République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Dr.Yahia FARES de Médéa



Faculté de Technologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master :

Filière : ***Electrotechnique***

Spécialité : ***Commandes électriques***

Thème :

Alimentation d'un filtre actif paralléle par un system PV Controlé par l'algorithme de Coucou search

Realisé par :

- Rahmani Mohamed

- kerrouche Adel

Encadré par :

- Dr: Morsli Abd-Elkader

- Dr: Khelil Cherfi Mohamed

Promotion 2022

REMERCIMENT

Le travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'études réalisé à l'université YAHIA FARES de Médéa.

En premier lieu, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Mes encadreurs Dr, ***Morsli Abdelkader Et*** *Dr****, Khelil Cherfi Mohamed*** *pour son temps précieux qu'il m'a consacré, qui a dirigé et suivi nos travail et qui a toujours su me faire confiance et de m'apporter l'aide nécessaire, tant sur le planscientifique que moral.*

Je présente aussi mes sincères remerciements à tous les enseignantsdu département du ***Génie Electrique*** *et qui ont contribué à ma formation.*

Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Dédicace 01

A **Mes parents, Mon frère et Ma sœur ....**

Je dédie ce mémoire à tous mes amis ....

Mohamed..

Dédicace 02

Je dédie ce travail à mes parents, mes

frères et mes sœurs, mes amies et mes

Collègues de travail et à toute la

famille

Adel ..

Résumé

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet, la caractéristique I (V) du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) associée au hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont être élaborées et utilisées.Le problème est abordé dans sa globalité dans cette thèse par une approche systémique du point de vue architecture de conversion et mode de commande associée visant des rendements, fiabilités et flexibilités élevés.

Mots clés: Système PV – Convertisseur DC/DC - Commande MPPT –Modélisation – Simulation

Abstract

A photovoltaic generator can function in a broad range of tension and of current output but it can deliver a maximum power only for particular values of the current and tension. Indeed characteristic I (V) of the generator depend on solar illumination and the temperature. These climatic variations involve the fluctuation of the point of maximum power. Because of this fluctuation, one often intercalates between the generator and the receiver one or more static inverters ordered allowing continuing the point of maximum power. These command are, known under the name of MPPT (Maximum Power Point Tracking) associated to the inverter DC-DC, which ensures the coupling between photovoltaic generator and the receiver by forcing the first to deliver his maximum power.Techniques MPPT (maximum power Point Tracking) are used in the photovoltaic systems to maximize the power delivered by the panel photovoltaic by continuing the point of maximum power continuously, which is not obvious to reach; Indeed, this problem of continuation made until our days the object of several research. Also, several methods have to be elaborate and used.In this thesis,

the problem is studied systematically from a power interface point of view in order to obtain high levels of efficiency, reliability and flexibility.

Keywords : DC/DC converter , photovoltaic panel system,mppt control, Modeling – Simulation

الملخص

يستطيع مولد الطاقة الشمسية العمل في مجال واسع من التوتر و التيار و لكن لا يستطيع توزيع الطاقة القصوى إلا في توتر وتيار مميزتين.

عموما تتأثر خصائص المولد بمعدل التنوير الشمسي و الحرارة، هده التغيرات لمناخية تتسبب في تدبدب نقطة الطاقة القصوى، لهدا السبب نعمل على إدراج واحد أو عدة محولات ساكنة، مزودة ببرنامج بين مولد الطاقة الشمسية والمستقبل ،هذه البرامج تعرف باسم mppt(متتبع نقطة الطاقة القصوى) مشترك مع محول ساكن مع نوع مستمر-مستمر .هذا الأخير يضمن الربط بين مولد الطاقة الشمسية والمستقبل بإرغام الأول بتوزيع الطاقة القصوى .

أساليب mppt تستعمل في أنظمة الطاقة الشمسية لرفع الطاقة المزودة من طرف المولد بتتبع دائم للطاقة القصوى ،لهذا الصدد يبقى مشكل تتبع الطاقة القصوى لحد يومنا هدف عدة أبحاث ، أيضا عدة طرق حضرت لهذا الغرض .

المشكل المعالج في هذه المذكرة هو بحث تتابعي لهذا النوع من التحولات وطريقة التحكم فيه لهدف تحسين المردود والفعالية .

كلمات مفتاحية : نظام الألواح الكهروضوئية ,محول تيار ثابت DC/DC, متتبع نقطة الطاقة القصوى, النمذجة - المحاكاة

Sommaire

Introduction *1*

CHAPITRE I :Qualité de l'énergie électrique *4*

I.1. Introduction *4*

I.2. Qualité de l'énergie électrique *4*

I.3. Perturbation électrique *5*

I.3.1. Creux de tension *5*

I.3.2. Coupure de tension *5*

I.3.3. Fluctuation de tension *6*

I.3.4. Déséquilibre du système triphasé *6*

I.3.5. Variation de fréquence *7*

I.3.6. Harmoniques et interharmoniques *8*

I.4. Origine des harmoniques *8*

I.5. Caractérisation des perturbations harmoniques *9*

I.5.1. Taux de distorsion harmonique *9*

I.5.2. Facteur de puissance *9*

I.6. Solutions de dépollution des réseaux électriques *10*

I.6.1. Solutions traditionnelles *10*

I.6.1.1. Filtrage passif *11*

I.6.2. Solutions modernes *12*

I.6.2.1. Filtre actif *12*

I.6.2.1.1. Filtre actif parallèle (F.A.P) *12*

I.6.2.1.2. Le filtre actif série (FAS) 13

I.6.2.1.3. Filtre combiné parallèle-série (UPQC) 14

I.6.2.2. Combinaison hybride active et passive 14

I.6.2.3. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles 15

I.6.2.4. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles 15

I.6.2.5. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle 16

***I.7. Algorithme du filtre coupe-bande (notch filter)** 16*

***I.8. Techniques de Commande** 17*

I.8.1. MLI à échantillonnage périodique 17

I.8.2. MLI à Bande d'hystérésis 18

I.8.3. MLI à porteuse triangulaire 19

I.8.4. Technique de la commande vectorielle 20

I.8.4.1. Cas d'un onduleur de tension deux niveaux 20

I.8.4.1.1. Modélisation de l'onduleur 20

***Conclusion** 25*

CHAPITRE II : GENERALITE SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

***II.1. Introduction** 27*

***II.2. L'énergie solaire photovoltaïque** 27*

II.2.1. Les rayonnement solaires 28

II.2.2. Type de rayonnement solaire..... 28

***II.3. Historique de la cellule photovoltaïque** 29*

***II.4. Cellule photovoltaïque** 30*

II.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 31

II.4.2. Les usages de la cellule photovoltaïque 32

II.4.3. Composition de la cellule solaire 32

II.5. Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques 34

II.5.1. Cellule en silicium polycristallin 34

II.5.2. Cellule en silicium monocristallin 35

II.5.3. Cellule silicium amorphe en couche mince 36

II.5.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS 36

II.5.5. Cellule multijonction 37

II.6. Générateur photovoltaïque(GPV) 38

II.6.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) 39

II.6.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle 39

II.6.3. Association des Cellules Photovoltaïques en Série 40

II.7. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque 40

II.7.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque 41

II.8. Module photovoltaïque 42

II.8.1.Les principales caractéristiques d'un module 43

II.8.1.1. Puissance crête 43

II.8.1.2. Facteur de forme 43

II.8.1.3. Rendement η 43

II.9. Panneau solaire 44

II.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 44

Conclusion 45

CHAPITRE III : Modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O et Cs

III.1. Introduction *47*

III.2. L'outil Matlab / Simulink *47*

III.3. Modélisation du système photovoltaïque *47*

III.4. Caractérisation du module PV *48*

III.5. Simulation du module PV *49*

III.6. Electronique de puissance et la conversion électrique *49*

III.7. Convertisseurs électriques *50*

III.8. Exigences de l'utilisateur *50*

III.9. Les Hacheurs *51*

III.9.1. Type des hacheurs *51*

III.9.1.1. Hacheur Buck *51*

III.9.1.1.1. Modèle mathématique équivalent *53*

III.9.1.2. Hacheur boost *54*

III.9.1.2.1. Modèle mathématique équivalent *56*

III.10. La MPPT (Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque ou « max power point tracker ») *57*

III.10.1. Principe de la MPPT *58*

III.10.2. Algorithmes de la commande MPPT *60*

III.11. Principe de la commande ''Perturbation et Observation'' (P&O) *60*

III.12. Principe de la commande l'incrément de conductance (IC) *62*

III.13. Les métaheuristiques *63*

III.14. Les algorithmes à base d'intelligence essaim *64*

III.15. La recherche coucou (CS) *64*

III.15.1. OISEAU DE COUCOU *64*

III.15.2. Principaux composants de recherche coucou (CS) 65

III.15.3. Fonction objectif 66

III.15.4. La vole de Lévy 66

III.16. Le comportement d'oiseau coucou 67

III.16.1. Description de l'algorithme 68

III.16.2. La MPPT avec l'algorithme recherche coucou 68

III.17. Le mécanisme de recherche MPP 70

III.18. Implémentation de l'algorithme CS 73

III.19. Simulation de FAP avec les algorithmes P&O et CS 74

III.20. Simulation des algorithmes avec le FAP 79

III.20.1. Simulation d'Implémentation de l'algorithme P&O 80

III.20.2. Simulation d'Implémentation de l'algorithme CS 82

III.20.3. Comparaison entre les deux algorithmes P&O et CS 84

Conclusion 86

Conclusion Conclusion 87

Bibliographie 89

Annexes 95

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : *Creux et coupure de tension.* *5*

Figure I .2*: Fluctuation de tension* *6*

Figure I .3: *Déséquilibre en amplitude et en phase.* *7*

Figure I .4 *: variation de fréquence.* *7*

Figure I .5*: Fondamental et inter-harmoniques.* *8*

Figure I .6: *Structures de filtres passifs* *11*

Figure I .7: *Structure du filtre actif parallèle* *13*

Figure I .8: *Filtre actif série.* *13*

Figure I .9: *Filtre combiné parallèle-série (UPQC).* *14*

Figure I.10 : *.Filtre actif série et filtre passif parallèle.* *15*

Figure I.11 : *Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.* *15*

Figure I.12 : *Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle* *16*

Figure I.13:*Génération des courants de référence par l'algorithme du filtre coupe-bande.* *17*

Figure I.14: *Modulateur MLI à échantillonnage périodique.* *18*

Figure I.15:*Modulateur MLI à bande d'hystérésis. (a). Schéma global. (b). Principe.* *18*

Figure I.16: *Modulateur MLI à porteuse triangulaire.* *20*

Figure I.17: *Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.* *21*

Chapitre II

Figure II .1: *Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.* *27*

Figure II.2 : *Les bandes de longueur d'onde* *28*

Figure II.3 : *Composantes du rayonnement solaire au sol.* *29*

Figure II.4 *: Schéma équivalent électrique de la cellule PV* *30*

Figure II.5 *: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque.* *31*

Figure II.6 : *Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.* *32*

Figure II.7 : *Structure d'une cellule photovoltaïque.* *33*

Figure II.8 : *Cellule en silicium polycristallin* ***.*** *34*

Figure II.9 : *Cellule en silicium monocristallin* *35*

Figure II.10 : *Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS* *37*

Figure II.11 : *Cellule multijonction* *38*

Figure II.12*: Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.* *39*

Figure II.13 : *Association des Cellules Photovoltaïques en Série.* *40*

Figure II.14 : *composition de panneaux photovoltaïques .* *42*

Chapitre III

Figure III.1: *Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.* *48*

Figure III.2 : *schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.* *49*

***Figure III.3**: Symbole d'un convertisseur (DC-DC)* *51*

***Figure III.4 :** Schéma électrique d'un hacheur buck.* *52*

***Figure III.5:** Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck* *53*

***Figure III.6:** Schéma électrique d'un hacheur buck fermé.* *53*

***Figure III.7:** Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.* *54*

***Figure III.8:** Schéma électrique d'un hacheur boost.* *55*

***Figure III.9:** Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.* *55*

***Figure III.10:** Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.* *56*

***Figure III.11 :** Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.* *56*

***Figure III.12 :** system photovoltaïque avec MPPT.* *58*

***Figure III.13:** Recherche et recouvrement du point maximal de puissance* *59*

***Figure III.14:** Signe de ΔV et ΔP à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.* *61*

***Figure III.15 :** Organigramme de la méthode P&O [54]* *61*

***Figure III.16 :** Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance.* *63*

***Figure III.17:** Oiseau de coucou* *65*

***Figure III.18:**plan dimensionnel pour la vole de Lévy.* *67*

***Figure III.19:** Le mécanisme de recherche MPP recherche coucou.* *70*

***Figure III.20 :** Organigramme de l'algorithme de la recherche coucou.* *71*

***Figure III.21:**Organigramme de l'algorithme de la recherche coucou avec la MPPT.* *72*

Figure III.22 : *code programme de l'algorithme de la recherche coucou.* *73*

Figure III.23 :*Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par MLI****.*** *76*

Figure III.24 : *Courant de charge ica .* *77*

Figure III.25 : *Courant de charge ica avec la tension de source vsa.* *77*

Figure III.26:*l'ordre de THD sans FAP.* *78*

Figure III.27: *allure de courant de charge ica et le courant harmonique iha, le courant de source isa.* *78*

Figure (III.28): *allure de la tension de source vsa et le courant source isa.* *79*

Figure (III.29) : *Le circuit Buck -boost utilisé pour réaliser le MPPT P&O* *80*

Figure III.30:*Tensions d'entré du convertisseur Boost avec P&O* *80*

Figure III.31:*Evolution du Rapport cyclique D avec P&O.* *81*

Figure III.32:*l'ordre de THD avec FAP et P&O* *81*

Figure III.33 : *Le circuit Buck -boost utilisé pour réaliser le MPPT CS* *82*

Figure III.34:*Tensions d'entré du convertisseur Boost avec CS* *83*

Figure III.35:*Evolution du Rapport cyclique D avec CS* *83*

Figure III.36:*l'ordre de THD avec FAP et CS.* *84*

Figure III.37:*Tensions de sortie du convertisseur Boost avec P&O et CS.* *84*

Figure III.38:*Evolution du Rapport cyclique D avec P&O et CS.* *85*

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau.I.1 : *Obtention des deux niveaux de tension en fonction des etats des interrupteurs d'un onduleur.* *21*

Tableau. I.2 : *Obtention des deux niveaux de tension pour toutes les combinations possibles d'un onduleur.* *22*

Chapitre III

Tableau.III.1: *Caractéristiques électriques du module PV LG365N2W-B3 en condition de test standard .* *49*

Tableau III.2 *Paramètres de simulation de PV.* *74*

Tableau III.3 : *Paramètres de simulation de FAP.* *75*

Liste des symboles

E: Eclairement (W/m^2).

D2 : Diamètre de soleil($1.39.10^9$m)

D_t: Diamètre de la terre($1.27.\ 10^7$m)

L_{ts} : Distance moyenne soleil_ terre ($1.5.\ 10^{11}$m)

Icc : Le courant de court-circuit (A)

Vco : La tension de circuit ouvert (V)

N_s: Nombre de modules dans le panneau en série

N_P: Nombre de modules dans le panneau en parallèle

Ipv : Courant générer par la cellule photovoltaïque(A)

Iph : Photo courant créer par la cellule(A)

Id: Le courant circulant dans la diode (A)

Ish : Le courant circulant dans la résistance Rsh (A)

E_g: Energie de seuil

Ios : le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence Tr et l'éclairement de référence(A)

I_s: Courant de Saturation(A)

I_{cc}: Courant de court de circuit(A)

K : la constante de Boltzmann (1.3854 10-23J /K)

q : Charge électrique élémentaire (1,6 10-19 C)

A : Facteur d'idéalité de la diode (1<A<3)

V_{pv}: La tension aux bornes de cette même cellule(V)

η : Rendement de la cellule(%)

T_r: Température référence de la cellule

T_s: Température ambiante

T_{mod}: Température de fonctionnement de la cellule

R_s: Résistance Série(Ω)

R_{sh}: Résistance Parallèle(Ω)

V_{co}: Tension de circuit ouvert(V)

V_{th}: Tension thermique(V)

K_i: Coefficient de la température de I_{pv}

V_e: Tension d'entrée du hacheur – Boost(V)

V_s: Tension de sortie du hacheur – Boost(V)

V_d: Tension aux bornes de la diode (V)

G : Eclairement (W /m2)

V_0: Eclairement pour les STC

L : Inductance(H)

C : Capacité (F)

α : rapport cyclique

R : Résistance(Ω)

I_c: Courant de Capacité(A)

I_L: Courant de l'inductance(A)

Abréviation utilisées

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF : Facteur de forme.

MPP : Point de fonctionnement optimal ‘Maximum Power Point.

NOCT : Nominal Operating Cell Temperature.

STC: Standard Test Conditions.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

CS: Algorithme de recherche de ”Cuckoo” (Cuckoo Search).

AC : Courant alternatif (Alternating current).

AM : Air Mass.

ANN : Réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Network).

DC : Courant continu (Direct current).

IncCond : Incr´ement de la conductance (Incremental Conductance).

GMPP : Point de Puissance Maximale Globale.

LG365N2W-B3: Module solaire LG ayant une puissance maximale de 365.156 W.

MG : Mode de Glissement (Sliding mode).

PSC : Conditions d’ombrage partiel (partial shading conditions).

PSO : Optimisation par essaim de particules (Particle swarm optimization).

PWM : Modulation de largeur d’impulsions (Pulse Width Modulation).

STC : Conditions de r´ef´erence (Standard Test Conditions).

INTRODUCTION GENERALE

Une grande partie de l'énergie consommée dans le monde repose sur les énergies fossiles comme le charbon, le gaz et le pétrole. Cependant, les ressources de ces énergies seront épuisées dans quelques dizaines d'années, de plus, leur exploitation produit des gaz toxiques qui sont nocifs pour l'environnement. Cela a engendré l'éxploitation d'autres sources d'énergie renouvelables et non polluantes. Les énergies renouvelables sont des énergies issues de ressources naturelles inépuisables telles que l'eau, la chaleur de terre, le vent, et le solaire. Dans de nombreux pays, ces énergies ont connu un développement considérable, en particulier l'énergie solaire.

La puissance générée par les systémes photovoltaïques (PV) est largement dépendante des conditions météorologiques. En effet, comme l'unité photovoltaïques a des caractéristiques non-linéaires, la puissance de sortie est considérablement affectée par les changements de rayonnement solaire, de température ambiante et de charge. Par conséquent, une technique de recherche du point de puissance maximale (PPM) destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC/DC est nécessaire pour garantir un fonctionnement optimal de la chaine PV dans différentes conditions d'éxploitation. Plusieurs travaux ont abordé le probléme de la recherche du point de fonctionnement permettant de soutirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes dites MPPT (Maximum Power Point Tracking). Les plus connues de ces méthodes sont (Perturbation et Observation (P&O), Incrément de conductance (IncCon), mode glissant, logique flou,...) [1].

Le probléme, des variations du PPM, est encore aggravé puisqu'il est, en pratique, difficile de s'assurer que tous les modules PV , composant un panneau PV , sont soumis au méme niveau de rayonnement incident, . . La multiplicité des pics de puissance impose des exigences onéreuses sur la conception du MPPT en raison de la présence de points maximum locaux en plus du point de puissance maximum global (GMPP). Les techniques classiques du MPPT, telles que IncCon et P&O n'ont pas la flexibilité de différencier les points globaux et locaux, ce qui entraîne à son tour une réduction de l'efficacité du systéme de suivi.

Au cours des derniéres années, diverses techniques modernes, qui reposent principalement sur des techniques d'optimisation, ont été explorées pour capturer le point de puissance maximale globale (GMPP). L'objectif principal de toutes ces techniques est d'augmenter l'efficacité du systéme de génération PV lorsqu'il fonctionne sous PSC en garantissant son fonctionnement au GMPP. Parmi ces techniques, on peut citer l'algorithme de recherche de "Cuckoo" (CS). Ce techniques sera étudier au cours de ce m´emoire.

au autre part l'utilisation de l'électronique de puissance dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à l'amélioration des performance et de l'efficacité de ces systèmes.ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux et ils se comportent comme les générateur de courants harmoniques. Le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupation des distributeurs d'une part et des utilisateur d'énergie électrique d'autre part donc un solution a eté proposé le FAP filtre actif parallel .

Afin de mieux présenter notre travail, ce mémoire sera organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre, on va s'intéresser à la qualité de l'énergie électrique et les différentes perturbations pouvant l'affecter. et des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour palier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.
- Dans Le deuxiéme chapitre , nous allons rappelés quelques généralités sur l'énergie et les systémes PV .
- Au cours du troisiéme chapitre, sera consacré à la modélisation et la simulation et les résultats de simulation des systémes PV en particulier le module LG365N2W-B3 qui sera utilisé tout au long de ce mémoire,et aussi on va s'intéresser la commande MPPT des systémes PV sous des conditions d'irradiation uniforme. On commence d'abord par rappeler les algorithmes classiques P&O et IncCond et l'algorithme moderne la recherche coucou et après on va faire la simulation des algorithmes P&O et Cs Finalement on pose les résultats de cette simulation.

CHAPITRE I

CHAPITRE I : Qualité de l'Energie Electrique

I.1. Introduction :

Dans le premier chapitre, nous présentons les notions sur la qualité de l'énergie électrique et les différentes perturbations pouvant l'affecter. Nous discutons des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour palier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

I.2. Qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [2]. La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- La fréquence ;
- L'amplitude ;
- Laforme d'onde qui doit être sinusoïdale ;
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs. Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :
- Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes ;
- Les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes ;
- Les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période [3].

I.3. Perturbation électrique :

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension, caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.3.1. Creux de tension :

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.). [4]

I.3.2. Coupure de tension :

Une coupure brève est une diminution de la tension pendant une courte durée qui n'excède par une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues. [4] **Figure I.1** montre un exemple d'un creux de tension triphasé entre 0.1 à 0.2 s.

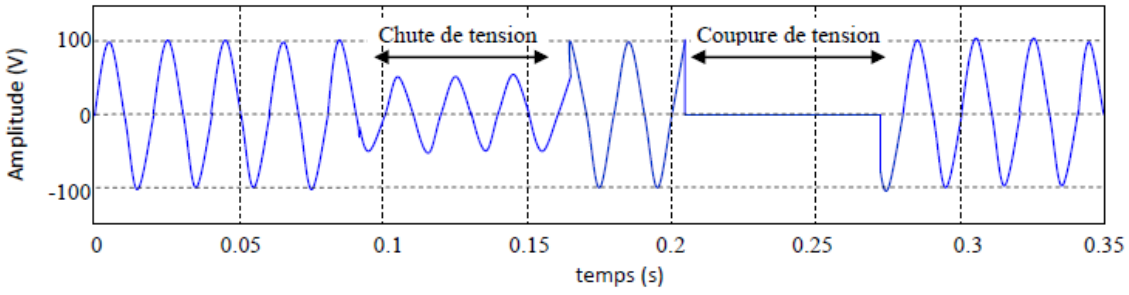


Figure I.1 : *Creux et coupure de tension.*

I.3.3. Fluctuation de tension :

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de ±10% de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière. [4] La **Figure I .2** montre un exemple d'une fluctuation de tension.

