

dre...../F.S.S.A/UAMOB/2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Kacimi Abdelaziz

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Option : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIEL

Thème :

**Amélioration de l'Efficacité Solaire avec MPPT et Algorithme du Loup
Gris en Ombrage Partiel**

Devant le jury composé de :

Gerriche Issam	MCA	UAMOB	Président
Smail Houria	MCB	UAMOB	Encadreur
Bouhada Ali	MAA	UAMOB	Examineur
Okba FERGANI	Vacataire	UAMOB	Co-Encadreur

Année Universitaire 2023/2024

Résumé

Ce mémoire explore l'importance croissante de l'énergie solaire dans la transition énergétique mondiale, en mettant l'accent sur les défis posés par les conditions d'ombrage partiel sur les systèmes photovoltaïques (PV). L'ombrage partiel, causé par des obstacles naturels ou artificiels, peut réduire considérablement l'efficacité des systèmes PV en créant des points de puissance maximale locaux. Pour surmonter ces limitations, nous proposons l'utilisation de l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO), inspiré par le comportement social et les tactiques de chasse des loups gris. Cette étude démontre que l'algorithme GWO permet d'optimiser efficacement les systèmes MPPT en conditions d'ombrage partiel, améliorant ainsi la performance globale et la fiabilité des installations photovoltaïques. Les résultats expérimentaux montrent des améliorations significatives par rapport aux techniques traditionnelles, ouvrant la voie à des innovations futures dans le domaine des énergies renouvelables.

Abstract

This thesis explores the growing importance of solar energy in the global energy transition, focusing on the challenges posed by partial shading conditions on photovoltaic (PV) systems. Partial shading, caused by natural or artificial obstacles, can significantly reduce the efficiency of PV systems by creating local maximum power points. To overcome these limitations, we propose the use of the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, inspired by the social behavior and hunting tactics of grey wolves. This study demonstrates that the GWO algorithm can effectively optimize MPPT systems under partial shading conditions, thereby improving the overall performance and reliability of photovoltaic installations. Experimental results show significant improvements compared to traditional techniques, paving the way for future innovations in the field of renewable energy.

Table des matières

Sommaire	2
Introduction Générale	2
Chapitre 1 : Notions de Base	2
Chapitre 2 : Notion sur MPPT	2
Chapitre 3 : Discussion des Résultats	3
Conclusion Générale et Perspectives d'Avenir	4
Bibliographie	4

Sommaire

Introduction Générale

Introduction	1
Problématique	2
Objectifs de la Recherche	3
Méthodologie	4
Organisation du Mémoire	5

Chapitre 1 : Notions de Base

1.1 Introduction.....	6
1.2 Historique de l'Énergie Solaire.....	7
- Antiquité et Premières Découvertes	7
- Avancées Technologiques au XXe Siècle	8
- Intégration Moderne et Perspectives Futures.....	9
1.3 Impact Économique de l'Énergie Solaire	10
- Création d'Emplois et Développement Industriel.....	10
- Réduction des Coûts de l'Énergie	11
- Avantages pour les Communautés Locales	12
- Stimulation de l'Innovation Technologique.....	13
- Contribution à la Croissance Économique Globale	14

Chapitre 2 : Notion sur MPPT

2.1 Introduction.....	15
-----------------------	----

2.2 Étude Comparative des Algorithmes d’Optimisation pour le MPPT	16
- Algorithme Perturb and Observe (PO)	17
- Algorithme Incremental Conductance (IC)	18
2.3 Fonctionnement Détaillé de l’Algorithme GWO	19
- Comportement des Loups Gris	20
- Principe de l’Algorithme	21
- Pseudocode de l’Algorithme GWO	22
- Paramètres de Contrôle et Convergence	23
2.4 Avantages et Limitations de l’Algorithme GWO	24
- Avantages de l’Algorithme GWO	25
- Limitations de l’Algorithme GWO	26
2.5 Modélisation des Conditions d’Ombrage Partiel pour les Systèmes PV	27
- Impact de l’Ombrage Partiel	28
- Modélisation Mathématique	29
- Simulation et Prédiction	30
2.6 Intégration des Modèles d’Ombrage Partiel à l’Algorithme GWO	31
- Importance de l’Intégration	32
- Méthodologie d’Intégration	33

Chapitre 3 : Discussion des Résultats

3.1 Introduction	34
3.2 Description du Système	35
- Modules PV	36
- Convertisseur DC-DC Boost	37
- Charge Résistive	38
3.3 Processus de Simulation	39
- Intégration du Convertisseur DC-DC Boost	40
- Application des Conditions d’Ombrage Partiel	41
- Utilisation de l’Algorithme MPPT	42

3.4 Analyse des Résultats de Simulation	43
- Caractéristiques P-V.....	44
- Courant en Fonction du Temps.....	45
- Tension en Fonction du Temps.....	46
- Puissance en Fonction du Temps	47
3.5 Discussion des Résultats	48
- Premier Scénario : Utilisation du Réseau de Neurones Artificiels	49
- Deuxième Scénario : Utilisation du Réseau de Neurones Artificiels	50
- Algorithme Perturb and Observe	51

Conclusion Générale et Perspectives d’Avenir

Résumé des Résultats	52
Contributions de la Recherche	53
Perspectives d’Avenir	54

Bibliographie

Références	55
-------------------------	-----------

Liste des Figures

Figure 1.1: L'ombrage partiel

Figure 1.2: Influence de l'ombrage partiel

Figure 1.3: Modèle électrique de module PV

Figure 1.4: Principe de MPPT

Figure 2.1: Comportement des loups gris

Figure 2.2: Principe de fonctionnement de GWO

Figure 3.1: Caractéristiques P-V des modules PV sous conditions d'ombrage partiel

Figure 3.2: Variation du courant en fonction du temps

Figure 3.3: Variation de la tension en fonction du temps

Figure 3.4: Variation de la puissance en fonction du temps

Figure 3.5: Caractéristiques P-V des modules PV sous conditions d'ombrage partiel pour le deuxième scénario

Figure 3.6: Variation du courant en fonction du temps pour le deuxième scénario

Figure 3.7: Variation de la tension en fonction du temps pour le deuxième scénario

Figure 3.8: Variation de la puissance en fonction du temps pour le deuxième scénario

