

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS -SÉTIF-1
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Pour L'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Automatique

Par

AYAT Rahma

THEME

Utilisation des techniques intelligentes (PSO/GA) en vue de la supervision d'une installation de production d'énergie renouvelable

Soutenu le 30 / 09 /2014 devant la commission d'examen :

Mr. F. KHABER	Prof. à l'université de Sétif 1	Président
Mr. M. KHEMLICHE	Prof. à l'université de Sétif 1	Encadreur
Mr. A. LAMAMRA	M.C.A à l'université de Sétif 1	Examineur
Mr. A. BOUAFIA	M.C.A à l'université de Sétif 1	Examineur

Remerciements

Avant tout, Je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force d'atteindre mon but et d'accomplir mon travail .

J'adresse un grand remerciement à mes chers parents, mes sœurs, mon mari, ma famille et tous mes amis de m'avoir soutenu et encouragé durant toute la durée de préparation de ce mémoire.

*Le travail présenté dans ce mémoire a été dirigé par Mr. **Khemliche Mabrouk**, Professeur à l'université de Sétif1. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance d'avoir proposer et diriger ce travail.*

*Mes remerciements vont également à Mr. **Khaber Farid** Professeur à l'université de Sétif1, qui a bien voulu présider ce jury*

*J'adresse tous mes remerciements aux membres du jury **Mr. Lamamra Athmane**
Et Mr. Bouafia Abdelouahab
Maîtres de conférences classe A à l'université de Sétif1 pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.*

Enfin, je ne pourrais terminer sans remercier toutes les personnes que je n'ai pas pu citer ici et qui ont participé, de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

*A mes chers parents,
A mes chères sœurs
A mon cher mari,
A ma famille et tous mes amies,*

Je dédie ce travail.

SOMMAIRE

Introduction Général.....	2
---------------------------	---

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

I.1 Introduction.....	5
I.2 Historique du solaire photovoltaïque.....	5
I.3 Effet photovoltaïque	6
I.3.1 Rappel sur l'énergie solaire.....	6
I.3.2 Principe de effet photovoltaïque	7
I.4 Cellule solaire.....	8
I.4.1 Différents types des cellules solaires.....	9
I.4.2 Modèle équivalent d'une cellule solaire	11
I.4.3 Paramètres caractéristiques d'une Cellule Solaire	13
I.4.4 l'influence des paramètres sur la caractéristique de la cellule.....	14
I.4.5 Association des cellules photovoltaïques	17
I.5 Générateur photovoltaïque (GPV).....	18
I.5.1 Modèle mathématique d'un GPV	19
I.5.2 Protection d'un GPV.....	19
I.6 Connexion d'un GPV.....	21
I.6.1 Connexion directe source-charge.....	21
I.6.2 Introduction d'un étage d'adaptation.....	21
I.7 Batteries.....	23
I.8 Convertisseurs DC-DC.....	25
I.8.1 Convertisseurs dévolteur « Buck ».....	25
I.8.2 Convertisseur Survolteur « Boost ».....	28
I.9 conclusion.....	30

CHAPITRE II TECHNIQUES CLASSIQUES DE POURSUIT DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

II.1. Introduction.....	32
II.2 Principe de la recherche du MPPT.....	32
II.2.1 Méthodes à contre réaction de tension.....	33
II.2.1.1 Méthode à tension de référence fixe.....	33
II.2.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de V_{OC}	34
II.2.1.3 Méthode à tension de référence externe (cellule pilote).....	34
II.2.2 Méthodes à contre réaction de courant.....	34
II.2.3 Méthodes à contre réaction de puissance	35
II.2.3.1 Méthode perturbation observation (P&O).....	35
II.2.3.2 Algorithme de la 'conductance incrémentale'.....	38
II.3 Conclusion.....	41

CHAPITRE III

TECHNIQUES INTELEGENTES DE POURSUIT DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

III.1 Introduction.....	43
III.2 Logique Floue	43
III.2.1 Introduction	43
III.2.1.1 Logique classique et logique floue	44
III.2.1.2 Valeurs analogiques et logique floue.....	44
III.2.2 Théorie des ensembles flous	45
III.2.2.1 Définition	45
III.2.2.2 Fonctions d'appartenance	46
III.2.2.3 Opérateurs flous	47
III.2.2.4 Règles floues.....	47
III.2.2.5 Mécanisme d'inférence de Mamdani	48
III.3 Optimisation par essaim particulaire	50
III.3.1 Introduction	50
III.3.2 Notion de voisinage	51
III.3.3 Principe général.....	52
III.3.4 Fonctionnement	53
III.3.5 Formalisation.....	54
III.3.6 Vitesse maximale... ..	56
III.4 Algorithmes génétiques.....	56
III.4.1 Introduction.....	56
III.4.2 Fonctionnement général des algorithmes génétiques.....	57
III.4.3 Description.....	59
III.4.3.1 Génération de la population initiale	59
III.4.3.2 Codage.....	59
III.4.3.3 Fonction d'évaluation.....	60
III.4.3.4 Génération de population.....	60
III.5 Conclusion.....	64

CHAPITRE IV

PRESENTATION DES TECHNIQUES INTELLIGENTES

IV.1 Introduction.....	66
IV.2 Conception du controleur MPPT floue	66
IV.2.1 Fuzzification.....	67
IV.2.2 Méthode d'inférence.....	68
IV.2.3 Défuzzification.....	70
IV.3 Conception du controleur MPPT flou optimisé	70
IV.3.1 Critère d'optimisation.....	71
IV.3.2 Critère d'arrêt.....	72
IV.4 Controleur MPPT floue optimisé par PSO (PSOF).....	72
IV.4.1 Création de la population initiale	72
IV.4.2 Variation de la fonction objectif.....	73
IV.4.3 Fonctions d'appartenances du PSOF	74
IV.5 Controleur MPPT floue optimisé par AGs (AGF)	75

IV.5.1 Création de la population initiale	75
IV.5.2 Selection.....	76
IV.5.3 Croisement.....	76
IV.5.4 Mutation.....	77
IV.5.5 Variation de la fonction objectif.....	77
IV.5.6 Fonctions d'appartenances du AGF	77
IV.6 Conclusion.....	78

CHAPITRE V

RESULTATS DE SIMULATION

V.1 Introduction.....	80
V.2 Schéma synoptique du système photovoltaïque	80
V.2.1 Module PV.....	81
V.2.2 Batterie pb-acide.....	81
V.2.3 Hacheur.....	82
V.3 Techniques classiques.....	83
V.3.1 La méthode P&O.....	83
V.4 Technique intelligent.....	85
V.4.1 MPPT floue.....	85
V.4.2 MPPT PSOF.....	86
V.4.3 MPPT AGF.....	87
V.5 Comparaison des résultats des techniques (floue, neuronale, neuro-floue)	88
V.5.1 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables.....	88
V.5.2 Simulation sous des conditions variables d'ensoleillement.....	91
V.5.3 Simulation sous des conditions variables de température.....	94
V.6 Conclusion.....	97
Conclusion générale.....	98
Bibliographie.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1 Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	7
Figure.I.2 Description d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure.I.3 Cellule photovoltaïque monocristalline.....	10
Figure.I.4 Cellule photovoltaïque polycristalline	10
Figure.I.5 Cellule photovoltaïque amorphe	11
Figure.I.6 Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure.I.7 Caractéristiques $I-V$, $P-V$, d'un module PV (MPP).....	13
Figure.I.8 Influence de l'ensoleillement sur les courbes $I-V$ et $P-V$	15
Figure.I.9 Influence de la température sur les courbes $I-V$ et $P-V$	16
Figure.I.10 Effet de résistance sur la caractéristique $I-V$	16
Figure.I.11 Caractéristique résultante d'un groupement de cellules identique.....	17
Figure.I.12 Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (N_p+N_s) cellules identique.....	18
Figure.I.13 Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.....	18
Figure.I.14 (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protections.(b) Défaillance d'une des cellules du module PV et l'activation de la diode bypass.....	20
Figure.I.15 Schéma électrique d'une liaison direct GPVcharge	21
Figure.I.16 Etage d'adaptation d'un générateur PV-charge.....	22
Figure.I.17 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec un convertisseur statique (CS) contrôlé par une commande MPPT sur une charge	22
Figure.I.18 Modèle équivalent de la batterie au plomb-acide.....	23
Figure I.19 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une...	25
Figure.I.20 Circuit électrique d'un convertisseur Buck	26
Figure.I.21 Circuit équivalent du Buck quand $t \in [0, dT_s]$, commutateur fermé.....	26
Figure.I.22 Circuit équivalent du Buck quand $(t \in [dT_s, T_s])$, commutateur ouvert	26
Figure.I.23 Circuit électrique d'un convertisseur Boost	28
Figure.I.24 Circuit équivalent du Boost au temps de fermeture DT_s	29
Figure.I.25 Circuit équivalent du Boost au temps de fermeture $(1-DT_s)$	29
Figure.II.1 Chaîne de puissance.....	33
Figure.II.2 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P &O).....	36

Figure.II.3 Déviation du PPM avec l'algorithme de P&O sous un changement rapide d'ensoleillement	37
Figure.II.4 Déviation du PPM avec l'algorithme de P&O sous un changement lent d'ensoleillement	38
Figure.II.5 Organigramme de l'algorithme 'Incremental Conductance'	40
Figure.III.1 Classification des températures d'une pièce en deux ensembles	44
Figure.III.2 Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	45
Figure.III.3 Comparaison entre fonction caractéristique et fonction d'appartenance.....	46
Figure.III.4 Fonctions d'appartenance de la variable Taille.....	46
Figure.III.5 Fuzzification.....	49
Figure.III.6 Degré d'activation.....	49
Figure.III.7 Agrégation.....	49
Figure.III.8 Défuzzification par centre de gravité.....	50
Figure.III.9 Voisinage étoile.....	51
Figure.III.10 Voisinage anneau	51
Figure.III.11 Voisinage rayon.....	51
Figure.III.12 Principe de déplacement d'une particule.....	52
Figure.III.13 Organigramme général de PSO	53
Figure.III.14 Concepts de base d'un Algorithme Génétique.....	58
Figure.III.15 Schéma de principe de la sélection par roulette.....	61
Figure.III.16 Croisement à un site.....	63
Figure.III.17 Croisement en 2 points.....	63
Figure.III.18 Illustration de la mutation.....	64
Figure.IV.1 Structure de base d'un contrôleur flou.....	66
Figure.IV.2 Fonctions d'appartenance.....	68
Figure.IV.3 L'inférence avec la loi de composition MAX-MIN.....	69
Figure.IV.4 Codages des fonctions d'appartenances	71
Figure.IV.5 Forme d'un particule.....	72
Figure.IV.6 Valeurs minimales de la fonction objectif	73
Figure.IV.7 Fonctions d'appartenances du CLF optimisé par PSO	74
Figure.IV.8 Forme d'un individu	75
Figure.IV.9 Valeurs minimales de la fonction objectif	77
Figure.IV.10 Fonctions d'appartenances du CLf optimisé par AGs.....	78

Figure.V.1 Schéma fonctionnel du système PV global de simulation.....	80
Figure.V.2 Bloc de simulation du module PV.....	81
Figure.V.3 Schéma Simulink représentant le hacheur Boost.....	82
Figure.V.4 Résultats de simulation de la méthode P&O combinée avec un hacheur Boost sous des conditions environnementales stables ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $S=1000\text{ W/m}^2$).....	83
Figure.V.5 Graphe détaillé sur les signaux générés par la méthode P&O, sous des conditions environnementales stables ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $S=1000\text{ W/m}^2$).....	84
Figure.V.6 Variation de la puissance du module, la puissance de la batterie et de la commande D pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C	85
Figure.V.7 Courbe de variation des tensions de batterie de panneau avec le contrôleur flou	85
Figure.V.8 Variation de la puissance du panneau, la puissance de la batterie et de la commande D pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°	86
Figure.V.9 Courbe de variation des tensions de batterie et de panneau avec le contrôleur PSOF	86
Figure.V.10 Variation de la puissance du panneau, la puissance de la batterie et de la commande D pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m^2	87
Figure.V.11 Courbe de variation des tensions de batterie et de panneau avec le contrôleur ..	87
Figure.V.12 Variation de la puissance du panneau PV et de la puissance du batterie pour un ensoleillement de 1000W/m^2 avec une température de 25°C	88
Figure.V.13 Courbe de simulation de la caractéristique P-V d'un panneau PV contrôlé par le contrôleur MPPT Flou	89
Figure.V.14 Courbe de simulation de la caractéristique P-V d'un panneau PV contrôlé par le contrôleur MPPT PSOF	89
Figure.V.15 Courbe de simulation de la caractéristique P-V d'un panneau PV contrôlé par le contrôleur AGF	89
Figure.V.16 Comparaison des divers signaux MPPT de puissance du panneau PV	90
Figure.V.17 Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation rapide de l'ensoleillement de 300 à 1000 W/m^2 en 2 secondes avec une température constante de 25°C	91
Figure.V.18 Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation lente de l'ensoleillement de 600 à 1000 W/m^2 en 120 secondes avec une température constante de 25°C	92

Figure V.19	Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une diminution lente de l'ensoleillement de 1000 à 650 W/m ² en 100 secondes avec une température constante de 25°C.....	93
Figure V.20	Courbe de la caractéristique P-V des contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une diminution lente de l'ensoleillement de 1000W/m ² à de 650W/m ² sous une température de 25°C durant un temps de 100s.....	93
Figure.V.21	Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation rapide de la température de 30°C à 60°C en 2 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m ²	94
Figure V.22	Courbe de la caractéristique P-V des contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une augmentation rapide de la température de 30°C à 60°C en 2s avec un ensoleillement de 1000W/m ²	95
Figure.V.23	Variation de la puissance du module, et de la commande D pour une diminution rapide de la température de 25°C à 10°C durant 5s sous un ensoleillement de 1000W/m ²	95
Figure.V.24	Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation lente de la température de 30°C à 50°C en 120 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m ²	96
Figure V.25	Courbe de la caractéristique P-V des contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une diminution lente de la température de 60°C à 20°C en 122s avec un ensoleillement de 1000W/m ²	97

Abréviations

MPPT :	Maximum Power Point Tracking.
MPP :	Maximum Power Point.
PPM :	Point de Puissance Maximale.
PV :	Photovoltaïque.
Eph :	Energie Photovoltaïque.
GPV :	Générateur Photovoltaïque.
Eg :	Energie de gap.
BC :	Bande de conduction.
BV :	Bande de valence.
FF :	Facteur de remplissage (Fill Factor).
STC :	Standard Conditions.
PWM :	Pulse Width Modulation.
P&O:	Perturbation Observation.
IncCond :	Incrémentation de Conductance.
AGs :	Algorithmes Génétiques.
CLF :	Contrôleur Logic Flou.
IA :	Intelligence Artificielle.
OEP :	Optimisation par Essaim Particulaire .
PSO :	Particle Swarm Optimization.
PSOF :	Floue optimisé par l'algorithme PSO.
AGF :	Floue optimisé par l'algorithme AG.

Les autres abréviations sont explicitées dans le texte.

Introduction Générale

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, des années 60 à nos jours celle-ci a triplé. Actuellement, les principales sources d'énergie proviennent des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Cependant, depuis les crises successives du pétrole des années 70, le problème de conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'elles engendrent [1].

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément aux sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages [1]:

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien.
- Elle fournit de l'électricité grâce à l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle ne nécessite aucun combustible.
- Elle est silencieuse, non polluante et respectueuse de l'environnement.
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

c'est les raisons pour lesquelles elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Elle est en train de s'imposer comme une valeur sûre dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique effectuée par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce dernier, a pour rôle de produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale (PPM) laquelle dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, le point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente [2], [3].

A cet effet, Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes de poursuite permettant de faire un contrôle fiable du point de puissance maximale. Plusieurs méthodes (allant de la plus simple et classique: l'adaptation manuelle de la charge au générateur photovoltaïque

jusqu'aux méthodes plus complexes: P&O, incrémentation de conductance ...), démontré par plusieurs travaux: [4], [5], [6], [7] ont déjà été utilisées pour déterminer cet point.

Dans ce travail nous proposons d'étudier et de simuler des commandes MPPT intelligentes (floue, floue optimisé par essaim particulière, floue optimisé par les Algorithmes génétiques).

Ce mémoire est présenté comme suit :

Après une introduction générale

Le chapitre I présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques et leurs composants. Il donne également une étude sur les modèles mathématiques du GPV et de la batterie et des convertisseurs DC-DC.

Dans le chapitre II, nous rappellerons les principales techniques de poursuite MPPT conventionnelles.

Le chapitre III introduit les concepts fondamentaux de la logique floue, les essaims particuliers et les algorithmes génétiques.

Le chapitre IV est dédié à la synthèse des lois de commande MPPT intelligentes.

Le chapitre V présente les résultats de simulation de notre travail et une étude comparative entre les techniques (P&O, floue, floue optimisé par essaim particulière, floue optimisé par les Algorithmes génétiques).

Le mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre I:

Généralités Sur Les Systèmes

Photovoltaïques

I.1 Introduction

Depuis la nuit des temps, l'être humain a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface de la terre malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère. Cette énergie est de l'ordre de 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et atteint 1400 W/m^2 dans les zones où l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou chargée d'eau.

Sachant que le l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, et de l'inclinaison de la surface terrestre.
- L'altitude, la latitude et du degré de pollution du lieu de collecte.
- La période de l'année, ainsi que de l'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Il existe donc des zones beaucoup plus ensoleillées dans le monde que d'autres. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique.

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné, localisé par une tension et un courant connu, appelé en anglais Maximum Power Point (MPP).

Le problème est que la position de ce point n'est pas fixe mais se déplace en fonction de l'ensoleillement et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Le but de ce chapitre est de montrer la manière de simuler le générateur photovoltaïque dans son ensemble.

I.2 Historique du solaire photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [8],[9].

L'histoire du PV remonte en 1839, lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvrait le principe photovoltaïque .

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

1923 : Albert Einstein, le premier, a pu expliquer le principe du photovoltaïque.

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

1958 : Une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des piles PV fut lancée.

1973 : La première maison alimentée par une installation photovoltaïque est construite à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique.

1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Kilomètres en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne. Et se généralisent depuis 2001.

I.3 Effet photovoltaïque

Pour la compréhension des travaux que nous avons menés dans cet axe, nous rappelons brièvement les différents phénomènes physiques mis en jeu dans la conversion photovoltaïque ainsi que les principales relations les caractérisant.

I.3.1 Rappel sur l'énergie solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle même, à la relation suivante [10], [11]:

$$E_{ph} = h \frac{C}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck ($h \approx 6,62606957 \times 10^{-34}$ j.s) et C la vitesse de la lumière.

D'après la relation (I.1), cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'ondes sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre telle quelle le montre la figure (I.1).

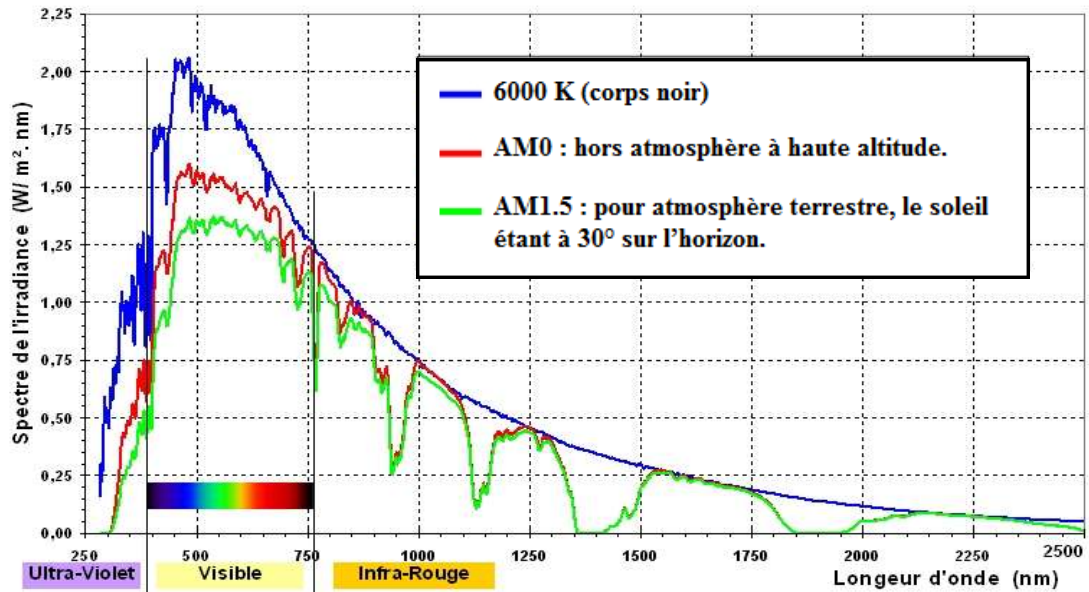


Figure I.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire.

Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [12].

Nous observons de la figure que les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre ultraviolet et infrarouge avec un maximum d'énergie pour $0,5 \mu m$. La figure montre aussi que 97,5% de cette énergie est comprise entre $0,2 \mu m$ et $2,5 \mu m$, et principalement, entre $0,4 \mu m$ et $0,78 \mu m$ qui correspond au visible. Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaires devront donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons.

I.3.2 Principe de l'effet photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui permet de capter l'énergie des photons composant la lumière. Dans un matériau conducteur, la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC) se confondent, ce qui fait que les électrons peuvent circuler facilement dans le réseau cristallin. Dans un matériau isolant, au contraire, la bande de valence et la bande de conduction sont séparées par ce qu'on appelle la bande interdite. Il faut beaucoup d'énergie aux électrons pour qu'ils puissent passer dans la bande de conduction, de l'ordre d'une dizaine d'électronvolts (ou eV). Dans un semi-conducteur, la largeur de la bande interdite est plus faible, de l'ordre de 0.5 à 2 eV [13].

Donc pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). Cette énergie de transition d'une bande à l'autre est l'énergie de gap noté E_g (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur. Elle est de 1,12 eV pour le silicium cristallin, et de 1,7 eV pour le silicium amorphe [11], [12].

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) de ces atomes se libèrent et passent de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui en contre partie, crée un trou dans la bande de valence (charges P) [14].

I.4 Cellule solaire

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Elle est basée sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [2].

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est-à-dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence on peut donc utiliser des éléments de la colonne 15, par exemple le Phosphore (P). Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N [11].

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore (B) ou d'un autre élément de la colonne 13. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons inférieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P [11].

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques lorsque elle est exposée à la lumière .

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure et l'autre au niveau de la couche inférieure : une différence de potentiel et un courant électrique sont créés.

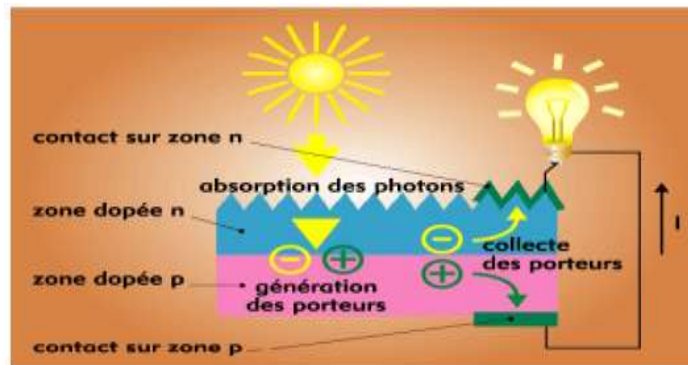


Figure I.2. Description d'une cellule photovoltaïque.

I.4.1 Différents types des cellules solaires

Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, il offre de nombreux avantages, Présent en abondance dans la croûte terrestre (20%), c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N) [15], [16].

Il existe différents types de cellules solaires, chaque type est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propres. Actuellement, il existe trois principaux types [11]:

❖ Cellules monocristallines

C'est la première génération des photopiles, elle s'approche le plus du modèle théorique. Ces cellules sont effectivement composée de nombreux cristaux purs de silicium spécialement produits à cet effet d'une taille d'environ de 10cm, ces cristaux sont ensuite scies en plaques ultrafines, dopées est connectées.

Ces cellules permettent d'obtenir des rendement élevés, de l'ordre de 12 à 18% et jusqu'à 24.7 % en laboratoire. Mais souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse difficile et donc très chère (fabrication compliquée).
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.



Figure I.3. Cellule photovoltaïque monocristalline.

❖ Cellules polycristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles sont caractérisées par :

- Cout de production moins élevé.
- Nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

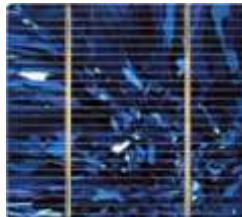


Figure I.4. Cellule photovoltaïque polycristalline.

❖ Cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée et non cristallisée, le cout de production de ces cellules est bien plus bas car la processus de fabrication est simple. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin (Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % au laboratoire) et nécessite donc plus de surface pour la même puissance.

Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).



Figure I.5. Cellule photovoltaïque amorphe.

I.4.2 Modèle équivalent d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (Figure (I.6)) [17], [18]. Nous pouvons considérer le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèle. La source de courant I_{ph} modélise le courant photogénéré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement la diffusion des porteurs (d_1), et la génération-recombinaison des porteurs (d_2).

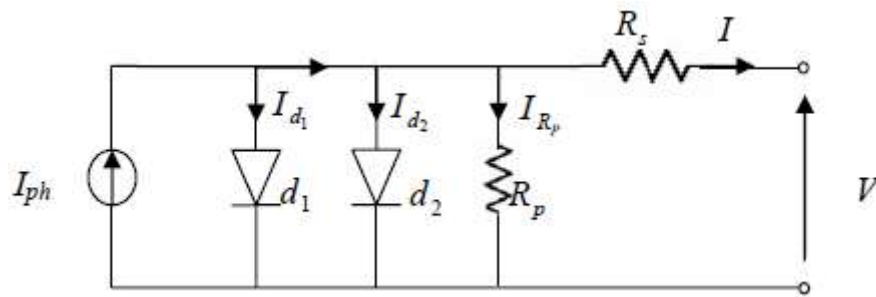


Figure I.6. Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- une résistance série R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- une résistance parallèle R_p , qui modélisant les courants de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée .

D'après la figure (I.6) le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donnée par [10], [19]:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IRs)}{KTn1}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IRs)}{KTn2}} - 1 \right] - \frac{V + IRs}{Rp} \quad (I.2)$$

Ou : I et V sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : le courant photovoltaïque généré par la cellule.

I_{s1} et I_{s2} sont les courants de saturation des diodes.

R_s et R_p sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle.

n_1 et n_2 les facteurs d'idéalité de diode.

T est la température de la cellule en Kelvin.

q est la charge de l'électron $q = 1.6021 \cdot 10^{-19} C$.

K : la constante de Boltzmann $K = 1.3854 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$.

Le photo-courant $I_{ph\max}$ est atteint à une insolation maximum, souvent on a ($I_{ph} = I_{ph\max} \cdot S \cdot 10^{-3}$) avec S : Insolation.

Il est évident de l'équation (I.2), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph} et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par [10]:

$$I_{ph}(T) = I_{ph(T=298K)} \left[1 + (T - 298.K) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (I.3)$$

$$I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (I.4)$$

$$I_{s2} = K_2 T^2 e^{-\frac{5}{2} \frac{E_g}{KT}} \quad (I.5)$$

Où E_g c'est l'énergie de gap du semi-conducteur et :

$$K_1 = 1,2 A/cm^2 \cdot K^3 \quad (I.6)$$

$$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 A/cm^2 \cdot K^{5/2} \quad (I.7)$$

I.4.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire

- **Courant de court-circuit I_{cc}**

C'est le courant maximal généré par la cellule; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit ($V=0$), dans ce cas on peut écrire $I_{ph} \approx I_{CC}$ du fait que $R_s \ll R_p$.

- **Tension à circuit ouvert V_{oc}**

C'est la tension obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, elle constitue la tension maximale qui peut être obtenue d'une cellule; elle se situe autour de 0.6 V pour la cellule en silicium.

- **Point de puissance maximale PPM**

C'est le point de fonctionnement (V_{mp}, I_{mp}) où la cellule solaire génère sa puissance maximale, Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie. La figure (I.7) montre les courbes typiques $I-V$, et $P-V$ pour un module PV.

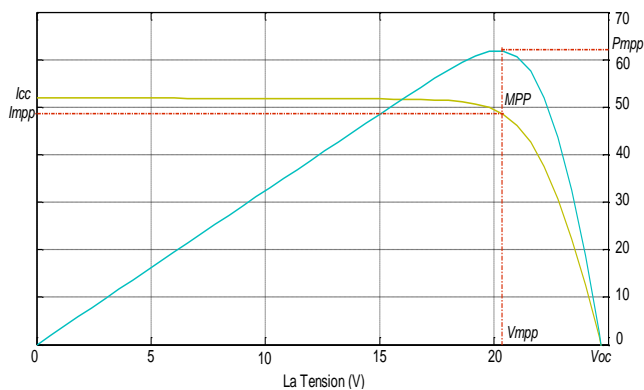


Figure.I.7 Caractéristiques $I-V$, $P-V$, d'un module PV (MPP).

- **Facteur de remplissage FF**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule par rapport à une cellule idéale ($FF = 1$), c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.8)$$

- **Rendement d'une cellule photovoltaïque**

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{cc} \cdot FF}{E \cdot S} \quad (I.9)$$

Où P_{in} est la puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sous forme de photons (E) sur la cellule PV par unité de surface (S).

I.4.4 Influence des paramètres sur la caractéristique de la cellule

Pour confronter un peu plus notre modèle à la réalité, il est nécessaire d'étudier comment certains paramètres vont influencer les caractéristiques I-V, P-V . Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont :

- Des paramètres externes tels que le flux solaire et la température T .
- Des paramètres internes tels que la résistance série R_s , la résistance shunt R_p .