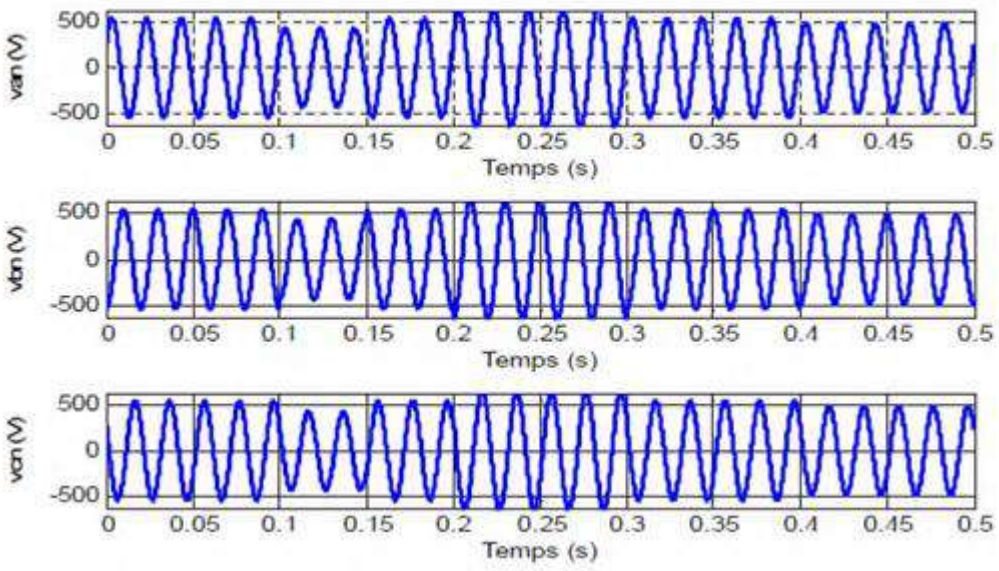
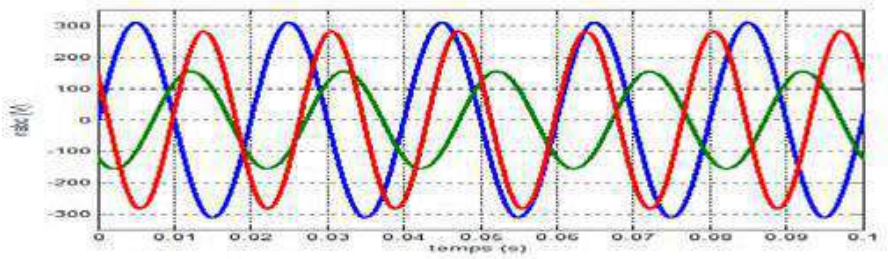


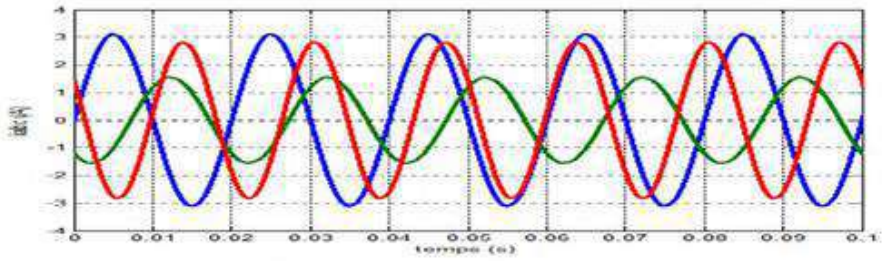
***Figure I .2**: Fluctuation de tension [5]*

I.3.4. Déséquilibre du système triphasé :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120º les unes par rapport aux autres, on parlera du déséquilibre du système triphasé. Les deux figures (a.la courbe de la tension et b.la courbe du courant) représentent respectivement, un exemple de déséquilibre de courants et de tensions d'un système triphasé.



a. la courbe de la tension



b. la courbe du couran

Figure I .3: *Déséquilibre en amplitude et en phase. [5]*

I.3.5. 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 autonome (**Figure I .4**).Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz ±1% [6].

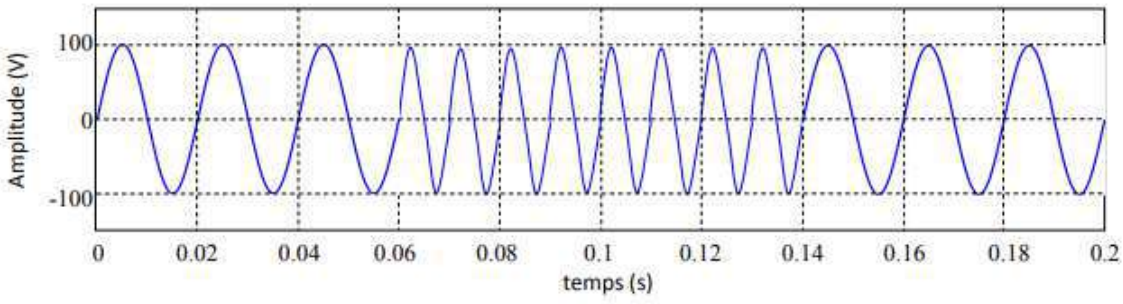


Figure I .4 *: variation de fréquence.*

I.3.6. Harmoniques et interharmoniques :

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence des réseaux. Comme montre la (***Figure I .5***).

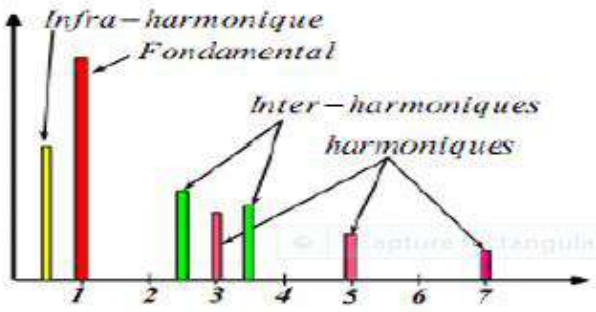


Figure I .5*: Fondamental et inter-harmoniques. [6].*

I.4. Origine des harmoniques :

Les dispositifs suivants sont des sources d'harmoniques :

- Les convertisseurs statiques à base de composants d'électronique (diodes, transistors…etc) sont générateurs de courants harmoniques [7], qui en conséquent le facteur de puissance.
- Toute fois rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Et le spectre des harmoniques est décroissant dont l'harmonique de rang 3 la prépondérante pour les charges monophasées peuvent atteindre 80 % du fondamental [8].
- L'éclairage par lampes a décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques.

- Pour les fours à arc à courant alternatif, l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Et les spectres possèdent des raies harmoniques impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). On que les fours à arc à courant continu sont généralement alimentés par l'intermédiaire d'un redresseur, l'arc est plus stable qu'en courant alternatif.
- Les inductances saturées (cas des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente) ont leurs impédances dépendantes de l'amplitude du courant qui les traverse et donc provoquent des déformations de ce courant.
- Les machines tournantes génèrent des harmoniques de rangs élevés et d'amplitudes négligeables [7].

I.5. Caractérisation des perturbations harmoniques :

Plusieurs critères sont définis pour caractériser les perturbations. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

I.5.1. Taux de distorsion harmonique :

Différents critères sont définis pour caractériser ce type de perturbation. Le THD (le Taux de Distorsion Harmonique) été acteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive. Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental [8].

$$\mathbf{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} y_n^2 + b^2}}{r_1} \qquad \mathbf{(I.1)}$$

I.5.2. Facteur de puissance :

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux.

Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, le facteur de puissance est dégradé une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) donnée par la relation est ajoutée [10].

$$\mathbf{D = 3V_1\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I^2_h}} \qquad \textbf{(I.2)}$$

Le facteur de puissance (F.P.) devient :

$$\mathbf{FP = \frac{P}{\sqrt{P^2+\rho^2+D^2}}} \qquad \textbf{\textit{(I.3)}}$$

I.6. Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Pour avoir de bonne qualité d'énergie électrique, tout d'abord, il faut remédier les signaux perturbés à cause de la charge non linéaire par des solutions proposées, les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.6.1. Solutions traditionnelles :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens, elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs)

a) Agir sur la structure de l'installation: Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur a part, afin de le séparer d ' u n récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

b) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique: On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes lies à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée.

Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation

c) Renforcement de la puissance de court-circuit: La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués
d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique: C'est une solution qui permet de repartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal reparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension.

I.6.1.1. Filtrage passif :

II représente une solution conventionnelle aux problèmes de distorsion harmonique et qui existe depuis longtemps. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductances, capacités et résistances configurés et réglés pour contrôler les harmoniques.

Les dispositifs du filtrage les plus répondus, sont le filtre passif résonnant, le filtre passif amorti et le filtre passe-haut, représentés par la ***Figure I .6***.

- Le phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à des fréquences voisines de celle de la résonance.
- La dépendance des performances du filtre passif des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté [11]

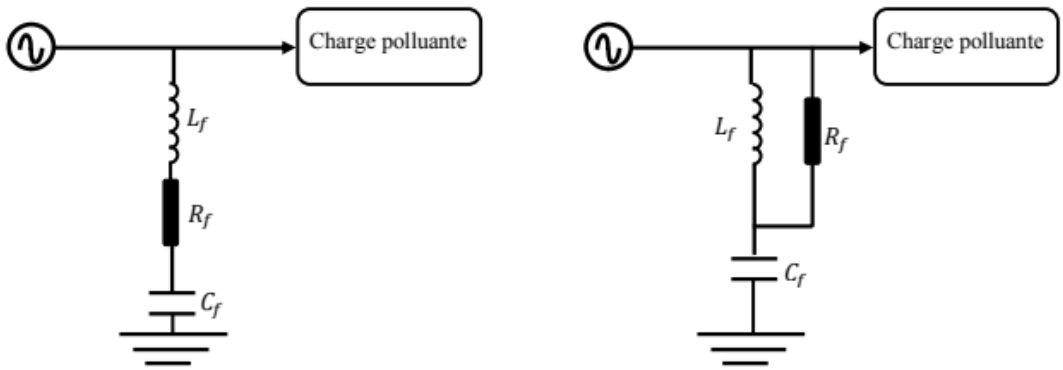


Figure I .6: *Structures de filtres passifs*

I.6.2. Solutions modernes :

Les solutions de dépollution traditionnelles ne répondent pas au changement des réseaux électriques et des charges à protéger, [12] donc des solutions modernes sont proposées. En effet, les filtres actifs s'adaptent aux évolutions du réseau électrique et de la charge. Tout en fournissant aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie, même si le fonctionnement est perturbé

I.6.2.1. Filtre actif :

Le filtrage actif date du début des années 1970 et ses familles de filtres actifs parallèles et série réalise a base d'onduleurs contrôlés en modulation de largeur d'impulsion (MLI) datent de 1976 et son la solution adaptée à la compensation des tensions [13].Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal [14].On trouve trois types de structures de filtre actif :

I.6.2.1.1. Filtre actif parallèle (F.A.P) :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant.

Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal,

cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionnent selon ce principe. [15]

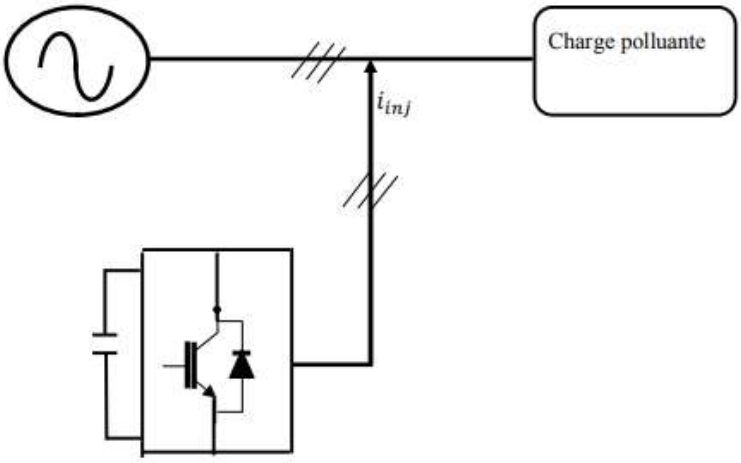


Figure I .7: *Structure du filtre actif parallèle*

I.6.2.1.2. Le filtre actif série (FAS) :

série est connecte en série sur le réseau (***Figure I .8***). Il se comporte commune source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles à des 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. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques produits par la charge.

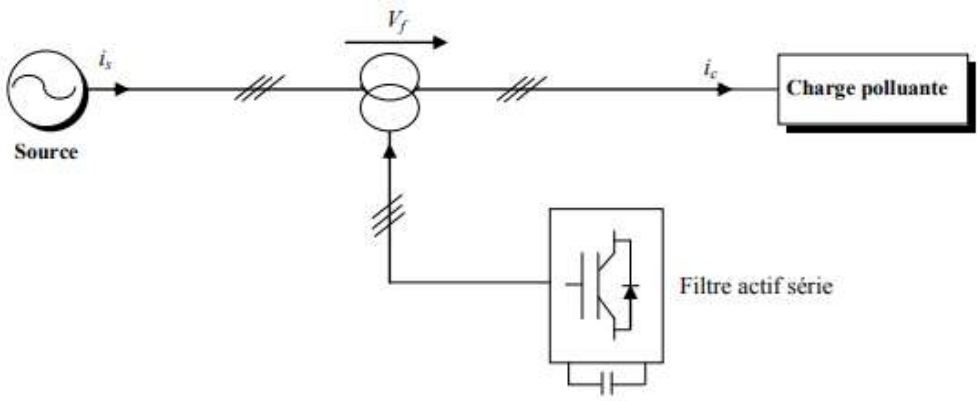


Figure I .8: *Filtre actif série.*

I.6.2.1.3. Filtre combiné parallèle-série (UPQC) :

D'après ce qui précède, ni le FAP, ni le FAS de puissance ne sont capables d'effectuer un filtrage total, donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant sans harmoniques du côté du réseau. Cet objectif peut être atteint en utilisant un conditionneur d'énergie électrique de puissance communément appelé (Unified Power Quality Conditioner : UPQC) composé de ces deux filtres actifs de puissance comme le montre la ***Figure I .9*** l'un connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge. L'UPQC permet de réaliser simultanément l'isolation harmonique, tension ou courant, entre la source et la charge et la compensation des différents types de perturbations : harmoniques de courant et de tension, creux tension, surtension et déséquilibre de tension [19], [18], [17], [16].

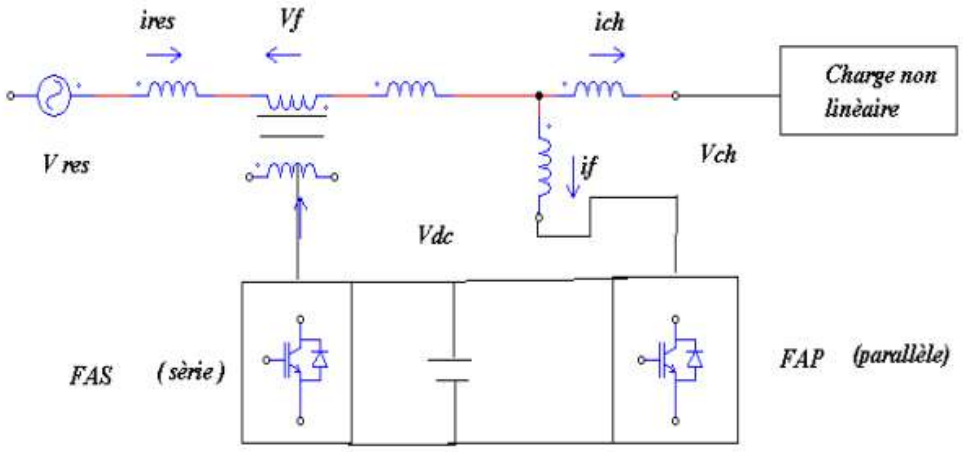


Figure I .9: *Filtre combiné parallèle-série (UPQC). [16]*

I.6.2.2. Combinaison hybride active et passive :

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- Filtre actif série connecte en série avec des filtres passifs parallèles ;
- Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.6.2.3. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

Le rôle du FAS dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la ***Figure I.10***. [20]

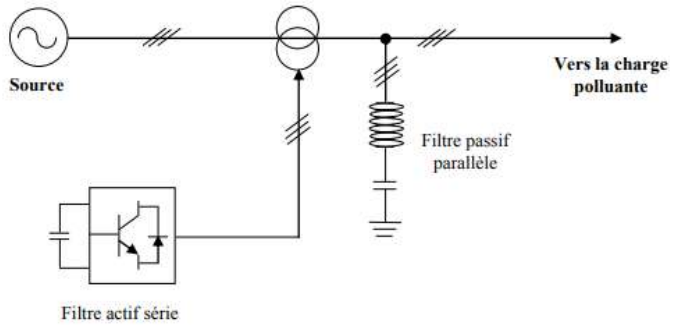


Figure I.10 : *.Filtre actif série et filtre passif parallèle.*

I.6.2.4. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Figure (***Figure I.11***) est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [21][20].

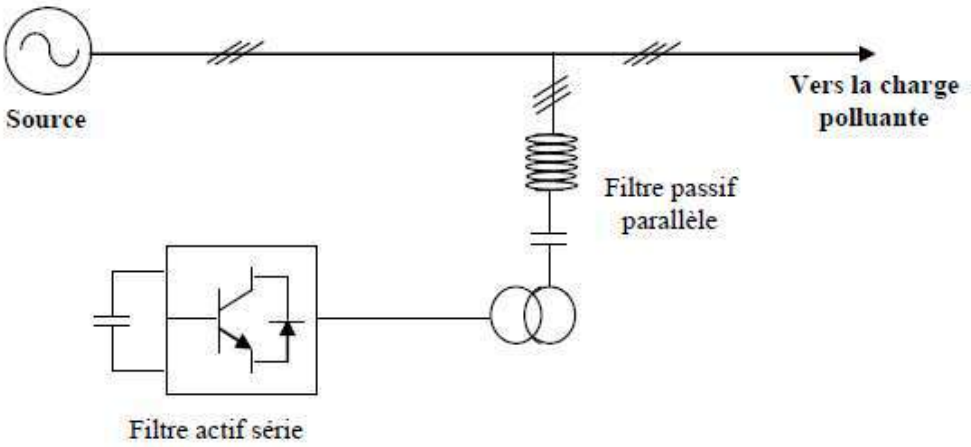


Figure I.11 : *Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.*

I.6.2.5. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en **Fig. I.12**, est la compensation de courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance [21].

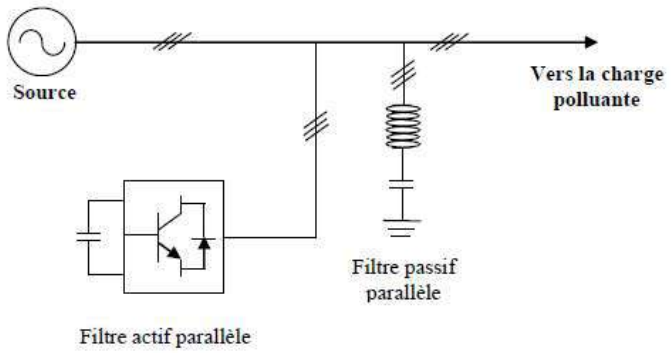


Figure I.12 : *Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle*

I.7. Algorithme du filtre coupe-bande (notch filter) :

C'est le plus simple des algorithmes de calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté Fig. II.13. Proposé en 1992 par C. A. Quinn & N. Mohan[22], cet algorithme est destiné à la fois à générer les courants de consigne d'un système à 04 fils (muni du fil du neutre) et à réguler la tension continue du filtre actif. L'opération est très aisée: il suffit de faire passer chacun des courants triphasés de charge par un filtre coupebande réglé sur la fréquence fondamentale à éliminer. En sortie, on obtient les courants harmoniques de référence de chaque fil y compris le conducteur neutre, étant la somme négative des références des trois phases. Ensuite, les tensions de source vont intervenir afin de fournir seulement la composante fondamentale du courant nécessaire à la charge. Ainsi, le courant du neutre se trouvera démuni de composantes harmoniques. Idéalement, le filtre actif n'est sensé fournir que de la puissance réactive. La valeur moyenne du courant du côté continu est donc nulle. Cependant,

les pertes dans un filtre actif non idéal peuvent engendrer la décharge de l'élément de stockage d'énergie. Ceci peut être évité en ajoutant aux courants de référence calculés, des composantes fondamentales dont l'amplitude peut être déterminée en comparant la valeur actuelle de la tension vdc par la valeur désirée vdcdésirée (**Fig. I.13**).

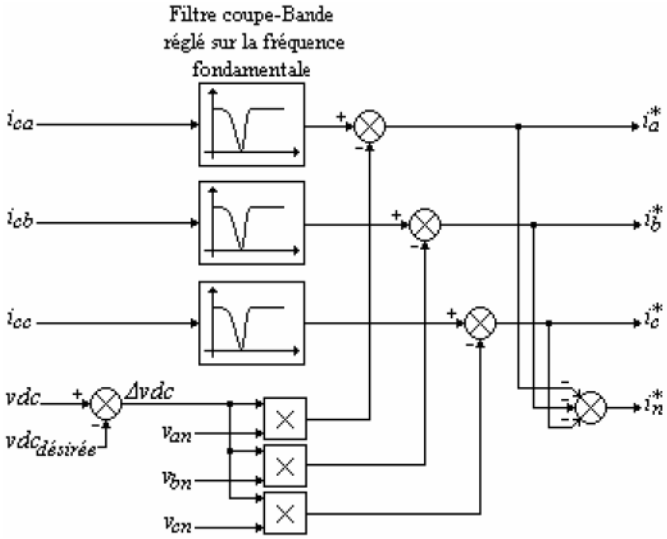


Figure :I.13 :*Génération des courants de référence par l'algorithme du filtre coupe-bande.*

I.8. Techniques de Commande :

La majorité des techniques de commande appliquées aux filtres actifs sont basées sur les stratégies MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) [23-25].

I.8.1. MLI à échantillonnage périodique :

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteur constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré **Fig. I.14**, ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type flip-flop par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.

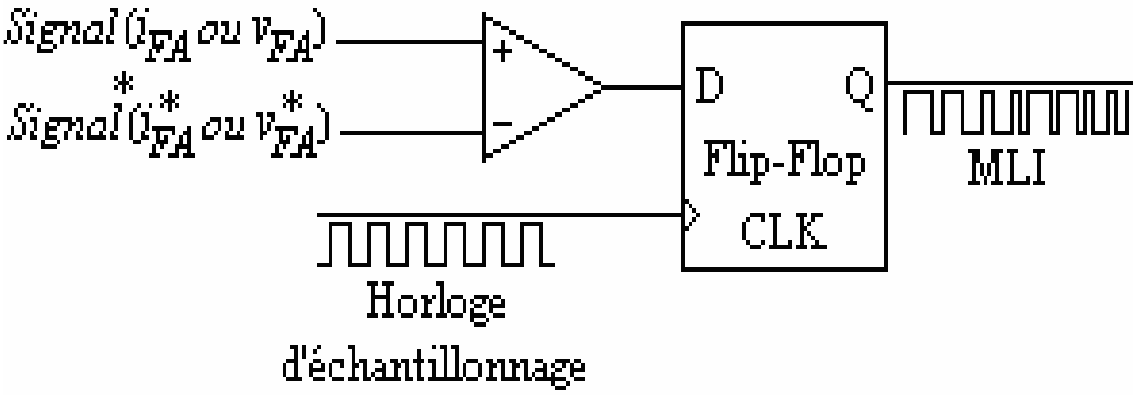


Figure : I.14 : *Modulateur MLI à échantillonnage périodique.*

I.8.2. MLI à Bande d'hystérésis :

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du filtre actif lorsque l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Comme illustré **Fig. I.15**.a, cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. Dans ce cas, la fréquence de commutation ne peut être déterminée mais plutôt estimée.

