REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master en

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : ENERGIES RENOUVELABLES EN ELECTROTECHNIQUE

ALIMENTATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE PAR UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE COMMANDE PAR L'ALGORITHME D'OPTIMISATION DU LOUP GRIS

Présentés par :

- **Mr BOULMAALI MOHAMED**
- **Mr DAOUD ZAKARIA**

Proposés et Dirigés par :

Promoteur : **Mr MORSLI Abdelkader**

Co-promoteur : **Mr KHELIL CHERFI Mohamed**

Promotion 2022-2023

Dédicaces

On dédie ce travail à nos chers Parents respectifs, nos sœurs et frères pour le soutien et l'assistance permanents tout le long de notre carrière scolaire et universitaire, Que DIEU nos donne la force et courage d'embellir leurs jours

Une pieuse pensée à mes défunts grands-pères qui restera toujours vivant dans nos cœurs

Ces dédicaces vont aussi de manière chaleureuse et amicale à l'endroit de tous nos amis : Muntasir, Yousef, Amar, Aymen, Hussam, Rachid, Oussama et Tous les éléments de la classe ENERGIES RENOUVELABLES EN ELECTROTECHNIQUE

Boulmaali Mohamed
Daoud Zakaria



Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord DIEU le tout puissant qui nous a donnés durant toute l'année la santé, le courage et la foi en nous même pour arriver à ce jour.

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre promoteur Mr MORSLI ABDELKADER et Co-promoteur Mr KHELIL CHERFI Mohamed pour ses valeureux conseils et son aide tout au long de ce travail.

Nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **I**

TABLE DES MATIERES ..... **II**

LISTE DES FIGURES ..... **III**

LISTE DES TABLEAUX ..... **IV**

NOTATIONS ET ABREVIATIONS ..... **IIV**

INTRODUCTION GENERALE **1**

CHAPITRE.I : NOTIONS SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

I.1 Introduction 4

I.2 Le solaire photovoltaïque 4

I.2.1 Le gisement solaire 4

I.2.2 La cellule photovoltaïque 7

I.3 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque 9

I.3.1 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV 11

I.4 Les différents types de cellules solaires et leur rendement 13

I.4.1 Le silicium monocristallin 13

I.4.2 Le silicium multi cristallin (poly cristallin) 14

I.4.3 Le silicium amorphe 15

I.4.4 Une quatrième technologie 15

I.5 Association des modules photovoltaïques 16

I.5.1 Le module photovoltaïque 17

I.5.2 Caractéristiques d'un module 18

I.5.3 Influence de l'éclairement 19

I.5.4 Influence de la température 19

I.6 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque 20

I.6.1 Convertisseur DC/DC 20

I.6.2 Les types de convertisseurs DC/DC 22

I.6.3 Hacheur parallèle (Boost) 23

I.6.4 Dimensionnement et choix des composants $\boldsymbol{L}$ et $\boldsymbol{C}$ de l'hacheur Boost 25

I.7 Les avantages et les inconvénients des énergies solaires photovoltaïque 25

I.8 Conclusion : 26

CHAPITRE.II : PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

II.1 Introduction : 27
II.2 Perturbations affectant le réseau électrique de distribution 27
II.2.1 Creux et coupures de tension 27
II.2.2 Fluctuations de tension 28
II.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension 29
II.2.4 Variation de fréquence 29
II.2.5 Les harmoniques 29
II.2.6 Les effets des harmoniques 34
II.3 Solutions de dépollution du réseau électrique 35
II.3.1 Solutions traditionnelles de dépollution 35
II.3.2 Solutions modernes de dépollution 36
II.4 Le filtre actif parallèle 40
II.4.1 Principe de fonctionnement 40
II.4.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle 41
II.4.3 Applications des filtres actifs parallèles 42
II.4.4 Classement des filtres actifs parallèles 42
II.5 Structure de l'onduleur à deux niveaux 43
II.6 Conclusion 44

CHAPITRE.III : TECHNIQUE D'OPTIMISATION DE L'ENERGIE

III.1 Introduction 45
III.2 Principe de la commande MPPT 45
III.2.1Classification des Commandes MPPT 46
III.2.2Classification des Commandes MPPT selon le type de recherche 47
III.3 Les algorithmes MPPT 48
III.3.1Approche de la tension constante (CV, Constant Voltage) 48
III.3.2Approche du courant constant (Constant Current) : 50
III.3.3Perturbation et Observation (P&O, Perturb And Observe) 51
III.3.4Conductance Incrémentale 54
III.3.5La Commande MPPT Flou 57
III.3.6Autres Méthodes 59
III.4 Algorithmes Meta-heuristiques ou intelligents 59

III.5 Méthode d'optimisation par les loups gris GWO : 61
III.5.1Inspiration 62
III.5.2Modèle mathématique et algorithme 64
III.5.3Application de GWO pour le MPPT 70
III.7 Conclusion 72

CHAPITRE IV : SIMULATION ET EXPEREMENTATION

IV.1 Introduction 73
IV.2 Simulation d'une alimentation d'un Filtre Actif Parallèle par système photovoltaïque basé sur un onduleur deux-niveaux : 73
IV.3 Caractérisation du générateur PV 73
IV.4 Les résultats de simulation avant l'application de FAP 76
IV.5 Les résultats de simulation après l'application de FAP 78
IV.5.1Simulation d'Implémentation de l'algorithme P&O : 79
IV.5.2Simulation d'Implémentation de l'algorithme GWO : 83
IV.5.3Comparaison entre les deux algorithmes P&O et PWO : 87
IV.6 Conclusion : 87

CONCLUSION GENERALE : 88
ANNEXE.
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

Liste des figures

CHAPITRE.I : NOTIONS SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Figure I. 1-Gisement solaire.....5
Figure I. 2- Carte de gisement solaire en Algérie. 5
Figure I. 3-Le mouvement de la terre. 6
Figure I. 4-Schéma d'une cellule élémentaire. 8
Figure I. 5-(A) caractéristique d'une photodiode, (B) caractéristique d'une Cellule Photovoltaïque. 8
Figure I. 6- Cellules, modules et panneau photovoltaïques 9
Figure I. 7- Représentation de la cellule PV idéale.....9
Figure I. 8- Représentation de la cellule PV réelle 10
Figure I. 9- Caractéristique courant-tension électriques d'une cellule PV 12
Figure I. 10- Caractéristique puissance-tension électriques d'une cellule PV.....12
Figure I. 11- Cellule photovoltaïque de type silicium monocristallin 14
Figure I. 12- Cellule photovoltaïque de type silicium multi cristallin.....14
Figure I. 13-Cellule photovoltaïque de type silicium amorphe 15
Figure I. 14- Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une autre au silicium cristallin (sous 1000 W/m2) 16
Figure I. 15- Association des modules photovoltaïques. 17
Figure I. 16-Un panneau photovoltaïque. 18
Figure I. 17- Caractéristique P-V du module PV selon la variation d'éclairement 19
Figure I. 18-Caractéristique I-V du module PV selon la variation d'éclairement 19
Figure I. 19- Caractéristique P-V du module PV selon la variation de température 20
Figure I. 20- Caractéristique I-V du module PV selon la variation de température 20
Figure I. 21- Schéma d'un quadripôle électrique.....21
Figure I. 22- Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....22
Figure I. 23-Hacheur parallèle. 23
Figure I. 24- Fonctionnement à courant de source ininterrompu.....24
Figure I. 25- Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu.....25

CHAPITRE.II : PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

Figure II. 1-Creux et coupures de tension 28
Figure II. 2-Fluctuations de tension 28
Figure II. 3-Déséquilibre du système triphasé de tension 29
Figure II. 4-Variation de la fréquence 29
Figure II. 5- Filtre passif résonant. 36
Figure II. 6-Filtre passif amorti. 36
Figure II. 7- Montage d'un correcteur du facteur de puissance (PFC) 37
Figure II. 8-Redresseur MLI 38
Figure II. 9-Filtre UPQC. 38
Figure II. 10-Filtre actif de puissance série. 39
Figure II. 11-Filtre actif de puissance parallèle 39
Figure II.12- Principe du filtrage actif parallèle 41
Figure II. 13-Structure générale d'un filtre actif parallèle 41
Figure II. 14- Schéma d'un onduleur de tension triphasé 44

CHAPITRE.III : TECHNIQUE D'OPTIMISATION DE L'ENERGIE

Figure III 1-Chaîne de conversion d'énergie solaire 45
Figure III 2- Principe de la commande MPPT 46
Figure III 3-Algorithme de la tension constante 49
Figure III 4-Algorithme du constant courant 50
Figure III 5- Recherche du PPM par la méthode (P&O) 51
Figure III 6- l'algorithme de P&O classique 52
Figure III 7- Divergence de la méthode P&O 53
Figure III 8-Caractéristique de tension-puissance du panneau 54
Figure III 9-l'algorithme IncCond classique 56
Figure III 10-Structure de base de la commande floue 57
Figure III 11- Exemple de classification des méthodes méta heuristiques. 60
Figure III 12- Exemple de l'optimum global d'un problème d'optimisation. 60
Figure III 13- Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas) 62
Figure III 14-Comportement de chasse des loups gris : (A) chasse, approche et suivi des proies (B-D) poursuite, harcèlement et encerclement (A) situation stationnaire et attaque 64
Figure III 15-Vecteurs de position 2D et 3D et leurs prochains emplacements possible 66

Figure III 16-Mise à jour du poste dans GWO 67
Figure III 17- L'attaque d'une proie ou la recherche d'une proie 67
Figure III 18-Pseudo code de l'algorithme GWO 69
Figure III 19- Schéma fonctionnel de la méthode MPPT-GWO 70
Figure III 20-Organigramme de l'algorithme GWO. 71

CHAPITRE IV : SIMULATION ET EXPEREMENTATION

Figure IV. 1-Système de compensation des harmoniques par GPV 73
Figure IV. 2-Caractéristique P-V du module PV selon la variation d'éclairement 74
Figure IV. 3-Caractéristique I-V du module PV selon la variation d'éclairement 74
Figure IV. 4-Caractéristique P-V du module PV selon la variation de température 75
Figure IV. 5-Caractéristique I-V du module PV selon la variation de température 75
Figure IV. 6-Courant de charge Ica 76
Figure IV. 7-l'ordre de THD sans FAP..... 77
Figure IV. 8-Courant de charge Ica avec la tension de source Vsa. 77
Figure IV. 9-Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par MLI. 79
Figure IV. 10-Le circuit hacheur BOOST utilisé pour réaliser le MPPT P&O 80
Figure IV. 11-Tensions d'entré (Vpv)et de sortie(Vs) du convertisseur Boost avec P&O 80
Figure IV. 12-Evolution du Rapport cyclique D avec P&O. 81
Figure IV. 13-Courant de charge Ica, Courant harmonique Iha, Courant de source Isa avec P&O. . 81
Figure IV. 14-L'ordre de THD avec FAP et P&O..... 82
Figure IV. 15-Allure de la tension de source Vsa et le courant source Isa après filtrage par P&O... 82
Figure IV. 16-Le circuit hacheur BOOST utilisé pour réaliser le MPPT –GWO..... 83
Figure IV. 17-Tensions d'entré (Vpv)et de sortie(Vs) du convertisseur Boost avec GWO 84
Figure IV. 18-Evolution du Rapport cyclique D avec GWO. 84
Figure IV. 19-Courant de charge Ica, Courant harmonique Iha, Courant de source Isa avec GWO. 85
Figure IV. 20-L'ordre de THD avec FAP et GWO 85
Figure IV. 21-Allure de la tension de source Vsa et le courant source Isa. 86

Liste des tableaux

Tableau II. 1 Sources des perturbations harmoniques 30
Tableau II. 2 Effet des harmoniques sur quelques matériels 34
Tableau III.1-Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue..... 58
Tableau IV. 1- Paramètres de simulation de PV 74
Tableau IV. 2- Paramètres de simulation sans filtre. 76
Tableau IV. 3- Paramètres de simulation de filtre avec P&O et PWO. 78

Notations et Abréviations

Liste des notations

Eph :	représente la quantité d'énergie.
λ :	la longueur d'onde.
h :	la constante de Planck.
c :	la vitesse de la lumière
Id :	le courant qui traverse la diode
Is :	le courant de saturation inverse de la diode.
q :	la charge de l'électron (1,6. 10-19 c).
K :	la constante de Boltzmann (1,38. 10-23m2kg/s2K).
T :	la température de la jonction.
V :	tension de sortie de la cellule.
n :	le facteur d'idéalité de la diode, dans le cas idéal n=1.
Ish :	le courant qui traverse la Résistance shunt.
Rs :	Résistance série.
Rsh :	Résistance shunt.
Ƞ :	Le rendement énergétique.
$Pmax$:	la puissance maximale produitepar le GPV .
$Vmax$:	tentions maximale produite par le GPV.
$Imax$:	courant maximale produite par le GPV.
S :	la surface du module.
G :	l'éclairement en W/m2.
Tf :	Un temps de fermeture de commutation du l'hacheur.
$T0$:	Un temps d'ouverture de commutation du l'hacheur.
Ts :	la période de commutation qui est égale à $1/fs$.
VD :	tension de la diode de l'hacheur parallèle (Boost).
uD :	tension du condensateur de l'Hacheur parallèle (Boost).
U :	tension d'entrée du Hacheur parallèle (Boost).
L :	l'inductance.
iL :	le courant qui traverse la bobine .
T :	Le période.

vL:	tension de la bobine .
ILM :	le courant de la bobine maximale.
Vh :	la tension harmonique de rang h.
Zh :	l'impédance harmonique de rang h.
Ih :	le courant harmonique de rang h.
h :	rang harmonique.
w:	pulsation fondamentale (2π.f1=2π/T).
φh:	déphasage du courant
Θh :	déphasage de la tension
P :	Puissance active.
$Y0$:	la fondamentale.
Yh :	l'harmonique.
$Veff$:	Tension efface.
$Ieff$:	Courant efficace.
Q :	la puissance réactive.
S :	La puissance apparente .
FP :	Le facteur de puissance .
Ii:	la valeur efficace du courant fondamental de la charge.
n :	le rang harmonique.
$VMPP$:	la tension de point maximal VMPP du GPV .
VOC :	la tension de circuit ouvert.
Isc :	le courant de court-circuit.
$K1$:	constante de proportionnalité.
Vref :	la tension de référence.
$IMPP$:	le courant de point maximal .
$K2$:	constante de proportionnalité.
e :	l'erreur .
E :	paramètre d'entrée.
D :	la proie des les loups gris pendant la chasse .
Xp :	le vecteur de position de la proie.
X :	le vecteur de position d'un loup gris.
A et **C :**	**les** vecteurs de position.
r_1 r_2 :	les vecteurs dans [0,1].

Liste des abréviations

$\boldsymbol{MPPT}$ **:**	Maximum Power Point Tracker .
P&O :	Perturb And Observe.
$\boldsymbol{GWO}$ **:**	Grey Wolf Optimizer
$\boldsymbol{THD}$:	le taux de distorsion harmonique.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux électriques est un ensemble de circuits interconnectés qui doit diriger de l'énergie électrique à partir des centrales de production aux consommateurs d'électricité, les consommateurs d'énergie électrique utilise un matériel qui comporte des charges non linéaires, ils peuvent être des consommateurs de grande puissance comme les industriels qui utilisent des convertisseurs statiques pour les systèmes de commande , pour la variation de vitesse d'un moteur électrique ou pour l'alimentations des charges continues, ces convertisseurs sont à base de composants de puissance qui provoque des problèmes au niveau du réseau électrique.[1]

Ces composants sont considérés comme des charges non linéaires, ainsi un redresseur à diode ou à thyristors, un gradateur, un onduleur, un hacheur, consomment un courant non sinusoïdale, génèrent une puissance réactive, ce qui provoque des perturbations et pollution harmoniques dans le réseau électrique [1].

D'autre part ces dernières années, grâce à l'augmentation de la consommation d'énergie, l'agitation et les fluctuations conséquentes du prix du pétrole brut et les changements climatiques mondiaux, les chercheurs se sont concentrés sur l'utilisation des énergies renouvelables incluant les systèmes photovoltaïques, la biomasse et l'énergie éolienne comme une alternative intéressante. [2]

Parmi les différentes ressources renouvelables, la technologie photovoltaïque est l'une des technologies à plus forte croissance, en raison de la disponibilité en abondance de l'éclairement solaire, n'ayant pas d'impacts environnementaux négatifs, la demande d'énergie produite à partir des systèmes photovoltaïques connaît une croissance importante, où la recherche montre que la contribution des systèmes photovoltaïques à la production d'énergie était d'environ 14 000 MW en 2010 et devrait être de 70 000 MW en 2020 [3].

Dans cette optique, l'amélioration de la qualité de l'énergie est devenue un sujet de recherche important dans les systèmes de distribution d'énergie modernes. Il y a près de 20 ans, la plupart des charges utilisées par l'industrie et les consommateurs étaient passives et linéaires, les charges non linéaires étant moins affectées. Charges non linéaires telles que : Hacheurs, onduleurs, redresseurs, etc. L'utilisation de ces dispositifs est la cause majeure des perturbations harmoniques et de la puissance réactive, ces derniers induisent la surchauffe des

transformateurs, la distorsion de la tension d'alimentation, le faible facteur de puissance et le dysfonctionnement des équipements sensibles [4].

La grande masse de ces recherches a adopté le filtrage (passif et actif) comme solution, d'autres se sont axées vers la reconfiguration des charges polluantes elles- mêmes (convertisseurs AC - DC à MLI).Un filtre passif basé sur l'inductance L et la capacité C a d'abord été choisi comme meilleur absorbeur d'harmoniques. En effet, ce dernier offre une méthode simple et efficace pour rejeter les harmoniques dans de nombreux cas, notamment lorsque l'impédance de la source d'harmoniques est élevée et dans une plage de fréquence étroite où le réseau ne présente pas de résonance proche de la fréquence des harmoniques.

Cependant, l'efficacité de ces filtres est compromise par la présence de certains facteurs tels que :

- Puissance insuffisante pour couvrir une large bande de fréquence, nécessitant l'installation de plusieurs filtres.
- Générer des résonances série et parallèle avec le réseau, amplifiant chaque harmonique à des fréquences proches de la fréquence de résonance.
- Mauvaise adaptation aux changements environnementaux pertinents.

Suite à ces effets néfastes, les recherches se sont orientées vers d'autres solutions présentant de moindres inconvénients. Alors, grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables (GTO, IGBT, et MOSFET), ont paru les convertisseurs AC - DC (redresseurs) d'une part, permettant un meilleur contrôle du facteur de puissance et l'atténuation de certains harmoniques basses fréquences, et les filtres actifs série et parallèle, constitués le plus souvent d'onduleurs de tension, d'autre part [4].

Ces derniers se caractérisent par de meilleures caractéristiques que les convertisseurs AC-DC. Toutes les propriétés ci-dessus font des filtres actifs la solution idéale de choix pour réduire les harmoniques, éliminer les résonances, compenser l'énergie réactive et améliorer le facteur de puissance. Par conséquent, cette étude s'est concentrée sur l'étude de filtres actifs parallèles alimenté par un panneau photovoltaïque.

La présentation du mémoire, structuré en une introduction, quatre chapitres, et une conclusion, est répartie comme suit :

- **Un premier chapitre,** nous présentons des généralités sur le gisement, l'énergie solaire, l'effet photovoltaïques et les technologies des cellules photovoltaïques. Ensuite, on

traitera les convertisseurs DC/DC en particulier des hacheurs Boost plus les avantages et les inconvénients d'énergie solaire photovoltaïque.

- **Un second chapitre,** nous présentons les différents phénomènes qui affectent la qualité de l'énergie électrique basse tension et expose leurs origines, On présentera les solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Enfin, le principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle et leur structure ainsi que les stratégies de commande pour le cas d'un filtre actif de puissance.
- **Un troisième chapitre concernant**, nous présentons la commande MPPT par la technique de Perturbation & Optimisation (P&O) et la technique d'optimisation de l'énergie de LOUP GRIS (méta heuristiques).
- **Un quatrième chapitre** concernant à une simulation et interprétation des résultats,des commentaires et observer la différence entre les deux techniques (P&O et LOUP GRIS).

Et on termine par une conclusion générale

CHAPITRE I

LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

I.1 Introduction

Ce chapitre présente les définitions liées au domaine solaire, puis il décrit en détail les cellules solaires, les modules et les principes de fonctionnement des modules et de leurs composants. Enfin, tous les éléments d'un système photovoltaïque incluant les convertisseurs statiques ainsi que les avantages et les inconvénients de l'ESPV sont présentés.

La limitation des réserves en ressources fossiles ainsi que leur impact négatif sur l'environnement d'une part, et la croissance de la demande en énergie d'autre part, font naître un nouveau principe de production d'électricité utilisant des énergies renouvelables tel que l'énergie photovoltaïque, car étant une énergie propre et inépuisable. Le terme « Photovoltaïque » souvent abrégé par l'acronyme « PV », a été formé à partir des mots « Photo » qui est un mot grec signifiant lumière et « Volta » qui est le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. [5]

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité, il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules, ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc, le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. [6]

I.2 Le solaire photovoltaïque :

I.2.1 Le gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

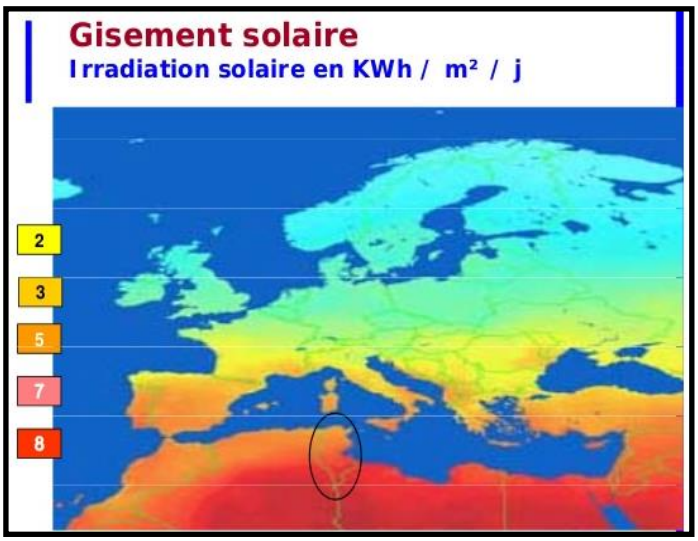


Figure I. 1-Gisement solaire.

I.2.1.1 Le gisement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m^2/an au nord et 2263 KWh/m^2/an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. La figure suivante indique le taux d'irradiation pour chaque région de l'Algérie.

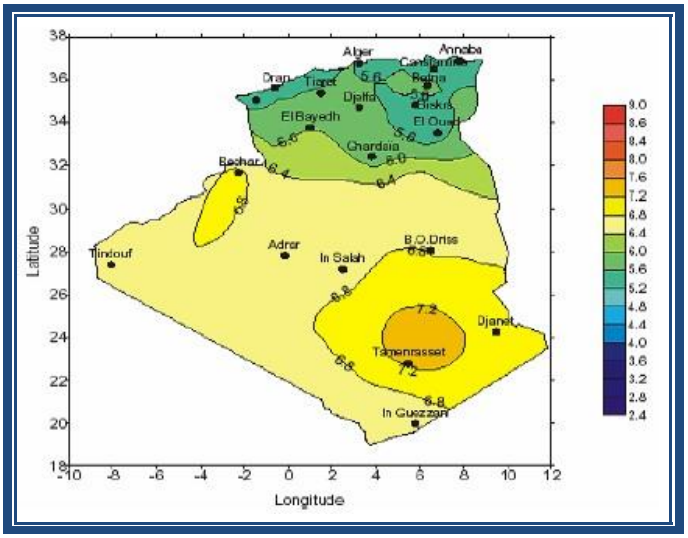


Figure I. 2- Carte de gisement solaire en Algérie.

I.2.1.2 Le mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un des foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil: 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à ±23°27'.

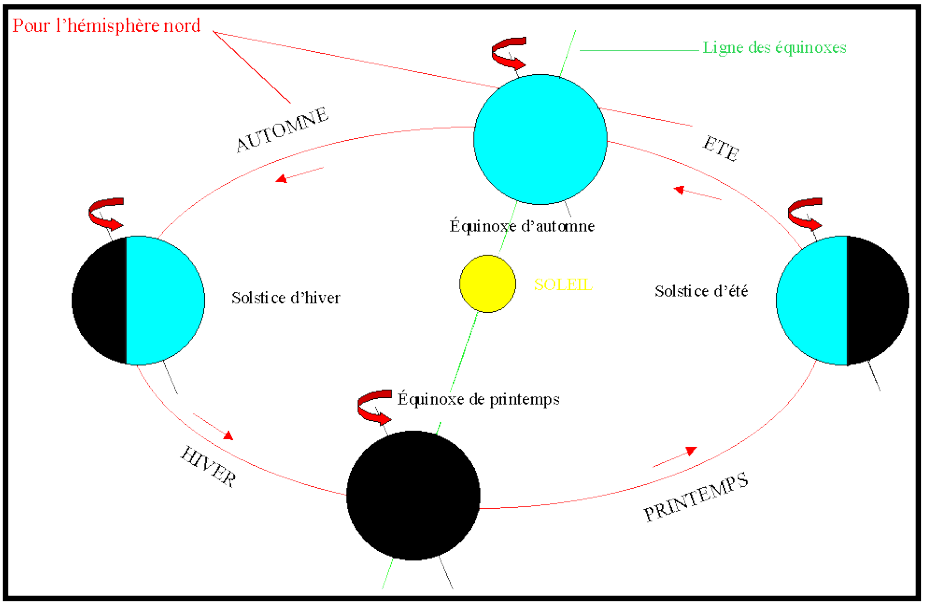


Figure I. 3-Le mouvement de la terre.

Le calcul du gisement solaire dépend de plusieurs facteurs tels que la latitude, l'heure de la journée, la saison et les conditions météorologiques. Il est possible de calculer le gisement solaire en utilisant des outils en ligne [55]. Vous pouvez également utiliser des formules pour calculer le rendement des panneaux solaires photovoltaïques [56].

I.2.1.3 L'effet photoélectrique

Il existe deux technologies qui permettent d'exploiter directement l'énergie solaire:

a- Le solaire thermique (pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire)

b - Le solaire photovoltaïque (pour la production d'électricité) :

Le solaire photovoltaïque exploite l'effet photoélectrique, c'est-à-dire le phénomène de transmission de l'énergie issue des photons de la lumière solaire aux électrons liés à la matière constituante du panneau photovoltaïque.

Le résultat de cette conversion lumineuse est un courant électrique directement exploitable, on retrouve des installations photovoltaïques aussi bien à l'échelle de grandes centrales, profitant d'une énergie lumineuse stratégique et réinjectant l'électricité produite sur le réseau, qu'à l'échelle plus locale du particulier, avec consommation directe ou non de l'électricité. [7]. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie **Eph** qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = h * {}^{c}/_{y} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Où ***Eph* :** représente la quantité d'énergie.

λ : la longueur d'onde.

h : la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

I.2.2 La cellule photovoltaïque

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteurs, ces deux couches sont dopées différemment, pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel, l'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure I.4).

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux, une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [8].

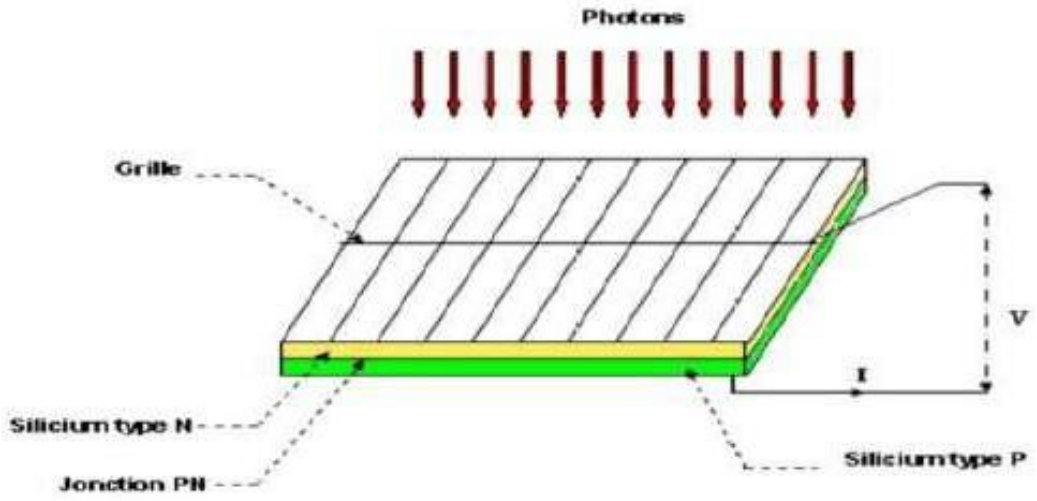
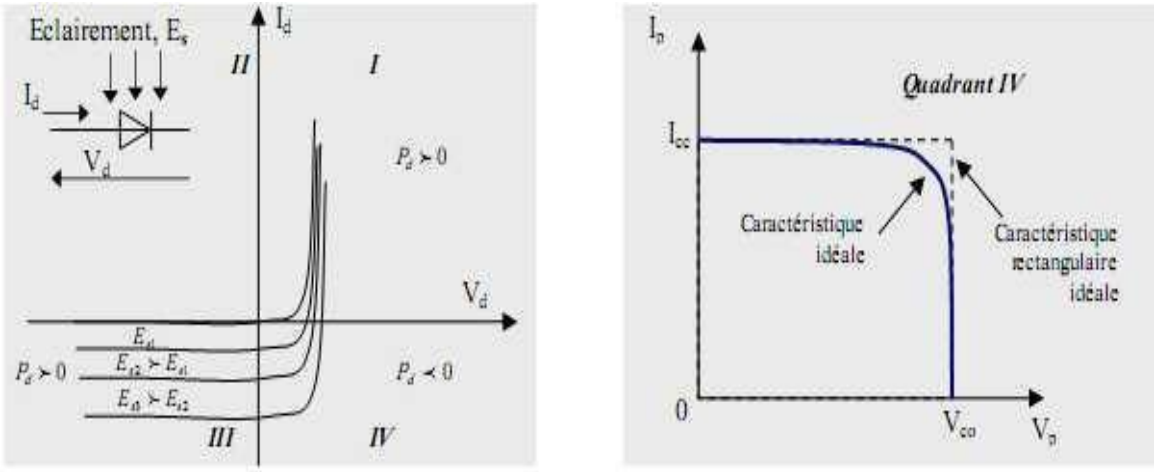


Figure I. 4-Schéma d'une cellule élémentaire.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium, le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention Générateur (figure I.5).



