

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.

Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa.

Faculté de Technologie.

Département Génie Electrique.

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables

Sous le Thème :

**Comparaison des algorithmes de suivi du point
de puissance maximale dans les systèmes
photovoltaïques**

Présenté par :

Mr. HADDOUCHE Yanis

Sous la direction de :

Dr. DEBOUCHA Houssam

Pr. BELAID Sofia

La soutenance a eu lieu le 04/07/2024.

Année universitaire 2023 – 2024

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements à tous les professeurs et toutes personnes qui, par leurs paroles, leurs critiques et leurs conseils, m'ont aidé durant mon parcours étudiant et qui ont su me guider dans mes études.

Je remercie plus particulièrement Mme BELAÏD.S et son doctorant, le co-encadreur, Mr DEBOUCHA.H pour son soutien indéfectible jusqu'à l'aboutissement de ce mémoire et qui m'a conseillé, orienté et a veillé à sa réalisation.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Un éternel merci à ma binôme de toujours et à jamais SMAOUN Lisa qui a été à mes côtés depuis le premier jour.

A ma grand-mère maternelle pour son amour et bienveillance.

A tous mes camarades du RCD qui m'ont soutenu jusqu'à la fin et qui continuent de le faire.

Et enfin, je tiens à remercier toutes personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à mener terme mon projet.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à mes chers parents pour leur soutien et leurs prières et qui m'ont offert un climat favorable pour mener à terme mes études.

A mon cher petit frère et petite sœur.

A la mémoire de mes grands-parents paternels et mon grand-père maternelle.

A ma belle-famille pour leur gentillesse et leur soutien.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont motivé tout au long de mon parcours.

Liste des Figures :

Figure 1.1 : Les Energies Renouvelables	4
Figure 1.2 : Panneaux Photovoltaïques	7
Figure 1.3 : Système Photovoltaïque Connecté au Réseau.....	8
Figure 1.4 : Système Photovoltaïque Hybride.....	9
Figure 1.5 : Système Photovoltaïque Autonome.....	10
Figure 1.6 : modèle type d'un module PV	10
Figure 1.7 : Les caractéristiques I-V et P-V d'un module.....	11
Figure 1.8 : Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.....	12
Figure 1.9: configuration du réseau Photovoltaïque.....	13
Figure 1.10 : Structure du réseau PV.....	14
Figure 1.11 : Schéma équivalent du convertisseur Buck.....	16
Figure 1.12 : Schéma équivalent du convertisseur Boost.....	16
Figure 2.1 : Catégories d'algorithmes MPPT.....	23
Figure 2.2 : L'organigramme de l'algorithme P&O.....	24
Figure 2.3 : l'organigramme de la méthode INC.....	25
Figure 2.4 : Mise à jour de la position des particules.....	27
Figure 2.5 : Organigramme de l'algorithme PSO.....	28
Figure 2.6 : Organigramme de l'algorithme TGO.....	31
Figure 2.7 : Organigramme de l'algorithme MPT.....	32-33
Figure 2.8 : le schéma de l'algorithme M-MPT	35
Figure 2.9 : Organigramme de l'algorithme M-MPT.....	37
Figure 3.1 : Modèle MATLAB/Simulink du système photovoltaïque.....	39
Figure 3.2 : Schéma fonctionnel de l'étage de conversion de puissance.....	40
Figure 3.3 : Modèle de petit signal du système photovoltaïque propose.....	42
Figure 3.4 : Pôles et les Zéros de notre système.....	43

Figure 3.5 : Diagramme de Bode résultant de notre Système.....	44
Figure 3.6 : Modèles d'ombrage partiel utilisés pour la vérification de l'algorithme VTO.....	45
Figure 3.7 : Allure de tension transitoire de l'algorithme P&O sous différents profils d'irradiation.....	46
Figure 3.8 : Allure de puissance transitoire de l'algorithme P&O sous différents profils d'irradiation.	46
Figure 3.9 : Allure de tension transitoire de l'algorithme PSO sous différents profils d'irradiation.....	46
Figure 3.10 : Allure de puissance transitoire de l'algorithme PSO sous différents profils d'irradiation.	46
Figure 3.11 : Allure de tension transitoire de l'algorithme M-MPT sous différents profils d'irradiation.....	46
Figure 3.12 : Allure de puissance transitoire de l'algorithme M-MPT sous différents profils d'irradiation.....	46
Figure 3.13 : Allure de tension de P&O sous scénario1.....	47
Figure 3.14 : Allure de puissance de P&O sous scénario1.....	47
Figure 3.15 : Allure de tension de PSO sous scénario1.....	47
Figure 3.16 : Allure de puissance de PSO sous scénario1.....	47
Figure 3.17 : Allure de tension de M-MPT sous scénario1.....	48
Figure 3.18 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario1.....	48
Figure 3.19 : Allure de tension de P&O sous scénario3.....	48
Figure 3.20 : Allure de puissance de P&O sous scénario3.....	48
Figure 3.21 : Allure de tension de PSO sous scénario3.....	48
Figure 3.22 : Allure de puissance de PSO sous scénario3.....	49
Figure 3.23 : Allure de tension de M-MPT sous scénario3.....	49
Figure 3.24 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario3.....	49
Figure 3.25 : Allure de tension de P&O sous scénario2.....	50

Figure 3.26 : Allure de puissance de P&O sous scénario2.....	50
Figure 3.27 : Allure de tension de PSO sous scénario2.....	50
Figure 3.28 : Allure de puissance de PSO sous scénario2.....	50
Figure 3.29 : Allure de tension de M-MPT sous scénario2.....	51
Figure 3.30 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario2.....	51
Figure 3.31 : Allure de tension de P&O sous scénario4.....	52
Figure 3.32 : Allure de puissance de P&O sous scénario4.....	52
Figure 3.33 : Allure de tension de PSO sous scénario4.....	52
Figure 3.34 : Allure de puissance de PSO sous scénario4.....	52
Figure 3.35 : Allure de tension de M-MPT sous scénario4.....	53
Figure 3.36 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario4.....	53

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1: Les différentes valeurs du MPP lors de la variation de l'irradiation.....	11
Tableau 1.2 : Valeurs des différents MPP avec différentes températures	12
Tableau 3.1 : Paramètres d'un module PV.....	45
Tableau 3.2 : Comparaison des performances expérimentales de l'algorithme sous différents scénarios.....	53

Liste des Abréviations

PSC	Partial shading condition
PI	Proportional-Integral
PV	Photovoltaïque
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
I_{PV}	Courant du Photovoltaïque
I_o	Courant de sortie
I_{in}	Courant d'entrée
L_{min}	Valeur Minimale de l'inductance
C_{min}	Valeur Minimale du condensateur
P&O	Perturb and Observe
INC	Incremental conductance
PSO	Particle Swarm Optimization
TGO	Team Game Optimization
MPT	Maximum Power Trapezium
M-	
MPT	Modified Maximum Power Trapezium
GMPP	Global maximum power point
LMPP	Local maximum power point
MPP	Maximal Power Point

Tables des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Systèmes Photovoltaïques.....	3
1. Introduction.....	3
2. Energie Renouvelable.....	3
2.1. Eolien.....	4
2.2. Hydraulique.....	5
2.3. Solaire.....	5
2.3.1. Energie Solaire Thermique.....	6
2.3.2. Energie Photovoltaïque.....	6
3. Configuration d'un système photovoltaïque.....	7
3.1. Système PV connecté au réseau.....	8
3.2. Système PV hybride.....	8
3.3. Système PV autonome.....	9
4. Modèle de module PV.....	10
5. Modélisation d'un module PV.....	11
6. Effet de changement de paramètre sur les caractéristiques du module PV.....	12
6.1. Modélisation des conditions d'ombrage.....	13
7. Convertisseurs DC-DC.....	15
7.1. Convertisseur Buck.....	15
7.2. Convertisseur Boost.....	16
7.3. Convertisseur Buck-Boost.....	17
7.3.1. Principe.....	17
7.3.2. Calcul des paramètres du convertisseur Buck-Boost.....	17
8. Batteries.....	19
1.1. Types de batteries.....	19
8.1.1. Les batteries Plomb/Acide.....	19
8.1.2. Les batteries Nickel-Métal hydride.....	20
8.1.3. Les batteries Lithium-ion.....	20
9. Conclusion.....	21
CHAPITRE 2 : Suivi du Point de Puissance Maximal.....	22
1. Introduction.....	22

2. Les algorithmes MPPT.....	22
2.1.Méthodes de Recherche locales (<i>Local Search Methods</i>).....	23
2.1.1. Perturbation et Observation P&O.....	23
2.1.2. Conductance Incrémentale INC.....	24
2.2.Méthodes de recherche Globales (<i>Global Search Methods</i>).....	26
2.2.1. Méthodes Soft-Camputing (<i>Soft-Camputig Methods</i>).....	26
2.2.1.1.Optimisation par Essaims Particulaires PSO.....	26
2.2.1.2.Amélioration Team Game Optimisation TGO.....	28
2.2.2. Algorithme à la plage de tension réduite (<i>Voltage Window Scanning</i>).....	32
2.2.2.1.Méthode de Trapèze de Puissance Maximale MPT.....	32
2.2.2.2.Méthode Modifiée de Trapèze de Puissance Maximale M-MPT.....	34
3. Conclusion.....	38
CHAPITRE 3 : Discussion des résultats de simulation et comparaison des algorithmes MPPT.....	39
1. Introduction.....	39
2. Analyses des paramètres.....	39
2.1.Modèle simulé.....	39
2.2.Etude de stabilité du système.....	40
2.2.1. Pôles et Zéros.....	42
2.2.2. Diagramme de Bode.....	43
2.3.Conditions d'ombrage partiel.....	44
2.4.Analyse des résultats de la simulation.....	45
3. Conclusion.....	53
Conclusion Générale.....	55
Références.....	56



Introduction

Générale

Introduction Générale

La dépendance globale de l'énergie électrique vis-à-vis des sources fossiles conduit à l'épuisement de ces dernières plus rapidement que prévu (environ 80 ans selon l'Agence fédérale allemande pour les sciences de la terre et les matières premières). L'influence négative de ce type d'énergie sur l'environnement et son utilisation plus rapide que sa régénération nous pousse à rechercher de nouvelles alternatives afin de satisfaire et de répondre aux besoins de la population mondiale [1].

Alors que les sources d'énergie renouvelables sont de plus en plus intégrées au réseau, des recherches considérables sont menées pour améliorer l'efficacité des systèmes de conversion. Le défi mondial consiste à réduire les coûts de production et à maximiser l'utilisation des ressources durables. À cet égard, l'énergie photovoltaïque est considérée comme une source d'énergie très prometteuse en termes de coûts de mise en œuvre et de nombre d'applications utilisant des panneaux photovoltaïques.

Dans un contexte mondial de transition énergétique, la recherche de solutions durables et renouvelables pour la production d'énergie est devenue une priorité. Les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie solaire, jouent un rôle crucial dans la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et dans la lutte contre le changement climatique. Les systèmes photovoltaïques (PV), qui convertissent directement l'énergie solaire en électricité, représentent une technologie prometteuse et en constante évolution.

Au cours des deux dernières décennies, grâce notamment à la politique de soutien, au coût de production, et surtout aux avancées technologiques ainsi qu'au développement du marché photovoltaïque, l'énergie photovoltaïque est devenue une source d'énergie fiable avec une productivité élevée et des coûts de maintenance en constante diminution. En 2018, le marché photovoltaïque a non seulement dépassé le niveau annuel de 100 GW, mais la capacité de production d'électricité photovoltaïque installée a également atteint plus de 0,5 TW [2].

Cependant, pour maximiser l'efficacité de ces systèmes, il est essentiel d'optimiser le processus de conversion de l'énergie. C'est dans cette perspective que le concept de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking) prend toute son importance. Le MPPT permet d'ajuster les conditions de fonctionnement du panneau photovoltaïque pour extraire

la quantité maximale d'énergie disponible, malgré les variations d'ensoleillement et de température [3-5].

Ce mémoire se propose d'étudier les différentes techniques de suivi du point de puissance maximale appliquées aux systèmes photovoltaïques. Dans le premier chapitre, nous introduirons les concepts de base des énergies renouvelables, en mettant l'accent sur leur importance et leur impact sur l'environnement. Le deuxième chapitre sera consacré aux systèmes photovoltaïques, expliquant leur fonctionnement, leurs composants, et leurs avantages. Le troisième chapitre se focalisera spécifiquement sur les méthodes de MPPT, détaillant les principaux algorithmes utilisés et leurs principes de fonctionnement. Enfin, le quatrième chapitre présentera une discussion des résultats obtenus à partir de simulations, comparant l'efficacité des différents algorithmes de MPPT étudiés.

À travers cette analyse, nous espérons apporter une contribution significative à l'optimisation des systèmes photovoltaïques et à la promotion de solutions énergétiques plus vertes et plus efficaces.

Chapitre 1 :

Systemes Photovoltaïques

1.1.Introduction

Les systèmes photovoltaïques sont conçus pour alimenter des charges électriques. La charge peut être de type DC ou AC et, en fonction de l'application, la charge peut nécessiter de l'énergie pendant les heures de clarté ou pendant la nuit, voire 24 heures par jour. Étant donné qu'un panneau photovoltaïque ne produit de l'électricité que pendant les heures d'ensoleillement, des dispositifs de stockage de l'énergie sont nécessaires pour alimenter la charge en dehors des heures d'ensoleillement. Dans cette partie du travail, nous allons définir les trois catégories suscitées avant de nous intéresser sur le type d'alimentation autonome en clarifiant son mode de fonctionnement et les particules qui constituent ce système.

1.2.Energie renouvelable

La consommation d'énergie électrique n'a cessé d'augmenter en raison de la croissance rapide de la population et de l'économie. La consommation totale d'énergie dans le monde a augmenté de 2,9 % en 2018, atteignant 26 700 TWh en 2018, tandis que la production mondiale d'énergie a augmenté de 30 % entre 2016 et 2018. L'indice de développement humain (IDH) des Nations unies propose que la croissance de la consommation d'énergie jusqu'à environ 100 Giga Joules (GJ) par personne soit liée à l'augmentation substantielle du développement et du confort humains. Les combustibles fossiles ont contribué à près de 75 % des besoins mondiaux en électricité en 2018, entraînant une augmentation des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) [6]. Par ailleurs, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a indiqué que la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,2 °C à 0,6 °C, entraînant la disparition des calottes glaciaires, des changements massifs dans la végétation, des extinctions régionales et une élévation du niveau de la mer d'environ 120 m. Il est donc essentiel de réduire les émissions de CO₂ en introduisant des méthodes de production d'énergie renouvelable (ER) afin de remplacer la production de combustibles fossiles. Depuis une dizaine d'années, de nombreux pays ont mis en place des économies d'énergie verte avec des objectifs et des politiques visant à augmenter leur production d'ER et à réduire la consommation de combustibles fossiles. En 2018, 169 pays se sont fixé des objectifs en matière d'énergies renouvelables et 150 pays ont consacré des fonds à la recherche et au développement dans ce domaine, avec des politiques de soutien [7].



Figure 1.1 : Les Energies Renouvelables [8].

Les énergies renouvelables, aussi appelées énergies alternatives car pour les spécialistes et les politiciens ce type est utilisé en attendant de trouver des sources d'énergies 100% vertes et non polluantes, sont des sources dont l'approvisionnement n'est pas limité, se reconstituent naturellement et sont considérées comme durable à l'échelle humaine. Contrairement aux différentes sources citées ci-dessus, qui contribuent fortement à la pollution et aux perturbations climatiques, de plus de sa limitation naturelle. Sans épuisé les ressources terrestre, ce type repose sur des processus naturels qui peuvent être exploité pour la production de l'électricité.

La technologie des énergies renouvelable est toujours en cours de développement afin de minimiser au maximum la pollution, et pour le moment nous pouvons distinguer plusieurs manières de production de l'énergie à travers des sources renouvelables et la plus utilisée sont de source solaire. Nous montrons dans cette section les différentes façons de production :

1.2.1. Eolien

Les éoliennes, comme les moulins à vent, captent l'énergie du vent à l'aide de pales en forme d'hélice. Ces pales peuvent avoir un axe horizontal, comme un ventilateur, ou vertical, comme un manège. La conception la plus courante est une grande tour avec trois grandes pales sur un axe horizontal [9]. Mais certaines éoliennes à axe vertical ressemblent à des batteurs d'œufs, tandis que d'autres ressemblent aux moulins à vent qui peuplaient les fermes il y a un siècle.

Contrairement aux ventilateurs, qui utilisent l'électricité pour déplacer l'air, les éoliennes utilisent l'air en mouvement pour produire de l'électricité. Lorsque le vent souffle, sa force fait tourner les pales, ce qui fait fonctionner un générateur et crée de l'électricité propre. Mais certaines conceptions d'éoliennes peuvent produire plus d'énergie propre que d'autres. Par exemple, comme les vents peuvent être plus puissants et moins volatils plus haut dans l'atmosphère, le fait de placer les éoliennes sur des tours de 30 mètres de haut peut les aider à produire plus d'électricité [10]. Les opérateurs d'éoliennes peuvent également déplacer leurs machines pour les placer directement face au vent, une technique appelée «embardée».

1.2.2. Hydraulique

Les technologies hydroélectriques produisent de l'énergie en utilisant la différence d'altitude, créée par un barrage ou une structure de dérivation, de l'eau qui s'écoule d'un côté et de l'autre, bien en dessous [11].

Les centrales hydroélectriques sont généralement situées dans des barrages qui retiennent les rivières, élevant ainsi le niveau de l'eau derrière le barrage et créant une hauteur de chute aussi élevée que possible. La puissance potentielle qui peut être tirée d'un volume d'eau est directement proportionnelle à la hauteur de chute, de sorte qu'une installation à haute chute nécessite un volume d'eau plus faible qu'une installation à basse chute pour produire une quantité égale d'énergie. Dans certains barrages, la centrale est construite sur l'un des flancs du barrage, une partie du barrage étant utilisée comme déversoir par lequel l'excès d'eau est évacué en période de crue. Lorsque la rivière coule dans une gorge étroite et escarpée, la centrale peut être située dans le barrage lui-même [12].

1.2.3. Solaire

L'énergie solaire est l'énergie du soleil qui est convertie en énergie thermique ou électrique. L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus propre et la plus abondante qui soit, et l'Algérie dispose de certaines des ressources solaires les plus riches au monde. Les technologies solaires permettent d'exploiter cette énergie à diverses fins, notamment pour produire de l'électricité, fournir de la lumière ou un environnement intérieur confortable, et chauffer de l'eau à des fins domestiques, commerciales ou industrielles [13].

La méthode utilisée et l'énergie exploitée dépend du besoin. Nous utilisons la méthode chauffe-eau pour des besoins domestiques par exemple, mais la méthode la plus couramment utilisée, via sa disponibilité et la facilité d'usage reste l'énergie des panneaux photovoltaïques

qui permet d'extraire de l'électricité à l'aide de l'irradiation solaire et la température qui augmente le rendement.

- La biomasse, considérée par une partie des spécialistes comme étant une source d'énergie renouvelable, contrairement à une autre qui la considère inversement pour cause de son non renouvelabilité dans toutes les parties du monde [14].

Nous distinguons à cet effet plusieurs systèmes d'énergies qui proviennent de source solaire, les principaux sont décidément l'énergie solaire thermique et l'énergie photovoltaïque :

1.2.3.1. Energie Solaire thermique

L'énergie solaire thermique (ETC) désigne la chaleur générée par le rayonnement solaire. Cette énergie est utilisée dans des applications industrielles, commerciales et résidentielles par le biais de différentes technologies, notamment la production de vapeur, les systèmes de chauffage, les systèmes de refroidissement et même la production d'électricité. Elle peut produire des températures allant de 45°C à plus de 300°C, ce qui la rend potentiellement utile pour un large éventail de secteurs tels que l'exploitation minière, l'alimentation et les boissons, ainsi que la fabrication de textiles, la production de produits chimiques et la fabrication de pâte à papier [15].

1.2.3.2. Energie photovoltaïque

Qui consiste, en effet, le sujet de notre étude. La technologie photovoltaïque, souvent abrégée en PV, représente une méthode révolutionnaire pour exploiter l'énergie solaire et la convertir en électricité. Elle repose sur le principe de l'effet photovoltaïque, selon lequel certains matériaux génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil [16].

Photovoltaïque signifie littéralement "lumière-électricité", car "photo" est un dérivé du mot grec "phōs" qui signifie lumière et "Volt" est une abréviation du nom d'Alessandro Volta (1745-1827), pionnier de l'étude de l'électricité.

La conversion de l'énergie solaire en électricité s'effectue dans un dispositif semi-conducteur appelé cellule solaire. Une cellule solaire est une unité qui fournit une certaine quantité d'énergie électrique caractérisée par une tension et un courant de sortie. Afin d'utiliser l'électricité solaire pour des appareils pratiques, qui nécessitent une tension ou un courant particulier pour leur fonctionnement, un certain nombre de cellules solaires sont connectées entre elles pour former un panneau solaire, également appelé module photovoltaïque. Pour la

production d'électricité solaire à grande échelle, les panneaux solaires sont reliés entre eux pour former un champ solaire.