Figure 3.9: Variation du courant en fonction du temps utilisant ANN pour le premier scénario

Figure 3.10: Variation de la tension en fonction du temps utilisant ANN pour le premier scénario

Figure 3.11: Variation de la puissance en fonction du temps utilisant ANN pour le premier scénario

Figure 3.12: Variation du courant en fonction du temps utilisant ANN pour le deuxième scénario

Figure 3.13: Variation de la tension en fonction du temps utilisant ANN pour le deuxième scénario

Figure 3.14: Variation de la puissance en fonction du temps utilisant ANN pour le deuxième scénario

Figure 3.15: Variation du courant en fonction du temps pour le premier scénario utilisant Perturb and Observe

Figure 3.16: Variation de la tension en fonction du temps pour le premier scénario utilisant Perturb and Observe

Figure 3.17: Variation de la puissance en fonction du temps pour le premier scénario utilisant Perturb and Observe

Figure 3.18: Variation du courant en fonction du temps pour le deuxième scénario utilisant Perturb and Observe

Figure 3.19: Variation de la tension en fonction du temps pour le deuxième scénario utilisant Perturb and Observe

Figure 3.20: Variation de la puissance en fonction du temps pour le deuxième scénario utilisant Perturb and Observe

Liste des Tableaux

Table 3.2: Irradiances des modules PV sous conditions d'ombrage partiel

Table 3.3: Irradiances des modules PV sous conditions d'ombrage partiel pour le deuxième scénario

Table 3.4: Irradiances des modules PV sous conditions d'ombrage partiel pour le deuxième scénario

Liste des Symboles

I : Courant de sortie

I_{ph} : Courant photogénéré

I_0 : Courant de saturation de la diode

V : Tension aux bornes de la cellule

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance shunt

n : Facteur d'idéalité de la diode

V_t : Tension thermique de la diode

G : Irradiance

P : Puissance

E : Énergie

η : Efficacité

T : Température

k : Constante de Boltzmann

q : Charge de l'électron

A : Coefficient de l'algorithme GWO

D : Distance entre les solutions

a : Coefficient de convergence

r : Nombre aléatoire

C : Coefficient d'exploration

Introduction Générale

L'énergie solaire joue un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale, contribuant significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la diversification des sources d'énergie. Avec l'augmentation continue de la demande énergétique globale [1], le photovoltaïque (PV) émerge comme une solution viable et renouvelable. Toutefois, la technologie PV doit surmonter plusieurs défis pour maximiser son potentiel [2], notamment les problèmes posés par les conditions d'ombrage partiel[3].

Les conditions d'ombrage partiel, résultant souvent de la présence d'obstacles naturels ou artificiels, peuvent entraîner une baisse significative de la performance des systèmes PV [4]. Ces ombres affectent non seulement l'efficacité globale mais provoquent également une distribution inégale de l'irradiation sur les panneaux, ce qui peut entraîner des pertes considérables de production énergétique. Face à ces défis [5], l'optimisation du suivi du point de puissance maximale (MPPT) devient essentielle [6].

Le MPPT est une technique utilisée pour extraire la puissance maximale disponible d'un module PV sous diverses conditions environnementales. Cependant [7], les techniques traditionnelles de MPPT peuvent se montrer inefficaces sous des conditions d'ombrage partiel en raison de la présence de multiples points de puissance maximale locaux sur la courbe caractéristique courant-tension du module PV [8].

Pour surmonter ces limitations, l'introduction de méthodes d'optimisation avancées, telles que l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO), est proposée. Inspiré par les stratégies de chasse des loups gris[9], cet algorithme imite leur comportement social et leurs tactiques de chasse pour trouver des solutions optimales. Dans le contexte des systèmes PV sous ombrage partiel [10], le GWO a le potentiel de repérer efficacement le point de puissance maximale global, même en présence de plusieurs maxima locaux, offrant ainsi une amélioration significative des performances du système[11].

Ce mémoire se propose d'explorer l'application de l'algorithme GWO dans l'optimisation des systèmes MPPT pour les installations photovoltaïques sous ombrage partiel. Nous commencerons par une présentation des concepts de base et de l'évolution historique de l'énergie solaire, suivie d'une discussion approfondie sur les défis posés par l'ombrage partiel et les techniques d'optimisation existantes. Ensuite, nous détaillerons le fonctionnement de l'algorithme GWO et son intégration dans les systèmes PV, avant de présenter les résultats et les perspectives d'amélioration futures.

Ainsi, ce travail vise à contribuer à l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des systèmes photovoltaïques, en proposant des solutions innovantes pour surmonter les obstacles posés par les conditions d'ombrage partiel, et en mettant en lumière l'importance de l'optimisation avancée pour le développement durable des énergies renouvelables.

Chapter 1

Notion de Base

1.1 Introduction

L'énergie solaire joue un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale, contribuant significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la diversification des sources d'énergie. Avec l'augmentation continue de la demande énergétique globale, le photovoltaïque (PV) émerge comme une solution viable et renouvelable. Toutefois, la technologie PV doit surmonter plusieurs défis pour maximiser son potentiel, notamment les problèmes posés par les conditions de ombrage partiel[1].

Les conditions de ombrage partiel, résultant souvent de la présence d'obstacles naturels ou artificiels (comme les arbres ou les bâtiments), peuvent entraîner une baisse significative de la performance des systèmes PV. Ces ombres affectent non seulement l'efficacité globale mais provoquent également une distribution inégale de l'irradiation sur les panneaux, ce qui peut entraîner des pertes considérables de production énergétique[2]. Face à ces défis, l'optimisation du suivi du point de puissance maximale (MPPT) devient essentielle.

Le MPPT est une technique utilisée pour extraire la puissance maximale disponible d'un module PV sous diverses conditions environnementales. Cependant, les techniques traditionnelles de MPPT peuvent se montrer inefficaces sous des conditions de ombrage partiel en raison de la présence de multiples points de puissance maximale locaux sur la courbe caractéristique courant-tension du module PV[3].

