Régulateur Flou Proportionnel Intégral et Dérivée (RF-PID)**

Ce dernier type de régulateur utilise l'erreur, l'intégrale de l'erreur et la variation de l'erreur pour

élaborer les règles. Avec : $\delta e(k) = \sum_{i=1}^{i=k-1} e(i)$, les règles sont de la forme :

Si $e(k)$ est E et $De(k)$ est DE et $\delta e(k)$ est SE alors $u(k)$ est U.

Plusieurs auteurs ont alors proposé des équivalences entre ces RF et leur version linéaire [64, 67].

3.7 Conclusion

En effet, des applications de la commande floue existent maintenant dans des domaines très variés, tels que la robotique, les machines-outils, les véhicules, le domaine ferroviaire, les applications domestiques (climatisation, douche, appareils photographiques, appareils électroménagers) ...

Il semble que la réalisation d'un contrôleur flou soit particulièrement recommandée lorsque le procédé est mal connu ou difficile à décrire, dû à une complexité trop importante. Dans ce cas, la facilité de mise en œuvre dépend bien entendu de l'application, la difficulté se résume de l'obtention de l'expertise liée à l'application. Il subsiste quelques points difficiles notamment en ce qui concerne le problème du choix des techniques spécifiques aux contrôleurs flous à mettre en œuvre pour un type de procédé donné. Ce problème est compensé par la facilité de mise en œuvre des contrôleurs flous et leur aptitude à implémenter l'expertise humaine sous forme de règles. Néanmoins, même avec ces limitations, des comparaisons entre des commandes classiques et floues ont été effectuées, entre autres ont montré que l'approche floue tient une place respectable par rapport aux autres méthodes.

Chapitre 4

Contrôleur MPPT à base de logique floue avec simulations et discussions

Chapitre 4: Contrôleur MPPT à base de logique floue avec simulations et discussions

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons parlé à propos des régulateurs flous en général.

Dans la première partie de ce chapitre nous allons voir tout détails afin d'expliquer comment concevoir un régulateur flou pour extraire le maximum d'énergie dans un système photovoltaïque et précisément nous allons l'appliquer sur notre modèle de système photovoltaïque choisi. Nous allons voir aussi le modèle d'un autre régulateur classique le plus populaire utilisé pour extraire le maximum d'énergie dans les systèmes photovoltaïques [8].

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous détaillons notre modèle utilisé sur Matlab du système photovoltaïque. Nous étudions ainsi les résultats de simulations des deux régulateurs : classique et intelligent appliquée sur ce système photovoltaïque.

4.2. I/ Contrôleur MPPT à base de logique floue

4.2. I/ 1. Méthodologie

L'étude mathématique de la caractéristique P-V illustrée à la Figure 1.7 nous amène au choix de l'algorithme MPPT suivant :

- 1) L'analyse de la pente $m(p_i)$ au point p_i de la caractéristique $P-V$ est utilisée pour localiser le point de fonctionnement réel du point p_i . Selon ces données, le contrôleur décidera d'augmenter ou de diminuer la tension en faisant varier le rapport cyclique D .
- 2) L'analyse du taux de variation de la pente au point p_i : $\Delta m(p_i) = S(p_i)$ exprime le taux d'approche et d'éloignement du PPM. Ce paramètre est également inclus dans le contrôleur pour une recherche plus rapide de PPM.

4.2. I/ 2. Configuration du contrôleur flou

Les systèmes flous sont de bons modèles pour les systèmes non linéaires. Les modèles flous sont basés sur des règles floues. Ces règles floues fournissent des informations sur les systèmes non linéaires incertains [68].

Un contrôleur à logique floue comprend trois opérations principales : «fuzzification», «inférence» et «défuzzification» [10, 69]. Les données d'entrée sont introduites dans le système flou où les quantités physiques sont représentées comme des variables linguistiques avec des fonctions d'appartenance appropriées. Ces variables linguistiques sont ensuite utilisées dans des antécédents (IF-Part) d'un ensemble de règles floues «IF-THEN» dans un moteur d'inférence pour générer un nouvel ensemble de variables linguistiques floues ou conséquentes (THEN-Part)[68]. La Figure 4.1 illustre la représentation schématique du contrôleur flou :

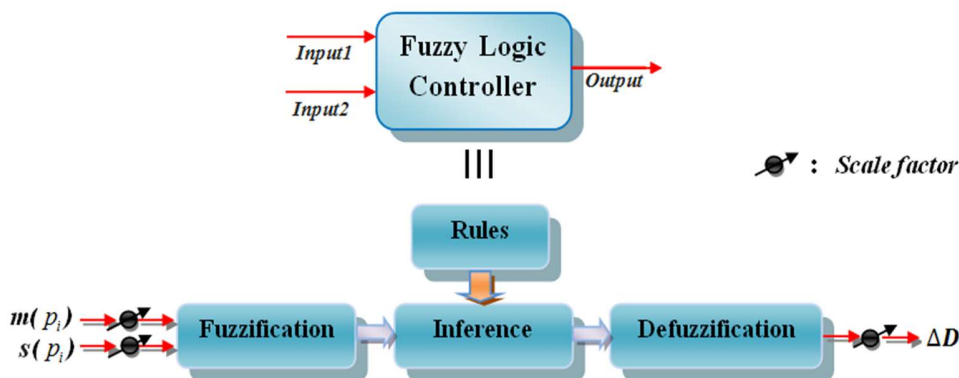


Figure 4.1 Configuration du contrôleur Flou.

4.2. I/ 3. Fuzzification

Le circuit de commande mesure instantanément la tension $V(i)$ et le courant $I(i)$ du générateur photovoltaïque et calcule la puissance sous la forme $P(i) = I(i) \times V(i)$.

Comme expliqué dans la section 3.2, le contrôleur analyse l'entrée1(i) qui représente la pente du point de fonctionnement actuel ($m(p_i)$) sur la courbe P-V et l'entrée2(i) qui représente le taux d'approximation ou de distance du point de référence MPP. Le contrôleur flou prend des mesures instantanées de ces deux valeurs d'entrées, puis décide et calcule la sortie, $\Delta D(i)$, qui correspond en fait au changement du rapport cyclique du MOSFET.

Les variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou sont exprimées en termes de fonctions d'appartenance. La détermination de la plage de variables linguistiques floues qui compose les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou est basée sur les expériences et les observations des spécialistes du contrôle travaillant avec le système photovoltaïque [58, 68], ainsi que le bon choix des règles d'inférence.

En d'autres termes, nos observations suggèrent que la valeur de la pente d'un point p_i sur de la courbe de la figure 1.7 (qui représente l'entrée 1) sera positive, négative ou égale à zéro (zéro étant le MPP). La valeur de changement de la pente de deux points p_i et p_{i-1} sur la même courbe (et qui représente l'entrée 2) sera soit positive, négative ou nulle. Le contrôleur flou décidera d'augmenter, de diminuer ou de stabiliser la sortie de la commande, qui est ΔD .

Par conséquent, afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles à partir de nos expériences de simulation, et après plusieurs calculs et tests sur notre système PV, nous avons décidé de choisir la décomposition des fonctions d'appartenance suivantes la plus simple pour le régulateur flou, qui est illustrée à la Figure 4.2.

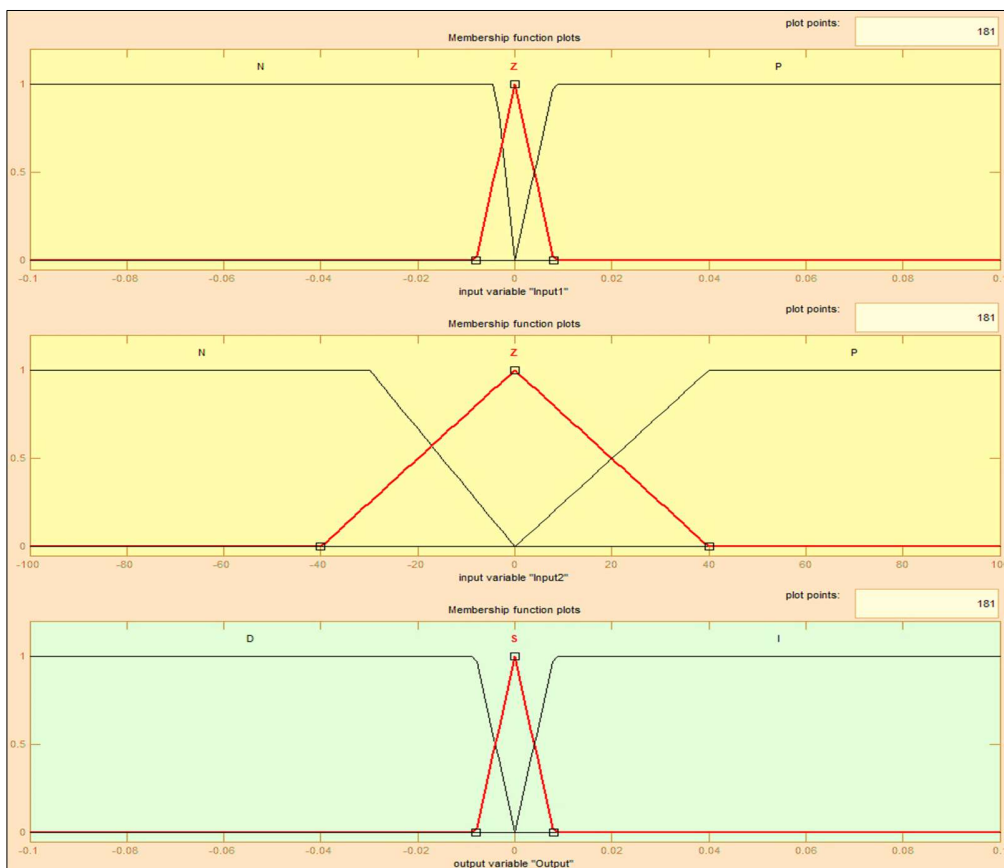


Figure 4.2 Fonctions d'appartenance des deux entrées: Input1, input2 et la sortie output, avec trois ensembles de variables linguistiques.