Les panneaux solaires font partie d'un système solaire photovoltaïque complet qui, selon l'application, comprend des batteries pour le stockage de l'électricité, des onduleurs DC-AC qui connectent un système solaire photovoltaïque au réseau électrique, et d'autres composants électriques divers ou éléments de montage. Ces éléments supplémentaires du système solaire photovoltaïque constituent une deuxième partie du système, appelée "équilibre du système" (BOS). Enfin, le système solaire comprend des produits tels que des appareils ménagers, des postes de radio ou de télévision qui utilisent l'électricité solaire pour leur fonctionnement. Nous désignons ces produits par le terme "charge".



Figure 1.2 : Panneaux Photovoltaïques.

1.3. Configuration d'un système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en plusieurs catégories : les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, les systèmes photovoltaïques autonomes et les systèmes photovoltaïques hybrides. Dans les systèmes photovoltaïques autonomes et les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, des éléments de stockage tels que des batteries ou des super condensateurs peuvent être adoptés pour stocker l'énergie pendant la journée lorsque

l'ensoleillement est suffisant. Les systèmes hybrides et autonomes sont de plus en plus utilisés dans les zones reculées.

1.3.1. Système PV connecté au réseau

Le système photovoltaïque relié au réseau via un onduleur de haute qualité, pour convertir le courant continu du champ photovoltaïque en un autre courant alternatif conforme aux normes du réseau.

L'énergie obtenue par le champ PV pendant la journée peut être divisé en deux. Elle est soit consommée immédiatement, soit revendue au fournisseur d'électricité. Le soir, le système n'est pas en mesure de produire de l'énergie et le consommateur consomme l'électricité fournie (vendue) par le distributeur. Ainsi montrer dans la figure suivante :

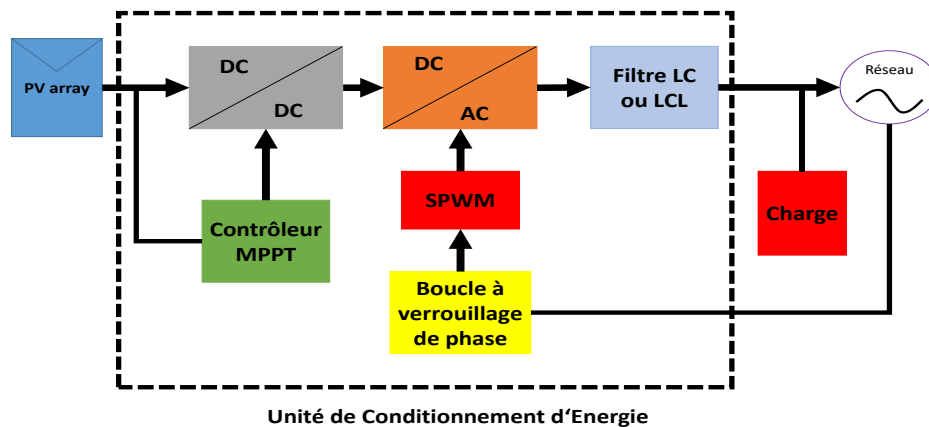


Figure 1.3 : Système Photovoltaïque Connecté au Réseau.

1.3.2. Système PV hybride

Les systèmes de panneaux solaires hybrides sont synonymes de systèmes solaires connectés au réseau dans la mesure où ils stockent dans des batteries de l'énergie pour une utilisation ultérieure car, en cas de panne de courant ou de black-out local, l'énergie stockée dans les systèmes hybrides fournit de l'énergie similaire à une alimentation électrique sans interruption (UPS). En général, les systèmes solaires hybrides s'appuient sur deux ou plusieurs sources de production d'énergie, telles que le vent et le soleil, et peuvent être mieux décrits comme des systèmes intégrés.

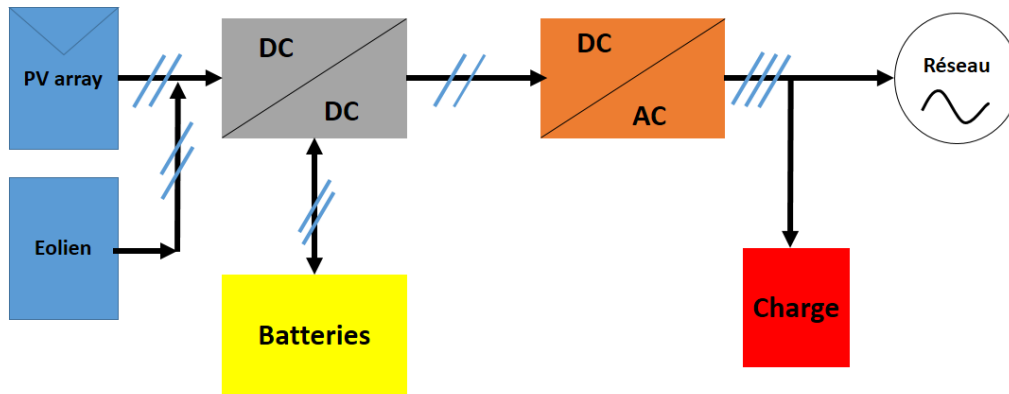


Figure 1.4 : Système Photovoltaïque Hybride.

1.3.3. Système PV autonome

Un système autonome est celui qui est directement connecté à la charge sans connexion au réseau électrique. Ces systèmes solaires photovoltaïques sont généralement dotés d'un dispositif de stockage de l'énergie. Comme un système PV autonome n'est pas connecté au réseau, il doit disposer d'une batterie ou d'une source auxiliaire pour compléter les besoins de la charge pendant les heures de la nuit ou lorsque le rayonnement solaire n'est pas disponible.

Le système autonome est considéré comme l'un des moyens les plus économiques à la réalisation d'un système photovoltaïque, en particulier pour les applications dans les zones rurales qui ont de grandes périodes de rayonnement solaire intense et n'ont pas accès au réseau principal de distribution. Les systèmes photovoltaïques sont conçus pour répondre aux besoins de la charge de la meilleure manière possible. Cela dépend du type de charge (AC ou DC, légère ou lourde), du type d'exigence de la charge (critique ou non critique) et du type de situation géographique (ressources éoliennes, sources solaires, proximité, etc.). La configuration d'un système solaire photovoltaïque peut être très simple, incorporant seulement deux composants : la charge et le module photovoltaïque, ou très complexe, contenant plusieurs sources d'énergie, des contrôleurs intelligents et diverses unités de stockage d'énergie pour répondre au renforcement de la demande du côté de la charge. Le choix de la formation du système dépend principalement des exigences de la charge, de la disponibilité des ressources, de la performance du système, de sa fiabilité et de son coût. Les configurations des systèmes photovoltaïques autonomes peuvent être classées dans les cinq catégories suivantes :

- Type A : Système autonome non régulé avec charge DC.
- Type B : Système autonome régulé avec charge DC.
- Type C : Système autonome régulé avec batterie et charge DC.

- Type D : Système autonome régulé avec batterie et charges AC et DC.
- Type E : Système hybride régulé avec charges AC et DC.

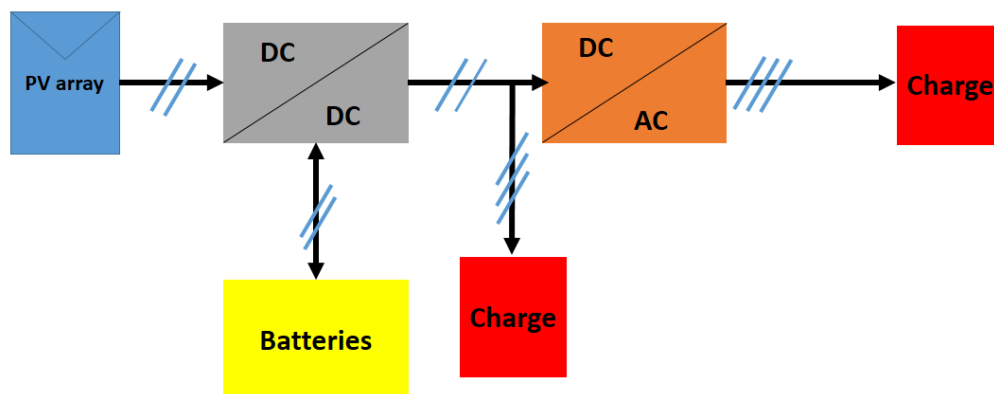


Figure 1.5 : Système Photovoltaïque Autonome.

1.4.Modèle de module PV

De nombreux modèles de cellules photovoltaïques avec différentes configurations en fonction des besoins d'utilisation sont disponibles dans la littérature. Dans ce travail, le modèle, photovoltaïque utilisé, qui les MSX60, est basé sur l'équation définissant le comportement statique d'une diode à jonction PN conventionnelle. Le circuit équivalent d'une cellule PV est illustré à la figure 1. Ce modèle comprend un générateur de courant continu I_{ph} qui modélise la conversion de l'énergie électrique en flux lumineux parallèlement à la modélisation de la diode à jonction PN, une diode et deux résistances R_p et R_s caractérisant respectivement les courants et les fuites à la jonction des différentes résistances de connexion des contacts [17].

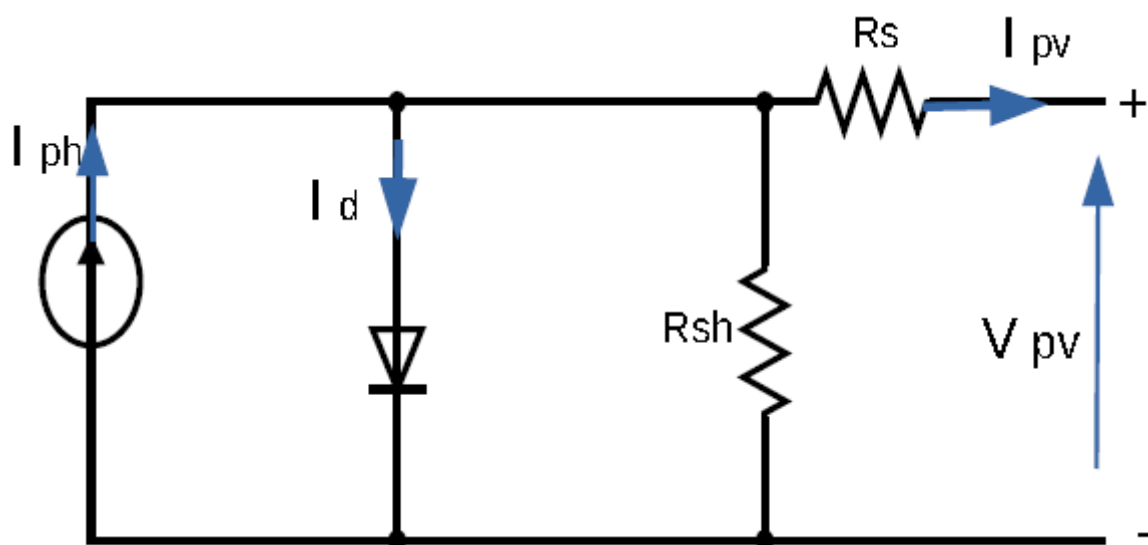


Figure 1.6 : modèle type d'un module PV [18].

1.5. Modélisation d'un module PV

La caractéristique V-I du circuit équivalent de la cellule solaire peut être déterminée par les équations suivantes. Le courant à travers la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \times \left(\exp\left(\frac{q(V + R \times I)}{A \times k \times T}\right) - 1 \right) \quad (1.1)$$

Alors que le courant de sortie de la cellule solaire :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp\left(\frac{q(V + R \times I)}{A \times k \times T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \times I}{R_p} \quad (1.2)$$

Avec, I_0 courant de saturation de la diode (A); q charge des électrons ($1,6 \times 10^{-19}$ C); A facteur d'idéalité de la diode; k la constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K); T températures de la cellule (K).

Un module photovoltaïque est l'élément de base de chaque système photovoltaïque. Il se compose de nombreuses cellules photovoltaïques connectées entre elles. L'équation du circuit équivalent d'un module pour N_s cellules PV en série conduit à l'équation (1.3).

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp\left(\frac{q(V + R_{se} \times I)}{N_s \times A \times k \times T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_{se} \times I}{R_{pe}} \quad (1.3)$$

Ou R_{se} résistances série équivalentes ($R_{se} = N_s \times R_s$); R_{pe} résistances parallèles équivalentes ($R_{pe} = N_s \times R_p$);

Les caractéristiques I-V et P-V dans des conditions de température standard (STC) sont indiquées dans les figures 1.9.

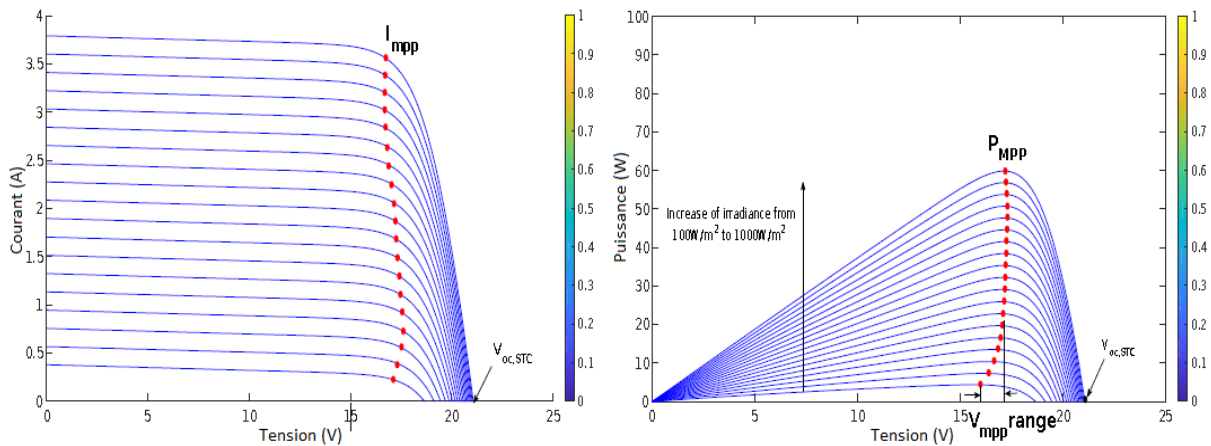


Figure 1.7 : Les caractéristiques I-V et P-V d'un module [19].

Les caractéristiques P-V n'a qu'un seul point maximal appelé MPP (Maximal Power Point).

1.6. Effet de changement de paramètre sur les caractéristiques du module PV

Les figures 1.10 présentes les caractéristiques I-V et P-V pour différentes irradiations avec une température fixe de 25°C. Comme nous pouvons le voir sur ces figures, le courant du module est proportionnel au rayonnement, tandis que la tension en circuit ouvert varie légèrement avec l'irradiation.

Le **tableau 1** illustre les valeurs des différents MPP pendant la variation de l'irradiation, le MPP augmente de 24,85 pour une irradiation de 400 W/m² à 62,2 pour une irradiation de 1000 W/m². Ainsi, l'augmentation de l'irradiation permet l'augmentation du MPP.

Tableau 1.1 : Les différentes valeurs du MPP lors de la variation de l'irradiation

Irradiation en (W/m ²)	400	600	800	1000
Puissance en (W)	24.85	37.53	50	62.2

La température est également un paramètre important dans le comportement du module PV. Les figures 1.10 (a et b) montrent que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension en circuit ouvert.

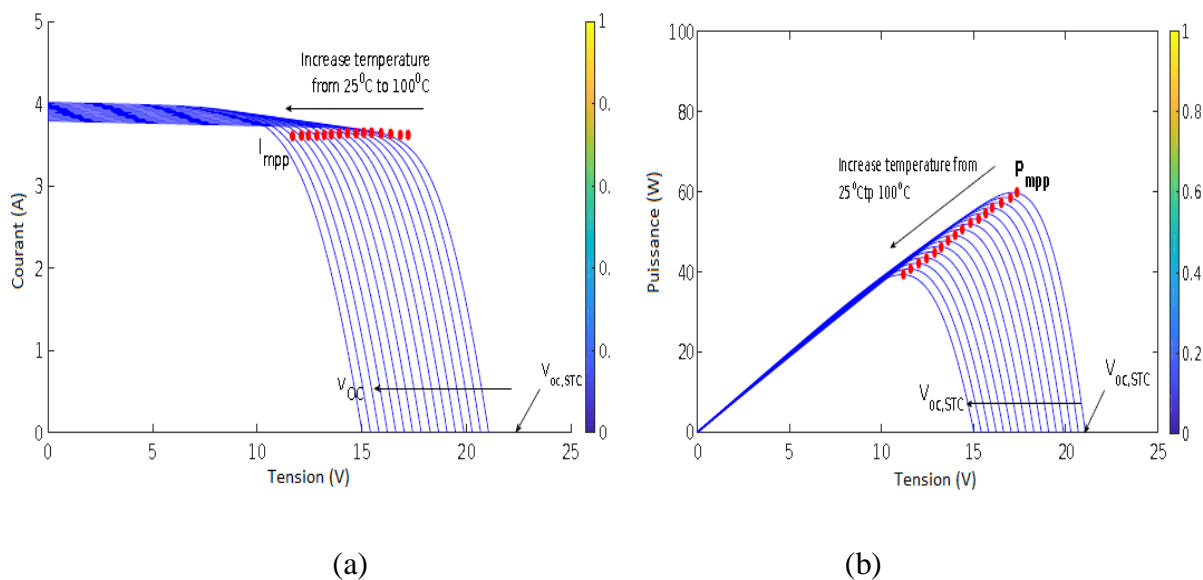


Figure 1.8 : Effet de la température sur (a) : les caractéristiques I-V (b) : les caractéristiques P-V [20].

Le Tableau 1.2 Valeurs des différents MPP lors de la variation de la température :

Température (°C)	10	25	40	55
Puissances (W)	64.89	62.2	59.47	56.72

Le tableau 2 montre les valeurs des différents MPP pendant la variation de la température, le MPP diminue de 64,89 pour une température de 10°C à 56,72 pour une température de 55°C. Ainsi, l'augmentation de la température permet la diminution du MPP.

Dans ces conditions, le MPP du réseau photovoltaïque change continuellement. Par conséquent, le point de fonctionnement du système photovoltaïque doit être modifié pour maximiser l'énergie produite. Une technique MPPT est donc utilisée pour maintenir le point de fonctionnement du module PV à son MPP.

1.6.1. Modélisation des conditions d'ombrage

En règle générale, le générateur photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle pour répondre aux exigences de courant et de tension de la charge, comme le montre la figure ... Selon la zone d'installation, l'ensemble du réseau PV peut ne pas être exposé au même niveau d'irradiation, en particulier dans les zones tropicales, ce qui crée le PSC (Partial shading condition) qui est généralement causé par l'ombre de bâtiments élevés, d'arbres, de nuages, etc.

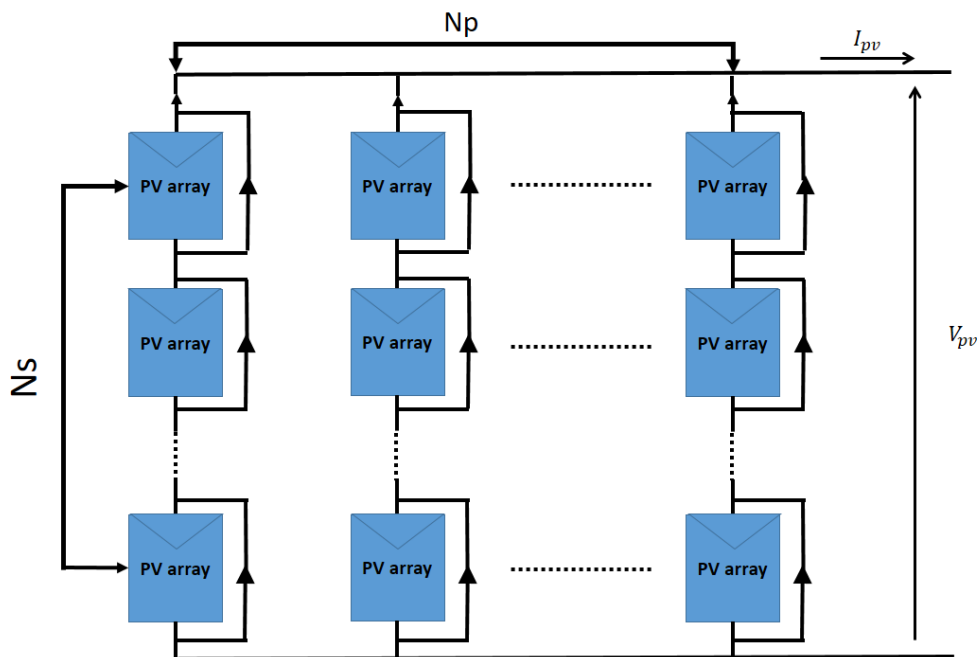


Figure 1.9 : configuration du réseau Photovoltaïque.