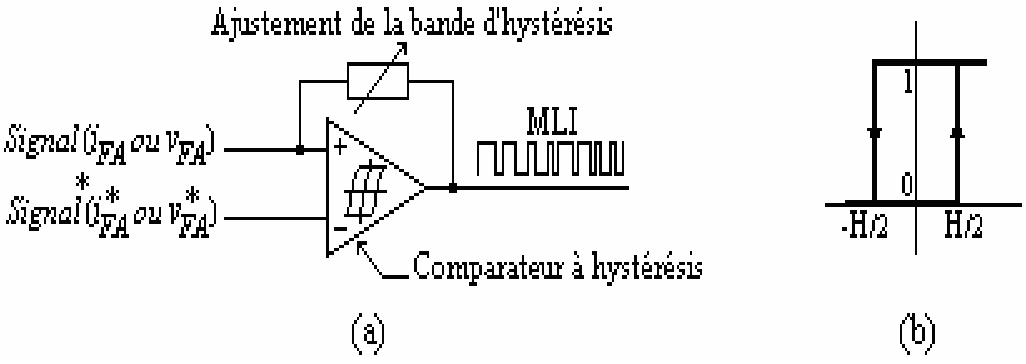


Figure : I.15 :*Modulateur MLI à bande d'hystérésis. (a). Schéma global. (b). Principe.*

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans **la Fig. I.15.b.** L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à –H/2, il se ferme si cette dernière est supérieure à +H/2, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis.

Si l'erreur est maintenant comprise entre –H/2 et +H/2 (c.-à-d. qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [24].

Par exemple, dans le cas d'un filtre actif parallèle, si l'erreur du courant généré se situe à l'intérieur de la bande, pas de réaction enregistrée de la part de la commande ; si l'erreur est trop élevée, la commande est positive et entraîne l'interrupteur à la fermeture. Par conséquent, la tension générée est supérieure ou égale à zéro, condition nécessaire pour l'accroissement du courant. Analogiquement, lorsque le courant de sortie est trop élevé, ceci incite l'interrupteur à l'ouverture, donc la tension à être inférieure ou égale à zéro et ainsi le courant à décroître.

L'interaction entre les trois phases de l'onduleur constituant le filtre actif est un inconvénient. En effet, si la commande est positive dans l'une des phases dans l'objectif d'accroître le courant, la tension s'accroît également sur cette phase, tandis qu'elle diminue dans les deux autres phases. Ceci peut être préjudiciable pour le contrôle du courant sur les deux autres phases.

La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, puisque les comparateurs à hystérésis ont une inertie et un retard négligeables.

I.8.3. MLI à porteuse triangulaire :

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, montrée dans la **Fig. I.16**, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur Proportionnel-Intégral PI avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire. En réalité, cette technique est un peu plus complexe que les deux précédentes. En effet, ce sont les deux coefficients kp et ki du correcteur PI qui permettent de déterminer la réponse transitoire et l'erreur du régime permanent de cette méthode à porteuse triangulaire. Il a été empiriquement montré que les kp et ki calculés par les équations (I.4) et (I.5) donnent une bonne performance dynamique indifféremment sous des conditions transitoires ou permanentes [28].

$$k_P = \frac{L.\omega_c}{2Vdc} \qquad (I.4)$$

$$k_i = \omega_c . k_P \qquad (I.5)$$

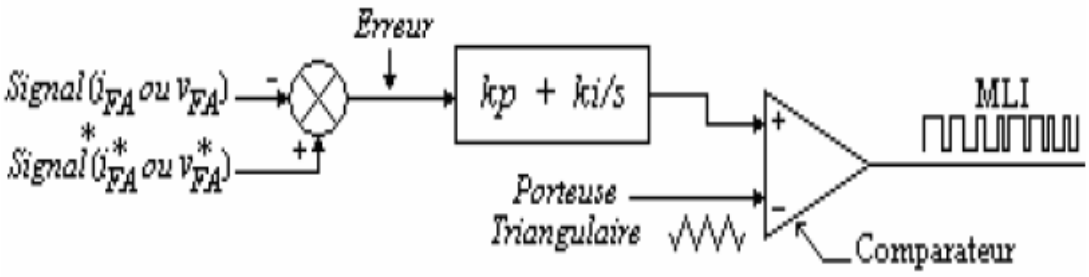


Figure :I.16 : *Modulateur MLI à porteuse triangulaire.*

Avec: L, inductance totale série vue par le filtre actif ; ω_c, fréquence de la porteusen triangulaire ayant une amplitude de 1V crête à crête, et Vdc est la valeur moyenne de la tension du bus continu du filtre actif.

I.8.4. Technique de la commande vectorielle :

I.8.4.1. Cas d'un onduleur de tension deux niveaux :

I.8.4.1.1. Modélisation de l'onduleur :

A. Structure générale :

En cas de présence d'un point milieu [26], la structure générale d'un onduleur de tension deux niveaux est représentée **Fig. I.17**. L'onduleur triphasé de tension deux niveaux est constitué de 02 interrupteurs par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées,

ou des GTO pour lestrès grandes puissances et fréquences faibles $[25-27]$[1].Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode.

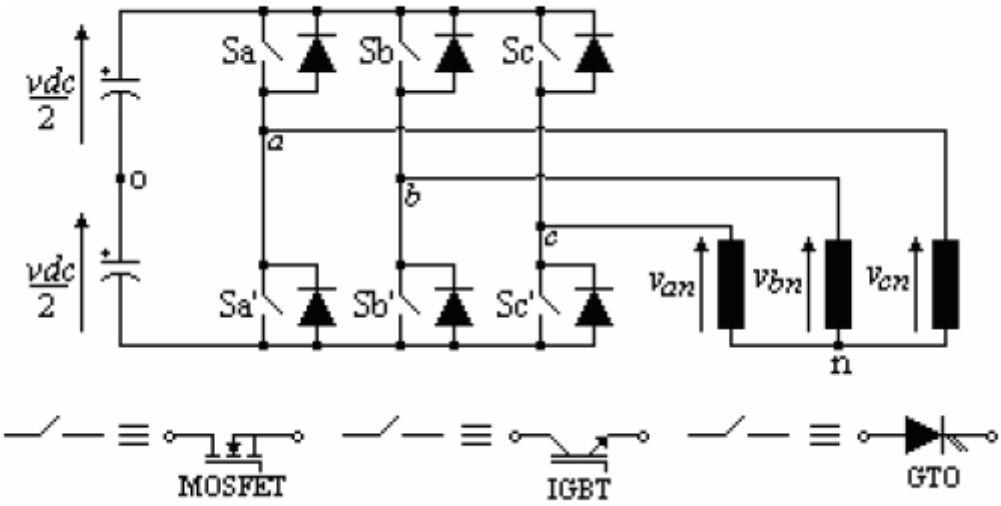


Figure : I.17 : *Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.*

➢ Expression des tensions de sortie :

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions **(–vdc/2)** Et **(+vdc/2),** en fonction des états des interrupteurs comme expliqué dans le **Tableau I.1.**

- **Tableau. I.1**

Obtention des deux niveaux de tension en fonction des etats des interrupteurs :

C_i	Si	Si'	v_{io}
-1	0	1	-vdc/2
1	1	0	+vdc/2

[1] Voir l'annexe B pour une brève description des différents semi-conducteur de puissance totalementcommandables.

i, indicateur de phase tel que i = a, b, c, Ci est la variable d'état de l'interrupteur prenant comme valeurs -1 ou 1, vio est la tension prise entre phase et point milieu o. La tension vio est obtenue en appliquant la formule suivante:

$$v_{io}=C_i.\frac{vdc}{2} \qquad (I.6)$$

Maintenant, si on considère tous les interrupteurs, toutes les phases (3), et tous les états possibles (2), on obtient 23 combinaisons lesquelles sont présentées dans le **Tableau I.2**. Les tensions entre phases sont données par:

$$\begin{aligned} v_{ab}&=v_{ao}-v_{bo} \\ v_{ab}&=v_{bo}-v_{co} \\ v_{ab}&=v_{co}-v_{ao} \end{aligned} \qquad (I.7)$$

- **Tableau. I.2**

Obtention des deux niveaux de tension pour toutes les combinations possibles :

N°	C_a	C_b	C_c	Sa	Sa'	Sb	Sb'	Sc	Sc'	v_{ao}	v_{bo}	V_{co}
1	-1	-1	-1	0	1	0	1	0	1	-vdc/2	-vdc/2	-vdc/2
2	-1	-1	1	0	1	0	1	1	0	-vdc/2	-vdc/2	vdc/2
3	-1	1	-1	0	1	1	0	0	1	-vdc/2	vdc/2	-vdc/2
4	-1	1	1	0	1	1	0	1	0	-vdc/2	vdc/2	vdc/2
5	1	-1	-1	1	0	0	1	0	1	vdc/2	-vdc/2	-vdc/2
6	1	-1	1	1	0	0	1	1	0	vdc/2	-vdc/2	vdc/2
7	1	1	-1	1	0	1	0	0	1	vdc/2	vdc/2	-vdc/2
8	1	1	1	1	0	1	0	1	0	vdc/2	vdc/2	vdc/2

Si le système est équilibré, on a une somme nulle des tensions phase-neutre:

$$v_{an+}v_{bn+}v_{cn}=0 \qquad \textbf{(I.8)}$$

Alors, les tensions phase-neutre seront données, en fonction des tensions entre phases, par:

$$\begin{aligned} v_{an} &= (1/3).(v_{ab}-v_{ca}) \\ v_{bn} &= (1/3).(v_{bc}-v_{ab}) \\ v_{cn} &= (1/3).(v_{ca}-v_{bc}) \end{aligned} \qquad \textbf{(I.9)}$$

Et en fonction des tensions phase-point milieu, on a:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(I.10)}$$

En remplaçant les tensions **vio** par leurs valeurs définies dans l'équation (**I.6**), on aboutit à:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} . \frac{vdc}{2} \qquad \textbf{(I.11)}$$

Et dans le plan α–β, on aura:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \cdot \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(I.12)}$$

Avec, C32 la matrice de Concordia définie par la formule (I.2). Les coordonnées α–β du vecteur v de la formule **(I.12)**, considérant toutes les combinaisons possibles, sont inscrites dans le **Tableau I.3**.

- **Tableau. I.3 :**

Coordonnees *α–β des* vecteurs de sortie de l'onduleur deux niveaux.

v_{ao}	v_{bo}	v_{vo}	v_α/vdc	v_β/vdc	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}	v_α/vdc	v_β/vdc	
-vdc/2	-vdc/2	-vdc/2	0	0	0	0	0	0	0	$\vec{v}_0$
-vdc/2	-vdc/2	vdc/2	-0.408	-0.707	- vdc/3	- vdc/3	2.vdc/3	-0.408	-0.707	$\vec{v}_5$
-vdc/2	vdc/2	-vdc/2	-0.408	0.707	- vdc/3	2.vdc/3	- vdc/3	-0.408	0.707	$\vec{v}_3$
-vdc/2	vdc/2	vdc/2	-0.816	0	-2.vdc/3	vdc/3	vdc/3	-0.816	0	$\vec{v}_4$
vdc/2	-vdc/2	-vdc/2	0.816	0	2.vdc/3	- vdc/3	- vdc/3	0.816	0	$\vec{v}_1$
vdc/2	-vdc/2	vdc/2	0.408	-0.707	vdc/3	-2.vdc/3	vdc/3	0.408	-0.707	$\vec{v}_6$
vdc/2	vdc/2	-vdc/2	0.408	0.707	vdc/3	vdc/3	- 2.vdc/3	0.408	0.707	$\vec{v}_2$
vdc/2	vdc/2	vdc/2	0	0	0	0	0	0	0	$\vec{v}_7$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème. Les filtres passifs sont souvent pénalisés en termes d'encombrement et de résonance. Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtre actif série et parallèle ,et présenté l'algorithme du filtre coupe-bande (notch filter) et les différentes type de commndes MLI . Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. Le chapitre suivant, fera l'objet d'une étude d'un filtre actif parallèle.

CHAPITRE II

CHAPITRE II:GENERALITE SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

II.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [29]. Cette figure représente le principe de fonctionnement :

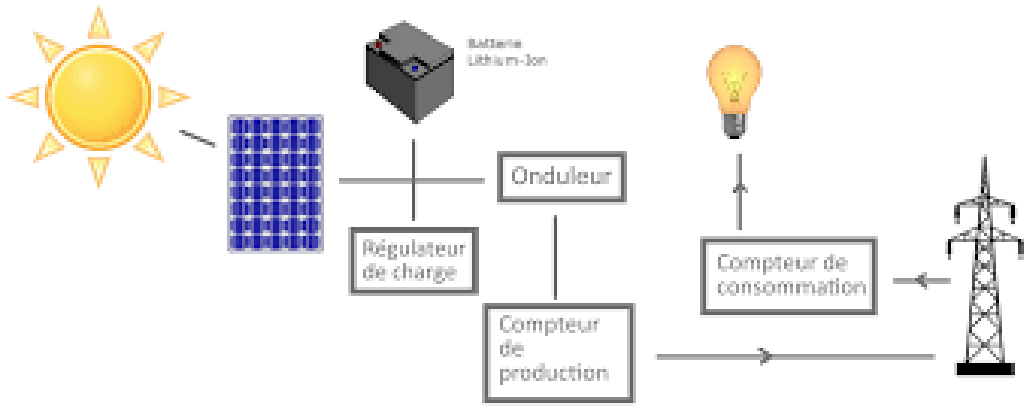


Figure II .1: *Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.*

II.2. L'énergie solaire photovoltaïque :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés: L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité. L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [30].

II.2.1. Les rayonnement solaires :

Le rayonnement solaire Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K,

il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de0,22 à 10 m et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets (<0 ,4um)
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8um)
- 44% dans la bande des infrarouges (> 0,8um)

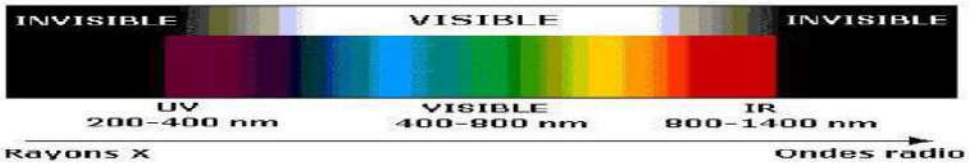


Figure II.2 : *Les bandes de longueur d'onde [31]*

II.2.2. Type de rayonnement solaire:

Etant absorbe et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifié du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements :

- **Le rayonnement direct :** Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.
- **Le rayonnement diffus** : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- **Le rayonnement réfléchi (albédo**) : Radiation solaire incidente réfléchie par une surface

Le rayonnement global est :la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi comme illustrer dans la figure si dessous :

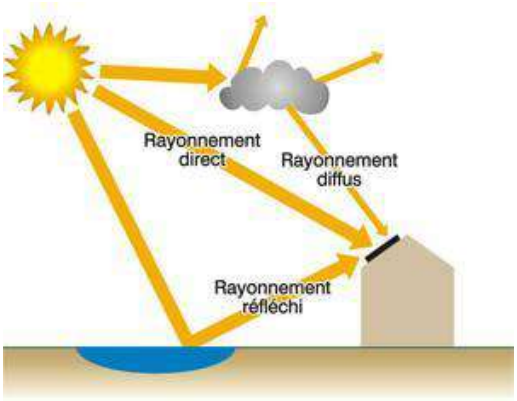


Figure II.3 : *Composantes du rayonnement solaire au sol.*

II.3. Historique de la cellule photovoltaïque :

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui noté 7 : 1839 : Le physicien français [Edmond becquerel] découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. c'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner von siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie [30].

II.4. Cellule photovoltaïque :

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite, les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants. [33]

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (AsGa), Tellurure de cadmium (CdTe). [34]

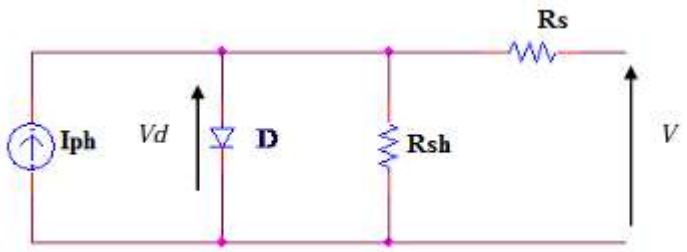


***Figure II.4** : Schéma équivalent électrique de la cellule PV*

En appliquant la loi des nœuds, on trouve :

$$I=I_{Ph}-I_O\left(exp\left(\frac{e(V+I.R_S)}{\alpha.KT}\right)-1\right)-\frac{V+I.R_S}{R_{sh}} \qquad (II.1)$$

α : Facteur d'idéalité de la diode et La valeur typique de α est 1.3

T : est la température de la cellule en K ,

e : est la charge de l'électron e =1.61010^{-19} C

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

La figure ***Figure II.5*** montre la caractéristique courant-tension d'une cellule PV à une température fixée et à une certaine ambiante irradiation Ga.

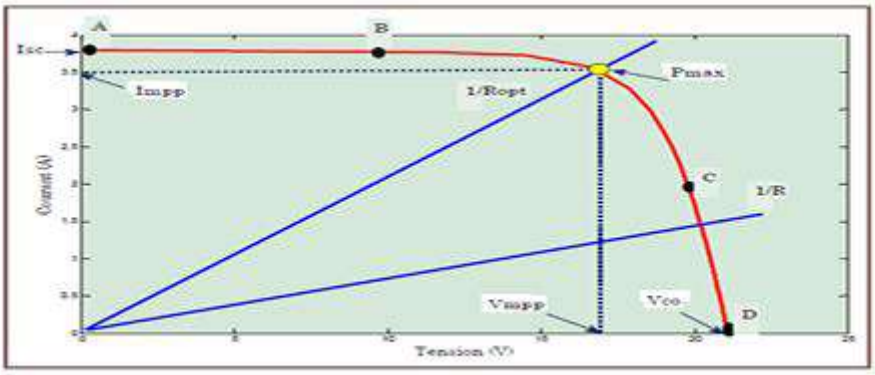


Figure II.5 *: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque.*

II.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement a base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P).

Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [35].

Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité [35]. Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré dans la figure (***II.6***): ent une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watt sous approximativement 0,5 v.

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. 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 bypass, 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.

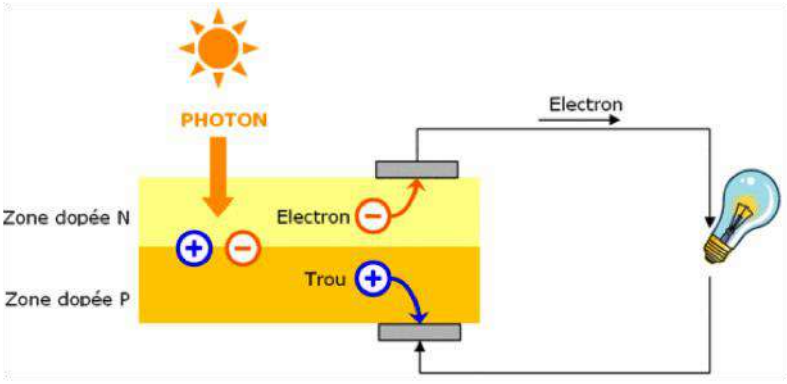


Figure II.6 : *Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.*

II.4.2. Les usages de la cellule photovoltaïque :

Assemblées entre elles, les cellules photovoltaïques forment un panneau solaire qui génère une puissance combinée. Cette dernière permet de créer de l'électricité et d'alimenter différents appareils ou installations électriques. Les usages de la cellule solaire sont multiples. En effet, la cellule photovoltaïque peut par exemple fournir en électricité :

- Une habitation, lorsque l'installation est domestique
- Le réseau public d'électricité, dans le cas des centrales solaires thermiques
- Les satellites envoyés dans l'espace
- Les bateaux solaires, avions solaires et autres véhicules alimentés grâce à des cellules

Photovoltaïques

II.4.3. Composition de la cellule solaire :

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque.

Celui-ci permet au matériau de cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives.

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu.

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

la couche active ou l'absorbeur constituée d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;

les contacts métalliques avant et arrièreconstituant les électrodes positive (+) et négative (–) chargées de collecter le courant généré ;

des couches supplémentaires comme un anti-reflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau etc.

Ainsi, ce qui différencie une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur. De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (anti-reflet, électrodes...) ainsi que son architecture globale : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes etc [36]

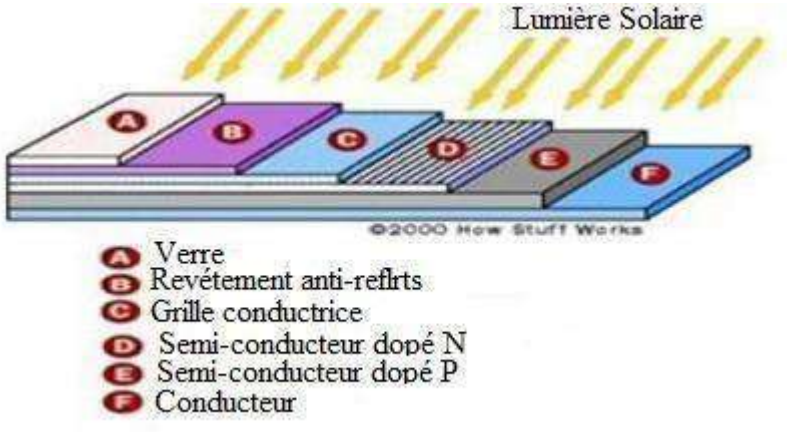


Figure II.7 : *Structure d'une cellule photovoltaïque.*

II.5. Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques :

II.5.1. Cellule en silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Avantages :

- ✓ Bon rendement (environ 100 Wc/m²)
- ✓ Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- ✓ Moins cher que le monocristallin
- ✓ Ces cellules ont pour l'instant le meilleur rapport qualité / prix

Inconvénients :

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement

Rendement module commercial : 11 à 15%
Rendement record en laboratoire : environ 20%



Figure II.8 : *Cellule en silicium polycristallin* **.**

II.5.2. Cellule en silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Avantages :

- ✓ Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²)
- ✓ Durée de vie importante (+/- 30 ans)

Inconvénients :

- ✓ Plus cher que le polycristallin
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement
- ✓ Coût plus élevé que le polycristallin

Rendement module commercial : 12 à 20%

Rendement record en laboratoire : environ 25%



Figure II.9 : *Cellule en silicium monocristallin*

II.5.3. Cellule silicium amorphe en couche mince :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

Avantages :

- ✓ Fonctionnent avec un éclairement faible
- ✓ Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- ✓ Moins sensible aux températures élevées
- ✓ Souple

Inconvénients :

- ✓ Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
- ✓ Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

Rendement faible : 5 à 9%

Rendement record en laboratoire : environ 13,4%

Ces cellules à faible rendement peuvent fonctionner en intérieur, elles sont principalement utilisées pour des applications à faible puissance (ex : calculatrice).