On définit les fonctions d'appartenances des entrées et des sorties en termes d'ensemble de variables linguistiques comme suit [8] :

(1) Input1: N: Négatif, Z: Zéro, P: Positif,

(2) Input2: N: Négatif, Z: Zéro, P: Positif,

(3) Sortie : D: Diminuer, S: Stabiliser, I: Augmenter.

Les valeurs réelles de Input1, Input2 et de la sortie sont normalisées par un facteur d'échelle en entrée [31, 48]. Dans ce système, le facteur d'échelle en entrée a été conçu comme suit :

- Les valeurs d'entrée1 sont comprises entre -0,1 et 0,1;
- Les valeurs d'entrée2 sont comprises entre -100 et 100;
- Les valeurs de sortie sont comprises entre -0,1 et 0,1.

Dans la littérature [68], différentes formes de fonctions d'appartenance peuvent exister : formes trapézoïdale, triangulaire, rectangulaire, en forme de cloche, concave, etc. Les formes triangulaires ou trapézoïdales sont généralement utilisées dans cet ouvrage en tant que fonctions d'appartenance. Le choix des fonctions dépend également de l'expérience des utilisateurs. Les fonctions d'appartenance doivent se chevaucher pour permettre l'inclusion partielle de la même variable linguistique en même temps dans deux ensembles flous différents [1, 13, 68].

4.2. I/ 4. La méthode d'inférence

La méthode d'inférence fonctionne de manière à ce qu'une modification du rapport cyclique du hacheur Boost entraîne la tension V_{MPP} correspondante au PPM. À la suite de l'analyse d'un nombre exhaustif de combinaisons de variables d'entrée et d'une analyse des sorties correspondantes, nous proposons des règles d'inférence floues, illustrées à la figure 4.3.

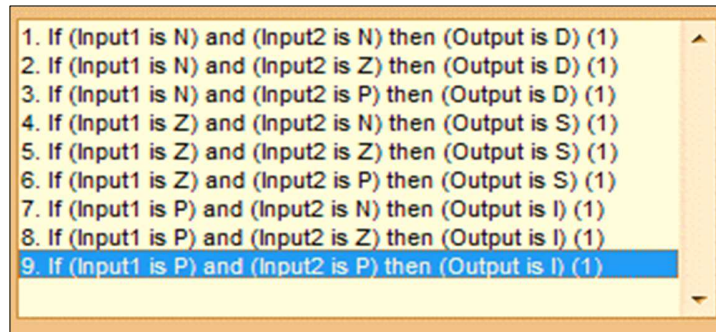


Figure 4.3 Décisions de règles floues proposées.

Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode de *Mamdani* [68] pour l'inférence floue avec la loi de composition floue de l'opération max-min, comme l'illustre la figure 4.4.

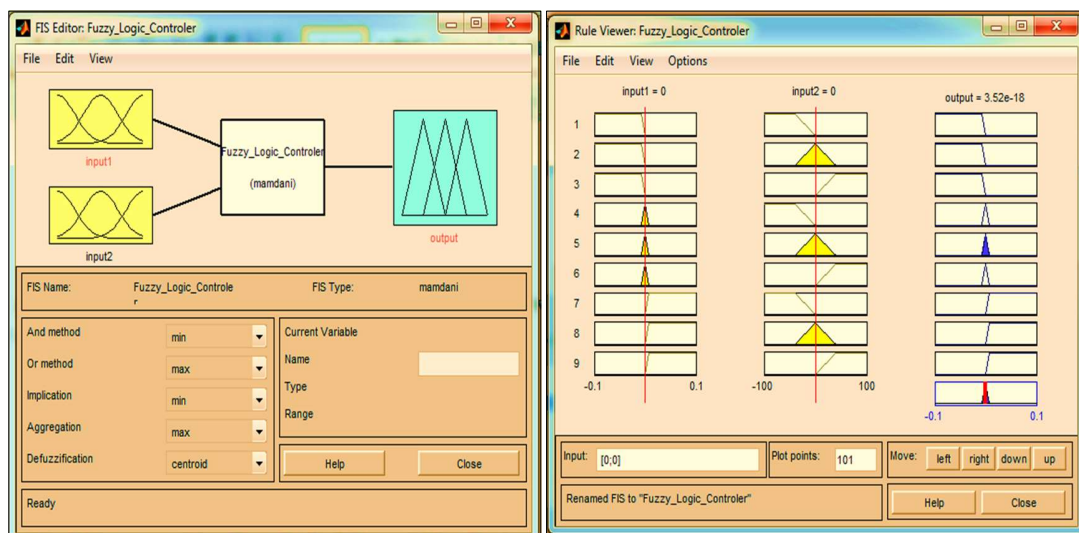


Figure 4.4 Composition max-min pour le calcul de la sortie ΔD .

4.2. I/5 Défuzzification

Après l'opération d'inférence, la sortie du contrôleur est exprimée sous la forme de courbes de variables linguistiques. Les méthodes de défuzzification sont ensuite utilisées pour calculer et décoder les variables linguistiques en une valeur numérique. Dans ce travail, nous utilisons la méthode centroïde [68], qui détermine la sortie du contrôleur en tant que valeur du centre de gravité du dernier sous-ensemble flou combiné.

4.2. I/.6 Extraire le PPM en utilisant les méthodes Perturb et Observe (P & O) et Floue.

Depuis les années 1970, la méthode P & O (perturbation et observation) est l'approche la plus largement utilisée dans l'MPPT [70, 71]. Il existe plusieurs versions de la méthode P & O, y compris celle décrite dans la Figure 4.5 ci-dessous.

Nous avons choisi ce régulateur classique à base de méthode P&O afin de faire une comparaison des résultats de simulation pour prouver les performances améliorées de notre régulateur flou conçu.

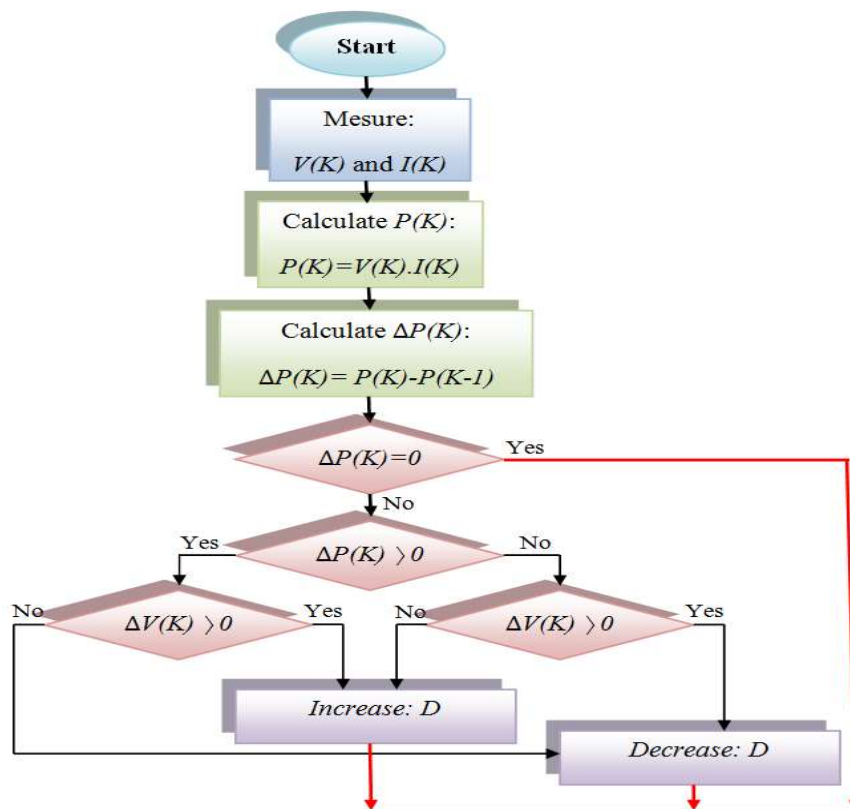


Figure 4.5 Organigramme de l'algorithme MPPT Perturb and Observe (P & O) utilisé.