(A) (B)

Figure I. 5-(A) caractéristique d'une photodiode, (B) caractéristique d'une Cellule Photovoltaïque.

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 volt, une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque.

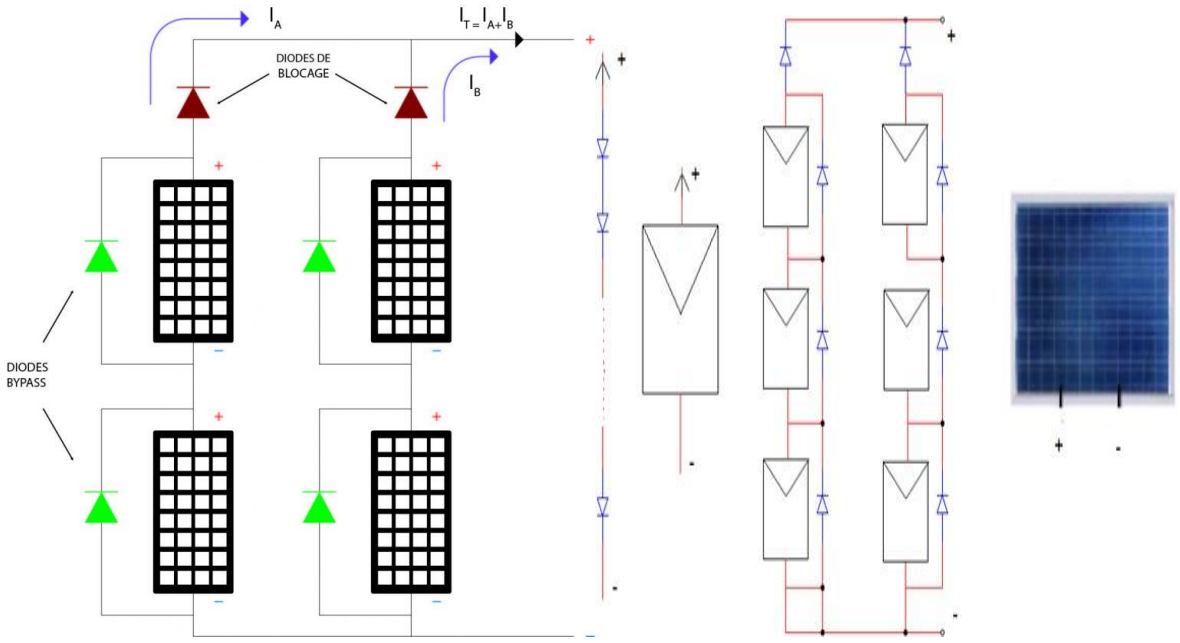


Figure I. 6- Cellules, modules et panneau photovoltaïques

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

I.3 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque :

On peut facilement représenter la cellule PV par le schéma de (la figure I.7), où le générateur de courant modélise le courant ***Iph*** généré par l'éclairement appliqué à la cellule (l'effet photovoltaïque), la diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité, c'est le cas idéal de la cellule.

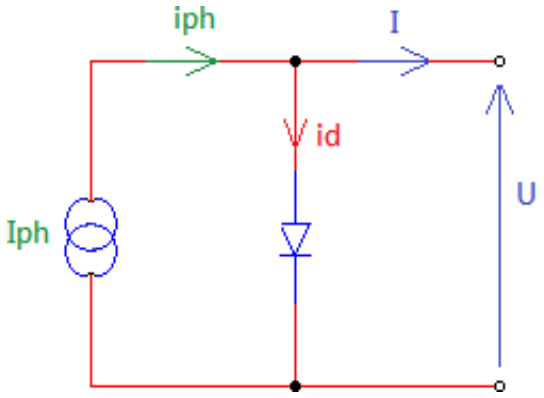


Figure I. 7- Représentation de la cellule PV idéale.

Dans ce cas le courant I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.2)$$

$$I_d = I_s \left[e^{\left(qV/nKT\right)} - 1 \right] \quad (1.3)$$

Où :

***Is* :** courant de saturation inverse de la diode.

***q* :** la charge de l'électron.

***K* :** constante de Boltzmann (1,38. 10-23m2kg/s2K).

***T* :** température de la jonction.

***V* :** tension de sortie de la cellule.

***n* :** le facteur d'idéalité de la diode, dans le cas idéal n=1.

Mais en réalité il y a des pertes au niveau de la cellule donc on ajoute au schéma de la cellule idéale deux résistances pour modéliser les pertes internes **:**

- Résistance série R_S : cette résistance est constituée de plusieurs composants, parmi ces composants, l'émetteur et grille supérieure dominent la résistance série globale.

- Résistance shunt R_{Sh} *:* Une faible résistance de shunt provoque des pertes de puissance dans les cellules solaires en fournissant un trajet de courant alternatif pour le courant généré par la lumière. Une telle dérivation réduit la quantité de courant circulant à travers la jonction de cellules solaires et réduit la tension à partir de la cellule solaire. L'effet d'une résistance shunt est particulièrement grave à de faibles niveaux de lumière.

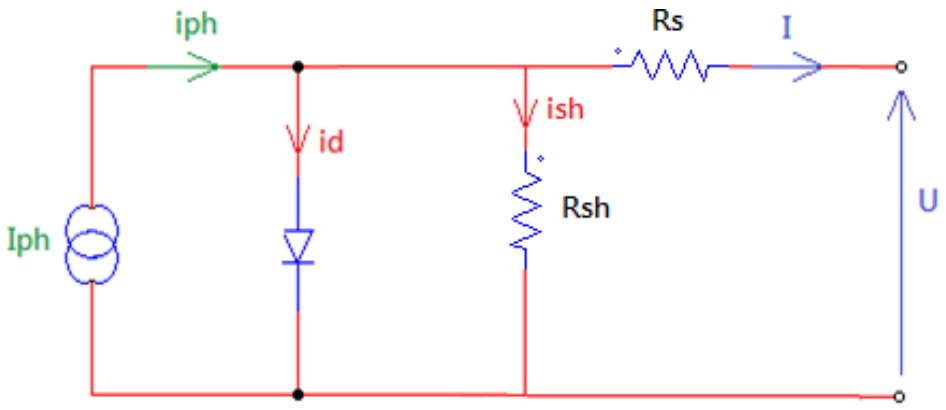


Figure I. 8- Représentation de la cellule PV réelle

La nouvelle équation modélisant la cellule sera :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.4)$$

Où :

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

Et :

$$I_d = I_s \left[e^{\left(q\left(\frac{V+IR_s}{nKT}\right)\right)} - 1 \right] \quad (1.6)$$

L'équation (1.4) sera donc :

$$I_d = I_s \left[e^{\left(q\left(\frac{V+IR_s}{nKT}\right)\right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{nKT} \quad (1.7)$$

I.3.1 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension (I-V), ainsi qu'illustré ci-dessous :

I.3.1.1 La tension en circuit ouvert :

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6V, appelée tension en circuit ouvert Vco (elle varie légèrement avec la technologie et l'éclairement) [9], cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait que l'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N.

I.3.1.2 Le courant de court-circuit :

Contrairement au cas précédent, les cellules solaires délivrent un courant maximum à tension nulle en cas de court-circuit. Ce courant est appelé courant de court-circuit Icc. La photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau utilisé. Plus ces deux paramètres sont élevés, plus l'intensité produite est importante.

I.3.1.3 La puissance :

Le but recherché par tout utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, les figure (1.9) et (1.10) représente la caractéristique courant-tension d'une photopile sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance

constante (puissance = tension × intensité).

Pour l'éclairement considéré, le point ***Pmax*** représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, dit puissance maximale, est associé à une tension optimale ***Vm*** et à une intensité optimale ***Im*.** Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (définition du rendement ci-dessous), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête **(*Wc*).**

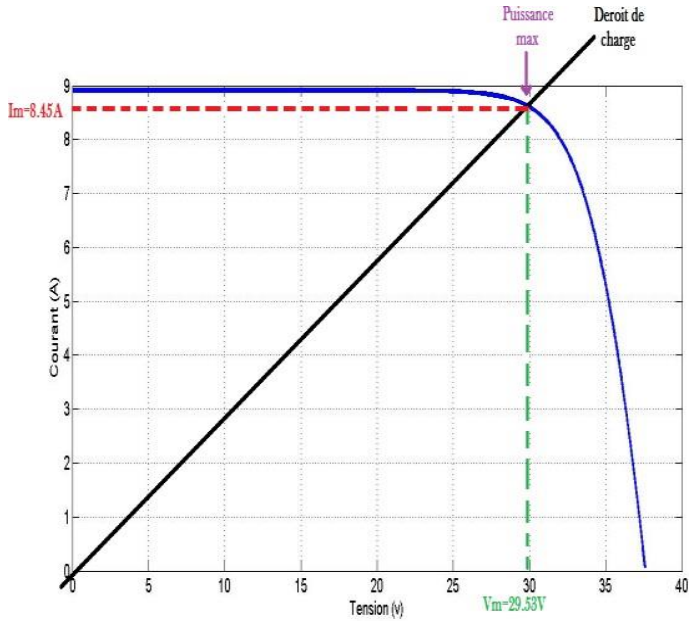


Figure I. 9- Caractéristique courant-tension électriques d'une cellule PV

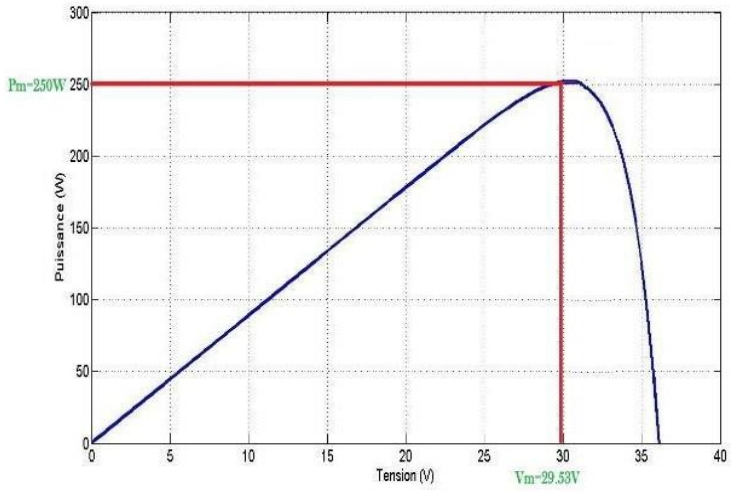


Figure I. 10- Caractéristique puissance-tension électriques d'une cellule PV

I.3.1.4 Le rendement :

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module, soit *S* la surface du module et G l'éclairement en W/m2, ce rendement a pour formule :

$$\eta = \frac{P_{max}}{G*S} \quad \textbf{(1.8)}$$

Il est généralement évalué dans des conditions de référence : Sous un ensoleillement de 1000W/m², à la température de 25 °C et sous un spectre AM 1,5 (Air Masse), ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard TestConditions [9].

I.4 Les différents types de cellules solaires et leur rendement :

Lorsque nous avons expliqué le fonctionnement des cellules solaires, nous avons mentionné certains des matériaux à partir desquels elles sont fabriquées. Deux grandes familles de matériaux photovoltaïques actuellement utilisés dans les installations peuvent être distinguées.:

- ❖ Les matériaux cristallisés, d'épaisseur de 0,15 à 0,4 mm.
- ❖ Les couches minces, d'épaisseur faible de l'ordre du micron [9], le matériau le plus répandu de nos jours est le silicium, semi-conducteur tétravalent.

Le silicium est soit cristallin, soit amorphe :

I.4.1 Le silicium monocristallin :

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché :

- Elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairement, Toutefois, leur prixreste élevé.
- Rendement électrique des panneaux : 15% en condition STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m2.
- Usage : tous usages extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage,relais, habitat) [9].

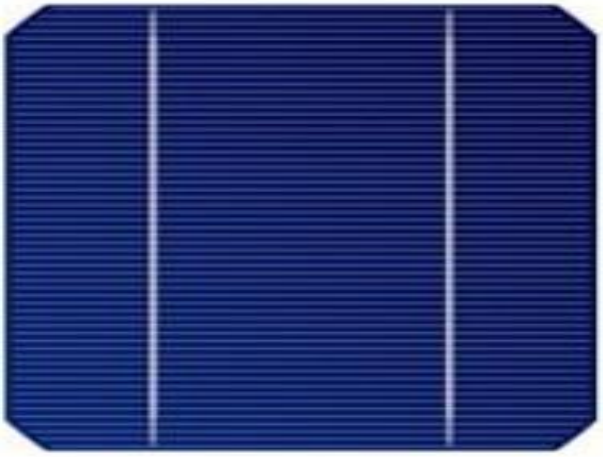


Figure I. 11- Cellule photovoltaïque de type silicium monocristallin

I.4.2 Le silicium multi cristallin (poly cristallin) :

Les plus couramment utilisées aujourd'hui, les propriétés électriques des cellules poly-cristallines sont similaires à celles des cellules monocristallines. Cependant, ils sont légèrement moins efficaces pour un éclairage essentiellement modéré, et sont moins coûteux en raison d'une moindre complexité de fabrication.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 14% dans les conditions STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m2.
- Usage : même usage que le silicium monocristallin [1].

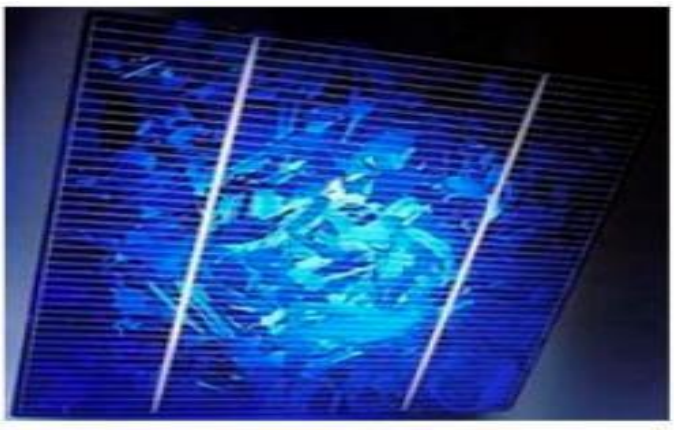


Figure I. 12- Cellule photovoltaïque de type silicium multi cristallin

I.4.3 Le silicium amorphe :

Il a un écart optique plus grand que le silicium cristallin, donc il a une tension plus élevée, mais il a une moins bonne collecte de courant et est plus fin, donc le courant est beaucoup plus faible, et donc moins puissant que le silicium cristallin. Par contre, avec des couches très fines, tout réagit vivement., extérieur et intérieur. Cette technique de fabrication est moins chère et permet la production de petits formats de plaques.

- Rendement électrique des panneaux : 5 à 7% dans les conditions STC (jusqu'à 9 %pour les multi-jonctions).
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc.
- Gamme d'éclairement : de 200 à 1000 W/m2.
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices),électronique de faible consommation en extérieur [9].

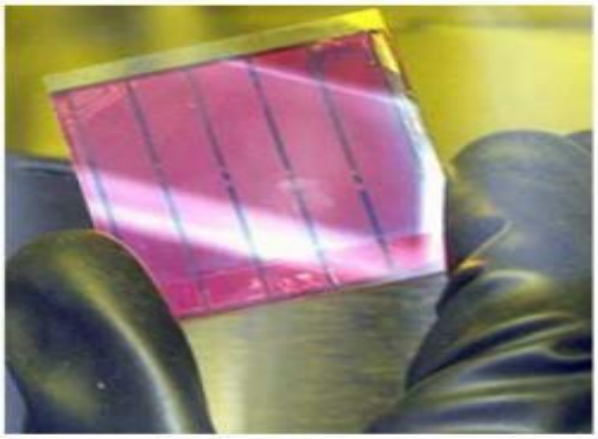


Figure I. 13-Cellule photovoltaïque de type silicium amorphe

I.4.4 Une quatrième technologie :

Avec le progrès technologique, émergent des solutions à base de cuivre indium / gallium / sélénium (CIS), on voit de plus en plus de panneaux équipés de cellules CIS, ces cellules ont la particularité de transformer en électricité un spectre lumineux plus large que celui des cellules en silicium. Cette caractéristique rend ces panneaux beaucoup plus performants à l'ombre ou par temps couvert, a puissance équivalente, l'énergie captée sur une journée est supérieure à celle d'un panneau en silicium, mais cette technologie est essentiellement utilisée à desfins industrielles ou adaptée sur des véhicules nomades car sa principale caractéristique est son

efficacité incomparable aux autres technologies existantes en zone d'ombre.

En matière de rendement, ces panneaux sont environ 12% supérieurs par rapport aux panneaux en silicium amorphe.

La figure (I.14) représente les caractéristiques courant-tension de deux cellules photovoltaïques, l'une au silicium monocristallin, l'autre au silicium amorphe.

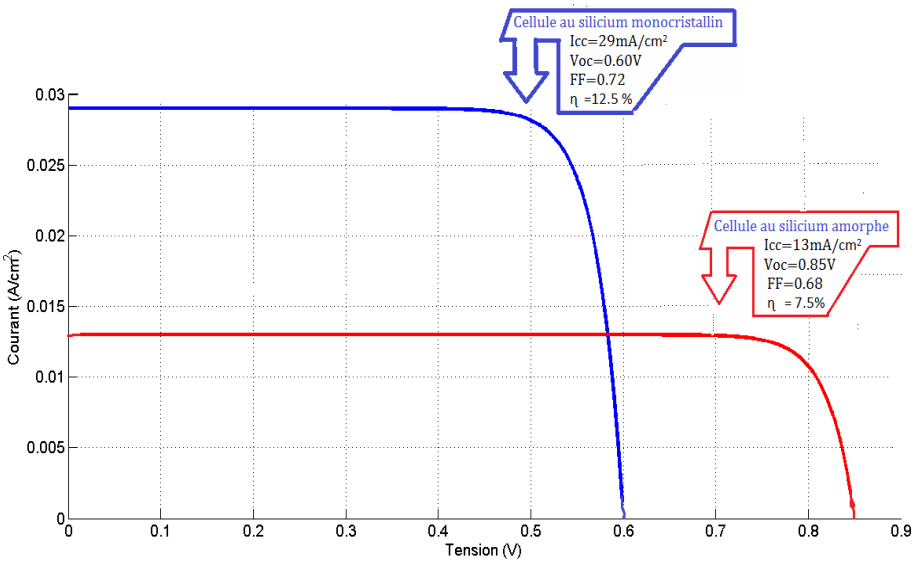


Figure I. 14- Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorpheet d'une autre au silicium cristallin (sous 1000 W/m2)

I.5 Association des modules photovoltaïques

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du Générateur en associe ***''Np''*** modules en parallèle comme le montre les figures (I.15.b) et (I.15.a). Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en associe ***''Ns''*** modules en série comme le montrent les figures précédentes.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (I.15.c). [10].

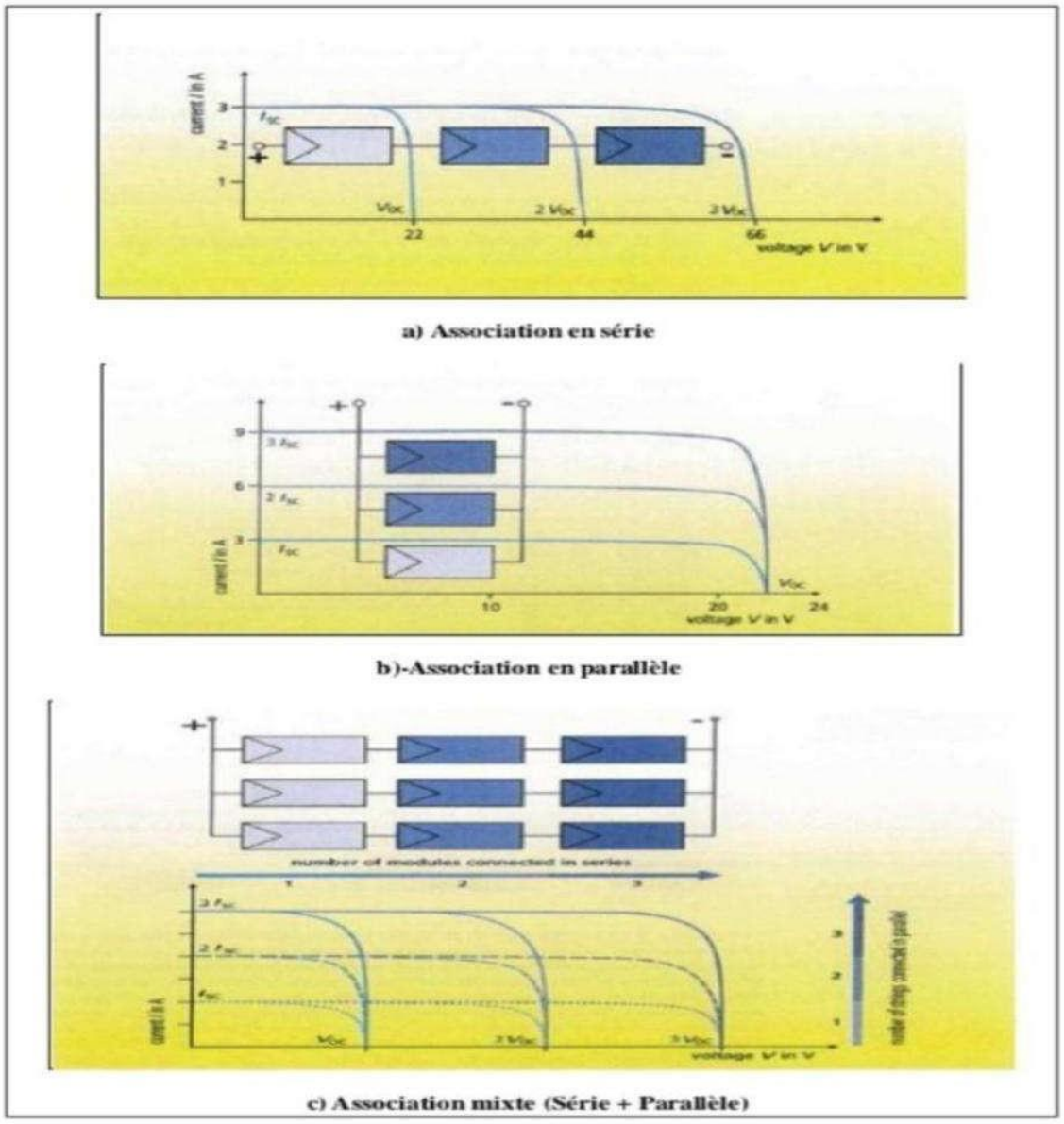


Figure I. 15- Association des modules photovoltaïques.

I.5.1 Le module photovoltaïque :

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques Ou Capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une Photopile Élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les Technologies. Il faut presque toujours utilise plusieurs photopiles en série pour générer une tension Utilisable [1].

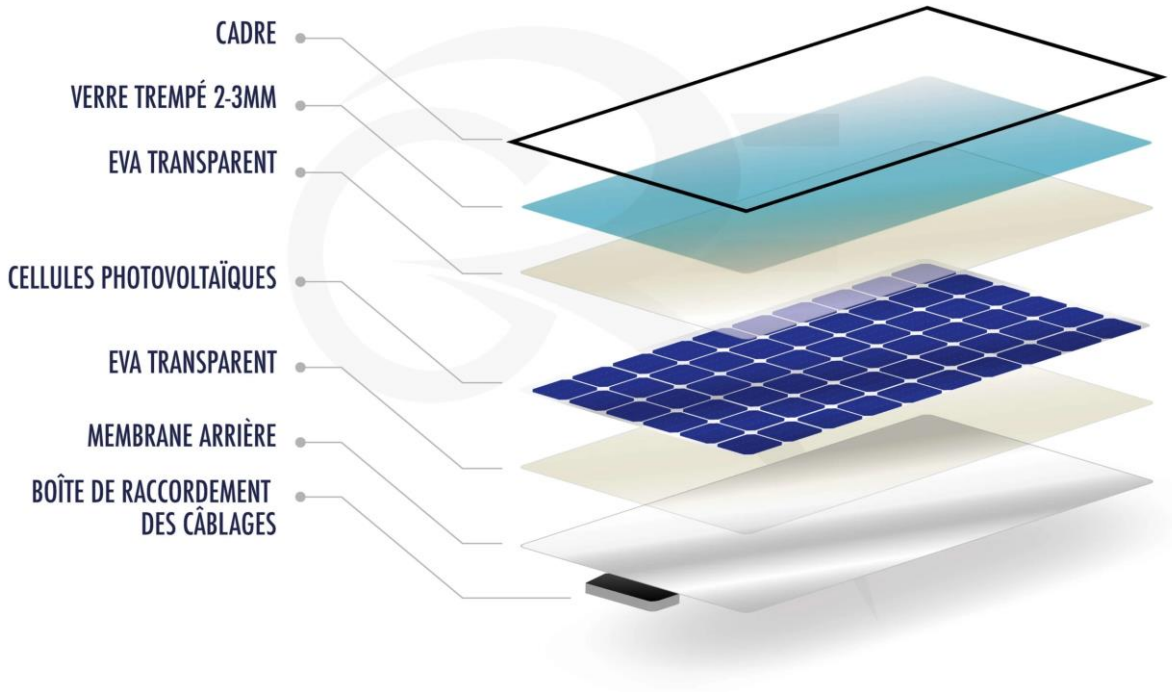


Figure I. 16-Un panneau photovoltaïque.

I.5.2 Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module :

- **La puissance crête Pc :** Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standard. (25°C et un éclairement de (1000 W/m²))
- **La caractéristique I (V) :** Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide Vco :** Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».
- **Courant de court-circuit Icc :** Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimum (Um, Im) :** Lorsque la puissance de crête est Maximum en plein soleil, ***Pm = Um. Im***
- **Rendement maximal :** Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme :** Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : ***Vco. Icc*** [11].

I.5.3 Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m², la caractéristique (***Ipv***=f(***Vpv***)) est donnée par les figures (I. (17-18)). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

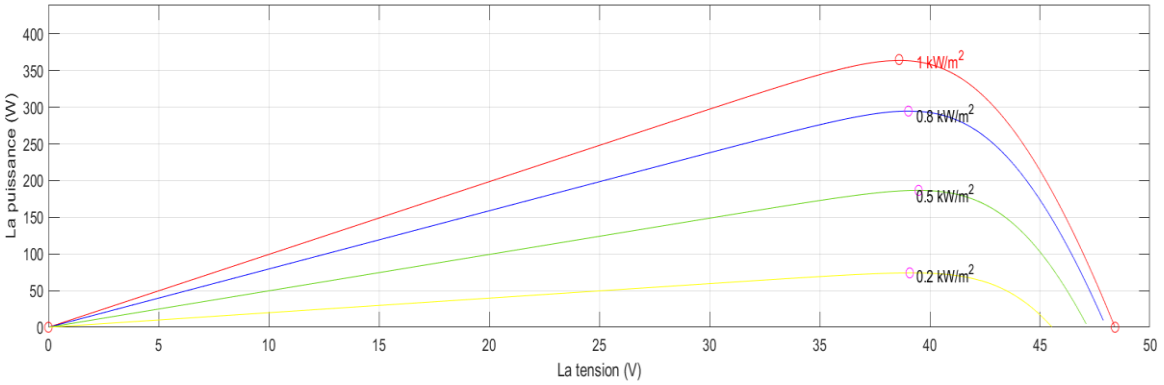


Figure I. 17- Caractéristique P-V du module PV selon la variation d'éclairement

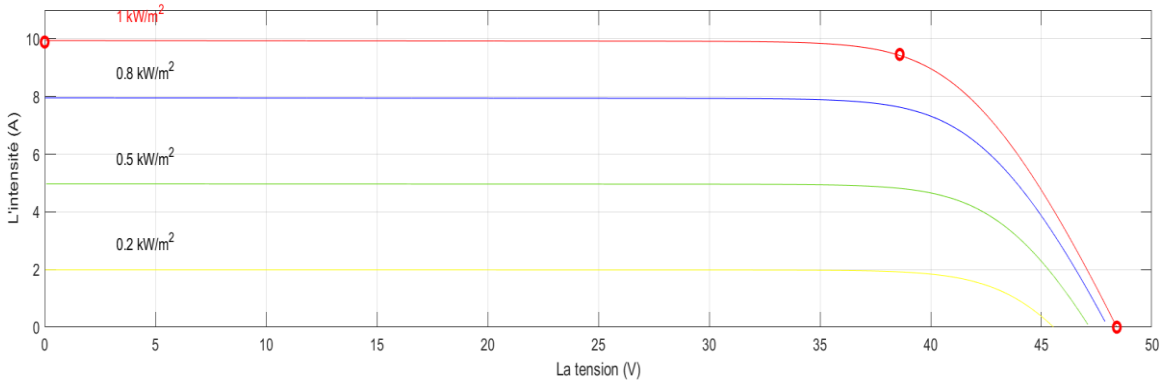


Figure I. 18-Caractéristique I-V du module PV selon la variation d'éclairement

I.5.4 Influence de la température :

En faisant varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, la caractéristique (***Ipv***=f(***Vpv***)) est donnée par Les figures (I. (19-20)). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court- circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

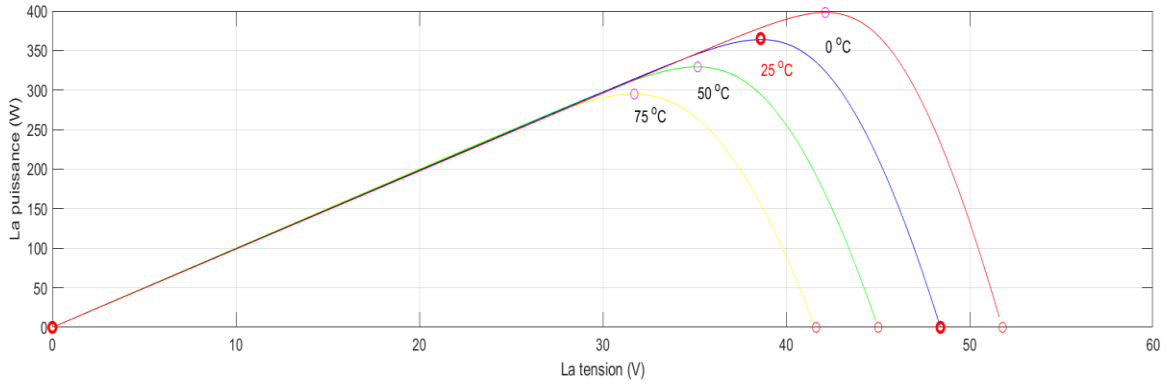


Figure I. 19- Caractéristique P-V du module PV selon la variation de la température

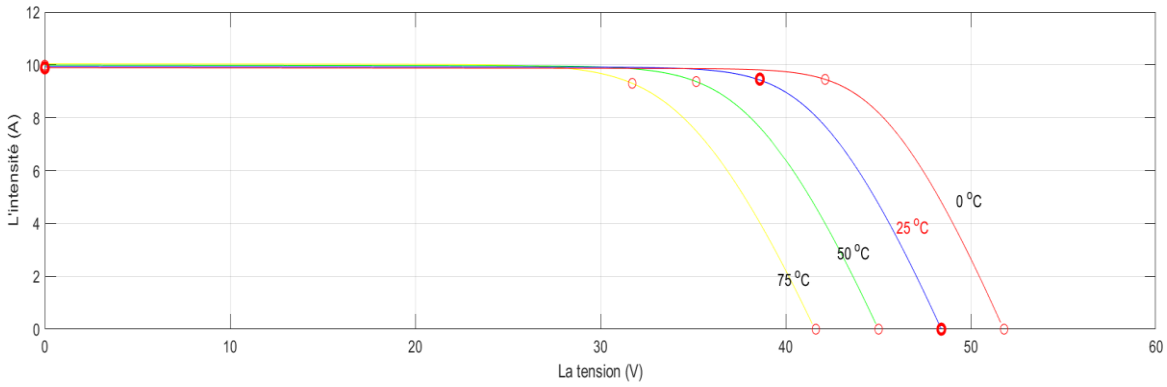


Figure I. 20- Caractéristique I-V du module PV selon la variation de la température

I.6 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque

Les convertisseurs DC/DC permettent un contrôle flexible et efficace de la puissance dans les circuits DC. Les systèmes de conversion photovoltaïque conventionnels connectés au réseau se composaient de convertisseurs DC/DC et d'onduleurs. Le convertisseur DC/DC est contrôlé pour suivre le point de puissance maximum du module photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire de l'énergie en phase avec la tension du réseau avec une faible distorsion harmonique totale de la puissance du système.