❖ Influence des paramètres externes

En traçant les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour différents ensoleillements à température constante, et pour différentes températures à ensoleillement constant, on constate bien que les caractéristiques du capteur solaire dépendent fortement de l'ensoleillement et de la température [12], [10].

Pour différents ensoleillements à température constante, le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire S . Par contre, la tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{mpp}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (voir figure (I.8))

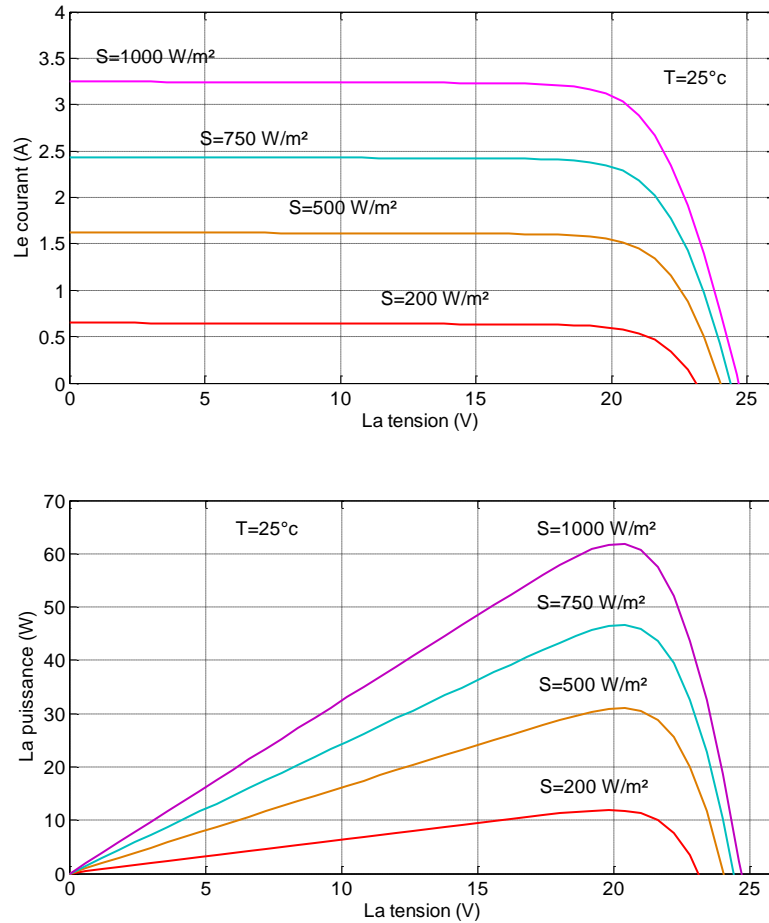


Figure I.8 Influence de l'ensoleillement sur les courbes I-V et P-V.

Pour une température qui change à ensoleillement constant, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier augmente très légèrement. La température a donc une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (voir figure (I.9)).

On peut remarquer aussi sur la figure (I.9) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°).

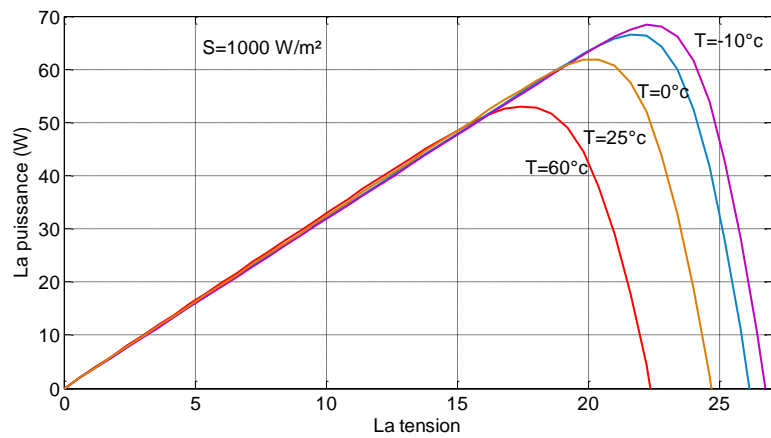
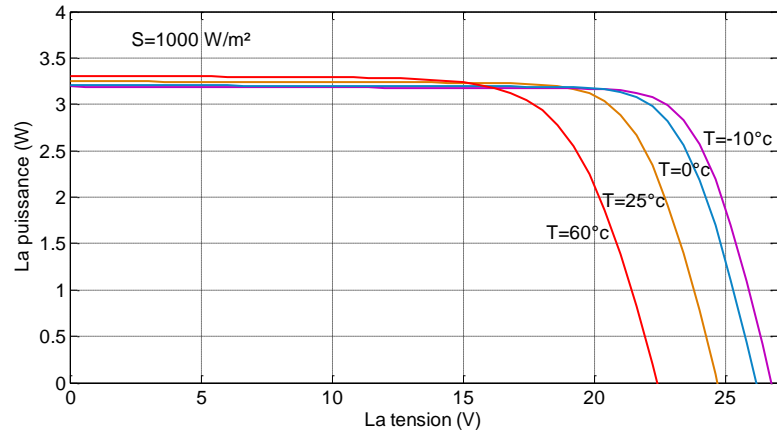


Figure I.9 Influence de la température sur les courbes I-V et P-V.

❖ Influence des paramètres internes

En traçant les courbes $I = f(V)$ pour différentes valeurs de résistance série et shunt, on constate bien que les caractéristiques du capteur solaire dépendent fortement de ces valeurs.

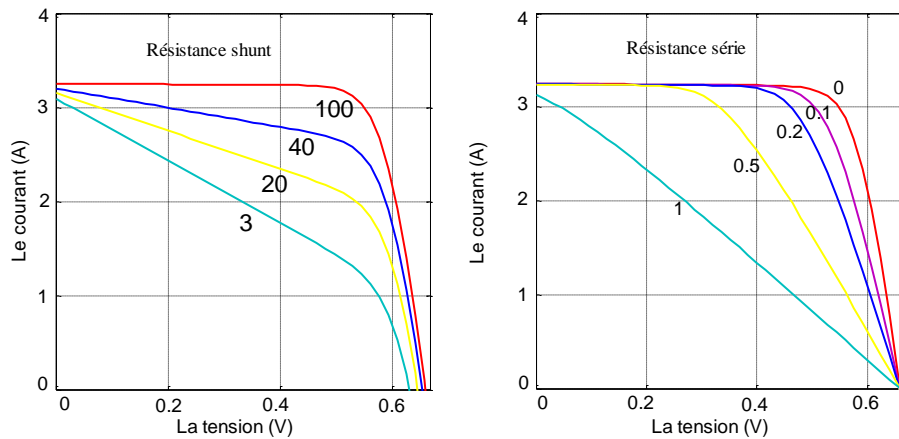


Figure I.10 Effet de résistance sur la caractéristique I-V.

La figure (I.10) montre bien l'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire. Celle-ci se traduit par une diminution de la pente de cette caractéristique, elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit.

La résistance parallèle R_p caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau semi conducteur et de l'épaisseur des régions Net P. Ainsi que l'existence de fissures devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle, leur influence sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (I.10).

I.4.5 Association des cellules photovoltaïques

Dans des conditions standard (STC), la cellule ne produit qu'une très faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance compatible avec le besoin, les cellules sont assemblées en série et/ou en parallèle.

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension pour un même courant, donc la caractéristique résultant du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule à courant donné [11]. La figure (I.11.A) montre la caractéristique résultante obtenue d'une association série de N_s cellules.

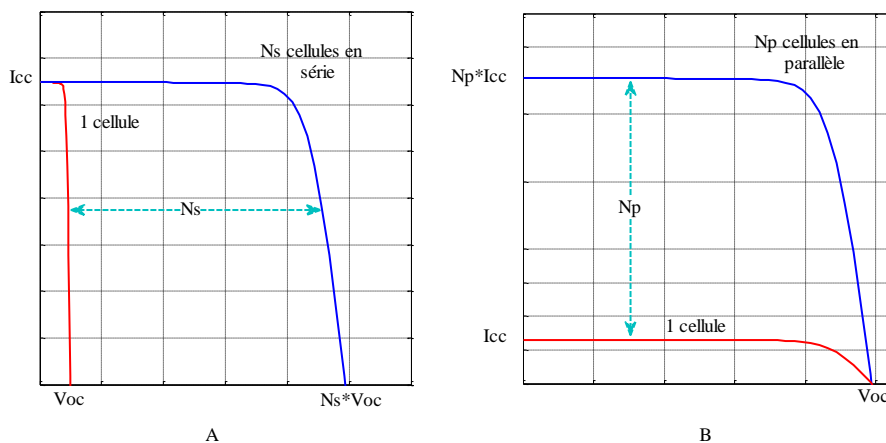


Figure I.11 Caractéristique résultante d'un groupement de cellules identiques.

Une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant est obtenue par addition des

courants à tension donnée [11]. La figure (I.11.B) montre la caractéristique résultante obtenue d'une association parallèle de N_p cellules.

Une association hybride de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). La figure (I-12) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p , cellules identiques.

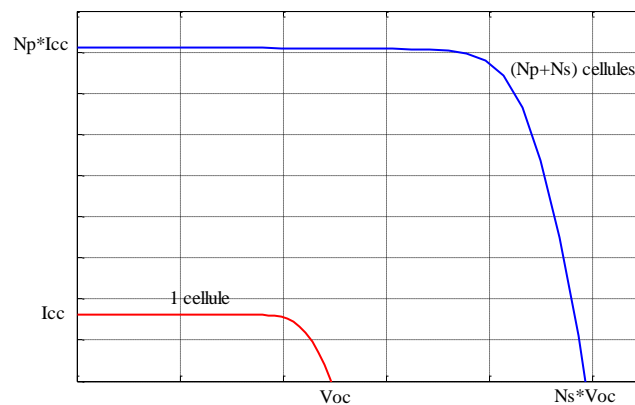


Figure I.12 Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (N_p+N_s) cellules identiques.

I.5 Générateur photovoltaïque (GPV)

La cellule, unité de base d'un système PV, ne produit qu'une très faible puissance électrique. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série pour former un module. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique.

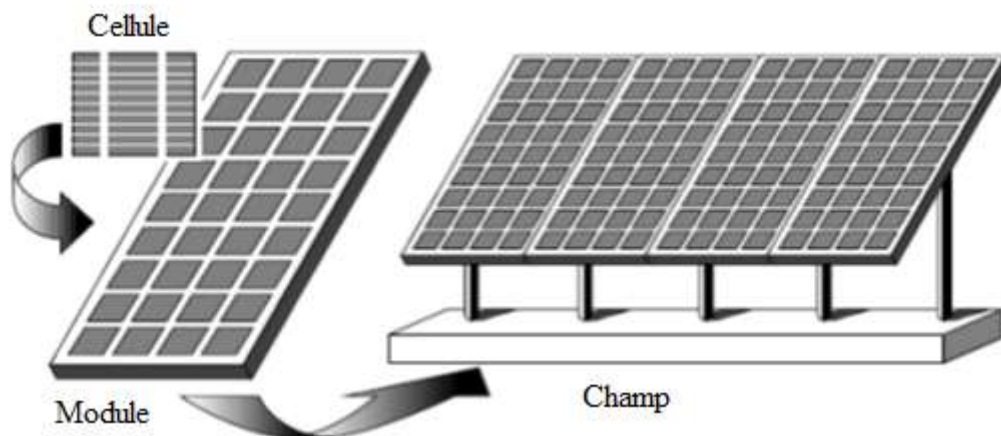


Figure I.13 Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque.

I.5.1 Modèle mathématique d'un GPV

La considération du modèle de circuit équivalent (figure (I.6)) mène à l'équation (I.10) pour un groupement mixte formé à partir d'un nombre N_s module en série et N_p module en parallèle [20].

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_{s1} \left[e^{\frac{q(V + \frac{I R_s N_s}{N_p})}{K T n_1 \cdot N_s}} - 1 \right] - N_p \cdot I_{s2} \left[e^{\frac{q(V + \frac{I R_s N_s}{N_p})}{K T n_2 \cdot N_s}} - 1 \right] - \frac{V + \frac{I R_s N_s}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}} \quad (I.10)$$

I.5.2 Protection d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique $I(V)$ d'un GPV peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de $N_s \cdot N_p$ cellules [11]. Elle varie en fonction de l'éclairement, la température, le vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement.

Il faut veiller avec soin à disposer des caractéristiques électriques équivalentes, c'est-à-dire toutes les cellules couplées en parallèle devraient avoir la même tension en circuit ouvert, et la même tension en point de puissance maximale. Pour les cellules couplées en série elles devraient avoir le même courant de court-circuit et le même courant pour le point de puissance maximale. Si ces conditions ne sont pas vérifiées les photopiles de grande puissance vont débiter dans celles de faible puissance, le panneau sera alors dégradé.

En conséquence, les performances du panneau solaire sont limitées par les photopiles dont les caractéristiques sont les plus faibles. La puissance de sortie est réduite par un accroissement de la température du panneau dû à la dissipation interne de la puissance qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène dit de hot spot ou « point chaud » [11], [21], [22].

Lorsqu'une partie du panneau est ombrée ou mal ensoleillée il apparaît un problème, car les cellules ombrées deviennent consommatrices de puissance, ce qui cause des pertes d'énergie. Pour remédier à ce phénomène, on équipe les panneaux photovoltaïques par des diodes appelées "*Bypass diode*" qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives (Figure (I.14. a)). La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite

une partie du panneau comme indiqué en (Figure (I.14.b)), évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses.

Donc la dégradation d'une seule cellule condamne le groupe de cellules associé à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protections [2].

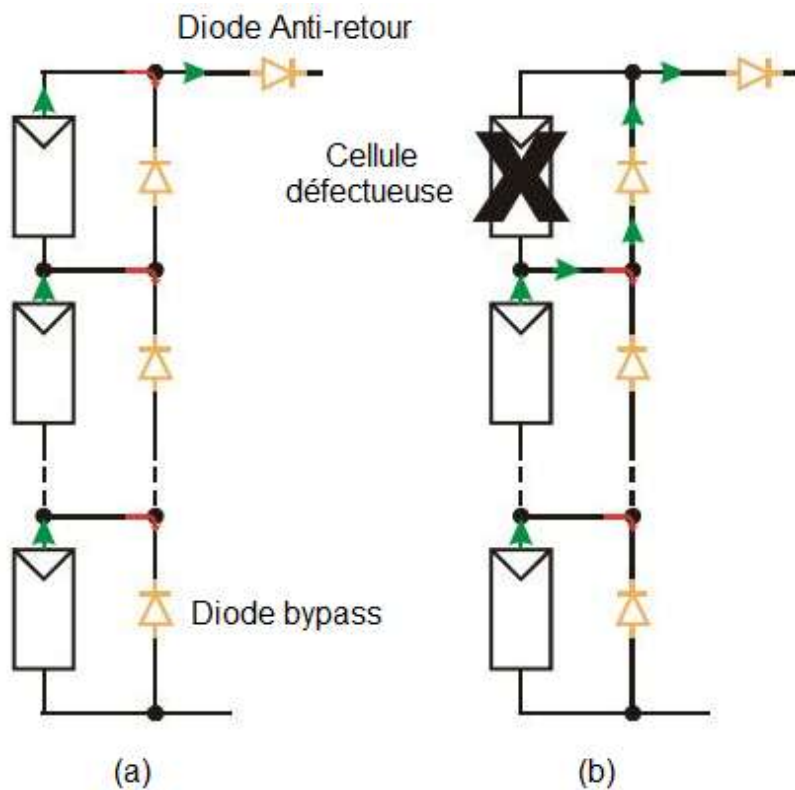


Figure I.14 : (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protections.(b) Défaillance d'une des cellules du module PV et l'activation de la diode bypass.

Une autre protection consiste à protéger le module photovoltaïque par la mise en série d'une diode antiretour entre chaque branche d'un GPV contre les courants négatifs qui traverse le module pendant la nuit ou une journée sans soleil, et qui pourraient être générés lors de différentes connexions en parallèle de plusieurs panneaux.

Cet écoulement de courant peut être provoqué par une autre source d'énergie dans le système tel que les batteries de stockage. Sans diodes antiretour, un courant inverse traversant le panneau à vide pourrait décharger les batteries (lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur) [2].

I.6 Connexion d'un générateur photovoltaïque (GPV)

I.6.1 Connexion directe source-charge

La connexion directe du panneau solaire à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très haut degré de fiabilité. La figure (I.15) montre ce cas de montage.

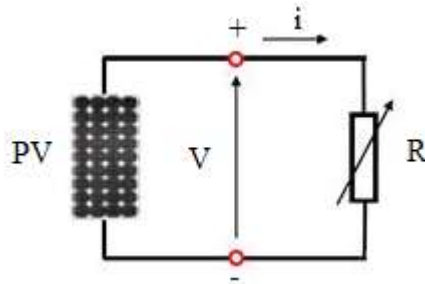


Figure I.15 Schéma électrique d'une liaison directe GPV-charge.

L'inconvénient de cette configuration est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la charge. Le transfert de P_{max} disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe alors n'est pas possible car le GPV fournit un courant continu. A travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe.

Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle.

I.6.2 Introduction d'un étage d'adaptation entre un GPV et une charge

Comme nous l'avons vu précédemment, un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximale PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe [2].

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique la plus usuelle consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (I.16) ci-dessous.

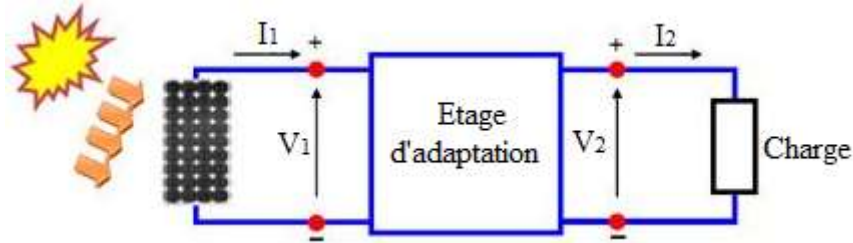


Figure I.16 Etage d'adaptation d'un générateur PV-charge.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible [23], [24].

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV à son point de puissance maximale PPM, des contrôleurs MPPT (de l'anglais Maximum Power Point Tracking) sont souvent utilisés pour effectuer une poursuite permanente du PPM, donc minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction des conditions climatiques [2], [3].

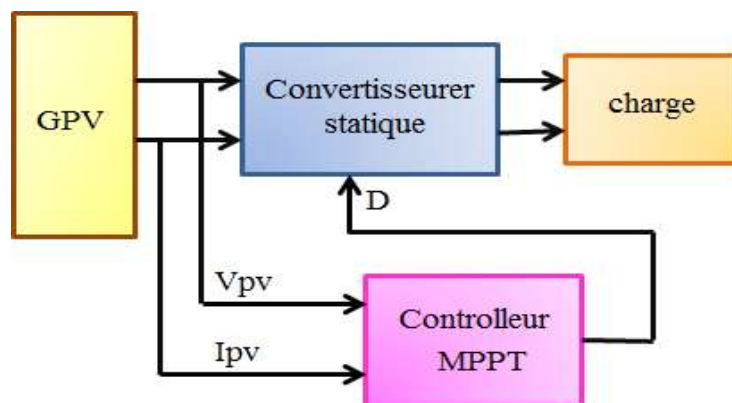


Figure.I.17 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec un convertisseur statique(CS) contrôlé par une commande MPPT sur une charge DC.

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une commande MPPT peut être représentée sur la figure (I.17) et dont le rôle est de faire varier le rapport cyclique du (CS) de telle sorte que la puissance fournie disponible aux bornes du GPV soit maximale.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM. Il est en général basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur dans l'objectif d'atteindre le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur (I et V).

I.7 Batteries

Le stockage de l'énergie produite se fera à l'aide 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 fournies par le fabricant.

Les deux types de batteries, utilisés le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques, sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb-acide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) [26], [27]. La batterie au plomb-acide est la plus connue, étant utilisée depuis plus de 150 ans pour fournir le courant de démarrage des voitures. Une modélisation du circuit électrique de la batterie plomb-acide qui a été proposée dans la littérature [18], est la suivante:

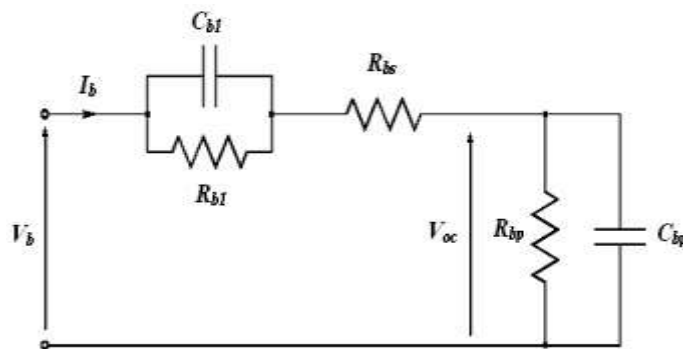


Figure.I.18 Modèle équivalent de la batterie au plomb-acide.

Une batterie est assimilée 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 $E_{C_{\max}}$.

$$\text{L'expression générale de l'énergie : } E_c = \frac{1}{2} C \cdot V_c^2 \quad (\text{I.11})$$

Où C étant la capacité et V_c la tension du condensateur.

$$E_b = E_{C_{\max}} - E_{C_{\min}} = \frac{1}{2} C \cdot V_{\max}^2 - \frac{1}{2} C \cdot V_{\min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{\max}^2 - V_{\min}^2) \quad (\text{I.12})$$

Où C_{bp} est la capacité électrochimique de la batterie.

L'énergie E_b est donnée par le constructeur de la batterie en kilowatt par heure (kWh).

Les tensions V_{\max} et V_{\min} sont respectivement la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert. La conversion de l'équation (I.12) mène finalement à une expression pour le condensateur représentant la capacité de la charge de la batterie.

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}. \quad (\text{I.13})$$

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.

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est la décharge spontanée, représentée par la résistance parallèle R_{bp} avec le condensateur principal C_{bp} .

Le circuit sur la figure (I.21) exprime l'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide par:

$$Z(s) = R_{bs} + (R_{b1} \parallel C_{b1}) + (R_{bp} \parallel C_{bp}) \quad (\text{I.14})$$

Donc:
$$Z(s) = R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1}C_{b1}s + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp}C_{bp}s + 1}$$

$$Z(s) = \frac{a_2.s^2 + a_1.s + a_0}{b_2.s^2 + b_1.s + b_0} \quad (\text{I.15})$$

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

$$\begin{aligned} a_2 &= R_{bs}b_2 \\ a_1 &= R_{bs}b_1 + R_{b1}R_{bp}(C_{bp} + C_{b1}) \\ a_0 &= R_{bs} + R_{b1} + R_{bp} \\ b_2 &= R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp} \\ b_1 &= R_{b1}C_{b1} + R_{bp}C_{bp} \\ b_0 &= 1 \end{aligned} \quad (\text{I.16})$$

C'est la forme finale du modèle mathématique de la batterie au plomb-acide qui sera employée dans les simulations de système.

I.8 Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé qui dans notre cas va nous permettre de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements [28]. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET fonctionnant en mode (bloqué/saturé).

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [10].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture égal à DT_s et un temps d'ouverture égal $(1-D)T_s$.

- T_s est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$.
- D est le rapport cyclique du commutateur ($D \in [0,1]$).

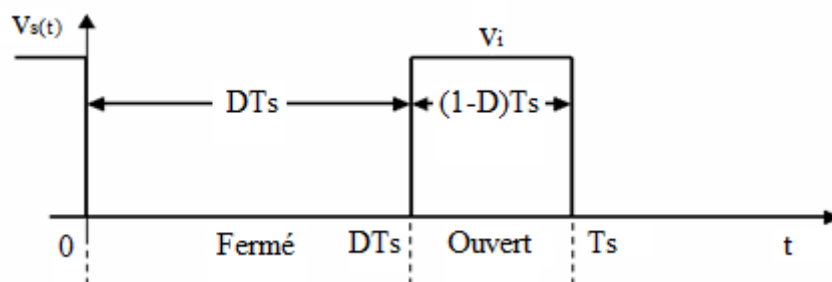


Figure.I.19 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue:

- Les élévateurs (Boost) dans lesquels $V_s > V_e$.
- Les abaisseurs (Buck) dans lesquels $V_s < V_e$.

Il y a aussi un type (Buck-Boost), mélange entre les deux précédents.

I.8.1 Convertisseur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur (figure (I.20)) peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. Ce dernier qui est un interrupteur ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse [10].

L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversions photovoltaïques est tout à fait adéquate, étant donné que le GPV est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie, a la nature d'une source de tension. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

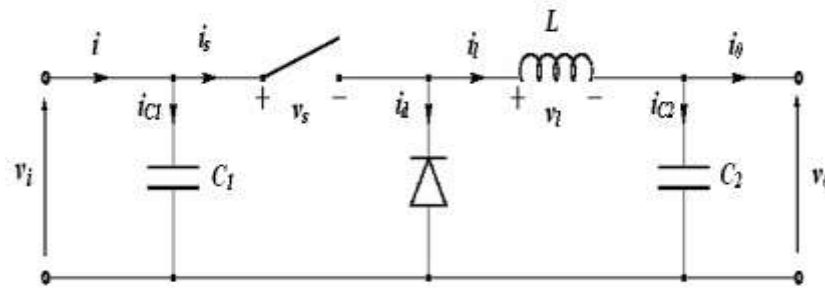


Figure.I.20 Circuit électrique d'un convertisseur Buck .

Quand le commutateur est fermé (figure (I.11)) (c.-à-d. $t \in [0, DT_S]$), la diode se bloque et un courant circulera dans la charge à travers l'inductance (figure (I.21)). Dès que le commutateur sera ouvert ($t \in [DT_S, T_S]$), la source et la charge ne sont plus en contact durant cette phase. La diode est passante et l'inductance maintiendra le courant dans la charge (figure (I.22)).

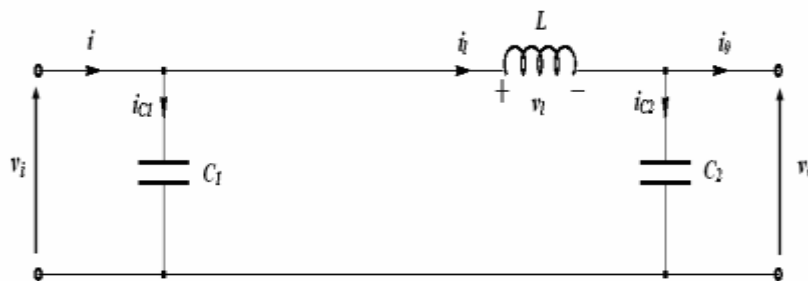


Figure.I.21 Circuit équivalent du convertisseur Buck quand ($t \in [0, DT_S]$), commutateur fermé.

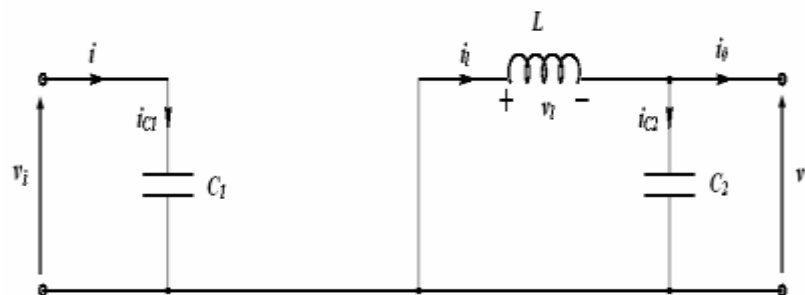


Figure.I.22 Circuit équivalent du convertisseur Buck quand ($t \in [DT_S, T_S]$), commutateur ouvert.

Quand le commutateur est fermé (figure (I.21)), $t \in [0, DT_s]$ les équations décrivant le fonctionnement du convertisseur sont:

$$\begin{aligned} i_{C1}(t) &= C_1 \cdot \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{C2}(t) &= C_2 \cdot \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) &= L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t), \end{aligned} \quad (I.17)$$

Quand le commutateur est ouvert $t \in [DT_s, T_s]$ (figure (I.22)), on a :

$$\begin{aligned} i_{C1}(t) &= C_1 \cdot \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{C2}(t) &= C_2 \cdot \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) &= L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} = -v_0(t), \end{aligned} \quad (I.18)$$

Modèle approximé du convertisseur Buck

Les systèmes d'équations de base (I.17) (I.18) représentent le convertisseur Buck pour une période DT_s et $(1-D)Ts$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques i_c , v_l est de forme linéaire [10].

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

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{Ts} = \frac{dx}{dt}_{(DT_s)} \cdot DT_s + \frac{dx}{dt}_{((1-D)Ts)} \cdot (1-D)Ts \quad (I.19)$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période Ts . Cette relation est valide si $\frac{dx}{dt}_{(DT_s)}$ et $\frac{dx}{dt}_{((1-D)Ts)}$ sont constants sur les périodes DT_s et $(1-D)Ts$ respectivement.

En appliquant la relation (I.19) sur les systèmes d'équations (I.17) et (I.18), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière.

$$\begin{aligned}
 C_1 \cdot \frac{dv_i}{dt} Ts &= DTs(i_i - i_l) + (1-D)Ts i_i \\
 C_2 \cdot \frac{dv_o}{dt} Ts &= DTs(i_l - i_o) + (1-D)Ts(i_l - i_o) \\
 L \cdot \frac{di_l}{dt} Ts &= DTs(v_i - v_o - R_l i_l) + (1-D)Ts(-v_o - R_l i_l)
 \end{aligned}
 \tag{I.20}$$

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

$$\begin{aligned}
 i_o &= i_l - C_2 \cdot \frac{dv_o}{dt} \\
 i_l &= \frac{1}{D} \left(i_i - C_1 \cdot \frac{dv_i}{dt} \right) \\
 v_i &= \frac{1}{D} \left(v_o + R_l i_l + L \cdot \frac{di_l}{dt} \right)
 \end{aligned}
 \tag{I.21}$$

I.8.2 Convertisseur survolteur (Boost)

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, est donné par la figure (I.23) [10].