La méthode P & O utilise un algorithme qui déduit l'influence du rapport cyclique (augmentation ou diminution) jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Comme illustré sur la figure 12, $V(K)$ et $I(K)$ sont surveillés en permanence et la puissance de sortie du générateur $P(K)$ est calculée. Cette valeur instantanée $P(K)$ est comparée à la valeur précédemment mesurée de $P(K - 1)$. Si les deux valeurs mesurées sont identiques, cela signifie que le point de puissance maximal a été atteint

et que le rapport cyclique n'est pas modifié. Dans le cas où la puissance de sortie et la tension $V(K)$ ont changé entre deux mesures successives et dans le même sens, le rapport cyclique est augmenté. Si $\Delta P(K)$ augmente alors que $V(K)$ diminue et vice-versa, le rapport cyclique est diminué [1, 10].

4.2. I/.7 Modèles Simulink de simulation des contrôleurs comparée

Dans ce travail, nous comparons les performances MPPT de la méthode P&O traditionnelle avec notre méthode de contrôle basée sur la logique floue. Nous illustrons dans la figure 4.6 la méthode MPPT à base floue et dans la figure 4.7 la méthode P & O MPPT, telle que mise en œuvre sur Simulink-Matlab®.

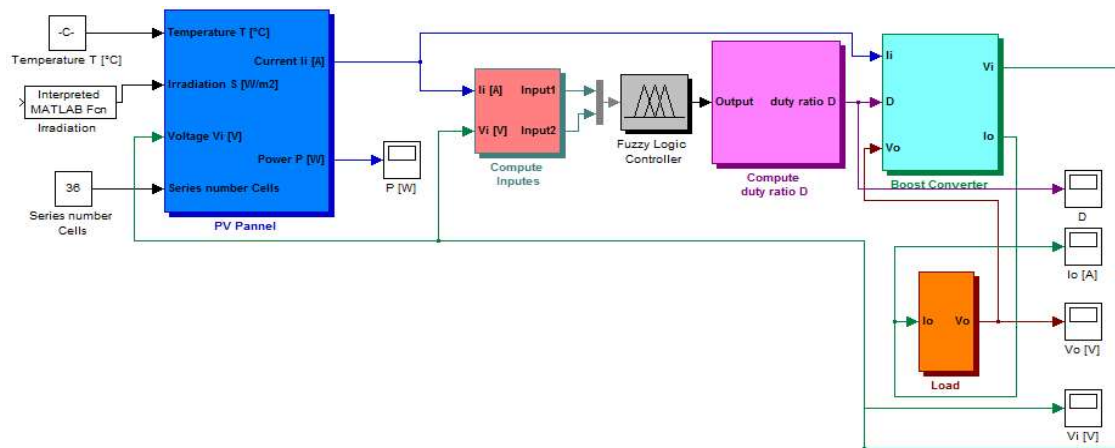


Figure 4.6 Représentation Simulink du système global PV avec un contrôleur à logique floue.

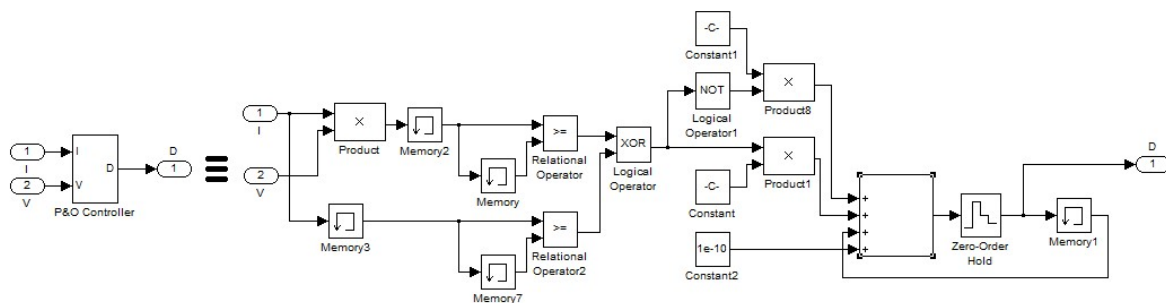


Figure 4.7 Détails des sous-systèmes MPPT du contrôleur P & O.

Nous avons vu dans cette première partie de ce chapitre, la conception du régulateur flou ainsi que les idées utilisées pour faire le contrôle flou idéalement. Dans la deuxième partie qui va suivre nous allons voir les résultats que donnent ce régulateur et ces performances prouvées.

4.2. II/ Simulations et discussions

4.2. II/ 1. Introduction

Dans ce qui suit nous détaillons notre modèle utilisé sur Matlab du système photovoltaïque. Nous étudions ainsi les résultats de simulations des deux régulateurs : classique et intelligent appliquée sur ce système photovoltaïque.

4.2. II/ 2. Modèle de simulation du système photovoltaïque

Notre modèle MPPT basé sur la logique floue a été conçu pour améliorer l'efficacité dans des conditions climatiques variables. Par conséquent, la température ambiante et l'irradiation incidente sur le panneau photovoltaïque sont définies comme un ensemble de valeurs d'entrée instantanées.

La représentation mathématique du système PV est définie dans les équations (1.2 à 1.5) mises en œuvre avec les paramètres suivants :

- Nombre de modules PV connectés en série est de 14 ;
- Nombre de cellules photovoltaïques dans chaque module PV, connectés en série $z = 36$;
- $R_p = 30 \Omega$, $R_s = 15 \times 10^{-3} \Omega$, $E_g = 1.1 eV$, $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, $k = 1.380 \times 10^{-23} J/K$;
- $q = 1.602 \times 10^{-19} C$,
- $I_{ph} \Big|_{(T=298.K)} = 3.25 A$
- La valeur initiale du rapport cyclique est 0,1.

Pour le convertisseur PV Boost, les équations (1.6-1.9) ont été implémenté avec les valeurs numériques suivantes [1, 10] : $C1 = 5,6mF$, $C2 = C1$, $L = 3,5mH$.

Pour le bloc de charge PV, l'équation (5.1) a été mise en œuvre à l'aide des définitions paramétriques du (5.2) :

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned}
a_2 &= R_{bs}R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp}, \\
a_1 &= R_{bs}R_{b1}C_{b1} + R_{bs}R_{bp}C_{bp} + R_{b1}R_{bp}C_{bp} + R_{bp}R_{b1}C_{b1}, \\
a_0 &= R_{bs} + R_{b1} + R_{bp}, \\
b_2 &= R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp}, \\
b_1 &= R_{b1}C_{b1} + R_{bp}C_{bp}, \\
b_0 &= 1.
\end{aligned} \tag{5.2}$$

L'équation (5.1) et les définitions paramétriques (5.2) ont été utilisées dans des travaux antérieurs [10, 12, 13, 36, 37, 72]. Pour modéliser les batteries Plomb-acide, les valeurs numériques suivantes ont été utilisées pour compléter le modèle : $R_{bs}=0.0013\Omega$, $R_{b1}=2.84\Omega$, $R_{bp}=10e^3\Omega$, $C_{b1}=2.5mF$, $C_{bp}=2 \times 45 \times 9 \times 12 \times 36000 / (125^2 - 90^2) = 4.650KF$.

4.2. II/ 3. Résultats de simulation pour des conditions climatiques fixes

Pour évaluer le système MPPT basé sur la logique floue, nous avons analysé ses capacités d'extraction de puissance et sa stabilité par rapport au contrôleur P & O traditionnel [8]. Dans cette simulation particulière, le modèle PV décrit précédemment a été simulé avec les deux contrôleurs : le contrôleur à logique floue et le contrôleur P & O pour des conditions climatiques fixes, c'est-à-dire une insolation de $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ et une température de 25°C . Les résultats sont illustrés à la Figure 5.1. Pour la sortie de puissance photovoltaïque, la méthode MPPT basée sur la logique floue permet d'obtenir une puissance de sortie maximale plus rapide que le contrôleur P & O (2,4s par rapport à 12,3s). De plus, le contrôleur MPPT basé sur la logique floue présente de meilleures performances non seulement pour atteindre le PPM, mais également en termes de stabilité et de robustesse (atténuation des fluctuations de puissance).

Le générateur PV atteint sa puissance de sortie stable maximum juste après un dépassement mineur à $t = 2,1 \text{ s}$ et que la sortie reste stable dans une plage de $0,0001 \text{ W}$. En attendant, le contrôleur P & O est plus lent à atteindre son point de consigne et est soumis à des oscillations importantes avant que la stabilité ne soit atteinte. De plus, un régime permanent est soumis à une oscillation continue de $0,0002 \text{ W}$. Un comportement similaire est observé avec la sortie de tension PV tandis que le contrôleur P & O atteint son point de consigne maximum après 15 secondes par rapport à un temps rapide de 2,4 secondes avec le contrôleur à logique floue. En outre, le contrôleur P & O est soumis à un dépassement important avant la stabilisation avec une oscillation continue de $0,02 \text{ V}$ par rapport à la quasi-absence d'oscillation dans le cas de notre contrôleur flou. Il en va de même

pour la tension de sortie du convertisseur, le courant du module PV et le courant du convertisseur, tandis que le contrôleur basé sur la logique floue offre des performances incroyablement meilleures que le contrôleur P & O en termes de vitesse pour une puissance maximale, la stabilité et la robustesse.