I.6.1 Convertisseur DC/DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques, pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit

être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs, les commutateurs de puissance utilisés dépendent duniveau de la puissance à convertir ou à commander, les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTS (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux dpuissance [12] .

D'un point de vue circuit, l'hacheur apparaît comme un quadripôle figure (I.21), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau, on peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [13].

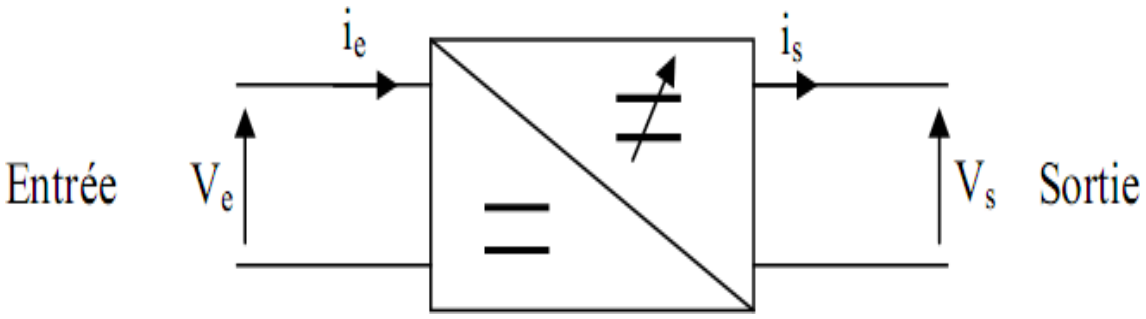


Figure I. 21- Schéma d'un quadripôle électrique.

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs, dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué – saturé) :

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle.

Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [13].

Pendant le fonctionnement de l'hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s

Avec :

Un temps de fermeture $T_f = d.T_s$

Un temps d'ouverture $T_0 = (1-d).T_s$

Où :

- T_s *:* est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$
- d *:* Le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$) la figure (I.22)

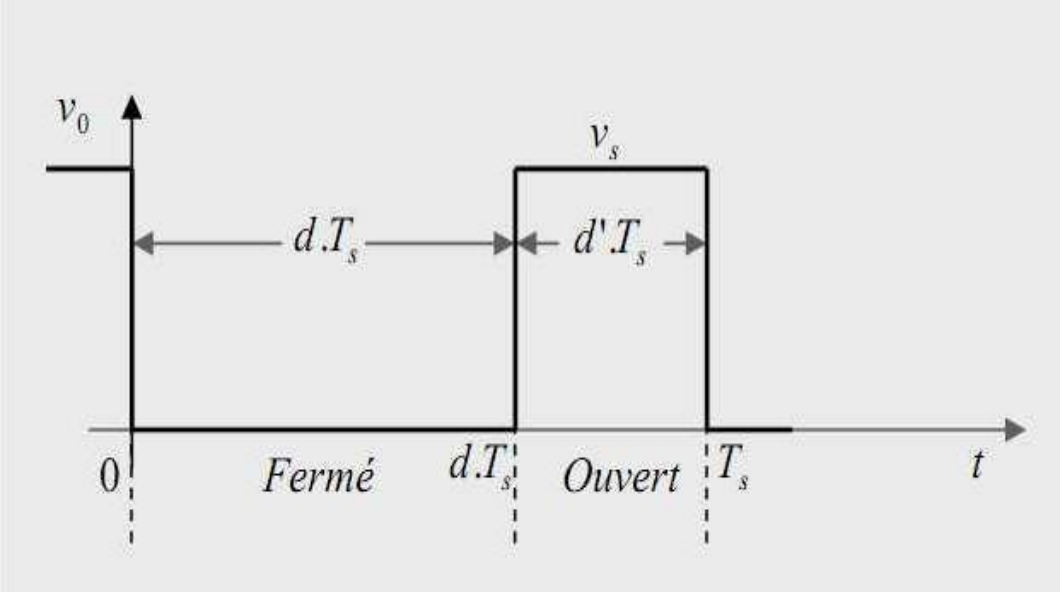


Figure I. 22- Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

I.6.2 Les types de convertisseurs DC/DC :

Il y a différents types de convertisseurs DC/DC, une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée, et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque).Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels VS>Ve.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels VS<Ve.
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST) : mélange entre les deux précédents.

Dans notre système, s'intéresse au convertisseur élévateur « Boost ».

I.6.3 Hacheur parallèle (Boost) :

Le hacheur Boost est aussi appelé hacheur survolteur, ce montage permet de fournir une tension moyenne U_{d0} à partir d'une source de tension continue $U > U_{d0}$, le montage étudié est donnée à la figure (I.23).

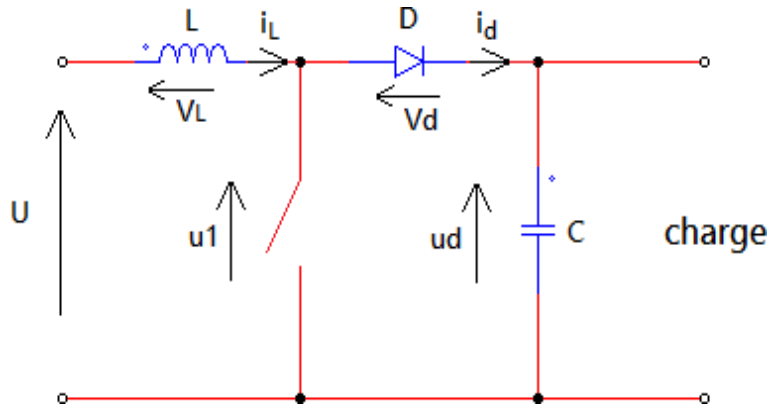


Figure I. 23-Hacheur parallèle.

On distingue deux phases de fonctionnement [13] :

1. Lorsque l'interrupteur I est fermé, la diode est polarisée en inverse $V_D = -u_D$, La charge est dons isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance L.
2. Lorsque l'interrupteur I est ouvert, l'étage de sortie (C + charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance L.

Pour l'analyse en régime permanent présentée ici, le condensateur de filtrage C a une valeur suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante : $u_D(t) = U_{d0}$

Enfin on distingue deux modes de fonctionnement selon le courant dans l'inductance $\boldsymbol{L}$, $i_L(t)$ est interrompu ou non.

Fonctionnement à courant de source ininterrompu :

- pour $0 < t < \alpha T$ l'interrupteur I est fermé et l'intensité $iL(t)$ croit linéairement :

$$U = L * \frac{di_L}{dt} + U_{d0} \qquad \text{Donc}$$

$$i_L(t) = U - U_{d0}(t - \alpha T) + i_L(\alpha t) \qquad (I.9)$$

Avec

$$i_L(\alpha t) = U\alpha T + i_L(0) \qquad (I.10)$$

Et $U < Ud0$ car iL(t) doit décroitre. On a :

$$u_L = U_{d0}$$
$$i_d = i_L$$
$$v_L = U - U_{d0}$$

On déduit les caractéristiques de la figure I.24 :

On détermine facilement la relation liant U et $Ud0$.

On a :

$$U = v_L + u_i$$

Donc en moyenne sur une période, compte tenu du fait que la valeur de la moyenne vL(t) est nulle, on obtient :

$$U = U_{I0} = \frac{(1-\alpha)T}{T} * U_{d0} = (1-\alpha) * U_{d0}$$

Donc $$\frac{U_{d0}}{U} = 1/(1-\alpha)$$

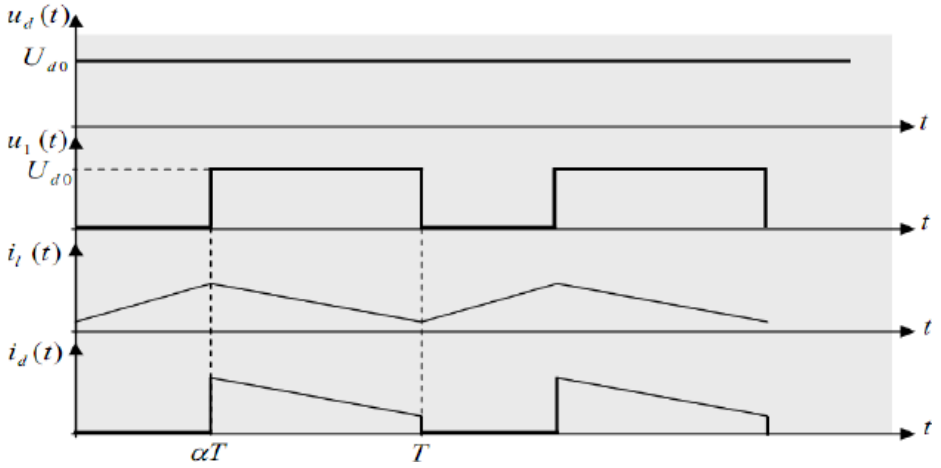


Figure I. 24- Fonctionnement à courant de source ininterrompu.

Limites entre le fonctionnement interrompu et le fonctionnement ininterrompu :

La forme des courant et tension i_L(t) et v_L(t) est donnée sur la figure I.25.La valeur moyenne du courant i_L(t) s'écrit :

$$I_{L0} = \frac{I_{LM}}{2} = \frac{1}{2} * U/L\alpha T \qquad \text{(car } iL(0) = 0) \qquad \text{(I.11)}$$

Donc la valeur moyenne du courant disponible en sortie $Id0$ s'écrit :

$$I_{d0} = (1-\alpha)I_{L0} = \frac{1}{2} * U/L\,\alpha T(1-\alpha) = \frac{1}{2} * U_{d0}/L\alpha T(1-\alpha) \qquad \text{(I.12)}$$

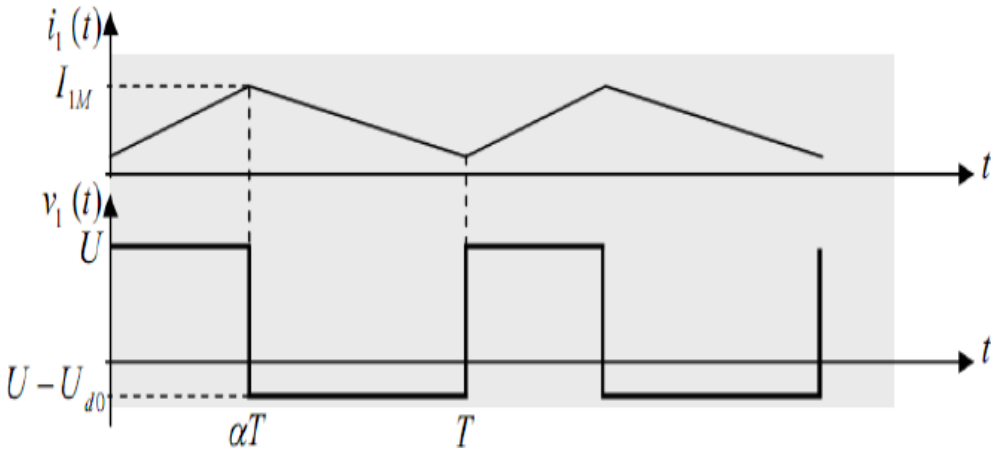


Figure I. 25- Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu

Les études faites sur l'hacheur Boost, montrent que l'hacheur Boost a un rendement élevé pour une grande partie du rapport cyclique [30], il est le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques car la puissance maximale que peut délivrer une source en l'occurrence du GPV est :

$$Pmax = Vmax \times Imax \quad \text{(I.13)}$$

I.6.4 Dimensionnement et choix des composants L et C de l'hacheur Boost :

La détermination des valeurs réelles de ces composants nécessite une étude largement étendu sur les paramètres imposés par le panneau solaire (***LG365N2W-B3***) d'une part, et d'autre part le dimensionnement de l'hacheur n'a pas été fixé par le cahier de charge donc on a choisi de faire une large étude selon la valeur de la tension de sortie hacheur **(V_s)**.

I.7 Les avantages et les inconvénients des énergies solaire photovoltaique

L'énergie solaire photovoltaïque présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients :

Avantages :

1. Renouvelable : l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui ne s'épuisera jamais, contrairement aux énergies fossiles qui s'épuisent lentement.
2. Propre : contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie solaire ne produit pas de pollution de l'air, de l'eau ou du sol, ce qui la rend respectueuse de l'environnement.
3. Faible coût d'exploitation : une fois installé, un système solaire photovoltaïque ne nécessite que très peu d'entretien, ce qui réduit les coûts d'exploitation.

4. Autonomie énergétique : les systèmes solaires photovoltaïques peuvent fournir de l'énergie dans des endroits isolés qui ne sont pas reliés au réseau électrique.
5. Longue durée de vie : les panneaux solaires ont une durée de vie d'environ 25 à 30 ans, ce qui en fait un investissement rentable à long terme.

Inconvénients :

1. Coût initial élevé : l'installation de panneaux solaires peut être coûteuse et nécessite souvent un investissement initial important.
2. Dépendance à la météo : l'énergie solaire est une source d'énergie intermittente, ce qui signifie que la production d'électricité dépend des conditions météorologiques et de la luminosité du soleil.
3. Occupation de l'espace : les installations solaires nécessitent souvent beaucoup d'espace pour installer les panneaux, ce qui peut poser des problèmes dans les zones urbaines densément peuplées.
4. Stockage d'énergie : en l'absence de soleil, il est difficile de stocker l'énergie solaire, ce qui signifie que les systèmes solaires nécessitent souvent des systèmes de stockage d'énergie coûteux pour fournir de l'énergie en continu.
5. Production de déchets : les panneaux solaires contiennent des matériaux toxiques qui peuvent être nocifs pour l'environnement lorsqu'ils sont mal gérés en fin de vie.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur le gisement solaire et la production d'énergie électrique, et nous nous sommes intéressés à la production photovoltaïque qui est à base d'un semi-conducteur (silicium), assurant la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, par la suit nous avons exposé brièvement quelques topologies de convertisseurs, utilises fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaites ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges . Dans nôtre travaille, le Boost est le meilleur choix car l'élévateur du gain et le rendement ainsi la simplicité du circuit.

CHAPITRE II

PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

II.1 Introduction :

Le distributeur de l'énergie électrique a pour objectif de fournir à l'ensemble de ses clients une énergie de bonne qualité [15]. La modernisation des processus industriels ainsi que la sophistication des machines et appareillages électriques ont entrainé, ces dernières années, un développement important de l'électronique de puissance comportant les différents convertisseurs statiques d'énergie à base de semi-conducteurs (redresseurs, onduleurs, cyclo-convertisseurs, alimentations à découpage, etc.…). Ces systèmes représentent pour le réseau électrique des charges dites « non linéaires » dont le courant absorbé n'est pas à l'image de la tension d'alimentation (bien que la tension de la source imposée à la charge soit sinusoïdale, le courant absorbé ne l'est pas).

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdale triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

II.2 Perturbations affectant le réseau électrique de distribution

La qualité de l'énergie électrique dépend de la tension aux points de raccordement et du courant absorbé par la charge. La tension est fournie sous la forme de trois tensions sinusoïdales, d'amplitude et de fréquence constantes [16], constituant un réseau triphasé équilibré [15]. Les perturbations peuvent se manifester par un creux ou une coupure brève de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence et par les harmoniques.

II.2.1 Creux et coupures de tension:

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre10% et 90%de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelque second.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils s'apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) **[16].** Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues.La plupart des appareils électriques admettent un coupure totale d'alimentation d'une durée inférieureà 10 ms. La figure (II.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

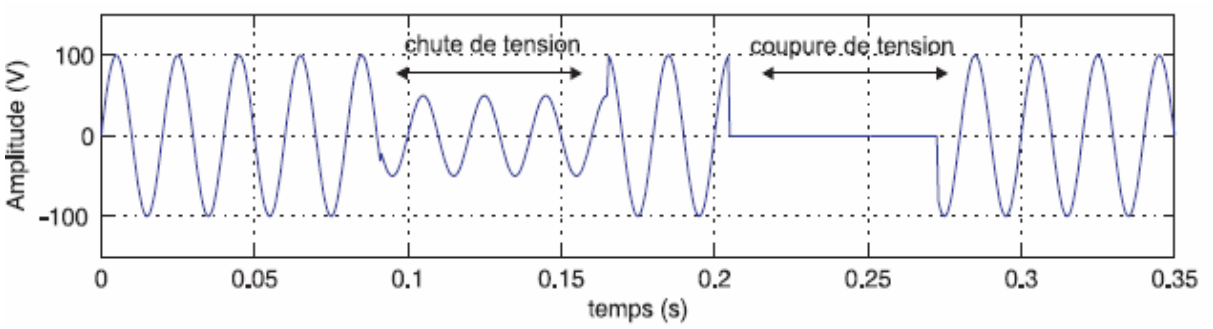


Figure II. 1-Creux et coupures de tension

II.2.2 Fluctuations de tension:

Les fluctuations de tension peuvent être décrites comme une variation de l'enveloppe de tension ou comme une suite de variation de tension aléatoire, figure (II.2), ce sont des variations brutales d'amplitude située dans une bande de ±10% et se produisent sur unintervalle de quelques centièmes de secondes. Elles sont dues en particulier à la propagation, sur les lignes du réseau, de courants d'appel importants dont l'origine principale est le fonctionnement d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc ou encore les machines à souder.

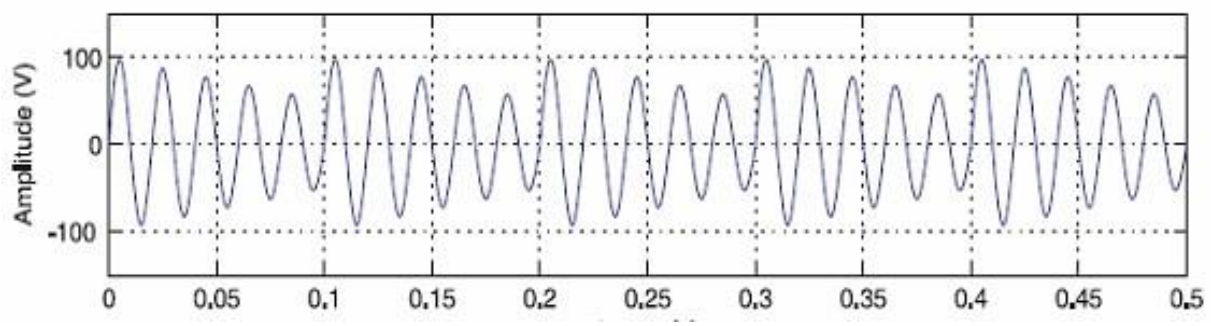


Figure II. 2-Fluctuations de tension

II.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (II.3). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. **[16]**

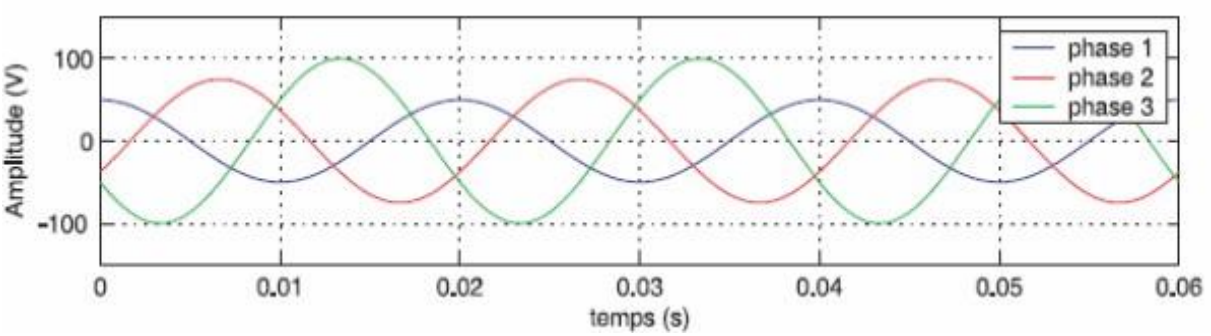


Figure II. 3-Déséquilibre du système triphasé de tension

II.2.4 Variation de fréquence :

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaitre sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, voir la figure (II.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présenteque lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau.Dans les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz 1% ±. **[16].**

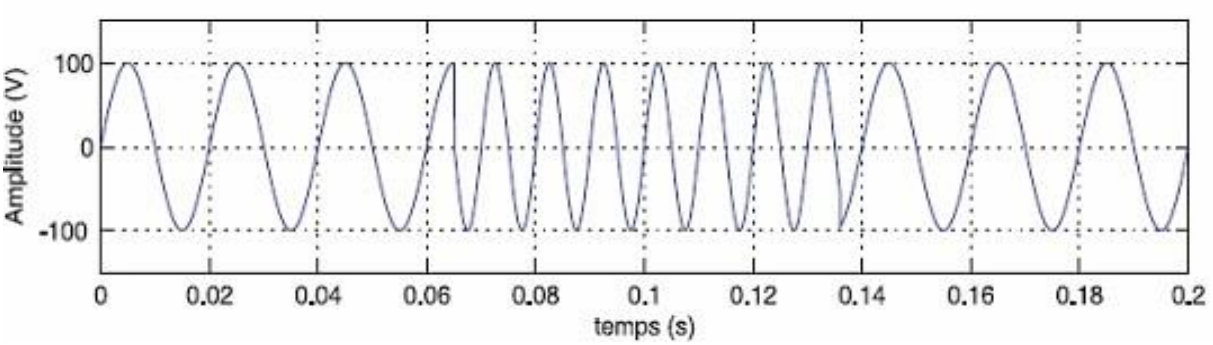


Figure II. 4-Variation de la fréquence

II.2.5 Les harmoniques :

II.2.5.1 Définition et origine des harmoniques et inter-harmoniques :

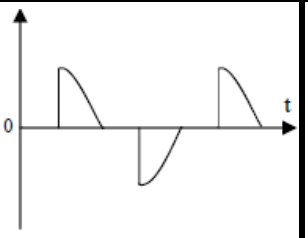
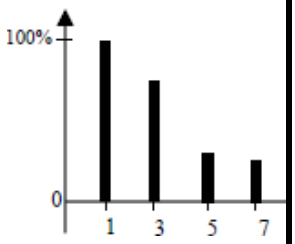
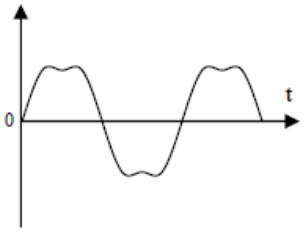
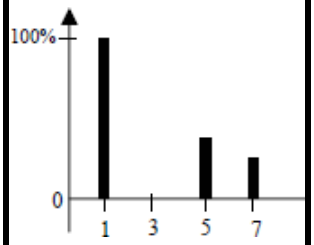
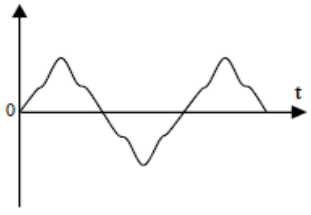
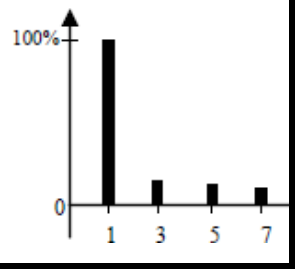
Les harmoniques sont des signaux dont la fréquence est un multiple entier de celle du fondamental, ils sont principalement générés par des charges non linéaires. Soumise à une tension sinusoïdale, une charge non linéaire absorbe un courant déformé dont les composantes

harmoniques dépendent que de ses caractéristiques propres et non de celles du réseau. Cette charge se comporte comme une source de courants harmoniques, on peut observer d'autres fréquences qui sont des multiples non entiers de celle du fondamental.

Les principales sources d'harmoniques sont dues aux convertisseurs statique (redresseurs, variateurs de vitesse, ordinateurs, téléviseurs, etc..). Pour les inter-harmoniques, les sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les moteurs asynchrones et les machines à souder (pour le réseau à basse tension), et les fours à arc (pour le réseau a moyenne et haute tension).

Le tableau (II.1) montre quelques sources des harmoniques. **[17]**

Tableau II. 1 Sources des perturbations harmoniques

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondent
- Gradateurs monophasé (commandepar angle dephase).	- Régulation de puissance de fours à résistances. - Modulation de puissance des lampes halogènes.		
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur devitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		
- Moteur asynchrone.	- Machines-outils, - Appareils électroménagers. - Ascenseurs.		

II.2.5.2 Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la

tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive. [18]

La circulation des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires à travers des impédances harmoniques du réseau en un point du réseau crée des harmoniques de tension selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h * I_h \qquad \text{(II.1)}$$

Vh : la tension harmonique de rang h.

Zh : l'impédance harmonique de rang h.

Ih : le courant harmonique de rang h.

Le contenu harmonique d'une grandeur, tension ou courant par exemple, peut être calculé enutilisant la décomposition en série de Fourier. Cette décomposition met en évidence [15] :

- Un terme sinusoïdal à la fréquence 50Hz du réseau, le fondamental.
- Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de celle du fondamental, les harmoniques.

Ainsi, la somme de ces deux termes donne l'expression de la grandeur, selon les relations suivantes :

$$v(t) = \sum_{h=i} V_h . \sqrt{2} . \sin(hwt - \theta_h) \qquad \text{(II.2)}$$

$$i(t) = \sum_{h=i} I_h . \sqrt{2} . \cos(hwt - \varphi_h) \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

h : rang harmonique.

Vh, Ih : tension et courant harmoniques de rang h.

w: pulsation fondamentale (2π.f1=2π/T).

φh: déphasage du courant

Ih par apport à l'origine des phases à l'instant initial (t=0s).

θh : déphasage de la tension

Vh par apport à l'origine des phases à l'instant initial (t=0s).

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h . I_h . \cos(\varphi_h - \theta_h)$$

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}.\int_0^T y^2(t)dt} \quad \text{(II.4)}$$

Le théorème de Perceval montre que [4] :

$$\frac{1}{T}\int_0^T y^2(t)dt = Y_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2 \quad \text{(II.5)}$$

$\boldsymbol{Y_0}$: la fondamentale et $\boldsymbol{Y_h}$: l'harmonique

On a donc les relations suivantes par les grandeurs suivantes [2] :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad \text{(II.6)}$$

De même :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{(II.7)}$$

II.2.5.3 Les puissances mises en jeu [19]

Les notions de puissance définies pour les signaux sinusoïdaux ne sont pas valables pour les signaux non sinusoïdaux. Considérons un courant et une tension non sinusoïdaux la puissanceactive est exprimée par:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v(t).i(t)dt \quad \text{(II.8)}$$

Après calcul on obtient :

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h.I_h.\cos(\varphi_h - \theta_h) \quad \text{(II.9)}$$

De même, la puissance réactive est donnée comme suit:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h.I_h.\sin(\theta_h - \varphi_h) \quad \text{(II.10)}$$

La puissance apparente monophasée est :

$$S = V_{eff}.I_{eff} \quad \text{(II.11)}$$

La contribution des produits des rangs harmoniques engendre une puissance déformante, exprimée en volt ampère déformant (VAD) et peut s'écrire sous la forme [20] :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad \text{(II.12)}$$

Le facteur de puissance F est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente.Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente disponible au niveau de la source. Son expression est la suivante [20] :

La puissance apparente S est composée de trois parties : active P, réactive Q et déformante D.

$$FP = \frac{P_i}{S} = \frac{P_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2 + D^2}} \quad \text{(II.13)}$$

De cette équation, le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1, Sachant que :

$$P_i = VI_i \cos \varphi_i \quad \text{(II.14)}$$

On obtient:

$$FP = \frac{I_i}{I_{eff}} \quad \text{(II.15)}$$

Ieff: la valeur efficace du courant de la charge

Ii: la valeur efficace du courant fondamental de la charge

II.2.5.4 Distorsion harmonique

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation du signal. On caractérise la déformation sur un rang particulier par le taux harmonique de rang h, exprimé par rapport à la composante fondamentale [19], soit :

$$Y_h(\%) = \frac{Y_h}{Y_i}.100 \quad \text{(II.16)}$$

On définit le taux de distorsion harmonique (THD) ou facteur de distorsion, qui peut s'appliqué soit au courant, soit à la tension, par :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}}{Y_i}.100 \quad \text{(II.17)}$$

II.2.5.5 Rang de l'harmonique

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence fn à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz).

$$n = \frac{f_n}{f_i} \quad \text{(II.18)}$$

II.2.6 Les Effets des harmoniques :

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances.