Pour surmonter ces limitations, l'introduction de méthodes d'optimisation avancées, telles que l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO), est proposée. Inspiré par les stratégies de chasse des loups gris, cet algorithme imite leur comportement social et leurs tactiques de chasse pour trouver des solu-

tions optimales[4]. Dans le contexte des systèmes PV sous ombrage partiel, le GWO a le potentiel de repérer efficacement le point de puissance maximale global, même en présence de plusieurs maxima locaux, offrant ainsi une amélioration significative des performances du système[5].

1.2 Évolution historique de l'énergie solaire

L'énergie solaire, en tant que source d'énergie renouvelable, a une histoire riche qui remonte à des millénaires. Son évolution a été marquée par des découvertes scientifiques, des innovations technologiques et des changements sociétaux qui ont permis son adoption croissante à travers le monde.

1.2.1 Les débuts de l'utilisation de l'énergie solaire

L'utilisation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité. Les civilisations anciennes, comme les Égyptiens et les Grecs, utilisaient la chaleur du soleil pour diverses applications, telles que le séchage des aliments et la conception de bâtiments orientés pour maximiser le chauffage solaire passif [6]. Les Grecs ont même utilisé des miroirs pour concentrer la lumière solaire, un concept qui sera plus tard à la base des technologies solaires modernes [7].

1.2.2 Les premières découvertes scientifiques

Le 19^{ème} siècle a été une période cruciale pour le développement de l'énergie solaire. En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque, le phénomène par lequel la lumière du soleil peut être convertie en électricité [8]. Cette découverte a jeté les bases de la technologie des cellules solaires.

Dans les années 1860, Augustin Mouchot, un autre pionnier français, a construit des dispositifs solaires thermiques capables de produire de la vapeur en utilisant des miroirs pour concentrer la lumière solaire. Ses travaux ont montré le potentiel de l'énergie solaire pour remplacer les combustibles fossiles, même si ses dispositifs n'ont pas été largement adoptés à l'époque en raison du coût élevé et de la disponibilité abondante de charbon [9].

1.2.3 Avancées technologiques au 20^{ème} siècle

Le 20^{ème} siècle a vu des progrès significatifs dans la technologie solaire, en particulier après la Seconde Guerre mondiale. En 1954, les Bell Labs aux

États-Unis ont développé la première cellule solaire en silicium efficace, capable de convertir la lumière du soleil en une quantité substantielle d'électricité [10]. Cette invention a marqué le début de l'ère moderne de l'énergie solaire photovoltaïque (PV).

Les années 1970 ont été marquées par une crise énergétique mondiale qui a stimulé l'intérêt pour les énergies renouvelables. Les gouvernements et les entreprises ont commencé à investir dans la recherche et le développement de technologies solaires. Des initiatives telles que le Programme Énergie Solaire de la NASA ont conduit à des améliorations significatives dans l'efficacité des cellules solaires et à une réduction des coûts de production [11].

1.2.4 Adoption et intégration dans les systèmes énergétiques modernes

Depuis les années 2000, l'énergie solaire a connu une croissance exponentielle. Les coûts des modules photovoltaïques ont chuté de manière spectaculaire grâce aux avancées technologiques et à la production de masse, en particulier en Chine [12]. Les politiques gouvernementales, telles que les subventions et les tarifs de rachat, ont également joué un rôle crucial dans l'adoption de l'énergie solaire à grande échelle [13].

1.2.5 Perspectives futures

L'avenir de l'énergie solaire semble prometteur, avec des perspectives de croissance continue et d'innovations. Les chercheurs travaillent sur des technologies de nouvelle génération, comme les cellules solaires à pérovskite et les systèmes de stockage d'énergie solaire, qui pourraient révolutionner la manière dont l'énergie solaire est capturée et utilisée [14]. En outre, l'intégration de l'énergie solaire avec les réseaux intelligents et les technologies de gestion de l'énergie pourrait améliorer encore plus l'efficacité et la fiabilité des systèmes énergétiques solaires [15].

1.3 Impact économique de l'énergie solaire

L'énergie solaire a un impact économique significatif, non seulement en tant que source d'énergie renouvelable, mais aussi en tant que moteur de développement économique et de création d'emplois. Son adoption croissante a entraîné des changements majeurs dans plusieurs secteurs économiques, avec des bénéfices directs et indirects pour les sociétés et les économies du monde entier.

1.3.1 Création d'emplois et développement de nouvelles industries

L'un des impacts économiques les plus visibles de l'énergie solaire est la création d'emplois. Selon l'Agence internationale de l'énergie renouvelable (IRENA), le secteur solaire photovoltaïque a créé des millions d'emplois dans le monde entier, couvrant des rôles allant de la fabrication et de l'installation à la maintenance et la recherche-développement [8]. Par exemple, en 2018, l'industrie solaire employait environ 3,6 millions de personnes à l'échelle mondiale, faisant d'elle l'un des plus grands employeurs du secteur des énergies renouvelables [8].

1.3.2 Réduction des coûts de l'énergie

L'énergie solaire a également un impact économique en termes de réduction des coûts de l'énergie. Le coût des systèmes photovoltaïques a considérablement diminué au cours des dernières décennies en raison des avancées technologiques et des économies d'échelle [8]. Cette baisse des coûts a rendu l'énergie solaire compétitive par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, permettant aux consommateurs et aux entreprises de réaliser des économies substantielles sur leurs factures d'énergie [9].

1.3.3 Avantages économiques pour les communautés locales

Les projets solaires peuvent apporter des avantages économiques significatifs aux communautés locales. Les installations solaires génèrent des revenus pour les propriétaires fonciers et les collectivités locales par le biais de taxes et de redevances [10]. De plus, les projets solaires peuvent stimuler le développement économique local en créant des emplois et en soutenant les entreprises locales qui fournissent des biens et des services aux projets solaires [11].

1.3.4 Stimulation de l'innovation technologique

L'adoption de l'énergie solaire a également stimulé l'innovation technologique. Les investissements dans la recherche et le développement ont conduit à des améliorations continues de l'efficacité et de la performance des technologies solaires [12]. Par exemple, le développement des cellules solaires à pérovskite et d'autres technologies de nouvelle génération pourrait encore réduire les coûts et améliorer les performances des systèmes solaires [13].

1.3.5 Contribution à la croissance économique globale

L'énergie solaire contribue à la croissance économique globale en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles importés, en stabilisant les prix de l'énergie et en améliorant la sécurité énergétique [14]. Les économies qui investissent dans l'énergie solaire peuvent bénéficier d'une balance commerciale plus favorable en réduisant les dépenses liées à l'importation de combustibles fossiles et en augmentant les exportations de technologies et de services solaires [8].