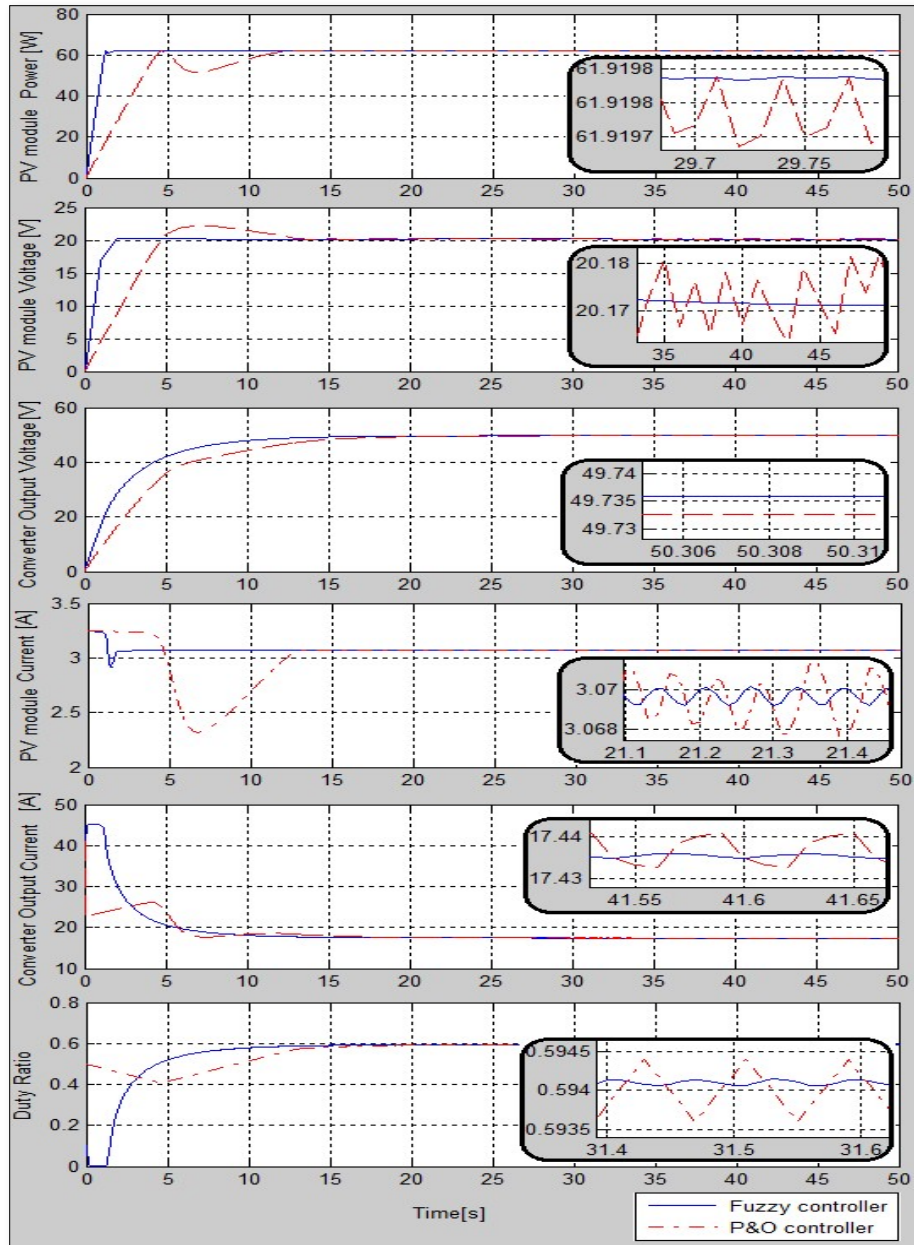


Figure 4.8 Résultats de la simulation pour des conditions climatiques fixes : insolation $S = 1000\text{W} / \text{m}^2$ et température $T = 25^\circ \text{C}$.

Une amélioration des performances résulte de la variation très rapide et plus appropriée du rapport cyclique dans le cas du contrôleur à logique floue.

4.2. II/ 4. Résultats de la simulation pour les conditions climatiques changeantes

4.2. II/ 4.1. Résultats de simulation pour une température fixe à 25 ° C et une augmentation rapide de l'insolation de 500 Wm⁻² à 1100 Wm⁻²

Dans ce cas, l'insolation a été rapidement augmenté de $S = 500 \text{ Wm}^{-2}$ à $S = 1100 \text{ Wm}^{-2}$ via une fonction d'échelon à $t = 30 \text{ s}$. Comme l'illustre la Figure 5.2, la méthode MPPT basée sur la logique floue présente des performances bien meilleures que celles du contrôleur P&O. Le contrôleur flou réagit presque instantanément au changement d'insolation et recouvre sa stabilité avec une robustesse étonnante pour la puissance et la tension de sortie du module PV (oscillation de puissance réduite). Le contrôleur P&O met plus de temps à atteindre la stabilité qui se produit après les oscillations du signal dans le cas de la sortie de puissance PV et les dépassements dans le cas de la sortie de tension PV. Nous notons que la variation du taux de fonctionnement du contrôleur de logique floue est beaucoup plus rapide que celle du contrôleur P&O lorsqu'ils détectent le changement de rayonnement. Le rapport cyclique diminue dans le cas du contrôleur flou par rapport au rapport cyclique presque constant dans le cas du contrôleur P&O, ce qui contribue probablement à la rapidité de l'obtention de la puissance maximale ainsi qu'à l'atténuation des oscillations et des dépassements.

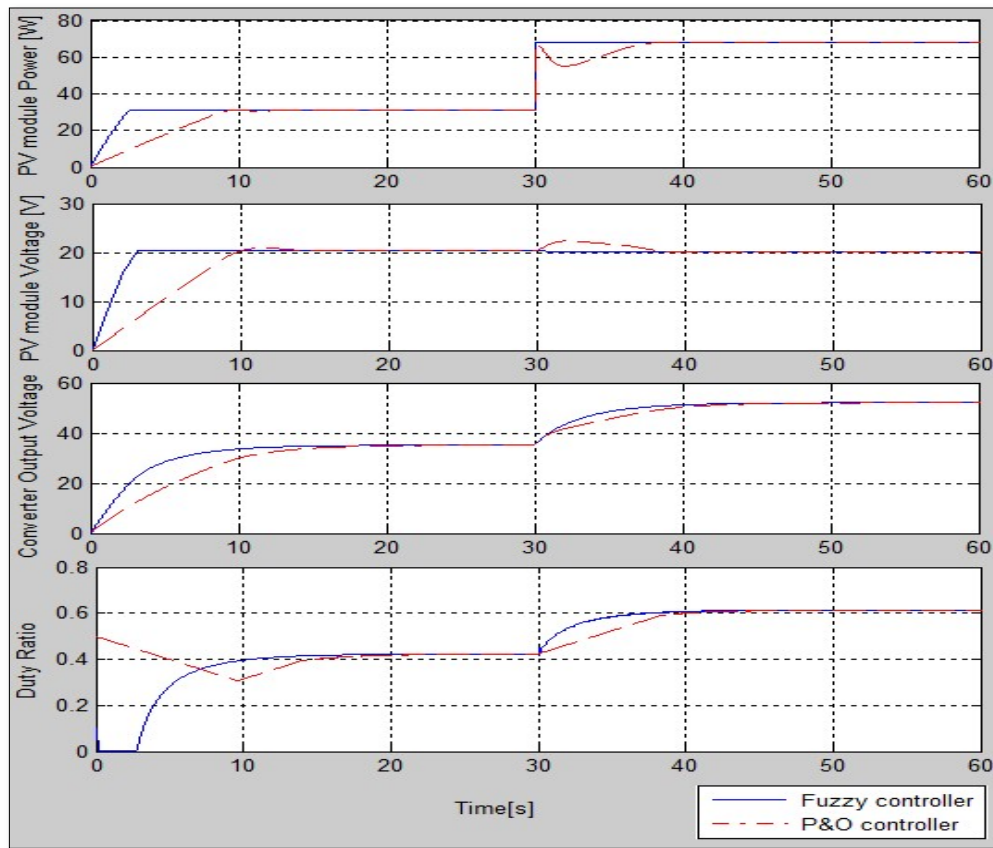


Figure 4.9 Résultats de la simulation avec une augmentation rapide de l'éclairement solaire à $t = 30$ s de $S = 500 \text{ W} / \text{m}^2$ à $S = 1100 \text{ W} / \text{m}^2$ à température constante $T = 25^\circ \text{C}$.