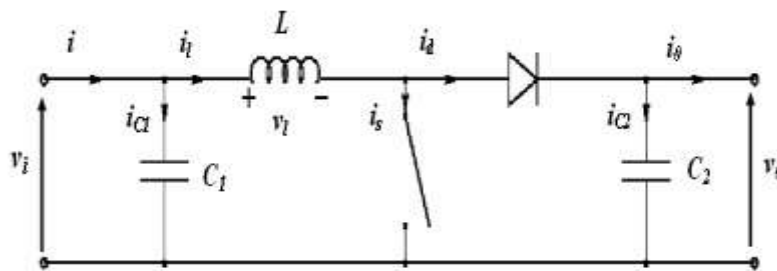


Figure.I.23 Circuit électrique d'un convertisseur Boost.

Pendant le temps DT_s , (figure (I.24)), le transistor est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, ce qui permet d'emmagasiner au fur et à mesure de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période.

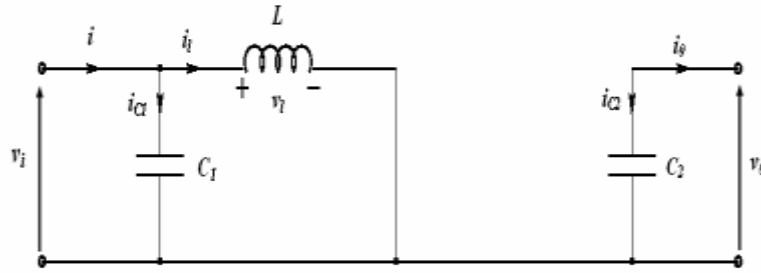


Figure.I.24 Circuit équivalent de Boost au temps de fermeture DT_s de commutateur.

Lorsque le transistor se bloque, l'inductance L s'oppose à la diminution du courant i_l et elle génère ainsi une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode. (figure(I.25)).

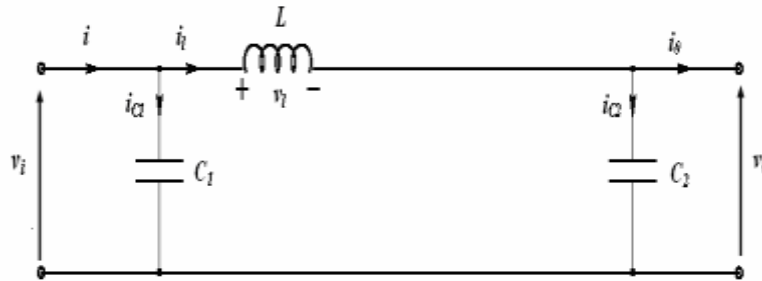


Figure.I.25 Circuit équivalent du Boost au temps d'ouverture $(1-D)T_s$ de commutateur.

Quand le commutateur est fermé (figure (I.24)) durant le temps $t \in [0, DT_s]$, on a les équations suivantes

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \cdot \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \cdot \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\
 v_l(t) &= L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t)
 \end{aligned} \tag{I.22}$$

Quand le commutateur est ouvert (figure (I.25)) durant le temps $t \in [DT_s, T_s]$. On a :

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \cdot \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \cdot \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\
 v_l(t) &= L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t)
 \end{aligned} \tag{I.23}$$

Modèle approximé du convertisseur Boost

Comme pour le Buck, en appliquant la relation (I.19) sur les systèmes d'équations (I.22) et (I.23), on trouve le modèle approximé du convertisseur Boost :

$$\begin{aligned}C_1 \cdot \frac{dv_i}{dt} Ts &= DTs(i_i - i_l) + (1 - D)Ts(i_i - i_l) \\C_2 \cdot \frac{dv_o}{dt} Ts &= -DTs i_o + (1 - D)Ts(i_l - i_o) \\L \cdot \frac{di_l}{dt} Ts &= DTs(v_i - R_l i_l) + (1 - D)Ts(v_i - v_o - R_l i_l)\end{aligned}\tag{I.24}$$

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

$$\begin{aligned}i_l &= i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \\i_o &= (1 - D)i_l - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\v_i &= (1 - D)v_o + R_l i_l + L \cdot \frac{di_l}{dt}\end{aligned}\tag{I.25}$$

I.9 Conclusion

Le générateur photovoltaïque est l'ensemble de modules photovoltaïques couplés aux éléments de contrôle.

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages:

- D'abord, une haute fiabilité (pas de pièces mobiles) qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Elles ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Tributaries des conditions météorologiques.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.

Chapitre II:

Méthodes Classiques Pour La Poursuite

Du Point De Puissance Maximale

II.1 Introduction

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et du faible rendement de dispositifs de conversion photons-électrons mis en oeuvre, le développement de cette énergie à grande échelle nécessite avant tout une amélioration de ces systèmes de telle sorte qu'ils puissent fonctionner, à tout instant, à leur puissance maximale.

Comme on l'a vu, l'énergie solaire PV provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique. En effet, les études autant que les simulations ont montré que cette conversion est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température et aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

Pour remédier à cette dernière influence, des lois de commandes spécifiques ont été conçues afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit la charge [29], [30], [31], [32]. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature 'Recherche du Point de Puissance Maximale'. Le principe de base, comme l'indique son nom, commun à toutes ces commandes est d'effectuer une recherche permanente du point de puissance maximale (PPM). Ainsi, la principale fonction effectuée par ces commandes est d'assurer, à tout instant, une parfaite adaptation entre le générateur PV et sa charge tout en assurant que le générateur fonctionne à son maximum.

II.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La poursuite du point de puissance maximale, de l'anglais "Maximum Power Point Tracker", (MPPT), cette dernière qui signifie maximisation de la puissance extraite, est un facteur primordial pour l'amélioration du rendement d'un système photovoltaïque.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible à ses bornes.

Avant d'aborder l'étude de la commande que nous allons utiliser, nous présenterons les différentes lois de commandes MPPT possibles étudiées dans la littérature. Pour effectuer la poursuite du point de puissance maximale, on peut appliquer l'une des méthodes suivantes:

- Méthodes à contre réaction de tension.
- Méthodes à contre réaction de courant.
- Méthodes à contre réaction de puissance.

II.2.1 Méthodes à contre réaction de tension

Ces méthodes reposent sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence [33],[34]. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable), on trouve trois types de cette méthode [10]:

II.2.1.1 Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie. Cette dernière correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points de puissances maximales relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année .

II.2.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de la tension en circuit ouvert (V_{OC})

pour un ensoleillement et une température donnés, la tension qui correspond à la puissance maximale du panneau est exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert du panneau [35].

On utilise dans cette méthode La relation linéaire qui existe entre la tension de fonctionnement V_{mp} et la tension en circuit ouvert V_{oc} de la forme : $V_{mp}=kV_{oc}$. La tension V_{oc} est prélevée régulièrement par le débranchement du panneau pour une courte durée pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité généralement égale à 0.77. En traçant la fonction $V_{mp} = f(V_{oc})$, on remarque que cette fonction est pratiquement linéaire, en exploitant cette propriété on peut traquer en permanence le PPM.

II.2.1.3 Méthode à tension de référence externe (cellule pilote)

La méthode précédente présente l'inconvénient des pertes causées par l'interruption du fonctionnement du circuit pour la mesure de V_{ref} . Pour éviter ces pertes, une cellule pilote est ajoutée au panneau solaire (C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée). La tension à circuit ouvert de cette cellule mesurée

continuellement permet de nous informer de la tension en circuit ouvert de l'ensemble des panneaux solaires, en multipliant cette tension avec le nombre de cellules en série.

Cette méthode évite l'interruption du système, mais le problème qui se pose, c'est qu'il est difficile de trouver un endroit idéal à la cellule pilote pour qu'elle donne une information parfaite de la tension V_{oc} de l'ensemble, pour différents ensoleillements et températures.

Cette méthode utilise un facteur fixe pour estimer la tension V_{mp} à partir de la tension V_{oc} , ce qui fait que le MPP n'est pas suivi correctement.

II.2.2 Méthodes à contre réaction de courant

Il existe une certaine analogie entre les méthodes à contre réaction de courant et celles de tension. Comme pour la méthode à tension de référence en fonction de V_{oc} , il y a une méthode basée sur le courant de court-circuit du panneau solaire. Ce courant permet de connaître la valeur du courant optimal à laquelle doit fonctionner le panneau solaire pour l'extraction du PPM. Le courant optimal est proportionnel au courant de court-circuit, cette proportionnalité nous permet de suivre le PPM.

Mais généralement la méthode à tension de référence fixe n'est pas applicable à cause de la grande déviation du courant optimal pour différents ensoleillements et températures.

L'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information de courant de court circuit de l'ensemble des panneaux est impossible par le fait que court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui va fausser l'information générée par cette cellule et emmenés sa destruction rapide [10].

II.2.3 Méthodes à contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itératifs, pour trouver le point de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi, pour un point donné on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau, on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans l'autre sens. C'est le principe général de poursuite par maximisation de puissance [8]. La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures du courant I , de la tension V du panneau et de la multiplication de ces deux grandeurs $P=V.I$. Le sens de variation de la puissance P est déduit par le calcul de manière approximative de la dérivé.

II.2.3.1 Méthode perturbation observation (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé [4], [5], [6]. Et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution du rapport cyclique d du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. La figure (II.2) donne l'organigramme de cet algorithme.

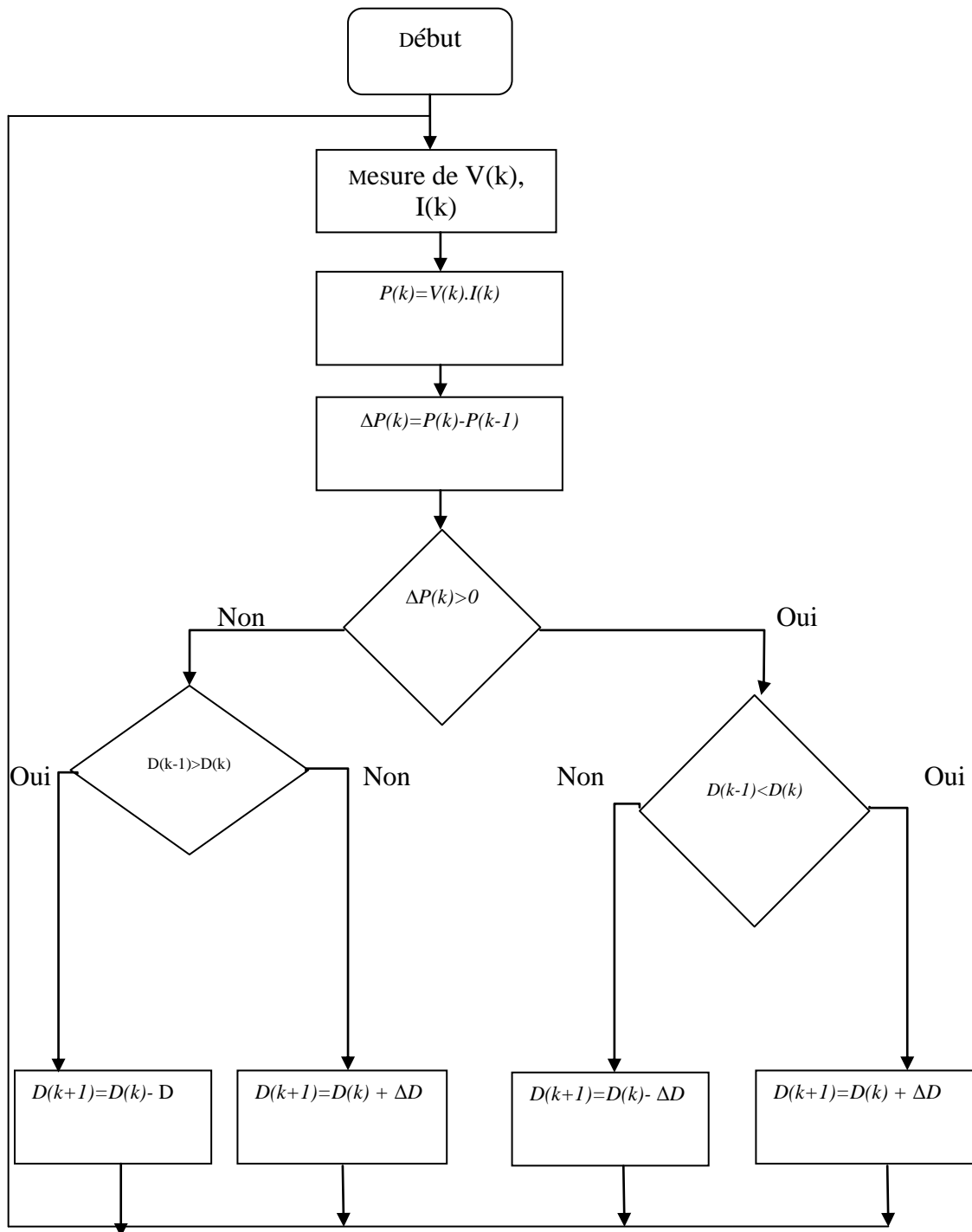


Figure II.2 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P &O) .

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmentée depuis la dernière mesure, l'incréméntation ou décrémentation du rapport cyclique d continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incréméntation ou la décrémentations du rapport cyclique d sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée dans chaque cycle.

Dés que le PPM sera atteint, V oscillera autour du point de fonctionnement idéal V_{mp} . Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation Δd .

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements brusques et rapides des conditions de fonctionnement mais occasionnera des pertes dans les conditions de variations lentes et dans les états stables.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions de variations lentes seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation.

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par [37], Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au point correct de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

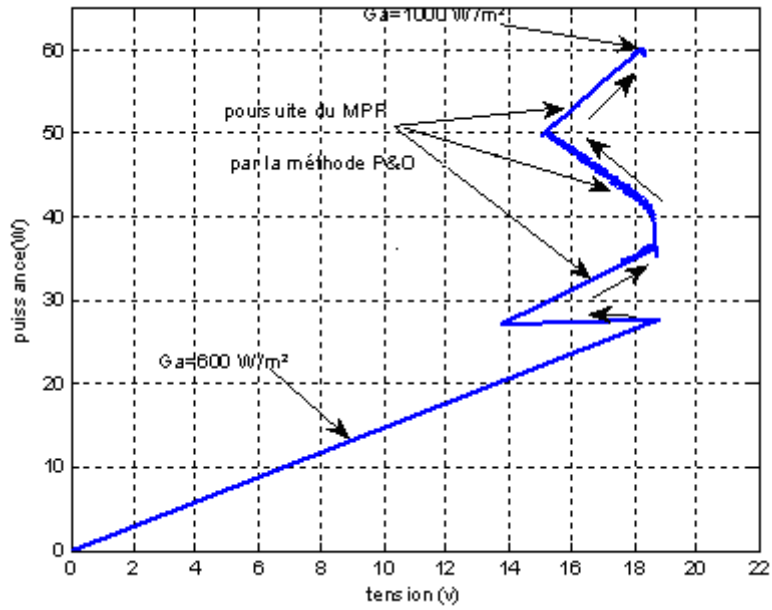


Figure II.3 Déviation du PPM avec l'algorithme de P&O sous un changement rapide d'ensoleillement G_a .

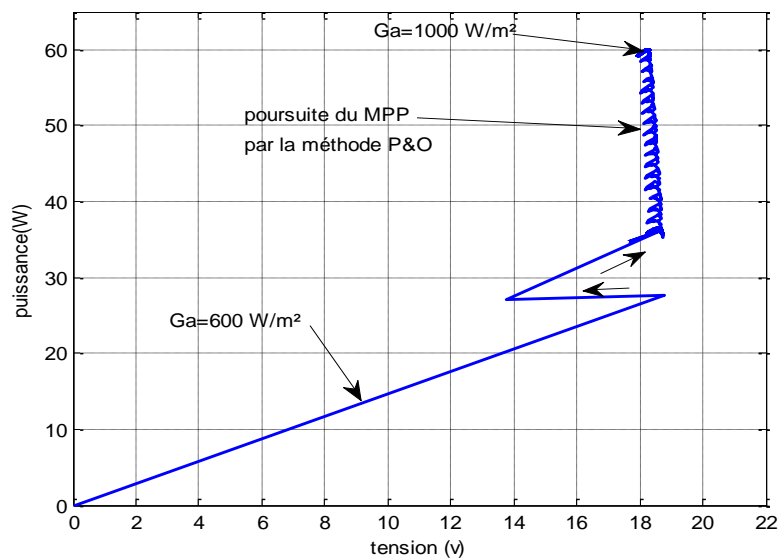


Figure II.4 Déviation du PPM avec l'algorithme de P&O sous un changement lent d'ensoleillement G_a .

Ces changements atmosphériques sont souvent produits dans les véhicules solaires par le passage dans l'ombre des végétations et des bâtiments ainsi que le changement de l'angle d'incidence pour des véhicules en mouvement.

II.2.3.2 Algorithme de l'incrémentation de Conductance

Dans cette méthode, la dérivée de la puissance de sortie du panneau est évaluée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V , de dV , du courant I et de dI . Cette dérivée s'annule au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite.

La puissance du panneau solaire est donnée par:

$$P=V.I \quad (\text{II.1})$$

La dérivée partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.2})$$

D'où:

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.3})$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{I}{V}$ et l'incrémentation de Conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$. Puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (II.3) montre que le point de puissance maximale est atteint quand la conductance de la source G est égale à l'incrémentation de Conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentation de Conductance ΔG et vice versa, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & \text{si } \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{si } \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{si } \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Lorsque le point de fonctionnement atteint le PPM, dV devient nulle, pour éviter ce problème et donc éviter une division par zéro, l'algorithme effectue un test de dV . Si dV est nul, il teste si $dI = 0$. Si c'est le cas, alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun

changement. Dans le cas contraire, l'algorithme teste le signe de dI pour déterminer la position du PPM et ajuste la tension de référence correspondante. La figure (II.5) donne l'organigramme de cet algorithme.

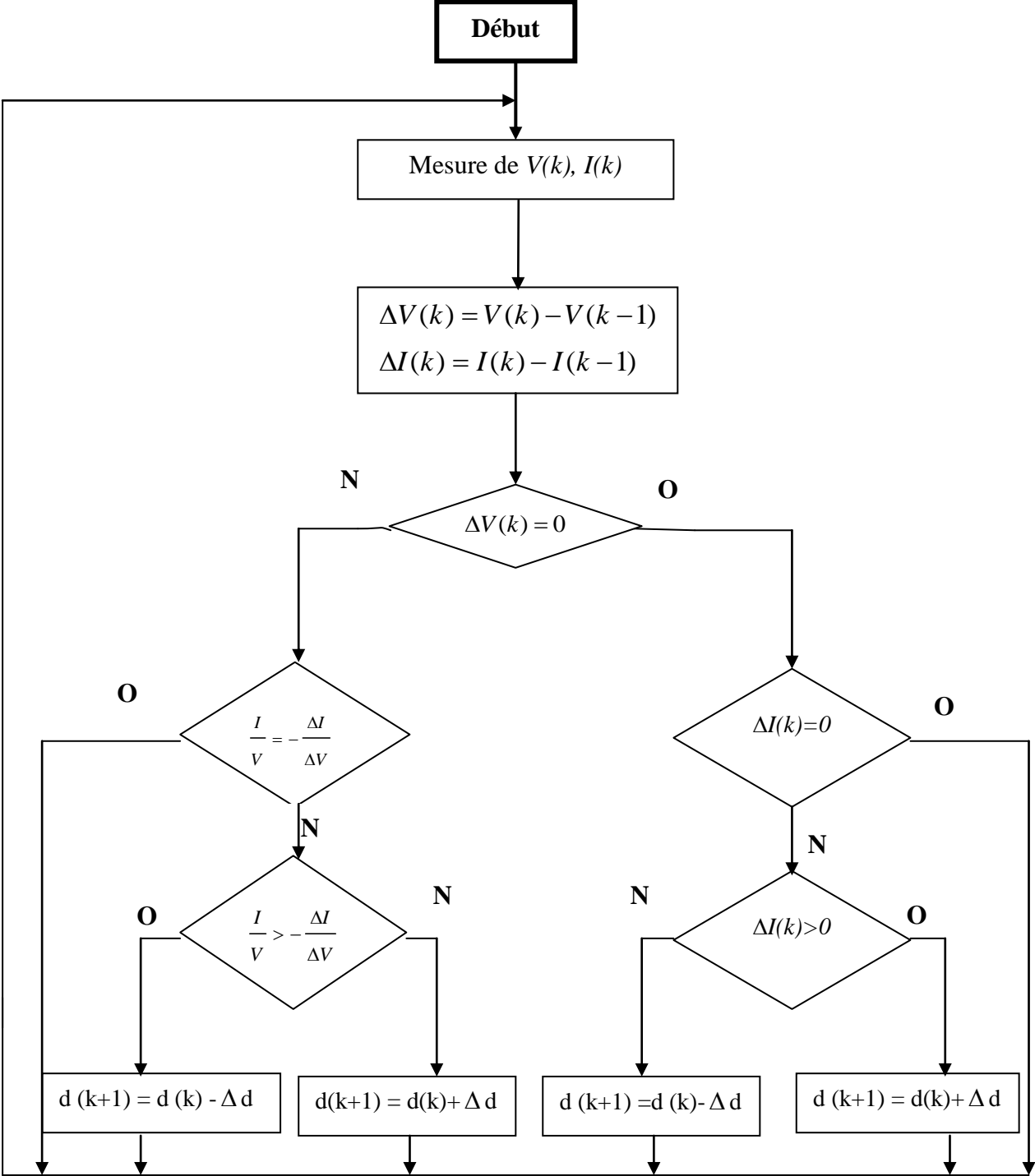


Figure II.5 Organigramme de l'algorithme " Incrémentation de Conductance " .

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du MPP, à cause du test $dI=0$. L'algorithme se stabilise une fois le MPP atteint et le signe de dI donne la vraie direction à emprunter pour la poursuite du MPP. Une fois que le système est stable, on aura une réponse rapide pour d'éventuelles conditions atmosphériques.

Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action constant, la condition $\frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV}$ est rarement vérifiée, ce qui conduit à des oscillations autour du MPP.

Il existe d'autres types d'algorithmes à contre réaction de puissance que nous n'allons pas aborder mais nous les citerons. Ces méthodes sont:

- Méthode de poursuite analogique.
- Méthode à oscillation forcée.

II.3 Conclusion

La commande MPPT permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de puissance, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation) la commande du convertisseur place le système au PPM (V_{opt}, I_{opt}).

Ce chapitre nous a permis d'analyser et d'examiner divers types de commandes MPPT existants dans la littérature, nous pouvons déduire de cette étude et d'après des travaux déjà faits que ces algorithmes de recherches utilisées entraînent souvent des lenteurs de convergence et donc de pertes d'énergie, une des causes qui amené a réaliser dans le cadre de cette thèse de nouvelles commandes MPPT présentant de meilleurs performances à celles connues sans apport de complexité ni de surcoût à des systèmes de conversion existants.

Chapitre III:

Techniques intelligentes Pour La
Poursuite Du Point De Puissance
Maximale

III.1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) a été conçue pour apporter des réponses à des problèmes complexes, qui peuvent avoir un grand nombre de solutions possibles. Cela est dû à la variété des méthodes utilisées pour la résolution de ce problème. La question qui se pose est la suivante : comment peut-on trouver le meilleur choix parmi toutes les solutions ?

Pour répondre à cette question, les chercheurs en IA ont proposé des méthodes ingénieuses qui permettent de trier parmi les solutions possibles, appelées les heuristiques, afin d'accélérer le processus de sélection de la meilleure solution.

Les techniques d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules) ont été développées à partir de la compréhension de phénomènes biologiques et naturels. Ils suivent souvent des lois stochastiques, ce qui les rend plus proches de la réalité, car la plus part des phénomènes physiques suivent le hasard.

III.2 Logique Floue

III.2.1 Introduction

De nos jours, la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques.

Les bases théoriques de la logique floue ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley en Californie [38]. Il a introduit la notion de sous ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux excepté par quelques experts.

Dès 1975, Mamdani et Assilian publient les premiers résultats permettant une exploitation de cette théorie dans des systèmes de réglage [39]. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, ils ont obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type PID.

Peu de temps après, en 1977, le danois Ostergaard [40] a appliqué la logique floue à la commande tubes broyeurs pour la fabrication de ciment. A cette époque, la plupart des études concernant les systèmes de régulation exploitant la logique floue ont été réalisées en Europe [41].

A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais [42] qui commencent à utiliser largement la logique floue dans des produits industriels et de consommation pour résoudre des problèmes de réglage et de commande.

III.2.1.1 Logique classique et logique floue

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est soit vraie, soit fausse (1 ou 0). Par exemple, la logique classique peut facilement partitionner la température d'une pièce en deux sous-ensembles, «moins de 15 degrés» et «15 degrés ou plus». La figure (III.1) 1a montre le résultat de cette partition. Toutes les températures de moins de 15 degrés sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur affecte une valeur de 1. Toutes les températures atteignant 15 degrés ou plus ne sont pas considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur attribue une valeur de 0.

Cependant, le raisonnement humain s'appuie fréquemment sur des connaissances ou des données inexactes, incertaines ou imprécises. Une personne placée dans une pièce dont la température est soit de 14.95 degrés soit de 15.05 degrés, ne fera certainement pas de distinction entre ces deux valeurs.

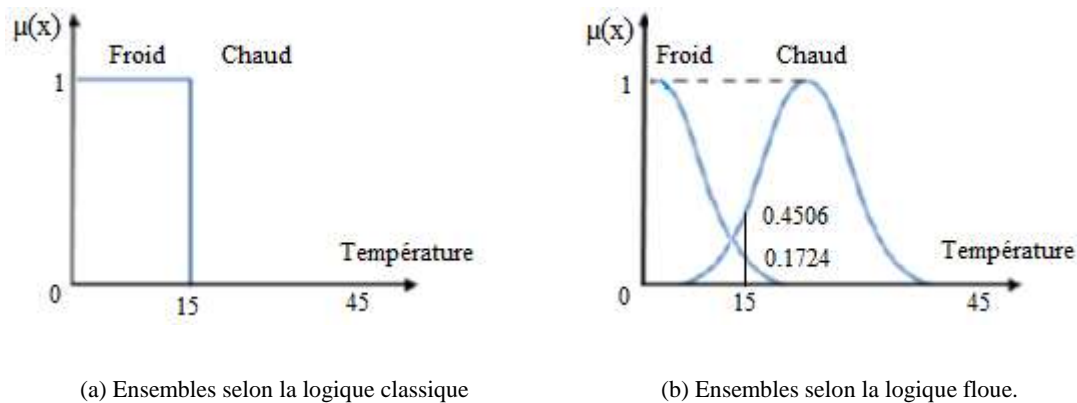


Figure III.1 : classification des températures d'une pièce en deux ensembles.

La logique floue permet de définir des sous-ensembles, comme «froid» ou «chaud», en introduisant la possibilité pour une valeur d'appartenir plus ou moins à chacun de ces sous ensembles.

III.2.1.2 Valeurs analogiques et logique floue

Lorsqu'on mesure une grandeur physique, on obtient une valeur qui peut ensuite être utilisée dans une série de calculs. Les grandeurs physiques sont en général continues et le résultat de la mesure est un nombre réel. Dans bon nombre de systèmes de régulation ou de commande, on utilise directement la valeur de la mesure en tant qu'entrée du contrôleur.

Pourtant, réaliser une mesure sans tenir compte de sa précision est indigne d'un bon physicien. Non seulement la mesure est imprécise (le plus souvent à cause de l'appareil de mesure), mais elle peut également être incertaine puisque aucun appareil de mesure n'est

parfaitement fiable : un capteur défectueux peut continuer à fournir une mesure erronée sans que le système de régulation en soit informé.

La logique floue permet de faire intervenir les notions d'imprécision et d'incertitude dans un système. Cela permet par exemple de faire intervenir une température « d'environ 15 degrés» dans un contrôleur flou. L'incertitude et l'imprécision peuvent être prises en compte dans le cadre de la logique floue quand on utilise une connaissance issue d'un expert humain.

III.2.2 Théorie des ensembles flous

III.2.2.1 Définition

Etant donné un ensemble de référence X qui peut être fini ou infini, dénoté par ses éléments $\{x\}$, on peut indiquer les éléments $\{x\}$ qui appartiennent à une certaine classe de X (on leur donne une valeur 1) et ceux qui n'y appartiennent pas (on leur donne une valeur 0). Cette classe est alors un sous-ensemble classique de X caractérisé par une fonction caractéristique X_A prenant simplement deux valeurs 0 ou 1 :

$$X_A : X \rightarrow \{0, 1\}$$

Si l'appartenance de certains éléments de X à une classe n'est pas absolue (l'élément appartient *un peu* au sous-ensemble), on peut remplacer la fonction caractéristique par une *fonction d'appartenance* qui prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Cette classe est appelée sous-ensemble flou de X . L'ensemble X sera également appelé *univers du discours*.