II.2.6.1 Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans lecas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévisionou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. La précision des appareils demesure est également affectée par la présence d'harmoniques. **[18]**

II.2.6.2 Les effets à terme

Les effets différés sont souvent liés à un sur échauffement plus au moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes, l'échauffement des conducteurs ou des composantes traversées par des courants harmoniques et le vieillissement des isolants, on peut distinguer trois classes :

- **Les effets à court terme** (jusqu'à quelque secondes).
- **Les effets à moyen terme** (de quelques secondes à quelques heures).
- **Les effets à long terme** (de quelques heures à quelques années).

Tableau II. 2 Effet des harmoniques sur quelques matériels

Nature du matériel élèctrique	Effet de la «pollution harmonique »
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans lesenroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.

Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et Multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, Transistors, etc.)	Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissants à unvieillissement prématuré des condensateurs
Lampes à décharge	Risque de vacillement
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs Magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image

II.3 Solutions de dépollution du réseau électrique

Il existe deux solutions principales de dépollutions électriques pour réduire les perturbations la solution de dépollution traditionnelle qui consiste à utiliser les convertisseurs statiques peu ou moins polluant et les solutions de dépollution moderne qui utilise le filtrage pour compenser les harmoniques. **[21]**

II.3.1 Solutions traditionnelle de dépollution

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Qui est la méthodelà moins couteuse et la plus utilisé. Elles apportent une solution plus facile et rapide pour certains cas de perturbation bien localisé. Elles utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. **[21]**

II.3.1.1 Filtrage passif

Cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la

fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répondus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques.

II.3.1.1.a Filtres passifs résonants

Qui sont constitué d'un circuit LC série avec résistance utilisée généralement pour éliminer les harmoniques de rang 5 et 7. Comme il est représenté sur la figure (II.5).

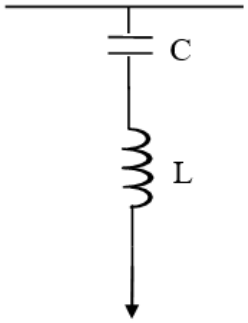


Figure II. 5- Filtre passif résonant.

II.3.1.1.b Filtres passifs amortis

Qui est constitué d'un circuit LC et une résistance R. la résistance est en parallèle avec l'inductance L, Ce filtre est généralement utilisé pour filtrer tous les harmoniques de rang supérieurà 11. Il est moins sensible à la variation de ces paramètres, néanmoins sa résistance d'amortissementinflue sur la fréquence de résonance.

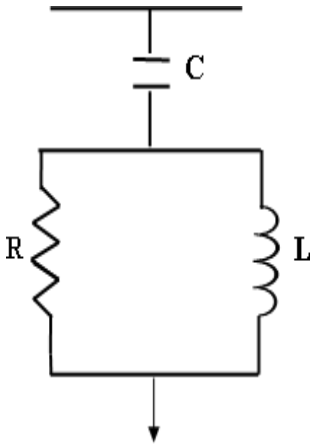


Figure II. 6-Filtre passif amorti.

II.3.2 Solutions modernes de dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et desréseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi- conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT et MOSFET. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. **[22]**

II.3.2.1 Correction du facteur de puissance(PFC)

Un convertisseur AC/DC avec un correcteur de facteur de puissance, figure (II.7) 'PFC' agit comme si l'alimentation était une résistance pure vue de l'extérieur, c'est à dire que le courant est sinusoïdal et en phase avec la tension. Le PFC permet de limiter le taux de perturbation harmonique provoqué par les systèmes d'électronique de puissance connectés au réseauélectrique et le rend sans harmoniques, et compense la puissance réactive.

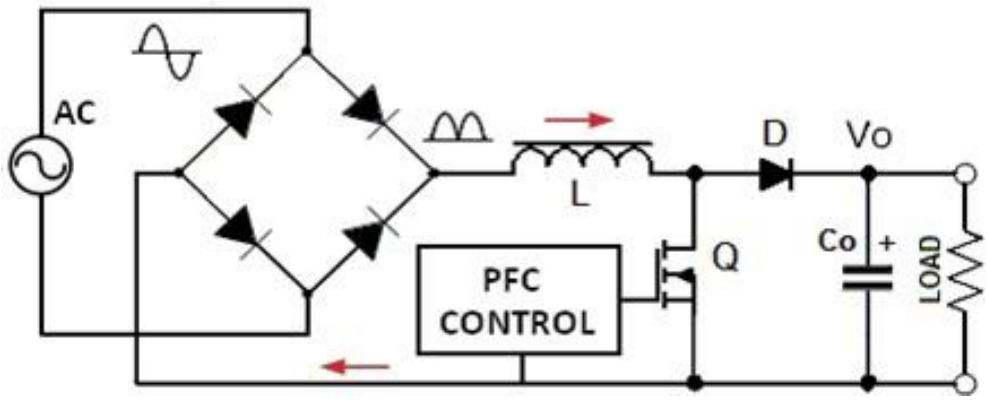


Figure II. 7- Montage d'un correcteur du facteur de puissance (PFC)

II.3.2.2 Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions MLI, figure (II.8) utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives.

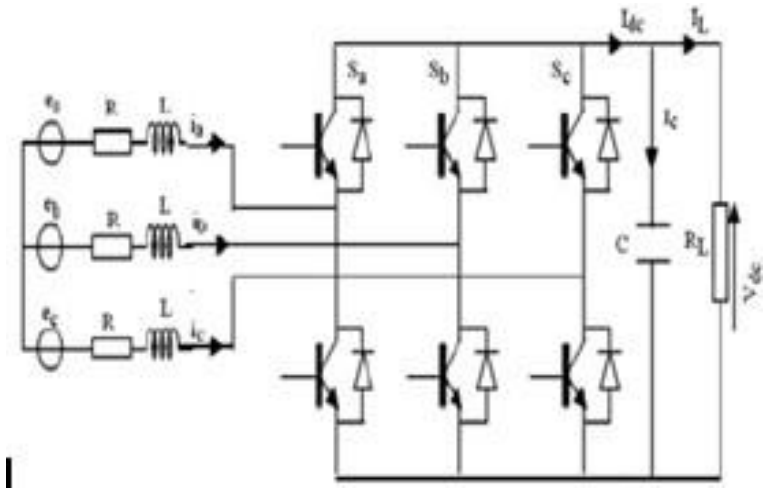


Figure II. 8-Redresseur MLI

II.3.2.3 Filtrage Actif

Les filtres actifs sont constitués de convertisseurs statiques à base des semi-conducteurs de puissance commandés par un système de contrôle approprié. Ils peuvent être une source de courantou de tension qui compensent en temps réel les harmoniques en injectant au niveau du point de raccordement un courant ou une tension en opposition de phase par rapport aux perturbations harmoniques existantes, afin que le courant/tension de ligne reste purement sinusoïdal et égale au fondamental du courant de charge. **[23]**

II.3.2.3.a Filtre UPQC

Association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale. **[24]**

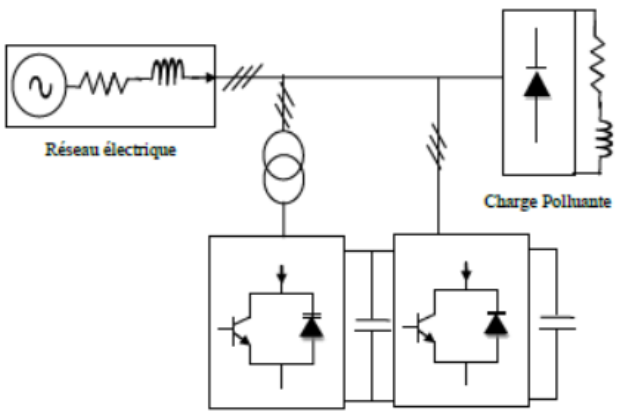


Figure II. 9-Filtre UPQC.

II.3.2.3.b Filtre actif de puissance série

Qui sont considérer comme une source de tension branchée en série avec le réseau électrique. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire **[25]**

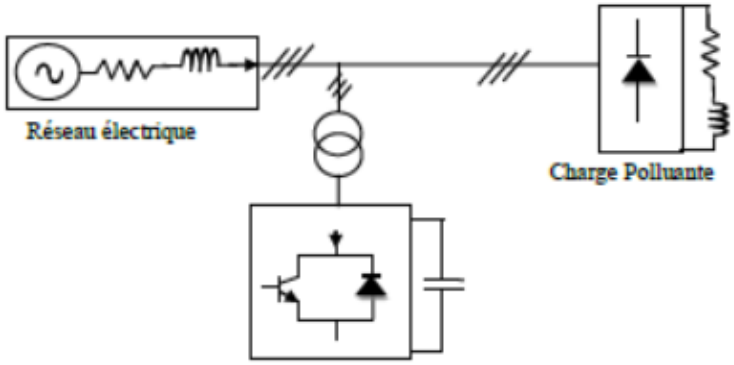


Figure II. 10-Filtre actif de puissance série.

II.3.2.3.c Filtre actif de puissance parallèle

Le filtre actif de puissance parallèle est connecté en parallèle sur le réseau électrique entre la source de tension et la charge non-linéaire. Il injecte dans le réseau le courant nécessaire afin de compenser les harmoniques de la charge polluante. Il est souvent commandé comme générateur de courant réglable. Ainsi, l'objectif du filtre actif parallèle est conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactiveengendrés par la charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. **[26]**

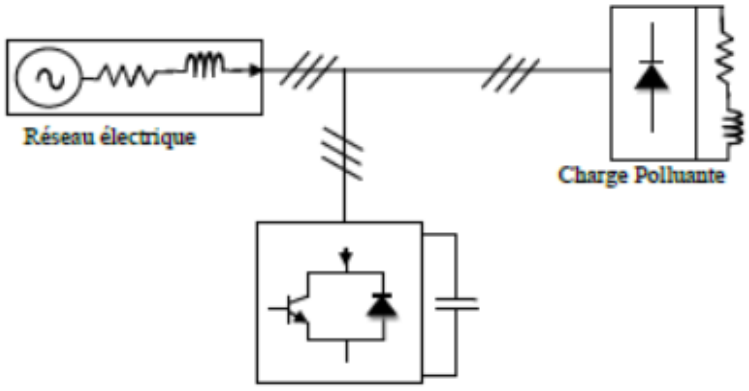


Figure II. 11-Filtre actif de puissance parallèle

II.3.2.3.c.1 Coût du filtre actif :

Le coût du filtre actif varie principalement en fonction de la taille de son élément de stockaged'énergie, du nombre de semi-conducteurs qu'il contient ainsi que de sa topologie. Pour les applications de faibles et moyennes puissances, le stockage de l'énergie capacitif s'avère plus efficace et moins coûteux que celui de stockage d'énergie inductif. De façon complémentaire, l'élément de stockage d'énergie inductif, composée d'une bobine supra conductrice, est plus fiable dans les applications de haute puissance. Pour ce qui est du dernier point, il est à noter que des améliorations doivent encore être faites, car les bobines supraconductrices sont encoreau stade de recherche. La topologie du filtre actif joue un grand rôle dans le coût. La topologiehybride, de son côté, permet de réduire le coût du filtre actif (réduction de la taille de l'élément de stockage d'énergie) puisque la majorité de la compensation harmonique est effectuée par le filtre passif.

II.3.2.3.c.2 Avantages du filtrage actif :

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau. b/ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques.
- Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- L'effet de l'impédance du réseau est moindre que dans le cas du filtre passif. Le risque de résonnance entre le filtre actif et l'impédance du réseau est inexistant.
- Il peut protéger les condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

II.4 Le filtre actif parallèle

II.4.1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (II.12), est le plussouvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés),

produits par des chargespolluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif **[17].**

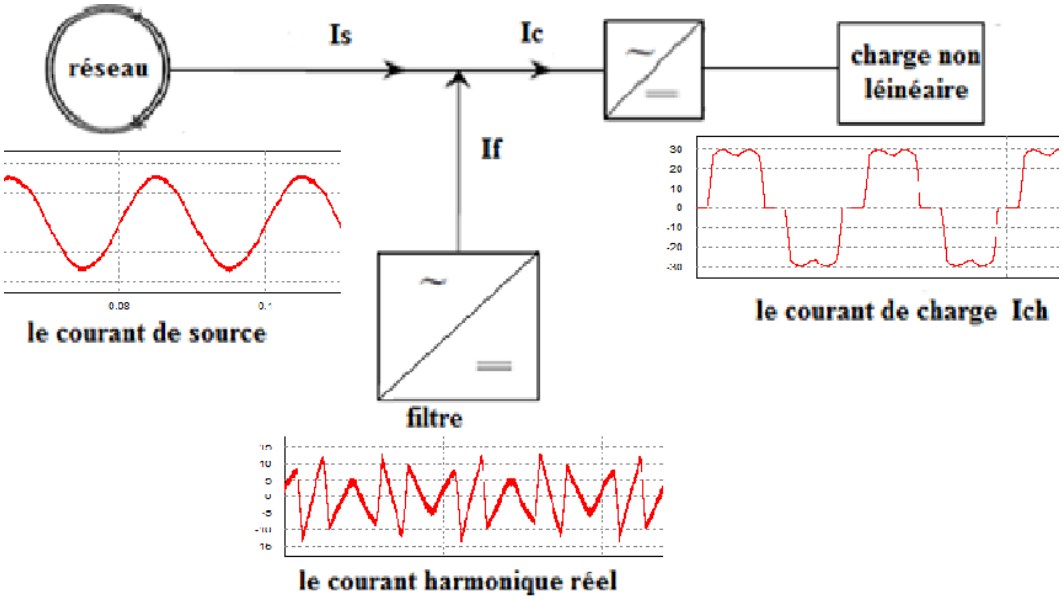


Figure II.12- Principe du filtrage actif parallèle

II.4.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle

La figure (II.13) montre la structure d'un filtre actif composé en deux parties:

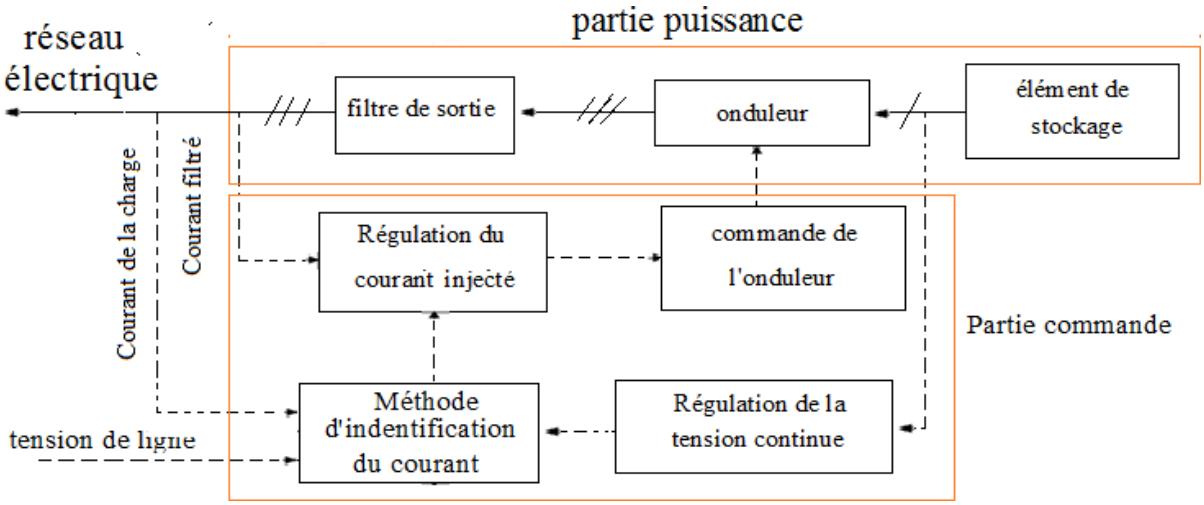


Figure II. 13-Structure générale d'un filtre actif parallèle

La partie puissance qui est constituée:

- D'un onduleur de tension.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande qui est constituée:

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'un système de commande de l'onduleur de tension.
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

II.4.3 Applications des filtres actifs parallèles

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type seconnectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles sont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux avec plusieurs charges polluanteset dans les réseaux à courant continu en haute tension.

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.). En fin, le filtrageactif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent lescourants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50. Ces filtresactifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et uneprolongation de la durée de vie de l'installation **[27]**

II.4.4 Classement des filtres actifs parallèles

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie :

- Filtres actifs monophasés ou triphasés ;
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé ;
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature, dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentationen continu), sauf dans le cas de la traction électrique. La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé.

Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé. Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras ; ence qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur uncommutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau. Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu).

Par ailleurs, les modules à IGBTS disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti- retour. De plus, un aspect vient renforcer provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classiques. En conséquence presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension **[27].**

II.5 Structure de l'onduleur a deux niveaux

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas. L'onduleur est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante : fi = { 1 l ′ interrupteur i est fermé (Ki conduit, $\bar{k}\,i$ bloqué) 0 $l\,'\,interrupteur$

$i\ est\ ouvert$ ($Ki\ bloqué$, $ki\bar{}\ conduit$) Avec : $fi + \bar{f}\ i = 1$ et i= 1…3.

La figure (II.14) fournit une représentation schématique de cet onduleur.

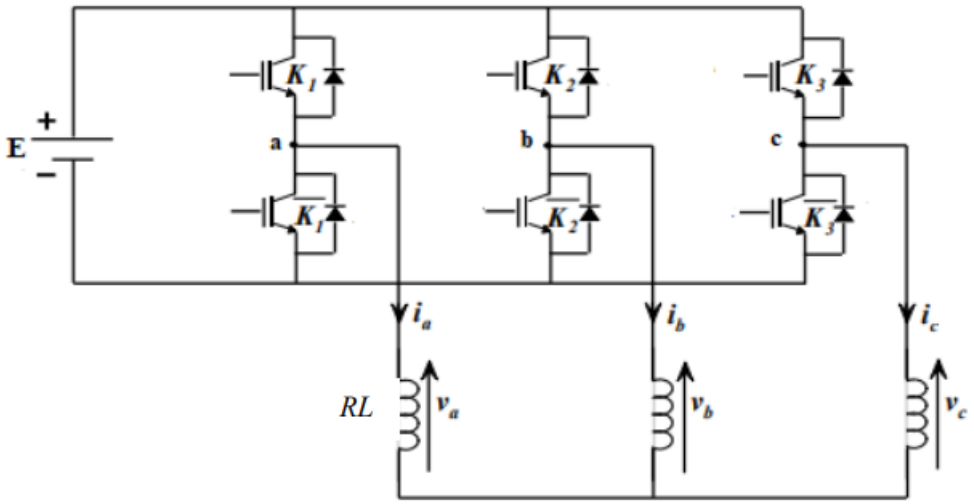


Figure II. 14- Schéma d'un onduleur de tension triphasé

II.6 Conclusion :

Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment.

On a abordé les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluant.

CHAPITRE III

TECHNIQUE D'OPTIMISATION DE L'ENERGIE

III.1 Introduction

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans quel'on sache à quel moment ils ont n'été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » oubien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

III.2 Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé parune MPPT [29]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure (III.1).

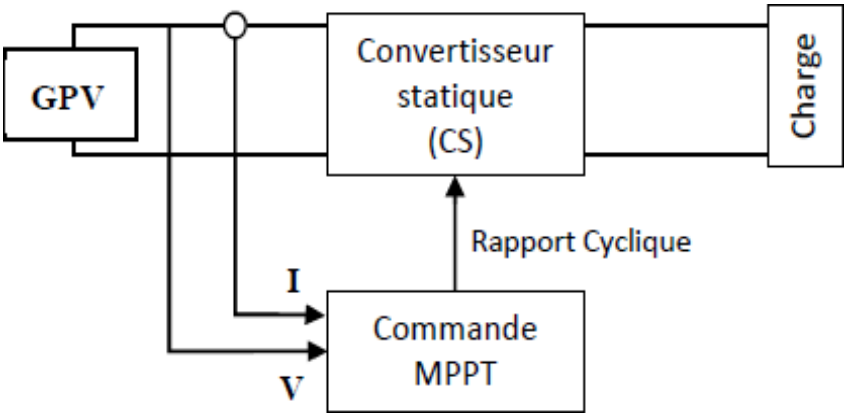


Figure III 1-Chaîne de conversion d'énergie solaire.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP.

En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entréede ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

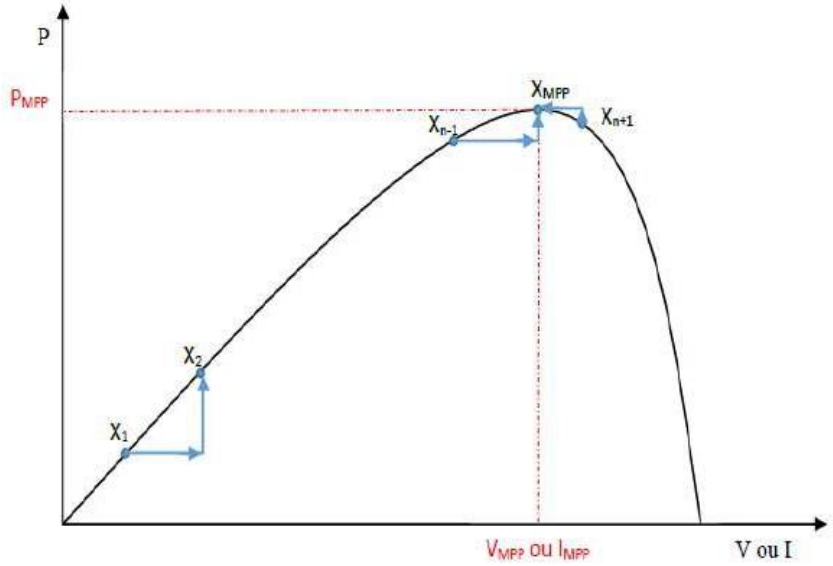


Figure III 2- Principe de la commande MPPT

III.2.1 Classification des commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [30].

III.2.1.A Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolutionde la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb &Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le pointde puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [30].

III.2.1.B Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de ***Pmax*** est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [30].

III.2.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

A/ MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (***Isc*** ou ***Voc***), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [30].

B/MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction derecherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse

de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du Courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension duGPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [30].

III.3 Les algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

III.3.1 Approche de la tension constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative (III-1) liant cette tension avec la tension de point maximal VMPP du GPV[30]:

$$VMPP = K1 * VOC \qquad \text{(III.1)}$$

Où k1 est une constante de proportionnalité.il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une foisque k1 est déterminé, le VMPP peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (III-1) avec VOC mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension VMPP est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle VPV et la tension de référence Vref(VMPP). Le signal d'erreur est traité pourrendre V = Vref. (Figure III.3)

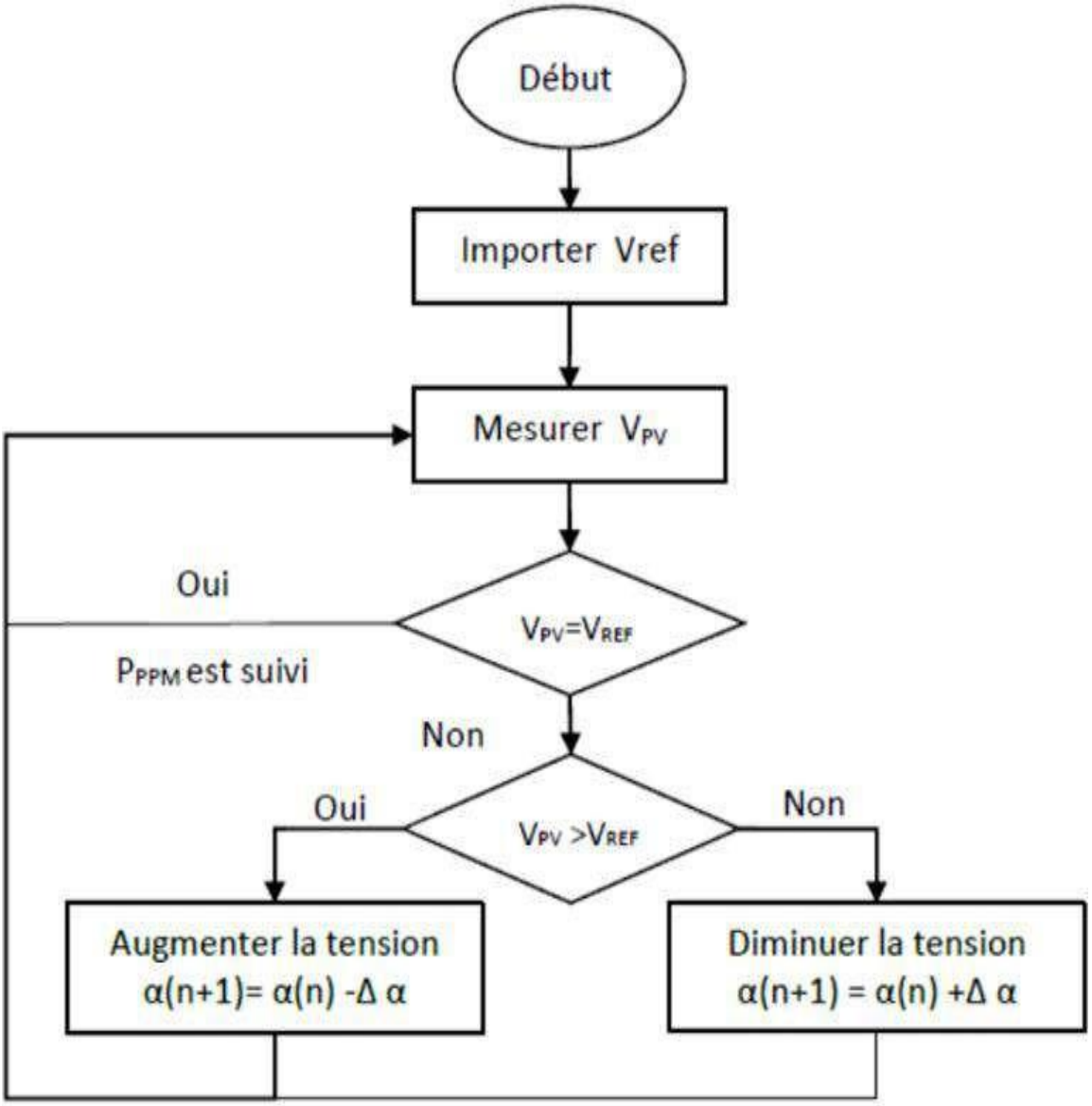


Figure III 3-Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [29]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à 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 Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc.et n'oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV [31].

III.3.2 Approche du courant constant (Constant Current) :

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur lamesure en temps réel du courant de court-circuit Isc (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (III-2) liant cette courant avec le courant de point maximal IMPP du GPV [30] :

$$IMPP = K_2 * Isc \quad \text{(III.2)}$$

Avec k2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [32]. La mesure du courant I_{SC} durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant I_{SC} à l'aide d'un capteur de courant.

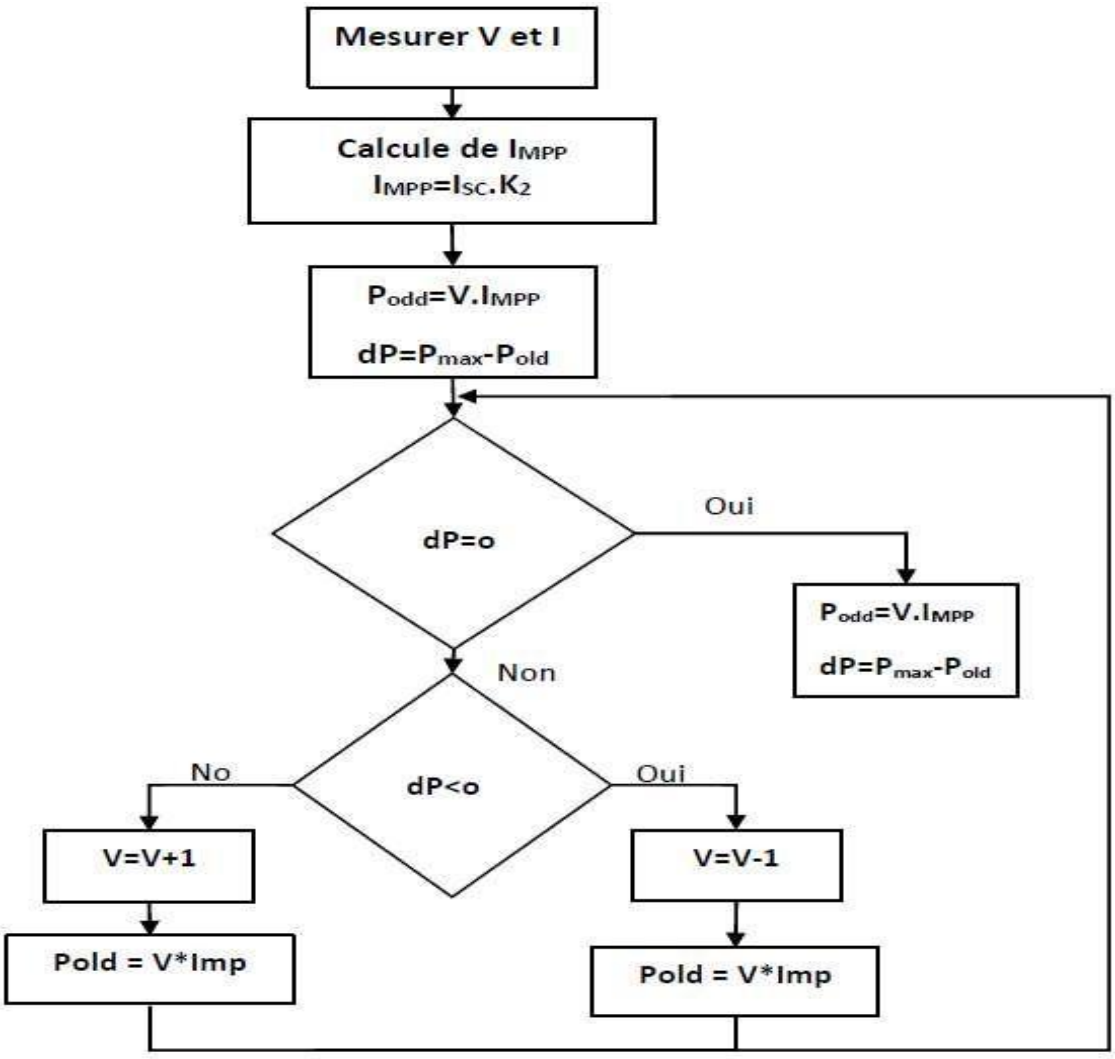


Figure III 4-Algorithme du constant courant

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance,alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrémenté en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (IMPP) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [29]. Figure (III.4)

III.3.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension *Vref*, ou du courant *Iref*, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée *(P=VI)* [33].