II.5.4. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS :

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

Avantages :

- ✓ Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- ✓ La cellule peut être construite sur un substrat flexible.

Inconvénients :

- ✓ Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses"

Rendement module commercial : 9 à 11%
Rendement record en laboratoire : environ 19,3%

Suite aux investissements massifs dans les cellules "traditionnelles" (silicium) au début des années 2000 qui a entraîné une baisse importante des coûts de fabrication, les cellules sans silicium en couche mince ont perdu leur avantage concurentiel.



Figure II.10 : *Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS*

II.5.5. Cellule multijonction :

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

Avantages:

- ✓ Rendement
- ✓ Inégalé

Inconvénients :

- ✓ Pas ou peu d'applications commerciales

Rendement record en laboratoire : environ 40% (sous une concentration de 240 soleils)

Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable



Figure II.11 : *Cellule multijonction*

II.6. Générateur photovoltaïque(GPV) :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un champ photovoltaïque. Relié au récepteur sans autres éléments, le panneau solaire fonctionne au fil du soleil, c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et est nulle la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation).

On équipe alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. [37]

II.6.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. [38]

II.6.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (***II.2***) résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de Np cellules. La figure (***II.12***) montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de Np cellules en parallèle. [39]

$$I_{PCC}=N_P*I_{CC} \quad et \quad V_{PCO}=V_{CO} \qquad (II.2)$$

Avec :

- I_{CC} :Courant de court circuit

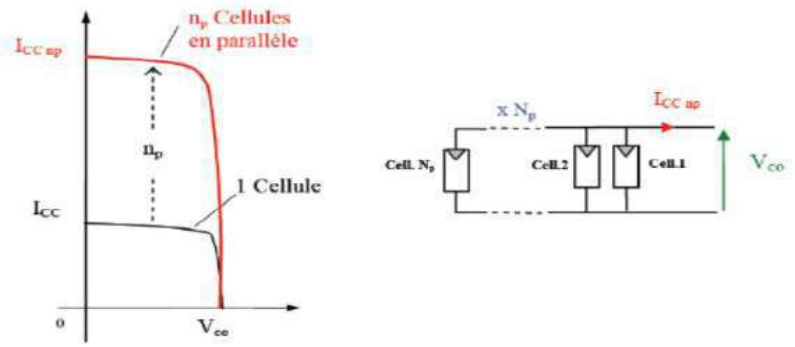


Figure II.12*: Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.*

II.6.3. Association des Cellules Photovoltaïques en Série :

D'autre part un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires. L'équation (***II*.3**) résume les caractéristiques électriques d'une association série de Ns cellules. La figure (***II.13***) montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de Np cellules en série. [40]

$$I_{PCC}=I_{PCO} \qquad et \qquad V_{SCO}=N_S * V_{CO} \qquad (II.3)$$

Avec :

- V_{CO}:La tension du circuit ouvert

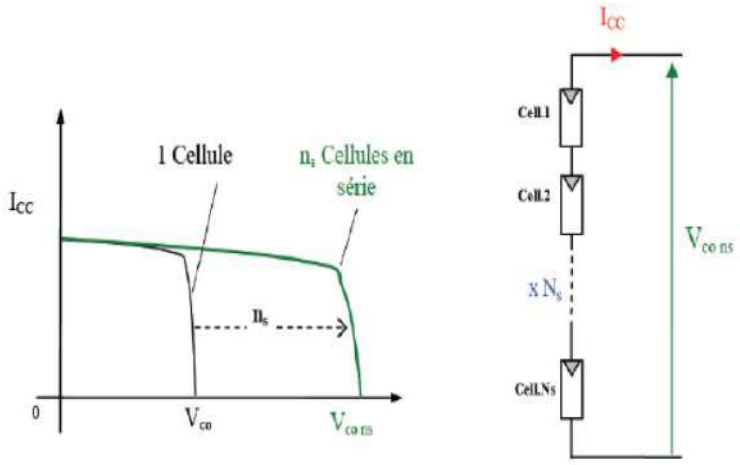


Figure II.13 : *Association des Cellules Photovoltaïques en Série.*

II.7. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque :

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire,

résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV à savoir : Modèle à une diode (ou exponentielle simple), Modèle à deux diodes (ou double exponentielle). Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

II.7.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extrait de caractéristique courant-tension :

- **Tension en circuit ouvert Vco :**

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

- **Courant de court circuit Icc :**

En court circuit V=0 : D'où $$Icc = Iph \qquad (II.4)$$

- **Point du fonctionnement Pm (Vm,Im) :**

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$Pm = Vm * Im \qquad (II.5)$$

Elle traduit sur la caractéristique

le point du fonctionnement Pm (Vm , Im) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension Vm et du courant Im appelées également tension et courant maximums respectivement [36].

II.8. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance,

plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou unpanneauphotovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [41].

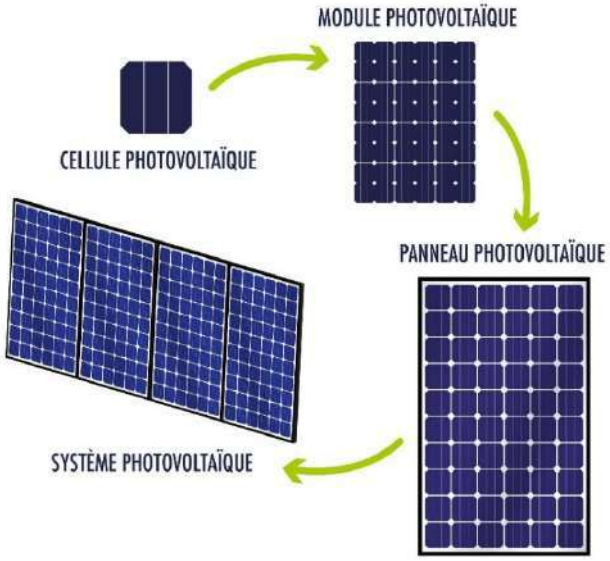


Figure II.14 : *composition de panneaux photovoltaïques* .

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [39].

II.8.1.Les principales caractéristiques d'un module :

II.8.1.1. Puissance crête :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m² et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . En France l'éclairement maximum reçu, la puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir.

II.8.1.2. Facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule Pmax (Iopt,Vopt) et le produit du courant de court-circuit Icc par la tension de circuit-ouvert Vco (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites Rs et Rsh.

Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{cc}\,V_{co}} = \frac{I_{opt}\;V_{opt}}{I_{cc}\;\;V_{co}} \qquad (II.6)$$

II.8.1.3. Rendement η :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule Pmax(Iopt,Vopt) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \qquad (II.7)$$

Avec est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.9. Panneau solaire :

Panneau solaire Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [42]

II.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- **Avantage :**

✓ L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

✓ La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.

✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, vu la petite taille des installations et leur fonctionnement silencieux.

✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.

✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée directement chez l'utilisateur.

✓ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques.

✓ La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans. [43]

- **Inconvénients :**

✓ Le coût très élevé des investissements.

✓ Faible rendement de conversion.

✓ Dans le cas d'une installation photovoltaïques autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans lequel les inconvénients pourraient se multiplier, notamment du côté des coûts de fabrication. [43]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, rayonnements solaire et ses caractéristiques, ainsi la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. En plus nous avons étudié le fonctionnement d'une cellule PV et en déduire son modèle mathématique. Nous avons aussi cité les différents types de cellule PV ainsi que les modes de montage ce qui conduit au module PV, l'association de ce denier permet de réaliser un panneau PV.

CHAPITRE III

III.1. Introduction :

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP. Cette simulation digitale sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et identifier en détail les pertes à travers le système.

Ce chapitre, à pour but l'étude modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté a un hacheur survolteur « boost» avec une commande MPPT numérique « perturbation et observation et cuckoo search». Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB 2021B.

III .2. L'outil Matlab / Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur. Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [44]

III.3. Modélisation du système photovoltaïque :

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule,

une résistance série Rs représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle RP caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

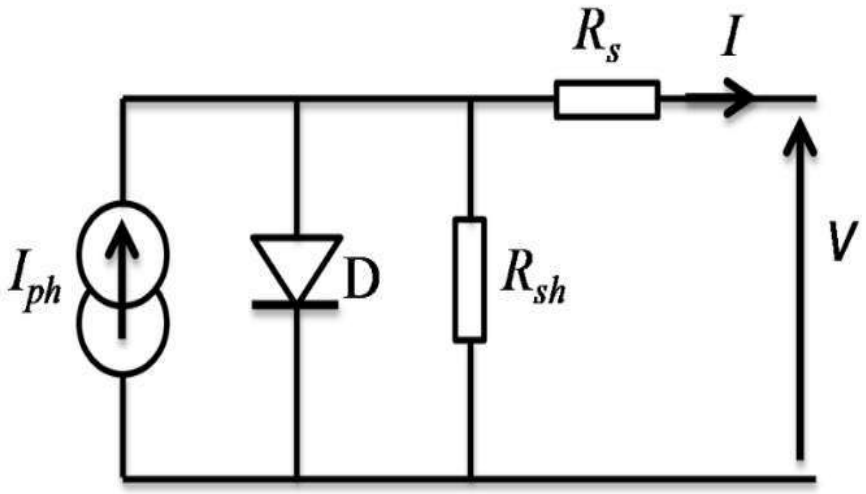


Figure III.1: *Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.*

III.4. Caractérisation du module PV :

Dans ce travail, 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. Ce ci 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.Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **(LG365N2W-B3)** en conditions de test standards sont représentées sur le tableau **(III.1).**

***Tableau (III.1)** : Caractéristiques électriques du module PV LG365N2W-B3 en condition de test standard .*

Grandeurs	Valeur
Eclairement standard, E. Température standard, T. Puissance crête maximale, Pm. Tension optimale, Vopt. Courant optimale, Iopt. Tension de circuit ouvert, Vco. Courant de court-circuit, Icc	1000 w/m^2 25° C 365.156 W 38.6 V 9.46 A 48.4 V 9.89 A

III.5. Simulation du module PV :

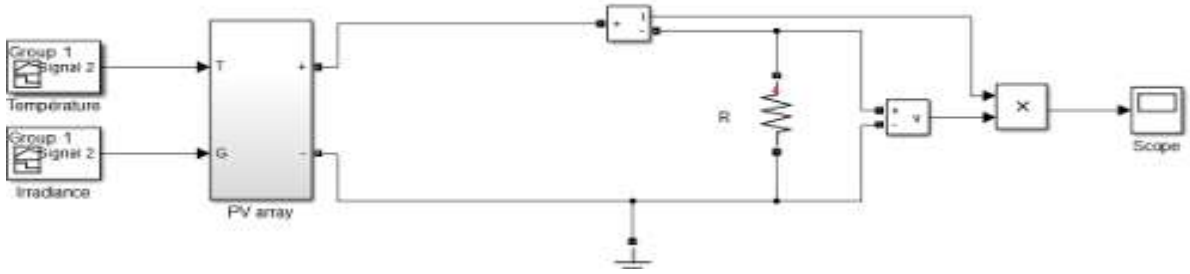


***Figure III.2:** schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.*

Caractéristique (Ipv = f(Vpv)) :

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

III.6. Electronique de puissance et la conversion électrique :

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques [45].

III.7. Convertisseurs électriques :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pourl'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tensionalternative.L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupartdes nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [46].La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pourl'adapter à nous besoin il y a deux sorte de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC).

III.8. Exigences de l'utilisateur :

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double: d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe: fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit. Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [47] :

- délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé;
- posséder un rendement élevé;
- présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau;
- posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc);
- ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique);
- être la plus petite et la plus légère possible;
- et bien entendu être de préférence peu coûteuse…

III.9. Les Hacheurs :

L'hacheur est un convertisseur continu\continu permettant de convertir une énergie à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [48] Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques. [49]

III.9.1. Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer: des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant. des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension. Cela conduit à L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs). hacheur abaisseur (ou buck). hacheur élévateur (ou boost). [50]

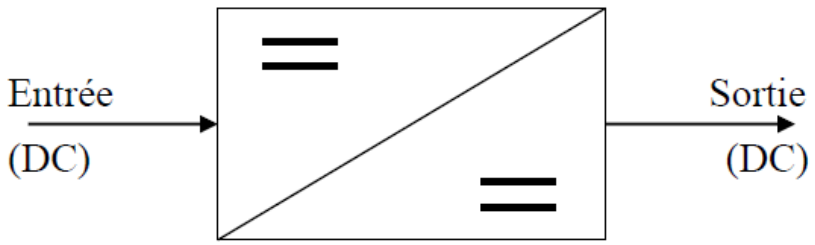


Figure III.3: *Symbole d'un convertisseur (DC-DC)*

III.9.1.1. Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (III.4) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [50].

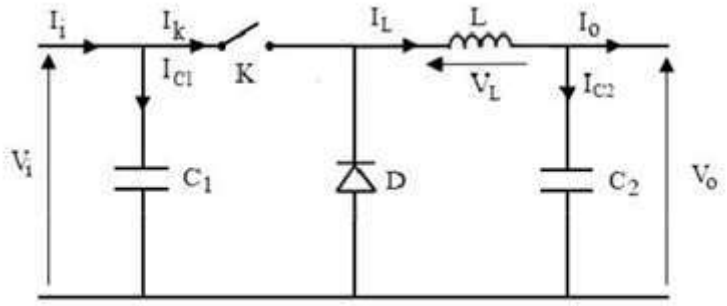


Figure III.4: *Schéma électrique d'un hacheur buck.*

- **Fonctionnement :**

On note **α** : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e :la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e, la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i . L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $fe = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [41].Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (fig.III.5) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro.

Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [49].

$$V_{0=\alpha V_i} \qquad \textbf{(III.1)}$$

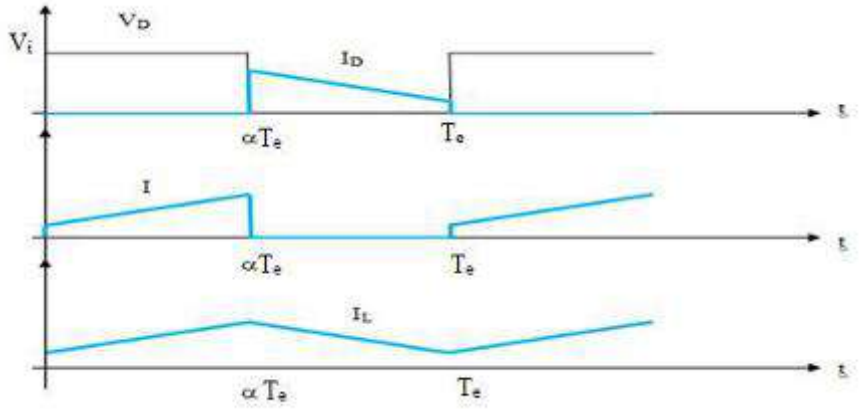


Figure III.5: *Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck*

III.9.1.1.1. Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure ***(III.6)*** montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure *(III.7)* représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha)T_e$ [50].

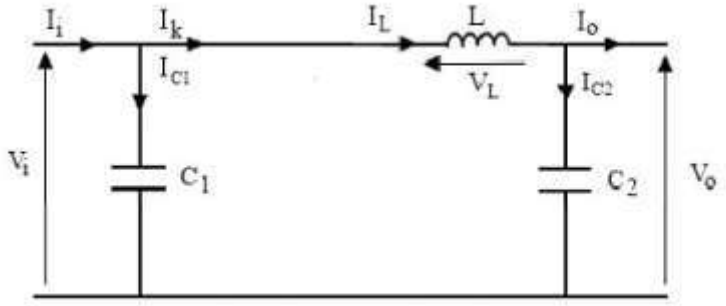


Figure III.6: *Schéma électrique d'un hacheur buck fermé*

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$
$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = I_L(t) - I_O(t) \qquad (III.2)$$
$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_O(t)$$

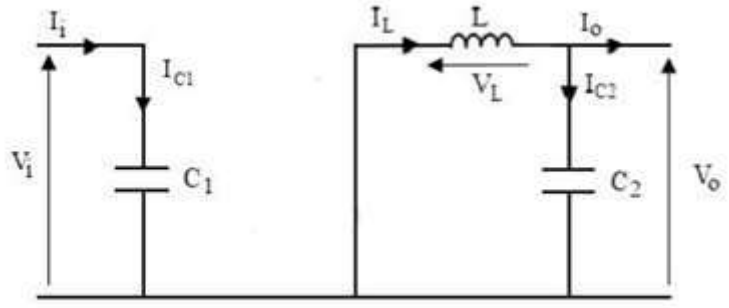


Figure III.7: *Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert*

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t)$$
$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = I_L(t) - I_O(t) \qquad (III.3)$$
$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_O(t)(t)$$

III.9.1.2. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [49]. Connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (**III.**8). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [51].

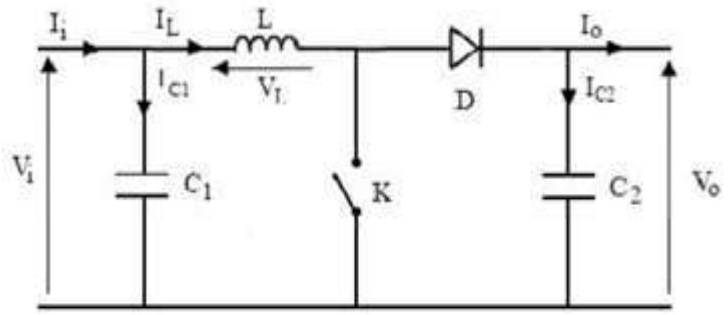


Figure III.8: *Schéma électrique d'un hacheur boost.*

- **Fonctionnement :**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [50]

$$V_0(1-\alpha) = V_i \qquad (III.4)$$

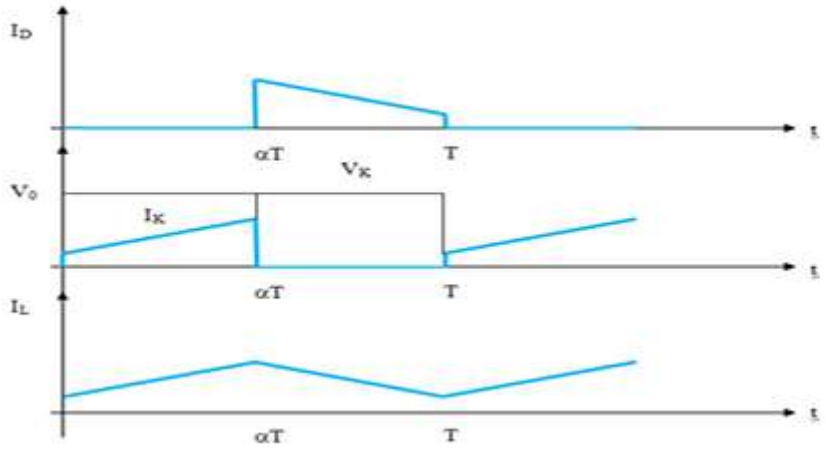


Figure III.9: *Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.*

III.9.1.2.1. Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre,il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (**III.**10) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d d'entre$[0, \alpha T_e]$ [50].

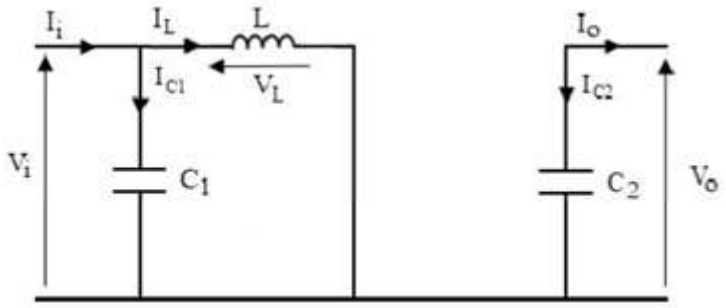


Figure III.10: *Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.*

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calcules suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = -I_O(t) \qquad (III.5)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

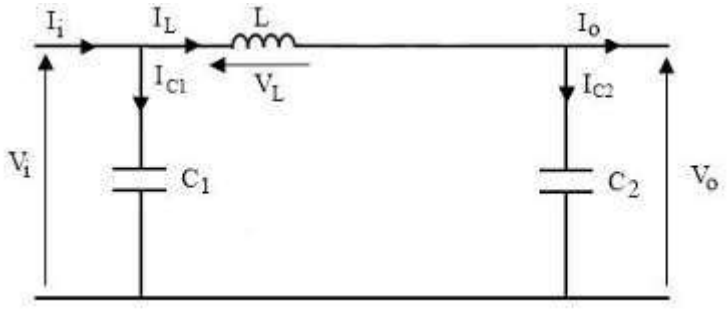


Figure III.11: *Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.*

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$
$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = I_L(t) - I_O(t) \qquad (III.6)$$
$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_O(t)$$

III .10. La MPPT (Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque ou « max power point tracker ») :

Lorsque le rayonnement solaire ou la température changent, le point de puissance Maximale se déplace sur le plan I − V. La technique de contrôle MPPT consiste a Agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC de manière automatique pour Amener le GPV a sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient l'instabilité est Météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir (variation de l'ensoleillement, de température ou de charge).

Généralement, les algorithmes MPPT sont class´es en deux catégories :

- **Algorithmes classiques :**

Comme "Incrément des conductances (IncCon)" et "Perturbation et l'observation (P&O)". Ces techniques sont faciles `a mettre en œuvre en raison de leur moindre complexité dans l'algorithme. Ils sont efficaces pour des conditions d'irradiation uniformes car le PV ne générera qu'un seul MP P dans ces conditions. Ces algorithmes seront rappel´es dans la suite de ce chapitre.

- **Algorithmes intelligents :**

Basés sur l'optimisation, ils incluent l'algorithme de recherche de coucou (CSA), Optimisation par essaim de particules (P SO) et des autres algorithmes meta heuristiques. Ces méthodes peuvent rechercher le vrai P PM dans des conditions d'environnement dynamiques avec ombrage partiel, o`u le module P V possédera plusieurs pics dans la courbe P − V. Ca fera l'objet du dernier chapitre. [52]

III .10.1. Principe de la MPPT :

Par définition, une commande MPPT connectée à un étage d'adaptation intermédiaire peut faire fonctionner le générateur PV pour produire en permanence une puissance maximale.