En conclusion, l'énergie solaire a un impact économique profond et diversifié, englobant la création d'emplois, la réduction des coûts de l'énergie, le soutien aux communautés locales, la stimulation de l'innovation technologique et la contribution à la croissance économique globale. Ces avantages économiques renforcent l'importance de l'énergie solaire dans la transition vers un avenir énergétique durable.

1.4 Politiques et réglementations pour promouvoir l'énergie solaire

Les politiques et réglementations gouvernementales jouent un rôle crucial dans la promotion de l'énergie solaire. Elles peuvent stimuler l'adoption de cette technologie en offrant des incitations financières, en établissant des normes et en soutenant la recherche et le développement.

1.4.1 Incitations financières

Les incitations financières, telles que les subventions, les crédits d'impôt et les tarifs de rachat, sont des outils essentiels pour encourager l'investissement dans l'énergie solaire. Par exemple, de nombreux pays offrent des crédits d'impôt pour l'installation de systèmes solaires résidentiels et commerciaux, réduisant ainsi le coût initial pour les consommateurs [15]. Les tarifs de rachat garantissent aux producteurs d'énergie solaire un prix fixe pour l'électricité qu'ils injectent dans le réseau, ce qui rend l'investissement dans l'énergie solaire plus attrayant [16].

1.4.2 Normes et règlements techniques

Les gouvernements peuvent également promouvoir l'énergie solaire en établissant des normes et règlements techniques. Ces normes assurent la qualité et la sécurité des installations solaires, tout en facilitant leur intégration dans

les réseaux électriques existants. Par exemple, des normes telles que celles établies par l'International Electrotechnical Commission (IEC) spécifient les exigences de performance et de sécurité pour les modules photovoltaïques [17].

1.4.3 Soutien à la recherche et au développement

Le soutien à la recherche et au développement (RD) est un autre moyen par lequel les gouvernements peuvent promouvoir l'énergie solaire. En finançant des projets de recherche, les gouvernements peuvent aider à développer de nouvelles technologies solaires plus efficaces et moins coûteuses. Par exemple, le programme Horizon 2020 de l'Union européenne a financé de nombreux projets de recherche sur les technologies solaires avancées [18].

1.4.4 Politiques de déploiement et d'intégration au réseau

Les politiques de déploiement et d'intégration au réseau sont également cruciales pour la promotion de l'énergie solaire. Ces politiques incluent des mesures pour faciliter le raccordement des installations solaires au réseau électrique et pour gérer l'intermittence de la production solaire. Par exemple, certains pays ont mis en place des politiques de "net metering" qui permettent aux propriétaires de systèmes solaires de recevoir des crédits pour l'électricité qu'ils produisent en excès et qu'ils injectent dans le réseau [19].

1.4.5 Réglementations environnementales

Les réglementations environnementales peuvent également encourager l'adoption de l'énergie solaire en rendant les sources d'énergie fossile moins attractives. Par exemple, les taxes sur les émissions de carbone augmentent le coût de l'utilisation des combustibles fossiles, ce qui rend les énergies renouvelables comme le solaire plus compétitives [20]. De plus, les réglementations sur la qualité de l'air et les émissions peuvent pousser les entreprises et les gouvernements à investir davantage dans des technologies propres.

1.5 Importance de l'énergie solaire dans la transition énergétique mondiale

L'énergie solaire joue un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale, visant à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à minimiser

l'impact environnemental associé à la production d'énergie. Cette section explore en détail l'importance de l'énergie solaire dans ce contexte global.

1.5.1 Durabilité et accessibilité de l'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie les plus propres et les plus abondantes disponibles sur notre planète. Contrairement aux combustibles fossiles, qui peuvent s'épuiser et sont inégalement répartis géographiquement, l'énergie solaire peut être captée presque partout dans le monde. De plus, elle ne produit pas de polluants atmosphériques ni de gaz à effet de serre lors de sa conversion en électricité, ce qui en fait une pièce centrale dans les stratégies de développement durable [6].

1.5.2 Réduction des coûts et innovation technologique

Au cours des dernières décennies, le coût des technologies solaires, notamment les panneaux photovoltaïques, a considérablement diminué grâce à des avancées technologiques et à une production à plus grande échelle. Cette réduction des coûts rend l'énergie solaire de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, encourageant ainsi son adoption à une plus grande échelle. L'innovation continue, notamment dans les domaines de l'efficacité des cellules solaires et des systèmes de gestion de l'énergie, contribue également à améliorer le rendement et la fiabilité des installations solaires [7].

1.5.3 Impact sur la sécurité énergétique

L'énergie solaire contribue à la sécurité énergétique en diversifiant les sources d'énergie et en réduisant la dépendance à l'égard des importations de combustibles fossiles, ce qui est particulièrement important pour les pays qui ne disposent pas de ressources naturelles abondantes. En intégrant l'énergie solaire dans leur mix énergétique, les nations peuvent atténuer leur vulnérabilité aux fluctuations des prix du marché et aux tensions géopolitiques associées aux combustibles fossiles [8].

1.5.4 Promotion de l'équité énergétique

L'énergie solaire a le potentiel de jouer un rôle significatif dans la promotion de l'équité énergétique. Grâce à des solutions telles que les micro-réseaux solaires et le solaire hors réseau, des communautés isolées ou économiquement

défavorisées peuvent accéder à une énergie abordable et fiable. Cela permet de réduire la pauvreté énergétique et de favoriser le développement économique dans les régions moins desservies [9].

1.5.5 Rôle dans les engagements climatiques internationaux

L'énergie solaire est essentielle pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés par des accords internationaux tels que l'Accord de Paris sur le climat. En augmentant la part de l'énergie solaire dans le mix énergétique mondial, les pays peuvent contribuer de manière significative à la lutte contre le changement climatique, tout en développant une économie basée sur des technologies propres et renouvelables [10].