4.2. II/4.2. Résultats de la simulation pour une température fixe à 25°C et une augmentation lente de l'éclairement solaire de 500 Wm^{-2} à 650 Wm^{-2}

Dans ce cas, nous évaluons la performance relative du système P & O et le contrôleur basé sur la logique floue pour une augmentation de la température fixe et de l'éclairement solaire lent de 500 Wm^{-2} à 650 Wm^{-2} . Comme l'illustre la Figure 5.3, l'insolation augmente lentement et de façon continue de $S = 500 \text{ Wm}^{-2}$ à $t = 20$ s jusqu'à $S = 650 \text{ Wm}^{-2}$ à $t = 80$ s. Dans ce cas, nous constatons que les deux contrôleurs affichent des performances presque similaires.

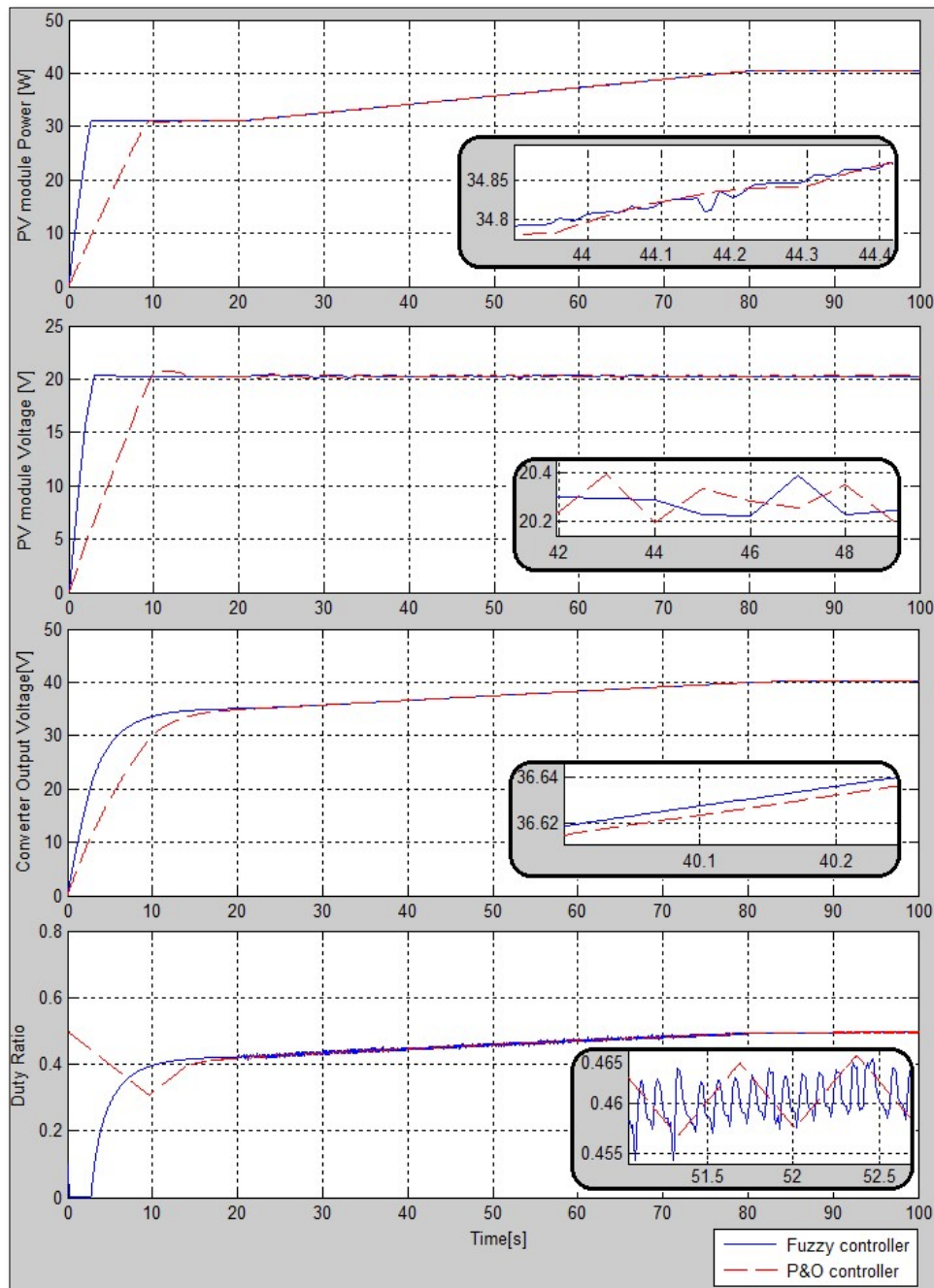


Figure 4.10 Résultats de la simulation avec une augmentation lente de $S = 500 \text{ W} / \text{m}^2$ ($t = 20$ s) à $S = 650 \text{ W} / \text{m}^2$ ($t = 80$ s) à température constante $T = 25^\circ \text{ C}$.

4.2. II/ 4.3. Résultats de la simulation pour un ensoleillement fixe à 1000 Wm^{-2} et une diminution rapide de la température de 40° C à 10° C .

Dans ce cas, la température diminue rapidement via une fonction échelon à $t = 30$ s tout en maintenant l'insolation fixée à 1000 Wm^{-2} (figure 5.4). Nous notons des observations similaires à

celles du cas d'augmentation rapide de l'insolation avec une température fixe. Le contrôleur MPPT flou réagit rapidement au changement agressif du rapport cyclique. Cela conduit bien sûr à une puissance de sortie maximale plus rapide avec une stabilité comparable à celle du contrôleur P & O.

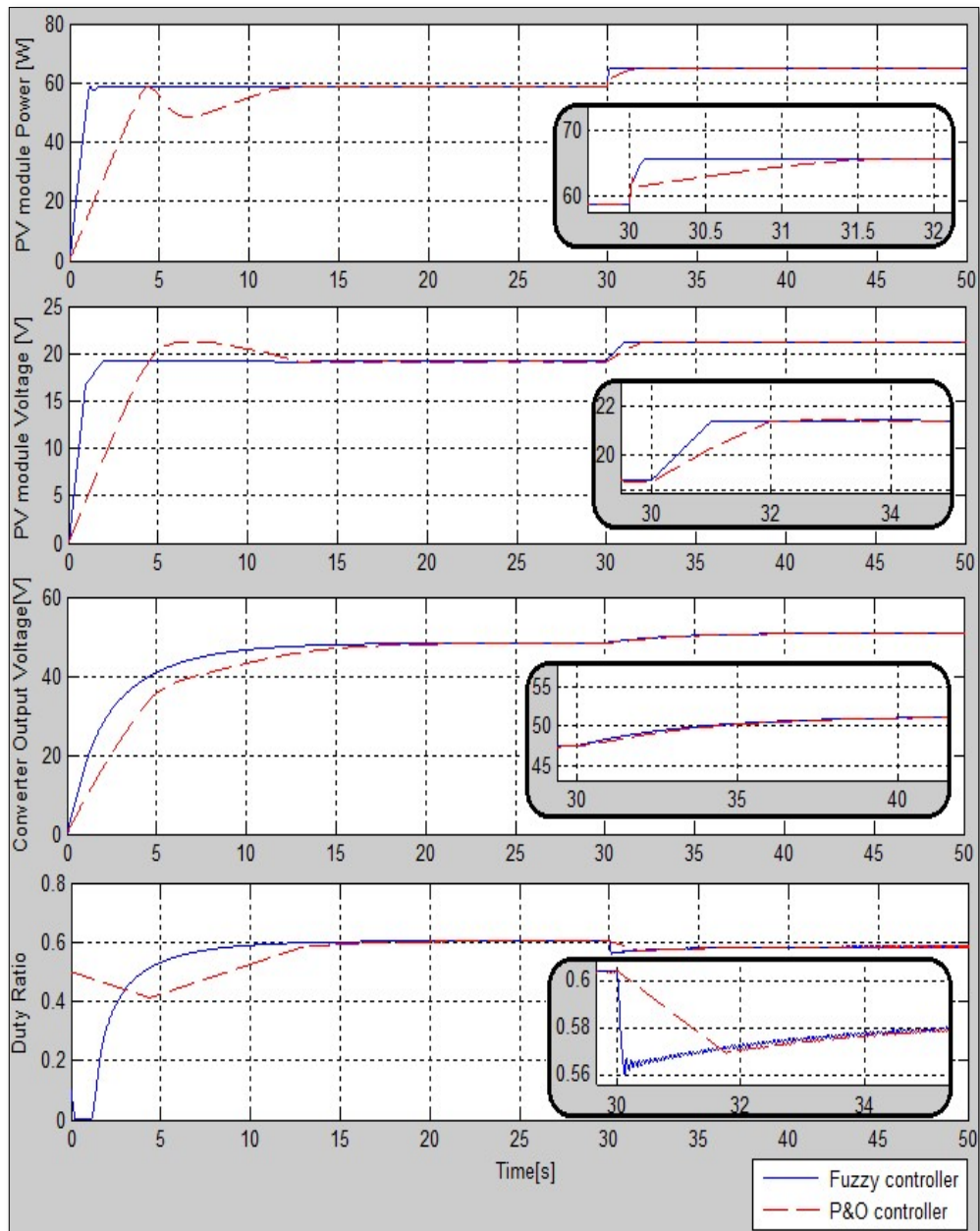


Figure 4.11 Résultats de la simulation avec une diminution rapide de la température à $t = 30$ s de $T = 40$ °C à $T = 10$ °C, avec un ensoleillement constant de $S = 1000$ W / m².