Le courant de sortie du générateur photovoltaïque est donné par l'équation suivante :

$$I = N_p(I_{ph} + I_o) \left[\exp\left(\frac{1}{V_{therm}} \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + R_s \frac{I_{pv}}{N_p}\right)\right) \right] - \frac{N_p}{R_{SH}} \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + R_s \frac{I_{pv}}{N_p}\right) \quad (1.4)$$

Où I_{ph} est le photo-courant, N_p les cellules parallèles, I_o le courant de fuite de la diode, V_{therm} la tension thermique de la cellule, k la constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/ K), T la température de la jonction p-n, q la charge électronique ($1.60217646 \times 10^{-19}$), n ($1 \leq n \leq 1.5$) le facteur d'idéalité de la cellule, N_s les cellules en série, R_s la résistance en série, et R_{sh} la résistance en dérivation. Afin d'analyser l'effet PSC sur le module PV, trois modules PV sont connectés en série, comme la montre la figure Lorsque le PSC se produit, les modules de la chaîne ne sont pas uniformément éclairés. Les modules ombragés produisent moins de courant que les modules non ombragés. Par conséquent, les modules ombragés conduisent dans la zone de polarisation inverse, tandis que les modules non ombragés conduisent dans la zone de polarisation directe, comme l'illustre la figure 1.12

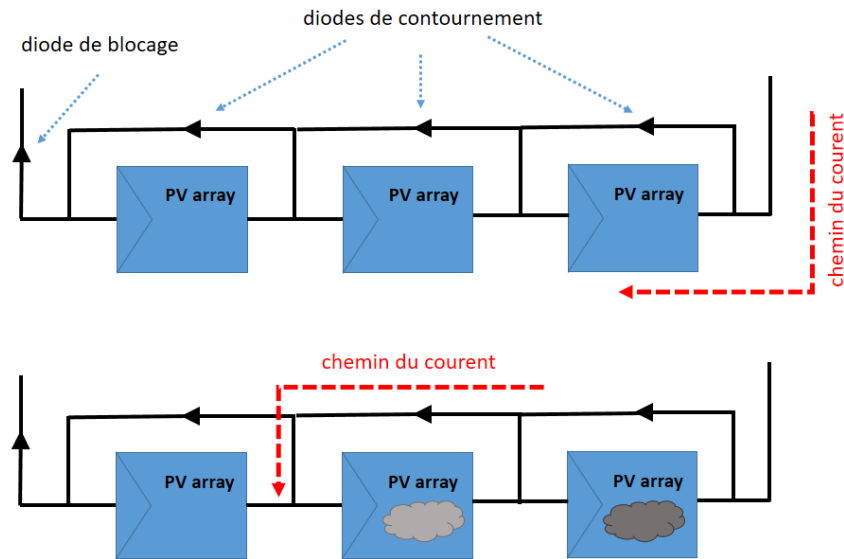


Figure 1.10 : Structure du réseau PV.

Par conséquent, le module ombragé se comporte comme une charge et consomme du courant, ce qui provoque des points chauds à la surface du panneau. Cela peut endommager de manière permanente les cellules photovoltaïques. C'est pourquoi des diodes de dérivation sont utilisées en parallèle sur chaque module PV pour éviter les points chauds dans des conditions de déséquilibre. En outre, une diode de blocage doit également être ajoutée en série avec chaque

chaîne pour éviter le flux de courant inverse. La conduction de la diode de dérivation sous PSC transforme la courbe P-V d'une forme concave à des pics multiples. D'autre part, un escalier est créé sur la courbe I-V, comme le montre la figure 1.7. Dans de telles conditions d'inadéquation, l'efficacité du système PV sera considérablement réduite si un MPPT inadapté est utilisé. Dans le chapitre suivant, différents systèmes MPPT sont examinés dans des conditions d'ombrage partiel.

1.7. Convertisseurs DC-DC

Afin de maintenir une efficacité énergétique élevée de la chaîne photovoltaïque, les modules sont toujours couplés à la charge via un convertisseur DC-DC à commutation pour obtenir le point de puissance maximal. Par conséquent, pour éviter une consommation électrique et un échauffement excessif des composants électroniques, les composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les interrupteurs de puissance doivent être sélectionnés en fonction du niveau de puissance à convertir ou à commander. Les MOSFET (transistors à effet de champ à oxyde métallique) sont généralement utilisés à des puissances relativement faibles (plusieurs kilowatts), tandis que les IGBT (transistors bipolaires à grille isolée) sont utilisés à des puissances plus élevées. Les thyristors sont devenus couramment utilisés et acceptés aux niveaux de puissance les plus élevés.

A cet effet, il existe différents type de convertisseurs continue-continue, nous pouvons les exposés comme suit :

1.7.1. Convertisseur Abaisseur

Aussi appelé convertisseur abaisseur, ce type est constitué, comme montrer dans la figure suivante, d'une source de tension d'entrée continue V_o , d'un commutateur S, une diode, une inductance L, un condensateur C ainsi qu'une charge résistive R.

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux phases selon l'état du commutateur. En effet, lors de l'état bloquant de ce dernier, la tension est appliquée aux bornes de la diode et l'interrupteur est commandé à une fréquence de découpage ainsi que la source fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Tandis que dans l'état passant, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée commande la circulation du courant dans la diode de roue libre. La tension est donc nulle à ses bornes [21].

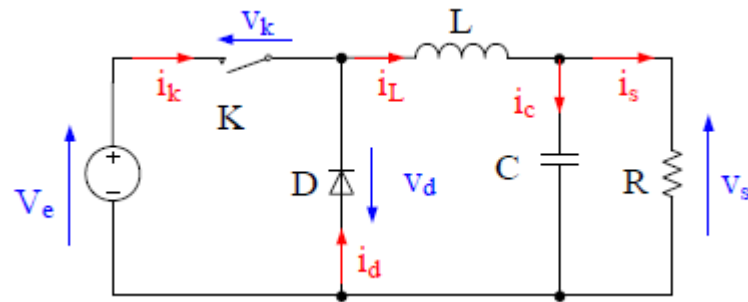


Figure 1.13 : Schéma équivalent du convertisseur Buck.

La tension de sortie par rapport à la tension d'entrée est donnée comme suit :

$$V_e = \alpha V_s \quad (1.5)$$

1.7.2. Convertisseur Elévateur

Contrairement au type susmentionné, le convertisseur Boost, aussi appelé un hacheur parallèle, est un convertisseur élévateur.

Son fonctionnement peut être divisé en deux parties. La première consiste à phase est lorsque le MOSFET est dans l'état fermé, avec la diode bloquée, ce qui fait que la charge est déconnectée de l'alimentation, le stockage d'une quantité d'énergie ce fait, dans ce cas, via l'augmentation du courant dans inductance. Dans le cas contraire, ou le MOSFET est dans l'état bloquant (ouvert), l'inductance est en série avec la source. Dans ce fait, le courant traverse la diode, le condensateur et la charge [22].

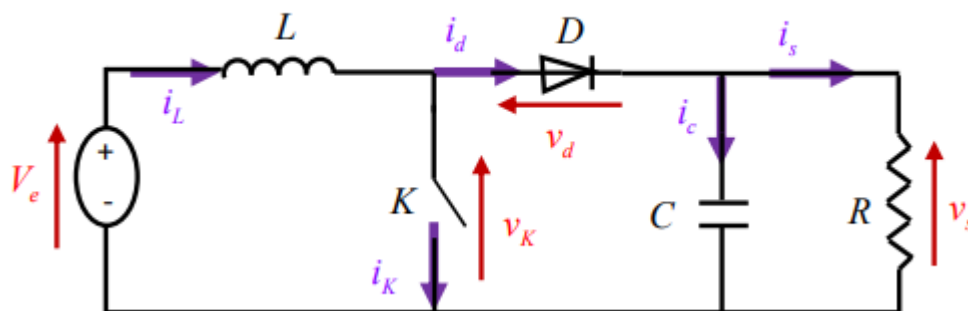


Figure 1.14 : Schéma équivalent du convertisseur Boost.

La tension d'entrée par rapport à la tension d'entrée peut être exprimée comme :

$$V_e = \frac{1}{1 - \alpha} V_s \quad (1.6)$$

1.7.3. Convertisseur Abaisseur-Elévateur

Le convertisseur Buck Boost, le convertisseur que nous allons utiliser dans notre travail, est un sujet intrigant du point de vue du contrôle, en raison de sa non-linéarité intrinsèque. Les approches de contrôle courantes, telles que le contrôle de la tension et le contrôle du courant injecté, nécessitent une bonne connaissance du système et un réglage précis afin d'obtenir des performances [23].

1.7.3.1. Principe

Le convertisseur Buck-Boost est une topologie de base du convertisseur DC-DC en mode puissance qui combine le principe du convertisseur Buck avec le convertisseur Boost. Il fonctionne en contrôlant le cycle de travail d'un commutateur pour réguler la tension de sortie qui peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée fixe.

1.7.3.2. Calcul des paramètres du convertisseur Buck-Boost

L'inductance et le condensateur du convertisseur buck-boost sont calculés selon les équations de conception standard suivante :

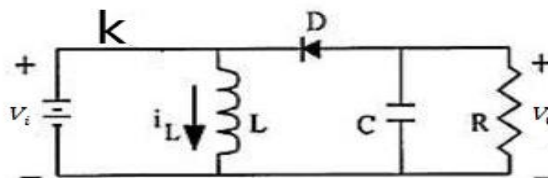
$$\frac{V_o}{V_{pv}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (1.7)$$

$\frac{V_o}{V_{pv}}$ est au maximum lorsque V_o est au maximum et V_{pv} est au minimum

$\frac{V_o}{V_{pv}}$ est au minimum lorsque V_o est au minimum et V_{pv} est au maximum

$$D_{max} = 90\% , D_{min} = 16\% \quad (1.8)$$

- **Analyse pour l'interrupteur Q1 fermé :**



Lorsque l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes de l'inducteur est de

$$V_L = V_{PV} = \frac{L di_L}{dt} \frac{\Delta i_L}{2} \quad (1.9)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{pv}}{L} \quad (1.10)$$

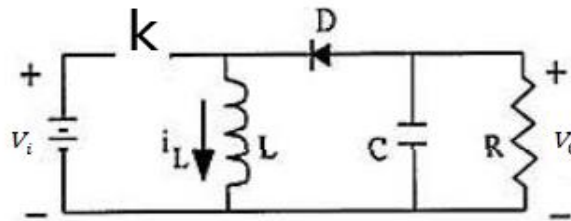
$$\Delta i_L = \frac{V_{pv} DT}{L} \quad (1.11)$$

$$L_{min} > \frac{V_{pv,min} D_{min}}{f \Delta i_L} = 0.28 \text{ mH} \quad (1.12)$$

Où $V_{O,max}$ est la tension de sortie maximale qui peut être supportée par le condensateur de sortie (200 V), $V_{pv,min}$ est la tension d'entrée minimale du module PV qui correspond à $V_{MP,STC,module}$ (17 V), $V_{pv,max}$ est la tension d'entrée maximale de la matrice PV qui correspond à $V_{oc,STC,array}$ (100), D_{min} est le rapport cyclique minimal, D_{max} est le rapport cyclique maximal, et I_{max} est le courant maximal de l'inducteur (6 A). Pour un courant continu, le courant de l'inducteur doit rester positif. Δi_L (Variation du courant inducteur) est considéré comme 5 % du courant inducteur moyen.

Comme pour le dimensionnement des inductances, en connaissant les ondulations de tension admissibles ($\Delta V_{C1} = \Delta V_{C2} = 5\%$), ($R = 40 \Omega$) ($f = 50 \text{ kHz}$) les ondulations de tension admissibles, les condensateurs appropriés peuvent être sélectionnés.

- **Analyse pour l'interrupteur Q1 ouvert :**



Lorsque l'interrupteur est ouvert, la tension aux bornes de l'inductance est de

$$V_L = V_{PV} = V_{C1} \quad (1.13)$$

$$C_1 \frac{\Delta V_{C1}}{\Delta t} = i_{pv} \quad (1.14)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_{pv}(1-D)T}{C_1} \quad (1.15)$$

$$C_1 > \frac{I_{pv,max} (1-D_{min})}{f \Delta v_{c1}} = 1216 \mu F \quad (1.16)$$

$$V_L = V_{C1} = V_o \quad (1.17)$$

$$C_2 \frac{\Delta V_{C2}}{\Delta t} = \frac{V_o}{R} \quad (1.18)$$

$$\Delta V_{C2} = \frac{V_o(1-D)T}{C_2R} \quad (1.19)$$

$$C_2 > \frac{V_{o,max}(1-D_{min})}{\Delta V_{C2}fR} = 1600 \mu F \quad (1.20)$$

Pour s'assurer que le convertisseur Buck-Boost proposé fonctionne en CCM, les valeurs finales des composants passifs doivent être supérieures aux valeurs minimales.

1.8. Batteries

Pour les éléments de stockage, nous utilisons un dispositif rechargeable. La fonction première du système de stockage par batterie est d'harmoniser le système photovoltaïque sur site avec le réseau, afin d'apporter un maximum d'avantages au réseau, à l'environnement et aux occupants.

Harmonisation des réseaux : Pour les besoins des normes de construction, l'harmonisation du réseau est définie comme des stratégies et des mesures qui harmonisent les ressources énergétiques distribuées appartenant aux clients avec le réseau afin de maximiser l'auto-utilisation de la production des panneaux photovoltaïques et de limiter les exportations vers le réseau aux périodes bénéfiques pour le réseau et le contribuable. Pour ce faire, les batteries du système photovoltaïque est chargée lorsque la charge électrique du bâtiment est limitée, et déchargée en soirée lors de l'absence de source d'énergie [24].

1.8.1. Types de batteries

Une batterie est composant constitué de plusieurs cellules utilisées afin de stocker de l'énergie et qui convertit dans le même temps, de l'énergie chimique en énergie électrique. Pour ce fait, il existe trois principaux types de batteries : les batteries Plomb/Acide, les batteries Nickel-Métal-Hydrure ainsi que les batteries Lithium-Ion.

1.8.1.1. Les batteries Plomb/Acide

Ce type de batteries existe depuis plus de 150ans, utilisées en grande partie dans les voitures. Son avantage réside dans sa robustesse et coût minime. L'inconvénient de cette catégorie est la durée de vie courte, une efficacité moindre et une densité énergétique faible [25].

1.8.1.2. Les batteries Nickel-Métal hydride

Elles ont été inventées fin des années 1970 à l'institut Battelle de Genève, développées au cours des décennies qui ont suivi. Elles ont été mises au marché au début des années 1990. Leur énergie spécifique est d'ordre de 60-120 Wh/Kg, tandis que son énergie volumique est d'ordre de 150-300 Wh/L [26].

Malgré que ce type de batteries a été dominé et quasiment remplacé par les batteries Lithium-ion mais elles restent tout de même moins coûteuses que ces dernières, et elles n'utilisent pas de cobalt, qui s'avère difficile à approvisionner et pose des enjeux humains et environnementaux, ni aussi le cadmium dont le relâchement accidentel peut conduire à des problèmes grave pour l'environnement et aussi pour la santé humaine.

1.8.1.3. Les batteries Lithium-ion

Représente la nouvelle génération de batteries qui est en train de prendre de la place dans le monde énergétique, jusqu'à en devenir omniprésent dans notre quotidien à commencer par les téléphones portables à en arriver aux véhicules électriques. Les batteries en Lithium-Ion, inventée pendant les années 1970 mais n'ont été commercialisés qu'en début des années 1990, à l'issue d'un long processus de développement technologique [27].

Les batteries lithium-ion actuelles sont constituées d'une électrode négative au carbone (graphite), d'un électrolyte à solvant organique (généralement des carbonates d'alkyles) dans lequel on dissout du sel de lithium et d'une électrode positive à base d'oxyde de métal constituée de composés d'insertion. Nous pouvons distinguer les batteries lithium-ion et les batteries lithium-ion polymère. Les batteries lithium-ion polymère ont la particularité d'être composées d'un électrolyte en gel de polymère (oxyde de polyéthylène ou poly-acrylonitrile) contenant des sels de lithium ce qui limite les fuites d'électrolyte. Elles sont plus résistantes à la surcharge et ont un plus long cycle de vie. Néanmoins, pour une température équivalente, leur conductivité ionique est inférieure à celle d'un électrolyte liquide. Dans le cas des batteries lithium-ion, l'électrolyte le plus largement utilisé est constitué de sel LiPF₆ dissout dans un solvant, généralement issu d'un mélange de carbonate d'éthylène (EC), de carbonate de propylène (PC) et de carbonate d'éthyle méthyle(EMC) [28].

1.9. Conclusion

De ce fait, les systèmes photovoltaïques ont plusieurs types, soit les hybrides, les autonomes et ceux connectés aux réseaux, chacun d'entre eux a sa propre configuration qui peut varier selon la méthode de connexion et de charge. Les différentes catégories de convertisseurs, à savoir le convertisseur Buck, le convertisseur Boost et le convertisseur Buck-Boost, ainsi que les divers types de batteries, sont spécifiques à chaque système PV et sont utilisés selon les besoins environnementaux et ont un impact considérable sur ce dernier, selon la commande MPPT que nous mettrons en avant dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT)

2.1.Introduction

Un panneau solaire typique ne convertit que 30 à 40 % du rayonnement solaire incident en énergie électrique. La technique de suivi du point de puissance maximale est utilisée pour améliorer l'efficacité du panneau solaire.

Selon le théorème du transfert de puissance maximale, la puissance de sortie d'un circuit est maximale lorsque l'impédance de Thevenin du circuit (impédance de la source) correspond à l'impédance de la charge. Par conséquent, notre problème de suivi du point de puissance maximale se réduit à un problème d'adaptation d'impédance.

Du côté de la source, nous utilisons un convertisseur Buck-Boost connecté à un panneau solaire afin d'éviter les perturbations de la tension de sortie pour qu'elle puisse être utilisée pour différentes applications telles que la charge du moteur.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents algorithmes MPPT que nous utiliserons dans notre étude.

2.2.Les algorithmes MPPT

Les algorithmes de recherche locale, dont la perturbation et l'observation (P&O) et la conductance incrémentale (INC), sont bien connus et constituent les méthodes les plus couramment utilisées pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques, en raison de leur structure simple [29]. Cependant, ces algorithmes ne sont capables que d'effectuer une recherche locale (lorsqu'un seul pic est présent dans la courbe P-V) en raison de leur codage inhérent pour différencier le pic maximal global GMP et le pic maximal local LMP, ce qui peut entraîner une perte d'énergie considérable en cas de conditions d'ombrage partiel [30]. Cependant, les méthodes de recherches globales sont indispensables en cas de condition d'ombrage partiel. Par conséquent, cette dernière méthode citée peut être divisée en deux catégories, la méthode Soft-Computing ainsi que la méthode de Plage de Tension Réduite, comme montré dans la figure 2.1.

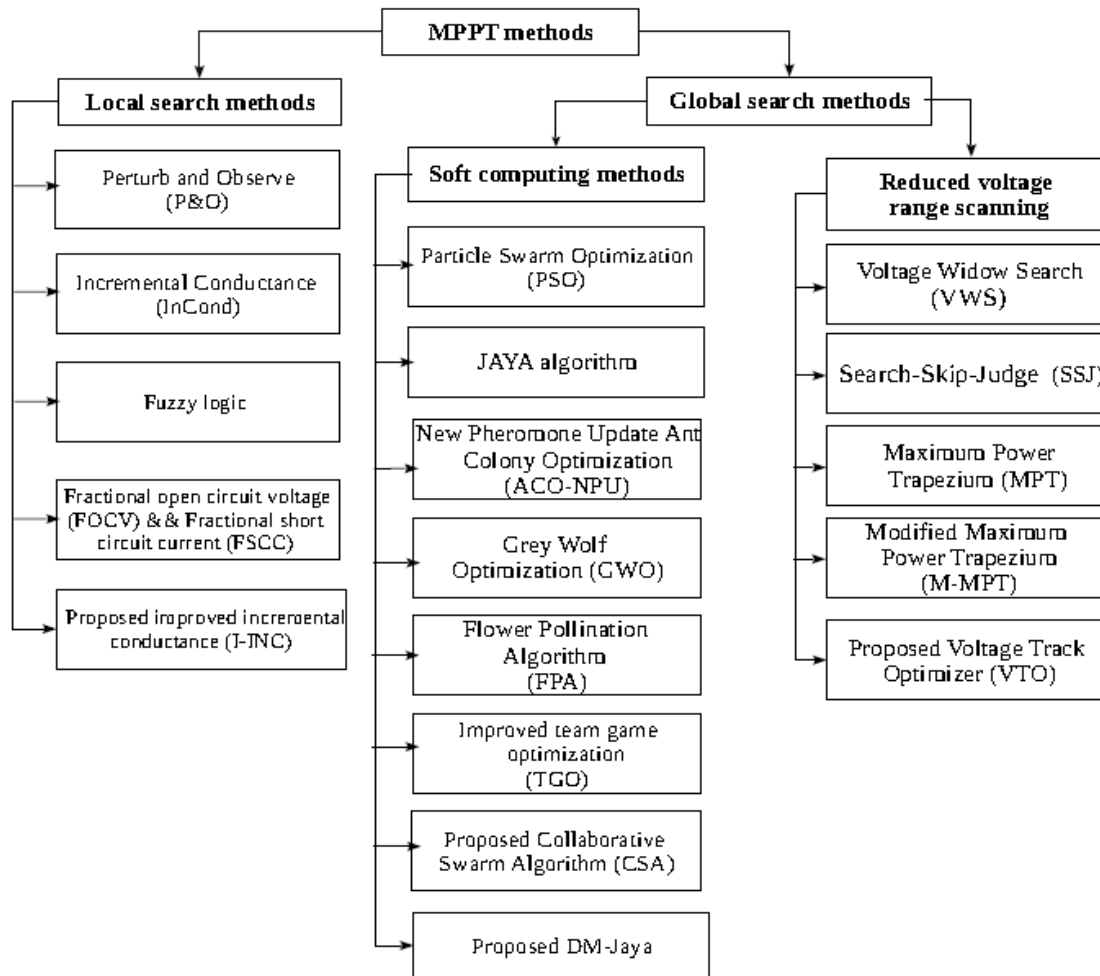


Figure 2.1 : Catégories d'algorithmes MPPT [32].