1.6 Défis posés par les conditions d'ombrage partiel sur les performances des systèmes PV

L'ombrage partiel est une problématique significative pour les systèmes photovoltaïques (PV), impactant directement leur efficacité et leur production d'énergie. Cet obstacle peut provenir de diverses sources, telles que les nuages passants, les bâtiments voisins, la végétation, et même la saleté accumulée sur les panneaux. Cette section explore les défis spécifiques posés par l'ombrage partiel et examine comment ils affectent les performances des systèmes PV.

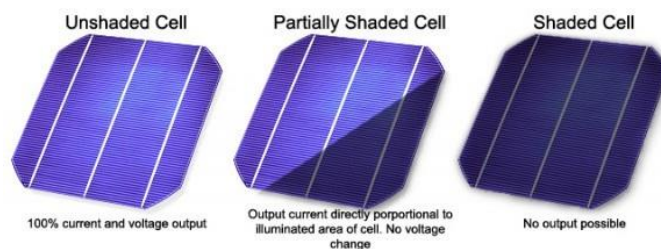


Figure 1.1: l'ombrage partiel

1.6.1 Impact de l'ombrage partiel sur les caractéristiques électriques

L'ombrage partiel sur les panneaux solaires crée des disparités dans la production d'énergie électrique au sein d'un même panneau ou entre différents panneaux d'une installation. Un panneau partiellement ombragé produit moins de courant, ce qui peut entraîner une baisse significative de la performance globale de l'installation. De plus, l'ombrage partiel peut induire des points chauds dangereux, augmentant le risque de dommages durables sur les cellules photovoltaïques [11], comme définir dans Figure 1.1 et 1.2.

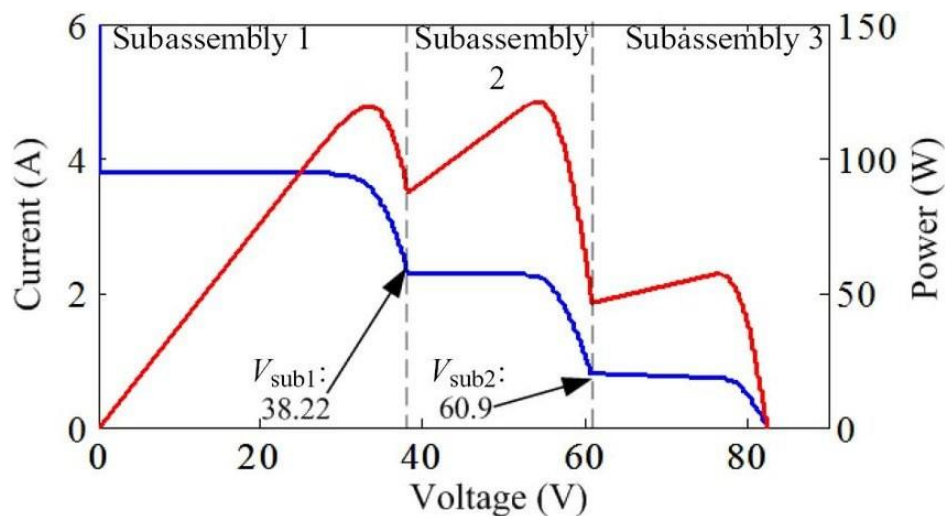


Figure 1.2: Influence de l'ombrage partiel

1.6.2 Modélisation mathématique des effets de l'ombrage

Pour comprendre et quantifier l'impact de l'ombrage partiel, des modèles mathématiques complexes sont utilisés. Ces modèles prennent en compte les variations de l'intensité lumineuse sur différentes parties du panneau et leur impact sur la tension et le courant de sortie. Une approche commune est l'utilisation de la méthode des circuits équivalents, où chaque cellule photovoltaïque dans une configuration ombragée est modélisée comme une source de courant en série avec une diode et une résistance interne. La relation peut être exprimée par l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V + IR_s}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

où I est le courant de sortie, I_{ph} est le courant photogénéré, I_0 est le courant de saturation de la diode, V est la tension aux bornes de la cellule, R_s et R_{sh} sont respectivement les résistances série et shunt de la cellule, n est le facteur d'idéalité de la diode, et V_t est la tension thermique de la diode [12], comme illustré dans Figure 1.3.

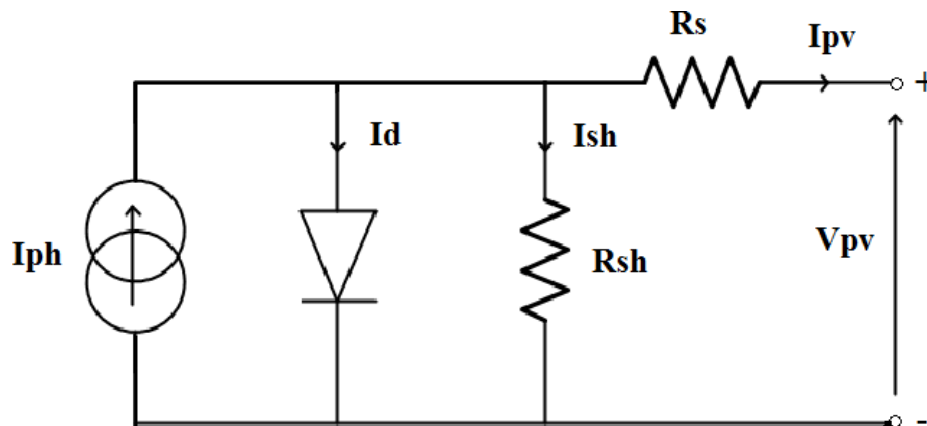


Figure 1.3: Model électrique de PV module

1.6.3 Stratégies de gestion de l'ombrage

Pour atténuer les effets négatifs de l'ombrage partiel, plusieurs stratégies peuvent être employées. L'une des plus courantes est l'utilisation de micro-onduleurs ou d'optimiseurs de puissance, qui permettent à chaque panneau ou à chaque groupe de panneaux de fonctionner de manière indépendante, minimisant ainsi les pertes de production dues à l'ombrage. Ces technologies assurent que les panneaux non ombragés continuent à fonctionner à leur maximum même lorsque d'autres sont affectés par l'ombrage [13].