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$$

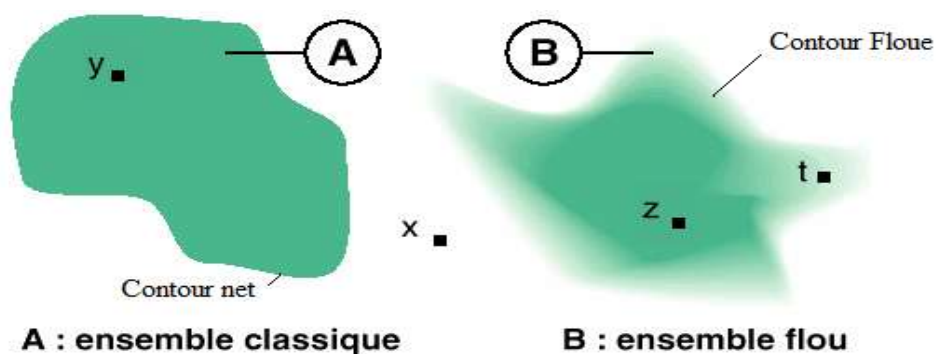


Figure III.2 Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

La figure ci-dessus nous permet de dire que:

- x n'appartient ni à A ni à B.
- y appartient totalement à A.
- z appartient totalement à B.
- t appartient partiellement à B.

III.2.2.2 Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notion de « fonction caractéristique » en logique classique. Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1.60 m et 1.80 m. La fonction caractéristique de l'ensemble donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1.60 m , 1.80 m] et « 1 » dans cet intervalle.

L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une fonction d'appartenance qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0,1]. A chaque taille possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble « tailles moyennes » compris entre 0 et 1. La figure (III.3) fait une comparaison entre une fonction caractéristique et une fonction d'appartenance.

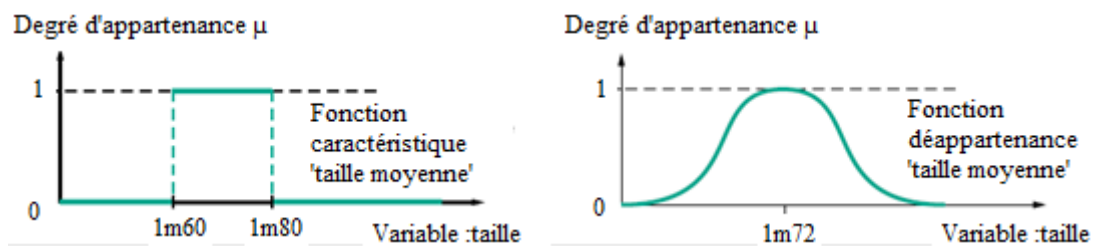


Figure III.3 Comparaison entre fonction caractéristique et fonction d'appartenance.

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance. La figure (III.4) montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1.75m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré $\mu=0.3$, et à « taille moyenne » avec un degré de $\mu=0.7$. En logique classique, le passage du moyen au grand serait brusque. Une personne de 1.80m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1.81m serait grande, ce qui choque l'intuition.

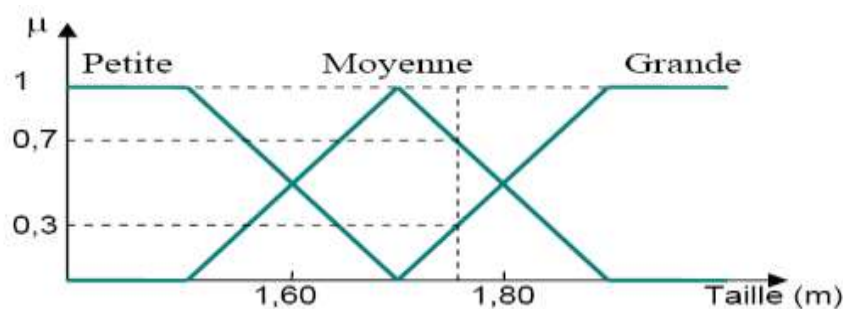


Figure.III.4 Fonctions d'appartenance de la variable Taille.

III.2.2.3 Opérateurs flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs, cependant, les plus répandus sont décrits ci-dessous:

- **Intersection**

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le "ET". Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B:

$$\mu (A \text{ ET } B) = \text{MIN} [\mu (A), \mu (B)]$$

Exemple:

« Température Basse » est vraie à 0.7; « Pression Faible » est vraie à 0.5.
« Température Basse ET Pression Faible » est donc vraie à $0.5 = \text{MIN} [0.7, 0.5]$.

- **Union**

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le "OU". Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B:

$$\mu (A \text{ OU } B) = \text{MAX} [\mu (A), \mu (B)]$$

Exemple:

« Température Basse » est vraie à 0.7; « Pression Faible » est vraie à 0.5.
« Température Basse OU Pression Faible » est donc vraie à $0.7 = \text{MAX} [0.7, 0.5]$.

- **Complément**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation.

$$\mu (\text{NON } A) = 1 - \mu (A)$$

Exemple:

« Température Basse » est vraie à 0.7.
« Température NON Basse » est donc vraie à 0.3.

III.2.2.4 Règles floues

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

Une règle est du type: SI « prédicat » ALORS « conclusion ».

Par exemple: « Si température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte ».

- **Prédicat**

Un prédicat (appelé prémisses ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON. Les propositions « température élevée » et « pression forte » de l'exemple précédent sont combinées par l'opérateur ET pour former le prédicat de la règle.

- **Inférence**

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani ». Il représente une simplification du mécanisme plus général. Seules les bases de règles « de Mamdani » sont utilisées dans ce qui suit.

- **Conclusion**

La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs ET. Dans l'exemple précédent, « ventilation forte » et « soupape grande ouverte » sont la conclusion de la règle.

Les bases de règles floues, sont définies par des fonctions d'appartenance sur les variables du système, et par des règles qui peuvent être écrites textuellement, où chaque règle fait appel à des entrées et des sorties. Beaucoup d'applications définissent des tableaux de règles. Dans cette optique, l'espace est quadrillé, et à chaque case correspond une règle. Cette approche a l'avantage d'être systématique, mais elle n'est applicable que pour deux entrées, alors que des bases de règles libres peuvent être avec un nombre important de variables.

III.2.2.5 Mécanisme d'inférence de Mamdani

Une base de règles floues de Mamdani comprend des règles linguistiques faisant appel à des fonctions d'appartenance pour décrire les concepts utilisés. Le mécanisme d'inférence comprend les étapes suivantes:

- **Fuzzification**

La fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles. La figure (III.5) illustre ceci par un exemple.

Exemple: Si « pression forte » ET « température élevée » ALORS « ouverture vanne grande ».

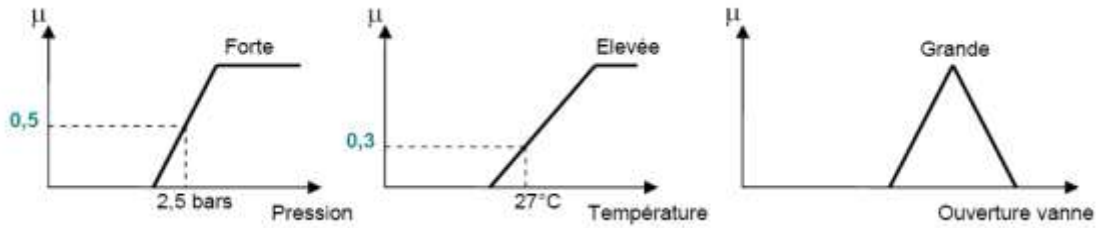


Figure.III.5 Fuzzification.

- **Degré d'activation**

Le degré d'activation d'une règle est l'évaluation du prédicat de chaque règle par combinaison logique des propositions du prédicat pour déterminer la conclusion de la règle. Le « ET » est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions.

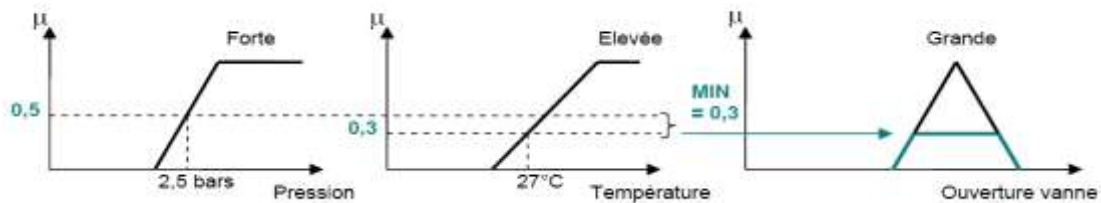


Figure.III.6 Degré d'activation.

- **Agrégation**

L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles concernant cette sortie. L'exemple suivant présente le cas où deux règles agissent sur une sortie. On considère que les règles sont liées par un « OU », et on calcule donc le maximum entre les fonctions d'appartenance résultantes pour chaque règle.

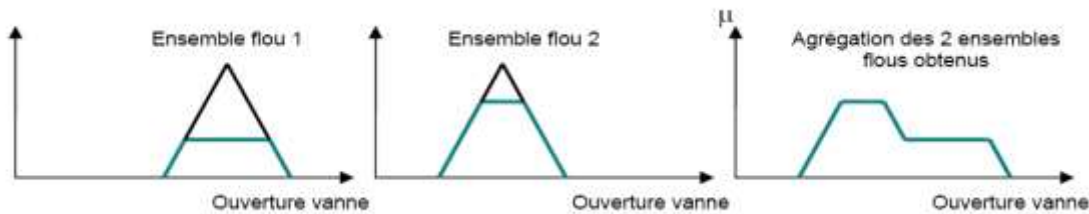


Figure.III.7 Agrégation.

- **Défuzzification**

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification. Pour réaliser cette opération il existe plusieurs méthodes, la plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou .figure (III.8).

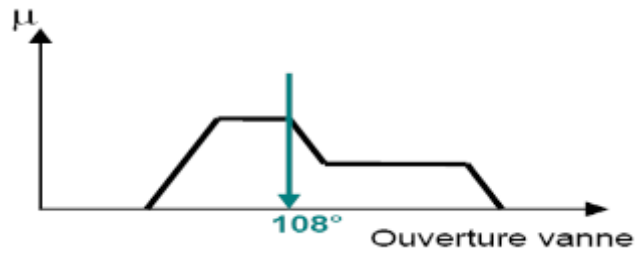


Figure.III.8 Défuzzification par centre de gravité.

La formule qui permet d'obtenir le centre de gravité à partir de l'ensemble flou de sortie est la suivante:

$$x = \frac{\int_a^b x\mu(x)dx}{\int_a^b \mu(x)dx} \quad (\text{III.1})$$

III.3 Optimisation par essaim particulaire

III.3.1 Introduction

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est une méthode d'optimisation stochastique qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème.

Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité et enseignant à l'Université Purdue à Indianapolis) et James Kennedy (socio-psychologue travaillant à Washington) en 1995. Elle s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. tout en y apportant leurs variations personnelles [43], [44].

En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller avec même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim. L'essaim particulaire correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage [45], [46].

III.3.2 Notion de voisinage

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lequel il a une communication directe. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou la topologie de l'essaim. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées [46], [47]:

- **Topologie en étoile** (figure III.9) : chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée *gbest* et communique avec les autres.

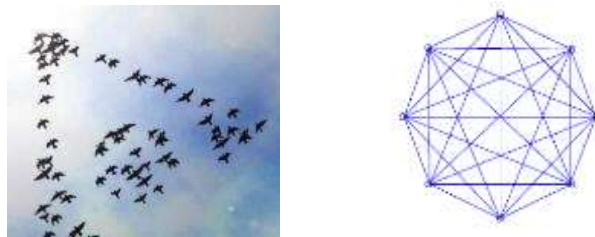


Figure III.9 Voisinage étoile.

- **Topologie en anneau** (figure III.10) : chaque particule communique avec n particules (en généra, $n = 3$) immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée *lbest*.



Figure III.10 Voisinage Anneau.

- **Topologie en rayon** (figure III.11) : une particule « centrale » est connectée à toutes les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres.

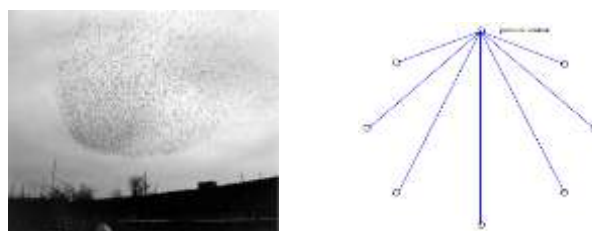


Figure III.11 Voisinage rayon.

III.3.3 Principe général

On dispose d'une fonction objectif à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de définition de la fonction objectif. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de définition afin de trouver la solution optimale. Une particule est caractérisée par plusieurs attributs :

Sa position actuelle : c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition et la valeur de la fonction objectif lui correspond.

Sa meilleure position : c'est la valeur obtenue par la particule et ses coordonnées.

Sa vitesse : cette donnée, recalculée à chaque itération de l'algorithme, permet de déduire la position suivante de la particule. Elle est fonction de la meilleure position de la particule depuis le début de la recherche, du voisin le mieux positionné à l'instant actuel et de la vitesse précédente de la particule.

Ses voisins : c'est un ensemble de particule qui influe sur ses déplacements, en particulier celui qui est le mieux positionné.

La figure (III.12) présente le principe de déplacement d'une particule dans l'espace de recherche à chaque itération et pour réaliser son prochain mouvement Chaque particule change sa position actuelle via l'intégration de trois vecteurs [49] :

- Suivre sa propre vitesse.
- Revenir vers sa meilleure performance.
- Aller vers la meilleure performance de ses informatrices.



Figure III.12 Principe de déplacement d'une particule.

III.3.4 Fonctionnement

L'organigramme du PSO est présenté selon la procédure illustrée par la figure (III.13) [46].

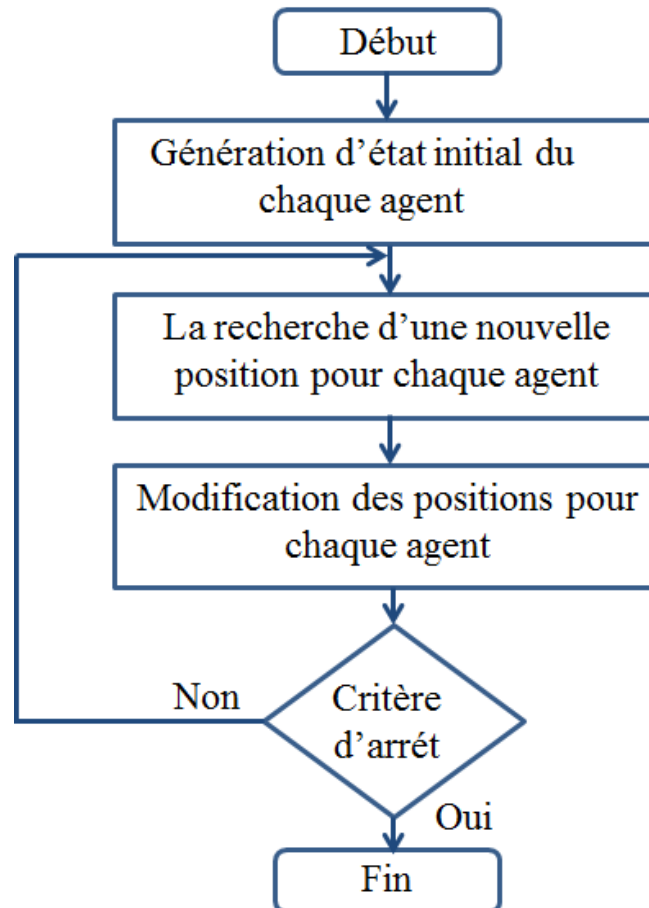


Figure III.13 Organigramme général de PSO.

Etape 1 (Génération d'un état initial de chaque particule)

Les points de recherche initiaux, position (S_{i0}) et vitesse (V_{i0}) de chaque particule sont générés aléatoirement dans l'espace de recherche. Le point de recherche courant est placé à $pbest$ pour chaque agent. La meilleure valeur évaluée de $pbest$ est placée à $gbest$.

Etape 2 (Recherche d'une nouvelle position pour chaque agent)

La valeur de la fonction objective est calculée pour chacun des agents. Si la valeur d'un agent est meilleure que son $pbest$ courant, $pbest$ prend cette nouvelle valeur. Si la meilleure valeur de $pbest$ est meilleure que $gbest$ courant, $gbest$ est remplacé par celle-ci et l'agent qui correspond à cette valeur est ainsi stocké.

Etape 3 (Modification de chaque point de recherche)

Le point de recherche courant du chaque agent est changé en utilisant les équations (III.2), (III.3) et (III.4).

Etape 4 (Vérification de l'état de sortie)

Le nombre courant d'itération atteint le nombre maximum d'itération $iter_{max}$, alors fin du programme, autrement, retourner à l'étape 2.

III.3.5 Formalisation

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{V}_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\vec{P}_{besti} = (P_{besti1}, P_{besti2}, \dots, P_{bestiD})$ et la meilleure position atteinte par tous les particules de l'essaim notée $\vec{g}_{best} = (g_{best1}, g_{best2}, \dots, g_{bestD})$. [49].

Remarque : le terme de « vitesse » est ici abusif, car les vecteurs \vec{V}_i ne sont pas homogènes à une vitesse. Il serait plus approprié de parler de « direction de déplacement ». Cependant, pour respecter l'analogie avec le monde animal, les auteurs ont préféré utiliser le terme de « vitesse ».

PSO Démarre le processus d'optimisation par une population des solutions aléatoires qui se déplacent dans l'espace de recherche. Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle et la mise à jour de sa vitesse.

En effet, à l'itération $k + 1$, le vecteur position est calculé à partir de l'équation (III.2)

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (III.2)$$

S_i^{k+1}, S_i^k : Position de la particule i à l'itération $k+1$ et k respectivement.

V_i^{k+1} : Vitesse de la particule i à l'itération $k+1$.

Chaque particule dans l'essaim, change sa vitesse suivant deux informations essentielles. Une, est liée à son expérience personnelle, qui est la meilleure position trouvée par la particule durant le processus de recherche *pbest*. La deuxième information, concernant la meilleure position trouvée par les voisins (*lbest*) (ou par tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme *gbest*). Cette information est obtenue à partir de la connaissance de la façon dont les autres agents ont exécuté leurs recherches.

Sachant que la variation de la vitesse est proportionnelle à l'éloignement d'une solution par rapport à la solution globale afin de faire bouger la particule vers les meilleures solutions. Le principe de changement de la vitesse est défini par l'équation (III.3).

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + C_1rand_1*(pbest_i - S_i^k) + C_2rand_2*(gbest - S_i^k) \quad (III.3)$$

D'où :

V_i^k : Vitesse de l'agent i à l'itération k .

S_i^k : Position actuelle d'agent i à l'itération k .

$pbest_i$: Meilleure position trouvée par la particule i jusque ici.

$gbest$: Meilleure position trouvée par l'essaim jusque ici.

w : Fonction de pondération ou coefficient d'inertie.

C_1, C_2 : Sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération, sachant que $C_1 + C_2 \leq 4$.

$rand_1, rand_2$: sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$ à chaque itération k et pour chaque dimension j .

La fonction de pondération W est donnée par l'équation suivante [50]:

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{iter_{\max}} * iter \quad (III.4)$$

W_{\max} : Poids initial.

W_{\min} : Poids final.

$iter_{\max}$: Nombre d'itération maximum.

$iter$: Itération courante.

La fonction de pondération w joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale, un bon choix de cette fonction augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de w de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats.

Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées et les deux vecteurs $Pbest_i$ et $gbest$ sont mis à jour à l'itération $k+1$, suivant les deux équations précédentes.

III.3.6 Vitesse maximale

Pour éviter que les particules se déplacent trop rapidement d'une région à une autre dans l'espace de recherche, on fixe une vitesse maximale V_{max} . Sachant que $V_{i,j}(k)$ est la vitesse de la particule i à l'itération k dans la dimension j [44] :

Algorithme 1 : Fixation du vitesse maximale

Si $V_{i,j}(k) > V_{max}$ **Alors**
 $V_{i,j}(k) = V_{max}$

Fin Si

Si $V_{i,j}(k) < -V_{max}$ **Alors**
 $V_{i,j}(k) = -V_{max}$

Fin Si

III.4 Algorithmes génétiques

III.4.1 Introduction

Les organismes que nous connaissons aujourd'hui sont rendus utiles pour la résolution des problèmes d'optimisation dans des divers domaines de la science et en particulier dans celui de l'ingénierie grâce à l'orientation de la recherche vers des techniques d'optimisation basés sur les analogies avec des processus naturels, biologiques ou humain. Parmi ces techniques, on trouve les algorithmes génétiques (AG) qui sont des procédures stochastiques (pseudo aléatoires) inspirées des lois de l'évolution des espèces et de la génétique naturelle.

Nous pouvons dire que l'histoire des algorithmes génétiques commença en **1860** date à laquelle **Charles Darwin** publia son livre intitulé *L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature*. Dans ce livre, **Darwin** prône que l'évolution se fait par [sélection naturelle](#), ce sont les animaux les plus adaptés à leur milieu qui survivent. Ce sont donc eux qui auront le plus de chance de se reproduire, et donc de transmettre leurs gènes.

Les premiers travaux dans le domaine des algorithmes dits évolutionnistes ont commencé dans les années cinquante, lorsque plusieurs biologistes américains ont simulé des structures

biologiques sur ordinateur. Puis, entre **1960** et **1970**, John Holland, sur la base des travaux précédents, développe les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. Comme il y avait aussi les travaux de **L. J. Fogel**, qui en **1966** a proposé des algorithmes pour la programmation évolutionnaire dans le cadre de la découverte d'automates.

Malheureusement, les ordinateurs de l'époque n'étaient pas assez puissants pour envisager l'utilisation des algorithmes génétiques sur des problèmes réels de grande taille.

La parution en **1989** de l'ouvrage de référence écrit par **D.E. Goldberg** qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation, qui reste néanmoins très récente.

Enfin vers les années **1990**, nous avons assisté à une programmation d'une panoplie d'algorithmes génétiques transcrits en C++, appelée GALib. Cette bibliothèque contient des outils pour des problèmes d'optimisation en utilisant les AG. Elle est conçue pour servir de support de programmation.

III.4.2 Fonctionnement général des algorithmes génétiques

Une description de l'AG de base peut se faire selon les étapes suivantes [51]:

- Initialiser aléatoirement une population de chromosomes (individus).
- Evaluer chaque chromosome dans la population. A chaque chromosome est associée une fonction coût déterminant son rang dans la population. Cette fonction est l'arbitre final décidant la vie ou la mort de chaque individu.
- Créer de nouveaux chromosomes, en appliquant les opérateurs de la sélection et de la reproduction.
- Evaluer les nouveaux chromosomes (les descendants) et les insérer dans la population pour construire une nouvelle génération.

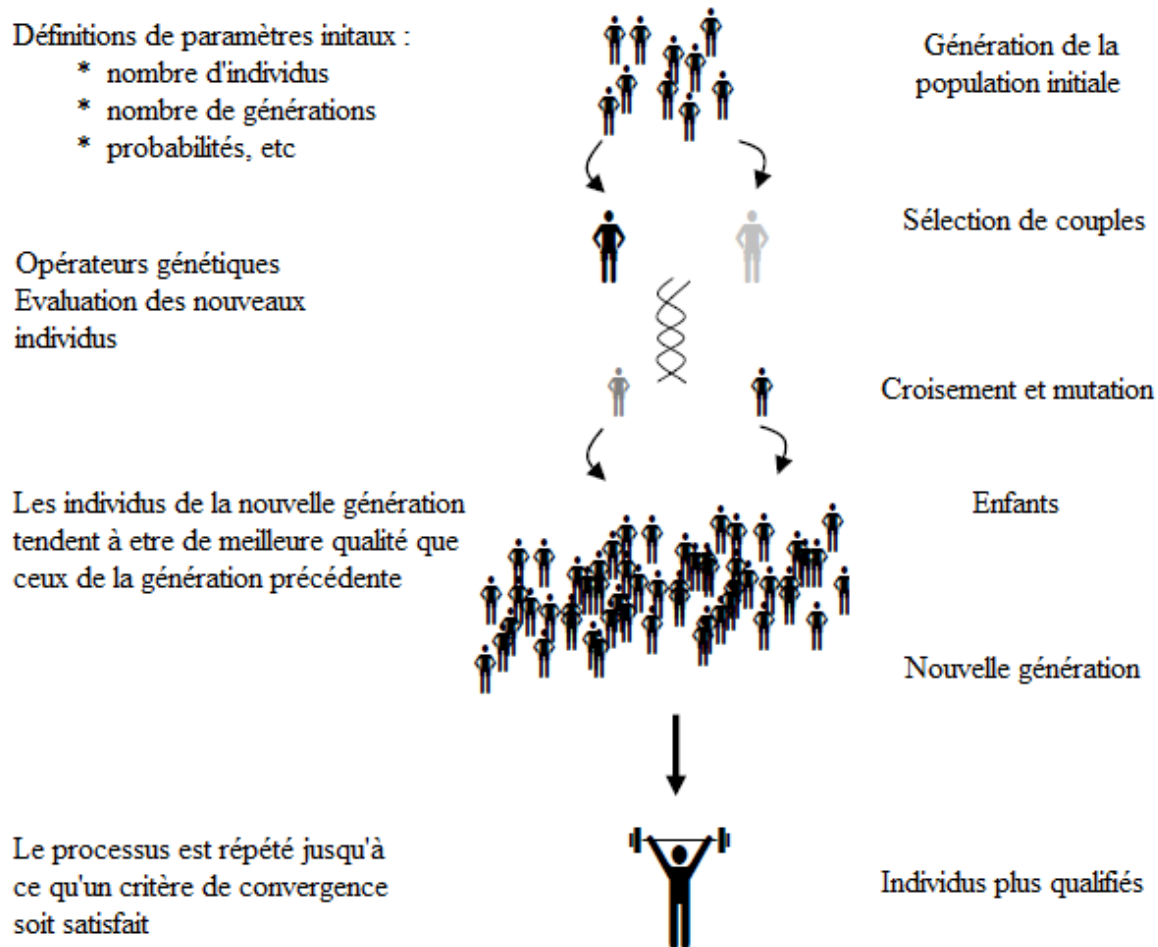


Figure III.14 Concepts de base d'un Algorithme Génétique.

En se basant sur le principe de fonctionnement des AG's, on peut identifier quelques différences avec les méthodes classiques d'optimisation. Ces différences sont:

- Les AG's possèdent une représentation codée et cherchent une représentation dans l'espace des solutions.
- Les AG's utilisent une population de solutions à la place d'une seule solution (un espace de recherche plus vaste, limité par la taille de la population).
- Les AG's utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes (pseudo aléatoire) comme outils pour guider l'exploration à travers les régions de l'espace de

recherche (une procédure pseudo-aléatoire n'implique pas nécessairement une exploration sans direction).

- Les AG's n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire.

III.4.3 Description

Les AG's, en tant qu'approche de résolution de problèmes, se caractérisent par un certain nombre d'aspect qui sont : la population initiale, le codage des paramètres du problème à traiter, l'espace de recherche de solution, la fonction d'évaluation et le rôle du hasard dans le choix des chromosomes ; dans ce qui suit, nous allons passer en revue ces différents aspects [52].

III.4.3.1 Génération de la population initiale

La première étape de l'algorithme consiste à générer la population initiale. Une population est constituée de plusieurs individus. Les individus de la population sont des chaînes de bits de longueur l_c , et tous les individus ont la même longueur. Une population a N individus est une matrice de taille $N_{pop} \times l_c$. Chaque ligne de cette matrice correspond donc à un individu initialisé de façon aléatoire. La population initiale ne représente alors qu'une petite partie de l'ensemble des solutions possibles du problème à résoudre.

L'unique condition pour générer la population initiale est de créer une population avec beaucoup de diversité. Cela permet de garantir une zone de recherche riche dans laquelle il y aura une grande variété d'individus. On peut envisager la génération d'une population aléatoire ou bien pour des situations bien spécifiques on peut introduire de manière directe la population. La population initiale indique le point de départ pour la génération des nouvelles populations à partir de plusieurs itérations ou cycles génétiques. Dans chaque cycle évolutif, une nouvelle population devient de plus en plus adaptée. Cette évolution de la population est effectuée par des opérateurs génétiques tels que la sélection, le croisement et la mutation.

III.4.3.2 Codage

La première étape pour construire un AG est de choisir la représentation génétique la plus appropriée pour coder la variable dont on cherche la valeur optimale sous forme utilisable, c'est-à-dire associer à chacun des points de l'espace de recherche une structure contenant l'information du problème. Étant donné la grande diversité des problèmes, le

codage est une opération délicate, car la solution du problème dépend fortement du codage des individus. Il existe principalement trois types de codage [51] :

- **Codage binaire**

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

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

- **Codage réel**

Il a le mérite d'être simple. Chaque chromosome est en fait un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome contenant les n variables: (x_1, x_2, \dots, x_n) , avec ce type de codage, la procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence de l'étape de transcodage (du binaire vers le réel).

- **Codage en base n**

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

III.4.3.3 Fonction d'évaluation

L'évaluation des individus s'effectue à l'aide d'une fonction, la fitness ou la fonction objectif, qui permet d'associer une valeur à chaque individu. Ces valeurs serviront au processus de sélection des candidats aptes à la reproduction.

III.4.3.4 Génération de population

La création d'une nouvelle génération de population se fait en deux étapes :

- par sélection, ce qui va permettre une meilleure reproduction des bons individus par rapport aux individus moins bien adaptés.
- par reproduction (croisement et mutation), ce qui va permettre d'enrichir la population avec de nouveaux individus et de rendre l'algorithme génétique susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'états.