2.2.1. Méthodes de Recherche locales (Local Search Methods)

Les algorithmes de recherche locale, dont la perturbation et l'observation (P&O) et la conductance incrémentale (INC), sont bien connus et constituent les méthodes les plus couramment utilisées pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques, en raison de leur structure simple [31]. Cependant, ces algorithmes ne sont capables que d'effectuer une recherche locale (lorsqu'un seul pic est présent dans la courbe P-V) en raison de leur codage inhérent pour différencier le pic maximal global GMP et le pic maximal local LMP, ce qui peut entraîner une perte d'énergie considérable en cas de conditions d'ombrage partiel [33].

2.2.1.1. Perturbation et Observation P&O

La méthode Perturb & Observe (P&O) est la plus simple. Dans cette méthode, nous utilisons deux capteurs, à savoir le capteur de tension et le capteur de courant, pour détecter la tension du panneau photovoltaïque, ce qui réduit le coût de la mise en œuvre et la rend facile à

appliquer. La complexité temporelle de cet algorithme est très faible, mais lorsqu'il s'approche du MPP, il ne s'y arrête pas et continue à le perturber dans les deux directions. Lorsque cela se produit, l'algorithme s'est rapproché du MPP et nous pouvons fixer une limite d'erreur appropriée ou utiliser une fonction d'attente qui finit par augmenter la complexité temporelle de l'algorithme.

Cependant, la méthode ne tient pas compte du changement rapide du niveau d'irradiation (en raison duquel le MPPT change) et le considère comme un changement du MPP dû à une perturbation et finit par calculer un MPP erroné. Pour éviter ce problème, nous pouvons utiliser la méthode de conductance incrémentale.

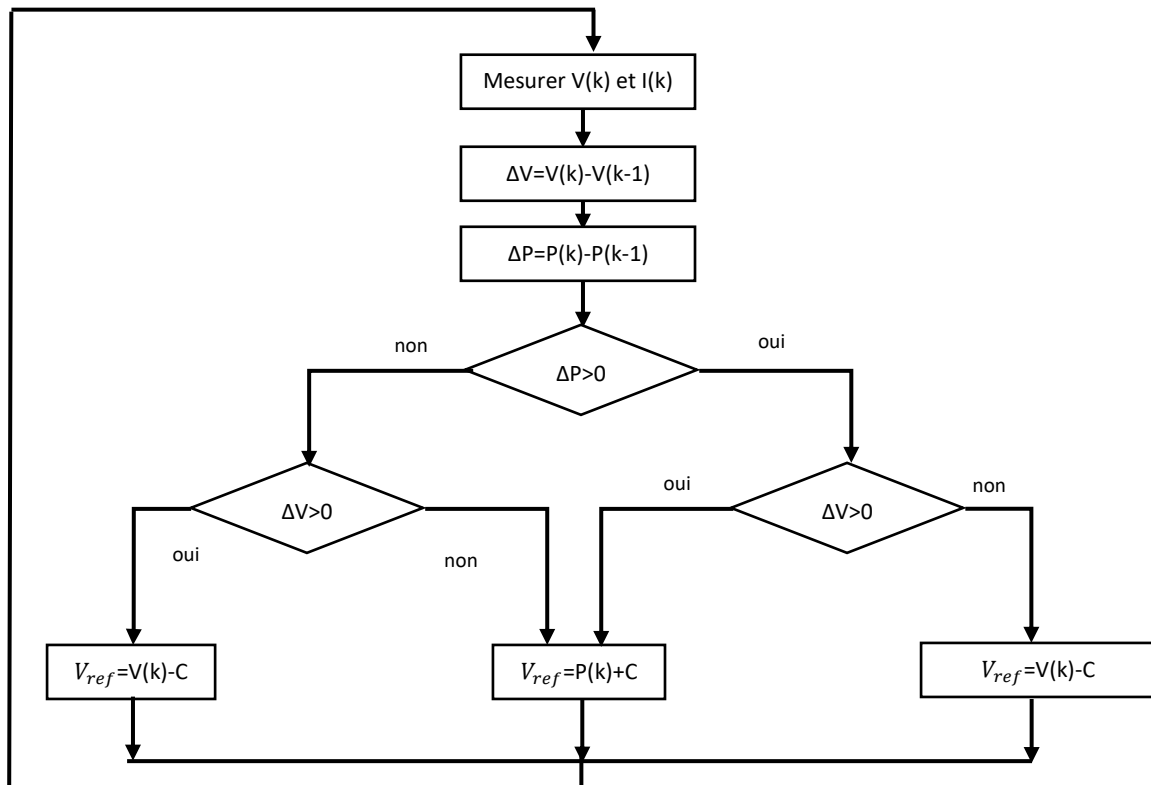


Figure 2.2 : L'organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation [34].

2.2.1.2. Conductance Incrémentale INC

L'algorithme de conductance incrémentale (INC) recherche le pic de puissance maximale (MPP) où la pente ($dP/dV = 0$) au MPP, en utilisant la valeur de l'inductance (I/V) et l'inductance variable (dI/dV). La dérivée est positive sur le côté gauche et négative sur le côté droit du MPP [31], comme indiqué ci-dessous : La dérivée de puissance peut également être écrite comme suit :

$$P = V \times I \tag{2.1}$$

Différenciant l'équation II-12 par rapport à dV :

$$\frac{dP}{dV} = I \times V \times \frac{dI}{dV} \quad (2.2)$$

À partir de l'équation II-14, les équations de base de cette méthode sont les suivantes:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V} \quad ; \quad \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{à MPP} \quad (2.3)$$

$$\frac{dI}{dV} > \frac{-I}{V} \quad ; \quad \frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{à gauche du MPP} \quad (2.4)$$

$$\frac{dI}{dV} < \frac{-I}{V} \quad ; \quad \frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{à droite du MPP} \quad (2.5)$$

La figure suivante montre l'organigramme de l'algorithme Conductance incrémentale :

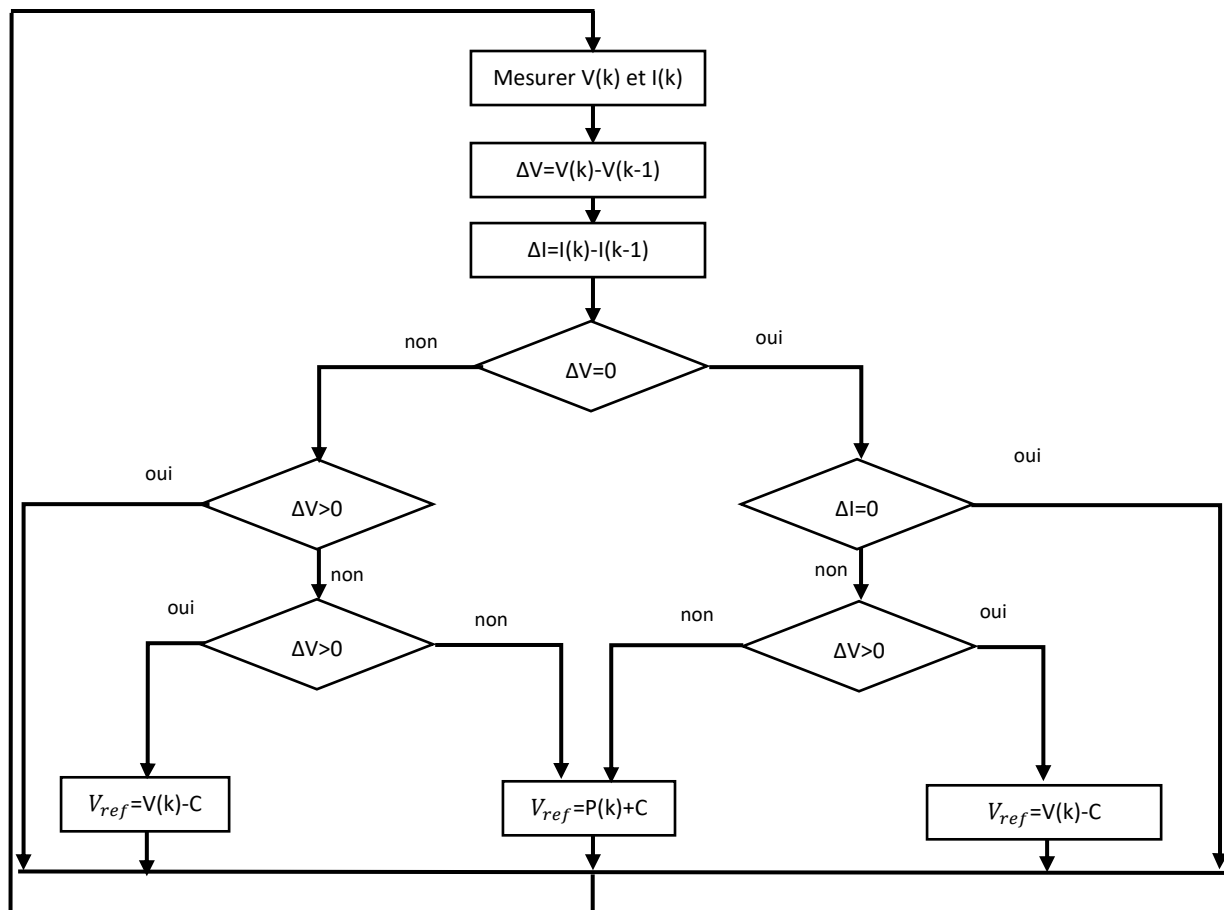


Figure 2.3 : l'organigramme de la méthode Conductance Incrémentale [34].

L'idée principale est de comparer la conductance incrémentale dG à la conductance instantanée G . En fonction du résultat, la tension de fonctionnement du panneau est augmentée ou diminuée jusqu'à ce que le MPP soit atteint [36].

2.2.2. Méthodes de recherche Globales (Global Search Methods)

Les méthodes de recherche globale sont indispensables pour rechercher le GMP en cas de conditions d'ombrage partiel. En effet, cette méthode peut effectuer une recherche de deux ou plusieurs pics. Les algorithmes de recherche globale peuvent également être divisés en deux groupes : les méthodes informatiques douces et les méthodes de suivi de la tension réduite.

2.2.2.1. Méthodes Soft-Camputing (Soft-Camputing Methods)

Les algorithmes d'informatique douce ou les algorithmes méta-heuristiques sont largement utilisés dans la littérature pour suivre la crête maximale globale (GMP) dans des conditions d'ombrage partiel comme solution alternative aux méthodes de recherche locale, car le problème MPPT peut être considéré comme un problème d'optimisation, où la fonction objective est de maximiser la puissance produite par le module photovoltaïque. La section suivante aborde certains des algorithmes d'informatique douce existants dans la littérature.

2.2.2.1.1. Optimisation par Essais Particulaires PSO

L'optimisation par essaims de particules (PSO) est un algorithme méta-heuristique basé sur la population, proposé par Kennedy et Eberhart en 1995, qui a révolutionné le domaine des algorithmes bio-inspirés. Les bancs de poissons et les volées d'oiseaux ont inspiré sa modélisation mathématique. Son approche méta-heuristique et sa capacité à résoudre des problèmes d'optimisation avec de nombreux maxima locaux rendent son utilisation populaire. Plusieurs agents coopératifs sont utilisés pour partager les informations obtenues dans un espace de recherche défini. Le nombre d'agents coopératifs est attribué lors de la phase d'initialisation. Chaque agent suit deux règles simples, à savoir suivre la meilleure position locale de l'agent et suivre la meilleure position globale de tous les agents, comme le montre l'équation (1). En fin de compte, chaque agent évolue autour de la solution optimale. La méthode PSO peut être définie à l'aide d'un ensemble standard d'équations, comme suit comme indiqué dans (2.6) et (2.7).

$$V_i(k + 1) = w \cdot V_i(k) + C_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best,i} - X_i(k)) + C_2 r_2 \cdot (G_{best} - X_i(k)) \quad (2.6)$$

$$X_i(k + 1) = X_i(k) + V_i(k + 1) \quad (2.7)$$

Avec :

$V_i(k + 1)$ est la vitesse pour l'itération suivante qui est utilisée pour mettre à jour la position de chaque agent comme le montre la figure.

w est le paramètre d'inertie.

C_1 est un coefficient constant qui valorise la meilleure solution locale (P_{best}) et C_2 est un coefficient constant qui valorise la meilleure solution globale (G_{best}).

r_1 et r_2 représentent des nombres aléatoires entre 0 et 1.

X_i représente la position de chaque agent.

Les coefficients C_1 , C_2 et w sont plus importants, comme le montre la figure 2.4. Les valeurs élevées des coefficients peuvent entraîner une convergence rapide, mais aussi une mauvaise optimisation du point culminant. Les valeurs de coefficient les plus faibles entraîneront une vitesse de convergence lente vers le point optimal. Par conséquent, la sélection de valeurs appropriées pour ces constantes est d'une importance capitale.

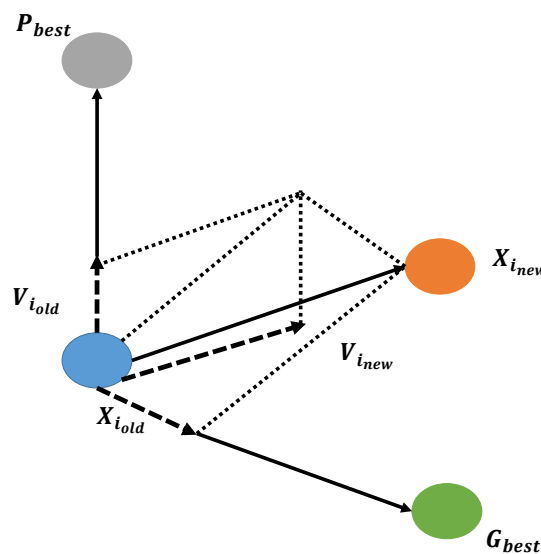


Figure 2.4 : Mise à jour de la position des particules.

Pour le MPPT, le flux de PSO est illustré par l'organigramme de la figure 2.5. L'initialisation de la position des agents (X_i) se réfère au cycle de travail comme indiqué dans les équations (6) et (7). La fonction objective est la puissance. G_{best} est le rapport cyclique qui correspond à la meilleure puissance globale. Alors que P_{best} est la meilleure puissance locale, comme le montre l'équation (6).

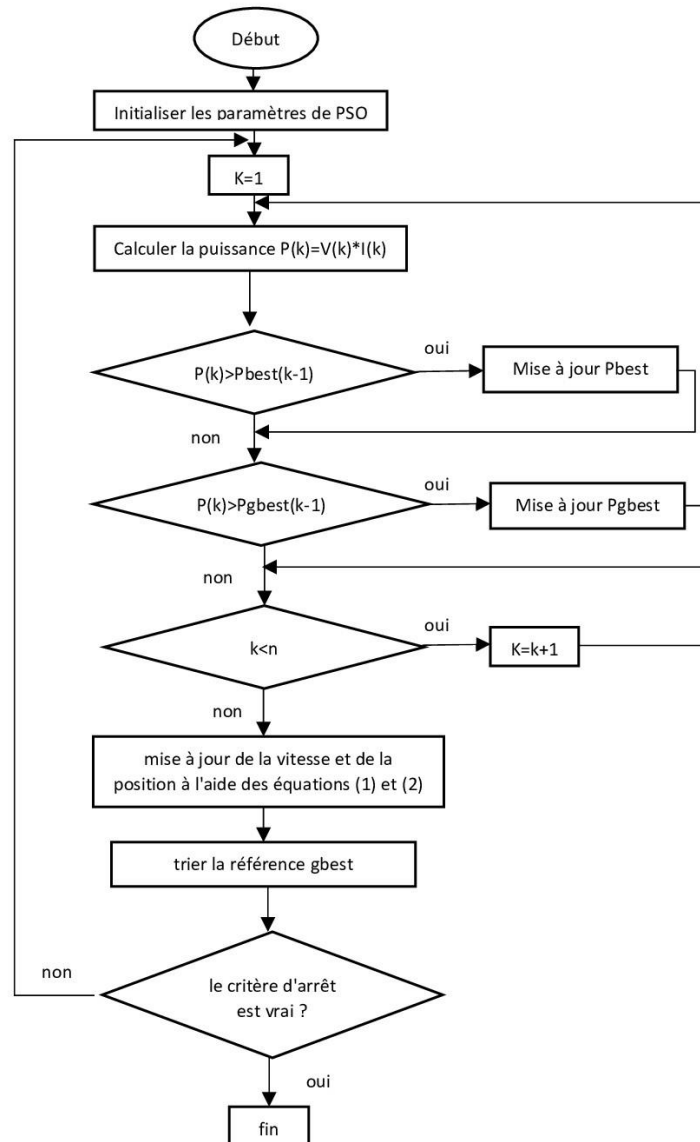


Figure 2.5 : Organigramme de l’algorithme PSO [37].

2.2.2.1.2. Amélioration Team Game Optimisation TGO

A. L’algorithme Team Game Optimisation

L'algorithme d'optimisation du jeu d'équipe (TGO) est un algorithme métaheuristique proposé par Mahmoodabadi en 2018 [38]. Cet algorithme s'inspire d'un jeu d'équipe où les joueurs se divisent en deux équipes. La performance des joueurs est mesurée par leur endurance (propriété). Chaque joueur a effectué trois opérations différentes : passer la balle, faire une erreur et remplacer.

a) Initialisation

À ce stade, n joueurs (particules) sont initialisés aléatoirement dans l'espace de recherche, où les n particules sont divisées en deux groupes égaux, A et B, comme suit :

$$A = X_{1A}, X_{2A}, X_{3A} \dots$$

$$B = X_{1B}, X_{2B}, X_{3B} \dots$$

b) Opération de dépassement

L'opération de transmission de la balle s'effectue comme suit :

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + r \times C_i(t + 1) \quad (2.8)$$

$$C_i(t + 1) = 2 \cdot X_{best}(t) - X_i(t) - X_{rand}(t) \quad (2.9)$$

Où $X_i(t)$ correspond aux particules, C est une formule de communication entre le joueur ayant le ballon, X_{rand} est une particule aléatoire et X_{best} est la meilleure particule de l'équipe. La figure 3.6 est un diagramme schématique illustrant le processus de passing Ball.

c) Opération erronée

L'erreur du joueur qui a le ballon est réalisé lorsque la condition de probabilité est satisfaite. Dans cette opération, le propriétaire qui a le ballon entre en contact avec l'équipe adverse, ce contact a pour effet de modifier une dimension aléatoire du joueur qui a le ballon par (5).

d) Propriété de substitution

Le joueur est remplacé par un nouveau joueur dans une position aléatoire, lorsqu'il ne peut pas améliorer son profil de propriétés ou le maintenir constant, bien que la détérioration des propriétés puisse se produire moins souvent dans le jeu. Le profil de chaque joueur est mis à jour à chaque itération.

e) Joueurs hors champ

Cette tâche se produit lorsque le joueur sort de l'espace de recherche lors de la mise à jour de sa position. À ce moment-là, les joueurs sortis de l'espace de recherche sont réinitialisés avec une position aléatoire, et cela se produit à chaque mise à jour de l'itération.