1.6.4 Défis de l'optimisation de la disposition des panneaux

L'agencement des panneaux solaires joue également un rôle crucial dans la minimisation des effets de l'ombrage. Une planification et une simulation précises, utilisant des logiciels de modélisation avancés, peuvent aider à identifier les meilleurs emplacements pour l'installation des panneaux afin de réduire l'impact de l'ombrage. Cela inclut l'analyse de la trajectoire solaire, des structures environnantes et de la topographie du site [14].

1.7 Présentation du problème de suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est une technique essentielle pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV). Cette technologie est cruciale car elle permet d'adapter dynamiquement la charge électrique pour optimiser la puissance extraite des panneaux solaires, indépendamment des variations environnementales comme l'irradiance solaire et la température. Cette section détaille le problème MPPT et ses implications dans les systèmes PV.

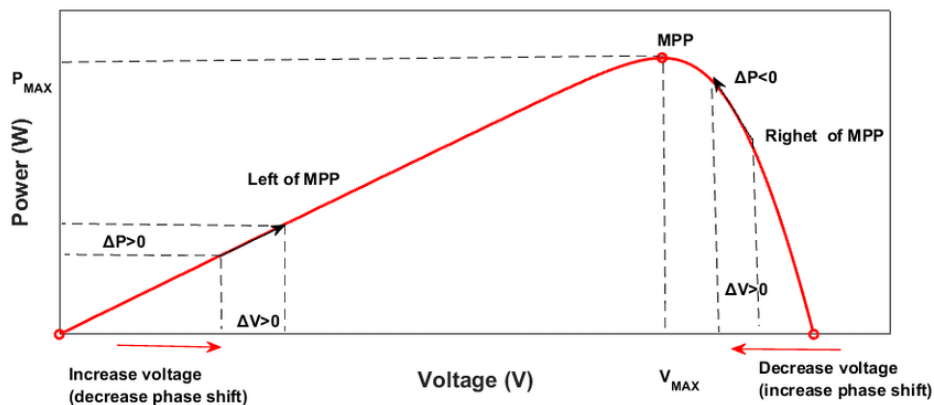


Figure 1.4: Principe de MPPT

1.7.1 Fondamentaux du MPPT

Le MPPT est un algorithme qui ajuste continuellement le ratio tension/courant des panneaux solaires pour exploiter leur point de puissance maximale, qui varie avec les conditions météorologiques et d'ombrage. Le but principal du MPPT est d'assurer que les panneaux solaires fonctionnent à leur efficacité maximale à tout moment, maximisant ainsi la production d'énergie dans diverses conditions [15].

1.7.2 Importance du MPPT dans les systèmes PV

Le MPPT est particulièrement vital dans les contextes où les conditions de lumière solaire sont inconstantes, comme dans les régions sujettes aux changements climatiques fréquents ou dans les installations où l'ombrage

partiel est un problème. Sans MPPT, les panneaux PV peuvent fonctionner à des points de performance sous-optimale, ce qui réduit considérablement l'efficacité globale et la sortie énergétique du système [16].

1.7.3 Techniques de MPPT

Plusieurs techniques de MPPT sont utilisées pour identifier le point de puissance maximale, y compris:

- **Perturb and Observe (P&O):** Cette méthode ajuste périodiquement la tension et observe l'effet sur la puissance; si la puissance augmente, l'ajustement continue dans la même direction, sinon, il change de direction.
- **Incremental Conductance:** Cette technique mesure la dérivée de la puissance par rapport à la tension et compare cette valeur à la conductance instantanée pour déterminer si le point de puissance maximale a été atteint.
- **Algorithmes optimisés:** Des méthodes plus avancées, telles que l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO), sont également appliquées pour suivre efficacement le point de puissance maximale, en particulier dans des conditions d'ombrage complexe ou changeant rapidement [17].

1.7.4 Défis associés au MPPT

Malgré ses avantages, l'implémentation du MPPT dans les systèmes PV n'est pas exempte de défis. Ces défis incluent:

- **Coût des composants:** L'ajout de technologies MPPT augmente le coût initial des systèmes PV.
- **Complexité de la gestion:** L'optimisation continue de la puissance nécessite des systèmes de contrôle complexes et robustes pour gérer efficacement les fluctuations rapides des conditions d'énergie solaire.
- **Sensibilité aux perturbations:** Les techniques MPPT peuvent être sensibles aux variations rapides de l'environnement, nécessitant des ajustements fréquents qui peuvent affecter la stabilité du système [18].

1.8 Introduction à l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO)

L'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) est une méthode de recherche métaheuristique inspirée par le comportement social et de chasse des loups gris. Cet algorithme est utilisé pour résoudre divers problèmes d'optimisation complexes, y compris le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Cette section introduit le principe de fonctionnement de l'algorithme GWO et explique son modèle mathématique.

1.8.1 Principe de fonctionnement de GWO

L'algorithme GWO simule le comportement de chasse des loups gris, où les loups (agents) chassent des proies (solutions optimales) et interagissent entre eux selon une hiérarchie sociale stricte. La meute de loups est divisée en quatre types de loups: Alpha (le leader), Beta, Delta, et Omega (les suiveurs). Les positions des loups dans l'espace de recherche sont ajustées en fonction de la position des meilleurs agents (Alpha, Beta, et Delta), qui guident la meute vers les meilleures solutions [19].

1.8.2 Modèle mathématique de GWO

Le positionnement des loups est mis à jour en utilisant les équations suivantes, où chaque loup ajuste sa position relativement aux positions d'Alpha, Beta, et Delta pour explorer ou exploiter les solutions potentielles dans l'espace de recherche:

$$\mathbf{x}^{(t+1)} = \mathbf{x}_\alpha - A \cdot D_\alpha + \mathbf{x}_\beta - A \cdot D_\beta + \mathbf{x}_\delta - A \cdot D_\delta \quad (1.2)$$

où $\mathbf{x}^{(t+1)}$ est la position du loup i à l'itération $t + 1$, \mathbf{x}_α , \mathbf{x}_β , et \mathbf{x}_δ sont les positions des loups Alpha, Beta, et Delta respectivement. A et D sont des coefficients calculés comme suit:

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (1.3)$$

$$D_\alpha = |C \cdot \mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_i| \quad (1.4)$$

$$D_\beta = |C \cdot \mathbf{x}_\beta - \mathbf{x}_i| \quad (1.5)$$

$$D_\delta = |C \cdot \mathbf{x}_\delta - \mathbf{x}_i| \quad (1.6)$$

avec a décrivant linéairement de 2 à 0 au cours des itérations, r_1 et r_2 étant des nombres aléatoires uniformément distribués dans $[0, 1]$, et $C = 2 \cdot r_2$ étant

un autre coefficient d'exploration [20].