- **Sélection**

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. Le rôle de la sélection est de choisir parmi tous les individus d'une population les parents qui assureront la reproduction. Ce choix est réalisé par tirage au sort parmi les individus, en tenant compte d'une probabilité de sélection affectée à chacun d'eux. Un individu a d'autant plus de chances d'être sélectionné que sa fonction d'évaluation F prend une valeur importante à cette point. Pratiquement, la probabilité p_i d'évolution d'un individu chi est définie par [51] :

$$p_i = \frac{F(ch_i)}{\sum_{j=1}^N F(ch_j)} \quad (\text{III.5})$$

La méthode souvent utilisée pour sélectionner les individus assurant la reproduction est la sélection par roulette biaisée (roulette wheel selection) de Goldberg [13]. Chaque individu occupe un secteur de la roulette dont l'angle est proportionnel à sa probabilité de sélection définie par l'équation (III.5). On actionne N fois la roulette, afin de définir les parents qui assureront la reproduction.

On constate aisément que les individus les plus performants ont plus de chances d'être sélectionnés puisqu'ils occupent une surface plus importante de la roulette. Lors du tirage au sort, certains individus peuvent être retenus plusieurs fois, alors que d'autres sont tenus à l'écart. Le nombre de copies espérées pour chaque individu chi qui va résulter de la sélection est alors égal à :

$$n_i = N * p(ch_i) \quad (\text{III.6})$$

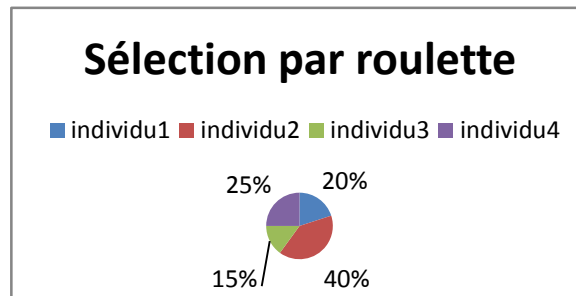


Figure III.15 Schéma de principe de la sélection par roulette.

L'inconvénient majeur de ce type de reproduction vient du fait qu'il peut favoriser la dominance d'un individu qui n'est pas forcément le meilleur. Cette méthode peut aussi engendrer une perte de diversité par la dominance d'un super-individu. Pour palier cet inconvénient, on préfère souvent des méthodes qui n'autorisent en aucun cas l'apparition de super-individu. Par exemple, la sélection par tournoi (tournoiement sélection) ou élitisme.

Sélection par tournoi

On tire deux individus aléatoirement dans la population et on reproduit le meilleur des deux dans la nouvelle population. On répète la procédure jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète.

Élitisme

La stratégie élitiste consiste à conserver le meilleur individu à chaque génération. Ainsi l'élitisme empêche l'individu le plus performant de disparaître au cours de la sélection ou que ses bonnes combinaisons soient affectées par les opérateurs de croisement et de mutation. Après chaque évaluation de la performance des individus à une génération (k) donnée, le meilleur individu de la génération précédente ($k-1$) est réintroduit dans la population si aucun des individus de la génération k n'est meilleur que lui. Par cette approche, la performance du meilleur individu de la population courante est monotone de génération en génération. Il apparaît que l'élitisme améliore considérablement les performances de l'algorithme génétique pour certaines de problèmes, en augmentant le taux de convergences prématurées.

- **Croisement**

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

L'opération de croisement est essentielle, car elle permet d'obtenir de nouveaux individus, distincts de ceux déjà existants, et donc d'explorer tout un espace de recherche. Dans un algorithme génétique standard, on définit ainsi un deuxième paramètre de fonctionnement : *la probabilité de croisement* p_c , qui permet de choisir entre une conservation ou une modification des chromosomes. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0.5 et 0.9 [10].

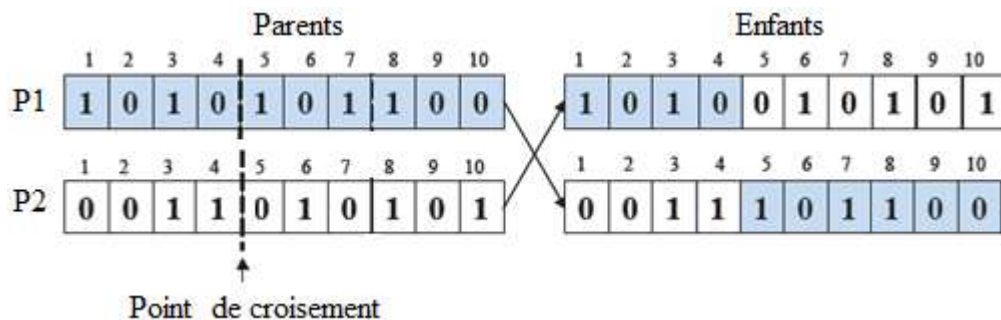


Figure III.16 : Croisement à un site.

Dans un algorithme génétique standard, le croisement de deux chromosomes est réalisé de la façon suivante : on choisit aléatoirement un point de croisement situé à la position p comprise entre 1 et $l_c - 1$, où l_c est la longueur de la chaîne binaire. Afin de créer les deux nouveaux chromosomes, on conserve intactes les sous-chaînes contenant les bits compris entre 1 et p , et on échange les sous-chaînes contenant les bits compris entre $p + 1$ et l_c . Le croisement à un site est illustré par la figure I.2. Ainsi on peut étendre ce principe de combinaison en choisissant non pas un seul point, mais 2, 3, etc...(croisement en multipoints).

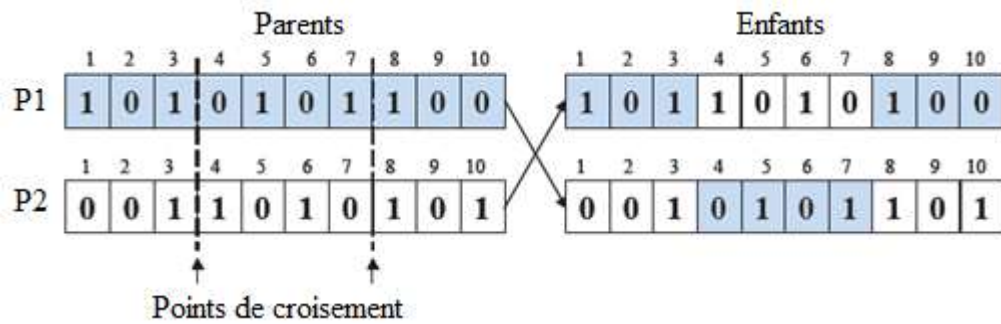


Figure III.17 Exemple de croisement en 2 points.

- **Mutation**

La mutation permet aux chromosomes des fils biologiques d'être différents de ceux des pères biologiques. Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement la valeur d'un gène dans un chromosome. Dans le cas du codage binaire, chaque bit $a_i \in \{0,1\}$ est remplacé par son complémentaire $\bar{a}_i = 1 - a_i$.

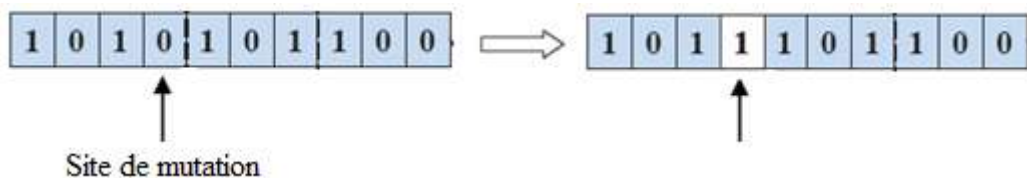


Figure III.18 : Illustration de la mutation.

Pour les chaînes codées en base n , la mutation consiste à remplacer le gène initial par un chiffre en base n tiré au sort.

Dans le cas d'un codage réel, on utilise principalement deux opérateurs de mutation: la mutation *uniforme* et la mutation *non uniforme*. En supposant fixée la probabilité de mutation pm , un tirage au sort pour chaque gène d'un chromosome permet de décider si ce gène doit

être ou non modifié. Nous supposons que le gène prend ses valeurs dans un intervalle $[x_k^{\min}, x_k^{\max}]$.

Pour la mutation uniforme, qui est une simple extension de la mutation binaire, on remplace le gène sélectionné par une valeur quelconque tirée aléatoirement dans l'intervalle $[x_k^{\min}, x_k^{\max}]$. Pour la mutation non uniforme, le calcul de la nouvelle valeur d'un gène est un peu plus complexe. Le gène subit des modifications importantes durant les premières générations, puis graduellement décroissantes au fur et à mesure que l'on progresse dans le processus d'optimisation [51].

III.5 Conclusion

La logique floue est une théorie très puissante qui permet de générer de réponses à partir d'informations vagues, ambiguës, incomplètes et imprécises, là où les modèles mathématiques du système sont inconnus ou difficiles à extraire. Ainsi, l'introduction de la logique floue dans un processus a pour but de lui ajouter une dimension « Intelligente », inspirée de la pensée humaine qui est une superposition de l'intuition.

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement le principe de deux algorithmes, qui permettent d'aborder la majorité des problèmes d'optimisation en utilisant un formalisme simple qui sont l'essaim particulaire et les algorithmes génétiques. Dans le chapitre suivant de cette mémoire, nous verrons comment utiliser ces algorithmes pour optimiser les paramètres de fonctionnement d'un contrôleur flou.

Chapitre IV:

Présentation des Techniques Intelligentes

IV.1 Introduction

La puissance de sortie des modules PV est influencée par l'intensité du rayonnement solaire, la température et la surface des cellules, ainsi que la charge. Et pour maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre la MPP.

Dans ce chapitre, nous proposons un système de commande MPPT à base de logique floue, quand on conçoit un contrôleur par logique floue (CLF) [43], [44], [45], une connaissance experte du processus à commander peut être employée pour établir les fonctions d'appartenance et les règles d'inférence. Cependant il n'y a aucune procédure générale pour concevoir un CLF, vu que le temps est exigü et que beaucoup d'erreurs d'essais, peuvent être rencontrées lors de la réalisation d'un CLF. Dans cette approche traditionnelle, concevoir un CLF peut être un processus laborieux et long. Ces CLF tendent également à être non adaptables à d'autres applications.

Il serait prudent de chercher à optimiser les différents paramètres concernant un CLF. On se propose de faire appel aux algorithmes d'optimisations qui peuvent être employés pour chercher dans un grand espace de possibilité des solutions optimales.

pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV. L'algorithme flou et CLF optimisé par essaim particulaire d'un part et d'autre part par les algorithmes génétiques sont appliqués à la commande du convertisseur DC-DC Boost pour la MPPT.

IV.2 Conception du contrôleur MPPT flou

La commande a pour but de poursuivre le point de puissance maximale qui correspond au point de fonctionnement optimale d'un GPV pour différentes valeurs d'insolations et de température, une nouvelle technique de la poursuite basée sur l'intelligence artificielle, c'est la commande par logique floue. Cette approche est basée sur trois concepts essentiels: La fuzzification, L'inférence, La défuzzification .

Dans ce qui suit, on va détailler les étapes de réalisations d'un contrôleur flou.

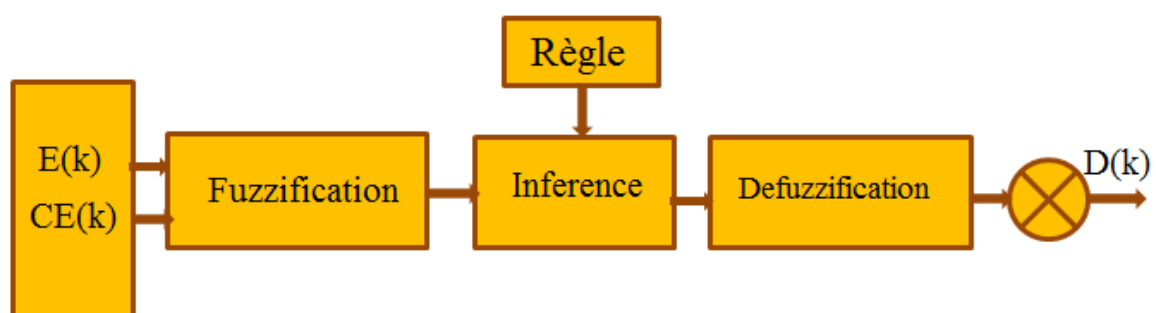


Figure.IV.1 Structure de base d'un contrôleur flou.

IV.2.1 Fuzzification

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont:

L'erreur E et la variation de l'erreur CE à des instants échantillonnés k .

Les variables E et CE sont exprimées comme suit:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{IV.1})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{IV.2})$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont respectivement: la puissance et la tension du module photovoltaïque. Par conséquent, $E(k)$ est nulle au MPP du GPV.

L'entrée $E(k)$ permet de situer le point de fonctionnement de la charge à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe P-V. Si cette valeur est positive, alors le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP, sinon, le point de fonctionnement est à droite du point MPP. tandis que l'entrée $CE(k)$ montre la direction du point de fonctionnement et nous permet d'estimer la vitesse de convergence vers le point MPP.

Connaissant ces deux entrées on peut décider quel sera la variation du rapport cyclique qu'on doit imposer en agissant sur un hacheur Boost : pour augmenter la tension de point de fonctionnement D doit être diminué et vice versa.

- **Variables linguistiques**

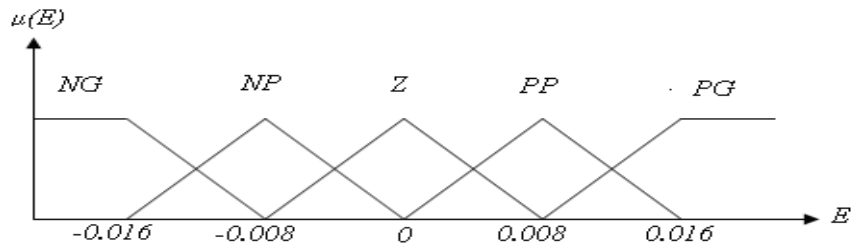
En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en terme des variables linguistiques suivantes:

PG: (positif grand) ; PP: (positif petit) ; ZE: (Zéro) ; NP: (négatif petit) ; NG: (négatif grand).

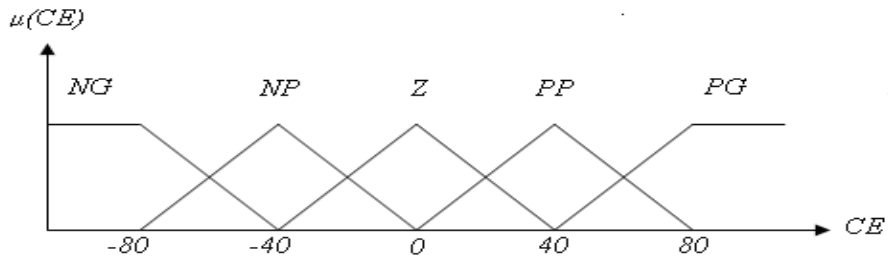
- **Fonctions d'appartenance**

La génération de fonctions d'appartenance s'effectue soit d'une manière itérative, soit avec la méthode d'essai et d'erreur ou encore en se basant sur l'expérience humaine. Il n'existe jusqu'à présent aucune méthode généralisée pour la formulation des stratégies de la logique floue.

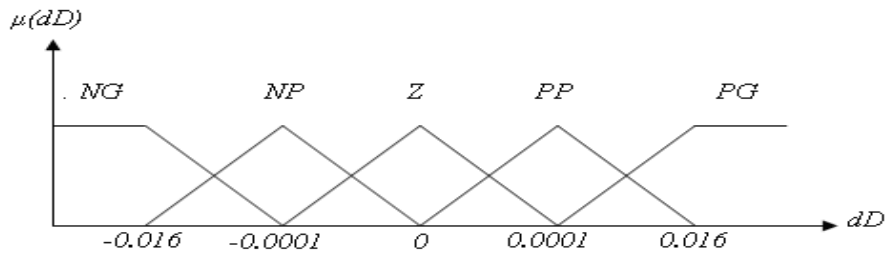
On définit pour la résolution des problèmes de poursuite du point de puissance maximale les fonctions d'appartenances suivantes [10]:



(a)



(b)



(c)

Figure.IV.2 Fonctions d'appartenance de:

(a) L'entrée E . (b) L'entrée CE . (c) La sortie D .

IV.2.2 Méthode d'inférence

La table suivante est la table de règles du CLF.

Table.IV.1 Table de règles floues

$\begin{matrix} CE \\ E \end{matrix}$	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

Ou :

- Les entrées de la matrice sont: l'erreur E et le changement de l'erreur CE .
- La sortie est le changement du rapport cyclique D .

Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E doit être toujours *Zéro*.

Le Table. IV. comprend 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande du convertisseur Boost, telle que la puissance maximale du GPV soit atteinte.

Par exemple l'intersection de la colonne 3 et la ligne 5 du Table. IV représente la règle :

- Si E est PG et CE est ZE Alors D est NG

Ceci implique que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (PPM) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe ($P=f(V)$) est environ *Zéro*; Alors diminuer le rapport cyclique D largement".

On a choisi la méthode Mamdani comme une méthode d'inférence floue avec (opération MAX-MIN). Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU. Nous remarquons que pour une valeur de E et CE , il y'a deux règles à vérifier (figure(IV.3)) pour aboutir à la valeur de la sortie D .

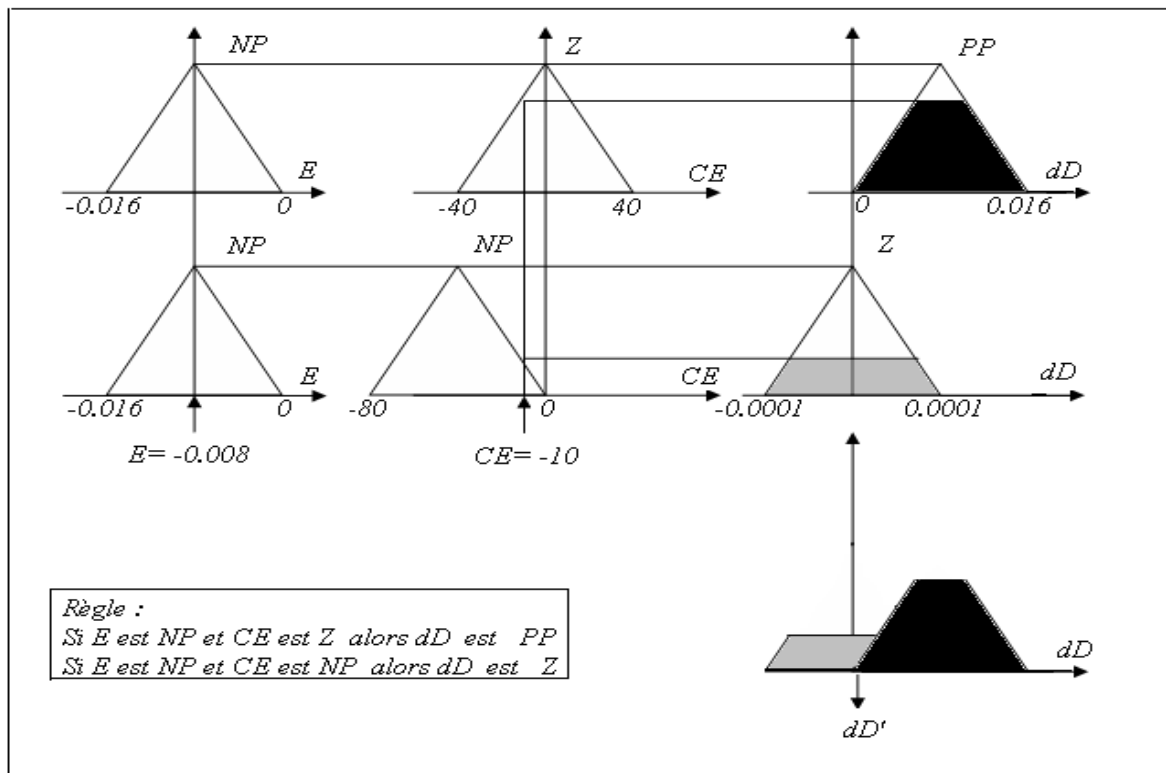


Figure.IV.3 L'inférence avec la loi de composition MAX-MIN.

IV.2.3 Défuzzification

Les sorties floues des règles floues précédentes sont combinées en utilisant la fonction MAX pour former un seul ensemble flou, cet ensemble est défuzzifié pour générer une seule valeur de commande, il existe plusieurs méthodes de défuzzification, nous avons choisi celle de centre de gravité pour la simplicité de son implémentation.

IV.3 Conception du contrôleur MPPT flou optimisé

Les difficultés rencontrées dans la conception des contrôleurs flous (CF), ont guidé les chercheurs à s'orienter vers l'optimisation de ces contrôleurs. On rencontre souvent, dans la littérature, trois stratégies d'optimisations pour la conception des CF :

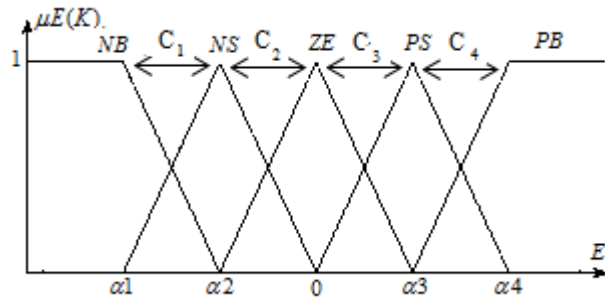
1. Les fonctions d'appartenance sont fixées et les règles floues sont optimisées.
2. Les règles floues sont bien définies et Les fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrées et de sorties sont optimisées.
3. Les fonctions d'appartenance et les règles floues associées sont optimisées simultanément.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la deuxième stratégie ou on applique PSO et AG pour concevoir le meilleur CLF pour la commande MPPT.

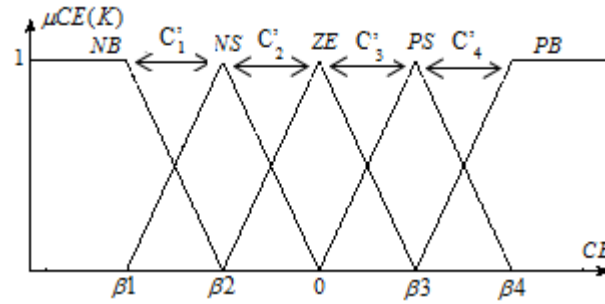
Dans la conception du contrôleur MPPT flou on a trois fonctions d'appartenances, deux entrées et une sortie, E, CE et D respectivement. Chacune d'entre elles est composée de 5 sous-ensembles flous.

Les relations entre les C_i , C'_i , C''_i et α_i , β_i , δ_i ($i=1,2,3,4$) sont données par :

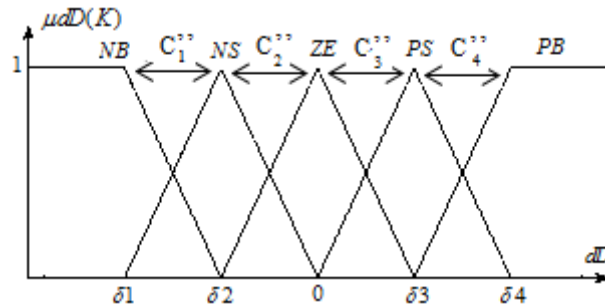
$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = - (C_1 + C_2) & \beta_1 = - (C'_1 + C'_2) & \delta_1 = - (C''_1 + C''_2) \\ \alpha_2 = - (C_2) & \beta_2 = - (C'_2) & \delta_2 = - (C''_2) \\ \alpha_3 = (C_3) & \beta_3 = (C'_3) & \delta_3 = (C''_3) \\ \alpha_4 = (C_3 + C_4) & \beta_4 = (C'_3 + C'_4) & \delta_4 = (C''_3 + C''_4) \end{array}$$



(a)



(b)



(c)

Figure IV.4 Codages des fonctions d'appartenances de :
 (a) L'entrée E (b) L'entrée CE (c) La sortie D.

IV.3.1 Critère d'optimisation

En générale, l'objectif d'un système de commande est de minimiser l'écart $e(t)$ entre la sortie d'un système et une valeur de consigne désirée. Pour choisir un bon réglage du régulateur, on prend en compte l'amplitude maximum de l'écart et la durée nécessaire pour qu'il s'annule. Il existe plusieurs critères d'optimisation [6]. Dans ce travail nous allons utiliser le critère quadratique à minimiser suivant :

$$F = \int e^2 dt \quad (IV.3)$$

Avec:
$$e = P_{max} - P \quad (IV.4)$$

Où : P est la puissance désirée et P_{max} est la puissance maximale délivrée par le module sous les conditions normalisées : $T=25^{\circ}C$ et $S=1000W/m^2$.

La réinsertion des particules dans la neveux population a été faite par les meilleurs individus et cela se fait par les valeurs de la fonction objectif en ces point.

IV.3.2 Critère d'arrêt

Le processus évolutif se termine lorsqu'un critère d'arrêt est atteint. Le critère d'arrêt peut être une des conditions suivantes :

- Un nombre de générations maximal fixé a été atteint.
- La valeur de la fonction d'aptitude a atteint une valeur fixée a priori.
- Un temps de calcul maximal est atteint.
- Pendant plusieurs générations la valeur de la fonction d'aptitude ne change pas, ce qui correspond à un cas de convergence reposant sur l'évolution de cette fonction.
- Les individus de la population atteignent un certain degré d'homogénéité.

Une fois que la condition d'arrêt est satisfaite, les meilleurs résultat de la population sont retenus comme les solutions au problème initial.

Le critère d'arrêt qu'on a utilisé dans ce travaille lors de l'exécution du programme, est quand le nombre de génération maximal atteint la valeur 50.

IV.4 Contrôleur MPPT flou optimisé par PSO (PSOF)

Comme on sait qu'il y a toujours des défauts au niveau des règles d'inférences et des fonctions d'appartenances, on va essayer dans ce travail de trouver les fonctions d'appartenances optimales en utilisant PSO pour concevoir le meilleur CLF pour la commande MPPT, et cela se fait par les étapes suivantes :

IV.4.1 Création de la population initiale

La population se compose d'un ensemble d'individus (70 individus), où chaque individu est composé de 13 dimension , La forme de chaque individu qui en résulte est illustrée sur la figure (IV.5).

C_1	C_2	C_3	C_4	C'_1	C'_2	C'_3	C'_4	C''_1	C''_2	C''_3	C''_4	F
-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	-----

Figure IV.5 Forme d'un particule.

Dans un espace de recherche de 13 dimension, chaque particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur vitesse $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{i12})$, et par son vecteur position $S_i = (S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i12})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de F en ce point.

Les points de recherche initiaux de position (S_{i0}) et de vitesse (V_{i0}) du chaque particule sont habituellement générés aléatoirement dans l'espace de recherche.

- Pour la fonction d'appartenance $E : C_1, C_2, C_3, C_4$. On définit un intervalle de variation de C (l'espace de recherche initial), qui varie entre [0.0001 0.032].
- Pour la fonction d'appartenance $CE : C'_1, C'_2, C'_3, C'_4$. On définit un intervalle de variation de C' , qui varie entre [0.1 100].
- Pour la fonction d'appartenance $D : C''_1, C''_2, C''_3, C''_4$. On définit un intervalle de variation de C'' , qui varie entre [0.0001 0.032].

Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle et la mise à jour de sa vitesse, suivant les deux équations précédente.

Le point de recherche courant est placé à $pbest$ pour chaque agent. La meilleure valeur évaluée de $pbest$ est placée à $gbest$, et pour atteindre l'optimum global, on prend une grande taille de la population qui est égale à 70 individus.

IV.4.2 Variation de la fonction objectif

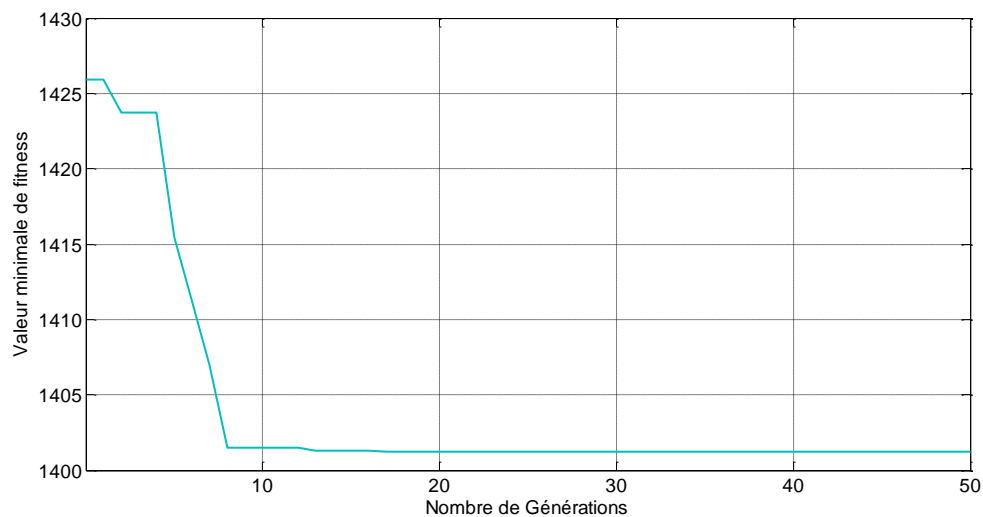


Figure IV.6 Valeurs minimales de la fonction objectif en fonction du nombre de générations.

La variation de la valeur minimale de la fonction objectif (fitness) en fonction du nombre de générations est donnée par la Figure (IV.6). Nous remarquons que la valeur minimale a convergé progressivement vers une solution optimale représentée par le meilleur

individu de la population de la dernière génération. Cet individu donne les valeurs des paramètres recherchés.

IV.4.3 Fonctions d'appartenances du PSOF

La solution optimale obtenue après 50 générations donne les formes des fonctions d'appartenance illustrées dans la figure (IV.7) au dessous.