B. Amélioration de l'algorithme Team Game Optimisation

L'algorithme TGO est amélioré pour traiter le problème PSC sur la base des caractéristiques PV. Où les particules représentent le cycle D. Lors de l'initialisation, quatre particules sont générées à équidistance dans l'intervalle [0,1] pour équilibrer le compromis entre la précision et la vitesse du temps de suivi. Une seule équipe est considérée ici tant que toutes les particules convergent vers la meilleure. Deux particules $D_{best1}(t)$, $D_{best1}(t)$ qui ont la meilleure solution (puissance plus élevée) dans l'itération seront choisies pour la mise à jour. Ensuite, un nombre aléatoire r est généré et comparé à la probabilité d'opération de passage ($P=0,5$) pour décider de l'opération de passage ou d'erreur à effectuer.

a) Opération de dépassement

L'opération de passing ball effectuée par (2.8) et (2.9) devient (2.10) et (2.11) pour rester dans la plage de l'espace de recherche [0,1].

$$D_i(t + 1) = M + \left(1 - K/K_{max}\right) \cdot C_i(t + 1) \quad (2.10)$$

$$C_i(t + 1) = D_{best1}(t) - D_i(t) \quad (2.11)$$

Le nombre r est remplacé par un facteur dynamique $(1 - K/K_{max})$ pour une meilleure précision, K étant le nombre d'itérations et K_{max} le nombre maximum d'itérations. En outre, pour éviter la répétition de l'exploration d'une même particule, deux meilleures particules ($D_{best1}(t)$, $D_{best2}(t)$) sont utilisées, et M est utilisé pour obtenir $(D_1(t + 1), D_2(t + 1))$ en les remplaçant par $D_{best1}(t)$, $D_{best2}(t)$. Par ailleurs, les autres particules D_3 et D_4 sont générées aléatoirement au sein de $D_{best1}(t)$, $D_{best2}(t)$ conformément à (2.12) et (2.13), comme suit :

$$D_3(t + 1) = rand[D_{best1}(t)D_{best2}(2)] \quad (2.12)$$

$$D_4(t + 1) = rand[D_{best1}(t)D_{best2}(2)] \quad (2.13)$$

b) Opération erronée

L'opérateur d'erreur est modifié selon l'équation suivante :

$$D_i(t + 1) = D_i(t) + r \times (D_j(t) - D_i(t)) \quad (2.14)$$

Où le facteur z est remplacé par un nombre aléatoire r [0,1] pour éviter de sortir D de l'espace de recherche. D_j est choisi au hasard entre D_1 et D_4 .

c) Critères d'arrêt

La condition d'arrêt de la recherche est présentée dans l'équation suivante :

$$D_i(t + 1) = D_i(t) + r \times (D_j(t) - D_i(t)) \quad (2.15)$$

Qui est une combinaison de deux conditions, ΔP représente la différence de puissance entre l'itération précédente et l'itération actuelle correspondant à la meilleure. Une fois que la condition (1) est remplie, ce qui signifie que toutes les particules se rapprochent les unes des autres, la phase d'exploration s'arrête et se stabilise à D_{best} . L'organigramme présenté à la figure 2.6 résume les étapes de l'algorithme.

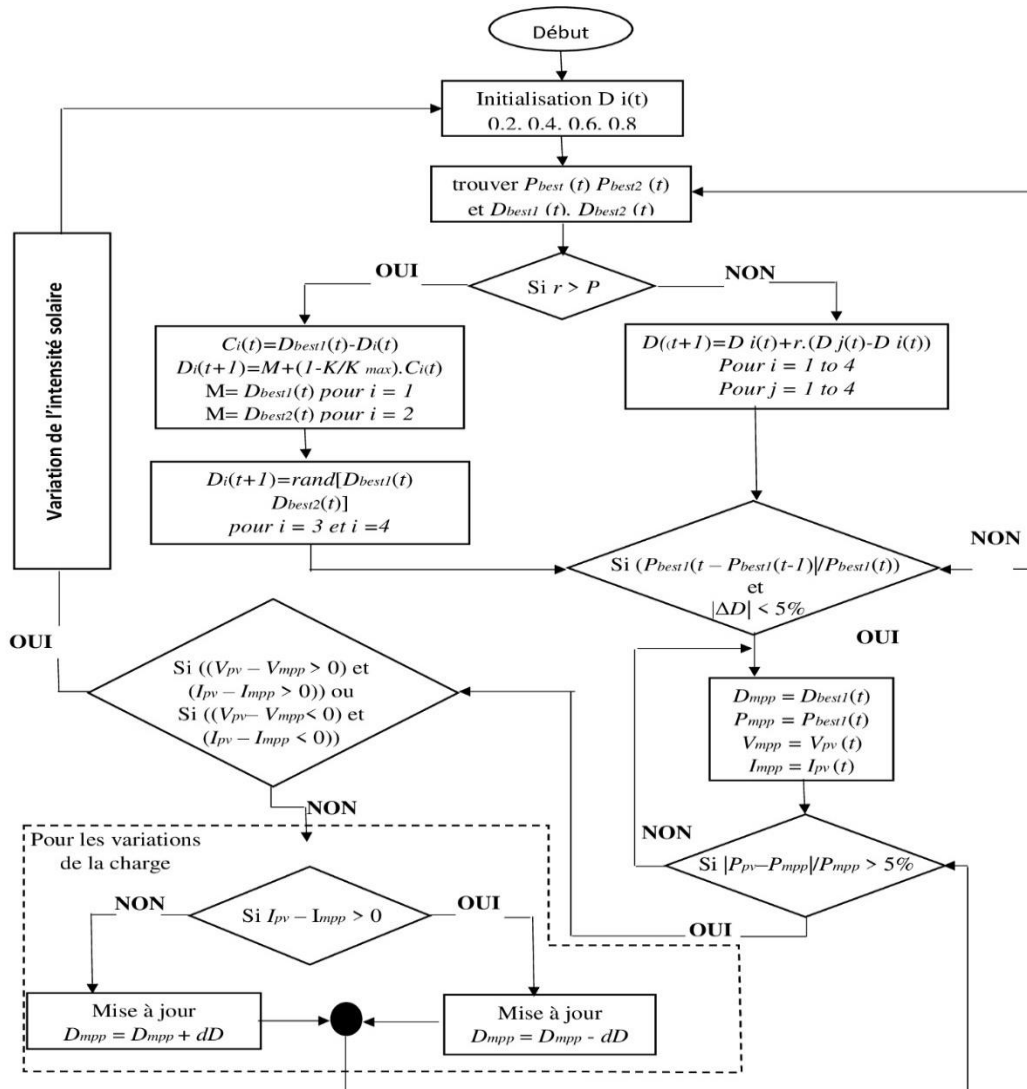


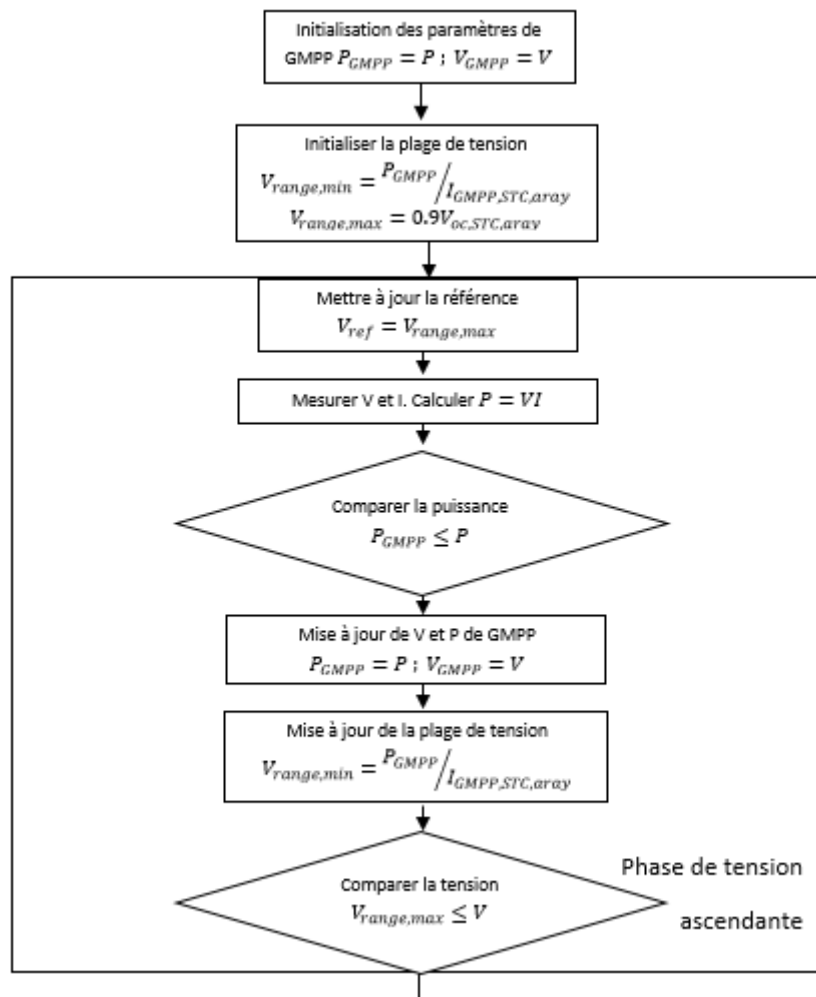
Figure 2.6 : Organigramme de l'algorithme TGO.

2.2.2.2. Algorithmes à plage de tension réduite (Voltage Window Scanning)

Les méthodes MPPT à balayage à plage de tension réduite sont des méthodes efficaces qui visent à accélérer le temps de suivi en réduisant la plage de balayage de la tension. Cette tâche est réalisée en exploitant les caractéristiques du réseau PV dans des conditions d'ombrage partiel et uniforme, au lieu de rechercher la MPP dans l'ensemble de la courbe PV, seules les zones susceptibles de contenir la MPP seront analysées. Par conséquent, la plage de tension analysée est réduite et le temps de suivi est accéléré. La section suivante présente quelques propositions de balayage à tension réduite.

2.2.2.2.1. Méthode de Trapèze de Puissance Maximale MPT

Pour mieux expliquer la méthode de trapèze de puissance maximal, nous allons nous utiliser le diagramme illustratif suivant



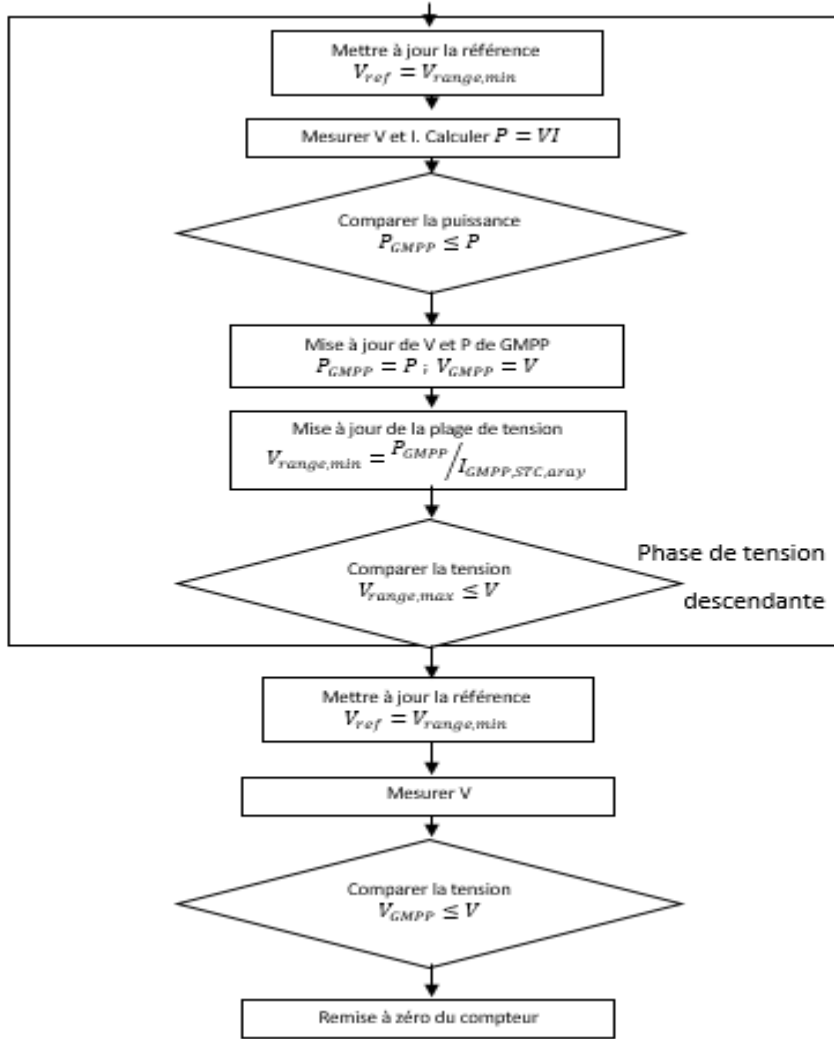


Figure 2.7 : Organigramme de l'algorithme MPT [36].

V_{oc} est la tension en circuit ouvert, $P_{GMPP,STC}$ et $I_{GMPP,STC}$ sont respectivement le point de puissance maximale et le courant correspondant dans les conditions d'essai standard STC (1000W/m², 25°C). D'après la simulation approfondie réalisée dans l'étude [37], qui a révélé que toutes les distributions GMPP possibles se trouvent à l'intérieur du trapèze, formé par la ligne verticale $V_{array} = V_k = 0,9.V_{OC,STC}$, la ligne horizontale $P_{array} = P_{GMPP,STC}$, la pente de l'hypoténuse $I_{array} = I_{GMPP,STC}$, et l'axe des x (V_k). Le processus de balayage est limité par une limite supérieure de tension fixe $0,9.V_{OC,STC}$, et une limite inférieure de tension V_{min} , qui est continuellement mise à jour pendant le balayage comme suit.

$$V_{min} = \frac{P_{GMPP}}{I_{GMPP,STC}} \quad (2.16)$$

La figure 2.8 montre que lorsque le PSC passe du pointillé au trait plein, le point de fonctionnement était au point a' puis est passé au point a, ce qui a permis de détecter une différence de puissance. Par conséquent, le balayage commence vers Voc jusqu'à V_{max} , puis vers la gauche jusqu'à V_{min} . Pendant le processus de balayage, V_{min} est continuellement mis à jour conformément au P_{GMPP} enregistré, où V_{min} est mis à jour de V_e à V_d comme le montre la figure 2.8. La plage de tension de balayage à la fin est $[V_d, V_k]$.

Le processus de balayage utilise un temps de pas dynamique T_{max} , qui est choisi pour garantir que le pas de tension maximal (ΔV) est toujours inférieur à la distance minimale entre deux pics locaux adjacents ($V_{min,MPP}$), la valeur de V_{min} , MPP est déterminée par des simulations approfondies, qui ont révélé que $V_{min,MPP}$ peut être choisi comme V_{MPP} à 100 W/m² et 75°C [34]. Par conséquent, le T_{max} peut être exprimé comme suit :

$$T_{max} = \frac{V_{min,MPP} C_{PV}}{I_{C,max}} \quad (2.17)$$

Où C_{PV} est le condensateur du bus DC de l'onduleur connecté au réseau, et $I_{C,max}$ est le courant maximum du bus DC. Dans le cas de $I_{C,max}$, le pas de tension maximal est $V_{min,MPP}$. En revanche, lorsque I_C n'est pas maximal, le processus de balayage peut être retardé. La figure III-8 représente l'algorithme de la méthode MPT.

2.2.2.2.2. Méthode Modifiée de Trapèze de Puissance Maximale M-MPT

Dans cet article, une méthode modifiée de trapèze de puissance maximale (M-MPT) pour le suivi global du point de puissance maximale (GMPPT) des systèmes photovoltaïques (PV) dans des conditions partiellement ombragées (PSC) est proposée. Par rapport à la méthode traditionnelle du trapèze de puissance maximale (MPT), la méthode proposée introduit une limite inférieure de plage de courant variable en utilisant les caractéristiques de sortie monotones du réseau photovoltaïque. En outre, compte tenu de l'influence du point de fonctionnement initial du générateur photovoltaïque sur la trajectoire de balayage dans le cas de PSC dynamiques, un mécanisme de jugement de la tension initiale est ajouté dans la méthode modifiée. La méthode proposée garantit que le point de puissance maximale globale est suivi avec précision avec une plage de balayage de tension plus petite et un temps de suivi plus court dans toutes les conditions. En outre, l'excellente performance de la méthode proposée a été vérifiée à la fois par la simulation et par les résultats expérimentaux [35].

La limite supérieure de tension (V_{max}) de la méthode MPT est une valeur fixe ($0,9.V_{OC,STC}$). Cependant, lorsque la température est élevée ou que l'ombre est trop grande, la valeur de V_{max} est décalée par rapport à $0,9.V_{OC,STC}$. Le MPT échoue alors parce que la tension ne peut pas atteindre $0,9.V_{OC,STC}$. Ainsi, une méthode GMPP à puissance maximale modifiée (MMPT) est proposée [36]. Pour mieux expliquer le fonctionnement principal de la méthode proposée, on considère le même exemple que celui présenté à la figure 2.8.

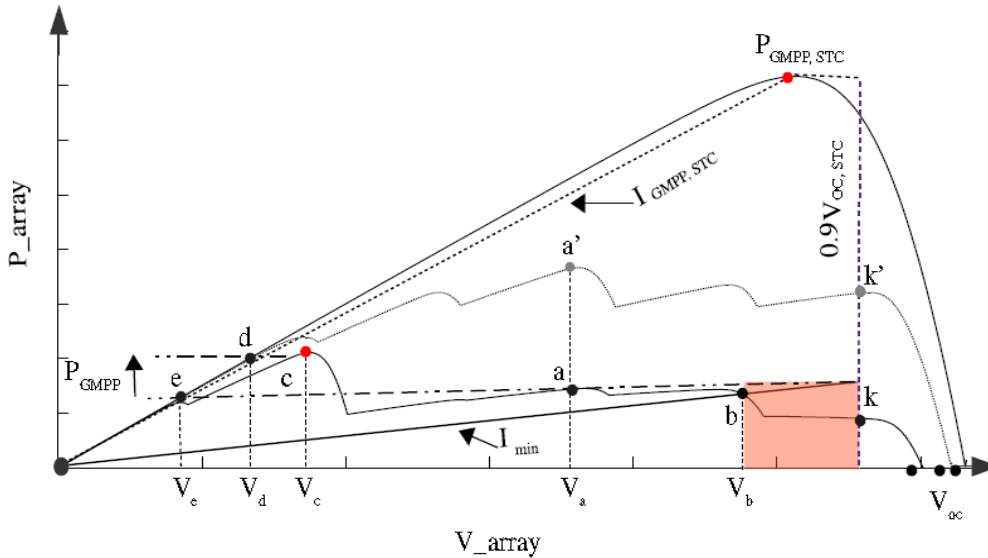


Figure 2.8 : le schéma de l'algorithme M-MPT [37].

a) Limite inférieure de la plage de courant

La ligne de courant I_{min} , qui est formée graphiquement dans la figure 2.8 en reliant l'origine O et le point d'intersection de la puissance maximale économisée et de $0,9.V_{OC,STC}$, qui correspond au point k, peut être représentée par :

$$I_{min} = \frac{P_{GMPP}}{0,9.V_{OC,STC}} \quad (2.18)$$

La figure III-8 montre que la tension derrière le point k est inférieure à $0,9.V_{OC,STC}$, et que le courant est inférieur au courant au point a parce que le courant diminue de façon monotone sous l'effet de l'uniformité et de la PSC. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de balayer derrière le point k et la zone colorée $[V_b V_k]$ n'est pas balayée.

b) Limite inférieure de tension

La limite de tension minimale V_{min} , qui correspond à V_e dans la figure III-8, est formée par l'intersection de la ligne horizontale P_{GMPP} enregistrée pendant le balayage et de la ligne de pente de $I_{G\Box PP,STC}$, et elle satisfait.

$$V_{min} = \frac{P_{GMPP}}{0,9 \cdot I_{GMPP,STC}} \quad (2.19)$$

Comme le montre la figure III-8 V_{min} est mis à jour pendant le balayage de V_e à V_d selon l'équation (précédente) V_d est considéré comme la limite inférieure de la tension parce que la tension derrière le point **d** est inférieure à la tension au point **c**, et le courant est approximativement égal $I_{GMPP,STC}$, il n'est donc pas nécessaire de balayer derrière le point **b** parce qu'il n'y a pas de puissance plus élevée que la puissance au point **c**.

c) Point initial

Systématiquement, la méthode M-MPT effectue un balayage vers la droite plutôt que vers la gauche, mais avant de commencer le balayage vers la gauche, la condition présentée dans l'équation (suivante) doit d'abord être testée.

$$V_{init} > V_{min} \quad (2.20)$$

Si la condition (16) est vraie, il faut balayer vers la gauche parce qu'il peut exister un GMPP supérieur à celui qui a été sauvegardé. Dans le cas contraire, il n'est pas nécessaire de balayer vers la gauche car il n'y a pas de GMPP supérieur à celui qui a été sauvegardé. Par conséquent, le processus de balayage est réduit et le temps de suivi est accéléré.

Pour résumer les étapes de l'algorithme M-MPT, on considère l'exemple présenté dans la figure. Tout d'abord, le point de fonctionnement fonctionnait au point **a**, puis le PSC est passé du pointillé au trait plein, ce qui a permis de détecter une différence de puissance. Au début, la puissance au point **a** est enregistrée comme PGMPP et les limites supérieure et inférieure sont calculées selon les équations (14) et (15) respectivement, qui sont mises à jour en permanence pendant le balayage. La recherche de GMPP commence à balayer vers le COV jusqu'au point **b**, où (16) est vrai à ce moment-là. Le balayage vers la gauche commence jusqu'au point **d**, et finalement le point de fonctionnement continue à fonctionner au point **c** par la méthode P&O. A la fin du balayage, la tension est mesurée à l'aide de l'équation (16). À la fin du balayage, la plage de tension balayée est réduite [V_d V_b], la zone située derrière **b** et **d** n'étant pas balayée.

Par conséquent, le temps de suivi est minimisé. La figure 2.9 présente l'organigramme de la méthode M-MPT.