4.2. II/ 4.4. Résultats de simulation pour une insolation fixe à $1\,000\text{ Wm}^{-2}$ et une augmentation lente de la température de 25 °C à 30 °C

Dans ce cas, comme le montre la Figure 5.5, les contrôleurs P & O et à logique floue affichent des performances comparables en termes d'atteinte et de stabilisation de la puissance PV. Cependant, une différence notable apparaît dans le cas de la sortie de tension PV. Le contrôleur flou ne montre aucun dépassement significatif par rapport au contrôleur P & O. De plus, le contrôleur de logique floue offre de meilleures performances en ce qui concerne la tension de sortie du convertisseur, plus rapidement obtenue par le contrôleur flou.

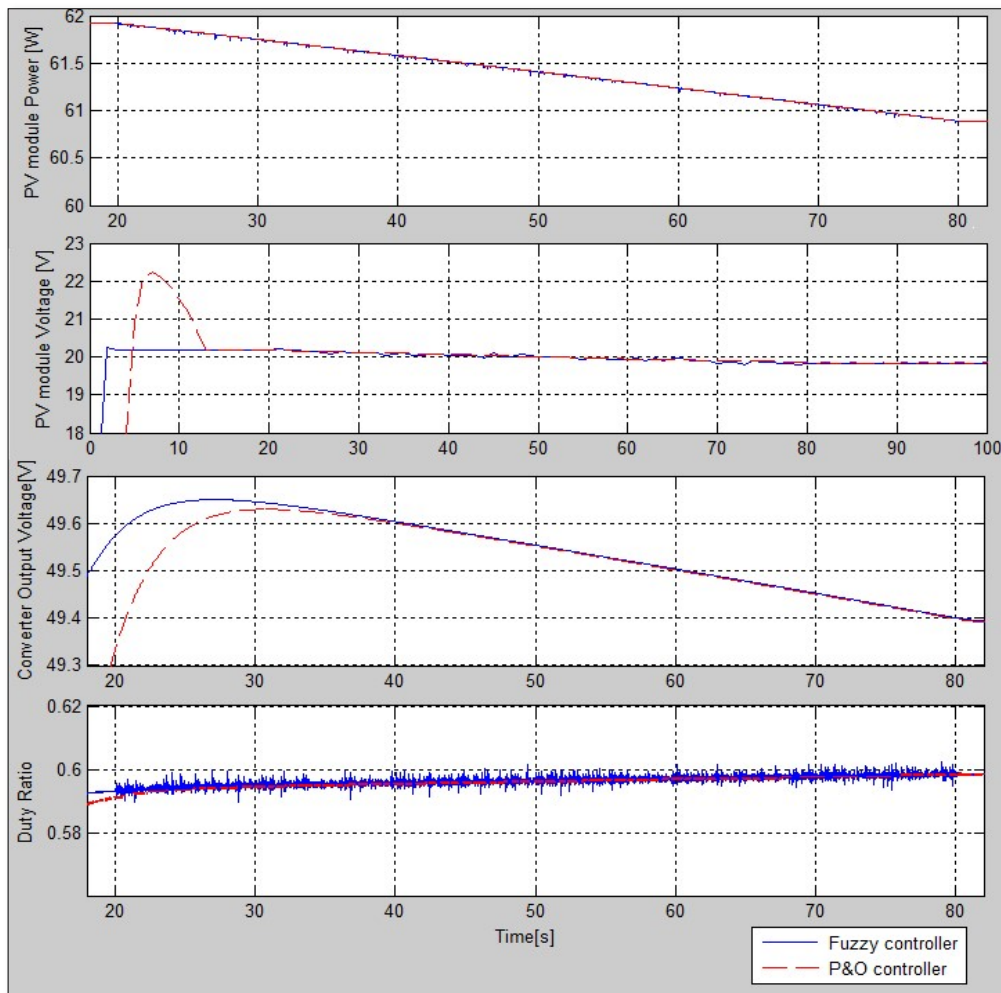


Figure 4.12 Résultats de la simulation avec une augmentation lente de la température de $T = 25\text{ °C}$ ($t = 20\text{ s}$) à $T = 30\text{ °C}$ ($t = 80\text{ s}$), avec un ensoleillement fixe de $S = 1000\text{ W/m}^2$.

4.2. II/ 5. Conclusion

Pour extraire le maximum d'énergie dans un système photovoltaïque nous avons choisi une méthode intelligente de l'intelligence artificielle connu dans le monde qui est la logique floue.

En étudiant les régulateurs à base de logique floue, nous avons conçu une forme qui peut être la plus simple qui existe pour faire la poursuite MPPT avec la meilleur décomposition et conception du régulateur MPPT_Flou. Ainsi nous avons Etudier cette poursuite MPPT et nous avons donné toute l'étude sur les performances de ce régulateur.

En général les résultats de simulations et de comparaison avec le régulateur flou classique le plus populaire et le plus utilisé pour faire la poursuite du PPM, nous ont prouvé les performances puissantes de notre régulateur intelligent flou le plus simple conçu, qui existe.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le coût de l'énergie solaire est un problème majeur pour son potentiel de développement. L'extraction maximale de puissance est donc un paramètre important qui influe sur la production totale de systèmes photovoltaïques et permet de mieux rentabiliser les projets photovoltaïques.

Dans ce travail, nous avons présenté et étudié une méthode de logique floue la plus simple et efficace permettant d'obtenir le PPM du générateur PV rapidement.

Afin d'illustrer les performances de ce contrôleur, un modèle Matlab-Simulink® a été construit et des simulations ont été effectuées pour différents scénarios d'exploitation.

Les résultats ont été comparés aux contrôleurs P & O couramment utilisés. Les résultats de la simulation démontrent une efficacité accrue du suivi de la puissance maximale du contrôleur à logique floue.

Les simulations ont montré que les performances les plus significatives ont été obtenues surtout lorsque les paramètres varient rapidement (température, insolation). En outre, le contrôleur le plus simple basé sur la logique floue, comparé au contrôleur P & O, affiche de meilleures performances en termes de temps de poursuite, de stabilité et de robustesse dans tous les cas. De meilleures performances de stabilité et de robustesse de la part du contrôleur basé sur la logique floue offrent des avantages majeurs pour atténuer les fluctuations de puissance. L'algorithme de logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. De plus, il se caractérise par un bon comportement transitoire. Cependant, la mise en œuvre de ce type d'algorithme est plus facile que les algorithmes conventionnels.

À la fin, nous pouvons conclure que l'utilisation de la logique floue pour le contrôle MPPT et même dans sa forme la plus simple, présente un avantage très intéressant, car il y a toujours des résultats étonnants en fonction de l'accélération de la vitesse de poursuite du PPM, de la stabilité grâce à la suppression des oscillations en régime permanent et robustesse. Ces résultats sont obtenus après des tests multiples de l'ingénieur utilisateur du système PV qui conçoit le régulateur flou, mais l'inconvénient est que chaque modèle de système photovoltaïque doit être étudié et spécifier avec ses propres paramètres, fonctions d'appartenances ainsi que les règles floues de son propre contrôleur flou pour obtenir son PPM.

Nous proposons donc comme perspective une étude généralisée pouvant contenir un modèle global à base de logique floue pour tout modèle PV, si cela est possible. Les analyses présentées dans ce travail devraient être utiles aux utilisateurs, aux concepteurs et aux fabricants commerciaux de systèmes photovoltaïques MPPT.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. AIT-CHEIKH, Mohamed-Salah. LARBES, Cherif. TCHOKETCH KEBIR, Gul Filiz. ZERGUARRAS, A. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme. *Revue des énergies Renouvelables*. 2007, **10**(3): p. 387-395. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061511002894>
2. OULCAID, Mustapha. EL FADHIL, Hassan. YAHYA, Ain Safura. GIRI, Fouad. Maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems under partial shaded conditions. *IFAC-PapersOnLine*. 2016, **49**(13): p. 217-222. Disponible à l'adresse : [Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems under Partial Shaded Conditions - ScienceDirect](#)
3. HASSAINE, Linda. *Modélisation et Simulation d'un Système de Conditionnement de Puissance pour la Poursuite de Puissance Maximale dans les Systèmes Photovoltaïques*. Mémoire de Magister: Electronique. *Ecole Nationale Polytechnique (ENP)*, 2003.
4. KHALIGH, Alireza et Omer C, ONAR. Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems. *CRC press*. 2017. Disponible à l'adresse : [Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems - \(routledge.com\)](#)
5. ALLATAIFEH, Areen Abdallah. BATAINEH, Khaled et AL-KHEDER, Mohamed. Maximum power point tracking using fuzzy logic controller under partial conditions. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2015, **6**(01): p. 1. Disponible à l'adresse : [Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Controller under Partial Conditions \(scirp.org\)](#)
6. PRIETY. GARG, Vijay Kumar. A review paper on various types of MPPT techniques for PV system. *Int. J. Innov. Eng. Res. Technol.* 2014, **4**: p. 320-330. p-ISSN 2320-976. Disponible à l'adresse : [journal_printPrreti_kushi_10_olmay14esr.pdf \(ijesr.org\)](#)
7. REISI, Ali Reza. MORADI, Mohammad Hassan. JAMAS, Shahriar. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, **19**: p. 433-443. Disponible à l'adresse : [Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review - ScienceDirect](#)
8. TCHOKETCH KEBIR, Gul Filiz. LARBES, Cherif. ILINCA, Adrian. OBEIDI, Thameur. TCHOKETCH KEBIR, Selma. Study of the Intelligent Behavior of a Maximum Photovoltaic Energy Tracking Fuzzy Controller. *Energies*. 2018, **11**(12). Disponible à

l'adresse : [Energies | Free Full-Text | Study of the Intelligent Behavior of a Maximum Photovoltaic Energy Tracking Fuzzy Controller \(mdpi.com\)](#)