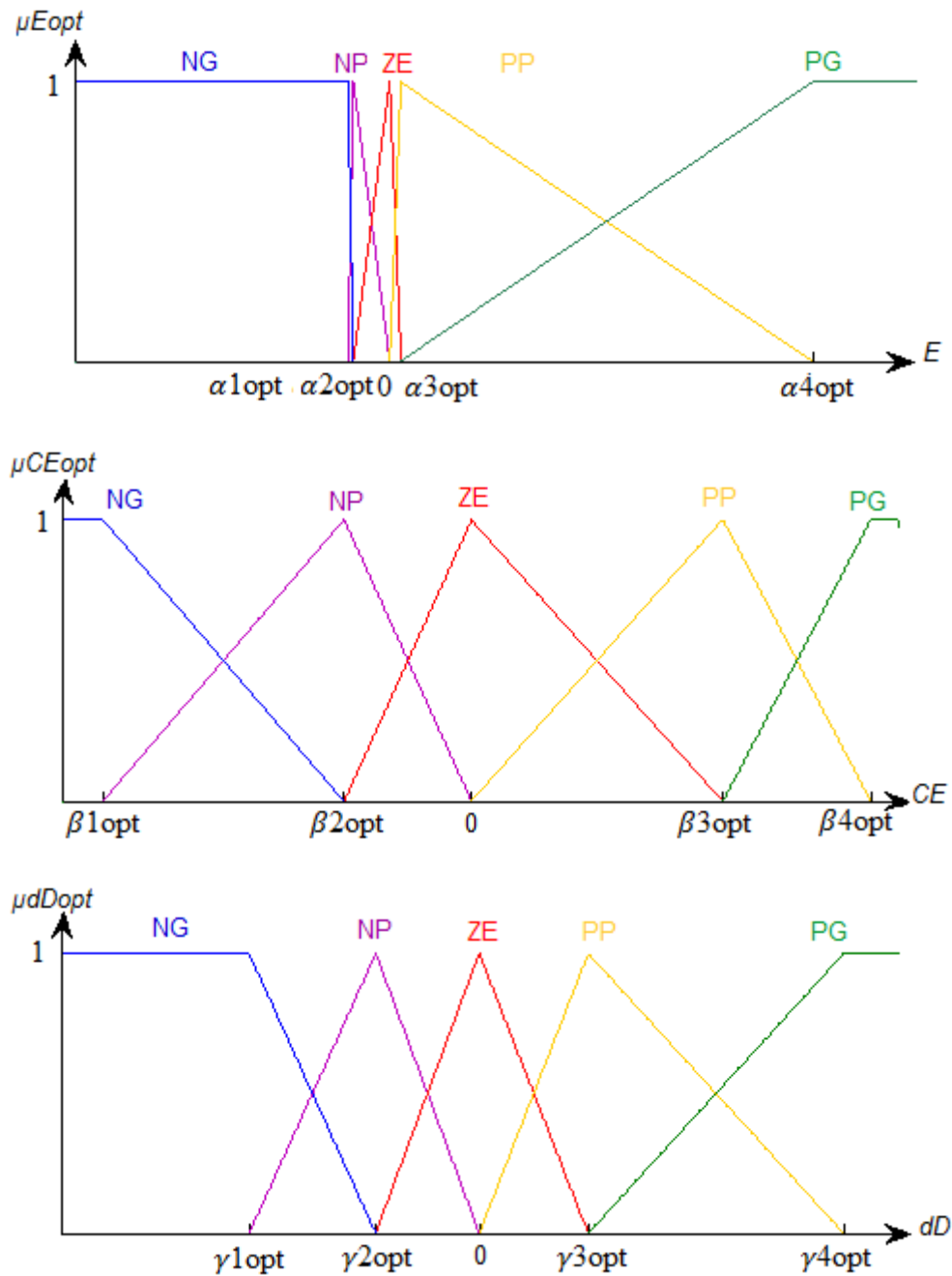


Figure IV.7 Fonctions d'appartenances du CLF flou optimisé par PSO.

sachant que :

$\alpha_{1opt} = -0.019955$	$\beta_{1opt} = -112.38$	$\gamma_{1opt} = -0.022$
$\alpha_{2opt} = -0.017318$	$\beta_{2opt} = -38.87$	$\gamma_{2opt} = -0.00989$
$\alpha_{3opt} = 0.005409$	$\beta_{3opt} = 76.695$	$\gamma_{3opt} = 0.010421$
$\alpha_{4opt} = 0.20164$	$\beta_{4opt} = 121.78$	$\gamma_{4opt} = 0.034833$

IV.5 Contrôleur MPPT flou optimisé par AGs (FAG)

Dans ce qui suit, on applique les AGs pour concevoir le meilleur CLF pour la commande MPPT. Après la conception (MPPT flou) du CLF, et comme on sait que les défauts rencontrés au niveau des règles d'inférences et des fonctions d'appartenances peut influencé a la puissance maximale générer par le GPV, dans ce travail on va essayer de trouver les fonctions d'appartenances optimales en utilisant les AGs, et cela par les étapes suivantes :

IV.5.1 Création de la population initiale

Dans la conception du contrôleur MPPT flou on a trois fonctions d'appartenances, deux entrées et une sortie, E, CE et D respectivement. Chacune d'entre elles est composée de 5 sous ensembles flous.

La population se compose d'un ensemble d'individus, où chaque individu est composé des trois chromosomes : E, CE et D, chaque chromosome est composé d'un ensemble de gènes. La forme d'individu est illustrée sur la figure (IV.8) :

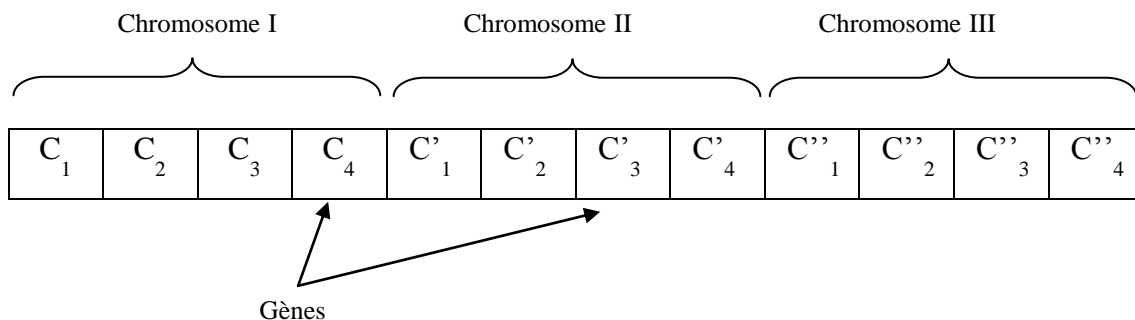


Figure IV.8 Forme d'un individu.

Les points de recherche initiaux de chaque individu sont habituellement générés aléatoirement dans l'espace de recherche.

- Pour le chromosome E les gènes sont : C_1, C_2, C_3, C_4 . On définit un intervalle de variation de C (l'espace de recherche initial) , qui varie entre [0.0001 0.032].
- Pour le chromosome CE les gènes sont : C'_1, C'_2, C'_3, C'_4 . On définit un intervalle de variation de C' , qui varie entre [0.1 100].
- Pour le chromosome D les gènes sont : $C''_1, C''_2, C''_3, C''_4$. On définit un intervalle de variation de C'' , qui varie entre [0.0001 0.032].

Afin de trouver l' individu optimal on se limite à chercher les valeurs des gènes qui sont inconnus. Pour atteindre l'optimum global, on prend une grande taille de la population qui est égale à 70 individus.

IV.5.2 Sélection

Dans cette étape on choisit les meilleurs individus et cela se fait par les valeurs de la fonction d'adaptation (fitness) F . La réinsertion a été faite par la méthode élitiste, qui consiste à conserver le meilleur individu à chaque génération. Après chaque évaluation des individus à une génération k donnée, le meilleur individu de la génération précédente $k-1$ est réintroduit dans la population si aucun des individus de la génération k n'est meilleur que lui.

IV.5.3 Croisement

Pour le croisement on a utilisé la méthode de croisement manipulant des variables continues (croisement réel), avec une probabilité de croisement $P_c=0.9$.

Comme on voit dans le chapitre précédent le croisement de deux chromosomes est réalisé soit sur un seul point, soit sur deux points, 3 points,.....etc. (croisement en multipoints). Ce type de croisement est très efficace et peut s'étendre à n'importe quel type de chaînes (réelles, en base n , etc...). Néanmoins certains auteurs (Wu et Lin, 1999) préfèrent utiliser dans le cas des chaînes réelles, un croisement de type barycentre ou : deux gènes $ch_1(i)$ et $ch_2(i)$ sont sélectionnés dans chacun des parents à la même position i . Ils définissent deux nouveaux gènes $ch'_1(i)$ et $ch'_2(i)$ par combinaison linéaire :

$$\begin{aligned} ch'_1(i) &= \alpha.ch_1(i) + (1-\alpha).ch_2(i) \\ ch'_2(i) &= (1-\alpha).ch_1(i) + \alpha.ch_2(i) \end{aligned} \quad (IV.5)$$

Ou α est un paramètre de pondération aléatoire qui prend généralement ses valeurs dans l'intervalle $[0,1]$ (ceci permet de générer des points entre ou à l'extérieur des deux gènes considérés).

IV.5.4 Mutation

Pour la mutation on a utilisé la méthode de mutation *uniforme* des variables continues (mutation réelle), avec une probabilité de mutation $P_m = 0.10 - [1 : 1 : N] * (0.01) / N$, pour avoir un P_m très petits ou N c'est la taille de la génération.

IV.5.5 Variation de la fonction objectif

La variation de la valeur minimale de la fonction objectif en fonction du nombre de générations sont données par la Figure (IV.9). Nous remarquons que l'AG a convergé progressivement vers une solution optimale représentée par le meilleur individu de la population de la dernière génération. qui donne les valeurs des paramètres recherchés.

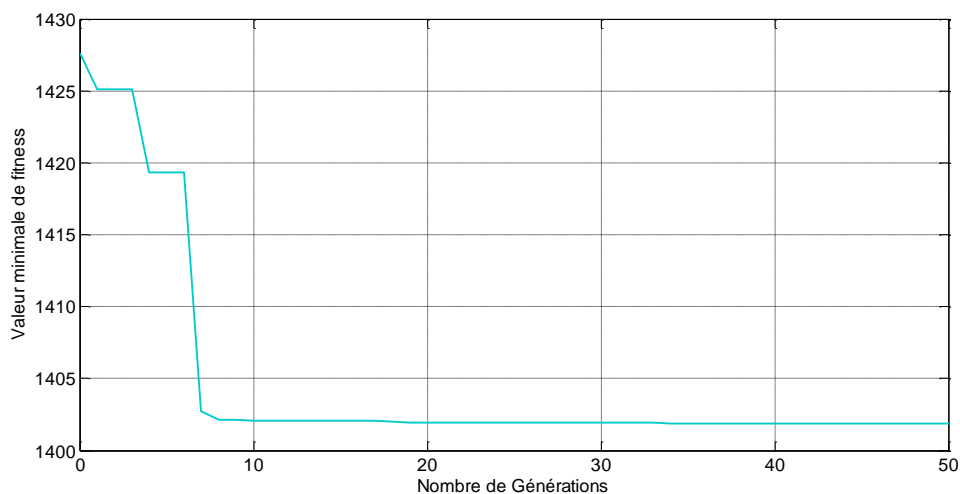


Figure IV.9 Valeurs minimales de la fonction objectif en fonction du nombre de générations.

IV.5.6 Fonctions d'appartenances du AGF

La solution optimale obtenue donne alors les formes des fonctions d'appartenances illustrées dans la figure (IV.10), avec les valeurs suivante :

$\alpha_{1opt} = -0.025642$	$\beta_{1opt} = -104.49$	$\gamma_{1opt} = -0.051798$
$\alpha_{2opt} = -0.00047082$	$\beta_{2opt} = -86.586$	$\gamma_{2opt} = -0.02641$
$\alpha_{3opt} = 0.0023967$	$\beta_{3opt} = 39.859$	$\gamma_{3opt} = 0.025891$
$\alpha_{4opt} = 0.0031101$	$\beta_{4opt} = 125.25$	$\gamma_{4opt} = 0.04301$

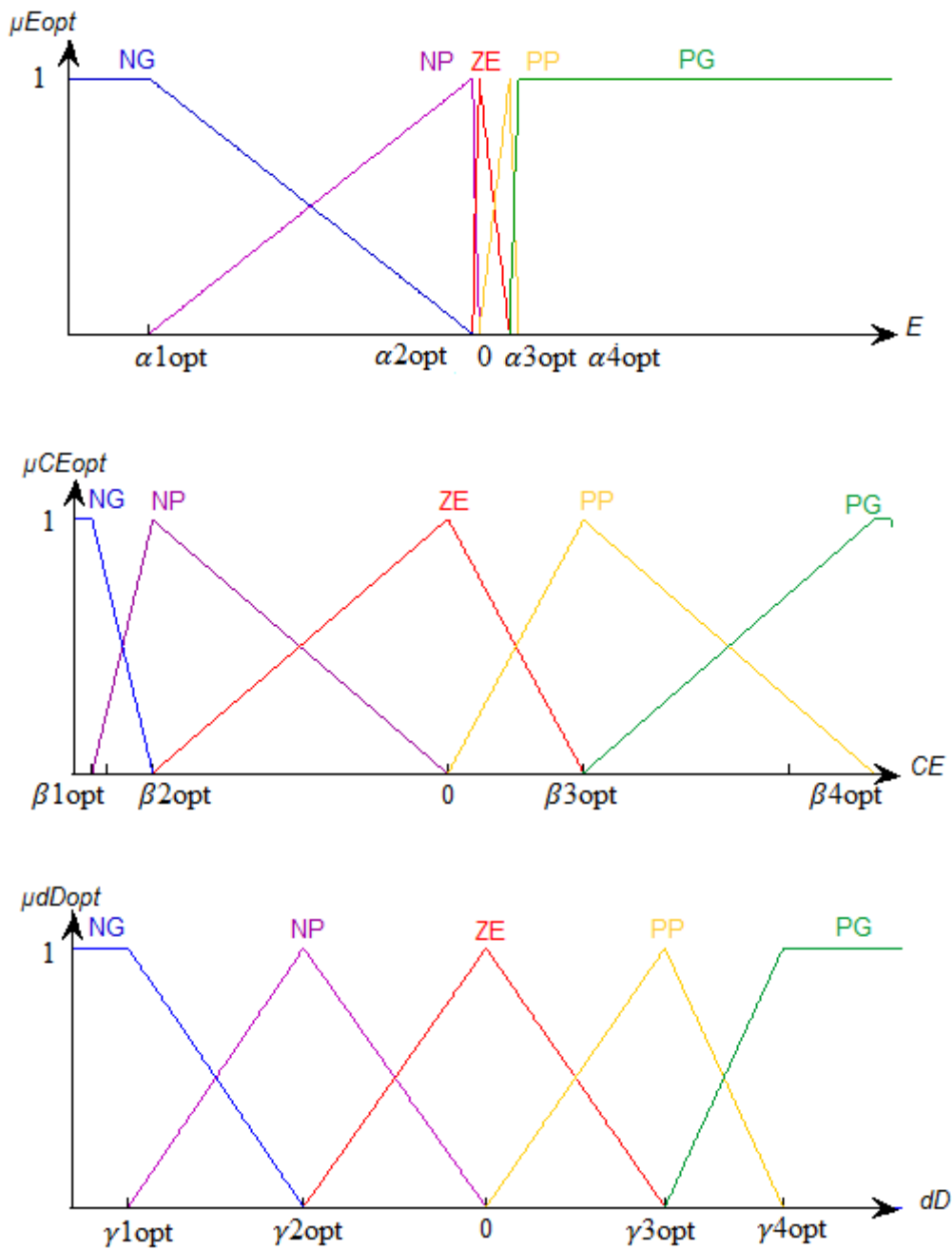


Figure IV.10 Fonctions d'appartenances du CLF flou optimisé par AGs.

IV.6 Conclusion

Après avoir donné un aperçu sur la logique floue, l'optimisation par essaim particulaire et les algorithmes génétiques, Nous avons abordé dans le présent chapitre les détails techniques des commandes émergentes qui font partie de l'intelligence artificielle,

Les performances de ces commandes sont exposées en détail dans le chapitre V, Ces observations ont été obtenues suite à plusieurs simulations soumises à différentes conditions environnementales de température et d'éclairage.

Chapitre V:

Résultats de Simulation

V.1 Introduction

Dans le présent chapitre nous allons montrer les résultats des différentes simulations effectuées sur un système PV constitué principalement d'un panneau PV, d'une charge et d'un hacheur. Ce dernier est piloté par différentes techniques MPPT permettant une meilleure adaptation source/charge, pour un transfert maximum de puissance. De ce fait, la simulation est la seule manière d'évaluer la performance d'un contrôleur dans un système avant d'établir un prototype réel.

Dans la simulation des différentes techniques MPPT, on a utilisé 'SIMULINK' de MATLAB en raison de la possibilité de simuler des systèmes mixtes.

Le 'SIMULINK' nous permet aussi de changer facilement les conditions atmosphériques (ensoleillement, température) afin d'évaluer la trajectoire de poursuite du MPP des différentes techniques MPPT vis-à-vis des changements brusques ou lents de ces conditions.

V.2 Modèle de simulation du système photovoltaïque

Le schéma synoptique du contrôleur MPPT simulé sous Simulink est donné par le bloc global représenté par la figure (V.1). Nous soulignons ici que chaque bloc a été construit d'après les équations de fonctionnement déjà étudiées dans les chapitres précédents.

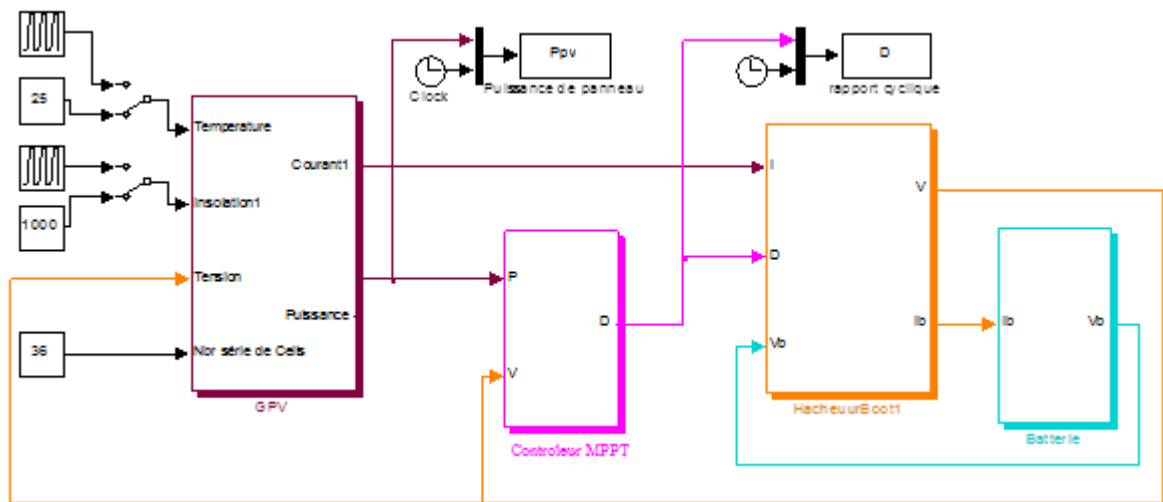


Figure V.1 Schéma fonctionnel du système PV global de simulation.

Pour la discussion des résultats de simulation on a choisi d'utiliser un hacheur Boost, pour cela on utilise les éléments suivants :

- 14 modules solaires en parallèle, chaque module contenant 36 cellules en série.
- 9 batteries au plomb en série, chaque batterie a une tension de fonctionnement de 12V.

V.2.1 Module PV

Le sous bloc qui représente le module PV est détaillé par la figure (V.2) qui suit :

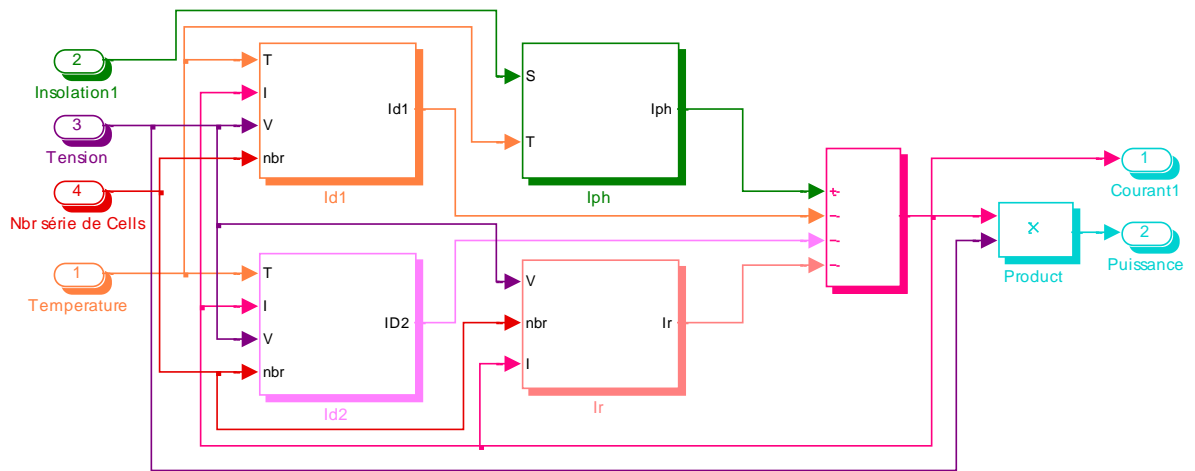


Figure V.2 Bloc de simulation du module PV.

Ce bloc a été modélisé d'après les équations mathématiques du modèle du panneau PV, décrites dans la section (I.4.2).

On donne les données suivantes:

$$I_{ph(T=298)} = 3.25 \text{ A}$$

$$R_p = 30 \Omega$$

$$R_s = 15.10^{-3} \Omega$$

$$E_g = 1.1 \text{ eV}$$

$$n_1 = 1 ; n_2 = 2 .$$

$$k = 1.380 * 10^{-23} \text{ J / K}$$

$$q = 1.602 * 10^{-19} \text{ C.}$$

V.2.2 Batterie Pb-acide

Le modèle de batterie Pb-Acide qui a été choisi pour les simulations c'est le modèle de équation mathématique (I.15) de la section (I.7). Ces équations peuvent être implantées directement dans un bloc Simulink de fonction de transfert associées avec les données suivantes :

$$R_{bs} = 0,0013 \Omega$$

$$R_{b1} = 2,84 \Omega$$

$$R_{bp} = 10e^3 \Omega$$

$$C_{b1} = 2,5 \text{ mF}$$

$$C_{bp} = 4,6501 \text{ kF}.$$

V.2.3 Hacheurs

Pour les simulations que nous avons effectuées nous avons utilisé un hacheur Boost. Les équations du modèle mathématique du hacheur Boost (I.25) ont été étudiées dans la section (I.8.2). On les représente directement par le schéma Simulink de la figure (V.3) associée avec les valeurs numériques suivantes : $L = 3.5 \text{ mH}$ et $C1 = C2 = 5.6 \text{ mF}$.

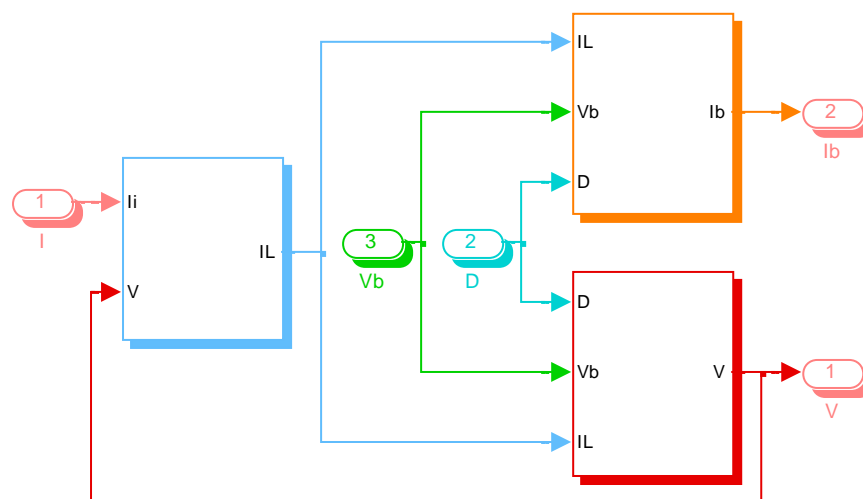


Figure V.3 Schéma Simulink représentant le hacheur Boost.

Nous obtenons les résultats suivants :

V.3 Les techniques classiques

V.3.1 La méthode de P&O

La méthode P&O évoquée au chapitre (II), est généralement une technique très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV. La figure (V.4) montre les signaux de puissance de sortie du panneau, de la puissance de la batterie et du rapport cyclique D du contrôleur respectivement.

Ou on remarque que le contrôleur parvient à ajuster le rapport cyclique d de sorte que le niveau de puissance stable soit atteint.

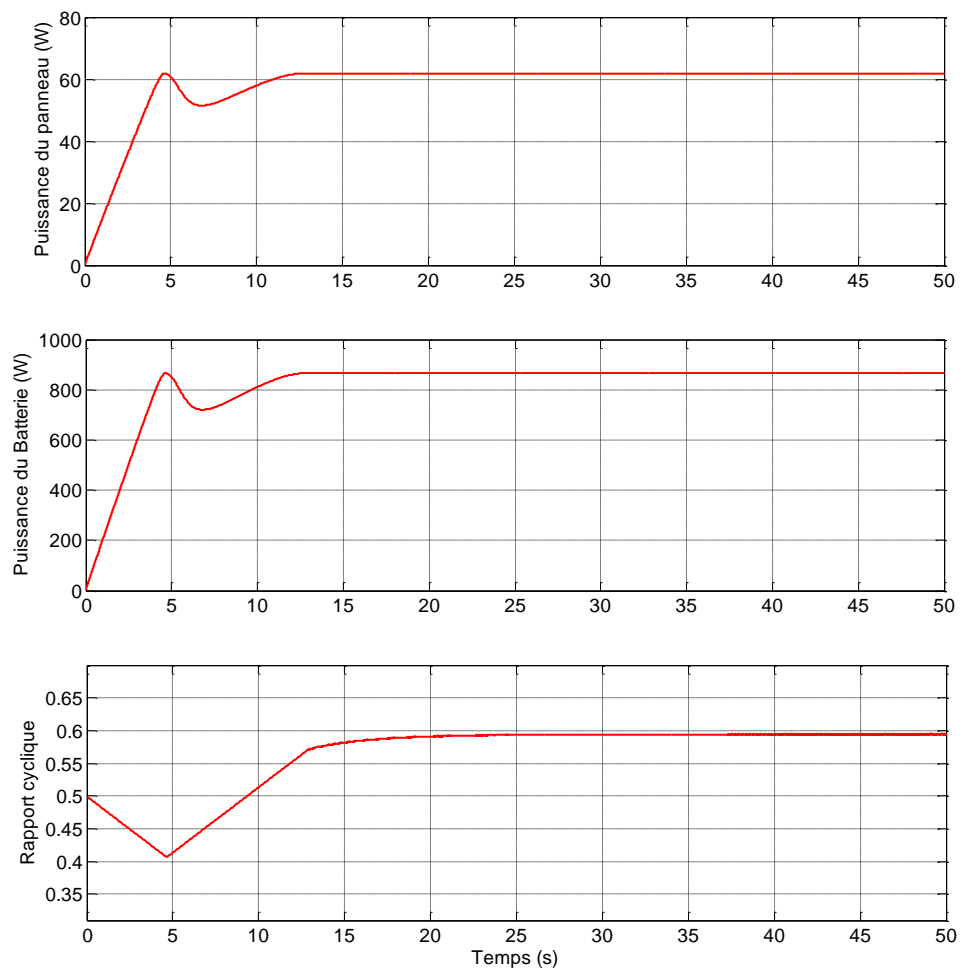


Figure V.4 Résultats de simulation de la méthode P&O combinée avec un hacheur Boost sous des Conditions environnementales stables ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $S=1000\text{ W/m}^2$).

Les résultats de simulation de la figure (V.5) met en évidence le cas réel du contrôleur qui ne peut jamais atteindre le rapport cyclique D optimal, mais il continue à osciller autour d'une valeur limite.

L'amplitude de l'oscillation de la commande dépend directement de la constante d'incrémentacion accordée au contrôleur. Cette dernière, lorsqu'elle est importante permet une convergence rapide du contrôleur vers le PPM adéquat, ce qui donne naissance à des oscillations de la commande autour d'une certaine valeur qui génère à son tour des oscillations au niveau de la puissance figure (V.5), ce qui implique des pertes qui sont proportionnelles à la valeur de la constante d'incrémentacion, et inversement.