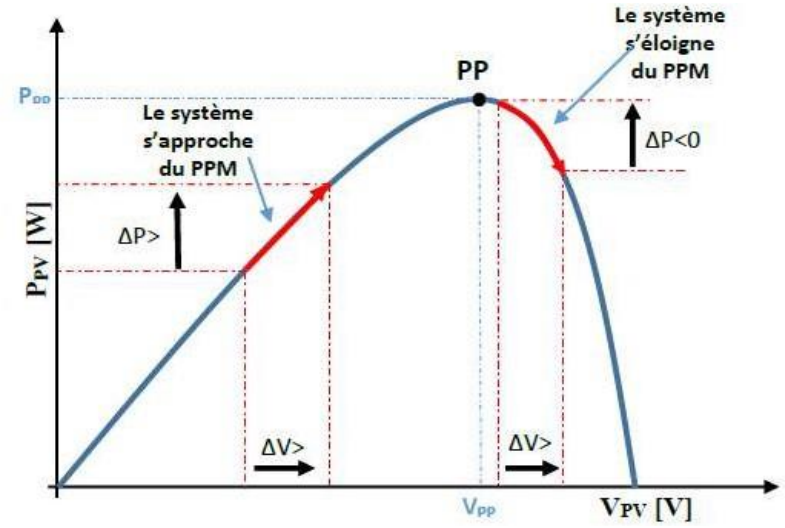


Figure III 5- Recherche du PPM par la méthode (P&O)

Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [34].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tensionVPV, ce qui engendre une variation de la puissance [35]. Figure (III.5) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à

gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P(V), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique p(v), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM,Et defaire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [32]. La Figure (III.6) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, oùl'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

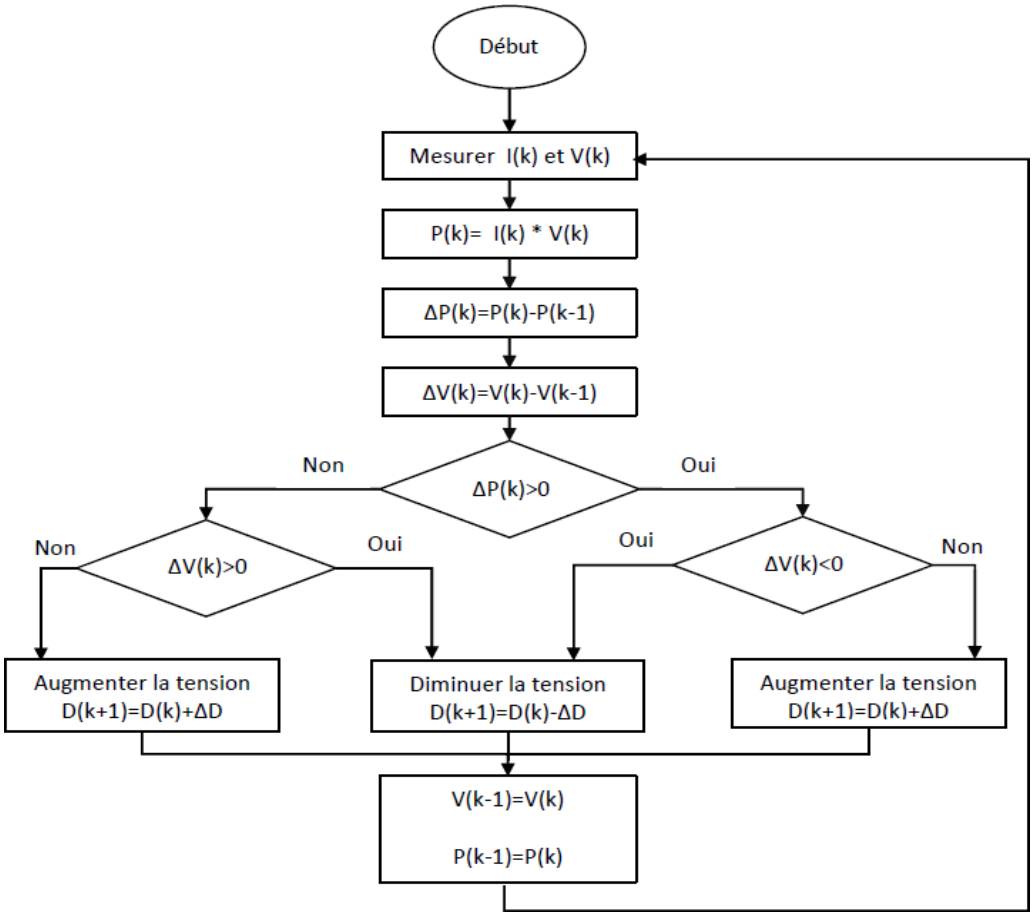


Figure III 6- l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint [36]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [37] :

•Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditionsstables ou lentement changeantes.

•Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure (III.7) Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, cequ'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [32].

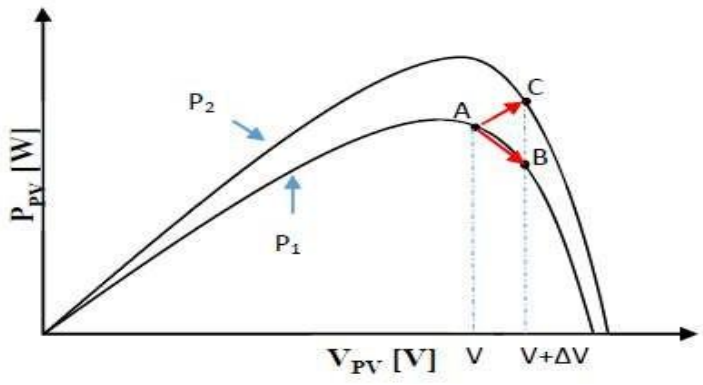


Figure III 7- Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre unedécision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la Figure III.8 avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [38].

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N * \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \quad \text{(III.3)}$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

III.3.4 Conductance Incrémentale

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneauest nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. Figure III.8

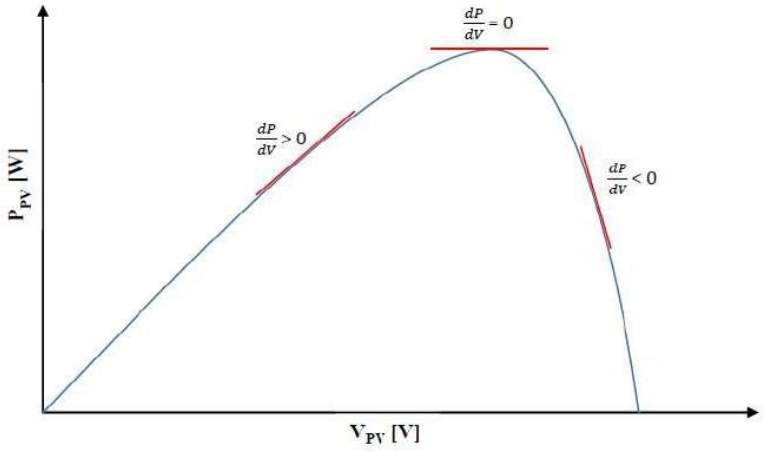


Figure III 8-Caractéristique de tension-puissance du panneau

On observer que :

dP/dV=0 au PPM

dP/dV>0 à gauche du PPM (III.4).

dP/dV<0 à droite du PPM

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V * I \quad \text{(III.5).}$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \cong I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} \qquad \text{(III.6).}$$

Donc, l'équation (III.4) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur le PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à gauche le PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à droite le PPM} \end{cases} \qquad \text{(III.7)}$$

Le PPM peut être atteinte en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance (dIPV/dVPV). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance (-G), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM. La Figure (III.9) montre l'algorithme de cette méthode.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP caril est difficile de remplir la condition dP/dv =0, ce qui fait que le système reste toujours en train dela chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert Voc sur le courant de court-circuit Isc. Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maximas locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur [34]

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \qquad \text{(III.8).}$$

D'après l'équation (III-8), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau

PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

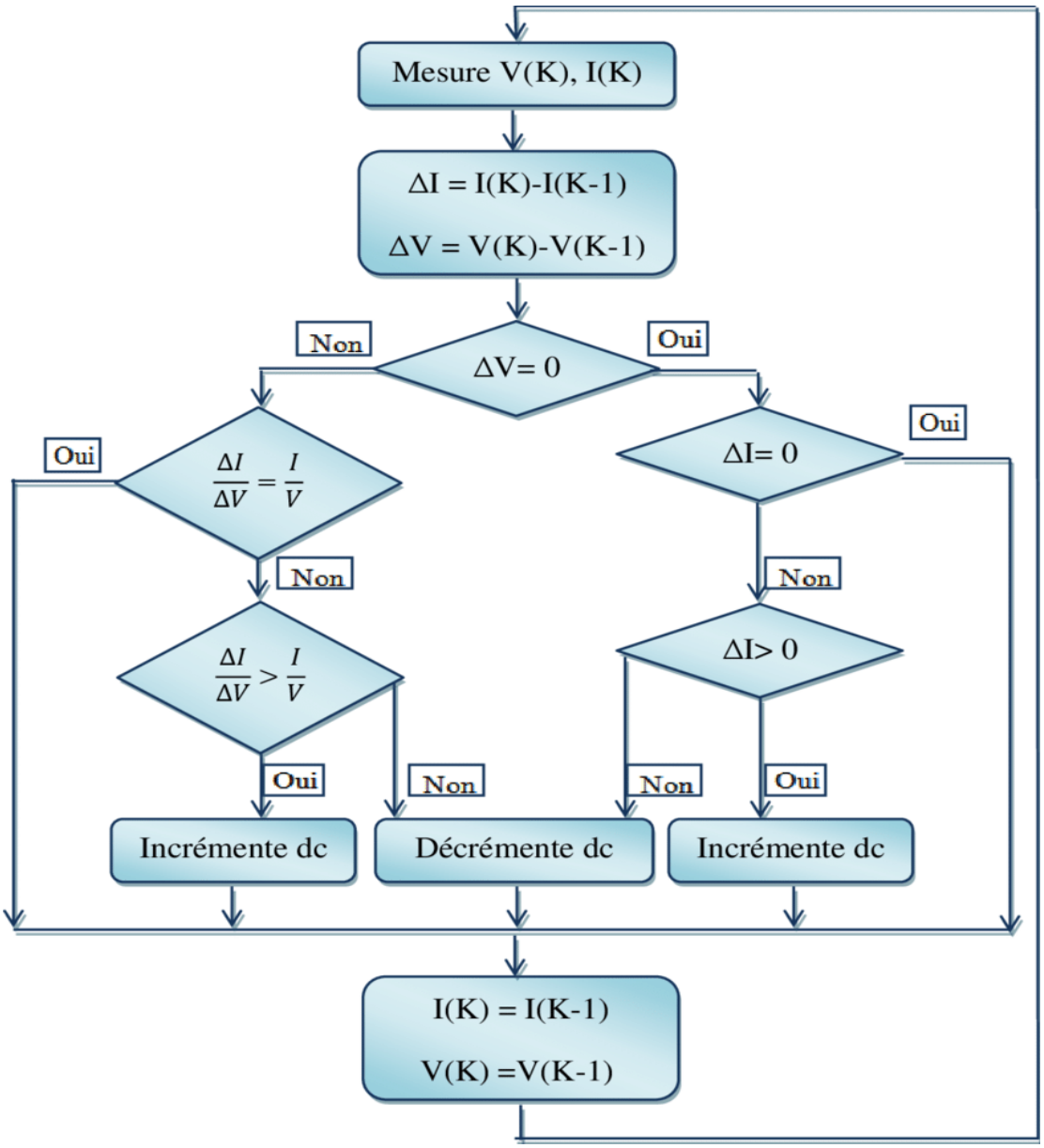


Figure III 9-l'algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encoure comme la méthode de P&O. c'est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est [39] :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N * \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \quad \text{(III.9)}$$

III.3.5 La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) estde plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [40-41]. L'avantage de cettetechnique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pasbesoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités. Leprincipe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le Changement d'erreur ΔE et une variable de sortie Δα (variation du rapport cyclique). La valeur dela variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée àl'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dansla littérature :

- La fuzzification,
- La lecture de la table de vérité,
- La defuzzification.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB : Negative Big,
- NS : Negative Small,
- ZE : Zéro,
- PS : Positive Small,
- PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure (III.10).

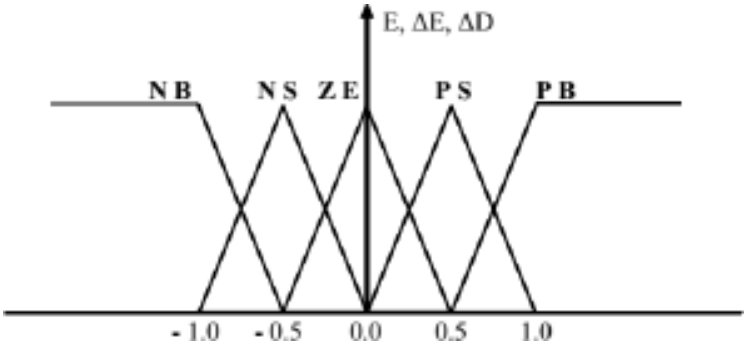


Figure III 10-Structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n)-P(\mathrm{n}-1)}{V(n)-V(n-1)} \quad \text{(III.10)}$$

$$\Delta E(n) = \mathrm{E(n)} - \mathrm{E(n-1)} \quad \text{(III.11).}$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau III.1, une valeur est attribuée au paramètre de sortie Δ α.

Tableau III.1-Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue

E \ ΔE	**NB**	**NS**	**ZE**	**PS**	**PB**
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

La variable linguistique assignée à Δα, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE. Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un pointde fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie Δα est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à Δα s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie Δα, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table devérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures

performances en termes de précisionet de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [42-43].

III.3.6 Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à destechniques nouvelles. On peut citer [44-45] :

- Méthode de look-up table.
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.
- Méthode de β.
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).
- La méthode de balayage du courant (CurrentSweep).

III.4 Algorithmes méta heuristiques:

Les métas heuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation heuristiques qui visentà la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé « SA »), en biologie de l'évolution (cas des Algorithmes Génétiques GA) ou encore du comportement social dans la nature (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims particulaires) [46].

Ces techniques méta heuristiques peuvent être classées en deux groupes: les méthodes basées sur population permettent d'atteindre des optimums globaux ou proche d'eux, comme les systèmes experts (ES), réseaux de neurones artificiels (ANN), génétique algorithme (GA), ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé (SA). Les méthodes méta heuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l'optimisation mono-objectif. Actuellement les recherches qui utilisent ces algorithmes sont évoluées pour permettre la résolution des problèmes d'optimisation multi-objective, en tenant compte de plusieurs contraintes et de nouvelles configurations des réseaux électriques surtout avec la pénétration des sources d'énergie renouvelable où la résolution du problème d'optimisation constitue un défi. Un exemple de classification de ces méthodes est montré dans la figure (III.11). [47].

En effet, une grande variété des techniques d'optimisation sont appliquées, et un grand nombre d'articles sont publiés dans ce sens. Parmi ces techniques, on peut citer aussi ;

recherche par colonie des formées (ACO), Colonie d'abeilles Artificielles (ABC), Différentiel Evolutionnaire (DE), plus des techniques d'intelligence artificielle hybrides [48].

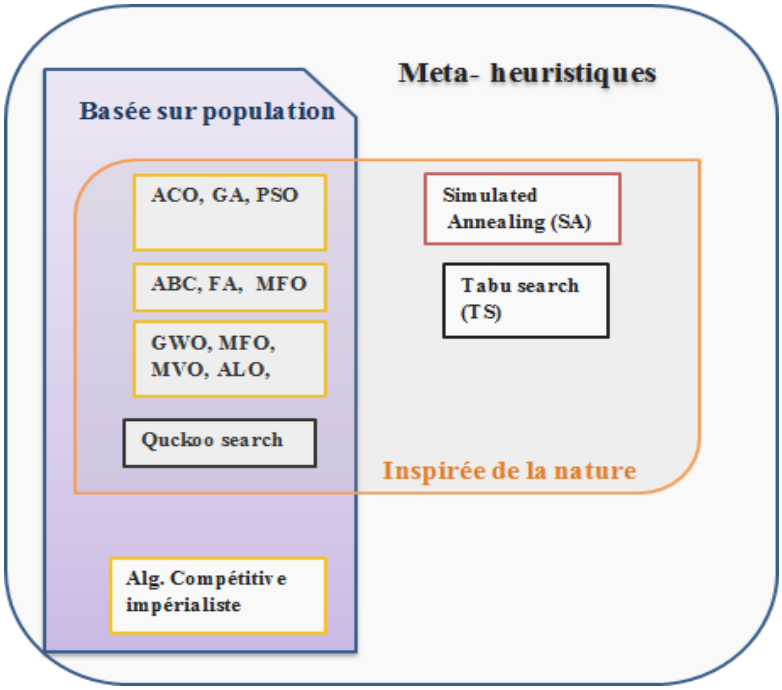


Figure III 11- Exemple de classification des méthodes méta heuristiques [48].

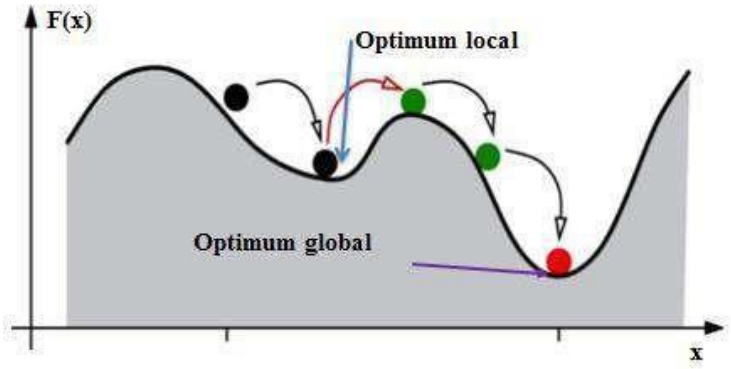


Figure III 12- Exemple de l'optimum global d'un problème d'optimisation.

En effet, l'optimisation basée sur l'utilisation des algorithmes méta heuristiques démarrentavec un certain réglage initial des variables de contrôle. Ces dernières évoluent à travers la procédure d'optimisation pour obtenir l'optimum global minimal/maximal d'une fonctionobjective. La fonction objective est le modèle mathématique qui affecte une valeur pour chaque solution dans l'espace de recherche [49]. En commençant à partir d'une solution initiale conçue par quelques heuristiques ou méta heuristiques et puis améliorée

itérativementjusqu'à ce qu'un critère d'arrêt choisi soit satisfait [50]. Le critère d'arrêt peut être un temps écoulé, nombre d'itérations, etc. La fonction de l'algorithme méta heuristique veille de façon à déterminer la solution finale. La recherche est effectuée sous la procédure caractérisant chaque algorithme méta heuristique, mais c'est une façon qui intelligemment tend à trouver la bonne solution possible. Cependant, il n'y a pas de garantie que la solution trouvée par la méta heuristique est toujours la bonne [51].

Tous les algorithmes méta heuristiques utilisent certain compromis d'exploitation locale et exploration globale, et une variété des solutions lesquelles rarement réalisées à travers le choix aléatoire. Ce dernier fournit une bonne manière de se déplacer de la recherche locale vers la recherche globale figure (III.12), ainsi, les deux concepts principaux des algorithmes méta heuristiques sont [51], [52]:

- Désertification ou exploration : qui est le moyen de générer des solutions diverses de sorte que l'espace de recherche soit exploré à une échelle globale.

- L'intensification ou exploitation : qui est le moyen de visé sur la recherche dans une région locale par exploiter l'information qu'une bonne solution actuelle est trouvée dans la région, cette dernière est en combinaison avec la bonne solution déjà trouvée, permettent d'obtenir la bonne solution du problème.

III.5 Méthode d'optimisation par les loups gris GWO :

La méthode GWO est un nouvel algorithme proposé par le chercheur Iranien **Mirjalili**, en 2014.L'algorithme GWO utilise la simulation de l'autorité sociale représenté par le comportement d'encerclement de la victime dans le but d'obtenir la solution optimale du problème à optimiser. Cet algorithme imite la technique de domination hiérarchique des loups gris pendant l'opération de la chasse pour la victime, et ce jusqu'à l'arrêt de leurs mouvements. Le GWO est similaire aux algorithmes basés sur population dans la recherche de la solution, par simuler le comportement naturel des loups gris dans leur vie sociale, lorsqu'ils cherchent leur nourriture.

Le premier niveau représente le commandement du groupe est appelé (alpha), le deuxième niveau dans la hiérarchie est appelé (beta), qui aide alpha à prendre de la décision. Le niveau suivant contient delta et oméga qui et sont les rangs les plus bas qui mangent les derniers après les loups des autres niveaux. En effet, les loups sont des chasseurs du groupe qui connaissent troisétapes principales : chasser, encercler et attaquer.L'algorithme démarre avec

un nombre donné des loups gris avec leurs positions générées arbitrairement.

III.5.1 Inspiration

Le loup gris (Canis lupus) appartient à la famille des canidés. Les loups gris sont considérés commedes prédateurs au sommet, c'est-à-dire qu'ils sont au sommet de la chaîne alimentaire. Les loups gris préfèrent généralement vivre en meute. La taille du groupe est de 5 à 12 sur moyenne. Il est particulièrement intéressant de noter qu'ils ont une hiérarchie sociale dominante très stricte, comme le montre Figure (III.13).

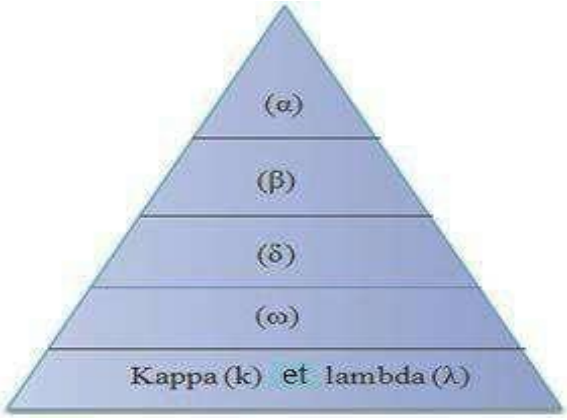


Figure III 13- Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas)

Les leaders sont un mâle et une femelle, appelés alphas. L'alpha est principalement responsable de la prise de décisions sur la chasse, le lieu de sommeil, l'heure de se réveiller, etc. Les décisions de l'alpha sont dictées à la meute. Cependant, une sorte de comportement démocratique a également été observé, dans lequel un alpha suit les autres loups dans le pack. Lors des rassemblements, toute la meute reconnaît l'alpha en maintenant la queue baissée. Le loup alpha est aussi appelé le loup dominant puisque ses ordres doivent être suivis par la meute [53]. Les loups alpha ne sont qu'autorisé à s'accoupler dans la meute. Fait intéressant, l'alpha n'est pas nécessairement le membrele plus fort de la meute mais Lemieux en termes de gestion du pack. Cela montre que l'organisationet la discipline d'une meute sont bien plus. Important que sa force. Le deuxième niveau de la hiérarchie des loups gris est la version bêta. Les bêtas sont des loups subordonnés qui aident l'alpha dans la prise de décision ou d'autres activités dupack. Le loup bêta peut être un mâle ou une femelle, et il/elle est probablement le meilleur candidat pour être l'alpha au cas où l'un des loups alpha décèderait ou deviendrait très vieux.

Le loup bêta doit respecter l'alpha, mais commande également les autres loups de niveau

inférieur. Il joue le rôle déconseiller de l'alpha et discipliner de la meute. La bêta renforce les commandes del'alpha tout au long du pack et donne un retour à l'alpha. Le loup gris le moins bien classé est l'oméga. L'oméga joue le rôle de bouc émissaire. Les loups Omega ont toujours se soumettre à tous les autres loups dominants. Ce sont les derniers loupsautorisés à manger. Cela peut sembler l'oméga n'est pas un individu important dans le pack, mais il a été observé que l'ensemble du pack fait face à l'intérieur combats et problèmes en cas de perte de l'oméga. Cela est dû à l'évacuation de la violence et de la frustration de tous loups par le(s) oméga(s). Cela aide à satisfaire l'ensemble de la meute et à maintenir la structure de domination. Dans certains cas, l'oméga est aussi la baby-sitter de la meute.

Si un loup n'est pas un alpha, un bêta ou un oméga, il est appelé subordonné (ou delta dans certainesréférences). Deltales loups doivent se soumettre aux alphas et aux bêtas, mais ils dominent l'oméga. Scouts, sentinelles, anciens, chasseurs et les gardiens appartiennent à cette catégorie. Les scouts sontchargés de surveiller les limites du territoire et avertir le pack en cas de danger. Les sentinelles protègent et garantissent la sécurité de la meute. Les aînés sont les des loups expérimentés qui étaient alpha ou bêta. Les chasseurs aident les alphas et les bêtas lors de la chasse aux proies et fournir de la nourriture pour la meute. Enfin, les gardiens sont chargés de soigner les faibles, les malades et les blessés loups dans la meute. En plus de la hiérarchie sociale des loups, la chasse en groupe est un autre comportement social intéressant des loups gris. Loups. Selon Muro et al. [54] les principales phases de la chasse au loup gris sont les suivantes :

- Suivi, poursuite et approche de la proie
- Poursuivre, encercler et harceler la proie jusqu'à ce qu'elle cesse de bouger
- Attaque vers la proie

Ces étapes sont illustrées dans Figure (III.14)



Figure III 14-Comportement de chasse des loups gris : (A) chasse, approche et suivi des proies (B-D)poursuite, harcèlement et encerclement (A) situation stationnaire et attaque

Dans ce travail, cette technique de chasse et la hiérarchie sociale des loups gris sont modélisée mathématiquement enfin de concevoir GWO et d'effectuer l'optimisation.

III.5.2 Modèle mathématique et algorithme

Dans cette sous-section, les modèles mathématiques de la hiérarchie sociale, traquant, encerclant et attaquant les proies sont prévues. Ensuite, l'algorithme GWO est décrit.

III.5.2.A Hiérarchie sociale :

Afin de modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des loups lors de la conception de GWO,nous considérons la solution la plus adaptée comme alpha ***(α).*** Par conséquent, les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions sont nommées bêta (β) et delta (δ) respectivement. Le reste des solutions candidates est supposé être oméga (ω). Dans l'algorithme GWO, la chasse (optimisation) est guidée par α, β, et δ. Les loups suivent ces trois loups.

III.5.2.B Encercler la proie :

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris encerclent leurs proies pendant la chasse. Afin de modéliser mathématiquement l'encerclement comportement, les équations suivantes sont suivantes :

$$\vec{D} = \left[\vec{C}\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)\right] \quad \text{(III.12).}$$

$$\vec{X}(T+1) = \left[\vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D}\right] \quad \text{(III.13).}$$

Où **t** indique l'itération courante, $\vec{A}$ et $\vec{C}$ sont des vecteurs de coefficients, $\vec{X}_p$ le vecteur positionde la proie, et $\vec{X}$ indique le vecteur de position d'un loup gris.

Les vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{C}$ sont calculés comme suit :

$$a = 2(1-t)/T_{MAX}$$

$$\vec{A} = 2.\vec{a}.\vec{r}_1 - \vec{a} \quad \text{(III.14).}$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad \text{(III.15).}$$

Où les composantes de $\vec{a}$ son linéairement diminuées de 2 à 0 au cours des itérations et, $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ sont aléatoires vecteurs dans [0,1].

Pour voir les effets des équations (III.12) et (III.13), un vecteur de position bidimensionnel et certains des possibles voisins sont illustrés sur la figure (III.15) (a). Comme on peut le voir sur cette figure, un loup gris en position (X, Y) peut mettre à jour sa position en fonction de la position de la proie (X*, Y*). Différents endroits autour du meilleur agent peuvent être atteints par rapport à la position actuelle en ajustant la valeur des vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{C}$. Par exemple, (X*-X, Y*).

Peut être atteint en réglant $\vec{A} = (1,0)$ et $\vec{C} = (1,1)$. Les positions mises à jour possibles d'un loup gris dans l'espace 3D sont représentées sur la figure (III.15) (b). Notez que les vecteurs aléatoires, $\vec{r}_1$ et $\vec{r}_2$ permettent aux loups d'atteindre n'importe quelle position entre les points illustrés à la figure (III.15) Ainsi, un loup gris peutmettre à jour sa position à l'intérieur de l'espace autour de la proie dans n'importe quel emplacement en utilisant les équations (III.12) et (III.13).

Le même concept peut être étendu à un espace derecherche à n dimensions, et les loups gris se déplaceront dans hyper-cubes (ou hyper-sphères)autour de la meilleure solution obtenue jusqu'à présent.