Ainsi, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximal quelles que soient les conditions météorologiques (température et luminosité). (Vmpp, Impp). [52].L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (**III.**12)

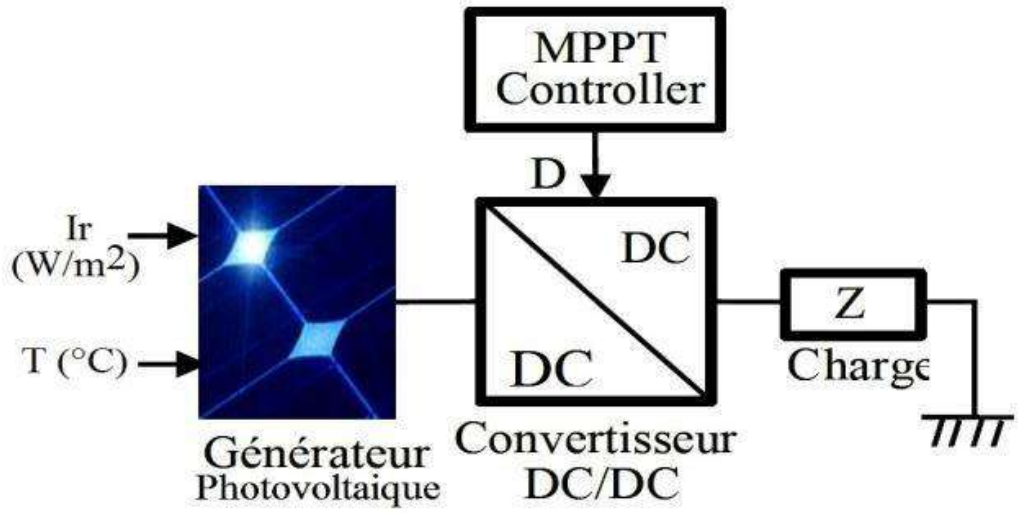


Figure III.12: *system photovoltaïque avec MPPT.*

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment. La figure **III.13** illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b),

on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure,

un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (casc). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande,

cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [53]

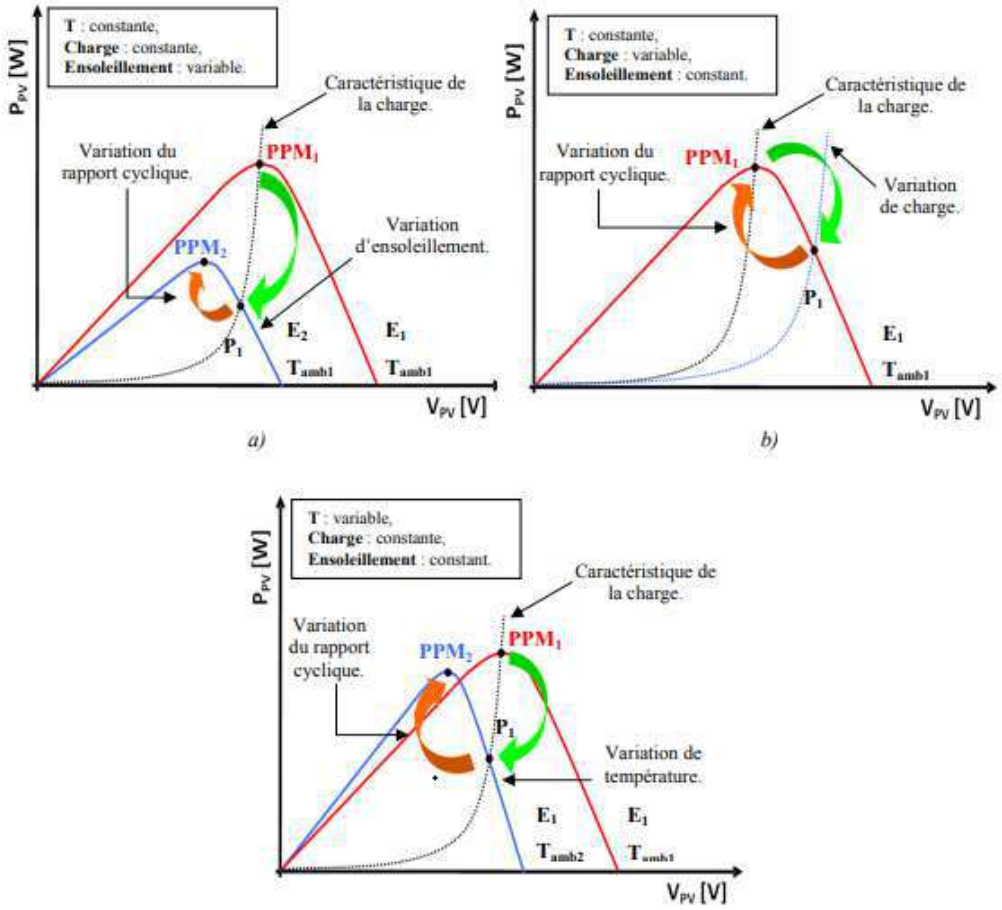


Figure III.13: *Recherche et recouvrement du point maximal de puissance.*

III .10.2. Algorithmes de la commande MPPT :

Dans la littérature, il existe plusieurs types d'algorithmes qui effectuent des recherches PPM, notamment avec le développement de ces recherches et des efforts consacrés à cette commande. Dans notre travail, Nous nous limitons à la méthode de recherche perturbation et observation (P&O), qui est très simple à mettre en œuvre et performante. et l'incrément de conductance (INC) et la méthode méta heuristique pour soyons exacte la méthode de recherche coucou (cuckoo search) .

III.11. Principe de la commande ‘’Perturbation et Observation’’ (P&O) :

La méthode P&O et IC est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilite de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque.

Sur la figure**(III.14)** on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente (P 0), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue (P), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM.

L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante. Cet algorithme est résumé sur la figure **(III.14)**et l'organigramme descriptif est donné par la figure(III.15). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteinte. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [54]

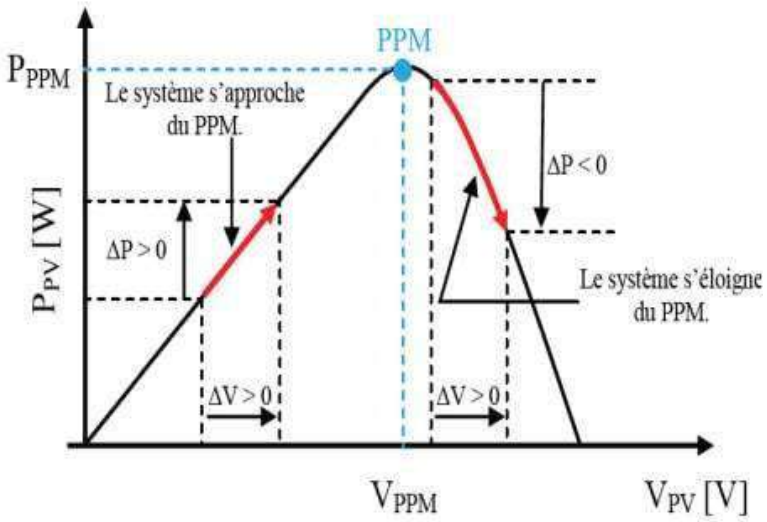


Figure III.14: *Signe de ΔV et ΔP à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.*

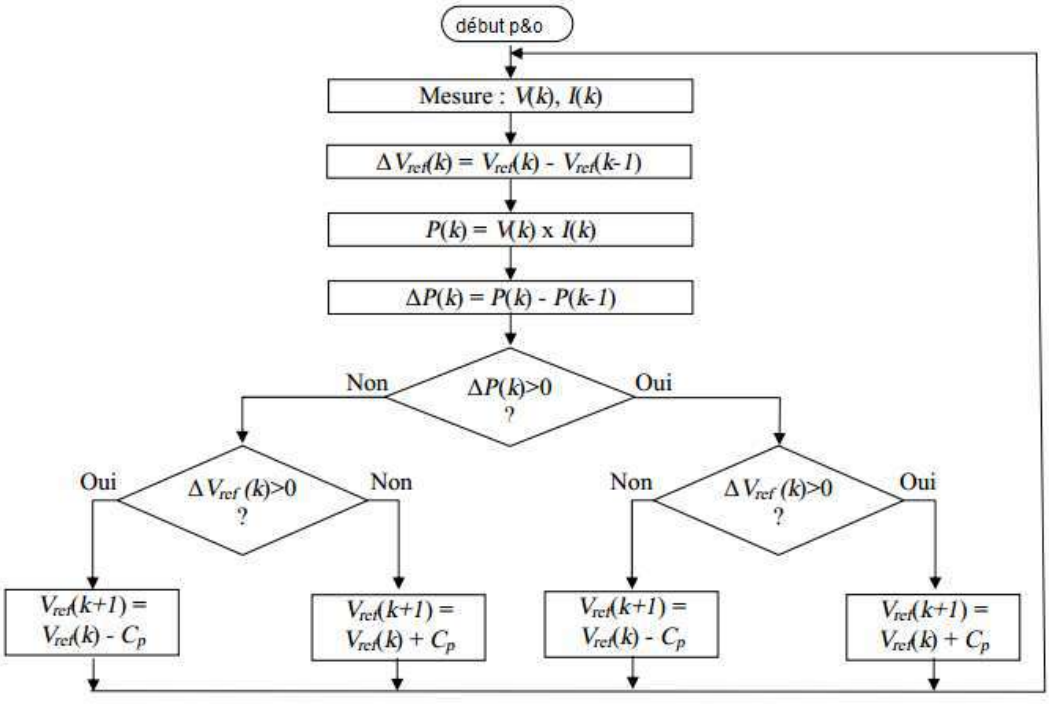


Figure III.15: *Organigramme de la méthode P&O [55]*

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque menu de la commande MPPT du type P&O,

nous allons simuler le fonctionnement de l'ensemble (panneau-hacheur charge et MPPT) avec une température du milieu et un éclairement constant.

III.12. Principe de la commande l'incrément de conductance (IC) :

L'algorithme de l'incrémentation de conductance (IC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour la mesure de la tension V de fonctionnement et du courant I du module PV. Cette méthode repose sur le fait que la dérivée de la puissance P de sortie par Rapport à la tension V du module PV est égale à zéro au point de puissance maximale. [56],[57]

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(VI)}{dV} = I\,\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\,\frac{dI}{dV} \qquad (III.7)$$

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} \qquad (III.8)$$

Selon l'algorithme IC, la fonction centrale utilise les conditions suivantes afin d'atteindre le MPP :

$$\begin{aligned} &\frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} \quad pour \quad V = V_{mp} \\ &\frac{dI}{dV} > -\frac{1}{V} \quad pour \quad V < V_{mp} \\ &\frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V} \quad pour \quad V > V_{mp} \end{aligned} \qquad (III.9)$$

$\mathbf{V_{mp}}$: La tension correspondant au MPP.

Si l'équation (***III.9***) est vérifiée, donc le système PV a atteint le MPP et aucun changement de la tension de fonctionnement n'est nécessaire, sinon la tension de fonctionnement est modifiée en conséquence.

C_p : Le pas de la correction.

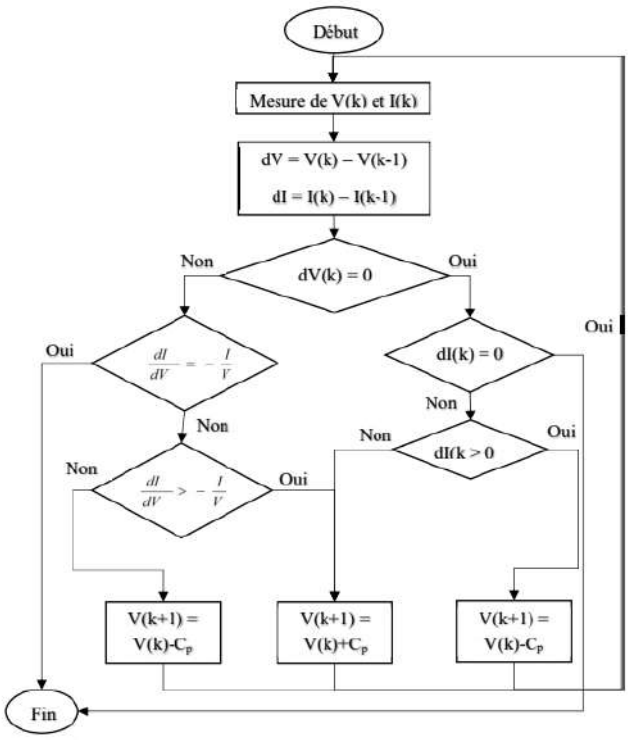


Figure III.16: *Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance.*

III.13. Les métaheuristiques:

L'algorithme méta heuristique est un technique d'optimisation qui conviennent parfaitement pour résoudre les problèmes logistiques. Il existe un grand nombre d'algorithmes méta heuristiques différentes parmi elles les méthodes individuelles et les méthodes basées sur la population Les techniques individuelles visent à se déplacer dans l'espace de recherche en s'appuyant sur un système de quartier qui permet aux gens de construire un ensemble de solutions voisines à partir d'une solution actuelle. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation individuelles comme la recherche locale, recuit simulé, algorithme kangourou , recherche local itérées recherche Tabou L'objectif des méthodes basées sur la population est d'initier une interaction entre les individus qui forment une population afin de générer de nouvelles solutions. Il existe plusieurs méthodes basées sur la population comme les algorithmes évolutifs l'algorithme de la colonisation des fourmis et l'optimisation des essaims de particules [58].

- **Méta :** Du la langue grec ancien (**μετά**)**,** qui signifie (« au-delà, après »). C'est-à-dire : « tout ce qui suit, ce qui change, ce qui participe de ». Et même, au figuré : « ce qui dépasse, englobe.
- **Heuristique :** aussi de la langue grec (**εὑρίσκω**) qui signifie (« trouver ») ou aussi comme un nom commun c'est l'art d'inventer, de faire des découvertes**.**

III.14. Les algorithmes à base d'intelligence essaim :

En intelligence artificielle (IA), l'intelligence en essaim fait référence à cette intelligence collective des sociétés d'animaux. Elle a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, ce type d'algorithme se repose entre autres sur un modèle permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'individus (oiseaux, insectes…). Cette méthode d'optimisation s'appuie sur la collaboration des individus entre eux. Cette idée veut qu'un groupe d'individu peu intelligent puisse posséder une organisation globale complexe. De même, grâce à des règles de déplacement très simples dans l'espace des solutions, les parties peuvent converger progressivement vers un minimum local. Cette algorithme méta heuristique donne l'aspect de mieux fonctionné pour des espaces en variables continues. Au départ de l'algorithme, chaque partie est donc positionnée aléatoirement ou non dans l'espace de recherche du problème. Chaque itération fait bouger les parties en fonction de trois composantes : sa meilleure solution, sa vitesse de déplacement ainsi que la meilleure solution obtenue dans son voisinage. [59]

III .15. La recherche coucou (CS):

III .15.1. OISEAU DE COUCOU :

Les coucous sont des oiseaux éblouissants de taille moyenne, non seulement en raison de leurs beaux sons, mais aussi en raison de leurs stratégies de reproduction agressives, comme les coucous femelles pondant un ou plusieurs œufs dans leurs nids, d'autres oiseaux, précédemment observés. Ils peuvent prendre des œufs d'autres pour augmenter la probabilité d'éclosion des œufs, l'objectif étant d'assurer la transmission à la génération suivante en soumettant l'oiseau hôte à son instinct naturel d'éclosion.

Pour augmenter la probabilité d'avoir un nouveau coucou, la femelle gobe un œuf dans le nid parasite, avant d'y pondre le sien. Certaines espèces hôtes peuvent avoir un conflit avec le coucou intrus.

Quand des oiseaux hôtes découvrent la présence d'œuf ne leur appartenant pas, grâce à une aire de peau sensible et dénudée qu'ils ont alors sous le ventre, soit ils s'en débarrassent, soit ils abandonnent le nid en construisant un nouveau ailleurs. Certains types de coucous comme le Tapera a développé la capacité d'imiter les œufs d'un ensemble d'hôtes en couleur et en forme. [60]



Figure III.17: *Oiseau de coucou.*

III .15.2. Principaux composants de recherche coucou (CS) :

- **Nid :**

Dans la recherche coucou, les nids ont les caractéristiques suivantes :

- Nombre de nids fixés
- Un nid est un individu dans une population.
- Le nombre de nids est égal à la taille de la population.
- Les tanières abandonnées consistent à remplacer des individus de la population par Nouveau.
- Un œuf dans le nid représente une solution.

Par conséquent, nous pouvons conclure de ces caractéristiques que pour notre problème A partir de l'optimisation combinatoire, le nid est représenté comme un individu dans la population sa propre solution.

- **Œufs :**

Les coucous peuvent pondre un œuf dans un nid et laisser l'œuf.

Les propriétés suivantes :

- Les œufs au nid sont la solution adoptée par l'individu population.
- (Cuckoo's Egg) est une nouvelle solution candidate pour une place a la population.

III .15.3. Fonction objectif :

La fonction objective (de test, fitness) est une fonction qui, à chaque solution dans L'espace de recherche associe une valeur numérique pour décrire sa qualité ou fitness. Donc la qualité ou fitness d'une solution est proportionnelle à la valeur de la fonction Objectif. Dans notre problème, un nid de meilleure qualité d'œuf nous mènera vers les nouvelles générations. Ce qui veut dire que la qualité d'un œuf de Coucou est directement liée à sa capacité de donner un nouveau Coucou. [61]

III .15.4. La vole de Lévy :

Dans la nature, la recherche des animaux pour la nourriture est d'une manière aléatoire ou quasi-aléatoire. En général, le chemin de recherche de nourriture d'un animal est véritablement une marche aléatoire car le prochain mouvement est basé sur la localisation (état actuel), et la probabilité de transition au prochain emplacement.

Quelle direction il choisit dépend implicitement sur une probabilité qui peut être modélisée mathématiquement, diverses études ont montré que le comportement vol de nombreux animaux et insectes a démontré les caractéristiques typiques des vols LEVY. Le terme « Lévy Flight » a été inventé par Benoît Mandelbrot, qui a utilisé cela pour une définition précise de la distribution des tailles de pas. Le Lévy flight, est une marche aléatoire dans laquelle les étapes sont définies en fonction des longueurs des pas, qui ont une certaine distribution de probabilité, avec les directions des étapes étant isotrope et aléatoire. Au cours de leurs trajectoires en air mort,

les mouches des fruits (Drosophila melanogaster) explorent leur paysage à l'aide d'une série de voies de vol droites ponctuées par des saccades rapides à 90°. Certaines saccades sont déclenchées par une expansion visuelle associée à l'évitement des collisions. Pourtant, de nombreuses saccades ne sont pas déclenchées par des repères visuels, mais plutôt apparaissent spontanément conduisant au style irrégulier du vol LEVY. [62]

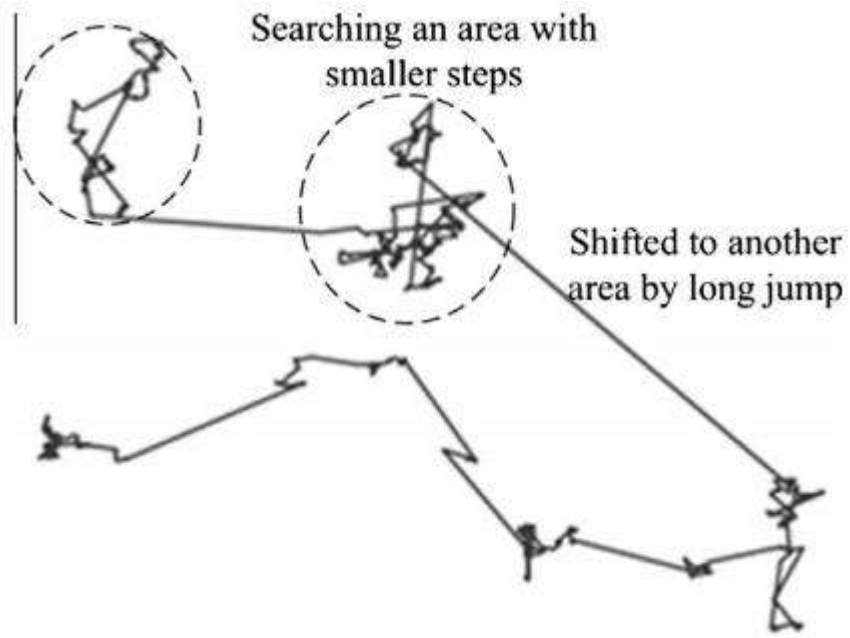


Figure III.18: *plan dimensionnel pour la vole de Lévy.*

III .16. Le comportement d'oiseau coucou :

Cet algorithme imite le comportement de l'espèce Coucou qui est un oiseau parasite qui place ses œufs dans le nid d'un autre oiseau nid qui n'est pas une espèce de coucou. Si l'oiseau parent trouve un œuf qui ne vient pas de lui-même, alors l'oiseau parent jettera le œuf parasite ou construire un nouveau nid ailleurs. Quand le Coucou grandit avec succès il cherchera un autre nid comme lieu pour ses œufs. Le processus se répète jusqu'à ce que tout le coucou ait réunis dans un nid d'oiseau. Généralement il y a trois types de parasites parents sont vus

- interspécifiques,
- coopératifs
- prise en charge de Nids.

Certaines espèces de coucous, comme le coucou dépouillé (Tapera naevia) est assez intelligent pour imiter la forme et la couleur d'un œuf de oiseau hôte pour augmenter sa probabilité de reproduction. Après l'éclosion initiale, le Coucou détruit plusieurs œufs de l'oiseau hôte pour augmenter les chances que l'enfant coucou reçoive plus de nourriture. Également un phénomène est tellement courant que l'oiseau hôte trouve l'œuf d'oiseau parasite et le détruit. Parfois, ils quittent leur nid complètement et aller ailleurs pour construire un nouveau nid.

III .16.1. Description de l'algorithme CS :

Pour plus de clarté dans la description de l'algorithme recherche coucou, trois règles idéalisées sont utilisées :

- Chaque coucou pond un œuf à la fois, et les déverse dans un nid choisi au hasard
- Les meilleurs nids de haute qualité des œufs (solutions) seront reportés aux prochaines générations
- Le nombre de nids disponibles d'accueil est fixe, et un hôte peut découvrir un œuf étranger avec une probabilité pad ∈ [0, 1]. Dans ce cas, l'oiseau hôte peut soit lancer l'œuf loin ou abandonner le nid afin de construire un nouveau nid dans un nouvel emplacement. Par souci de simplicité, cette dernière hypothèse peut être approchée par une fraction Pa des n nids étant remplacés par de nouveaux nids (avec de nouvelles solutions aléatoires à de nouveaux emplacements), dans ce travail nous avons utilisé Pa=25% de la taille de la population.

Pour un problème de maximisation, la qualité ou la fonction fitness d'une solution peut tout simplement être proportionnel à la fonction objective. [62]

III .16.2. La MPPT avec l'algorithme recherche coucou :

Pour utiliser CS pour concevoir la MPPT, les variables appropriées doivent être sélectionné pour la recherche. Tout d'abord, les échantillons ; dans ce cas, ils sont définis comme les valeurs des tensions PV, c'est-à-dire Vi (i = 1, 2 . . . n). Le nombre total d'échantillons est défini comme n. La deuxième est la taille du pas, notée a. La fonction de fitness (J) est la valeur de la puissance PV à député. Puisque J dépend de la tension PV, donc J = f(V).

Initialement, les échantillons générés sont appliqués aux modules PV et la puissance est définie comme la valeur de fitness initiale. Le maximum de puissance fournie par sa tension correspondante est considéré comme le meilleur échantillon actuel. Par la suite la vole de Lévy est effectuée ; Par conséquent, de nouveaux échantillons de tension sont générés sur la base des éléments suivants :

$$x_i^{(t+1)} = x_i^t + \alpha \oplus Levy(\lambda) \qquad (III.13)$$

$$\gamma = \gamma_0 (x_{best}^k - x_i^k). \qquad (III.14)$$

$$S = \gamma_0 (x_j^t - x_i^t) \oplus \text{levy}(\lambda) \approx K \times \left(\frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}\right)(x_{best}^k - x_i^k) \qquad (III.15)$$

Tandis que Ou β = 1.5, k est le coefficient multiplicateur de Lévy (choisi par le concepteur) u et v sont déterminés à partir des plans de distribution nominal.vbn,

$$v \approx N(0, \sigma_v^2) \qquad (III.16)$$

$$u \approx N(0, \sigma_u^2) \qquad (III.17)$$

Si Γ désigne la fonction gamma intégrale, alors la variable $\sigma_u$et σ_v sont définis comme

$$\sigma_u = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\pi \times \frac{\beta}{2})}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times (2)^{\frac{\beta-1}{2}}}\right) \qquad (III.18)$$

et $\sigma_v = 1$

La puissance respective des nouveaux échantillons de tension est mesurée des les modules photovoltaïques. En comparant les valeurs de puissance, la puissance maximale donnée par la tension est sélectionnée comme un nouveau meilleur échantillon. Outre ce meilleur échantillon, d'autres sont détruits au hasard avec une probabilité de Pa- un tel processus émule le comportement de l'hôte oiseau découvrant les œufs du coucou puis les détruisant. Alors de nouveaux échantillons aléatoires sont générés pour remplacer ceux détruits.En conséquence, les puissances de tous les échantillons sont à nouveau mesurées et le meilleur

courant est sélectionné en évaluant J. L'itération continue Jusqu'à ce que tous les échantillons aient atteint le MPP.