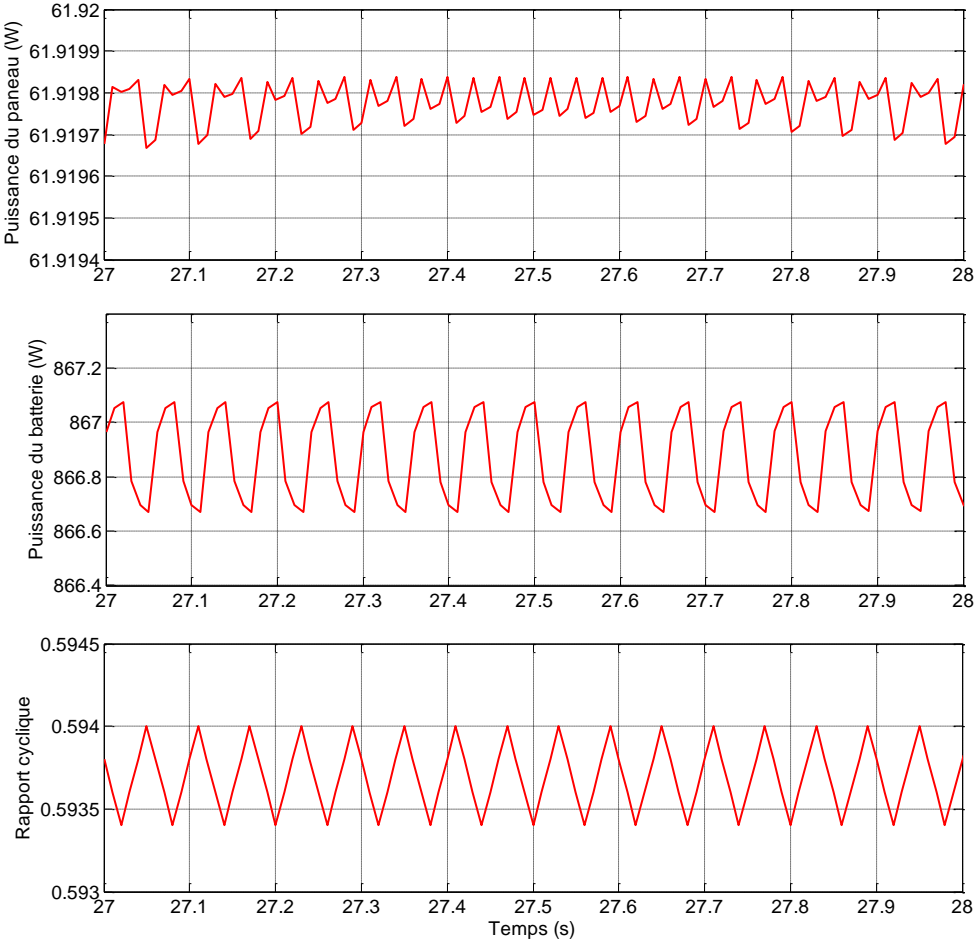


Figure.V.5 Graphe détaillé sur les signaux générés par la méthode P&O, sous des conditions environnementales stables ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $S=1000\text{ W/m}^2$)

V.4 Techniques intelligentes

V.4.1 MPPT flou

Dans le but de visualiser la position du point de puissance maximale par la logique floue, une simulation est effectuée pour une température et un ensoleillement constants, c'est-à-dire une température $T=25^{\circ}\text{C}$ et un ensoleillement $E=1000\text{W/m}^2$.

Sur la figure (V.6), on voit que la réponse du contrôleur flou est beaucoup plus rapide que celle du contrôleur réalisé par la méthode P&O.

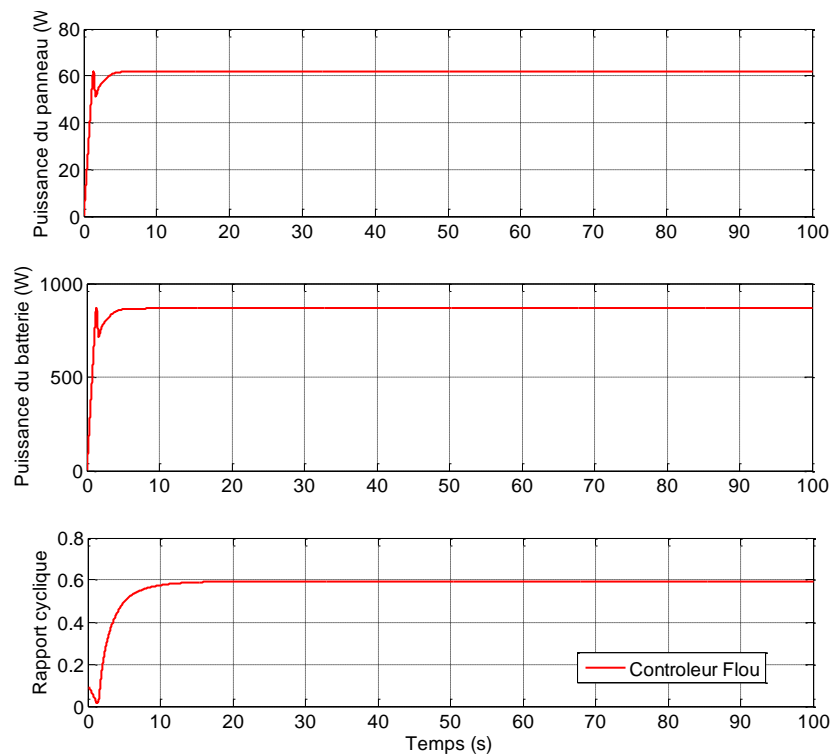


Figure V.6 Variation de la puissance du module, la puissance de la batterie et de la commande D pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

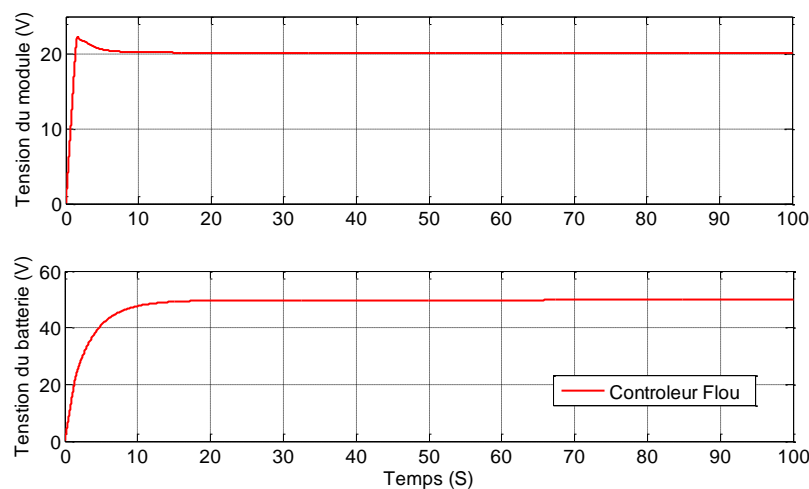


Figure V.7 Courbe de variation des tensions de panneau et de batterie avec le contrôleur Flou.

V.4.2 MPPT PSOF

Une fois le contrôleur PSOF conçu, il est inséré dans le système photovoltaïque. Une simulation est par la suite effectuée. Dans cette section nous allons faire subir notre contrôleur à une température et un ensoleillement constants, c'est-à-dire une température $T=25^{\circ}\text{C}$ et un ensoleillement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

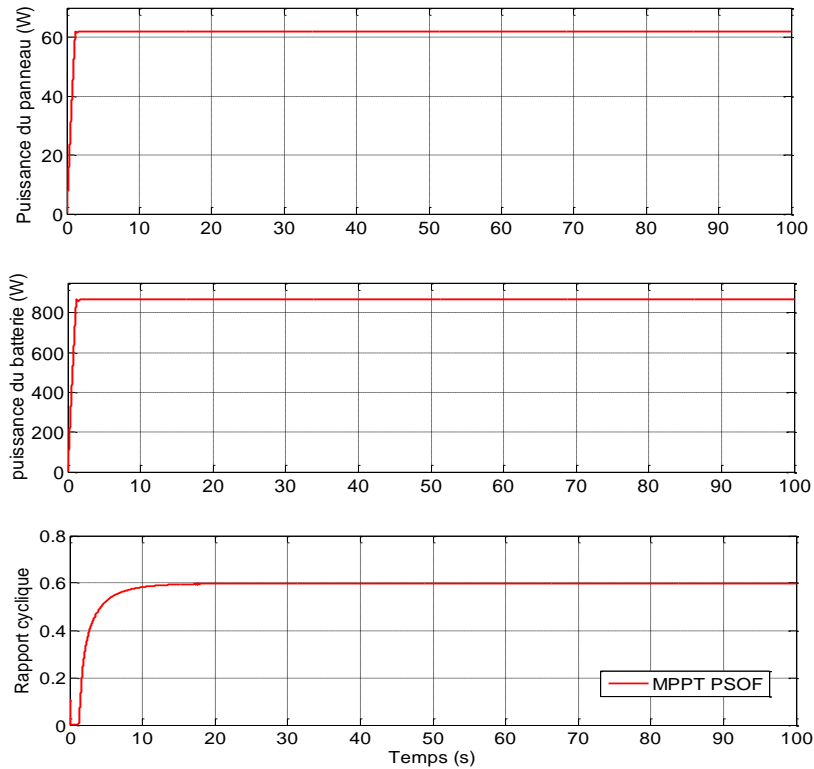


Figure.V.8 Variation de la puissance du panneau, la puissance de la batterie et de la commande D pour un ensoleillement $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température 25°C

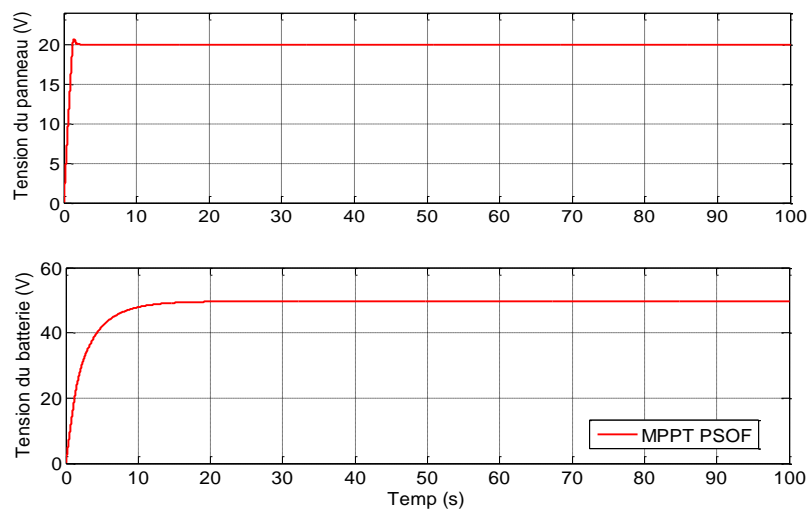


Figure.V.9 Courbe de variation des tensions de panneau et de batterie avec le contrôleur PSOF

V.4.3 MPPT AGF

Après la conception du contrôleur AGF, nous le insérés dans le système photovoltaïque. Une simulation est effectuée par la suite aux mêmes conditions de test que précédemment.

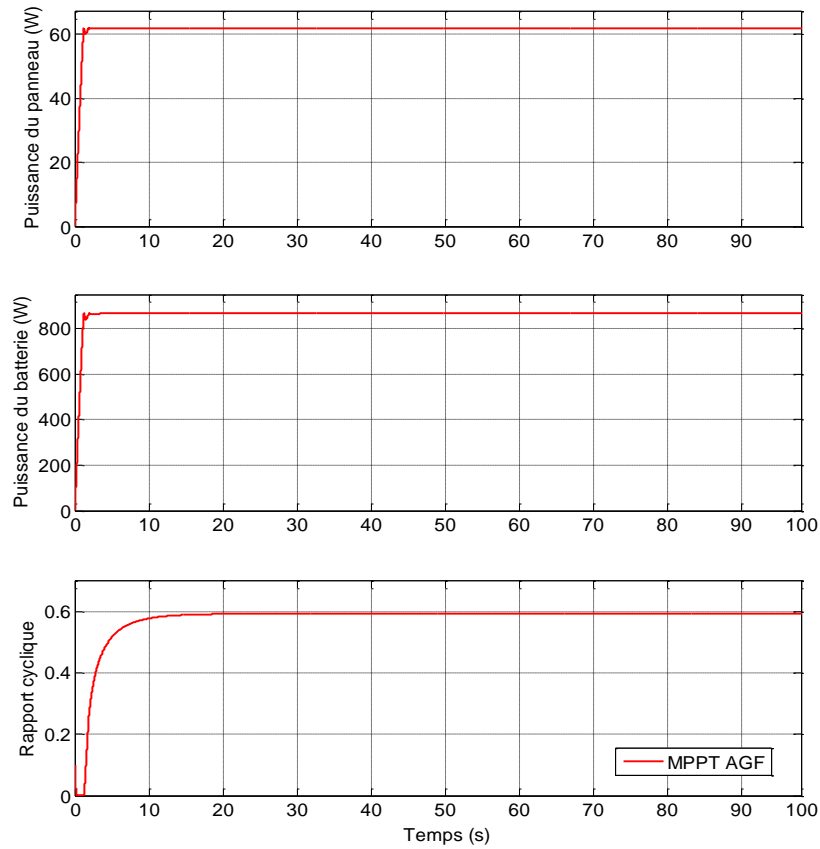


Figure.V.10 Variation de la puissance du panneau, la puissance de la batterie et de la commande D pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m^2

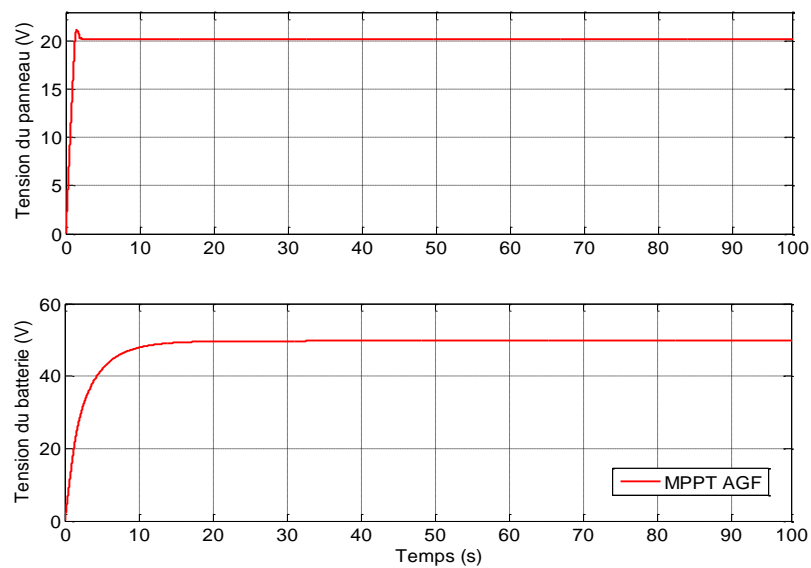


Figure.V.11 Courbe de variation des tensions de panneau et de batterie avec le contrôleur AGF

V.5 Comparaison des résultats des techniques (Floue, PSOF, AGF)

V.5.1 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables

les paramètres de température T et d'ensoleillement E pour faire une étude des performances sont maintenus égaux aux valeurs d'essais standards qui sont respectivement $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ W/m}^2$. L'intérêt majeur sera focalisé sur l'ondulation de puissance provoquée par des oscillations autour du PPM et de la rapidité de convergence vers le PPM.

Nous allons effectuer une étude comparative avec la méthode de « P&O », pour voir les améliorations que présentent ces méthodes intelligentes, mettant ainsi en évidence l'efficacité de chaque technique pour permettre à la fin de montrer la meilleure solution à adopter.

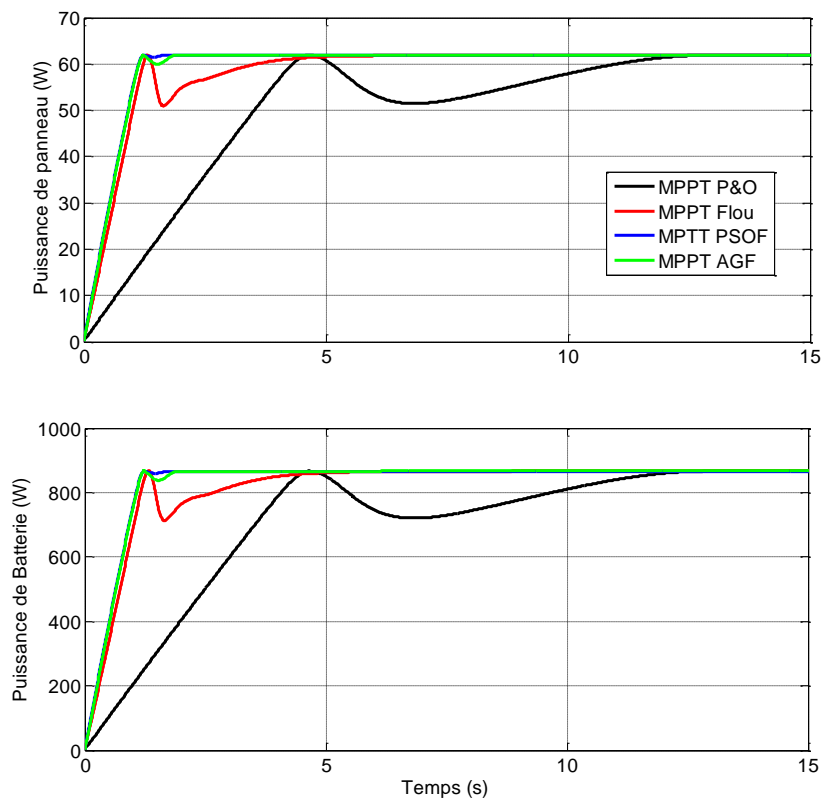


Figure.V.12 Variation de la puissance du panneau PV et de la puissance de la batterie pour un ensoleillement de 1000W/m^2 avec une température de 25°C

La figure (V.12) montre la réponse des différents contrôleurs MPPT utilisés. Cette figure nous montre la différence entre la rapidité des contrôleurs. Les contrôleurs optimisés sont plus rapides que le contrôleur flou original, qui lui-même a prouvé une bonne rapidité par rapport au contrôleur P&O. Et cela s'exprime bien sur les courbes de caractéristiques P-V illustrées sur les figures (V.13), (V.14) et (V.15).

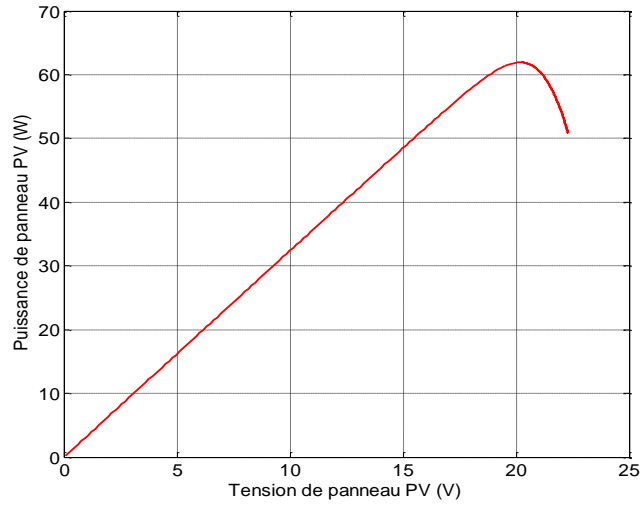


Figure V.13 Courbe de simulation de la caractéristique P-V d'un panneau PV contrôlé par le contrôleur MPPT Flou

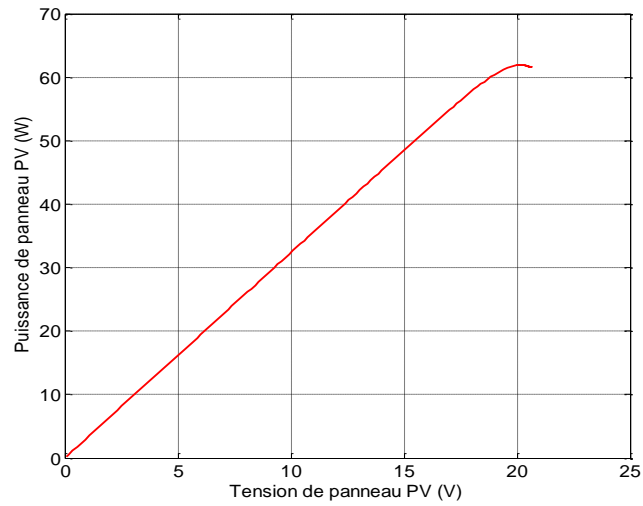


Figure V.14 Courbe de simulation de la caractéristique P-V d'un panneau PV contrôlé par le contrôleur MPPT PSOF

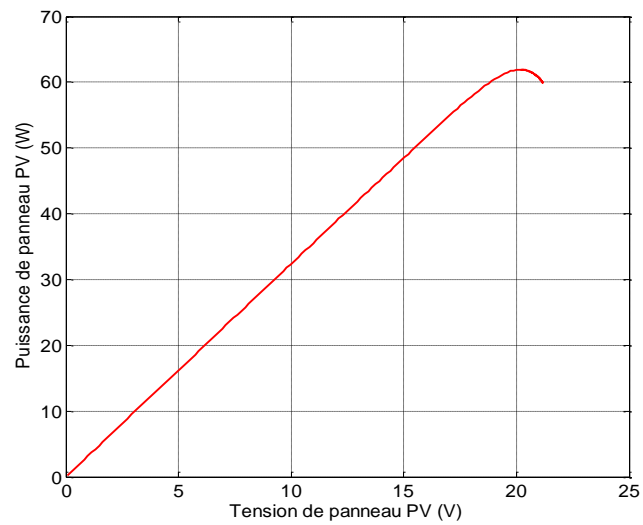


Figure V.15 Courbe de simulation de la caractéristique P-V d'un panneau PV contrôlé par le contrôleur MPPT AGF

Les figures (V.13), (V.14) et (V.15) montrent que les deux contrôleur MPPT PSOF et MPPT AGF cherche dans le bon sens et atteint facilement et directement le PPM, sachant que le contrôleur MPPT PSOF est un peu rapide que le contrôleur MPPT AGF pour atteindre le PPM. Tandis que le contrôleur MPPT Flou perd un peu de temps avant d’atteindre le PPM, cela est dû aux erreurs effectuées lors du choix des valeurs d’intervalle de fonctions d’appartenance.

Une regard plus détaillé sur les signaux des puissances du GPV simulé par les différentes techniques est présentée par la figure (V.16), ou on indique l'oscillation continue du point de fonctionnement trouvé par la technique « P&O ». Tandis que cette oscillation n’est pas produite par les techniques intelligentes où les signaux de puissance restent presque constants. Ceci a comme conséquence une réduction des pertes de puissance.

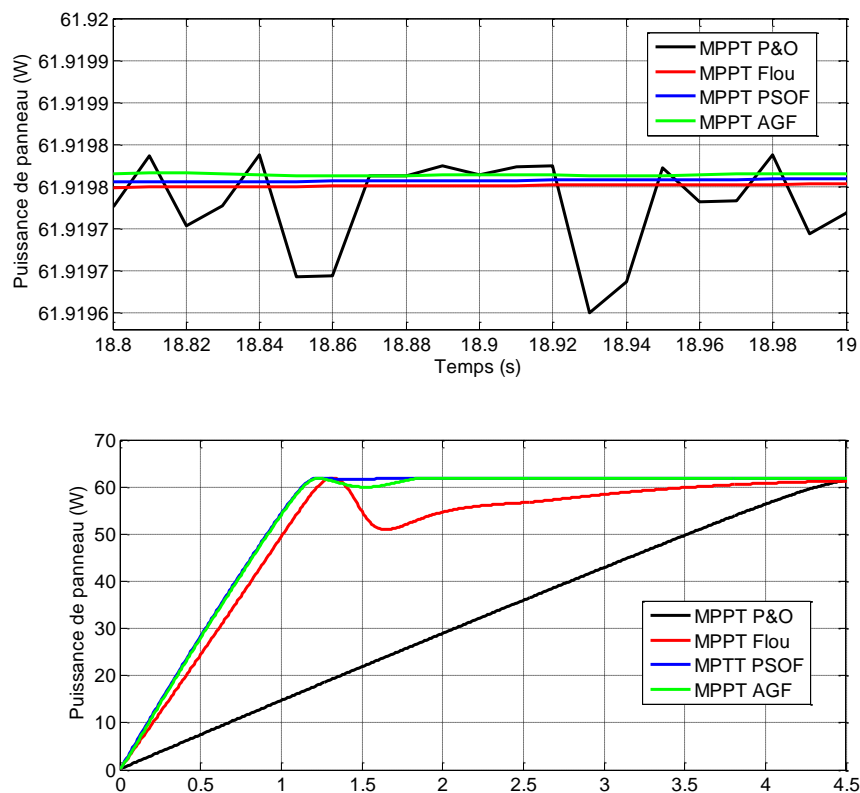


Figure.V.16 Comparaison des divers signaux MPPT (puissance de panneau PV)

Pour faire une étude de la robustesse des contrôleurs vis-à-vis des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

- d'abord on maintient une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et on varie l'éclairement solaire suivant une variation rapide ou bien lente, et dans les deux sens de variation : soit une augmentation ou bien une diminution.
- Ensuite on maintient l'éclairement solaire à une valeur fixe (1000 W/m^2) et on varie la valeur de la température suivant une variation rapide ou bien lente, et dans les deux sens de variation : soit une augmentation ou une diminution.

V.5.2 Simulation sous des conditions variables d'enseillement

❖ Augmentation rapide de l'enseillement (300 à 1000 W/m^2)

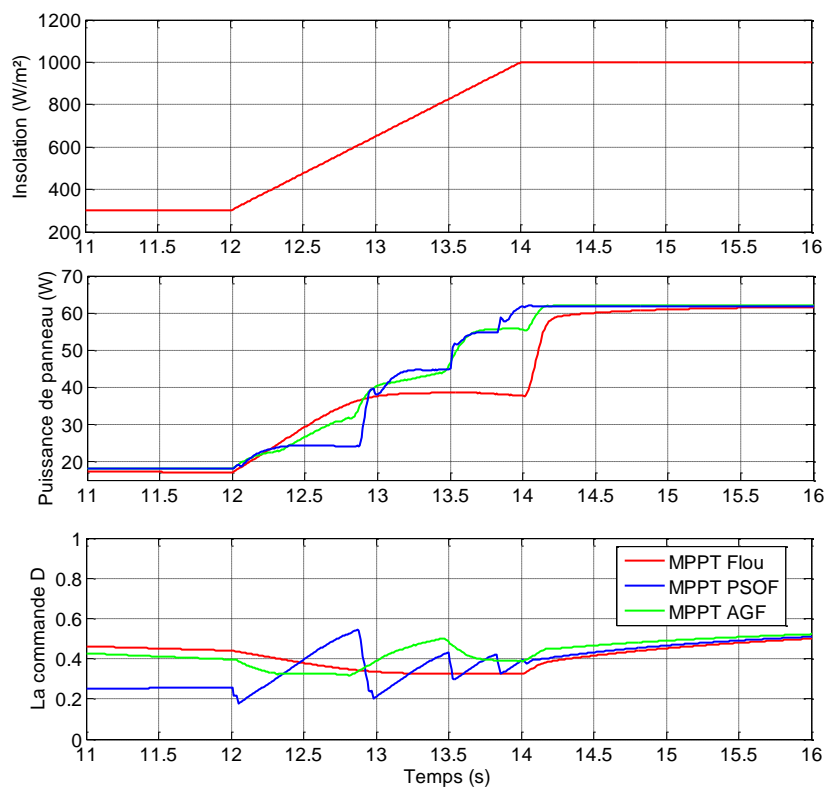


Figure.V.17 Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation rapide de l'enseillement de 300 à 1000 W/m^2 en 2 secondes avec une température constante de 25°C .

Les résultats obtenus lors de ce test montrent que les deux contrôleurs MPPT PSOF, MPPT AGF suivent la consigne (variation de l'enseillement) plus rapidement que le contrôleur MPPT flou qui montre un retard avec de faibles fluctuations.

❖ augmentation lente de l'ensoleillement de (600 à 1000 W/m²)

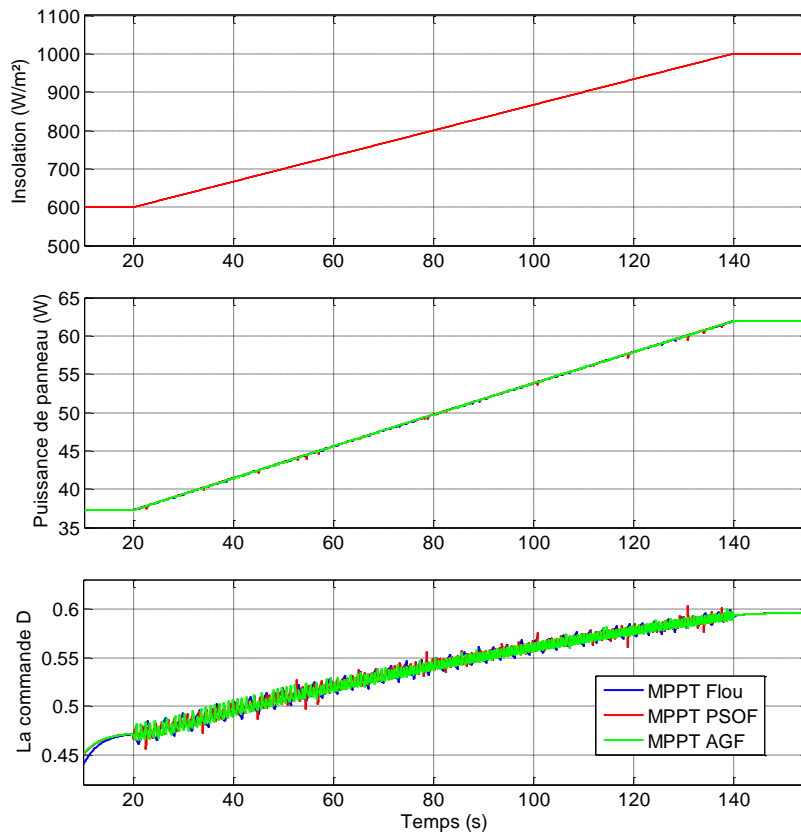


Figure.V.18 Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation lente de l'ensoleillement de 600 à 1000 W/m² en 120 secondes avec une température constante de 25°C

On remarque d'après cette figure que les trois contrôleurs MPPT donnent des résultats presque identiques et présentent une très bonne poursuite.