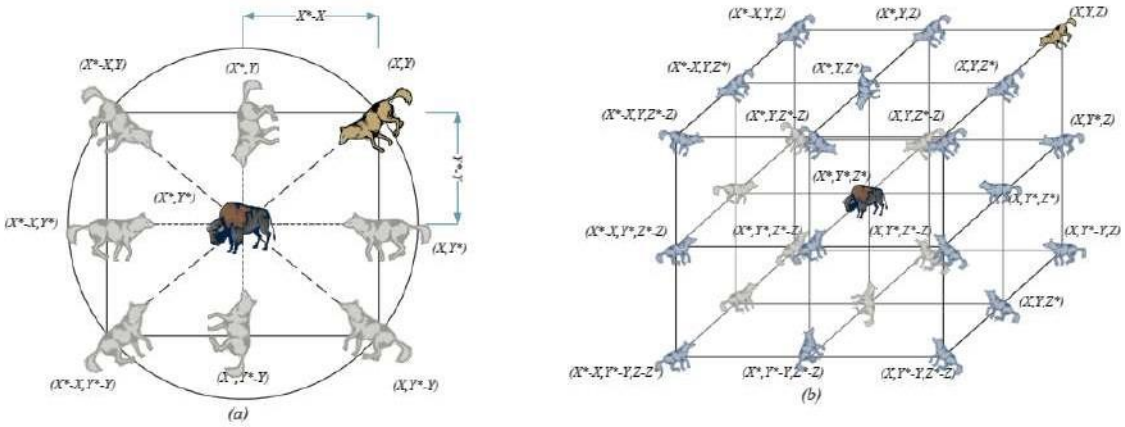


***Figure III 15*-Vecteurs de position 2D et 3D et leurs prochains emplacements possibles**

III.5.2.C Chasse :

Les loups gris ont la capacité de reconnaître l'emplacement des proies et de les encercler. La chasse est généralement guidée par l'alpha. Le bêta et le delta pourraient également participer à la chasse occasionnellement. Cependant, dans une recherche abstraite l'espace, nous n'avons aucune idée de l'emplacement de l'optimum (proie). Afin de simuler mathématiquement la chasse comportement des loups gris, nous supposons que l'alpha (meilleure solution candidate) bêta et delta ont une meilleure connaissance de l'emplacement potentiel des proies. Par conséquent, nous enregistrons les trois premières meilleures solutions obtenues jusqu'à présent et obliger les autres agents de recherche (y compris les omégas) à mettre à jour leurs positions en fonction de la position de le meilleur agent de recherche. Les formules suivantes sont proposées àcet égard.

$$D_\alpha = |C_1 . X_\alpha(t) - (t)|, \qquad D_\beta = |C_2 . X_\beta(t) - (t)|, \qquad D_\delta = |C_3 . X_\delta(t) - (t)| \qquad \text{(III-16)}$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 . D_\alpha . X_2, \qquad X_2 = X_\beta - A_2 . D_\beta . X_3, \qquad X_3 = X_\delta - A_3 . D_\delta \qquad \text{(III-17)}$$

$$X(t+1) = (X_1 + X_2 + X_3)/3 \qquad \text{(III-18)}$$

Figure. (III.15) montre comment un agent de recherche met à jour sa position selon alpha, bêta et delta dans un espace de recherche 2D.

On peut observer que la position finale serait dans un endroit aléatoire à l'intérieur d'un cercle quiest défini par la position alpha, bêta et delta dans l'espace de recherche. En d'autres

termes, alpha,bêta et delta estiment la position de la proie, et les autres loups mettent à jour leurs positions au hasard autour de la proie.

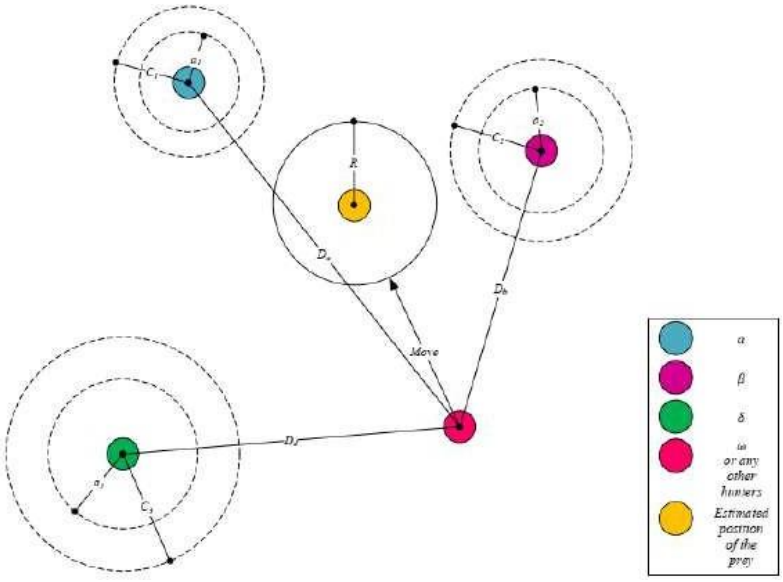


Figure III 16-Mise à jour du poste dans GWO

III.5.2.D Attaquer une proie (exploitation) :

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris finissent la chasse en attaquant la proie lorsqu'elle s'arrête de bouger. Afin de modèle mathématiquement en approchant de la proie nous diminuons la valeur de $\vec{a}$. Notez que la plage de fluctuation de $\vec{A}$ est également diminué de $\vec{a}$. En d'autres termes $\vec{A}$ est une valeur aléatoire dans l'intervalle [-a,a] où $\vec{a}$ est diminué de 2 à 0 au fil des itérations. Lorsque les valeurs aléatoires de $\vec{A}$ sont dans [-1,1], la position de $\overrightarrow{a}$suivante d'un agent de recherche peut être dans n'importe quelle position entre sa position actuelle et la position dela proie. La figure III.7 (a) montre que |A|<1 force le loup à attaquer vers la proie.

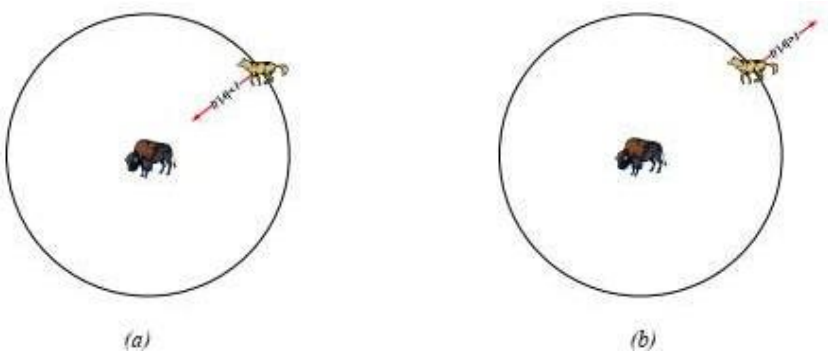


Figure III 17- **Attaquer une proie ou rechercher une proie**

Avec les opérateurs proposés jusqu'à présent, l'algorithme GWO permet à ses agents de recherche de mettre à jour leur position en fonction de l'emplacement de l'alpha, du bêta et du delta ; et attaque vers la proie. Cependant, l'algorithme GWO est sujettes à la stagnation des solutions locales avec cesopérateurs. Il est vrai que le mécanisme d'encerclement proposé montre l'exploration dans unecertaine mesure, mais GWO a besoin de plus d'opérateurs pour mettre l'accent sur l'exploration.

III.5.2.E Recherche de proies (exploration):

Les loups gris recherchent principalement en fonction de la position de l'alpha, du bêta et du delta. Ils divergent de chacun l'autre pour rechercher des proies et converger pour attaquer les proies. Afin de modéliser mathématiquement la divergence, nous utilisons avec des valeurs aléatoires supérieuresà 1 ou inférieures à -1 pour obliger l'agent de recherche à s'écarter de la proie. Cette met l'accent sur l'exploration et permet à l'algorithme GWO de rechercher globalement. La figure (III.17) (b) montre également que |A|>1 force les loups gris à s'écarter de la proie pour, espérons-le, trouver une proie plus adaptée. Une autre composante de GWO qui favorise l'exploration est$\vec{C}$. Comme on peut le voir dans l'équation (III.15), le vecteur$\vec{C}$ contient des valeurs aléatoires dans [0, 2]. Ce composant fournit des poids aléatoires pour les proies afin d'accentuer (C>1) ou de réduire (C<1) de manière stochastique l'effet des proies dans la définition de la distance dans l'équation (III.12). Cela aide GWO à afficher un comportement plus aléatoire tout au long de l'optimisation, favorisant l'exploration et l'évitement des optima locaux. Il convient de mentionner ici que C n'est pas diminué de façon linéaire contrairement à A. Nous demandons délibérément à C de fournir des valeurs aléatoires à tout moment afin mettre l'accent sur l'exploration non seulement lors des itérations initiales, mais aussi lors des itérations finales. Ce composant est très utile en cas de stagnation des optima locaux, en particulier dans les itérations finales.

Le vecteur C peut également être considéré comme l'effet des obstacles à l'approche des proies dans la nature. D'une manière générale, les obstacles naturels apparaissent dans les sentiers de chasse des loups et les empêchent en fait d'approcher rapidement et commodément leurs proies. C'est exactement ce que fait le vecteur C. Selon la position du loup, il peut donner au hasard un poids à la proie et rendre plus difficile et plus loin d'atteindre les loups, ouvice versa. En résumé, le processus de recherche commence par la création d'une population aléatoire de loups gris (solutions candidates) dans l'algorithme GWO. Au cours des itérations,

les loups alpha, bêta et delta estiment la probabilité position de la proie. Chaque solution candidate metà jour sa distance par rapport à la proie. Le paramètre a est diminué de 2 à 0 afin de mettre l'accent respectivement sur l'exploration et l'exploitation. Les solutions candidates ont tendance à diverger de la proie quand | |>1 et convergent vers la proie lorsque | |<1. Enfin, l'algorithme GWO est terminé par la satisfaction d'un critère final. Le pseudo code de l'algorithme GWO est présenté sur la figure. (III.18)

Initialiser la population de loups gris Xi (i = 1, 2, ..., n)
Initialiser a, A, and C
Calculer le fitness de chaque agent de recherche
Xα=le meilleur agent de recherche
Xβ=le deuxième meilleur agent de recherche
Xδ=le troisième meilleur agent de recherche
Tandis que (t < Nombre max d'itérations)
Pour chaque agent de recherche
Mettre à jour la position de l'agent de recherche actuel par l'équation (IV.7)
Fin pour
Mettre à jour a, A et C
Calculer le fitness de tous les agents de recherche
Mettre à jour Xα, Xβ et Xδ
t=t+1
Fin tandis que

Figure III 18-Pseudo code de l'algorithme GWO

Pour voir comment GWO est théoriquement capable de résoudre des problèmes d'optimisation, onpeut noter quelques points :

- La hiérarchie sociale proposée aide GWO à enregistrer les meilleures solutions obtenues jusqu'à présent au cours de la cours d'itération
- Le mécanisme d'encerclement proposé définit un voisinage en forme de cercle autour des solutions qui peut être étendu à des dimensions supérieures en tant qu'hyper-sphère
- Les paramètres aléatoires A et C aident les solutions candidates à avoir des hyper-sphères avec des rayons aléatoires.
- La méthode de chasse proposée permet aux solutions candidates de localiser la position probablede la proie
- Exploration et exploitation sont garanties par les valeurs adaptatives de a et A
- Les valeurs adaptatives des paramètres a et A permettent à GWO de passer en douceur entre l'exploration et exploitation.

- Avec A décroissant, la moitié des itérations sont consacrées à l'exploration (|A|≥1) et

l'autre moitié Sont dédié à l'exploitation (|A|<1)

- Le GWO n'a que deux paramètres principaux à régler (a et C).

III.5.3 Application de GWO pour le MPPT

La figure III.19 montre le schéma fonctionnel du schéma MPPT-GWO proposé pour le système PV.

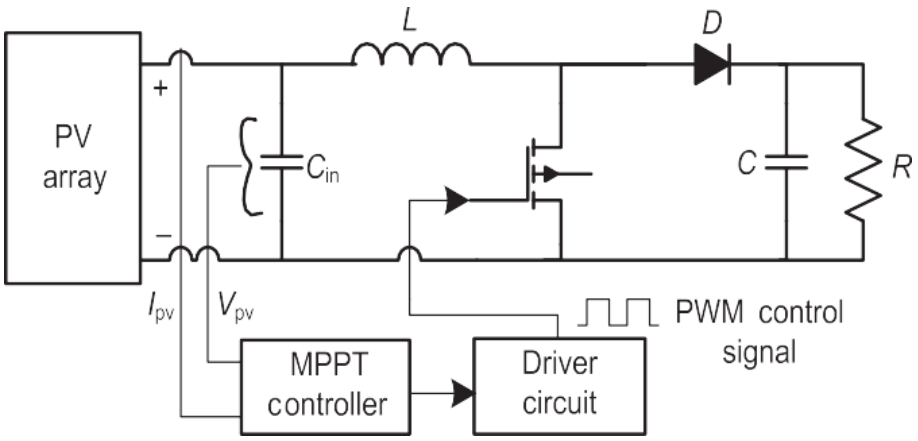


Figure III 19- Schéma fonctionnel de la méthode MPPT-GWO

Les rapports cycliques définis par le nombre de loups gris, le contrôleur mesure Vpv et Ipv à travers des capteurs et calcule la puissance de sortie. L'organigramme de l'algorithme MPPT basé sur GWO proposé est illustré à la Figure (III.20).

Le rapport cyclique est maintenu à une valeur constante qui à son tour réduit les oscillations en régime permanent qui existent dans les techniques MPPT conventionnelles et enfin, la perte de puissance due à l'oscillation est réduite, ce qui améliore l'efficacité du système. Pour implémenter le MPPT basé sur GWO, le rapport cyclique *D* est défini comme un loup gris. Par conséquent, L'équation (III.13) peut être modifiée comme suit :

$$\boldsymbol{D_i(k+1) = D_i(k) - A.D} \qquad \text{(III.19)}$$

Ainsi, la fonction de fitness de l'algorithme GWO est formulée comme :

$$\boldsymbol{P\left(D_i^k\right) > P\left(D_i^{k-1}\right)} \qquad \text{(III.20)}$$

Où P représente la puissance, D est le rapport cyclique, i est le nombre de loups gris actuels et k est le nombre d'itérations

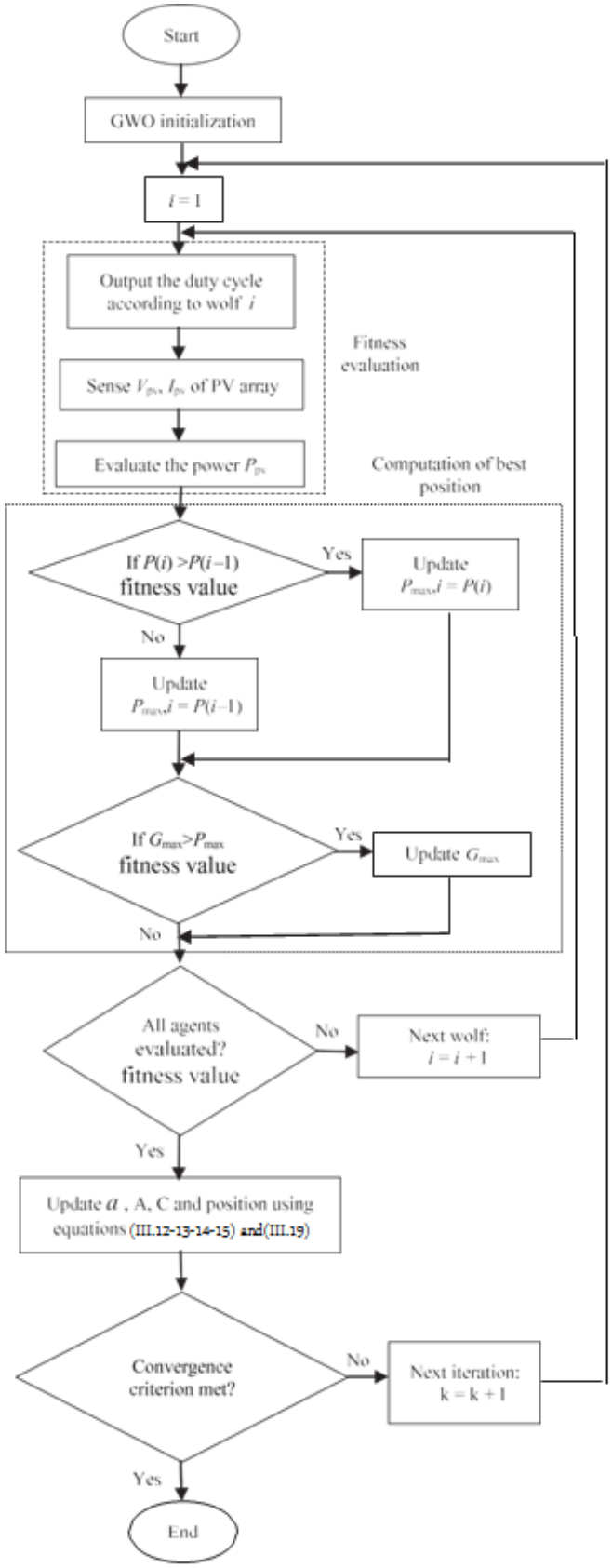


Figure III 20-Organigramme de l'algorithme GWO.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents technique d'optimisation de l'énergie et leur application par la commande MPPT et nous avons intéressé dans notre projet par l'algorithme Loup gris (GWO), et comparais avec un algorithme classique (Perturbation & Observation (P&O)).

CHAPITRE IV

SIMULATION ET INTERPRETATION

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la simulation d'un Filtre Actif Parallèle alimenté par un système PV adapté à un hacheur boost avec une commande numérique MPPT en utilisant deux méthodes : la méthode classique (P&O), et une nouvelle méta-heuristique appelée **Grey Wolf Optimizer (GWO)** et enfin on conclue la différence entre les deux méthodes**.**

IV.2 Simulation d'une alimentation d'un Filtre Actif Parallèle par système photovoltaïque basé sur un onduleur deux-niveaux:

Le système étudié se compose d'un générateur solaire PV connecté sur le bus continu d'un onduleur de tension triphasé à travers d'un hacheur parallèle (BOOST), couplé en parallèle au réseau à travers d'un filtre actif parallèle. Ce réseau électrique alimente un récepteur non linéaire constitué d'un redresseur ayant pour charge une résistance en série avec une inductance. Le synoptique de la Figure (IV.1) illustre cette configuration

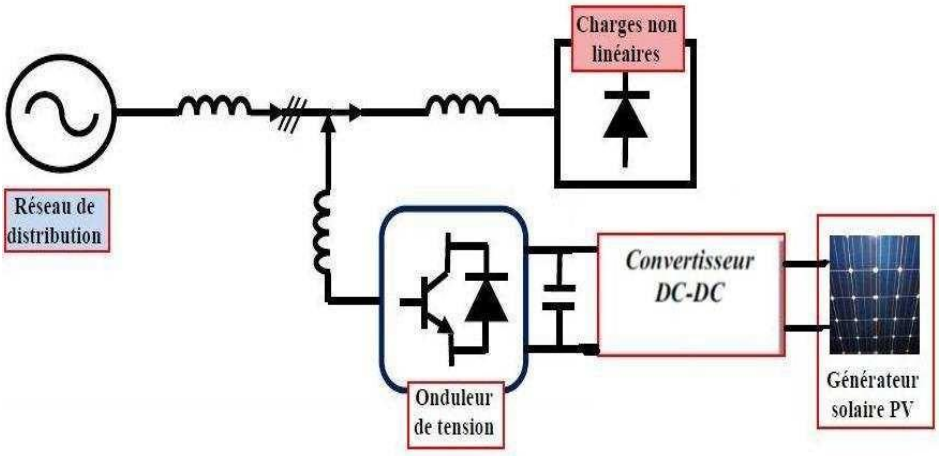


Figure IV. 1-Système de compensation des harmoniques par GPV

La modélisation globale de la structure, présentée sur la **Figure (IV.1)**, a permis d'étudier la validité fonctionnelle du filtre actif parallèle. Ces simulations **ont été réalisées à l'aide du logiciel Simulink MATLAB 2022B**

IV.3 Caractérisation du générateur PV

Nous avons simulé le module photovoltaïque **(LG365N2W-B3)** qui comporte 72 cellules solaires. Le module PV **(LG365N2W-B3)** peut produire une puissance maximale de 365.156 watts à 38.6 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m². La source PV est composée de 10 modules connecté en série et de 08 chaines en parallèle de type

(LG Electronic Inc365N2W-B3) avec les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.1 *Paramètres de simulation de PV*

Grandeurs	**Valeur**
Eclairement standard, E.	1000 w/m2
Température standard, T.	25° C
Puissance crête maximale, Pm.	365.156 W
Tension optimale, Vopt.	38.6 V
Courant optimale, Iopt. Tension	9.46 A
de circuit ouvert, Vco.	48.4 V
Courant de court-circuit, Icc	9.89 A

- **Influence de l'éclairement**

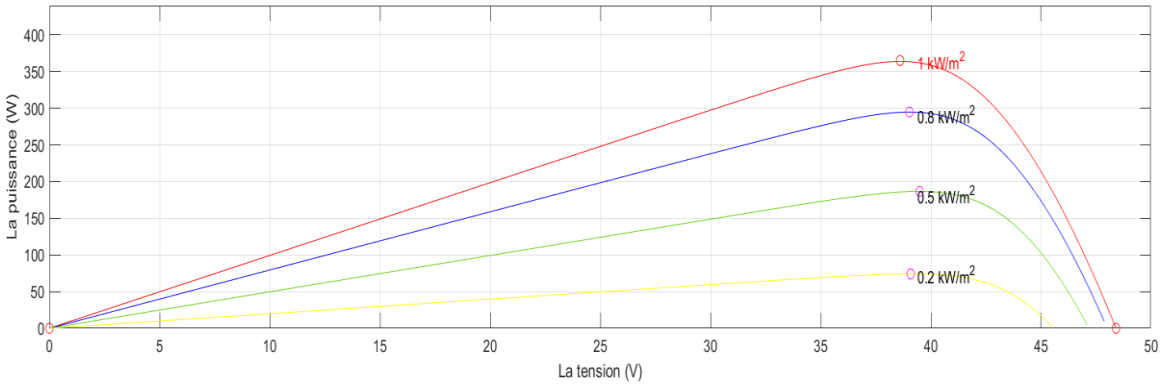


Figure IV. 2-Caractéristique P-V du module PV selon la variation d'éclairement

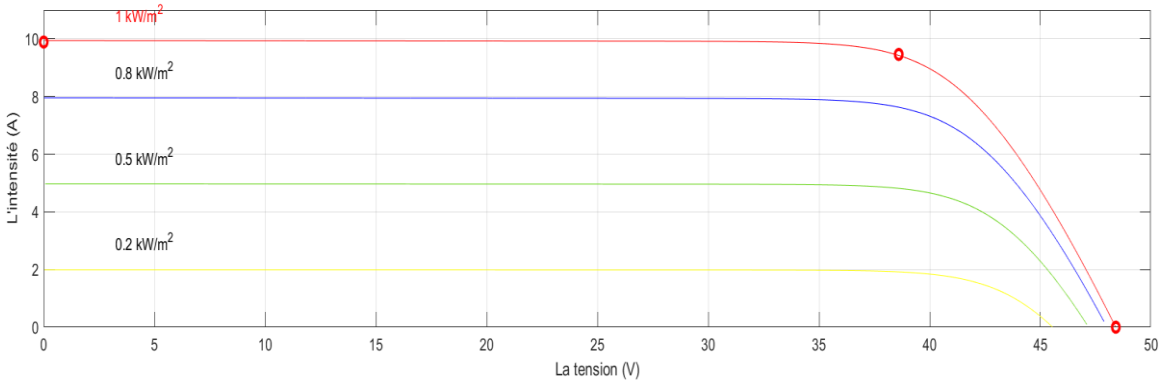


Figure IV. 3-Caractéristique I-V du module PV selon la variation d'éclairement

➢ **Influence de la Température**

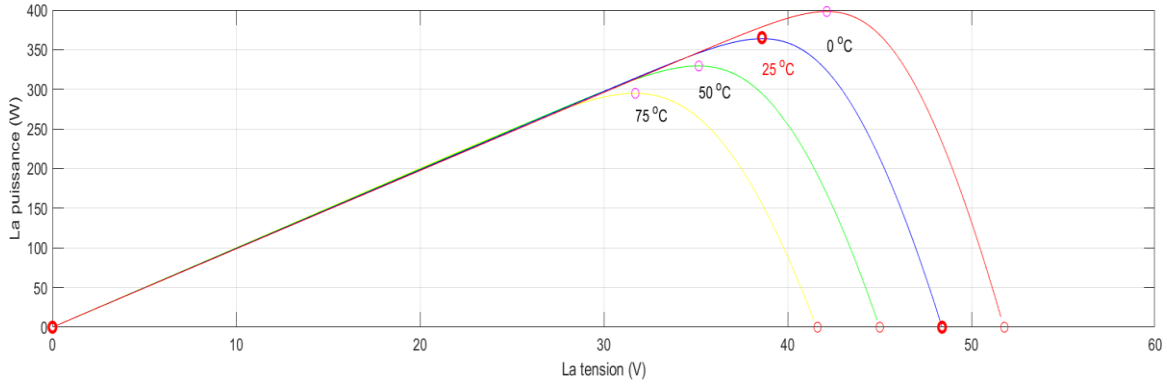


Figure IV. 4- Caractéristique P-V du module PV selon la variation de température

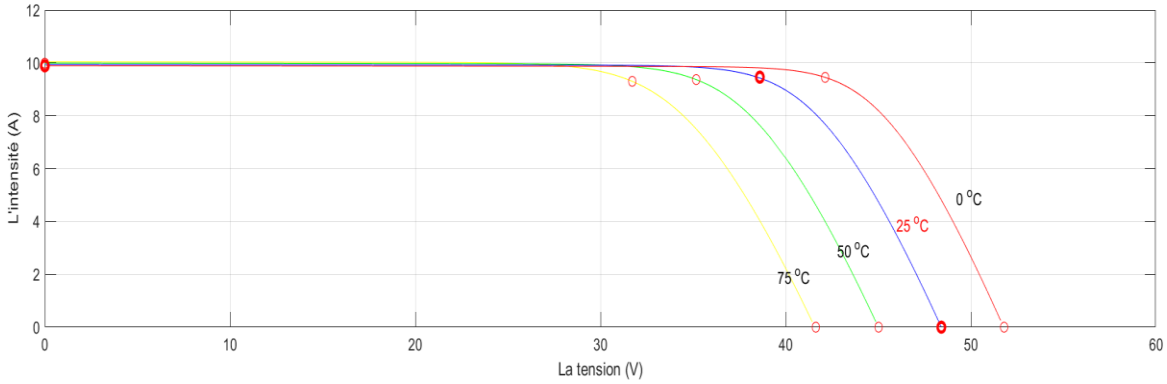


Figure IV. 5- Caractéristique I-V du module PV selon la variation température

➢ **Caractéristique (Ipv = f(Vpv)) :**

À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) (E = 1000 w/m2. T = 25°C).

Les simulations sont faites en prenant en compte les paramètres de l'hacheur BOOST:

- Inductance L= 0.01H.
- IGBT et une diode de puissance.
- Capacité C1=100µF, C2=10000µF
- Charge résistive R=50Ω.

Tableau IV.2 : *Paramètres de simulation sans filtre.*

Paramètres		**Valeurs numériques**
Réseau d'alimentation	Tension efficace **Es**	230 V
	Fréquence ***f***	50 Hz
	Résistance de ligne ***RS***	0.1 Ω
	Inductance de ligne ***Ls***	0.03 mH
Charge non-linéaire (Redresseur)	Inductance de chargeN-L ***LF***	0.3 mH
Charge linéaire	Résistance de charge RC Inductance de charge LC Condensateur de charge CC	4 Ω 25 mH 470 F

IV.4 Les résultats de simulation avant l'application de FAP :

Les graphes du courant de source avant application du filtrage actif sont représentés sur les Figures (IV.6), (IV.7) et (IV.8).

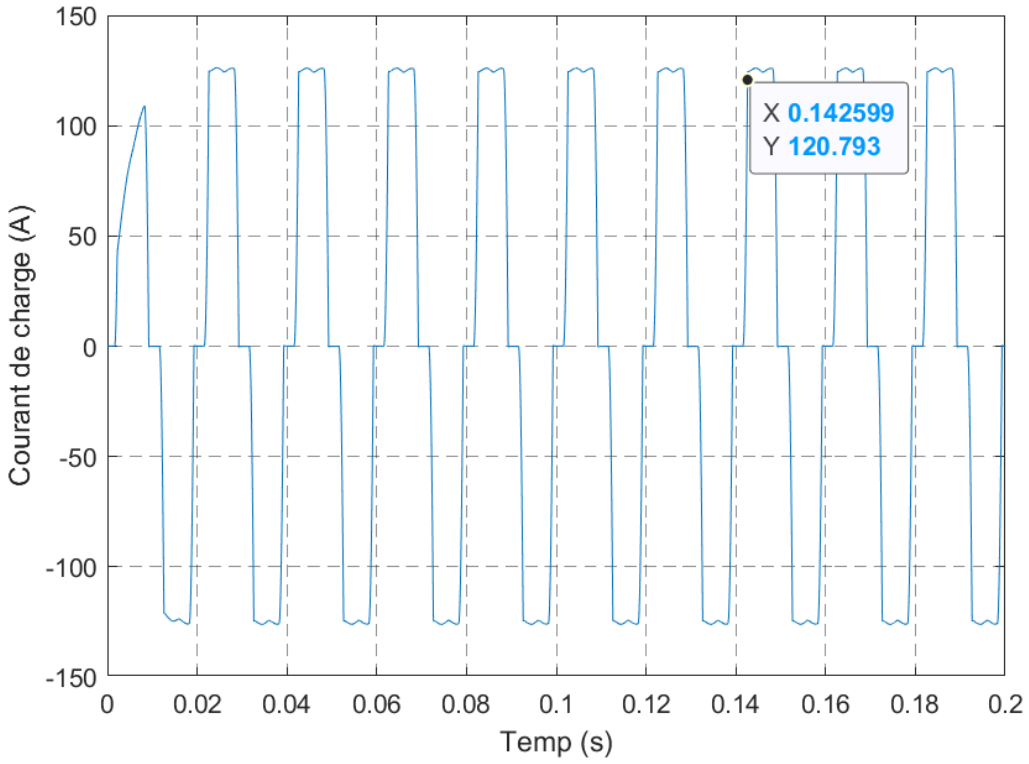


Figure IV. 6-*Courant de charge Ica* .