III .17. Le mécanisme de recherche MPP :

Pour trouver la courbe P-V entière, l'échantillon initial doit être répartir sur toute la plage de tension. Le nombre d'échantillons (n) est très important. Un "n" plus grand augmente L'efficacité de la recherche ce qui augmente les chances de converger vers valeur correcte mais nécessite un temps de convergence plus long. Dans le cas de Problèmes MPPT, des simulations poussées montrent que n =3 est un bon compromis et donc utilisé tout au long de cette recherche

Le mécanisme de recherche des CS sous uniforme rayonnement (normal) est illustré à la Figure suivent. Ici, les trois échantillons sont représentés par les variables X (vert),Y (rouge) et Z (jaune) L'exposant de rang supérieur de la variable indique le nombre de numéros d'itération. Pour la première itération, Y0 est situé le plus près du MPP. Par conséquent, considéré comme le meilleur évalué. Ainsi, X0 et Z0 sont obligés de se déplacer vers Y0 car Le mouvement de l'échantillon dépend de la différence de chemin entre le meilleur échantillon et l'autre échantillon De plus, à cause de Lévy Flight. Cependant, Il doit être a noté que la nature aléatoire de CS fait varier la taille du pas à chaque itération. Au fur et à mesure que la particule se rapproche du MPP, le pas la taille devient plus petite, comme déterminé par l'équation précédente.

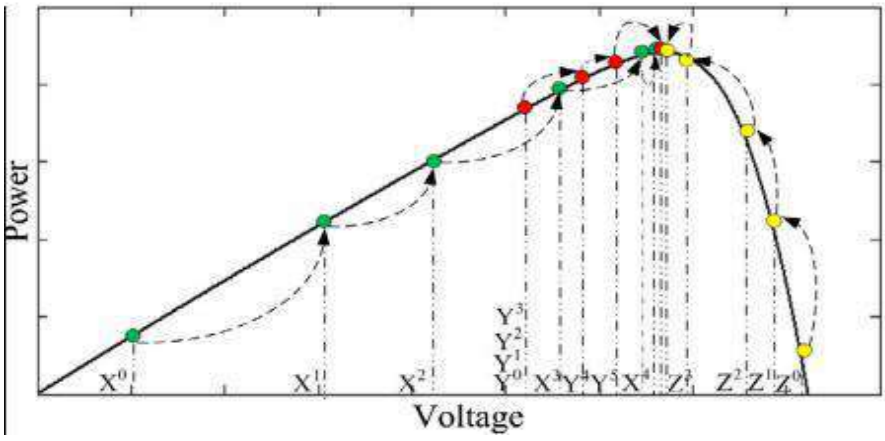


Figure III.19: *Le mécanisme de recherche MPP recherche coucou. [63]*

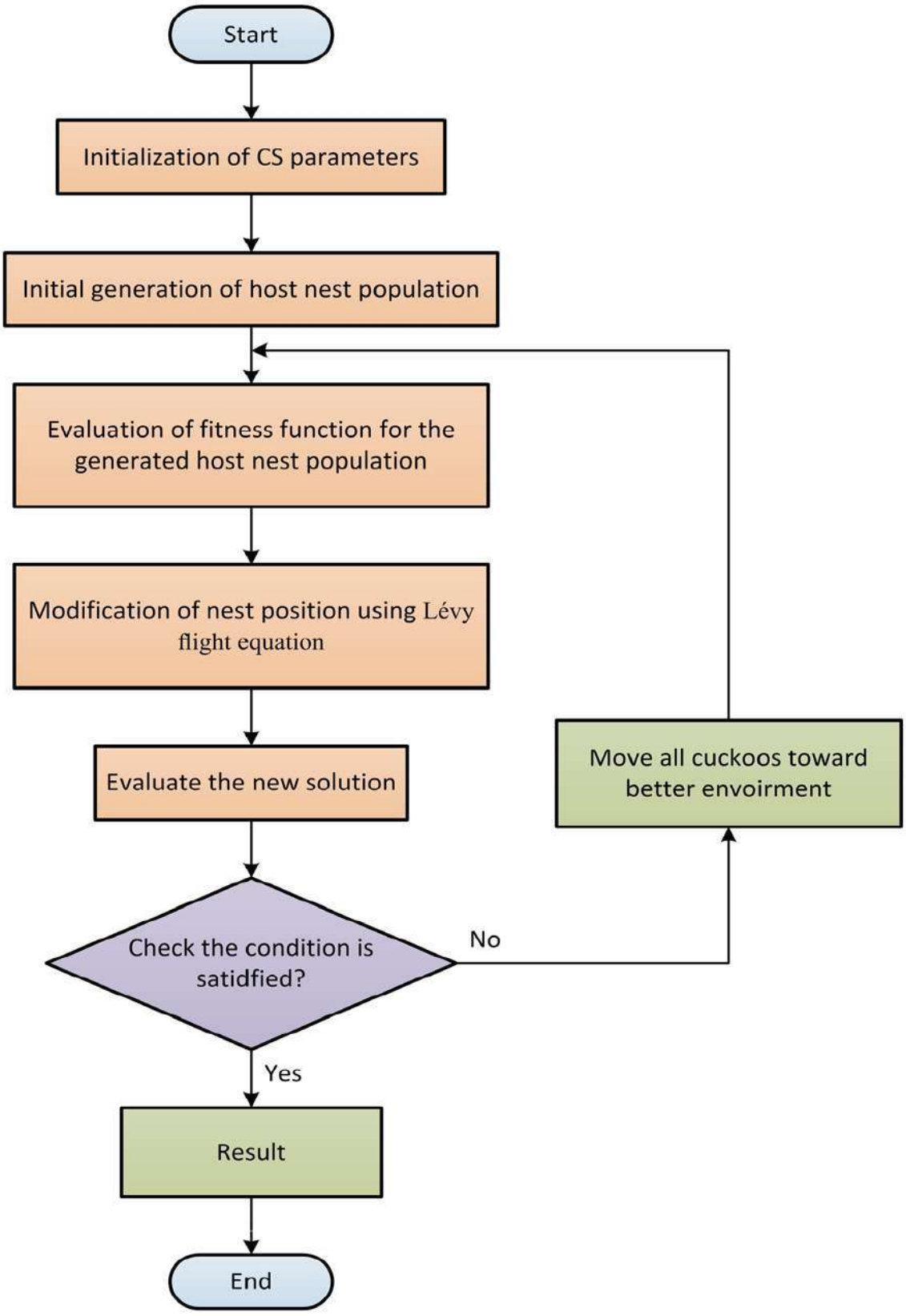


Figure III.20: *Organigramme de l'algorithme de la recherche coucou.*

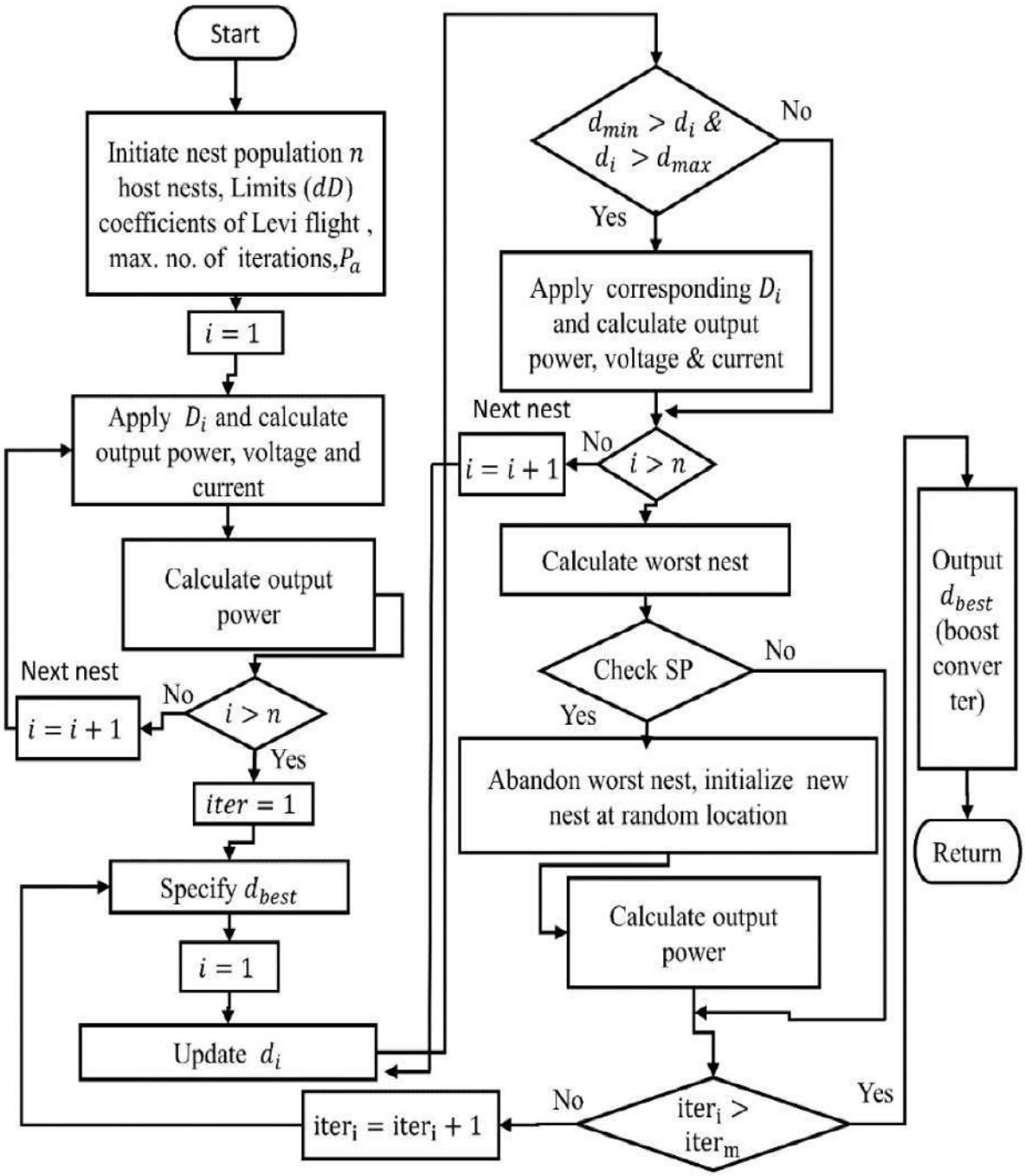


Figure III.21:*Organigramme de l'algorithme de la recherche coucou avec la MPPT.*

```
Begin
Objective function , ;
Generate initial population of n host nest, ;
While(t< Max Generation or stop criterion)
    Get a cuckoo randomly by levy flight
        Evaluate its quality/fitness,
    Choose a nest among n (say, j) randomly
    If ()
        Replace j by the new solution
    End
    A fraction(Pa) of worst nest occurs;
        Worst nests are abandoned and new nests are built;
    Keep the best solutions;
    Rank the solutions and find the current bests;
End while
Post process of results and visualization;
End
```

Figure III.22:*code programme de l'algorithme de la recherche coucou.*

III.18. Implémentation de l'algorithme CS :

L'organigramme global de CS MPPT est illustré à la Fig ***(III.21)***. L'algorithme est implémenté dans MATLAB. Tout d'abord, toutes les constantes et variables, à savoir la tension, le courant et la puissance, le nombre d'échantillons et la valeur de b est initialisée. Utilisation de la valeur actuelle de la tension et courant, la puissance est calculée. La nouvelle valeur de tension et la puissance sont stockées dans les réseaux de tension Vt i et de fitness Jt i, respectivement. De plus, avant le début de chaque itération, une vérification est effectuée pour déterminer si les échantillons ont déjà atteint la convergence ou non.

Si les échantillons ont convergé vers MPP, ils fusionneront en une même valeur, de même que la puissance respective Si les échantillons ne convergent pas, Par évaluant le tableau, l'échantillon avec la puissance la plus élevée est choisi comme le meilleur échantillon. Par la suite, en vertu de l'Eq. III.22 tous les autres échantillons sont contraints d'aller vers cette meilleure valeur. Les tailles de pas sont calculées en effectuant le vol de Lévy comme décrit par les équations précédentes.

- **Montage expérimental :**

Les Figure. (***III.23).*** (***III.24)*** présente le montage utilisé pour réaliser les algorithmes MPPT. Le convertisseur Buck-boost est sélectionné en raison de plusieurs avantages. Le convertisseur est conçu pour fonctionner en mode courant continu, La tension et le courant PV sont mesurés à l'aide d'un capteur de tension et de courant, respectivement. En utilisant ces valeurs mesurées, l'algorithme MPPT génère D le rapport cyclique du convertisseur. Ce rapport cyclique force le convertisseur à fonctionner à la tension souhaitée, c'est-à-dire au VMPP , car il réduit le dépassement transitoire et améliore la stabilité en régime permanent.

III.19. Simulation de FAP avec les algorithmes P&O et CS :

La simulation est effectuée pour illustrer la capacité des algorithmes P&O et CS a trouver la puissance maximale globale. Le panneau PV est composé de 10 modules (LG365N2W-B3) connecté en série et 8 modules en parallèle avec les caractéristiques suivantes :

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.	9.46 A
Tension de circuit ouvert, Vco.	48.4 V
Courant de court-circuit, Icc	9.89 A

Tableau III.2 *Paramètres de simulation de PV.*

Les modules reçoivent le niveau d'´eclairement de 1000 *W/m*2 et température de 25°C connecté a un FAP de caractéristiques suivantes :

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 charge N-L **LF**	0.3 mH
Charge linéaire	Résistance de charge RC Inductance de charge LC Condensateur de charge CC	4 Ω 25 mH 470 μF
Filtre Actif Parallèle	Inductance de filtre **LFA** Tension continue **Vdc**	1.3Mh 910V pour CS 880V pour P&O

Tableau III.3 : *Paramètres de simulation de FAP.*

Le schéma de FAP utilisé dans notre simulation se présente comme suivant :

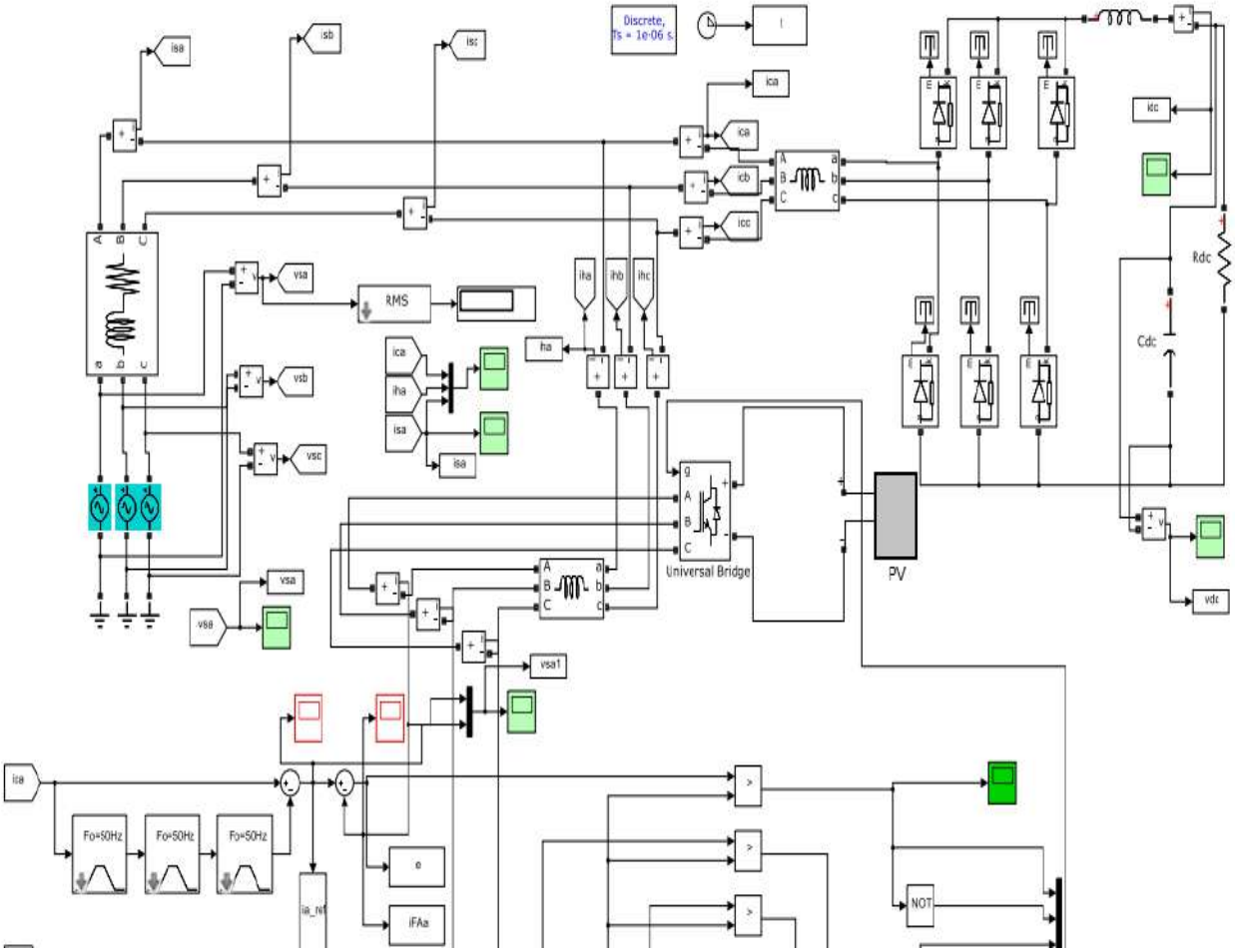


Figure III.23 :*Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par MLI.*

Les résultats de simulation avant l'application de FAP sont montrés sur les figures suivantes :

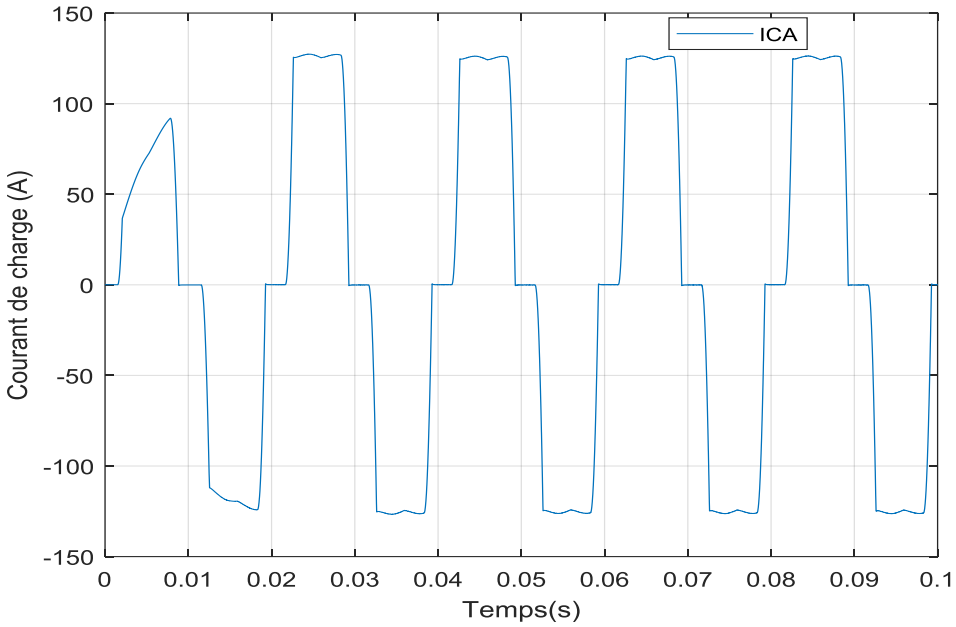


Figure III.24 : *Courant de charge ica .*

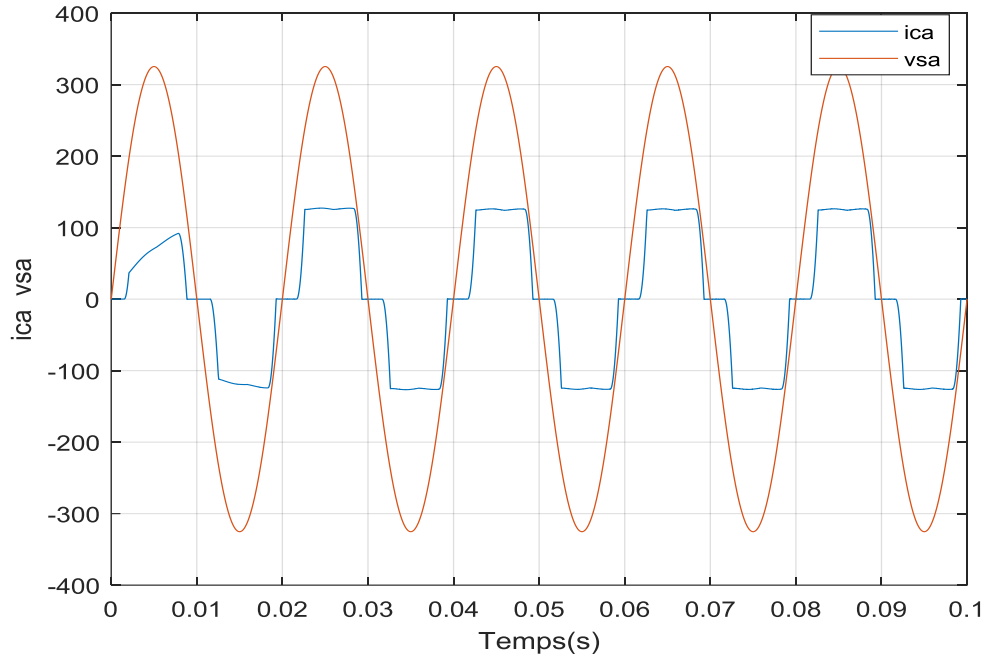


Figure III.25 : *Courant de charge ica avec la tension de source vsa.*

le figure montre le déphasage entre le tension de source et le courant de charge et la déformation de courant charge .