9. LABOURET, Anne. CUMUNEL, Pascal. BRAUN, Jean Paul. FARAGGI Benjamin. Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque. *Ed Techniques Et Scientifiques Françaises*, 5e édition DUNOD, 2010. Disponible à l'adresse : https://www.toolseurodiscount.com/catalog/pdf/fr/energie_solaire_photovoltaique.pdf
10. LUQUE, Antonio. HEGEDUS, Steven. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. *Ed. John Wiley & Sons Ltd.* England, 2003.
11. ISSADI, Salim. *Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones*. Mémoire de Magister: Electronique. Ecole Nationale Polytechnique El Harrach, Alger, 2006.
12. AZOUI, Boubekeur. Conception, mise en œuvre et évaluation d'un système. Laboratoire électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Batna, 2007.
13. MOLLER, H.J. Semiconductors for Solar Cells. *Artech House*. Inc, MA, 1993.
14. KNOPF, H. *Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle*. Master Thesis, Portland State University, 1999. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10015322134/>
15. GOTTSCHALG, R. Comparison of Different Methods for the Parameter Determination of the Solar Cell's Double Exponential Equation. In *14th European photovoltaic science and engineering conference (PVSEC), Barcelona, Spain*. 1997. Disponible à l'adresse : [\(8\) \(PDF\) Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation | Ralph Gottschalg - Academia.edu](#)
16. TCHOKETCH KEBIR, Gul Filiz. *Commande des hacheurs MPPT par logique floue*. Mémoire de Magistère: Electronique, ENP Alger. 2006.
17. LARBES, Cherif. AIT CHEIKH, Mohamed Salah. OBEIDI, Thameur. ZERGUARRAS, A. Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system. *Renewable Energy*, 2009. **34**(10): p. 2093-2100. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000135>
18. FARHAT, M.A. METWALLY, H.M.B. ABD-ELFatah, Mohamed. Optimal choice and design of different topologies of DC–DC converter used in PV systems at different climatic conditions in Egypt. *Renewable Energy*, 2012. **43**: p. 393-402. Disponible à l'adresse :

[Optimal choice and design of different topologies of DC–DC converter used in PV systems, at different climatic conditions in Egypt - ScienceDirect](#)

19. JOSE, Prince. JOSE Priya Rani. Grid connected photovoltaic system with fuzzy logic control based MPPT. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2014. **3**(8): p. 142-148.
20. ESRAM Trishan, and CHAPMAN P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on energy conversion*, 2007. **22**(2): p. 439-449. Disponible à l'adresse : [Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
21. BELHIMER, Salahaeddine. HADDADI, Mourad. and MELLIT, Adel. Design of a Quadratic Boost Converter for a Standalone PV System Based on INC MPPT Algorithm. In *International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy*. 2018. Springer. Disponible à l'adresse : [Design of a Quadratic Boost Converter for a Standalone PV System Based on INC MPPT Algorithm | SpringerLink](#)
22. NDOYE, Souleymane. LY, Ibrahima. BARRO, Fabé Idrissa, Ould Habiboulahi Lemrabort, Grégoire Sissoko. Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink de la chaîne d'alimentation d'une station relais de telecommunications en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique. *Journal des Sciences*, 2009. Disponible à l'adresse : [Modelisation et simulation sous matlab/simulink de la \(studylibfr.com\)](#)
23. ERICKSON, Robert W. MAKSIMOVIC, Dragan. *Fundamentals of Power Electronics. Second edition, University of Colorado*, 2001, Boulder. Disponible à l'adresse : [Fundamentals of Power Electronics | SpringerLink](#)
24. LAESER, Tuline. Le stockage stationnaire de l'énergie. *Technologies disponibles et recherches du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)*. 2012. Disponible à l'adresse : [Le stockage stationnaire de l'énergie - Dossier de presse CEA - 18 octobre 2012 - 3 Dossier_Presse_Stockage_Energie.pdf \(capenergies.fr\)](#)
25. Lu, C.-F. C.-C. Liu, and C.-J. Wu, Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 1995. **142**(4): p. 429-435. Disponible à l'adresse : [Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability - Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- \(ntu.edu.tw\)](#)

26. SALAMEH, Z.M. CASACCA, M.A. and LYNCH, W.A. A mathematical model for lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1992. 7(1): p. 93-98. Disponible à l'adresse : [A mathematical model for lead-acid batteries | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
27. REYNAUD, Jean-François. *Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques*. Thèse de Doctorat Toulouse, 2001. Disponible à l'adresse : [thesesups.ups-tlse.fr/1482/1/2011TOU30136.pdf](#)
28. MABROUK, Adouane. *Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*. Mémoire de magister : Electricité solaire : Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, 2008.
29. Ressources naturelles CANADA. Introduction aux systèmes photovoltaïques. 2001. Disponible à l'adresse : [Introduction aux systèmes photovoltaïques \(habiter-autrement.org\)](#)
30. <http://www.italiq-expos.com/blog-shopping/2009/05/05/1638-installation-photovoltaïque-apesud-rhone-alpes>.
31. <http://www.swissolar.ch/>
32. Peracod. Etude de faisabilité technico-économique de la filière photovoltaïque raccordée réseau au Sénégal. Promotion de l'Electrification Rurale et de l'Approvisionnement Durable en Combustibles Domestiques. Disponible à l'adresse : [Etude de faisabilité technico-économique de la filière photovoltaïque raccordée réseau au Sénégal - PDF Téléchargement Gratuit \(docplayer.fr\)](#)
33. ROYER, Jimmy. DJIAKO, Thomas. SCHILLER, Eric. SY Bocar Sada. Le pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. Université d'Ottawa, Eric Schiller, 1998. Disponible à l'adresse : https://www.pseau.org/outils/ouvrages/iepf_pompage_photovoltaïque.pdf
34. M. Mansour Niang, Souleymane Diop. Les pompes solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher. Institut Supérieur de Technologie Industrielle - DIT Electrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation, 2008. Disponible à l'adresse : [Memoire Online - Les pompe solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher - Sy M. Mansour Niang & Souleymane Diop](#)

35. BIN ARIF, M Saad. MUSTAFA, Uvais, and AYOB, bin Md. Extensively used conventional and selected advanced maximum power point tracking techniques for solar photovoltaic applications: An overview. *AIMS Energy*, 8(5): 935–958. DOI: 10.3934/energy.2020.5.935 2020. Disponible à l'adresse : [Extensively used conventional and selected advanced maximum power point tracking techniques for solar photovoltaic applications: An overview \(aimspress.com\)](https://aimspress.com/aimspress-data-energy/2020/5/935)
36. J. EL-KHOZONDAR, Hala. J. EL-KHOZONDAR, Rifa. MATTER, Khaled and SUNTIO, Teuvo. A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms. El-Khozondar *et al. Renewables*, 2016. Disponible à l'adresse : [A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms \(springeropen.com\)](https://www.springeropen.com/articles/10.1186/s13642-016-0288-1)
37. REMY, Ghislain. BETHOUX, Olivier. MARCHAND, Claude. DOGAN, Hussein. Review of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems. Nov 2009, Hebron, France. *2nd International Conference on Energy and Environmental Protection in Sustainable Development*. Disponible à l'adresse : [000577.pdf \(centralesupelec.fr\)](https://www.centralesupelec.fr/~remy/000577.pdf)
38. ESEOSA, Omorogiuwa. KINGSLEY, Itelima. Technical review on MPPT techniques on photovoltaic systems. *World Journal of Engineering Research and Technology*. wjert, 2020, Vol. 6, Issue 2, 23-38.
39. PODDER KUMER. Amit, ROY KUMAR. Naruttam, ROY POTA. Hemanshu. MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature. *IET. Renewable Power Generation*, 2019, Vol: 13, Iss: 10, pp. 1615-1632. Disponible à l'adresse : [MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature \(wiley.com\)](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/eng2:201900000)
40. HUSSAINAN BASHA, CH. RANI, C. Different Conventional and Soft Computing MPPT Techniques for Solar PV Systems with High Step-Up Boost Converters: A Comprehensive Analysis. *Energies* 2020, 13, 371; doi:10.3390/en13020371. Disponible à l'adresse : [Energies | Free Full-Text | Different Conventional and Soft Computing MPPT Techniques for Solar PV Systems with High Step-Up Boost Converters: A Comprehensive Analysis \(mdpi.com\)](https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/371)
41. KO, Jae-Sub. HUH, Jun-Ho. KIM, Jong-Chan. Overview of Maximum Power Point Tracking Methods for PV System in Micro Grid. *Electronics*, 2020, 9, 816; doi:10.3390/electronics9050816. Disponible à l'adresse : [Different Conventional and Soft](https://www.mdpi.com/1424-6460/9/5/816)