❖ Diminution lente de l'ensoleillement (1000 à 650 W/m²)

La même conclusion est tirée si en soumettant les contrôleurs MPPT intelligents à une diminution lente de l'ensoleillement de 1000 à 650 W/m², ou on remarque d'après la figure (V.19) que les trois contrôleurs MPPT donnent des résultats presque identiques.

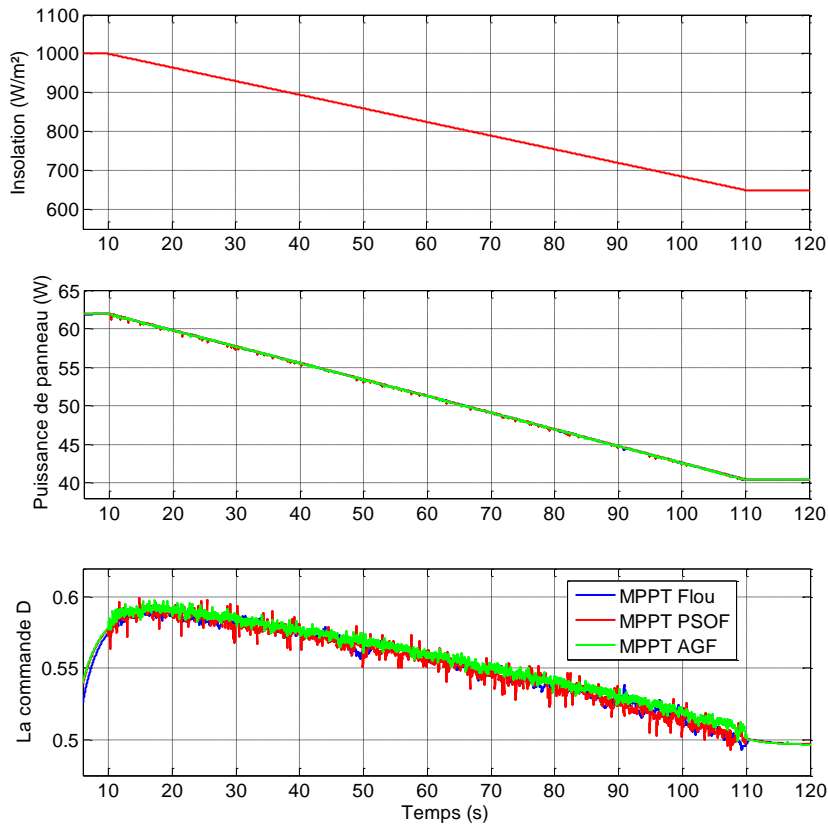


Figure V.19 Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une diminution lente de l'ensoleillement de 1000 à 650 W/m² en 100 secondes avec une température constante de 25°C.

La courbe de la figure (V.20) est une courbe de la caractéristique P-V des trois contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une diminution de l'ensoleillement de 1000W/m² à 650W/m² durant un temps de 100s, sous une température de 25°C. Cette courbe nous montre la recherche qui s'effectue dans le bon sens.

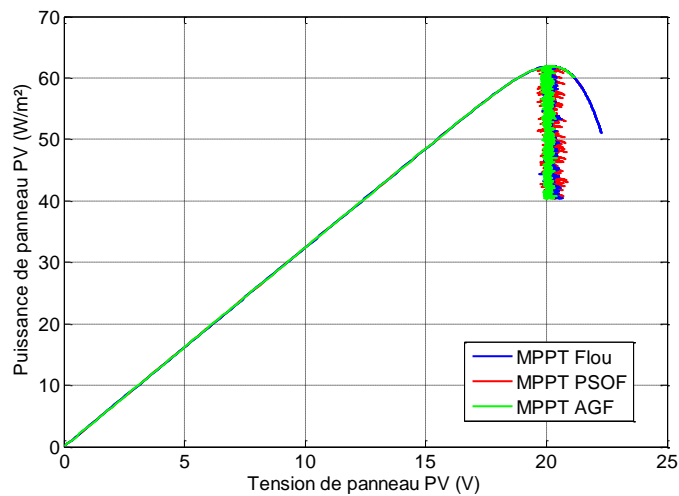


Figure V.20 Courbe de la caractéristique P-V des contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une diminution lente de l'ensoleillement de 1000W/m² à de 650W/m² sous une température de 25°C durant un temps de 100s.

V.5.3 Simulation sous des conditions variables de température

❖ Augmentation rapide de température (30°C à 60°C)

Pour le test sur la variation de la température on fait subir au système PV une augmentation rapide de la température de 30°C à 60°C durant 2 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m². Cette augmentation rapide produit une diminution de la puissance du système.

La figure (V.21) montre clairement le retard qui produit par le contrôleur MPPT flou ainsi que les fluctuations dans la phase transitoire par rapport au deux autres contrôleurs, alors que le contrôleur MPPT AGF présente une poursuite du PPM presque parfaite.

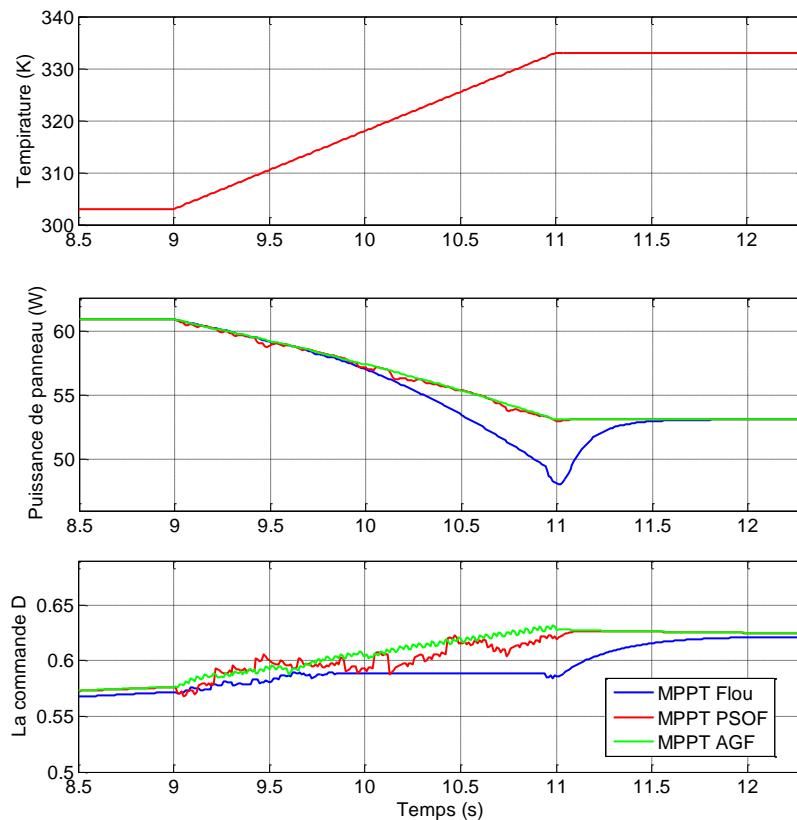


Figure.V.21 Variation de la puissance du panneau et de la commande D pour une augmentation rapide de la température de 30°C à 60°C en 2 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m².

La courbe de la figure (V.22) représente la caractéristique P-V des trois contrôleurs pour une augmentation rapide de la température de 30°C à 60°C pendant 2 sec, sous un ensoleillement de 1000W/m², elle présente la recherche du PPM qui s'effectue dans le bon sens par ces contrôleurs. Cette courbe montre la variation effectuée par le contrôleur MPPT flou avant d'atteindre le nouveau MPP, cette variation est réduite par le contrôleur MPPT PSOF, alors que le contrôleur MPPT AGF tend directement vers ce MPP.

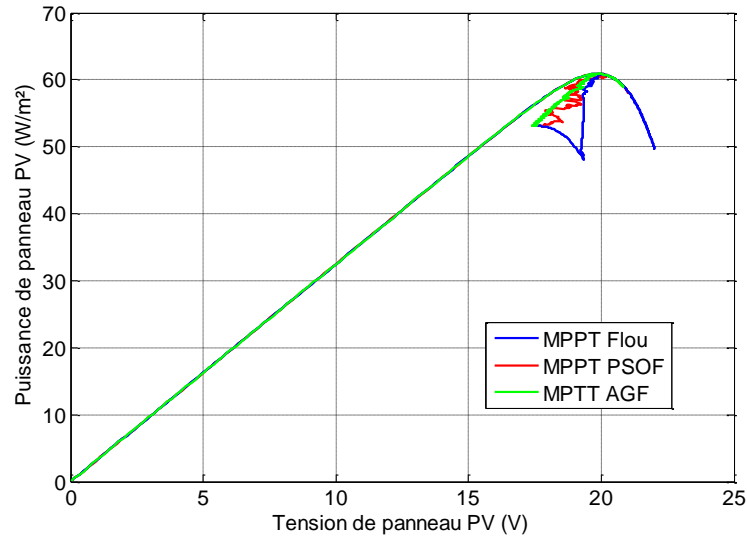


Figure V.22 Courbe de la caractéristique P-V des contrôleurs MPPT Flou et MPPT AGF pour une augmentation rapide de la température de 30°C à 60°C durant 2s avec un ensoleillement de 1000W/m².

❖ **Diminution rapide de la température (25°C à 10°C)**

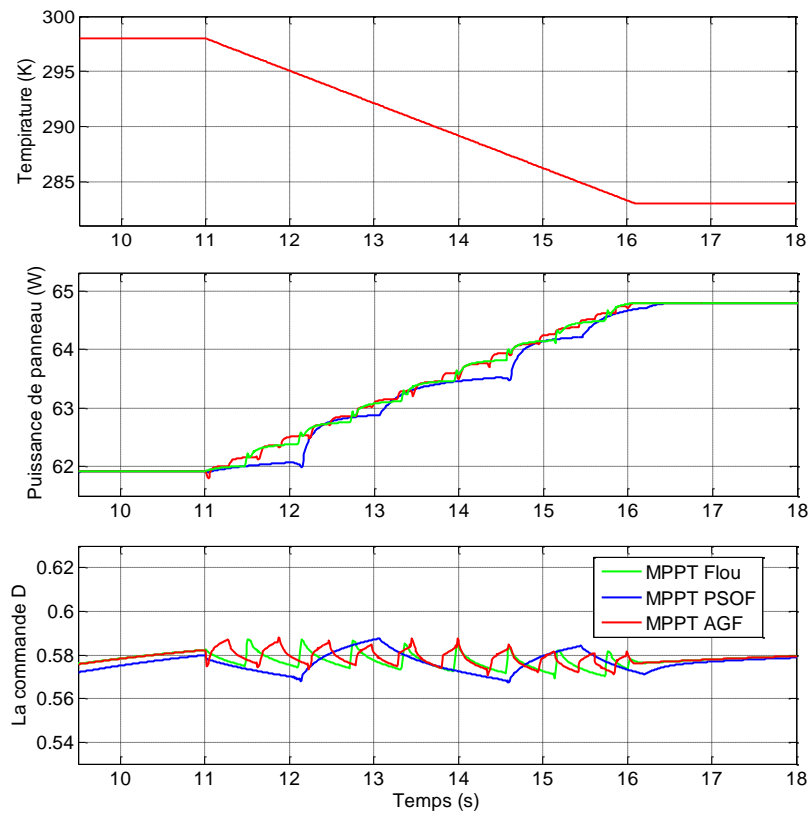


Figure.V.23 Variation de la puissance du module, et de la commande d pour une diminution rapide de la température de 25°C à 10°C durant 5s sous un ensoleillement de 1000W/m².

La diminution rapide produit une augmentation de la puissance mais avec une poursuite qui est parfaite dans la zone transitoire pour les contrôleurs MPPT PSOF et MPPT AGF tandis que le MPPT flou est toujours en retard.

❖ Augmentation lente de la température (30°C à 50°C)

La figure (V.24) montre les signaux de puissance du panneau PV et du rapport cyclique D pour les différentes techniques MPPT intelligentes lorsqu'une augmentation lente de la température de 30°C à 50°C sous un ensoleillement de 1000W/m² est produite dans un laps de temps de 120s. On remarque que les techniques utilisées poursuivent parfaitement la décrémentation linéaire de la puissance.

La courbe du rapport cyclique montre des oscillations importantes à cause du changement du pas d'incrémentatation important utilisé pour atteindre plus rapidement le nouveau PPM.

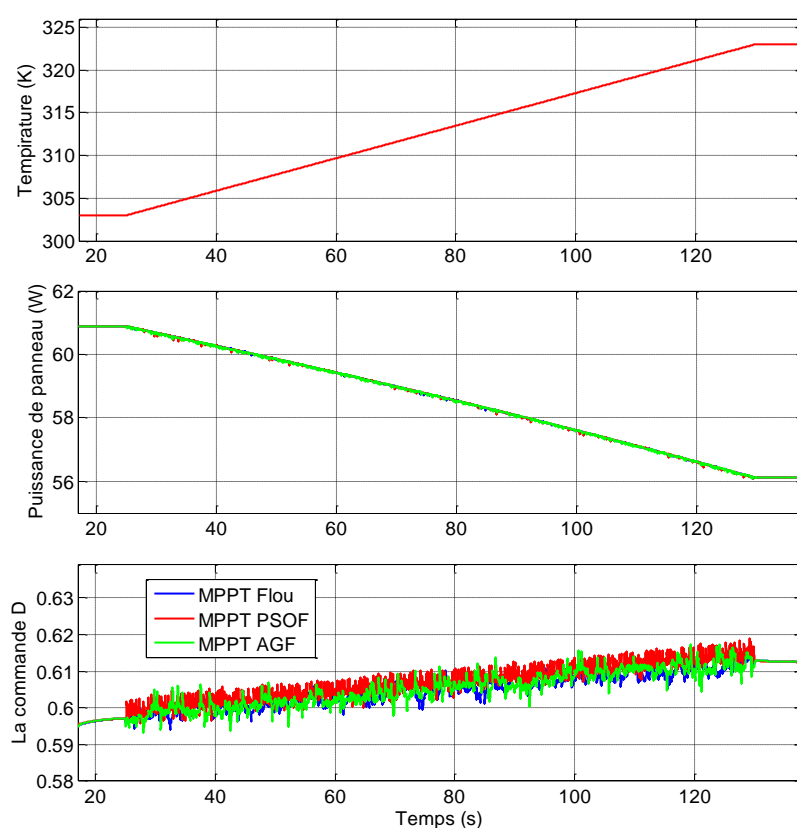


Figure.V.24 Variation de la puissance du panneau, et de la commande D pour une augmentation lente de la température de 30°C à 50°C en 120 secondes avec un ensoleillement de 1000W/m²

Comme pour l'augmentation de la température lente, la diminution lente de la température permet aux contrôleurs de bien poursuivre l'augmentation linéaire de la puissance. La courbe de la figure (V.25) est une courbe de la caractéristique P-V des trois contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une diminution lente de la température de 60°C à 20°C dans un laps de temps de 120s sous un ensoleillement de 1000W/m².

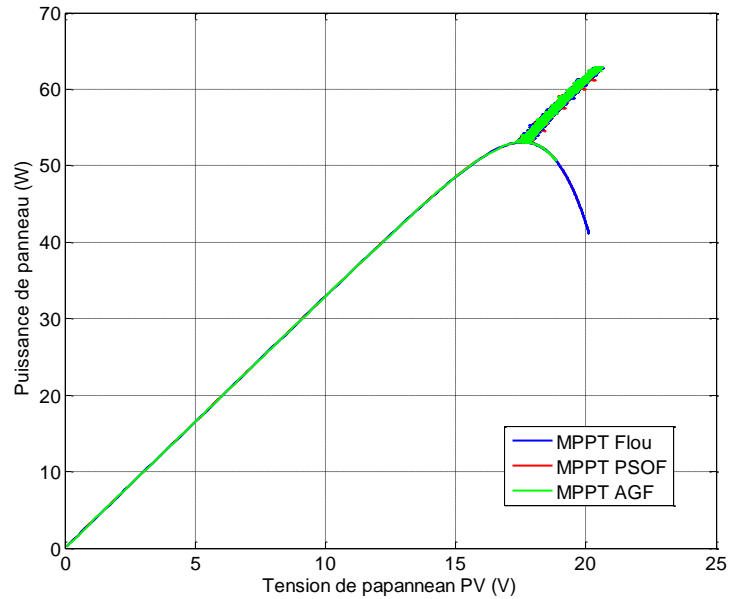


Figure V.25 Courbe de la caractéristique P-V des contrôleurs MPPT Flou, MPPT PSOF et MPPT AGF pour une diminution lente de la température de 60°C à 20°C durant 120s avec un ensoleillement de 1000W/m².

D'après les tests effectués, les résultats obtenus (figures (V.21-V.28)) nous montre la bonne poursuite des trois contrôleurs mais avec une rapidité et un rendement plus élevé pour les contrôleurs MPPT PSOF et MPPT AGF par rapport au contrôleur MPPT flou.

V.6 Conclusion

Les simulations effectuées au sein de ce chapitre, ont une dimension purement pratique, car la seule manière d'évaluer la performance d'un contrôleur numérique avant d'établir un prototype réel est d'effectuer d'abord une simulation. On a vu dans ce chapitre dans le détail la simulation de quatre types de contrôleurs combiné avec un hacheur Boost :

- Un contrôleur P&O.
- Un controller MPPT flou.
- Un contrôleur MPPT flou optimisé par les essaims particulaires.
- Un contrôleur MPPT flou optimisé par les algorithmes génétiques.

Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats de simulations obtenus par les quatre contrôleurs, en les soumettant aux mêmes conditions environnementales dans un but de voir leur rapidité et leur robustesse. Ensuite nous avons comparé les résultats de simulations des trois contrôleurs MPPT flou, MPPT PSOF et MPPT AGF. Nous avons observé au travers des résultats obtenus que quelque soient les conditions, le contrôleur MPPT flou optimisé est celui qui est le plus performant et le plus robuste.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons comme but de réguler la tension du module solaire afin de se positionner au PPM de la caractéristique P-V quelles que soient les conditions de température et d'ensoleillement. Pour cela une commande qui maintient le point de fonctionnement du module précisément au PPM de la caractéristique P-V est nécessaire.

Des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite du PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

Nous avons fait une étude de plusieurs méthodes valides dans la recherche du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Tel la méthode P&O qui a été déjà testés et qui a montré un certain retard pour atteindre le PPM, même aussi une oscillation autour cette point qui produit une perte de puissance. Plusieurs solutions, qui permettent d'augmenter le rendement global électrique d'un système photovoltaïque, ont été proposées.

Dans ce mémoire nous avons présenté deux genres d'algorithmes d'optimisation (PSO, AG) appliqués à un contrôleur floue pour trouver les meilleures fonctions d'appartenances, comme une parmi les solutions qui permettent de poursuivre le point de puissance maximale.

Les deux nouvelles solutions de commande, la commande PSOF et la commande AGF, proposées ont été testées pour montrer leurs efficacités. Les résultats de simulation à l'aide du logiciel Matlab de l'ensemble du système photovoltaïque en utilisant un convertisseur survolteur (Boost) montrent que les deux approches ont donné les meilleures performances du point de vue stabilité et de rapidité mais l'approche floue a montré aussi qu'elle a des bonnes performances par rapport la méthode P&O.

Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens. Nous pouvons également envisager de les améliorer. Il serait également intéressant de voir l'effet de l'utilisation d'autres architectures hybrides (éolienne-photovoltaïque) ainsi que d'autres algorithmes hybrides (PSO-AG).

Bibliographie

- [1] R. Chenni, '*Etude technico-economique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire*'. Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, février 2007.
- [2] M. Angel Cid Pastor, '*Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*'. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, septembre 2006.
- [3] C. Cédric, '*Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*'. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [4] R. Gottschalg, M. Rommel, D. Ineld, and H. Ryssel, '*Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation*'. 14th European Photovoltaic Science and Engineering Conference, Barcelona, Spain, 1997.
- [5] X. Liu, Lopes, '*An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays*'. Power Electronics Specialists Conference, June 2004.
- [6] N. Fernia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, '*Optimizing Duty-Cycle Perturbation of P&O MPPT Technique*'. Power Electronics Specialists Conference, June 2004.
- [7] H. Chihchiang, S. Chihming, '*Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power System*'. IEEE Record of Power Electronics Specialists Conference, 1998.
- [8] Y.C. Kuo, T.J.Liang and J.F.Chen, '*Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.48, No.3, pp.1-8, June 2001.
- [9] J. M. Navarro, '*Cellules photovoltaïques organiques transportantes dans le visible*'. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III- Paul Sabatier, 2008.
- [10] S. M. Ait cheikh, '*Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*'. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique. Décembre 2007.
- [11] M. Petibon Stéphane, '*Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications*'. Thèse de doctorat, Université Toulouse III- Paul Sabatier, 20 Janvier 2009.

- [12] S. Astier, P. Chapoulie, D. Harribey. ‘ *Modélisation et contrôle d’un système autonome à générateur photovoltaïque. Application à l’énergisation d’un véhicule électrique solaire*’. Journées CPGE ENSEEIHT 20/05/99.
- [13] A. Ricaud, ‘ *Photopiles solaires*’. Presses Polytechnique et universitaires romandes, Paris.1996.
- [14] N. Oleksiy, ‘ *simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigites*’. Thèse de doctorat à l’institut national des sciences appliquées de lyons.
- [15] V. Stéphane, ‘ *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion*’. Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [16] L. Bailly, ‘ *Systèmes photovoltaïques organiques souples à grande surface*’. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 2010.
- [17] J. P. Charles, A. Haddi, M. Alain, H. Bakhtiar, A. Zerga, A. Hoffmann, P. Mialhe, ‘ *The junction, of solar with micro-electronics*’. Rev. Energ. Ren. Vol.3, pp 1-16, 2000.
- [18] M. S. Imamura and J. I. Portscher, ‘ *Year Evaluation of the Methods of Determining Solar Cell Series Resistance*’. Proc. 8^{HT} Photovoltaic Specialists' Conf., Seattle, WA, pp 102-107, 1970.
- [19] A. Martin Green, ‘ *Silicon solar cells: At the crossroads. Progress in Photovoltaics: Research and applications*’. Vol. 8, pp 443-440. 2000.
- [20] R. Sastrawan, J. Renza, C. Prah, J. Beier, A. Hinsch, R. Kerna, ‘ *Interconnecting dye solar cells in modules—I-V characteristics under reverse bias*’. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 178 (2006) 33–40.
- [21] N. Laverdure, ‘ *Sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires*’. Thèse de doctorat, de L’INPG Spécialité Génie Electrique Institut national polytechnique. Décembre 2005.
- [22] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, ‘ *Technologie des systèmes éoliens-intégration dans les réseaux électriques*’, la Revue 3EL, no. 39, 2004.

- [23] S. Singer, A. Braunstein, “ *A general model of maximum power point tracking*”. Proceedings of MELECON’85 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Madrid, Spain pp147-151.
- [24] S. Singer, A. Braunstein, “ *Maximum power transfer from a nonlinear energy source to an arbitrary load*” IEEE Proceedings, Pt G, 1987 pp 1-7.
- [25] C.F. Lu, C.C. Liu, and C.J. Wu, '*Dynamic modeling of battery energy storage system and application to power system stability*', In IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Volume 142(4), pages 429-435, IEE, Stevenage, Herts., U.K., July 1995.
- [27] Z.M. Salameh, M.A.Casacca, A.W.Lynch, “ *A mathematical model for lead-acid batteries*”. IEEE Transactions on Energy Conversion, 7(1):93-98, March 1992.
- [28] C. Neville Richard, “ *Solar Energy Conversion: The Solar Cell*”. vol. 1 of Studies in Electrical and Electronic Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1978.
- [29] H Lim and D.C. Hamill. “Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays”. Electronics letters, Vol. 36 No. 11, 25thMay 2000.
- [30] R Muhida, M Park, M Dakkak, K Matsuura, A Tsuyoshi, M Michira “ *A maximum power point tracking for photovoltaic-SPE system using a maximum current controller*”. Solar Energy Materials & Solar Cells 75 pp 697–706, 2003.
- [31] G. J. Yu. Y. S. Jung, J. Y. Choi, I. Chog. J. H. Song. G. S. Kim “ *a novel two-mode mppt control algorithm based on comparative study of existing algorithms*”. IEEE pp 1531-1534. 2002.
- [32] L. Santos, F L. M. Antunes " *Maximum Power Point Tracker for PV Systems* “.Rio 3 - World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, Brazil, December 2003.
- [33] Z. M. Salameh, F. Dagher, W.A. Lynch. “ *Step-down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems* “, Solar Energy, Vol. 46, N° 5, pp. 279-282, 1991.
- [34] Z. Salameh, D. Taylor, “ *Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays*”, *Proc. Of the 1988 annual meeting of the American Solar Energy Society*, Cambridge, USA, pp. 409-414, 20-24 June 1988.
- [35] D. Pefitsis, G. Adamidis, A. Balouktsis, " *An investigation of new control method for MPPT in PV array using DC – DC buck – boost converter*", Vas.Sofias 12, 67100, Xanthi GREECE, Terma Magnesias, 62124, Serres GREECE.

- [37] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada. “*Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions*”. IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution, vol. 142(1), pp. 59-64, January 1995.
- [38] Zadeh, L. A. Soft computing and fuzzy logic. *IEEE Software*, 11(6), pp 48-56, 1994.
- [39] Mamdani, E.H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man Mach. Studies*, 7(1) : 1–13, 1975.
- [40] Ostergaad, J.J. Fuzzy logic control of a heat exchange process. in *Fuzzy Automata and ecision Processes*, M.M. Gupta, G.N. Saridis, and B.R. Gaines,Eds., pages 285–320, 1977.
- [41] Willaeyts, D., Malvache, N. Use of fuzzy model for process control. *IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, 1978.
- [42] Tamakawa, T. High speed fuzzy controller hardware system. *Proc. 2nd Fuzzy System Symp.*, pages 122–130, 1986.
- [43] Kennedy J. and Eberhart R. Particle Swarm Optimization, In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, vol. 4, 1995.
- [44] Clerc M. and Kennedy J., The Particle Swarm: Explosion, Stability and Convergence in a Multi- Dimensional complex Space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, 2001.
- [45] L. Benameur, “ *Contribution à l’optimisation complexe par des techniques de swarm intelligence* ”. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Rabat, 13 mai 2010.
- [46] A. Toumi, “ *Restauration adaptative d’image par les methodes intelligentes*”. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 5 février 2013.
- [47] Kennedy J. & Eberhart R.C., *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufman Publishers, Academic Press, 2001.
- [48] A. Eldor, “ *Perfectionnement des algorithmes d’Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d’images et en électronique*”. Thèse de doctorat, Université de Paris EST, 15 décembre 2012.
- [50] IEEE Committee Report. ” *Tutorial on Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems*”. IEEE Power Engineering Society, 02TP160, 2002.
- [51] D.Mokaddem, “ *Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d’Algorithmes Génétiques*”. Université de Sétif, 11 juillet 2010.
- [52] E. Bonilla Huerta, ” *Logique floue et algorithmes génétiques pour le pré-traitement de données de biopuces et la sélection de gènes*”. Université d’Angers, 13 novembre 2008.

ملخص:

الطاقة الضوئية هي نتيجة التحويل المباشر لجزء من اشعة الشمس الى طاقة كهربائية من خلال لوح شمسي. الطاقة الناتجة تتأثر بعدة عوامل : شدة الانارة الشمسية, درجة حرارة اللوح الشمسي. لهذا السبب من الضروري تعقب نقطة الإستطاعة العظمى بهدف الحصول على احسن خصائص الألواح الشمسية. العمل المطروح في هذه المذكرة يتمثل في استعمال تقنيتين جديدتين: خوارزمية الاسراب و الخوارزمية الجينية لتطوير مراقب المنطق الغامض بهدف تحسين زمن الاستجابة و انقاس اهتزازات الطاقة. النتائج المتحصل عليها تبين أن الطريقتين المستعملتين تحسن من خصائص مراقب المنطق الغامض الاصيلي.

كلمات مفتاحية: تعقب نقطة الإستطاعة العظمى, كهروضوئي, محول مستمر, مراقب المنطق الغامض, خوارزمية الاسراب, الخوارزمية الجينية

Résumé :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique effectuée par le biais d'une cellule photovoltaïque. La puissance produite est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire, la température des cellules et aussi par la charge. C'est pourquoi, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPPT) de la source d'entrée, afin d'optimiser l'utilisation du générateur PV.

Dans ce travail, de nouvelles méthodes MPPT sont introduits utilisant deux algorithmes d'optimisation PSO et AGs pour améliorer les fonctions d'appartenance d'un contrôleur flou, dans un but de réduire non seulement le temps nécessaire pour la poursuite mais aussi pour la réduction des fluctuation de la puissance, Les résultats de la simulation montrent que les performances des deux contrôleurs obtenu ont été améliorés par rapport à celle d'un contrôleur flou originale.

Mots clés : MPPT, Photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, Contrôleur logique floue, Fonction d'appartenance, Optimisation, PSO, AGs.

Abstract :

Photovoltaic systems (PV) are a device that converts solar energy into electrical energy. it consists of several solar cells, The output power induced is influenced by the intensity of solar cell insolation, temperature of the solar cells and by the load. hence, it is important to track the maximum power point (MPPT) of the input source to use the panel at the optimal point.

In this work, new MPPT methods have been applied by using two optimization algorithms PSO and AGs to finding the optimum membership functions (MFs) of a fuzzy logic controler, in order to reduce not only the time required to track the maximum power point but also to reduce powers' fluctuation. Simulation results show that performance of the two controlers obtained have a better behavior than that a original fuzzy logic controller.

Key-words: MPPT, Photovoltaic, DC-DC Converter, Fuzzy logic control (FLC), Membership functions (MFs), Optimization, PSO, AGs.