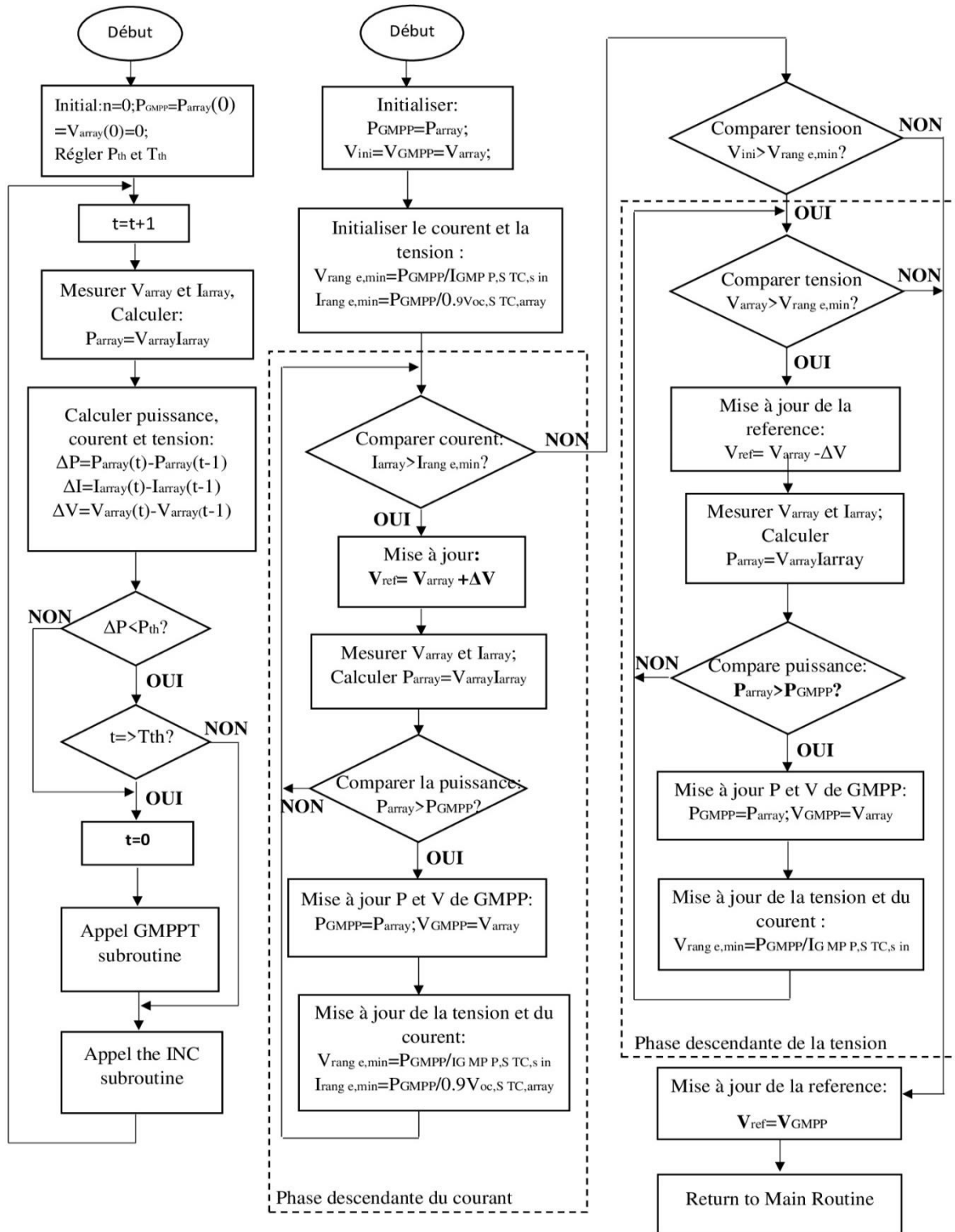


Figure 2.9 : Organigramme de l'algorithme M-MPT [36]

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, différents types d'algorithmes MPPT ont été exposés, en expliquant le principe de fonctionnement de chacun. Nous avons choisi les méthodes les plus utilisés et les plus présents. Nous avons sélectionné deux méthodes pour chaque groupe pour les développer, il s'agit en l'occurrence de P&O et INC pour le premier groupe, le PSO et le TGO pour le second, et pour le dernier nous avons opté pour le MPT et M-MPT.

Par conséquent, nous pouvons dire qu'il y a plusieurs types d'algorithmes pour le MPPT dont 03 groupes essentiels. Suite à l'étude de certaines méthodes de ces derniers, il s'agit en l'occurrence de P&O et INC pour le premier groupe, le PSO et le TGO pour le second, et le MPT et M-MPT pour le troisième, nous avons constaté que toute variation dans le processus initial peut conduire à un résultat différent. Ainsi, le point de maximisation peut différer d'une méthode à une autre. La théorie sera étudiée, analysée et discutée pour chaque groupe dans le dernier chapitre.

Discussion des résultats de simulation et comparaison des algorithmes MPPT

3.1.Introduction

Dans cette section, nous analyserons et comparerons les performances de trois algorithmes de suivi de point de puissance maximale (MPPT) : Perturb and Observe (P&O), Particle Swarm Optimization (PSO) et le Modified Maximal Power Trapezium (M-MPT). Chacun de ces algorithmes présente des avantages et des inconvénients spécifiques, influençant leur efficacité dans diverses conditions de fonctionnement des panneaux photovoltaïques. Notre étude se concentre sur l'évaluation de temps de réponse, la précision du MPPT et de la robustesse face aux variations climatiques. Les résultats sont obtenus à partir des simulations. Ils seront discutés en détail afin de donner un aperçu approfondi des capacités et des limites de chaque algorithme. Cette analyse comparative vise à identifier l'algorithme le plus performant pour optimiser la récolte de l'énergie solaire en tenant compte des contraintes climatiques.

3.2.Simulation du système global

Le modèle MATLAB/Simulink du système photovoltaïque illustré dans la figure 3.1 est utilisé pour tester les performances des méthodes proposées. Les caractéristiques électriques du module PV sont représentées par une look-up table à deux dimensions, qui stockent différentes valeurs de courant pour différentes valeurs de tension, d'irradiation et de température afin d'accélérer la vitesse du processus de simulation. Le convertisseur DC-DC (buck-boost) est utilisé comme étage de puissance, conçu pour fonctionner en mode de conduction continue, avec les spécifications suivantes : $C_{in} = 2200\mu F$, $L=350mH$, $C_{out}=2200\mu F$, fonctionnant à une fréquence de commutation f_s de 50 kHz.

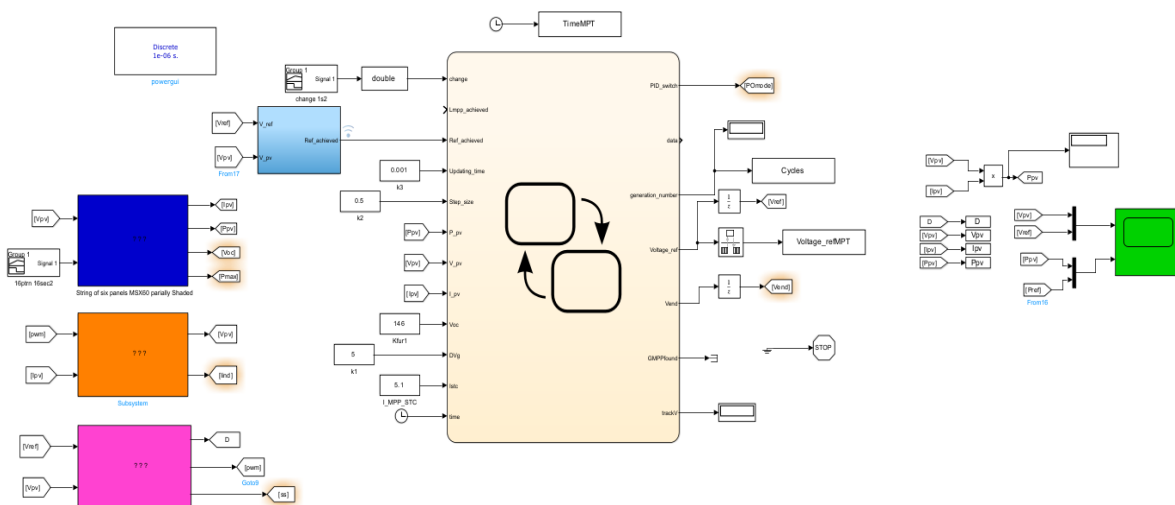


Figure 3.1 : Modèle MATLAB/Simulink du système photovoltaïque.

Le convertisseur buck-boost est simulé à l'aide de la bibliothèque simscape. Le contrôleur PI proportionnel intégral est intégré dans la boucle de contrôle pour atteindre le point de fonctionnement à la tension de référence obtenue par le contrôleur MPPT. Les algorithmes MPPT sont développés à l'aide d'un bloc de state-flow chart, qui est une représentation graphique d'une machine à états finis composée d'états, de transitions et de données, où les états peuvent être organisés de manière hiérarchique. Le mode de fonctionnement du diagramme est mis à jour lorsqu'un événement déclencheur se produit, qui peut être une entrée du système ou un événement interne.

3.3. Etude de stabilité du système

Nous allons étudier l'analyse de stabilité de l'approche de contrôle proposée en utilisant la théorie des petits signaux :

Pour faciliter l'analyse du circuit, quelques hypothèses sont prises en compte concernant le fonctionnement du convertisseur, comme suit :

- a) Le circuit fonctionne en régime permanent.
- b) Le courant de l'inducteur est continu.
- c) Le condensateur est suffisamment grand pour assurer une tension de sortie constante.
- d) Le commutateur est fermé pour le temps DT et ouvert pour le temps $(1-D) T$.
- e) Les composants sont idéaux.

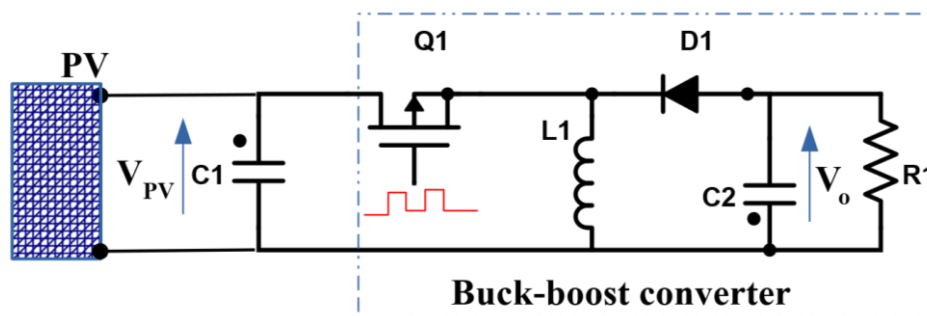


Figure 3.2 : Schéma fonctionnel de l'étage de conversion de puissance.

Le convertisseur buck-boost est modélisé avec des résistances parasites r_L et r_C associées à l'inductance L et au condensateur $C2$, respectivement. L'approche de la moyenne de l'espace d'état est utilisée ici pour modéliser le convertisseur buck-boost en termes de fonction de transfert de petit signal. Le convertisseur buck-boost proposé fonctionne dans deux modes au cours d'un cycle de commutation.

- Analyse du système interrupteur fermé [0 - DT] : dans cet intervalle, l'interrupteur Q1 est activé. Par conséquent, la tension aux bornes de l'inducteur L est égale à la tension d'entrée V_{pv} , et le courant de l'inducteur i_L augmente.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_L}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(r_C+R)C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_{pv} \quad (3.1)$$

- Analyse pour l'interrupteur ouvert [DT - T] : contrairement à l'état 1, dans cet intervalle, l'interrupteur est désactivé et la diode est polarisée vers l'avant.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R(r_L+r_C)+r_L r_C}{(R+r_C)L} & -\frac{R}{(R+r_C)L} \\ -\frac{R}{(R+r_C)L} & -\frac{1}{(r_C+R)C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{pv} \quad (3.2)$$

Où la variable d'état est le courant de l'inducteur et la tension du condensateur, $x(t)=[i_L, V_C(t)]$. L'équation de l'état moyen est basée sur le rapport cyclique de D et s'écrit comme suit en termes de moyenne pondérée de deux états Équation (3.1) et (3.2).

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.3)$$

$$\dot{x} = D.A_1x + (1 - D)A_2x + D.B_1u + (1 - D)B_2u \quad (3.4)$$

Après les simplifications et les calculs nécessaires dans l'équation (3), la dernière forme de l'équation peut être écrite sous la forme de l'équation (3.4).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_C(D+1)-r_L}{L} & \frac{1}{L} (D - 1) \\ \frac{1}{C} (D + 1) & \frac{1}{RC} (2D + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_{pv} \quad (3.5)$$

En outre, en appliquant la transformée de Laplace à (3.6), la fonction de transfert commande-sortie peut être calculée comme suit :

$$G_{vs} = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{D}(s)} = C[SI - A]^{-1}[(A_1 - A_2) \times (B_1 - B_2)V_{dc}] + (C_1 - C_2)x \quad (3.6)$$

Où $A_1 = A_2 = A$, $B_1 = B_2$, $C_1 = C_2 = C$. En substituant les valeurs de A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2

L'équation (3.6) peut être écrite comme :

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{v_{pv}}{(1-D)^2} \frac{\left(1 + \frac{s}{\left(\frac{1}{r_C C}\right)}\right) \left(1 - \frac{s}{\frac{(1-D)^2 R}{DL}}\right)}{\frac{s^2}{\frac{(1-D)^2}{LC}} + \frac{s}{\frac{(1-D)^2 R}{L}} + 1} \quad (3.7)$$

Contrôleur de tension :

Le régulateur parallèle proportionnel intégral PI est utilisé ici pour contrôler l'étage de puissance. La fonction de transfert du contrôleur PI est la suivante:

$$G_c(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (3.8)$$

La structure de contrôle en boucle fermée présentée à la figure 3.3 a été dérivée des équations (3.7) et (3.8)

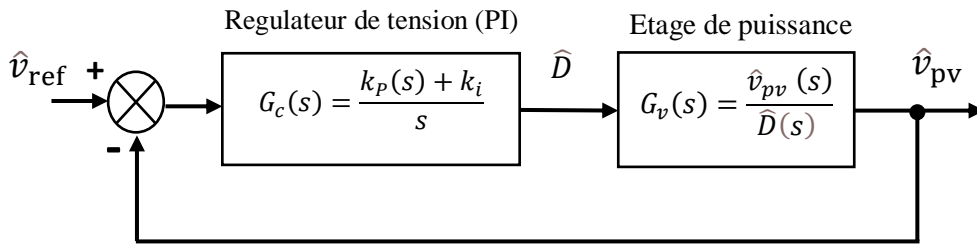


Figure 3.3 : Modèle de petit signal du système photovoltaïque proposé.

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{v_{pv}}{(1-D)^2} \frac{\left(1 - \frac{s}{(1-D)^2 R}\right) G_c}{\left(\frac{s^2}{LC} + \frac{s}{(1-D)^2 R} + 1\right) G_c} \quad (3.9)$$

$$\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{v_s \left(K_p s - \frac{K_p D L s^2}{(1-D)^2 R} + K_i \right)}{\left(K_p L C s^3 + (K_i L C + \frac{L K_p}{R}) s^2 + (\frac{L K_i}{R} + K_p) s + K_i \right)} \quad (3.10)$$

3.3.1. Pôles et Zéros

Les pôles et les zéros sont des propriétés de la fonction de transfert, et donc de l'équation différentielle décrivant la dynamique du système d'entrée-sortie. Avec la constante de gain K, ils caractérisent complètement l'équation différentielle et fournissent une description complète du système.

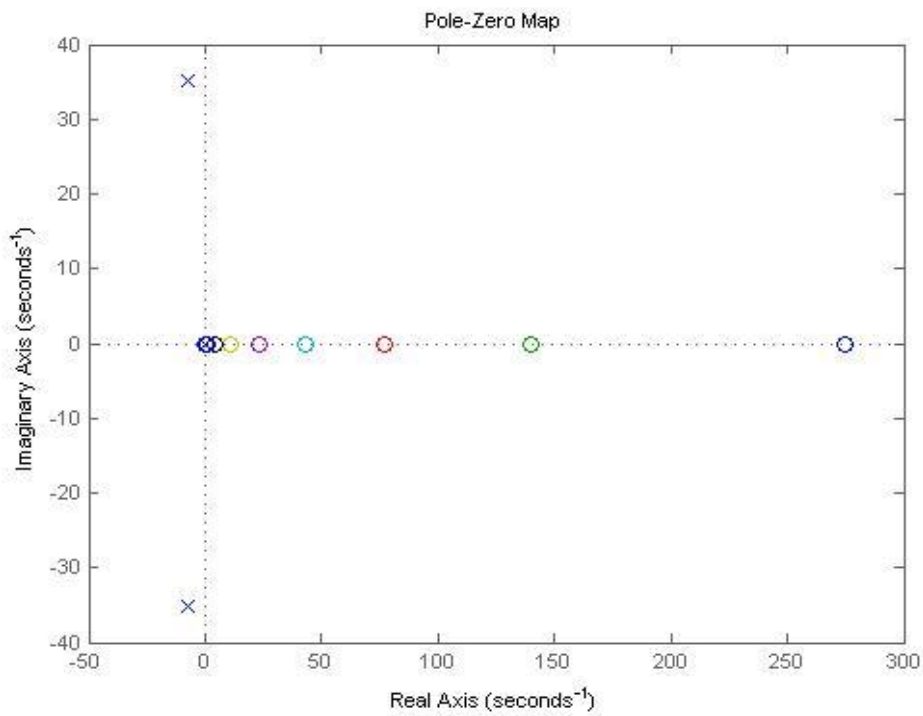


Figure 3.4 : Pôles et les Zéros de notre système.

x : Pôles

o : zéros

Nous remarquons ici dans cette figure, qui représente les pôles et zéros de notre système, que les pôles sont situés dans la partie négative, ce qui démontre la stabilité de notre système linéaire.

3.3.2. Diagramme de Bode

L'entrée est une fonction sinusoïdale dont la fréquence augmente avec le temps. L'animation montre qu'à basse fréquence (et à bas temps), l'entrée et la sortie sont égales en magnitude et en phase (après l'extinction du transitoire de démarrage initial).

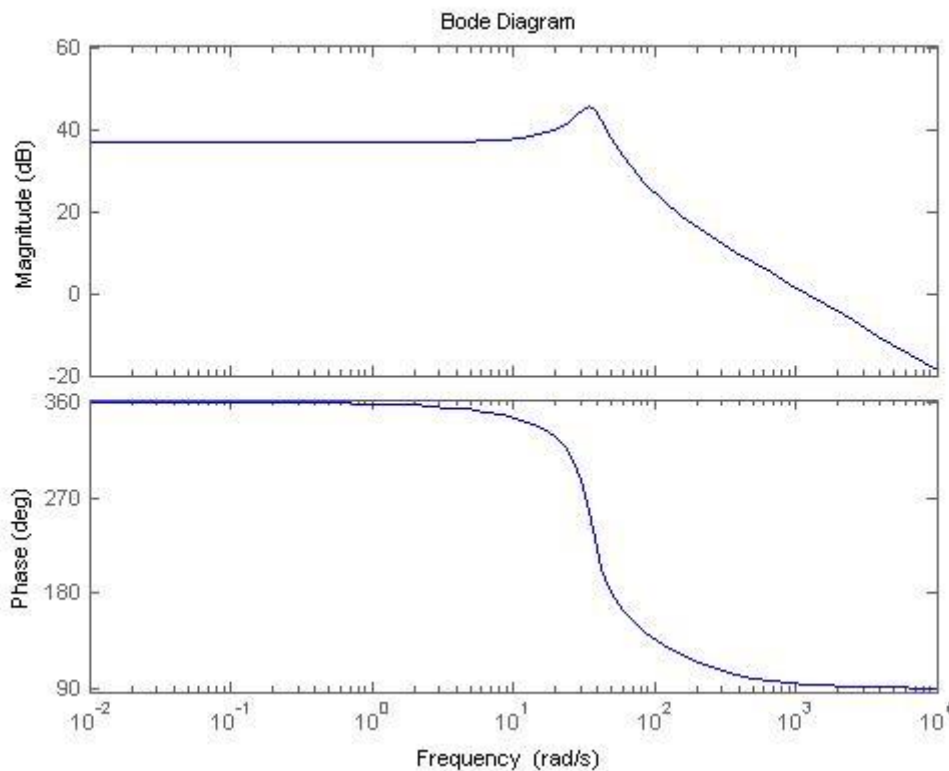


Figure 3.5 : Diagramme de Bode résultant de notre Système.

Cela se traduit par une magnitude de un et une phase de zéro sur les tracés de la magnitude et de la phase de $\frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{D}(s)}$ à des fréquences (et des durées) intermédiaires, le système est quelque peu résonant et la sortie devient en fait plus grande que l'entrée (mais il y a un décalage de phase croissant, c'est-à-dire une phase négative). Au fur et à mesure que la fréquence augmente, la sortie diminue ; là encore, vous pouvez le voir à la fois dans l'animation et dans le tracé de l'amplitude. Le tracé des crêtes du diagramme de sortie est similaire au diagramme de magnitude ci-dessus. La phase n'est pas aussi évidente, mais elle commence manifestement à 360° et diminue ensuite jusqu'à 90° (il peut être nécessaire de zoomer pour voir le déphasage). À haute fréquence (phase proche de 90°), les deux Allure sont complètement déphasées; lorsque l'une est à son maximum, l'autre est à son minimum.