1.8.3 Applications et avantages de GWO

L'algorithme GWO est largement utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation où les méthodes traditionnelles peuvent échouer à cause de la complexité du paysage de recherche ou des exigences de temps de calcul. En outre, GWO est particulièrement efficace pour localiser les optima globaux dans des espaces de recherche multidimensionnels et non linéaires, ce qui le rend idéal pour des applications telles que le MPPT dans les systèmes PV [21].

Conclusion

Ce premier chapitre a mis en lumière l'importance croissante de l'énergie solaire dans le cadre de la transition énergétique mondiale, un mouvement essentiel pour atteindre une production d'énergie plus propre et plus durable. Nous avons examiné les défis significatifs que pose l'ombrage partiel sur les systèmes photovoltaïques, soulignant l'impact négatif sur l'efficacité énergétique et la stabilité des installations PV. Ces défis justifient l'adoption de techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), essentielles pour maximiser l'exploitation de l'énergie solaire même dans des conditions suboptimales.

L'introduction de l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) représente une avancée prometteuse dans ce domaine, offrant une méthode robuste et efficace pour surmonter les limitations des systèmes PV sous ombrage partiel. Grâce à sa capacité à identifier le point de puissance maximale global, le GWO se positionne comme une solution optimale pour améliorer la performance et la fiabilité des systèmes photovoltaïques. Ainsi, ce chapitre pose les bases pour des explorations plus approfondies des capacités du GWO dans les applications MPPT, que nous continuerons à développer dans les chapitres suivants.

Chapter 2

Notion sur MPPT

2.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'application de l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) pour optimiser les systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans des conditions de ombrage partiel. L'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV) peut être sévèrement affectée par l'ombrage, rendant la tâche de maximisation de l'énergie captée plus complexe. L'utilisation de l'algorithme GWO, réputé pour son efficacité dans les environnements hautement dynamiques et incertains, présente une solution prometteuse. Ce chapitre détaillera le fonctionnement de cet algorithme, explorera ses avantages et limitations, modélisera les conditions d'ombrage pour les systèmes PV, et examinera comment ces modèles peuvent être intégrés à l'algorithme pour améliorer l'efficacité du MPPT[?].

2.2 Étude comparative des algorithmes d'optimisation pour le MPPT

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est essentiel pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV). Plusieurs algorithmes d'optimisation ont été développés pour le MPPT, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Cette section présente une analyse comparative des performances de différents algorithmes, en mettant l'accent sur les algorithmes Perturb and Observe (PO) et Incremental Conductance (IC).

2.2.1 Algorithme Perturb and Observe (PO)

L'algorithme PO est l'un des algorithmes de MPPT les plus couramment utilisés en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Le principe de base du PO est de perturber la tension du système PV et d'observer l'effet sur la puissance de sortie. Si une perturbation dans une direction augmente la puissance, la perturbation suivante est effectuée dans la même direction. Sinon, la perturbation est inversée.

Le modèle mathématique de l'algorithme PO est le suivant :

$$P(k) = V(k) \cdot I(k) \quad (2.1)$$

où $P(k)$ est la puissance au point de mesure k , $V(k)$ est la tension et $I(k)$ est le courant. Les étapes de l'algorithme sont les suivantes :

1. Mesurer la tension $V(k)$ et le courant $I(k)$ du panneau PV. 2. Calculer la puissance $P(k)$. 3. Comparer la puissance actuelle $P(k)$ avec la puissance précédente $P(k - 1)$:

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \quad (2.2)$$

4. Si $\Delta P > 0$, continuer la perturbation dans la même direction. 5. Si $\Delta P < 0$, inverser la direction de la perturbation.

Cependant, l'algorithme PO présente certaines limitations, notamment en présence de conditions de ombrage partiel. Les oscillations autour du point de puissance maximale (MPP) peuvent réduire l'efficacité globale du système [15].

2.2.2 Algorithme Incremental Conductance (IC)

L'algorithme Incremental Conductance (IC) surmonte certaines des limitations du PO en utilisant les variations de la conductance pour déterminer la position du MPP. Cet algorithme compare la conductance instantanée au changement incrémental de la conductance pour prédire l'emplacement du MPP.

Le modèle mathématique de l'algorithme IC est basé sur la dérivée de la puissance par rapport à la tension :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2.3)$$

Au MPP, la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle, donc :

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0 \implies \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.4)$$

Les étapes de l'algorithme IC sont les suivantes :

1. Mesurer la tension $V(k)$ et le courant $I(k)$ du panneau PV. 2. Calculer la conductance instantanée $\frac{I(k)}{V(k)}$ et la conductance incrémentale $\frac{\Delta I}{\Delta V}$. 3. Comparer $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ avec $-\frac{I(k)}{V(k)}$:

- Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I(k)}{V(k)}$, le MPP est atteint.
- Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I(k)}{V(k)}$, augmenter la tension pour atteindre le MPP.
- Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I(k)}{V(k)}$, diminuer la tension pour atteindre le MPP.

L'algorithme IC est plus précis que le PO en présence de variations rapides des conditions environnementales, telles que l'ombrage partiel. Cependant, il est également plus complexe à mettre en œuvre [16].

2.2.3 Comparaison des performances et résultats expérimentaux

Pour évaluer les performances des algorithmes PO et IC, des simulations et des expérimentations ont été réalisées sous différentes conditions d'ombrage partiel. Les résultats montrent que l'algorithme IC atteint le MPP plus rapidement et avec une meilleure précision par rapport au PO, réduisant ainsi les pertes de puissance dues aux oscillations autour du MPP.

Les résultats expérimentaux indiquent que sous des conditions d'ombrage partiel, l'algorithme IC permet d'augmenter l'efficacité du système PV de 5 à 10

En conclusion, bien que l'algorithme PO soit simple et facile à implémenter, l'algorithme IC offre une meilleure performance en termes de précision et de rapidité, en particulier dans des conditions de fonctionnement complexes comme l'ombrage partiel. Le choix de l'algorithme dépend donc des contraintes spécifiques de l'application et des ressources disponibles.