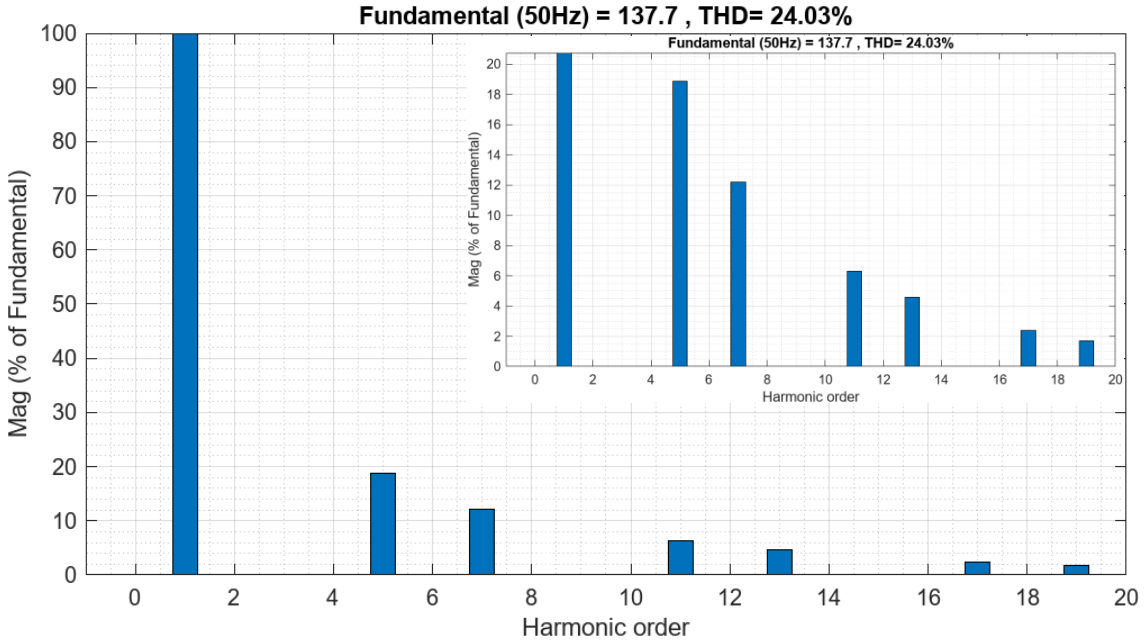


Figure IV. 7-*l'ordre de THD sans FAP.*

On constate une distorsion symétrique du courant I*ca* (avec I*ca*=*Isa*) par rapport au point de demi période (Figure IV.6), ce qui signifie que les harmoniques sont existants dans le spectre de *I*ca, ceci est confirmé par le spectre de *Ica*, (Figure IV.7) représentant les 20 premiers harmoniques, avec un THD de 24.03% pour une durée d'observation de 0.2 s.

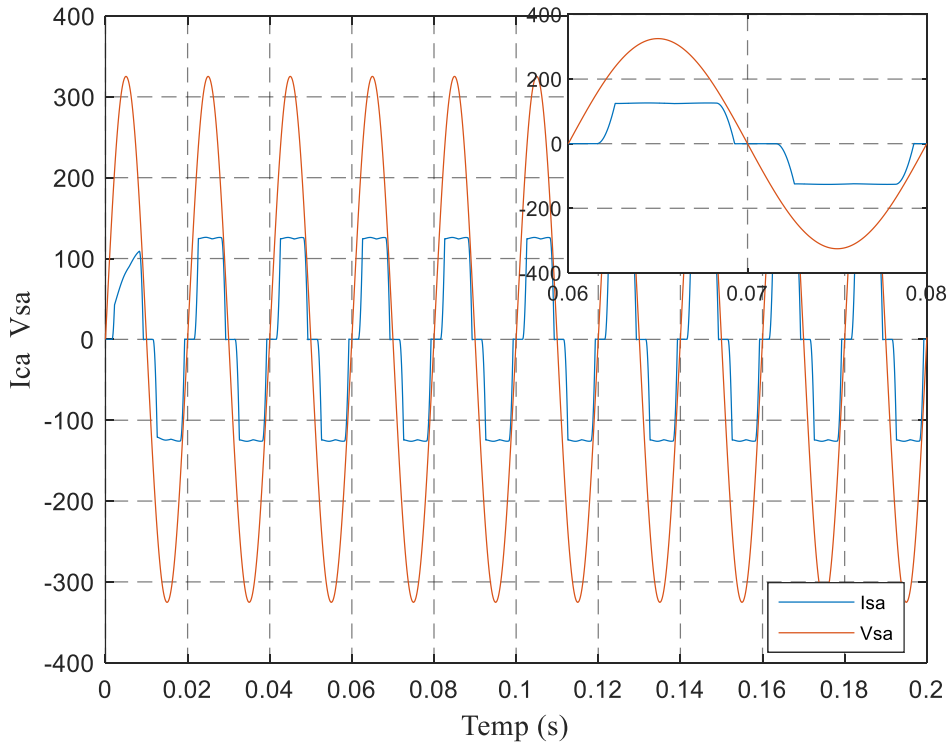


Figure IV. 8-*Courant de charge Ica avec la tension de source Vsa.*

La distorsion harmonique n'est pas le seul problème rencontré ici car la Figure (IV.8) indique une dégradation au niveau du facteur de puissance ; ainsi on peut s'attendre à une fluctuation dans l'énergie réactive du système.

-Le déphasage entre *Ic* (A) et *Vs* (V) :

$$\varphi_1 = \frac{360°\Delta t}{T} \qquad \varphi_1 = \frac{360°x1.7x10^{-3}}{0.02} \qquad \varphi_1 = 30.6° \quad \textbf{cos(} \boldsymbol{\varphi_1}\textbf{)} \cong \textbf{0.86}$$

Dans la figure (IV.8), nous montrons la tension de source Vsa et le courant de charge Ica dans même figure, nous constatons que le décalage entre eux a un déphasage, $\varphi_1 = 30.6°$ Alors le facteur de puissance **cos(φ_1) ≅ 0.86**

Ce résultat est indésirable, car, suivant les recommandations internationales IEEE519, il faut que le taux d'harmonique de distorsion soit inférieur ou égal à 5 % pour que la charge soit acceptée à connecter au réseau électrique. Pour cela, nous avons connecté entre la source d'énergie et la charge non linéaire un filtre actif parallèle de puissance (FAP), ce qui nous permet de minimiser tous les harmoniques en même temps.

IV.5 Les résultats de simulation après l'application de FAP :

La Figure. (IV.9) montre l'assemblage utilisé pour mettre en œuvre l'algorithme MPPT. Un convertisseur hacheur-Boost est choisi en raison de plusieurs avantages : la tension et le courant du PV sont mesurés à l'aide de transducteurs de tension et de courant respectivement. À l'aide de ces mesures, l'algorithme MPPT génère le rapport cyclique. Ce rapport cyclique force l'onduleur à fonctionner à la tension souhaitée,

Tableau IV.3 : *Paramètres de simulation de filtre avec P&O et PWO.*

Paramètres		**Valeurs numériques**
Filtre actif parallèle	Inductance de filtre LFA	1.3MH
	L'algorithme de P&O	Vdc = 880V $D - init = 0.5$ $\Delta D = 10^{-9}$
	L'algorithme de PWO Nbre des Loups Nbre itération Alpha a	Vdc = 890V 04 500 0.01

Le schéma suivant présente le FAP utilisé dans notre simulation:

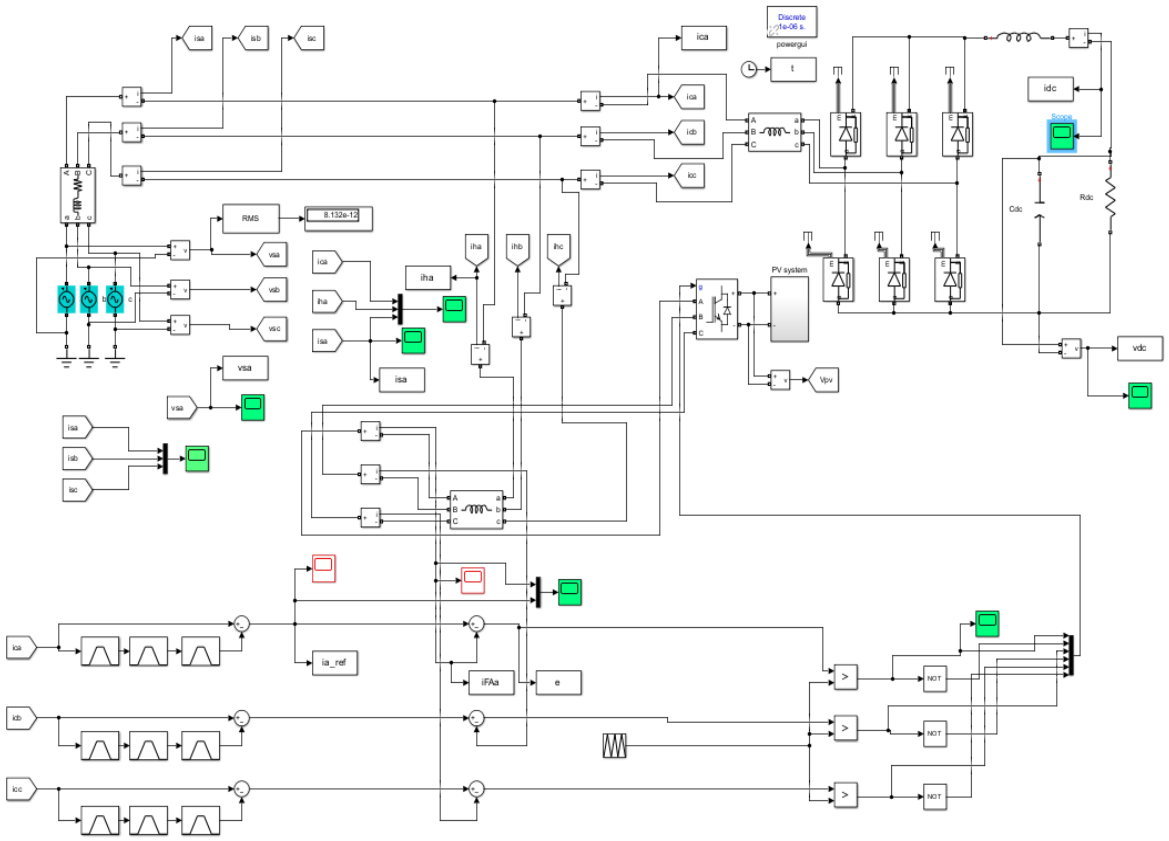


Figure IV. 9Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par MLI.

IV.5.1 Simulation d'Implémentation de l'algorithme P&O :

Parmi les techniques de commande à MPPT de l'hacheur BOOST, nous avons choisi la méthode perturbation et observation (P&O).

La figure (IV.10) montre le circuit hacheur-boost réalisé avec l'algorithme P&O simulé.

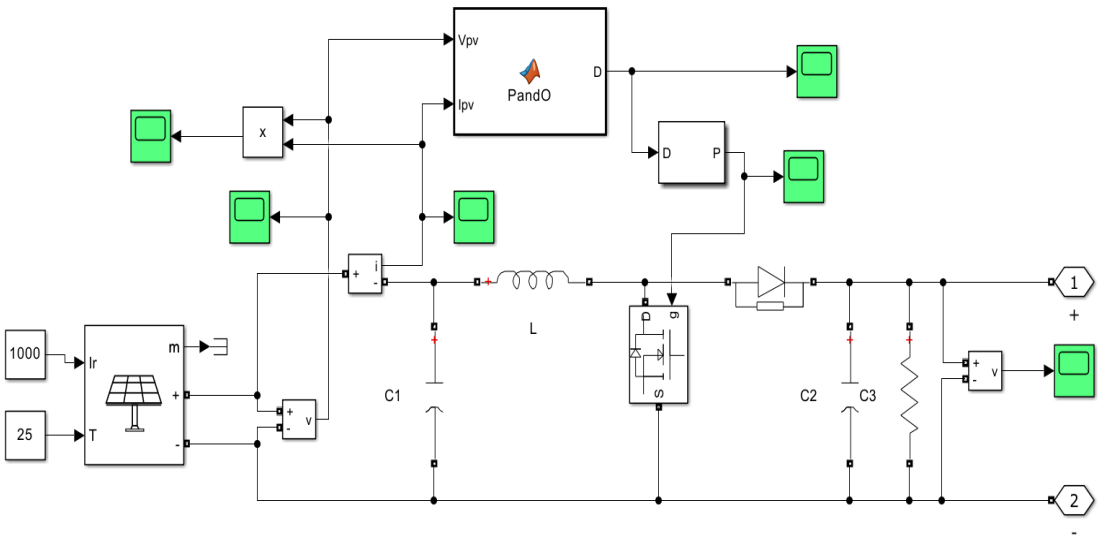


Figure IV. 10-*Le circuit hacheur BOOST utilisé pour réaliser le MPPT P&O*

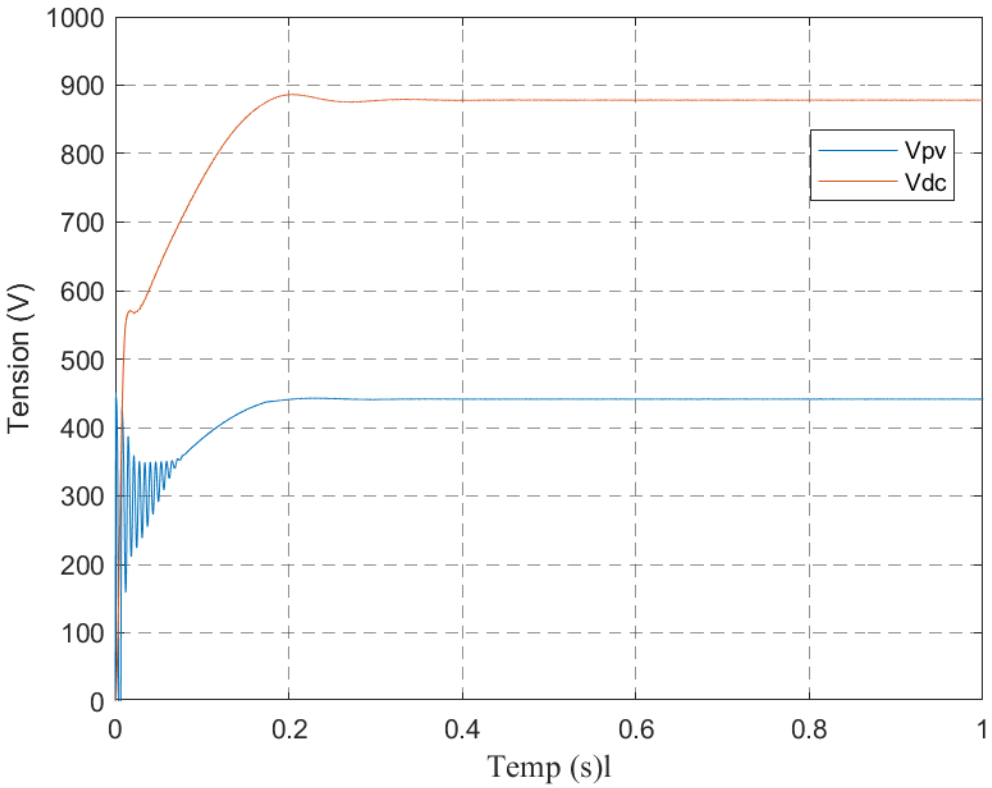


Figure IV. 11-*Tensions d'entré et de sortie du convertisseur Boost avec P&O*

Le figure (IV.11) montre la tension de PV (Vpv) et qui représente la tension d'entrée du convertisseur hacheur-Boost et la tension de système PV (Vdc) et qui représente la tension de sortie du convertisseur avec l'algorithme P&O.

La figure (IV.12) de rapport cyclique de P&Oest présentée comme suivant :

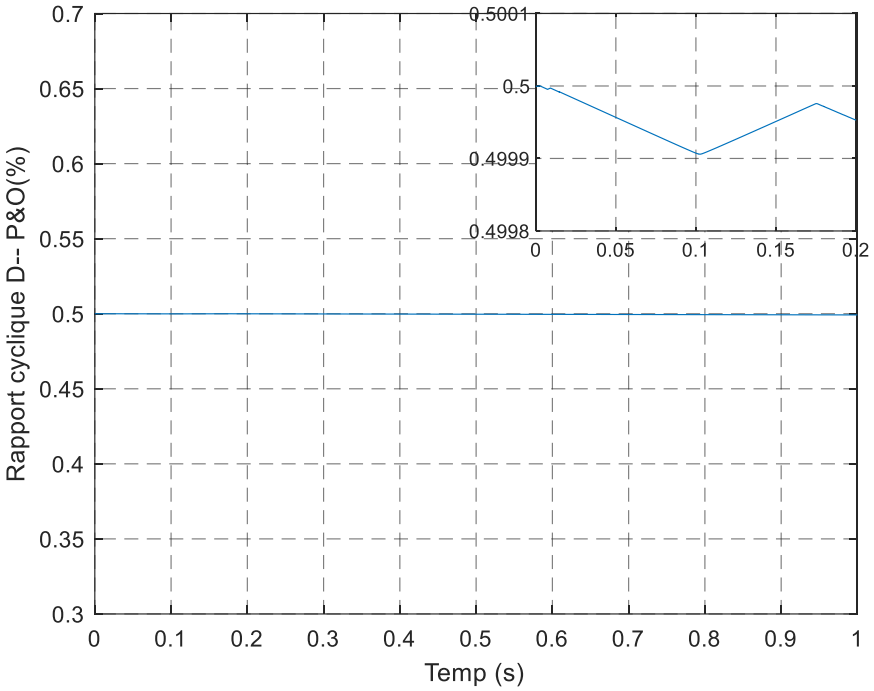


Figure IV. 12-*Evolution du Rapport cyclique D avec P&O.*

Dans la figure (IV.13), nous pouvons voir clairement les trois courants du système (*Ica, Iha, Isa*) dans la même illustration, ce qui nous montre que le courant de source a corrigé par la soustraction entre le courant de charge et le courant de filtre et devenu presque purement sinusoïdale dans le régime permanent (t>0.02s). C'est-à-dire : *Isa=Ica-Iha*.

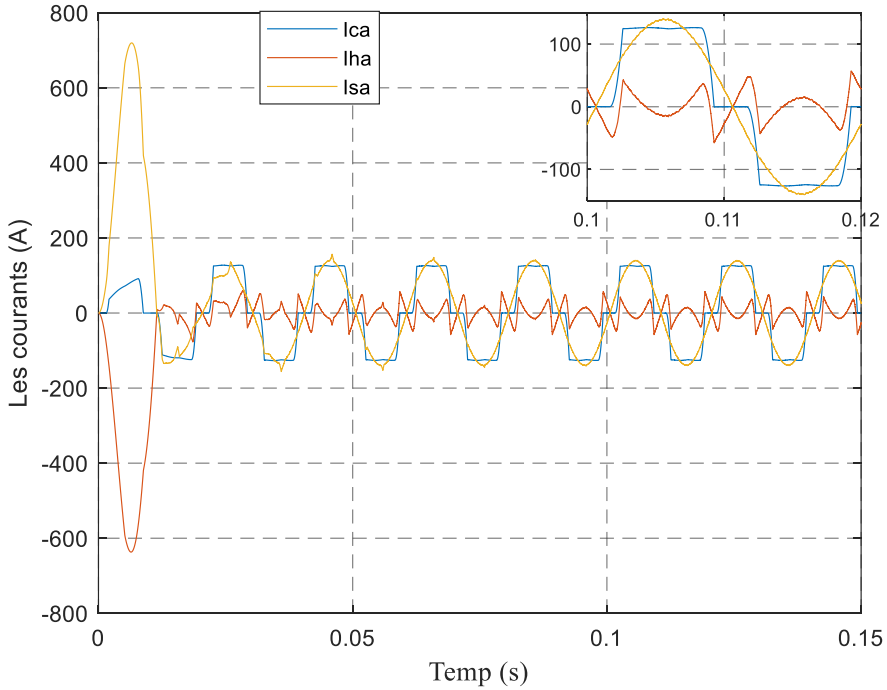


Figure IV. 13-C*ourant de charge Ica , Courant harmonique Iha, Courant de source Isa avec P&O* .

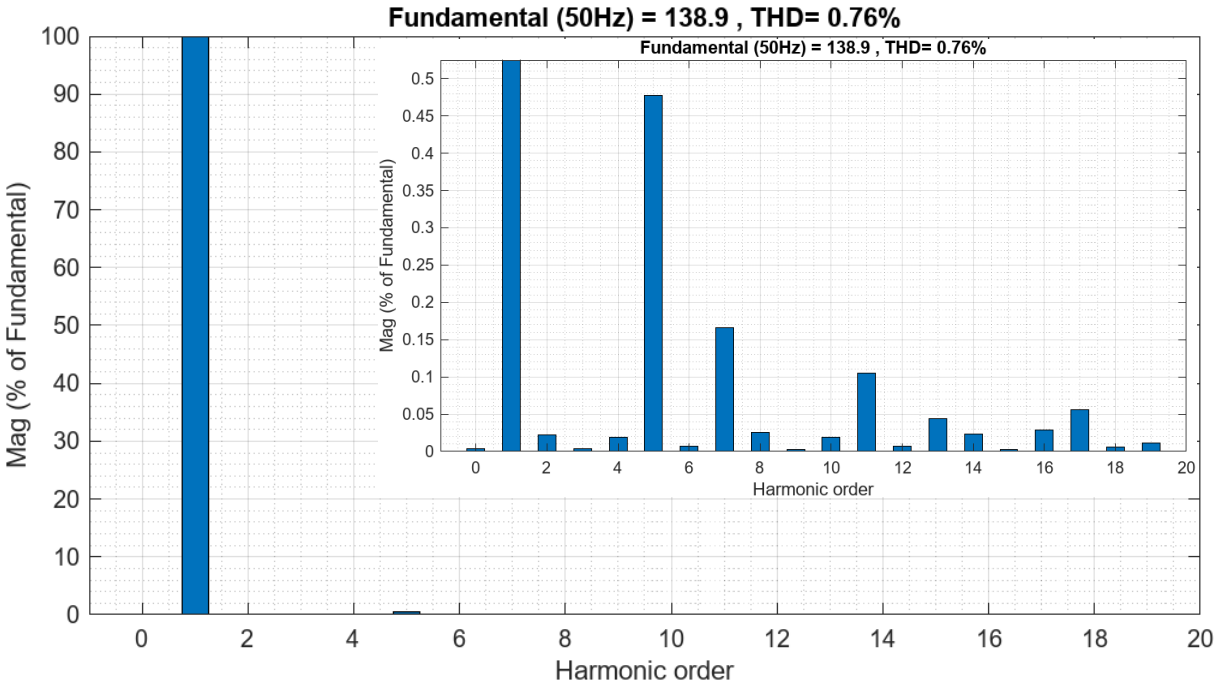


Figure IV. 14-L*'ordre de THD avec FAP et P&O*

On remarque que le spectre de *Ica* (Figure IV.14) représentant les 20 premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THD de *Ica* est de 0.76% pour une durée d'observation de 0.2 s. Ce résultat de THD est suffisant pour accepter par le réseau électrique de distribution car il est dans les normes de recommandation internationale IEEE519.

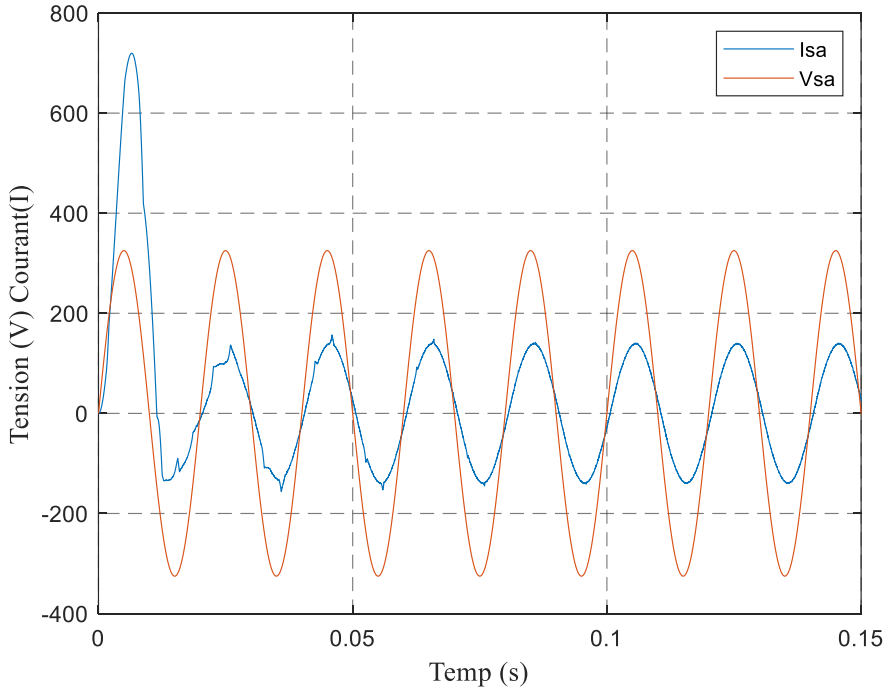


Figure IV. 15-*allure de la tension de source Vsa et le courant source Isa après filtrage par P&O.*

-Le déphasage entre *Ic* (A) et *Vs* (V) :

$$\varphi_1 = \frac{360°\Delta t}{T} \qquad \varphi_1 = \frac{360°x6.5x10^{-4}}{0.02} \qquad \varphi_1 = 11.7° \quad \textbf{cos(}\ \boldsymbol{\varphi_1}\textbf{)} \cong \textbf{0.97}$$

Dans la figure (IV.15), Nous montrons la tension de source *Vsa* et le courant *Isa* dans même figure, nous constatons que le décalage entre eux a un déphasage, φ_1 = 11.7°.Alors le facteur de puissance **cos(φ_1) ≅ 0.97.**

On remarque que le déphasage entre le courant et la tension de source est amélioré. Ces résultats impliquent que le courant injecté par le filtre entre la source et la charge améliore la forme du courant de source qui devient sinusoïdale.

IV.5.2 Simulation d'Implémentation de l'algorithme GWO :

Nous avons remplacé l'algorithme perturbation et observation (P&O) par l'algorithme Loup gris GWO. La figure (IV.16) montre le circuit hacheur-boost réalisé avec l'algorithme Loup gris GWO simulé.

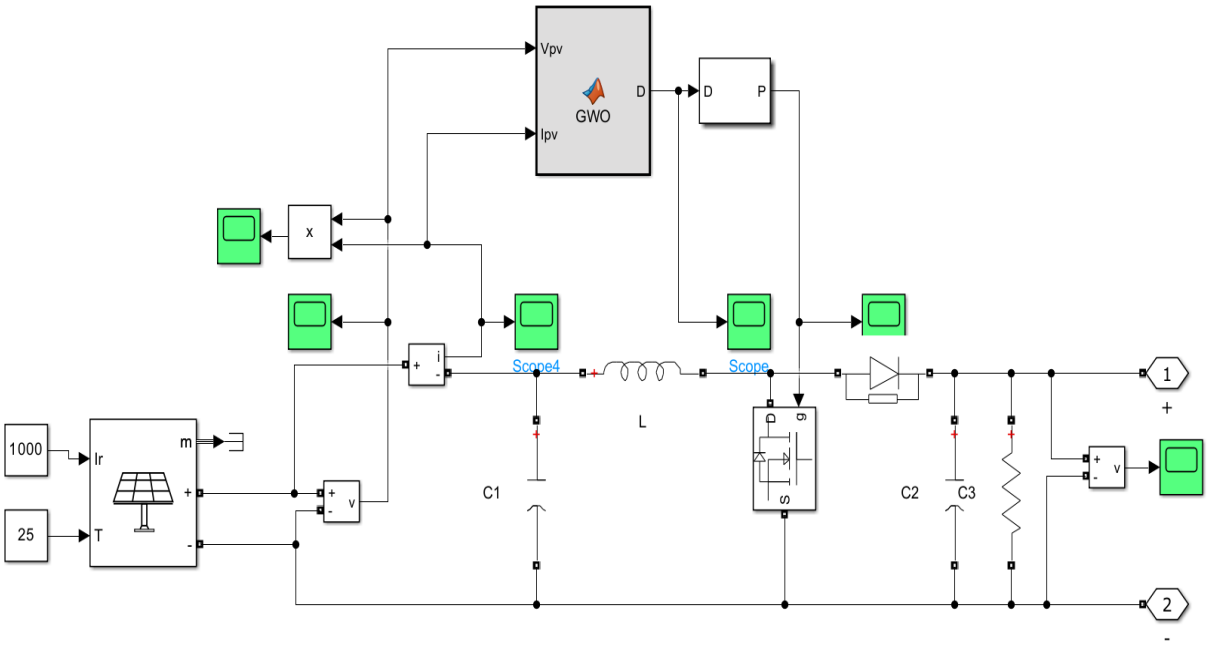


Figure IV. 16-Le circuit hacheur BOOST utilisé pour réaliser le MPPT –GWO

Le figure (IV.17) montre la tension de PV (Vpv) et qui représente la tension d'entrée du convertisseur boost et l la tension de système PV (Vs) et qui représente la tension de sortie du convertisseur avec l'algorithme GWO.