3.3.3. Conditions d'ombrage partiel

Pour valider la performance des algorithmes GMPPT (P&O, PSO, M-MPT), quatre modèles d'ombrage partiel différents sont créés via l'environnement MATLAB/Simulink en expérimentant le réseau PV, qui est une chaîne de 6 panneaux connectés en série à différents niveaux d'irradiation. Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques utilisés sont indiquées

Chapitre 3 : Discussion des résultats de simulation et comparaison des algorithmes MPPT

dans le tableau 3. Le GMPP se trouve dans différentes régions de la courbe P-V, à gauche, au milieu et à droite, comme le montre la figure 3.6.

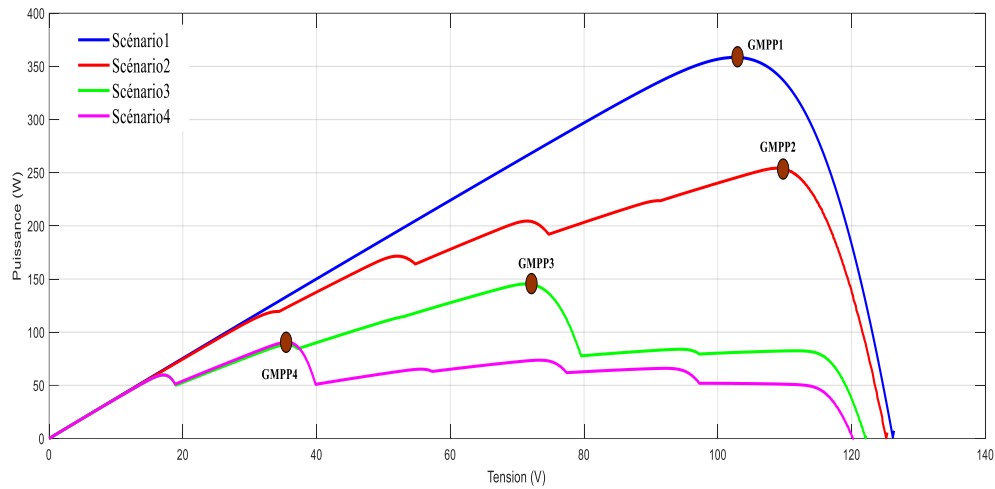


Figure 3.6 : Modèles d'ombrage partiel utilisés pour la vérification des algorithmes.

Tableau 3.1 : Paramètres d'un module PV MSX60.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximum P_{max}	60W
Tension P_{max} (V_{mp})	17.1V
Courant P_{max} (I_{mp})	3.5A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8A
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	21.1V

3.4. Analyse des résultats des algorithmes :

Dans cette section, nous examinerons en détail les résultats de puissance, tension, et courant lors des algorithmes MPPT (P&O, PSO, M-MPT).

• P&O

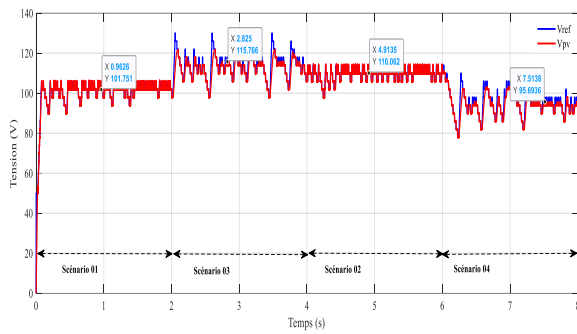


Figure 3.7 : Allure de tension transitoire de l'algorithme P&O sous différents profils d'irradiation

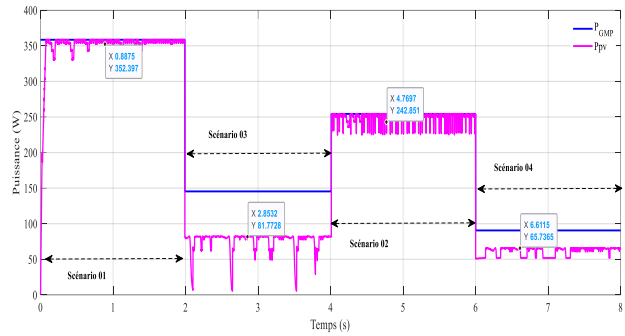


Figure 3.8 : Allure de puissance transitoire de l'algorithme P&O sous différents profils d'irradiation

• PSO

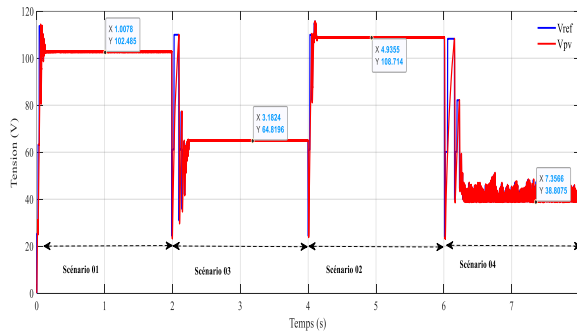


Figure 3.9 : Allure de tension transitoire de l'algorithme PSO sous différents profils d'irradiation.

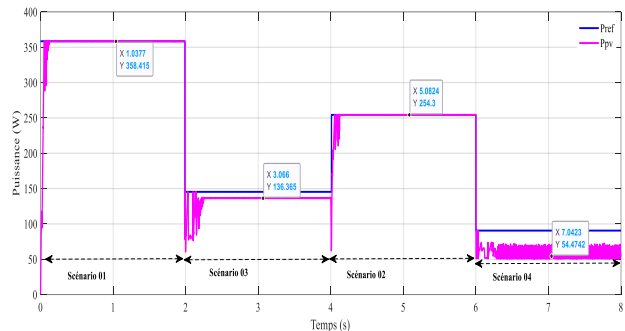


Figure 3.10 : Allure de puissance transitoire de l'algorithme PSO sous différents profils d'irradiation.

• M-MPT

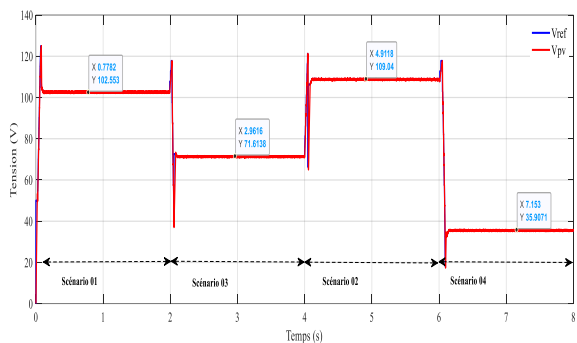


Figure 3.11 : Allure de tension transitoire de l'algorithme M-MPT sous différents profils d'irradiation.

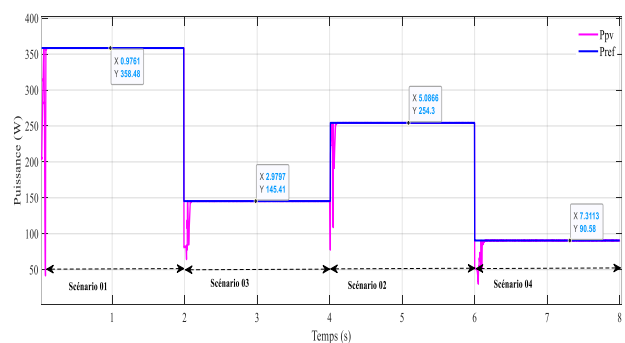


Figure 3.12 : Allure de puissance transitoire de l'algorithme M-MPT sous différents profils d'irradiation.

Scénario 01 (0 à 2 secondes) :

Les figures de 3.7 à 3.12 montrent le suivi de la tension transitoire et de la puissance pour le GMPP des algorithmes GMPPT (P&O, PSO, M-MPT). Nous pouvons voir que tous les algorithmes GMPPT suivent avec succès le bon GMPP1. Le GMPP est assuré de circuler de droite à gauche et vice versa dans la courbe P-V, comme le montre la figure 3.6. Au départ, le système fonctionne de manière stable à 50 V. Après avoir détecté le changement d'irradiation vers le scénario 1, les MMPT sont réinitialisés pour localiser le bon GMPP, qui est le GMPP1. Comme le point initial ne satisfait pas (3.15), le M-MPT appelées d'abord processus ascendant puis processus descendant ensuite en raison de la satisfaction de (3.16), ce qui entraîne le suivi du GMPP1.

L'algorithme P&O présente de faibles performances en termes de temps de suivi et de tension de suivi, ainsi qu'une perte d'énergie plus importante par rapport à l'algorithme M-MPT en raison du comportement stochastique, ce qui entraîne un suivi lent.

• P&O

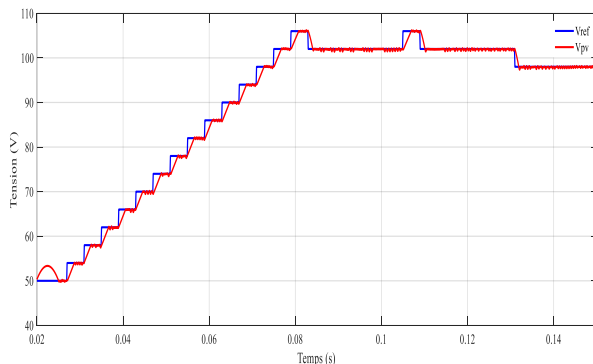


Figure 3.13 : Allure de tension de P&O sous scénario 1

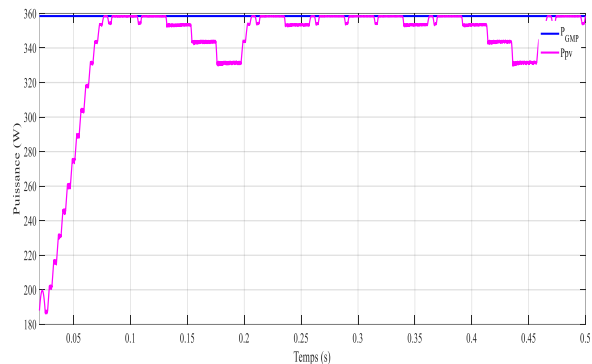


Figure 3.14 : Allure de puissance de P&O sous scénario 1

• PSO

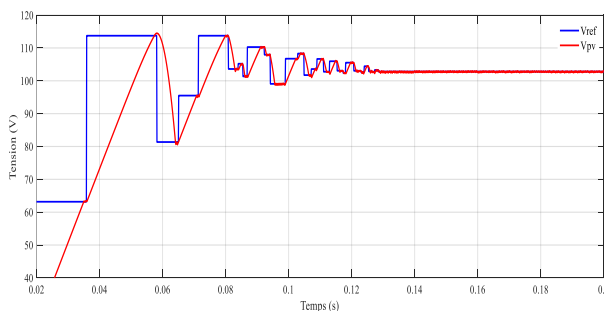


Figure 3.15 : Allure de tension de PSO sous scénario 1

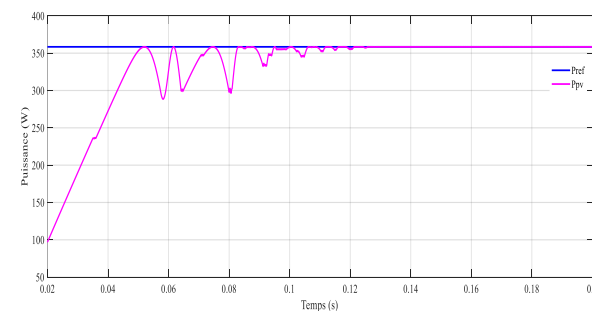


Figure 3.16 : Allure de puissance de PSO sous scénario 1

• M-MPT

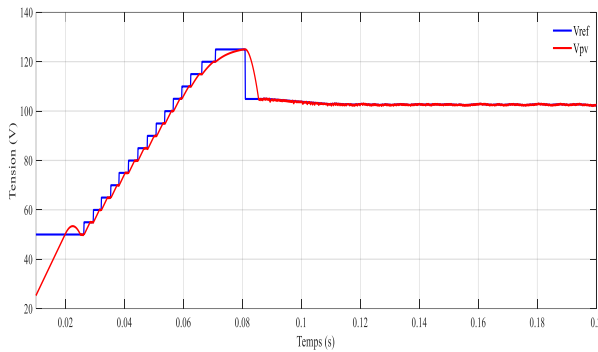


Figure 3.17 : Allure de tension de M-MPT sous scénario 1

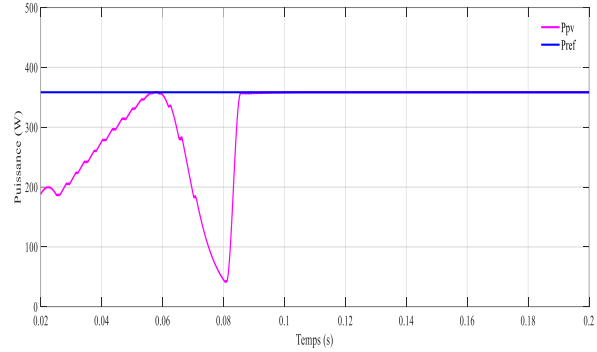


Figure 3.18 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario 1

Scénario 03 (2 à 4 secondes) :

Dans le quatrième scénario, un changement d'irradiation entraîne une nouvelle recherche du point de puissance maximale. L'algorithme M-MPT se réinitialise et, après plusieurs itérations de montée et de descente, il converge vers le GMPP3. Le PSO, grâce à son exploration collective et à la mise à jour continue des vitesses et des positions des particules, parvient aussi à suivre le GMPP3 efficacement. Cependant, l'algorithme P&O montre des performances inférieures avec un suivi plus lent et des pertes énergétiques plus importantes.

• P&O

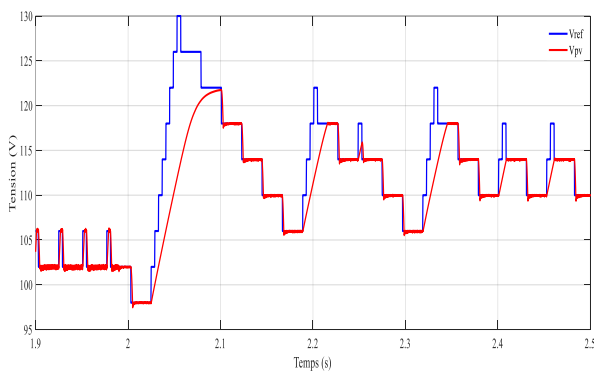


Figure 3.19 : Allure de tension de P&O sous scénario 3

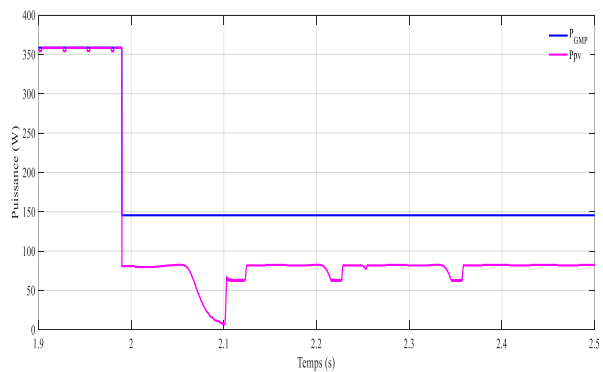


Figure 3.20 : Allure de puissance de P&O sous scénario 3

• PSO

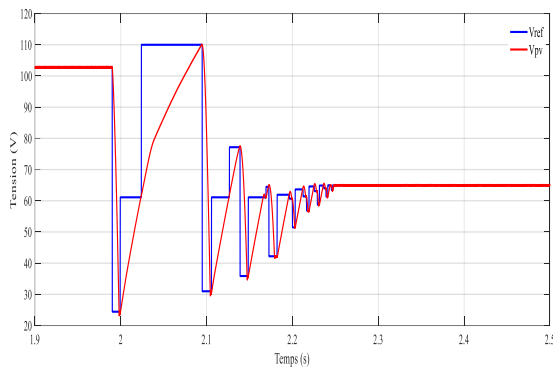


Figure 3.21 : Allure de tension de PSO sous scenario 3

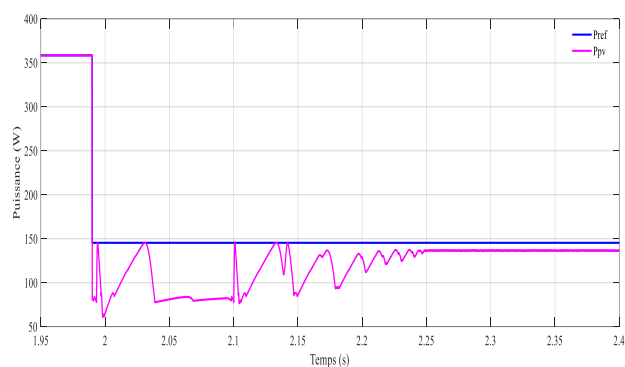


Figure 3.22 : Allure de puissance de PSO sous scenario 3

• M-MPT

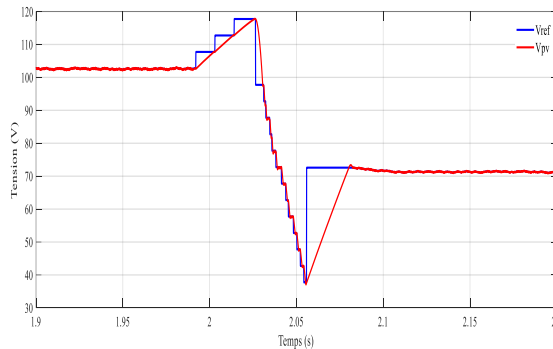


Figure 3.23 : Allure de tension de M-MPT sous scenario 3

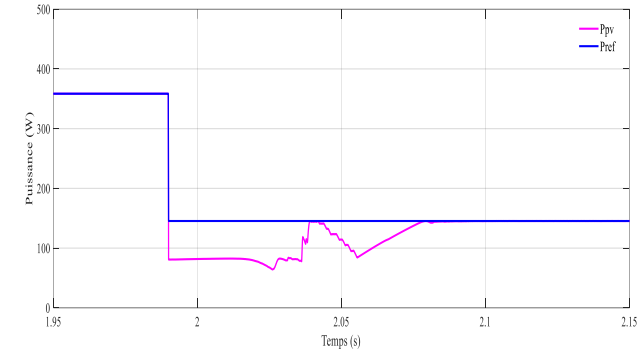


Figure 3.24 : Allure de puissance de M-MPT sous scenario 3

Scénario 02 (4 à 6 secondes) :

Au départ, le système fonctionne de manière stable à 103V. Après avoir détecté le changement d'irradiation vers le scénario 3, une différence de puissance est détectée, ce qui déclenche la sous-routine GMPPT. Puisque (3.21) est vrai, le processus ascendant est d'abord activé, et la tension de fonctionnement est continuellement perturbée vers l'avant. Le processus ascendant de la méthode proposée se termine lorsque (3.25) ou (3.26) devient vrai, ce qui entraîne le suivi du GMPP.

L'algorithme P&O présente de faibles performances en termes de temps de suivi et de tension de suivi, ainsi qu'une perte d'énergie plus importante par rapport à l'algorithme M-MPT en raison de son comportement stochastique, ce qui entraîne un suivi lent.

L'algorithme PSO, quant à lui, montre une amélioration notable par rapport à l'algorithme P&O. Le PSO utilise une approche de calcul basée sur l'optimisation par essais particuliers, où

plusieurs particules représentant des solutions potentielles explorent l'espace de recherche. La capacité du PSO à éviter les pièges des minima locaux et à converger rapidement vers le maximum global se traduit par une efficacité énergétique améliorée et un temps de réponse plus court par rapport au P&O.

Cependant, malgré ses avantages, le PSO peut encore être moins performant que l'algorithme M-MPT en termes de précision et de stabilité du suivi du GMPP. Le M-MPT montre une supériorité grâce à ses mécanismes de correction et sa capacité à ajuster dynamiquement ses paramètres en fonction des variations de l'environnement, ce qui réduit les fluctuations et les pertes d'énergie.