[Computing MPPT Techniques for Solar PV Systems with High Step-Up Boost Converters: A Comprehensive Analysis \(repec.org\)](#)

42. LOGESWARANA, T. SENTHIL KUMAR, A. A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems under Uniform and Non-Uniform irradiances. *Energy Procedia*, 2014, 54, 228 – 235. Disponible à l'adresse : [A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems under Uniform and Non-uniform Irradiances - ScienceDirect](#)
43. MAOA, Mingxuan. CUI, Lichuang. ZHANG, Qianjin. GUO Ke, ZHOU, Lin. HUANG, Han. Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 2020, 6, 1312–1327. Disponible à l'adresse : [Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies - ScienceDirect](#)
44. HLAILI, Manel.MECHERGUI, Hfaiedh. Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy*, 2016, Article ID 1728398, 10 pages.<http://dx.doi.org/10.1155/2016/1728398>. Disponible à l'adresse : [Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems \(hindawi.com\)](#)
45. REZAEI JORDEHI, A. Maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems: A review of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65, 1127–1138. Disponible à l'adresse : [Maximum power point tracking in photovoltaic \(PV\) systems: A review of different approaches - ScienceDirect](#)
46. HARJAI, Arjav. BHARDWAJ, Abhishek. SANDHIBIGRAHA, Mrutyunjaya. Study of maximum power point tracking (MPPT) techniques in a solar photovoltaic array. B.Tech thesis, 2011. Disponible à l'adresse : thesis.nitrkl.ac.in/2269/1/thesis_new_final.pdf
47. KUMARESH, V. MALHOTRA, Mridul. RAMAKRISHNA, N. SARAVANA PRABU, R. Literature Review on Solar MPPT Systems. *Advance in Electronic and Electric Engineering*. 2014, ISSN 2231-1297, Volume 4, Number 3, pp. 285-296. Disponible à l'adresse : [\(8\) \(PDF\) Literature Review on Solar MPPT Systems | harinatha reddy - Academia.edu](#)

48. TITRI, Sabrina. *Circuits reconfigurables pour la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques*. Thèse de Doctorat: Electronique. Ecole Nationale Polytechnique, 2017.
49. https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_%C3%A9volutionniste
50. BOMBRUN, Maxime. SENE, Abdoulaye. L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d'ordonnement. Rapport d'ingénieur, Projet de 2ème année, Filière 4 : Calculs et modélisations scientifiques. 2011. Disponible à l'adresse : [\(8\) \(PDF\) L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d'ordonnement | Rjab Hajlaoui - Academia.edu](#)
51. KARABOGA, Dervis. BASTURK, Bahriye. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. Springer Science+Business Media B.V. 2007. Disponible à l'adresse : [A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony \(ABC\) algorithm | SpringerLink](#)
52. FONSECA, R. PALUSZEWSKI, M. WINTER, P. Protein Structure Prediction Using Bee Colony Optimization Metaheuristic. Dept. of Computer Science, University of Copenhagen. Universitetsparken 1 DK-2100 Copenhagen. Denmark. Disponible à l'adresse : [Protein Structure Prediction Using Bee Colony Optimization Metaheuristic | SpringerLink](#)
53. MIRJALILI, Seyedali. SAREMI, Shahrzad. MIRJALILI, Seyed Mohammad. COELHO, Leandro dos. Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems With Applications* (2015), doi: 10.1016/j.eswa.2015.10.039. Disponible à l'adresse : [Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization - ScienceDirect](#)
54. MIRJALILI, Seyedali. MIRJALILI, Seyed Mohammad. LEWIS, Andrew. Grey Wolf Optimizer. 2014. Disponible à l'adresse : [Grey Wolf Optimizer - ScienceDirect](#)
55. El Khateb, A.H., N.A. Rahim, and J. Selvaraj. Fuzzy logic control approach of a maximum power point employing SEPIC converter for standalone photovoltaic system. *Procedia Environmental Sciences*, 2013. **17**: p. 529-536. Disponible à l'adresse : [Fuzzy Logic Control Approach of a Maximum Power Point Employing SEPIC Converter for Standalone Photovoltaic System - ScienceDirect](#)

56. Won, C.-Y., et al. A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller. In Power Electronics Specialists Conference, PESC'94 Record., 25th Annual IEEE. 1994. IEEE. Disponible à l'adresse : [A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
57. DRIR, Nadia. BARAZANE, Linda. LOUDINI, Malik. Comparative study of maximum power point tracking methods of photovoltaic systems. in 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). 2014. IEEE. Disponible à l'adresse : [Comparative study of maximum power point tracking methods of photovoltaic systems | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
58. Bühler, H. Réglage par logique floue. 1994: Presses polytechniques et universitaires romandes.
59. ZADEH, Lotfi.A. Fuzzy sets. Information and control, 1965. **8**(3): p. 338-353. Disponible à l'adresse : [L. A. Zadeh. Fuzzy sets. Information and control, vol. 8 \(1965\), pp. 338–353. - L. A. Zadeh. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, vol. 3 \(1971\), pp. 177–200. | The Journal of Symbolic Logic | Cambridge Core](#)
60. TAKAGI, Tomohiro. SUGENO, Michio. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1985(1): p. 116-132. Disponible à l'adresse : [Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
61. SHEHU, S. FARIN, W. DIMITAR, P. FILEV, D. LANGARI, R. Fuzzy control: synthesis and analysis. 2000: John Wiley & Sons, Inc. Disponible à l'adresse : [Fuzzy Control: Synthesis and Analysis | Wiley](#)
62. RONALD, R. YAGER, L. R. ZADEH, L.A. An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems. Vol. 165. 2012: Springer Science & Business Media. Disponible à l'adresse : [An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems | SpringerLink](#)
63. SILER, Wiliam. YING, Hao. Fuzzy control theory: The linear case. Fuzzy sets and systems, 1989. **33**(3): p. 275-290. Disponible à l'adresse : [Fuzzy control theory: The linear case - ScienceDirect](#)
64. YING, Hao. SILER, Wiliam. BUKLEY, J.James. Fuzzy control theory: a nonlinear case. Automatica, 1990. **26**(3): p. 513-520. Disponible à l'adresse : [Fuzzy control theory: A nonlinear case - ScienceDirect](#)
65. MIZUMOTO, M. *Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods*. Information sciences, 1988. **45**(2): p. 129-151. Disponible à l'adresse : [Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods - ScienceDirect](#)
66. DRIANKOV, Dimiter. HELLENDORRN, Hans. REINFRANK, Michael. *The Mathematics of Fuzzy Control*, in *An Introduction to Fuzzy Control*. 1993, Springer. p. 37-102. Disponible à l'adresse : [The Mathematics of Fuzzy Control | SpringerLink](#)
67. GALICHET, S. FOULLOY, L. *Fuzzy controllers: synthesis and equivalences*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1995. **3**(2): p. 140-148. Disponible à l'adresse : [Fuzzy controllers: synthesis and equivalences | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)

68. PATCHARAPRAKITI, Nopporn. PREMRUDEEPREECHACHARN, Suttichai. SRIUTHASIRIWONG, Yosanaï. Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 2005. **30**(11): p. 1771-1788. Disponible à l'adresse : [Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system - ScienceDirect](#)
69. EZINWANNE, Osioma. ZHOGWEN, Fu. ZHIJUN, Li. Energy performance and cost comparison of MPPT techniques for photovoltaics and other applications. *Energy Procedia*, 2017. **107**: p. 297-303. Disponible à l'adresse : [Energy Performance and Cost Comparison of MPPT Techniques for Photovoltaics and other Applications - ScienceDirect](#)
70. RAI, Anourag. AWATSHI, Bhoomika. SINGH, Shweta. DWIVEDI, C.K. *A Review of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system*. *International Journal of Engineering Research*, 2016. **5**(6): p. 539-545.
71. KAMARZAMAN, Nour, Atharah. TAN, Chee, Wai. A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. **37**: p. 585-598. Disponible à l'adresse : [A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems - ScienceDirect](#)
72. CASACCA, M.A. SALAMEH, Z.M. Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modeling techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1992. **7**(3): p. 442-446. Disponible à l'adresse : [Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modeling techniques \(Journal Article\) | OSTI.GOV](#)