Le déphasage est : $\Delta\phi = \left(\frac{\Delta T}{T}\right) \times 360$

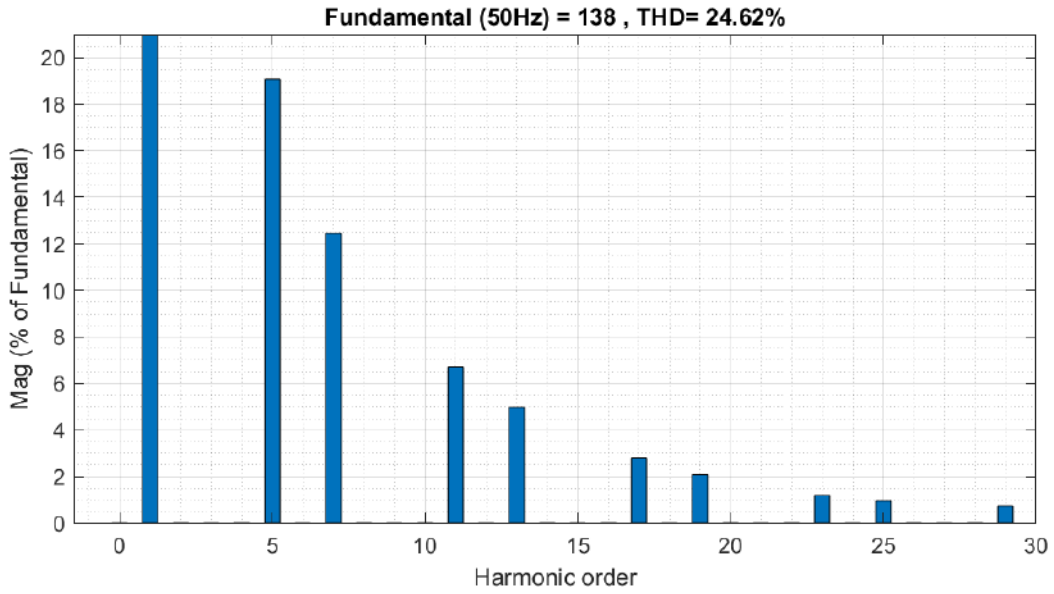


Figure III.26:*l'ordre de THD sans FAP.*

Les résultats de simulation après l'application de FAP sont montrés sur les figures suivantes :

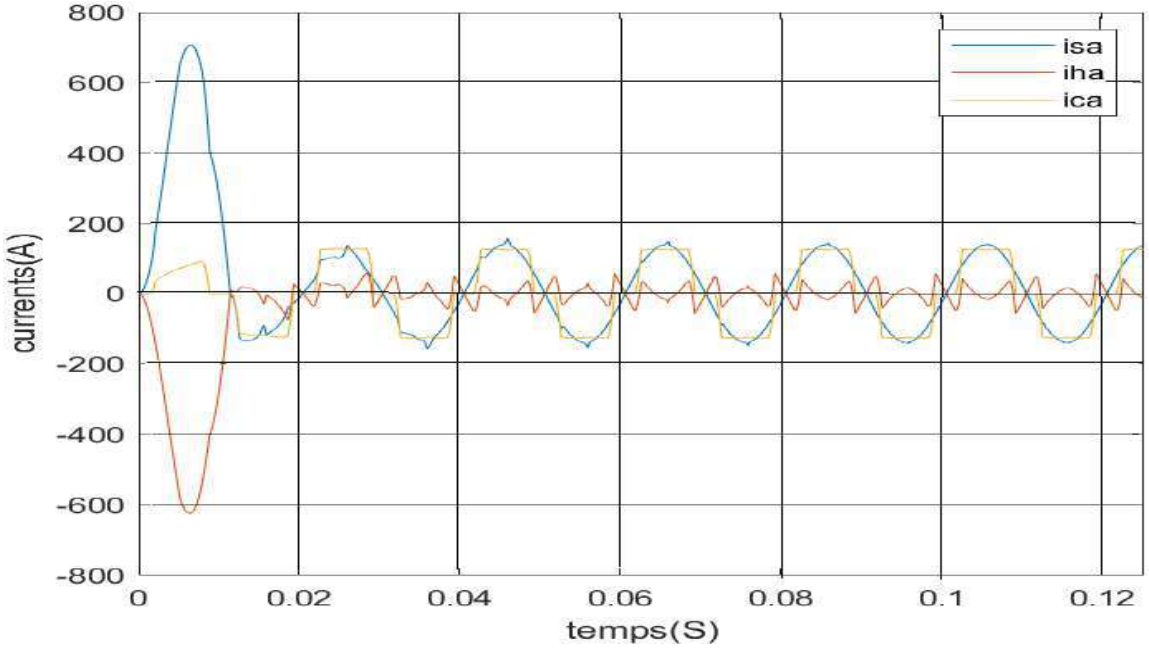


Figure (III.27) : *allure de courant de charge ica et le courant harmonique iha, le courant de source isa.*

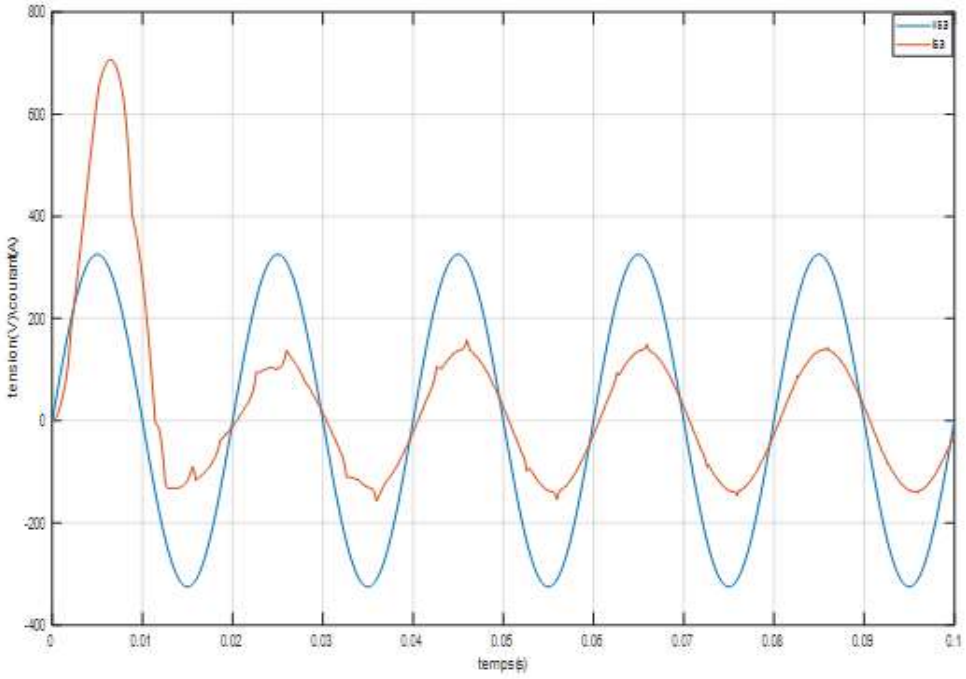


Figure (III.28): *allure de la tension de source vsa et le courant source isa.*

La figure montre l allure de tension de source et le courant de source on remarque que la tnesion est en phase avec le courant et les déformations de courant a disparu sur le régime permanant par ce que le filtrage actif parallèle doit injecter les courants harmoniques en opposition de phase avec celles envoyées par la charge polluante

III.20. Simulation des algorithmes avec le FAP :

Apres la réalisation de simulation FAP et posé les figures résultant nous passons à la MPPT (MAX POWER POINT TRACKER) et les résultats de simulation de ce dernier sont montrés sur les figures suivantes :

III.20.1. Simulation d'Implémentation de l'algorithme P&O :

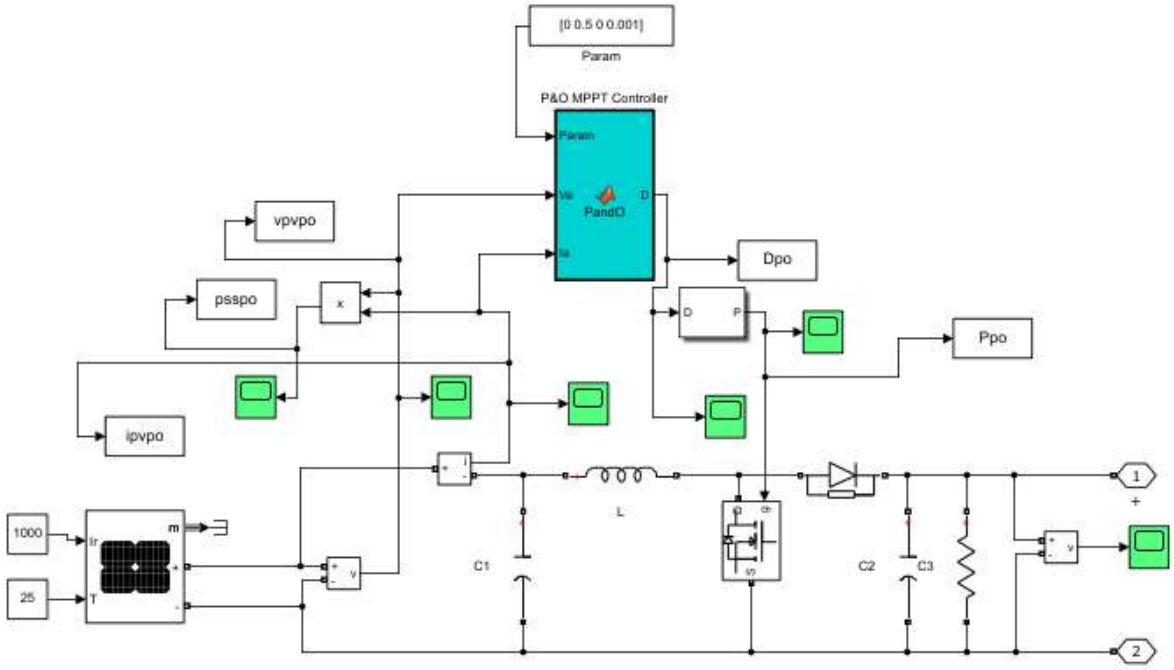


Figure III.29 : *Le circuit Buck -boost utilisé pour réaliser le MPPT P&O*

La figure montre le circuit Buck-boost réalisé avec l'algorithme P&O simulé sur programme Simulink MATLAB les résultats initial de cette simulation dessus :

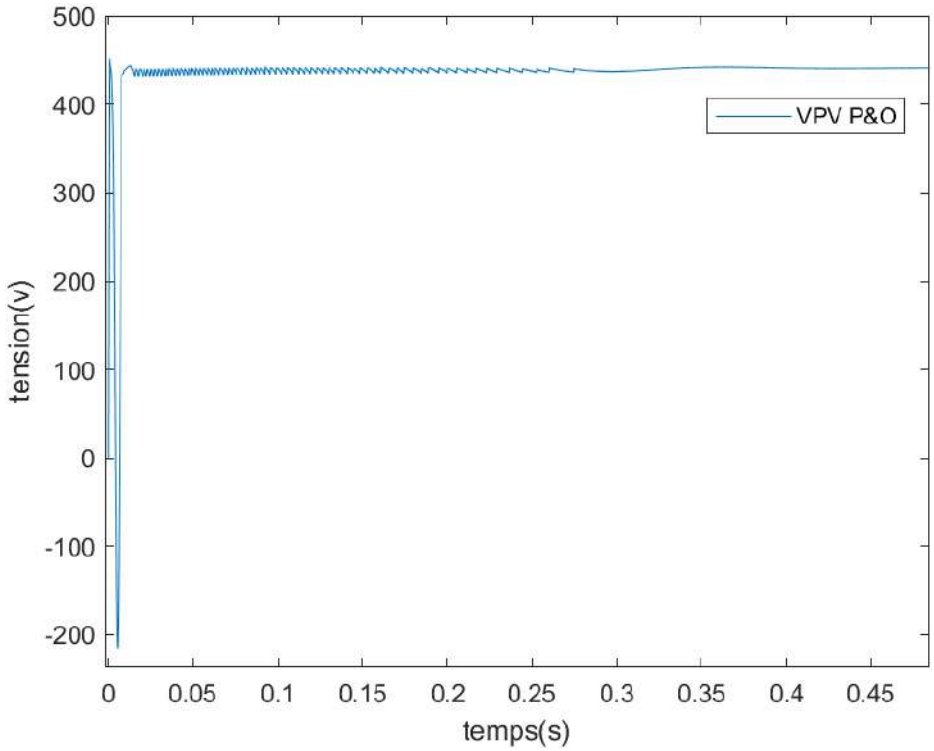


Figure III.30:*Tensions d'entré du convertisseur Boost avec P&O*

Le figure ci-dessus montre la tension de PV et qui représente la tension entré du convertisseur boost avec l'algorithme P&O et le rapport cyclique D génère du convertisseur. Force le convertisseur à fonctionner à la tension souhaitée, le figure de rapport cyclique de P&O est présenté comme suivant :

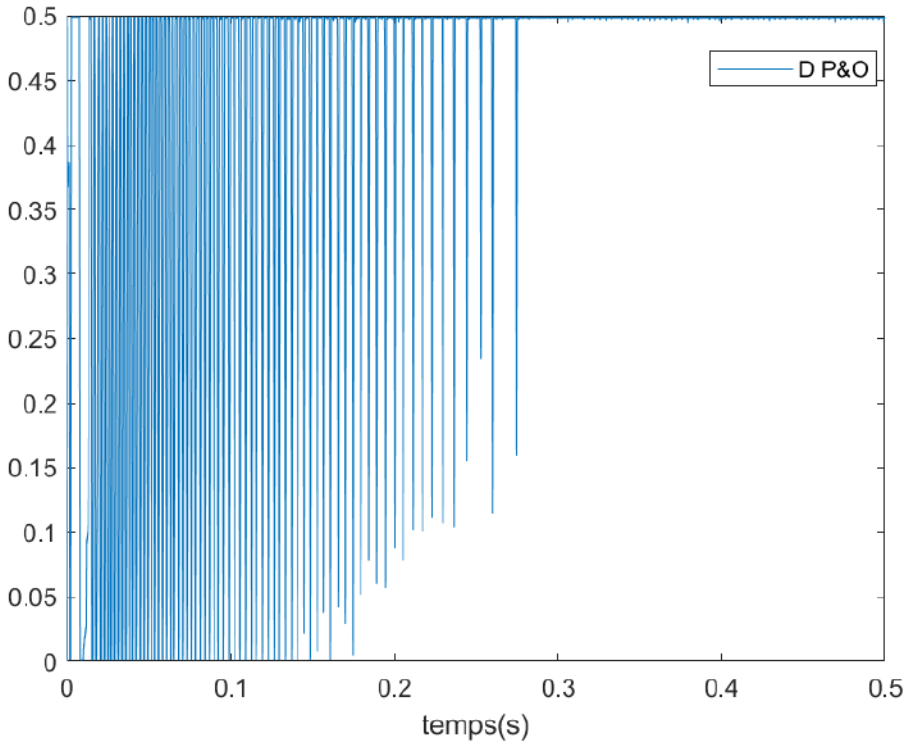


Figure III.31:*Evolution du Rapport cyclique D avec P&O.*

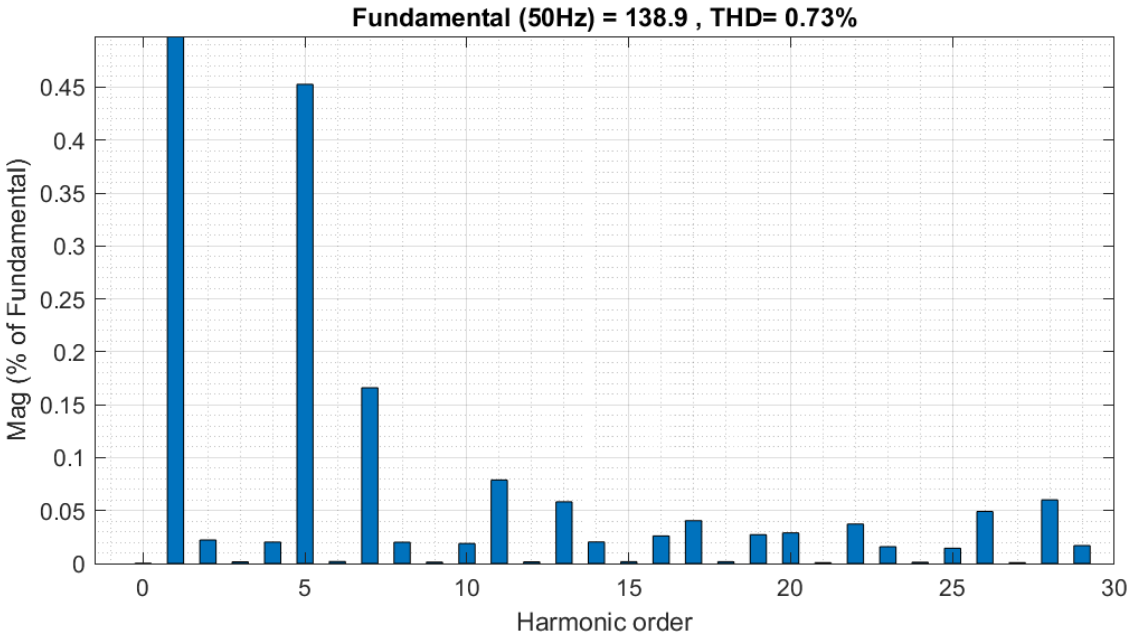


Figure III.32:*l'ordre de THD avec FAP et P&O*

III.20.2. Simulation d'Implémentation de l'algorithme CS :

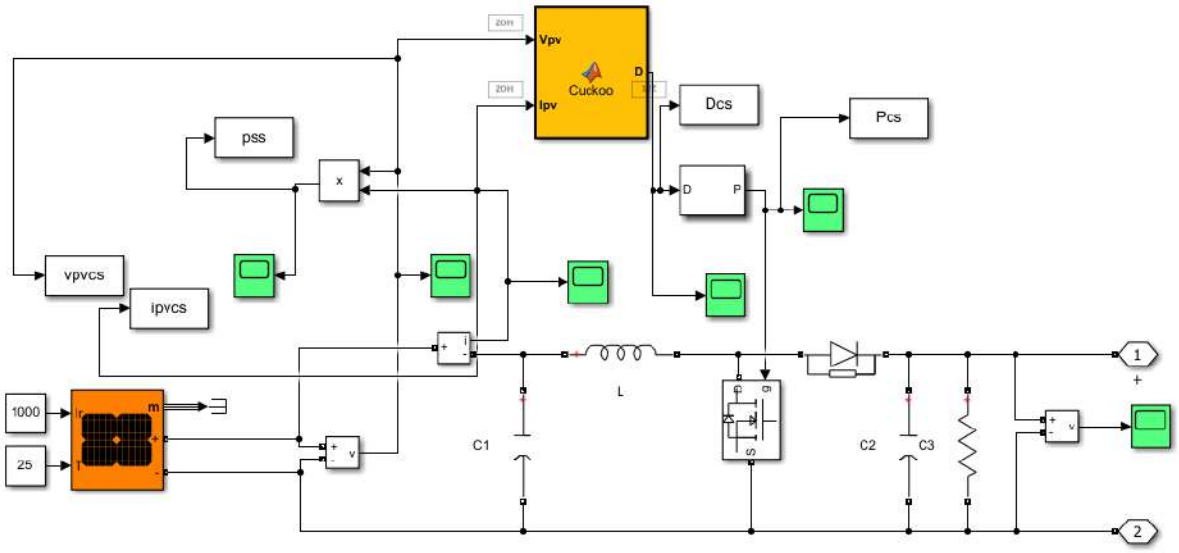


Figure III.33 : *Le circuit Buck -boost utilisé pour réaliser le MPPT CS*

La figure montre le circuit Buck-boost réalisé avec l'algorithme CS les paramètres de l'algorithme pour avoir le meilleur rapport cyclique (Dbest) qui est limité entre [0-1] pour avoir le meilleure MPP est comme suivent :

Paramètres	Valeur
β	3/2
Coefficient de K	0.8
σv	1
Nombre d'itération	20
Pa :la probabilté de découvert d'oeuf de coucou	0.25
P : nombre de nids	4

Tableau III.2 : *Paramètres de l'algotithme Cs.*

L'algorithme a été simulé sur le programme MATLAB/ Simulink les résultats initial de cette simulation sont posé dessus :

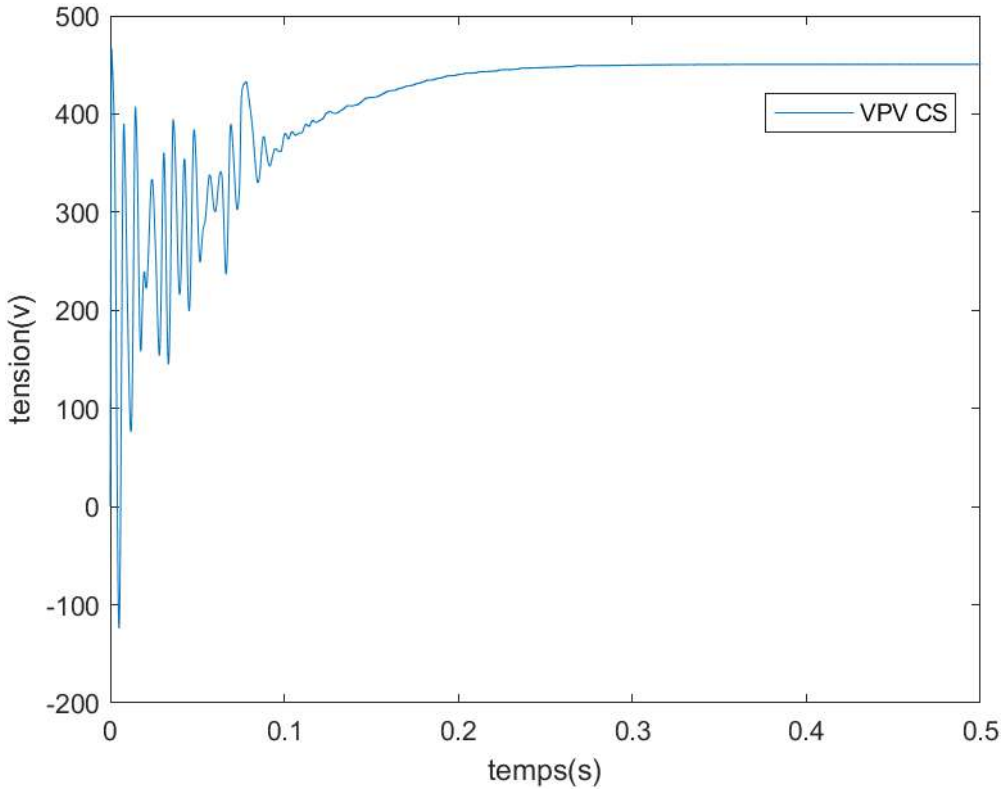


Figure III.34:*Tensions d'entré du convertisseur Boost avec CS*

Le figure ci-dessus montre la tension de PV et qui représente la tension entré du convertisseur boost avec l'algorithme P&O et le rapport cyclique D génère du convertisseur. Force le convertisseur à fonctionner à la tension souhaitée, la figure de rapport cyclique de CS est présenté comme suivent :