• P&O

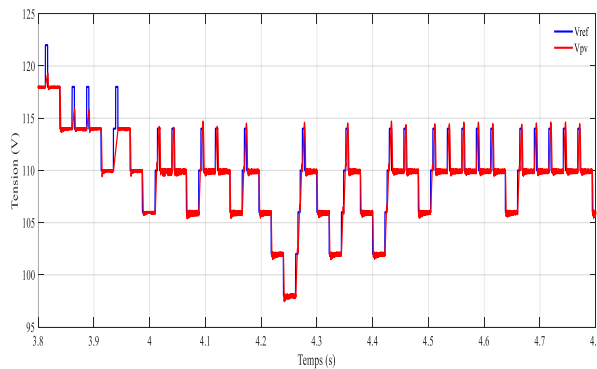


Figure 3.25 : Allure de tension de P&O sous scénario 2

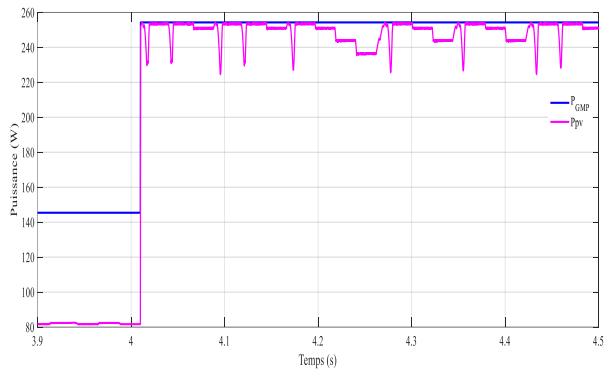


Figure 3.26 : Allure de puissance de P&O sous scénario 2

• PSO

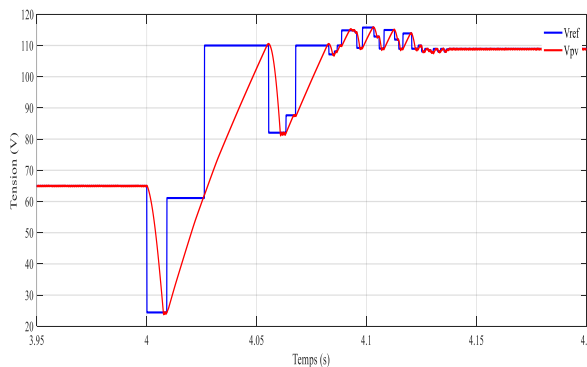


Figure 3.27 : Allure de tension de PSO sous scénario 3

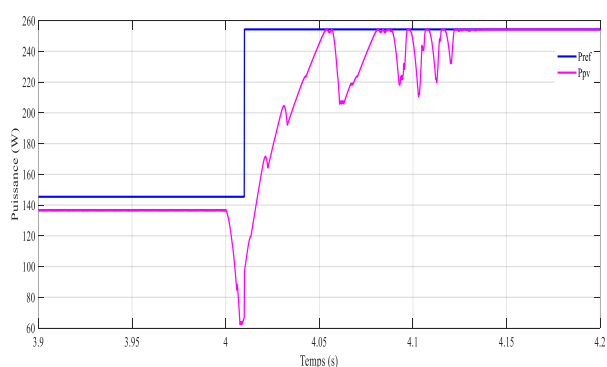


Figure 3.28 : Allure de puissance de PSO sous scénario 3

• M-MPT

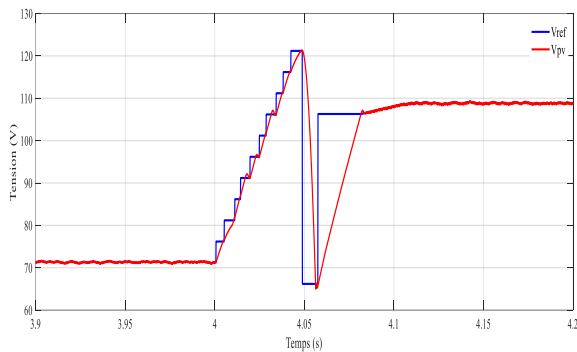


Figure 3.29 : Allure de tension de M-MPT sous scénario 2

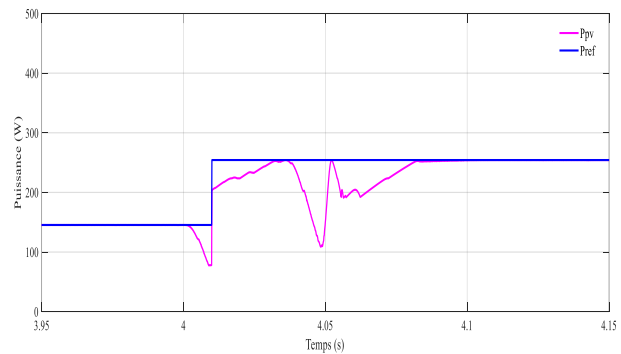


Figure 3.30 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario 2

Scénario 04 (6 à 8 secondes) :

Au début, le système fonctionne de manière stable vers une valeur avoisinant 110V. Suite à un changement soudain d'irradiation, les algorithmes sont activés pour ajuster la tension et suivre le nouveau GMPP. Cependant, les résultats montrent que les algorithmes P&O et PSO échouent à suivre le bon GMPP.

L'algorithme P&O, bien qu'efficace dans des conditions simples, se montre incapable de suivre correctement le GMPP dans ce scénario complexe. Le P&O perturbe périodiquement la tension et observe la variation de puissance pour ajuster son point de fonctionnement. Cependant, dans ce profil d'irradiation avec plusieurs pics proches, l'algorithme est facilement piégé dans un point de puissance local (GMPP local) et n'atteint pas le maximum global. Cette limitation est due à sa méthode de perturbation et d'observation, qui ne permet pas de différencier efficacement entre les multiples points de puissance locale et globale. En conséquence, le P&O conduit à une perte d'énergie significative et un rendement réduit.

L'algorithme PSO, bien qu'ayant montré des performances améliorées dans le profil précédent, échoue également à suivre le bon GMPP dans ce nouveau scénario. Le PSO fonctionne en explorant plusieurs solutions potentielles simultanément (particules) et en ajustant leurs positions en fonction de l'expérience individuelle et collective de l'essai. Toutefois, dans ce cas particulier, les particules du PSO convergent prématurément vers un pic de puissance local, incapable de s'échapper vers le pic global. Cette convergence prématurée est aggravée par les variations rapides et multiples de l'irradiation, qui désorientent les particules et réduisent l'efficacité globale de l'algorithme.

Chapitre 3 : Discussion des résultats de simulation et comparaison des algorithmes MPPT

En revanche, l'algorithme M-MPT parvient à suivre avec succès le bon GMPP dans ce profil d'irradiation complexe. Le M-MPT utilise une méthode avancée et d'ajustement dynamique de ses paramètres. Grâce à ces mécanismes, l'algorithme peut naviguer efficacement à travers les multiples pics de puissance et éviter les pièges des GMPP locaux. Lorsque le changement d'irradiation est détecté, le M-MPT active ses sous-routines de correction et ajuste la tension de manière plus adaptative et précise. Le processus de suivi se termine uniquement lorsque les conditions de convergence globale sont remplies, garantissant ainsi que le maximum global est atteint. En conséquence, l'algorithme M-MPT minimise les pertes d'énergie et maximise le rendement.

• P&O

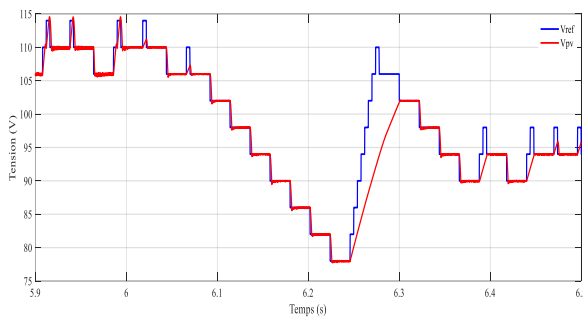


Figure 3.31 : Allure de tension de P&O sous scénario 4

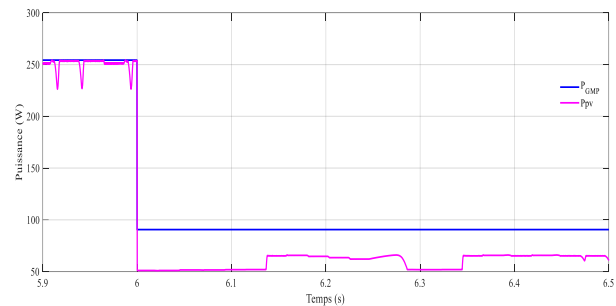


Figure 3.32 : Allure de puissance de P&O sous scénario 4

• PSO

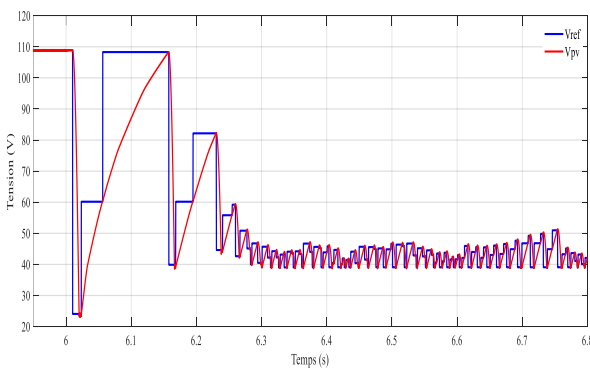


Figure 3.33 : Allure de tension de PSO sous scénario 4

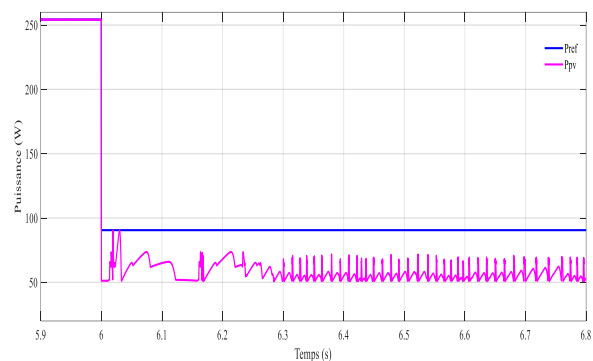


Figure 3.34 : Allure de puissance de P&O sous scénario 4

• M-MPT

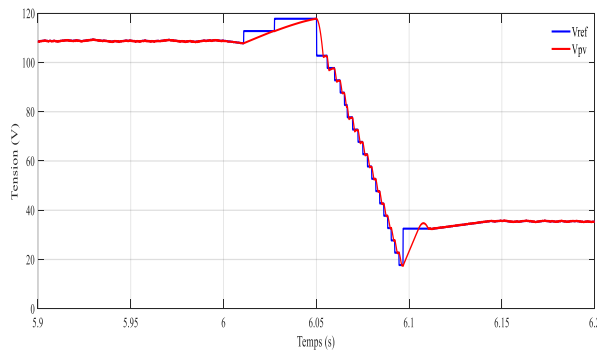


Figure 3.35 : Allure de tension de M-MPT sous scénario 2

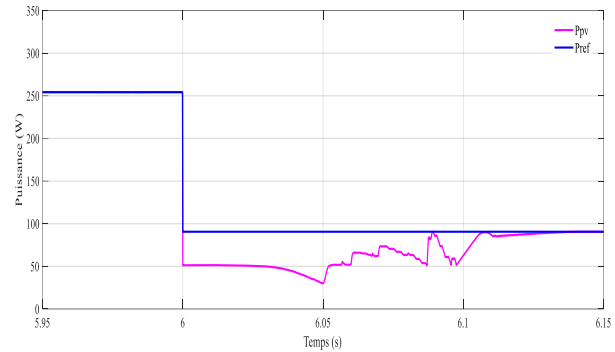


Figure 3.36 : Allure de puissance de M-MPT sous scénario 2

Tableau 3.2 : Comparaison des performances expérimentales des algorithmes sous différents scénarios

Algorithmes	Puissance maximale (W)	360	255	145	90	Complexité
	Condition d'ombrage	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	
P&O	Temps de réponse (s)	0.22	0.4	0.3	0.45	Faible
	Rendement (%)	91,66	60,17	90,3	55,48	
PSO	Temps de réponse (s)	0.13	0.26	0.15	0.4	Élevée
	Rendement (%)	96,78	93,43	93,33	61,11	
M-MPT	Temps de réponse (s)	0.085	0.095	0.055	0.15	Modéré
	Rendement (%)	99,61	99,42	99,26	99,17	

3.5. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre de notre travail, nous avons procédé à la discussion des résultats du système étudié lors du précédent chapitre. La comparaison des algorithmes MPPT révèle des différences remarquables en termes de rapidité de convergence, d'efficacité et de complexité de mise en œuvre. Les résultats expérimentaux et simulés ont montré que l'algorithme P&O offre une solution simple et efficace pour la plupart des conditions de d'irradiation. Cependant, il présente des oscillations autour du point de puissance maximale et peut manquer de précision sous les conditions d'absence de forte irradiation.

Contrairement à l'algorithme P&O, l'algorithme PSO utilise une approche basée sur la population pour explorer simultanément plusieurs solutions potentielles, ce qui permet de trouver rapidement le point de puissance optimale même sous conditions d'irradiation variable.

Chapitre 3 : Discussion des résultats de simulation et comparaison des algorithmes MPPT

Et nous avons déduit, par la même occasion, la distinction de l'algorithme MPT par sa capacité à tracer un trapèze autour du point de puissance maximale, ce qui lui permet de suivre avec précision les variations de conditions d'irradiation. Cette méthode nous a permis de réduire les oscillations couramment observées avec les algorithmes P&O et PSO et d'améliorer la stabilité du système.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

En conclusion, notre étude sur la comparaison des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques a permis de mettre en lumière les performances respectives des trois algorithmes étudiés : l'algorithme du Perturb and Observe (P&O), l'algorithme de la méthode (M-MPT) et l'algorithme basé sur l'optimisation par essais particuliers (PSO).

L'algorithme P&O, bien que simple et largement utilisé, présente des limitations en termes de précision et de rapidité dans des conditions de variations rapides d'ensoleillement. En revanche, l'algorithme M-MPT a montré une meilleure adaptation aux changements rapides, améliorant ainsi l'efficacité globale du système. Cependant, il peut être plus complexe à implémenter.

L'algorithme PSO, quant à lui, a démontré des performances supérieures en termes de rapidité et de précision de convergence vers le point de puissance maximale, notamment dans des conditions environnementales fluctuantes. Sa robustesse et sa capacité à éviter les oscillations autour du point de puissance maximale en font un candidat prometteur pour des applications avancées. Néanmoins, la complexité computationnelle et les besoins en ressources peuvent constituer un frein à son déploiement généralisé.

En synthèse, le choix de l'algorithme MPPT doit être guidé par un équilibre entre la simplicité d'implémentation et les exigences en matière de performance et de robustesse. Cette étude ouvre des perspectives pour l'optimisation et l'hybridation de ces algorithmes afin de tirer parti des avantages de chacun, dans le but d'améliorer encore davantage l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

- **Perspectives :**

- Analyse d'autres algorithmes MPPT.
- Validation pratiques des résultats retrouvés par simulation des différents algorithmes MPPT.

Références Bibliographiques

- [1] Fritz Dufour, M. B. A. Les coûts et implications de notre demande d'énergie: une analyse comparée et complète des ressources énergétiques disponibles: La crise d'énergie imputable aux combustibles fossiles/Exploration de nos options/L'avenir de l'énergie. Fritz Dufour, MBA, DESS, 2018.
- [2] Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global Market Outlook For Solar Power / 2019 - 2023: Power FS. Mobilising Investments in Emerging Markets. Sol Power Eur 2019 2019.
- [3] Li S. A maximum power point tracking method with variable weather parameters based on input resistance for photovoltaic system. Energy Convers Manag 2015;106:290–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.055>.
- [4] Kheldoun A, Bradai R, Boukenoui R, Mellit A. A new Golden Section method-based maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems. Energy Convers Manag 2016;111:125–36. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.039>.
- [5] Liu Y, Li M, Ji X, Luo X, Wang M, Zhang Y. A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems. Energy Convers Manag 2014;85:809–16. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.049>.
- [6] ELHELLI, Ayman, et al. Enjeux de la transition énergétique en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Ouargla. 2021
- [7] ZAHRAOUI, Younes, KHAN, Mohammed Reyasudin Basir, ALHAMROUNI, Ibrahim, et al. Current status, scenario, and prospective of renewable energy in algeria: a review. Energies, 2021, vol. 14, no 9, p. 23-54.
- [8] <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/energies-renouvelables>, consulté le 25-04-2024
- [9] ESSERIR ABDENNOUR, AZZOUZI Abdelhakim. La conception CAO d'une éolienne et l'étude du comportement mécanique de sa tour en présence de défauts. 2021.
- [10] BAI, Hao, Cherfils, Jean-Marc, Lemosse, Didier, et al. Optimisation géométrique du mât d'une éolienne de grande hauteur. In : CFM 2017-23ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, vol : 39 no : 41. 2017.
- [11] Moulin, Sébastien. "Amélioration de la production d'une petite centrale hydroélectrique." (2021).
- [12] Ratiat, Abdelkader. Simulation et analyse du phénomène d'infiltration dans les barrages en terre: cas du barrage de Fontaine des Gazelles. Université de Biskra. Thèse de doctorat. 2020.
- [13] Sun, Xiaodong, Jiang, Shuaiyu, Huang, Hongwei, et al. Solar energy catalysis. Angewandte Chemie, 2022, vol. 134, no 29, p. e202204880.

- [14] Ciubota-Rosie, Camelia, Gavrilesco, Maria, et Macoveanu, Matei. Biomass—An important renewable source of energy in Romania. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 2008, vol. 7, no 5.
- [15] Song, Chunshan. Fuel processing for low-temperature and high-temperature fuel cells: Challenges, and opportunities for sustainable development in the 21st century. *Catalysis today*, 2002, vol. 77, no 1-2, p. 17-49.
- [16] Bradford, Travis. *Solar revolution: the economic transformation of the global energy industry*. MIT Press, 2008.
- [17] Rustemli, S. et Dincer, F. Modular simulation of a hybrid power system with diesel, photovoltaic inverter and wind turbine generation. *Electronics and electrical engineering*, 2011, vol. 109, no 3, p. 1215-1392.
- [18] H. Deboucha, Contribution to the optimization of a photovoltaic energy production system, Thèse de doctorat Université de Béjaïa. 2021, p 08.
- [19] Azab, Mohamed. A new maximum power point tracking for photovoltaic systems. *Waset. Org*, 2008, vol. 34, p. 571-574.
- [20] Bouceredj, Leila. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande mppt. *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism*, 2021, vol. 5, no 5, p. 197-205.
- [21] Benali, Ahmed Ala Eddine, and Youcef El Rachid Kouadria. Etude et conception d'un convertisseur DC-DC multi-phasé. *Mémoire Master*. Université de Tiaret, 2020.
- [22] Zedira, Rahima. Conception et optimisation d'un convertisseur DC-DC multicanaux. *Thèse de doctorat*. 2020.
- [23] Souaih, Hana. : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque à l'aide du modèle Takagi-Sugeno. 2021. *Thèse de doctorat*.
- [24] LE, Minh Tri. Nouvelles approches d'analyse et de validation d'un réseau électrique intelligent basées sur des méthodes holistiques de co-simulation. *Thèse de doctorat*. Université Grenoble Alpes. 2021.
- [25] Korsaga, Eric, Koalaga, Zacharie, Bonkougou, D., et al. Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne. *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*, 2018.
- [26] Le Nawel, Zeraibi Khadidja Meguellati. Les sources d'énergies miniatures. *Thèse de doctorat*. Faculté des Sciences et Technologies Université de Bordj Bou Arreridj. 2014.
- [27] Sivert, Arnaud, Betin, F., et Lequeu, Thierry. Réalisation d'un kart électrique performant: gestion de l'énergie embarquée et choix technologiques. vol. 14, p. 1008. 2015.

- [28] Eddahech, Akram. Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I. 2013.
- [29] Seyedmahmoudyen, Mohammadmehdi, Horan, Ben, Soon, T. Kok, et al. State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 64, p. 435-455.
- [30] Belhachat, Faiza et Larbes, Cherif. A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 92, p. 513-553.
- [31] SOON, Tey Kok et Mekhilef, Saad. A fast-converging MPPT technique for photovoltaic system under fast-varying solar irradiation and load resistance. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2014, vol. 11, no 1, p. 176-186.
- [32] H.Deboucha, Contribution to the optimization of a photovoltaic energy production system, Thèse de doctorat Université de Béjaïa. 2021, p 18.
- [33] Safari, Azadeh et Mekhilef, Saad. Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2010, vol. 58, no 4, p. 1154-1161.
- [34] H.Deboucha, Contribution to the optimization of a photovoltaic energy production system, Thèse de doctorat Université de Béjaïa. 2021, p 21-23.
- [35] XU, Shungang, GAO, Yuan, ZHOU, Guohua, et al. A global maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems under partially shaded conditions using modified maximum power trapezium method. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2020, vol. 68, no 1, p. 370-380.
- [36] H.Deboucha, Contribution to the optimization of a photovoltaic energy production system, Thèse de doctorat Université de Béjaïa. 2021, p 37-45.
- [37] Nedjma Aouchiche. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [38] I. Shams, M. Saad, and K. S. Tey, "Improved Team Game Optimization Algorithm Based Solar MPPT with Fast Convergence Speed and Fast Response to Load Variations," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046. pp. 1–1, 2020,
- [39] Hassani, Hanane, Zaouche, Faika, Rekioua, Djamila, et al. Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production. *Journal of Energy Storage*, 2020, vol. 31, p. 101-644.

- [40] Xu, Shungang, GAO, Yuan, Zhou, Guohua, et al. A global maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems under partially shaded conditions using modified maximum power trapezium method. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2020, vol. 68, no 1, p. 370-380.
- [41] Furtado, Artur MS, Bradaschia, Fabricio, Cavalcanti, Marcelo C., et al. A reduced voltage range global maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 65, no 4, p. 3252-3262.
- [42] Latif, Abdul, HUSSAIN, SM Suhail, DAS, Dulal Chandra, et al. Optimum synthesis of a BOA optimized novel dual-stage PI-(1+ ID) controller for frequency response of a microgrid. *Energies*, 2020, vol. 13, no 13, p. 3446.