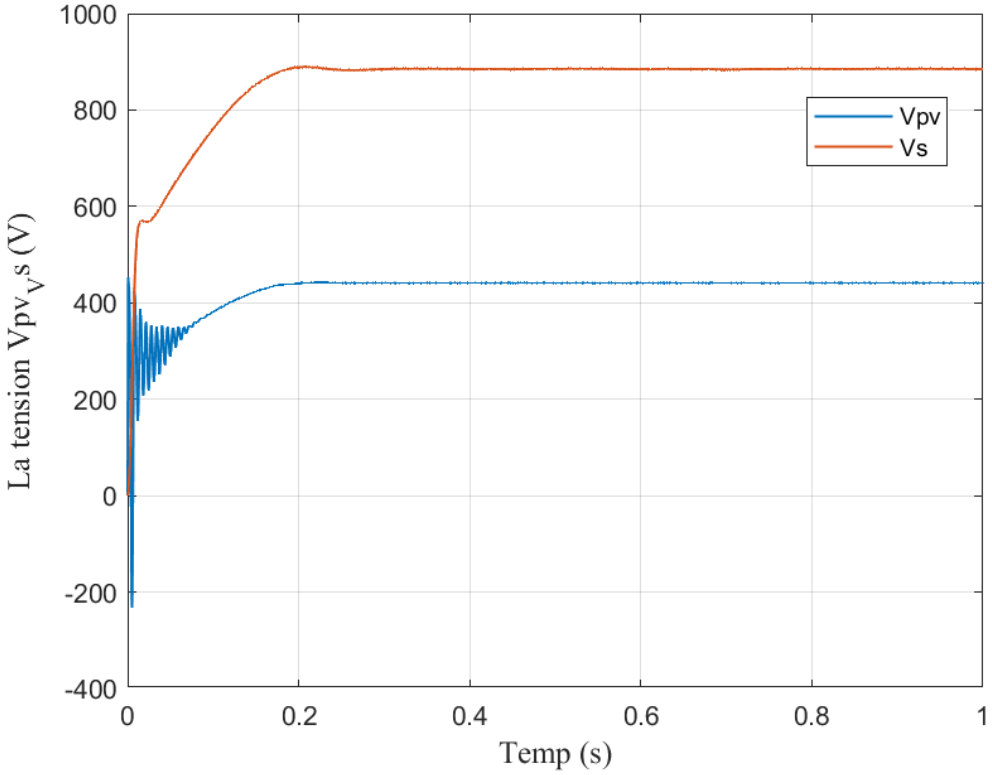


Figure IV. 17-Tensions d'entre(Vpv) et de sortie(Vs) du convertisseur Boost avec GWO

La figure de rapport cyclique de GWO est présentée comme suivant :

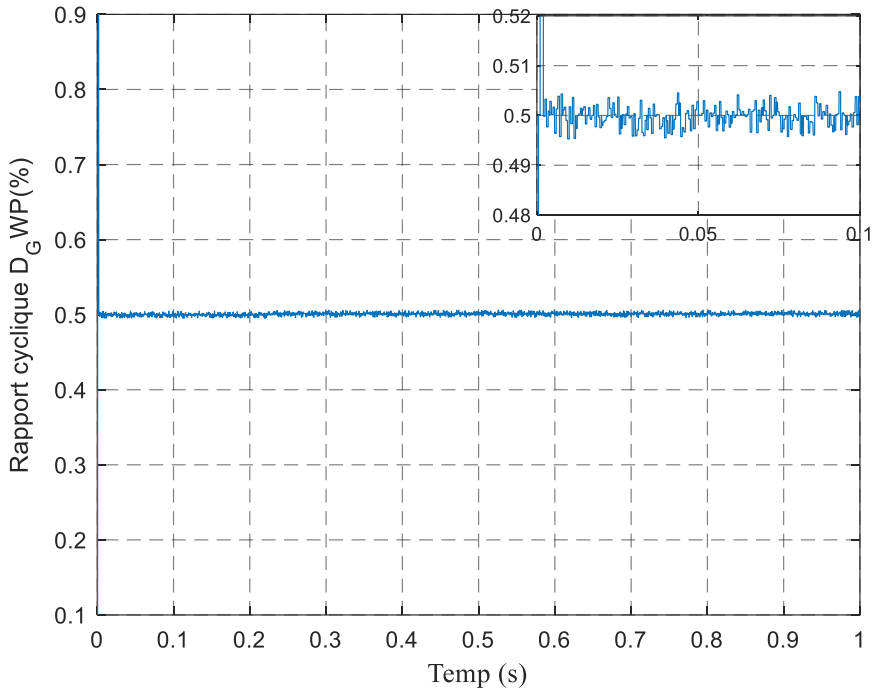


Figure IV. 18-*Evolution du Rapport cyclique D avec GWO.*

Dans la figure (IV.20), nous pouvons voir clairement les trois courants du système (*Ica, Iha, Isa*) dans la même illustration, ce qui nous montre que le courant de source a corrigé par la soustraction entre le courant de charge et le courant de filtre et devenu presque purement sinusoïdale dans le régime permanant (t>0.02s) mieux que l'algorithme P&O.

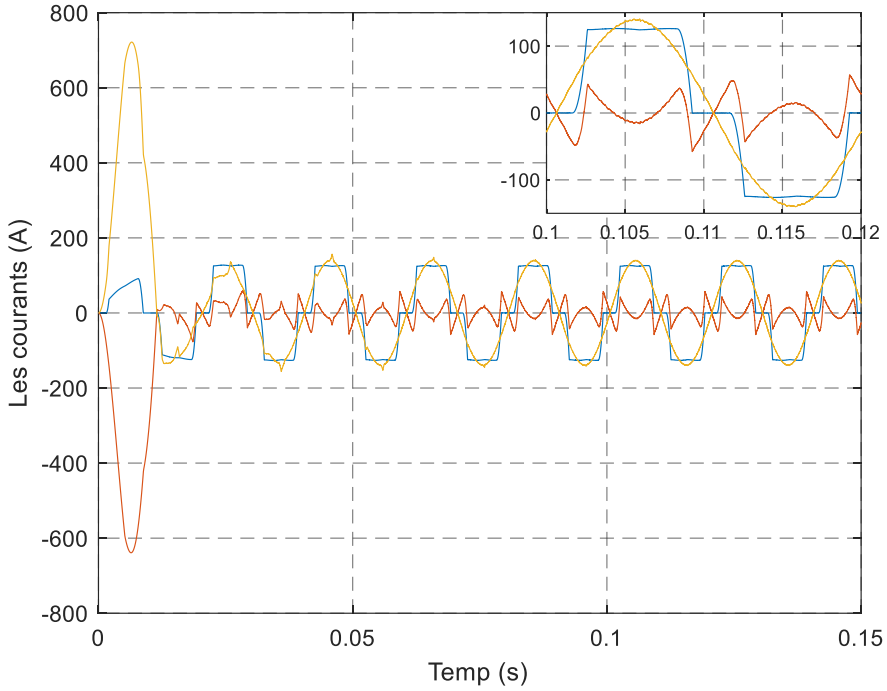


Figure IV. 19-*Allure de courant de charge Ica et le courant harmonique Iha, le courant de source Isa.*

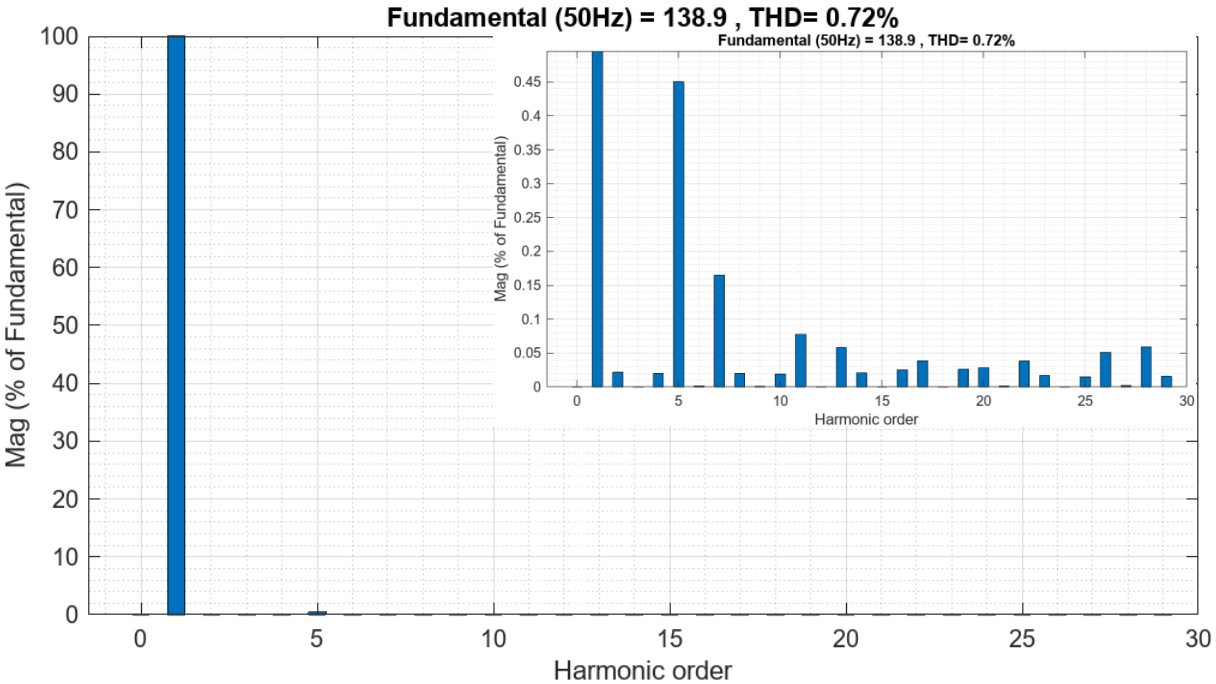


Figure IV. 20-L*'ordre de THD avec FAP et GWO*

On remarque que le spectre de *Ica* (Figure IV.19) représentant les 30 premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THD de *Ica* est de 0.72% pour une durée d'observation de 0.2 s, mieux que l'algorithme de P&O. Ce résultat de THD est suffisant pour accepter par le réseau électrique de distribution car il est dans les normes de recommandation internationale IEEE519.

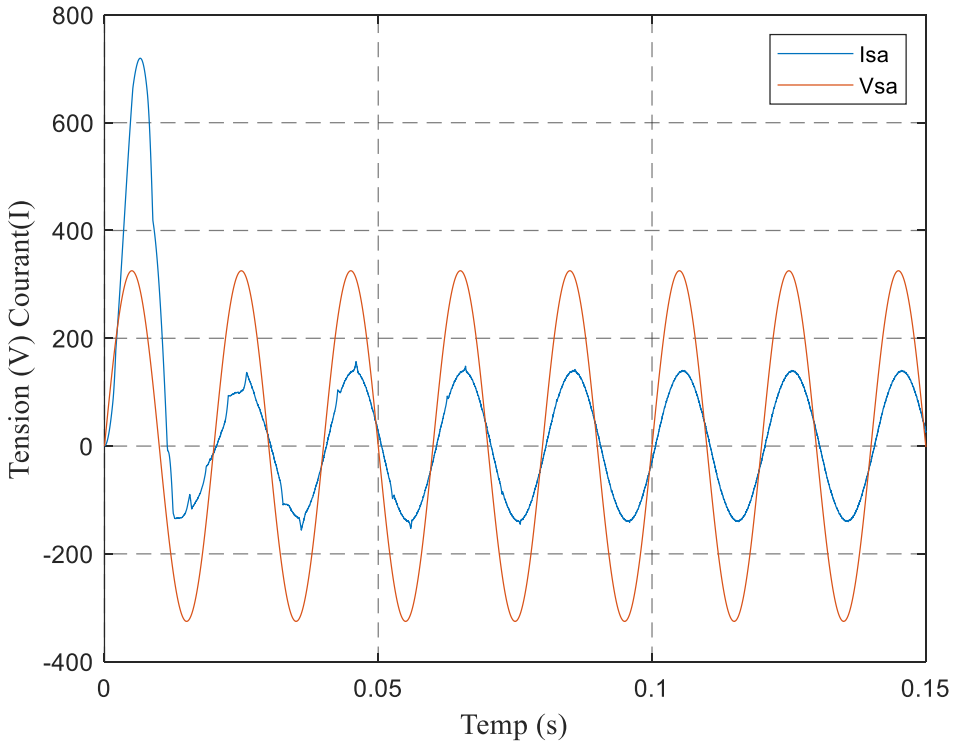


Figure IV. 21-*allure de la tension de source Vsa et le courant source Isa.*

-Le déphasage entre *Ic* (A) et *Vs* (V) :

$$\varphi_1 = \frac{360°\Delta t}{T} \qquad \varphi_1 = \frac{360°x5.5x10^{-4}}{0.02} \qquad \varphi_1 = 9.9° \quad \textbf{cos(} \boldsymbol{\varphi_1}\textbf{)} \cong \textbf{0.98}$$

Dans la figure (IV.21), nous montrons la tension de source *Vsa* et le courant *Isa* dans même figure, nous constatons que le décalage entre eux a un déphasage, $\varphi_1 = 9.9°$.Alors le facteur de puissance **cos(φ_1) ≅ 0.98.**

On remarque que le déphasage entre le courant et la tension de source est amélioré et devenu presque nul. Ces résultats impliquent que le courant injecté par le filtre entre la source et la charge améliore la forme du courant de source qui devient sinusoïdale.

IV.5.3 Comparaison entre les deux algorithmes P&O et PWO :

Les résultats de simulation montrent que :

- On remarque que L'algorithme de GWO a un THD meilleur que l'algorithme P&O par 0.72% contre 0.76% différence
- La méthode méta-heuristique proposée présente moins d'oscillations par rapport la méthode P&O dans le régime transitoire

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques de système photovoltaïque. Nous avons montré que la valeur moyenne de la tension de sortie peut ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Pour produire une puissance maximale et obtenir une efficacité maximale, l'ensemble du panneau photovoltaïque doit fonctionner à ce point particulier. Le point de puissance maximum du panneau PV continue de changer en fonction des conditions environnementales changeantes telles que l'irradiante solaire et la température de la cellule. Ainsi, pour extraire la puissance maximale disponible d'un module PV, Des algorithmes MPPT sont mis en œuvre (GWO et P&O).

D'après les résultats, nous avons constaté une grande concordance entre les résultats. Donc cela montre que le FAP est une solution efficace pour l'élimination des harmoniques de courant et amélioration de la distorsion totale des harmoniques (THD). Les résultats montrent aussi que le FAP s'adapte automatiquement avec les changements des charges ou des tensions aux bornes du condensateur.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce projet fin d'étude, on a étudié une stratégie de dépollution des réseaux électriques, appelée filtrage actif parallèle qui a vu son développement avec l'évolution des organes de l'électronique de puissance. Ces derniers nous permettant de concevoir des dispositifs appelés onduleur de puissance, permettant l'injection des courants harmoniques dans le réseau, par conséquence, la source fournira des courant sinusoïdaux en phase avec leurs tensions. D'autre part la méthode d'identification des puissances instantanées utilisée a été choisie pour identifier le plus grand nombre d'harmoniques pour pouvoir les éliminer.

Après avoir analysé une optimisation des performances d'un système photovoltaïque utilisant les Algorithmes classique et méta-heuristiques. On peut rapidement comprendre et justifier l'intéressement à l'énergie solaire photovoltaïque. D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse,disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, deux algorithmes de commandes ont été étudiées pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT l'algorithme de perturbation et l'observation (MPPT-P&O), et l'algorithme Loup gris (MPPT-GWO).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une description générale sur les systèmes des énergies renouvelables et leurs types d'une part et on a mis en valeur les avantages et les inconvénients de système photovoltaïque d'une autre part.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les caractéristiques générales des perturbations électriques leurs effets sur le réseau électrique, en présentant les déférents types des solutions pour les réduire

Le troisième chapitre nous avons présenté des généralités sur les différents technique d'optimisation de l'énergie et on a basé sur l'algorithme de perturbation et l'observation (MPPT-P&O), et l'algorithme Loup gris (MPPT-GWO).

Dans le quatrième chapitre, Nous avons commencé par la présentation de la conception et de la simulation et analyse d'un système PV sans FAP et avec utilisation de FAP avec MPPT-P&O et avec MPPT-GWO .Après la comparaison entre les deux algorithmes, il est clair qu'il y a une réduction THD et le déphasage quand la méthode proposée de GWO est employée.

Finalement, le filtre actif parallèle nous a donné des résultats satisfaisants par son adaptabilité au changement accompagnions le réseau pour le rendre plus stable avec un facteur de puissance unitaire. Nous pouvons dire que l'Algorithme GWO est un outil d'optimisation

très puissant où les résultats que nous avons obtenus après son utilisation nous sont satisfaisants.

Donc cet outil a donné un sens à notre contribution

Comme perspectives pour les futures promotions on peut citer:

- La réalisation pratique du travail réalisé en simulation.
- l'association du filtre actif parallèle avec un filtre passif pour réduire le coût de l'installation.
- l'utilisation d'autre technique de commande de l'intelligence artificielle dans la commande du filtre actif.

REFECRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] A.Fellague Chebra, A. Fellag « Etude et simulation d'un filtre actif parallèle multi-niveaux » Mémoire de master en génie électrique université Saad Dahlab de Blida, 2018.

[2] AS. Ouchen, A. Betka, S. Abdeddaim, and A. Menadi, "Fuzzy-predictive direct power control implémentation of a grid connected photovoltaic system, associated with anactive power filter," Energy Convers. Manag., vol. 122, pp. 515–525, 2016.

[3] M. Seyedmahmoudian, B. Horan, T. K. Soon, R. Rahmani, A. M. Than Oo, S.Mekhilef, and A. Stojcevski, "State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems - A review," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 64, pp. 435–455, 2016.

[4] S.Ouchen'' Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif associé à une source photovoltaïque '' Thèse de Doctorat, Université Mohamed khider-Biskra, 2017.

[5] Dr. Belaid Lalouni Sofia, cours énergie solaire photovoltaïque.

[6] Antonio Luque And Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.

[7] Les panneaux solaires photovoltaique, solutions for low energy Neighbourhoods.

[8] L.Protin and S. Astier. " Convertisseurs photovoltaïques", Technique d'ingénieur, D 3360, 1996.

[9] J. Royer,T.Djiako,E. Schiller,B. SadaSy, le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens.Université d'Ottawa, institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français.

[10] Douar Hakim « Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques » Mémoire de magister en génie électrique université M'Hamed Bougara, Boumerdes 2006.

[11] A.Chaoui « Filtrage active triphasé pour charges non linéaire » thèse de doctorat en génie électrique université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.

[12] T.Markvart et L.Castaber, ''Photovoltaics Fundamentals and applications''.Preface Guide to Usage of the Handbook by Professional Groups.

[13] Tadjer. Sid Ahmed.'' Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque'' Mémoire de magistère, Université M'hamed Bougara-Boumrdes, 2008.

[14] S. Naffouti « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque » Projet de fin d'étude pour obtenir le diplôme national d'ingénieur, Université de Monastir, Tunisie, 2012.

[15] Arezki KIFOUCHE « Identification des harmoniques et génération du courant de référence » Mémoire de magister, université de Boumerdès, 2005.

[16] Djafar OULDABDESLAM « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » Thèse de doctorat de l'université de Haute Alsace 08 décembre 2005.

[17] BADACHE Zohir & SACI Abdeslam. « Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.

[18] ABDELATIF Med Elhadi. « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.

[19] C LABOURE ; François COSTA; Lionel PICHON « Compatibilité électromagnétique.

[21] V. Beauvois, « Qualité de la tension, qualité de l'électricité ». Cours, université de Liege, Novembre 2008.

[22] G. Desquilbet et C. Foucher et P. Fauquembergue, « Statistic alanalysis of voltage dips». Notes EDF, 96NR00 102, 1995.

[23] A. Amaret et A. Bengana, «Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils». Mémoire master, université Abou BekrBelkaid de Tlemcenle, 25 Juin 2015.

[24] S. Kebiri, «Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux ».Mémoire de magister, université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.

[25] A. Sahli, « Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau ». Mémoire de Magister, université Ferhat Abbas –Sétif, 2012.

[26] S. Mouttou, « Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant ». Mémoire de maitrise, université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.

[27] YAHIAOUI Ahmed Lamine « Détection de défaut des convertisseurs de puissance : Application au filtre actif parallèle » mémoire de Master. Université de M'sila, 2014.

[28] ZERROUKI Youcef « Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension multi-niveaux » mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.

[29] AAMAROUAYACHE Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de doctorat en sciences en électrotechnique option, 2014

[30] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.

[31] Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012.

[32] Ahmad Zbeeb, "a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications" for the degree of master of applied science, concordia university montreal,quebec, canada, 2009.

[33] d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy,"an improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications," IEEE applied power electronics conf. And exposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003.

[34] Akihiro Oi, " design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of cali- fornia polytechnic state university, 2005

[35] Hajar Bagheri " advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa), 2015.

[36] Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », Mémoire de diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach,

algérie, 2012.

[37] Trishan Esram And Patrick“comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.

[38] Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « etude d’une chaine de conversion photovoltaique », Mémoire de diplôme d'ingenieur d'etat en génie electrotechnique, université de m’sila, 2010.

[39] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva “energy comparison of seven mppt techniques for pv systems”, scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;

[40] M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d’un système photovoltaïque".jcge'08 lyon, 2008.

[41] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk, “risc-microcontroller buildings fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered lightflasher applications”, industrial electronics society, 2004.

[42] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, “a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller”, IEEE power electronics specialists conference, pesc’94, pp. 396-403, jun. 1994.

[43] M. Veerachary, T.Senjyuand K. Uezato, “feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller”, IEEE trans. On aerospace and electronicsystems, vol 38, no. 3, july 2002.

[44] (2010) http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw.

[45] BOUALEM DENDIB" Technique conventionnelles et avanccée de poursuite MPPT

[46] Ferran T.t Fontbona, “Optimisation methods meet the smart grid New methods for solvinglocation and allocateion problems under the smart grid Paradigm », thèse de Doctorat 2015.

[47] M. Madić, Danijel M., Miroslav R., “Comparison of Méta-heuristique Algorithms for solvingMachining Optimization Problems”, Mechanical Engineering Vol. 11, pp. 29-44, 2013.

[48] Khajehzadeh, M., Raihan T., M., El-Shafie, A., Eslami, M., “A Survey on Meta-HeuristicGlobal Optimization Algorithms”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering andTechnology, Vol. 3, pp. 569-578, 2011.

[49] Blum, C., Roli, A., "Metaheuristics in combinatorial optimisation: Overview and concepturalcomparision”, ACM Computing Surveys, Vol. 35, pp. 268-308, 2003.

[50] Yang, X.S., “Review of Metaheuristics and Generalized Evolutionary Walk Algorithm”, International Journal of Bio-Inspired Computation, Vol. 3, pp. 77-84, 2011

[51] Zemmit, A., Messalti, S., &Harrag, A. (2018). A new improved DTC of doubly fed induction machine using GA-based PI controller. Ain Shams Engineering Journal, 9(4), 1877-1885.

[52] Omessaad Hajji, “ Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques.Application à la conception des dispositifs Electrotechniques ”, Thèse de doctorat en génieélectrique, Ecole centrale de Lille, Université des sciences et technologies de Lille, 2003.

[53] J. Brownlee « Clever algorithms- nature-inspired programming recipes » livre 2011.

[54] L. D. Mech, "Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs," Canadian

Journal of Zoology, vol. 77, pp. 1196-1203, 1999.

[55] CalSol - gisement solaire (ines-solaire.org).

[56] Rendement des panneaux solaires : calcul, formule, optimisation (kelwatt.fr).

ANNEXE

Annexe

Mechanical Properties

Cells	6 x 12
Cell Vendor	LG
Cell Type	Monocrystalline / N-type
Cell Dimensions	156.75 x 156.75 mm / 6 inches
# of Busbar	3
Dimensions (L x W x H)	1960 x 1000 x 46 mm
	77.17 x 39.37 x 1.81 inch
Front Load	60 psf
Rear Load	60 psf
Weight	20.3 ± 0.5 kg / 44.75 ± 1.1 lbs
Connector Type	MC4, IP67
Junction Box	IP67 with 3 bypass diodes
Cable	PV wire 12 AWG (4.0mm²) conductor
Length of Cables	2 x 1200 mm / 2 x 47.24 inch
Glass	High Transmission Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium

Certifications and Warranty

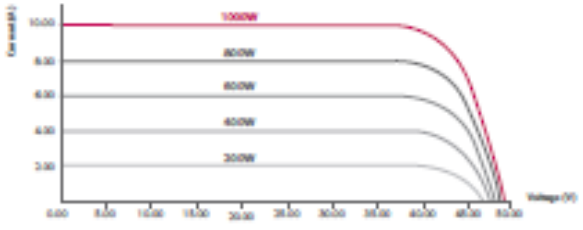
Certifications	IEC 62716 (Ammonia Test)
	IEC 61701(Salt Mist Corrosion Test)
	ISO 9001
	UL 1703
Module Fire Performance (USA)	Type 2 (UL 1703)
Fire Rating (for CANADA)	Class C (ULC/ORD C1703)
Product Warranty	12 years
Output Warranty of Pmax	Linear warranty*

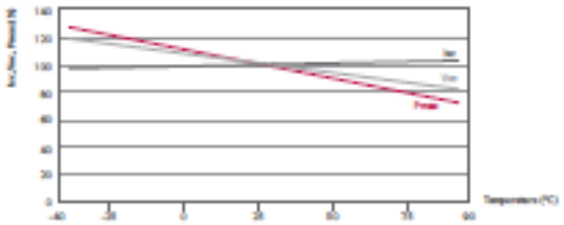
* 1) 1st year: 98%, 2) After 2nd year: 0.55% annual degradation, 3) 83.55% for 25 years

Temperature Characteristics

NOCT	45 ± 2 °C
Pmax	-0.41 %/°C
Voc	-0.30 %/°C
Isc	0.04 %/°C

Characteristic Curves





Electrical Properties (STC *)

Module Type	365 W	360 W
MPP Voltage (Vmpp)	38.6	38.4
MPP Current (Impp)	9.46	9.39
Open Circuit Voltage (Voc)	48.4	48.3
Short Circuit Current (Isc)	9.89	9.84
Module Efficiency (%)	18.6	18.4
Operating Temperature (°C)	-40 ~ +90	
Maximum System Voltage (V)	1000	
Maximum Series Fuse Rating (A)	20	
Power Tolerance (%)	0 ~ +3	

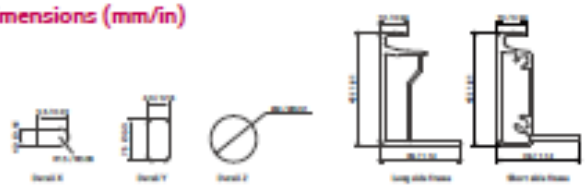
* STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000 W/m², Module Temperature 25 °C, AM 1.5
* The nameplate power output is measured and determined by LG Electronics at its sole and absolute discretion.
* The typical change in module efficiency at 200 W/m² in relation to 1000 W/m² is -2.0%.

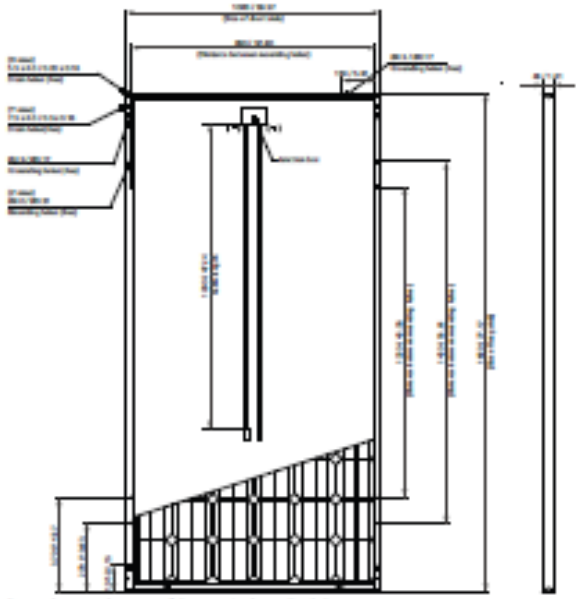
Electrical Properties (NOCT*)

Module Type	365 W	360 W
Maximum Power (Pmax)	267	263
MPP Voltage (Vmpp)	35.3	35.2
MPP Current (Impp)	7.55	7.49
Open Circuit Voltage (Voc)	44.9	44.8
Short Circuit Current (Isc)	7.98	7.93

* NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800 W/m², ambient temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

Dimensions (mm/in)





* The distance between the center of the mounting/grounding holes.

Résumé :

Les générateurs solaires peuvent fonctionner sur une large plage de tension et de courant de sortie, mais ils ne peuvent fournir une puissance maximale qu'à certaines valeurs de courant et de tension. En raison, un ou plusieurs convertisseurs statiques contrôlés sont souvent placés entre le générateur et le récepteur pour suivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont appelées MPPT (Maximum Power Point Tracking). Elles sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par un module photovoltaïque en visant en permanence le point de puissance maximum, cette mémoire basée sur une nouvelle méthode d'optimisation (GWO) qui surmonte les limitations telles que l'efficacité de suivi, les oscillations en régime permanent et les transitoires rencontrés dans les techniques de perturbation et d'observation (P&O).

-Mots Clés : Système PV-Convertisseur DC/DC-Onduleur-Filtre actif-Commande MPPT–algorithme P&O et GWO.

Abstract:

Solar generators can operate over a wide range of output voltage and current, but they can only deliver maximum power at certain current and voltage values. Because of this, one or more controlled static converters are often placed between the generator and the receiver to track the maximum power point. These commands are called MPPT (Maximum Power Point Tracking). They are used in photovoltaic systems to maximize the power delivered by a photovoltaic module by continuously aiming for the maximum power point, this memory based on a new method of optimization (GWO) that overcomes limitations such as tracking efficiency , steady-state oscillations, and transients encountered in Perturbation and Observation (P&O) techniques.

-Keywords: PV system-DC/DC converter-Inverter-Active filter-MPPT control-P&O and GWO algorithm.

ملخص:

يمكن لمولدات الطاقة الشمسية أن تعمل على نطاق واسع من جهد الخرج والتيار، لكنها لا تستطيع سوى توفير أقصى قدر من الطاقة عند قيم معينة للتيار والجهد. لهذا السبب، غالبًا ما يتم وضع محول ثابت واحد أو أكثر يتم التحكم فيه بين المولد والمستقبل لتتبع أقصى نقطة للطاقة. تسمى هذه الأوامر MPPT (الحد الأقصى لتتبع نقاط الطاقة). يتم استخدامها في الأنظمة الكهروضوئية لتعظيم الطاقة التي توفرها الوحدة الكهروضوئية من خلال الاستهداف المستمر لنقطة الطاقة القصوى، وهذه الذاكرة تعتمد على طريقة جديدة للتحسين (GWO) تتغلب على القيود مثل كفاءة التتبع، وتذبذبات الحالة المستقرة، والعابرين المصادفة في تقنيات الاضطراب والملاحظة (P & O).

-**الكلمات الرئيسية**: نظام PV - محول DC / DC - مرشح عاكس نشط - تحكم MPPT - خوارزمية P & O وGWO.