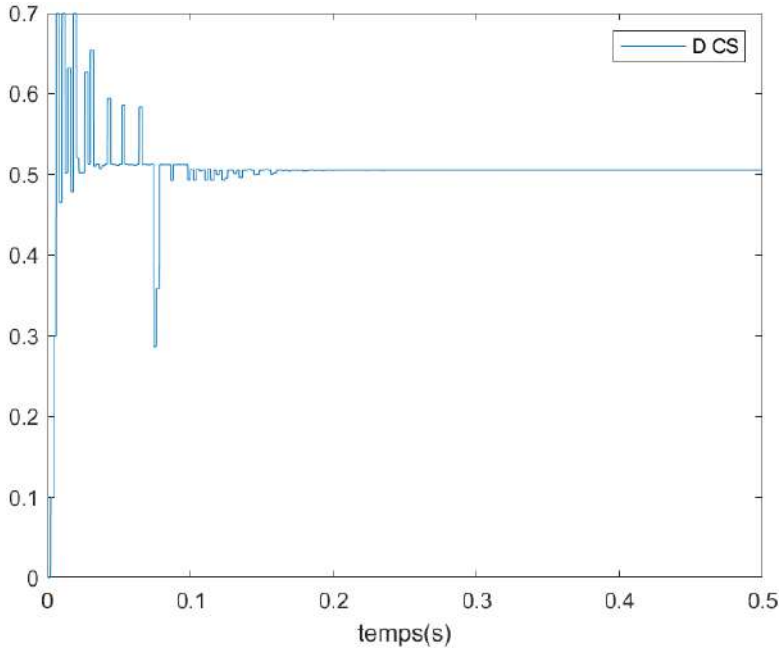


Figure III.35:*Evolution du Rapport cyclique D avec CS*

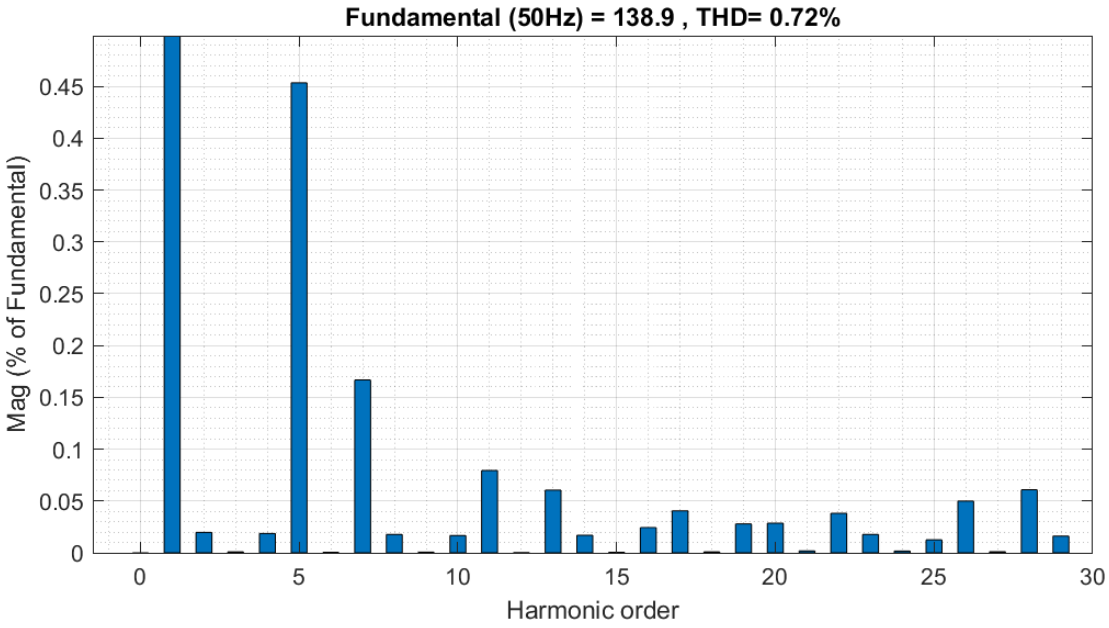


Figure III.36:*l'ordre de THD avec FAP et CS.*

III.20.3. Comparaison entre les deux algorithmes P&O et CS :

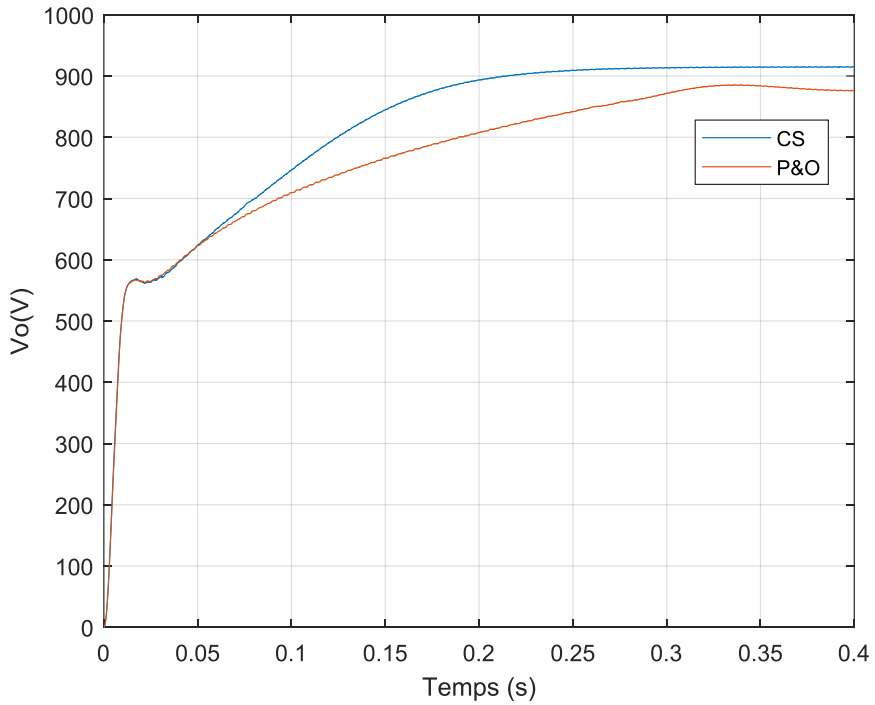


Figure III.37:*Tensions de sortie du convertisseur Boost avec P&O et CS.*

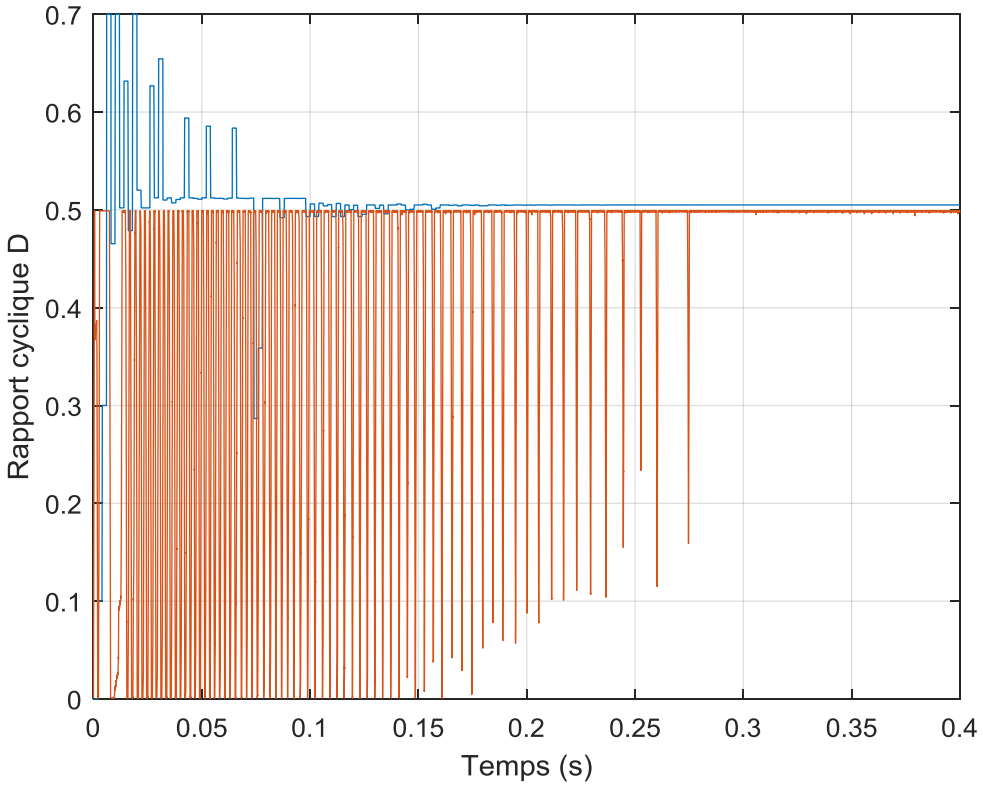


Figure III.38:*Evolution du Rapport cyclique D avec P&O et CS.*

Les résultats de simulation montrent que :

- La méthode P&O n'a pas réussie a atteindre le GMPP mais plutôt un PPM local, contrairement la méthode meta heuristique CS MPPT qui a pu extraire avec

  précision le GMPP par rapport l'algorithme P&O de limiter sa recherche au voisinage du GMPP
- La méthode meta heuristique proposée présente moins d'oscillations par rapport la méthode P&O dans le régime transitoire et aussi prendre un court instant pour trouver le GMPP:

Les figures montrent le taux de distorsion harmonique avant le filtre et après le filtre avec les deux algorithmes P&O et CS

On remarque que la méthode CS a un THD meilleur que l'algorithme P&O par 0.72 % contre 0.73% différence

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs Statiques (convertisseur DC-DC) et des convertisseurs Statiques (convertisseur DC-AC). Nous avons montré théoriquement que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être 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'irradiance 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(CS et P&O)

Conclusion Générale

La pollution harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité de l'énergie l'électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les ignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, les normes en vigueur, et les solutions ont été proposées permettant pour remédier à chaque type de perturbation, on distingue deux types: les solutions traditionnelles notamment le filtrage passif et les solutions modernes particulièrement le filtrage actif est une nouvelle solution pour le filtrage des harmoniques ce contexte, notre travail présente dans ce mémoire a été consacré à d'étude d'un filtre actif parallèle afin d'améliorer la qualité de l'énergie.

D'autre part Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement. Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink).

Nous avons procédé à cette étude en trois étapes : qualité de l'énergie et généralité sur les systèmes photovoltaïque, modélisation et simulation modélisation et Simulation de MPPT par la Commande P&O et CS , la méthode de poursuite de point de puissance maximale et système photovoltaïque connecté au réseau électrique (MPPT) enfin : la simulation de tout l'ensemble. Dans la première partie on parler sure les notions sur la qualité de l'énergie électrique et les différentes perturbations pouvant l'affecter. Nous discutons des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour palier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques. Dans le deuxiéme partie on parler sure les generalites sur les systémes PV,Après on a parlé sure les convertisseurs DC-DC est on a opté pour le convertisseur survolteur « BOOST » la raison c'est que le panneau ne génère pas assez de tension donc il faut utiliser le BOOST pour augmenter sa tension et ainsi augmenter la puissance de notre installation. Le convertisseur DC-DC nous a facilité la tâche de développement d'un modèle de recherche du MPPT en Simulink.

Conclusion Générale

En résumé, nous avons évoqué le filtre actif parallèle qui représente une solution efficace pour compenser les harmoniques de courant résultant des charges non linéaire.et.on fait l 'association entre le générateur photovoltaïque commandé par la MPPT bloc de poursuite de point de puissance maximale qui contient les algorithmes proposé et a la fin on a posé Les résultats de simulation obtenus qui confirment ce qu'on a dit sur l'étude théorique.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Malisetty Siva Sai Nihanth, N Rajasekar, Dhanup S Pillai, and J Prasanth Ram. A new array reconfiguration scheme for solar pv systems under partial shading conditions. In Intelligent computing techniques for smart energy systems, pages 387–396. Springer, 2020.

[2] M. Shafiee Khoor : "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006

[3] L. BENCHAITA Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif Parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle- commande » Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.

[4] L. MORAN et J. DIXON « Power Electronics Handbook »,Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.

[5] : BOUKADOUMAziz<<Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015

[6] Sahli Abdeslem « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau. », Mémoire de Magister en génie électrique. universite ferhat abbas – setif UFAS (algerie)

[7] :SAHLI Abdeslem «Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïque interconnectés au réseau», Mémoire de Magister, Université ferhat abbas – setif, 2012

[8] :KEBIRI Samia «Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveau», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.

[9] Y. Abdelli, «Etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de 1'énergie électrique». Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, 2005.

[10] M. M. Abdusalam, «Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales», Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Mai 2008

[11]:Seyed Hossein Hosseini, Tohid Nouri and Mehran Sabahi «A Novel Hybrid Active Filter for Power Quality Improvement and Neutral Current Cancellation», Electrical Engineering department, Seraj Higher Education Institute, Tabriz, Iran, Downloaded on May 27,2010 at 01:24:26 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply

[12] :G. ESCOBAR et G. A. A. VALDEZ, « A Model-Based Controller for A Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter With Compensation of the Neutral Line Current », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22. n° 6, p. 2261-2270, 2007.

[13] :MESBAHI Nadhir «Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution», thèse de Doctorat en sciences, Universite badji mokhtar annaba, 2014.

[14] : S. Beaulieu, «Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique», Mémoire de Fin d'Etude, Université, Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

[15] Boucif Abdelmalek << Filtrage actif d'un réseau Électrique >> Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, 2014

[16] Alali Mohamad Alaa Eddin <<Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension >> THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP–ENSAIS–ENGEES–URS,2002

[17] Mekri Fatiha, « Commande robuste des conditionneurs actifs de puissanc », Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, (France) 2007.

[18] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, « Commande avancées des systèmes dédies a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension », Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006.

[19] Tadjer Sid Ahmed, "Etude d'un système de compensation des harmoniques en utilisant un générateur voltaïque GPV", Thèse de Magister en génie électrique, Université M"hamed Bougara de Boumerdès, (Algérie) 2008.

[20] : BOUKADOUM Aziz << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015

[21] GHADBANE Ismail <>, thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016

[22] C. A. Quinn, N Mohan, & H. Mehta, "A four-wire, current-controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems", in Proc. IEEE APEC'93, pp. 841–846, 1994.

[23] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion", Proc. of the IEEE,vol. 82, pp. 1194–1214, August, 1994.

[24] S. L. Capitaneanu, "Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux niveaux", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse,France, Novembre 2002.

[25] A. M. Trzynadlowski, "Introduction to modern power electronics", Chapter 2, pp. 65-91, & Chapter 7, pp. 273-364, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1998.

[26] L. Morán & J. Dixon, "Active filters", Power Electronics Handbook, Academic Press, Chapter 39, pp. 1–36, 2007.

[27] G. Grellet & G. Clerc, "Actionneurs Electriques: Principes, Modèles Commandes",Chapitre 9, pp. 217–221, 2ème tirage, Ed. Eyrolles, Paris 2000.

[28] E. Wolfgang, F.J. Niedernostheide, D. Reznik, H.J. Schulze, "Advances in power electronic devices", in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting & World Conf. on Ind. Applicat. of Electrical Energy, pp. 4–6, 1999.

[29] Alain Bilbao learreta '' Réalisation de commandes MPPT Numériques '' Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006

[30] M.N.Mchalikh et CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[31] haloune assia, modélisation de transfert radiatif dans strates supérieur d'un module photovoltaïque, université de Boumerdass, 2016, Algérie.

[32] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane , Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque ,Mémoire de master académique , UNIVERSITE El Oued , 2015

[33]: L'électricité photovoltaïque, Yves JAUTARD et Thierry BOUDOL (Solarte) - 25/05/2000.

[34]: Alain RICAUD, "Modules photovoltaïques, Filières technologiques", Techniques de l'ingénieur, D3940.

[35] M.S.Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011

[36] site web :photovoltaique.info

[37] S.Djeriou. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.

[38] site web :photovoltaique.info

[39] M.S.Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011

[40] S.Petibon. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.

[41] M.N.Mechalikh et CH.E.Hamada. Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2013.

[42] M. Belhadj, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.

[43] W.Xiao. A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems, the University of British Columbia, 2003.

[44] Dossier technique «Eolienne et photovoltaïque»

[45] Merabet Kamel, " commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension

trlphasée", Université du Québec, 2011

[46] Benseddik Othmane, Djaloud Fathi, "Etude et optimisation du fonctionnement d' système

photovoltaïque", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 27/06/2012

[47] Abouchabana Nabil, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT''. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009

[48] KH. Ayache. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique. Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de SoukAhras, 2014.

[49] M.Chaabene. Cour Gestion énergétique des panneaux photovoltaïque, UNIVERSITE DE SFAX, 2008.

[50] M.N.Mchalikh et CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[51]K.Sobaihi '' étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction '' Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.

[52] Mémoire de Fin d''etude Pour l'obtention du Diplôme Master en Automatique Option : Automatique et Système Thème Commande MPPT d'un system photovoltaïque sous irradiation uniforme et non-uniforme Réalisé Par : Yehia Lalili

[53]Cedric Cabal. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008. Français. fftel-00357487f

[54] Trishan Esram, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior member,IEEE.Compariason of Photovoltaic array maximum power point tracking techniques Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2006.

[55] Hannes Knopf. Analysis, simulation, and evaluation of maximum pow er point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle . Master of Science in Electrical and Computer Engineering.Portland State University 1999.

[56] Othman AM, El-arini MMM, Ghitas A, Fathy A. Realworld maximum power point tracking simulation of PV system based on Fuzzy Logic control. NRIAG J Astron Geophys 2012;1:186–94. https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2012.12.016.

[57] Radjai T, Rahmani L, Mekhilef S, Gaubert JP. Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimatorusingdSPACE.SolEnergy2014;110:325–37.

[58] Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre. Techniques d'hybridation à base de métaheuristiques pour optimiser des systèmes logistiques. Métaheuristiques pour l'optimisation difficile, 2014. ffhal-02023663f

[59] Badr Benmammar. Moteur cognitif de la radio cognitive : Cuckoo Search, Firefly ou Dynamique Parallèle ? . [Research Report] Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT). 2018. ffhal-01686010f

[60] Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Par: LANNAK HANANE Intitulé Adaptation de la méthode coucou pour la résolution du problème job shop

[61] Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Par: LANNAK HANANE Intitulé Adaptation de la méthode coucou pour la résolution du problème job shop

[62] Badr Benmammar. Moteur cognitif de la radio cognitive : Cuckoo Search, Firefly ou Programmation Dynamique Parallèle ? . [Research Report] Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen (LTT). 2018. ffhal-01686010f

[63] Maximum Power Point Tracking Interleaved Boost Converter Using Cuckoo Search Algorithm on TheNano Grid System Journal on Advanced Research in Electrical Engineering, Vol. 5, No. 1, Apr. 2021

ANNEXE A

SEMI-CONDUCTEUR DE PUISSANCE TOTALEMENT COMMANDABLES :

Les nombreuses avancées qu'a connu la technologie des composants semi-conducteur de puissance ont conduit à l'apparition d'interrupteurs entièrement commandables à l'amorçage et au blocage, permettant l'obtention d'un rendement meilleur dans l'opération de conversion statique de l'énergie électrique. Parmi ces interrupteurs, les plus utilisés sont les GTO, les MOSFET et les IGBT. Dans ce qui suit, un bref descriptif de ces composants sera fourni .

A.1. GTO :

GTO est l'acronyme de Gate Turn Off. C'est un type de thyristor s'amorçant comme le thyristor (SCR) par un faible courant positif de gâchette. Cependant, contrairement au thyristor, le GTO se bloque par une forte impulsion négative. Les GTO ont des capacités de blocage de tensions symétriques ou dissymétriques. Les GTO à blocage dissymétrique sont usuellement employés dans les convertisseurs de grande puissance, particulièrement les onduleurs. Le gain du courant de blocage est pauvre, typiquement, il vaut 5, mais l'impulsion de blocage est de courte durée, de l'ordre de 50 µs, ainsi l'énergie associée au signal de gâchette est faible.

Une caractéristique intéressante est que le gain du courant dépend des variations diG/dt, du courant inverse de la gâchette. Avec un diG/dt élevé, le temps de blocage est court, mais le gain est presque unitaire et vice-versa. Généralement, les GTO sont lents, avec une fréquence de commutation maximale de l'ordre de 1 kHz, et avec des pertes par commutation élevées. Mais comme interrupteurs entièrement commandables, les GTO n'ont pas de concurrents lorsqu'il s'agit des grandes puissances, et ont des taux comparables à ceux des SCR, atteignant 6.5 kV et 4.5 kA.

A.2. MOSFET de puissance :

MOSFET est l'acronyme de Metal Oxyde Semiconducteur Field Effect Transistor. C'est un interrupteur caractérisé par la fréquence de commutation la plus élevée. Les 03 électrodes du MOSFET, le drain (D), la source (S), et la grille (G) correspondent respectivement au collecteur, à l'émetteur, et à la base d'un transistor bipolaire (Bipolar Junction Transistor BJT). Cependant, contrairement au BJT, le MOSFET est commandé en tension, comme l'impédance DC gâchette-source est infinie (10^9 Ω à 10^{11} Ω).

Les avantages techniques du MOSFET ne sont pas limités à la fréquence de commutation élevée. En effet, une faible puissance suffit pour le commander, aussi, le circuit de commande est plus simple que celui du BJT. La tension typique d'allumage sourcegâchette est de 20 V, alors que 0 V est la tension de blocage. Un processus technologique consiste à placer une diode en parallèle au MOSFET. Cette dernière peut servir comme diode de roue libre, mais le MOSFET devient relativement lent et doit par conséquent être dérivé par une diode externe rapide, surtout pour les fréquences élevées. Ces fréquences sont de l'ordre de centaine de kHz pour les puissances moyennes, et de MHz pour les très faibles puissances. Les MOSFET de puissance sont disponibles avec des taux de tension et de courant de 500 V et 150 A respectivement (aussi, il y a des MOSFET fabriqués pour 1000 V).

A.3. IGBT :

IGBT est l'acronyme de Insolated Gate Bipolar Transistor. C'est un composant semiconducteur hybride, combinant les avantages du MOSFET et du BJT. Les IGBT sont commandés en tension identiquement aux MOSFET, cependant, ils ont de moindres pertes par conduction et des taux élevés du courant et de la tension. L'électrode de commande est appelée grille (G), tandis que le courant principal est conduit ou interrompu du collecteur vers l'émetteur. La majorité des IGBT disponibles sur marché sont ceux communément appelés punchthrough ou type dissymétrique (assymetric type). Ces derniers sont incapables de bloquer la tension inverse et, avec de faibles pertes par conduction, ils sont destinés aux convertisseurs à entrée DC. D'ordinaire, ils sont intégrés avec une diode de roue libre placée en antiparallèle. Les IGBT symétriques (non-punch-through) peuvent, par contre, bloquer une tension inverse, cependant, les pertes par conduction sont plus importantes que celles du cas des IGBT dissymétriques. Les IGBT symétriques trouvent leur application dans les convertisseurs à entrée AC, notamment les redresseurs.

En ce qui concerne la chute de tension à l'état fermé, les IGBT sont comparables aux BJT, mais plus préférables que les MOSFET. Semblablement aux MOSFET, l'amorçage des IGBT est possible avec une commande en tension de 20 V envoyée entre gâchette émetteur, tandis que le blocage se fait avec une tension de 0 V. Les IBT peuvent commuter à des fréquences supersoniques au-delà de 20 kHz. Les taux maximum du courant et de la tension sont de l'ordre de 1 kA et 1.5 kV pour le cas des IGBT dissymétriques et de l'ordre de 2 kA et 3.5 kV pour le cas des IGBT symétriques.