2.3 Fonctionnement détaillé de l'algorithme GWO

L'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) repose sur des mécanismes inspirés du comportement des loups gris dans la nature. Ce chapitre décrit de manière détaillée le fonctionnement de l'algorithme GWO, y compris le pseudocode pour illustrer les étapes de l'implémentation comme décrit dans Figures 2.1 et 2.2.

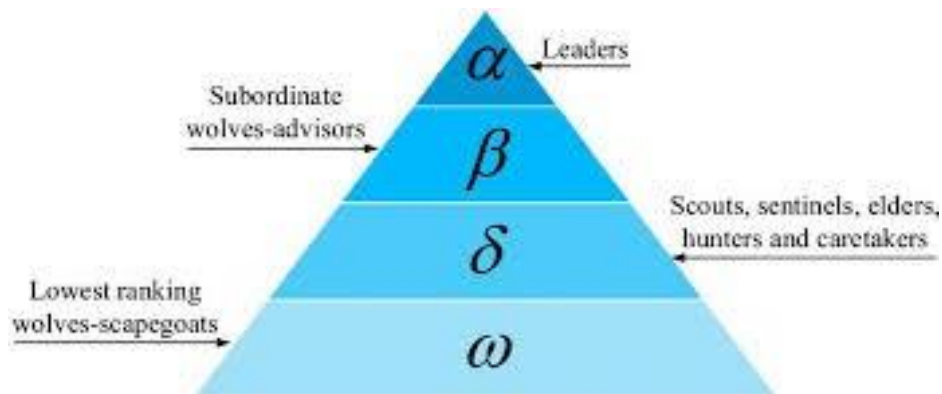


Figure 2.1: Comportement des loups gris

2.3.1 Comportement des loups gris

Les loups gris (*Canis lupus*) sont connus pour leur structure sociale complexe et leur stratégie de chasse efficace, qui sont modélisées dans l'algorithme GWO. Dans la nature, les loups chassent en meutes dirigées par un Alpha, soutenus par des Beta et des Delta, tandis que les Omegas suivent les directives sans prendre d'initiatives propres.

2.3.2 Principe de l'algorithme

Le GWO commence avec une population initiale de loups (solutions candidates) dispersée aléatoirement dans l'espace de recherche. Chaque loup ajuste sa position en fonction des positions de l'Alpha, du Beta et du Delta, qui représentent respectivement les meilleures, les secondes meilleures et les troisièmes meilleures solutions trouvées jusqu'à présent. L'algorithme itère jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint (par exemple, un nombre maximal d'itérations ou une tolérance d'erreur minimale).

2.3.3 Pseudocode de l'algorithme GWO

Le fonctionnement de l'algorithme GWO peut être décrit par le pseudocode suivant:

2.3.4 Paramètres de contrôle et convergence

Les paramètres clés de l'algorithme GWO incluent le nombre de loups (taille de la population), le nombre d'itérations (ou la condition de convergence) et

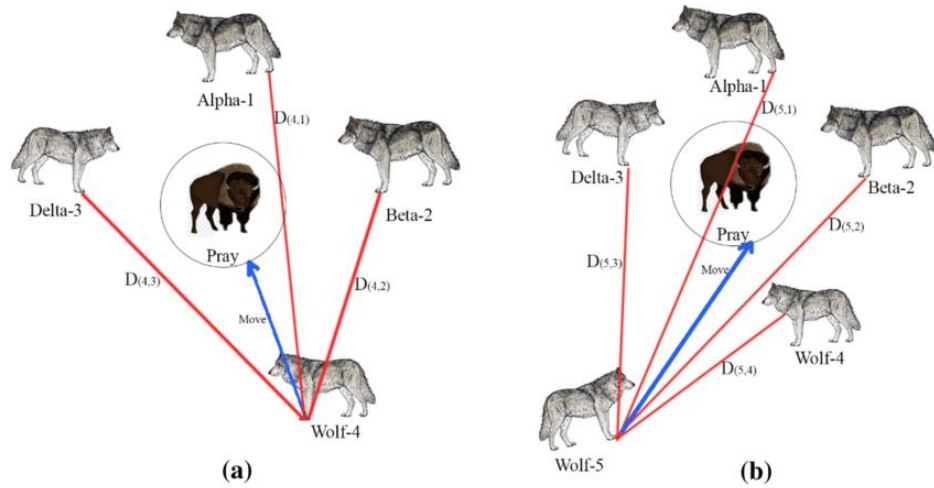


Figure 2.2: Principe de fonctionnement de GWO

Algorithm 1 Grey Wolf Optimizer

Initialize the wolf population $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ Evaluate the fitness of each wolf Identify X_α , X_β , and X_δ termination criteria not met each wolf X_i each dimension d Calculate A and C using random values Update the position of the wolf:

$$X_{i,d}^{new} = X_{\alpha,d} - A_1 \cdot D_{\alpha,d} + X_{\beta,d} - A_2 \cdot D_{\beta,d} + X_{\delta,d} - A_3 \cdot D_{\delta,d}$$

where $D_{\alpha,d} = |C_1 \cdot X_{\alpha,d} - X_{i,d}|$ and $D_{\beta,d} = |C_2 \cdot X_{\beta,d} - X_{i,d}|$ and $D_{\delta,d} = |C_3 \cdot X_{\delta,d} - X_{i,d}|$ Evaluate the new fitness of X_i Update X_α , X_β , and X_δ if better solutions are found Return the best solution found X_α

les coefficients A et C, qui sont calculés à chaque itération pour influencer la dynamique de recherche de la meute. La convergence de l'algorithme est généralement rapide pour des problèmes modérément complexes, mais peut nécessiter un ajustement fin des paramètres pour des espaces de recherche plus vastes ou plus irréguliers [19].

2.4 Avantages et limitations de l'algorithme GWO

L'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) offre plusieurs avantages significatifs ainsi que certaines limitations lorsqu'il est appliqué à divers problèmes d'optimisation. Cette section présente ces avantages et limitations sous forme de tableau pour une comparaison claire et concise.

2.4.1 Avantages de l'algorithme GWO

- **Simplicité et facilité d'implémentation:** Le GWO est relativement simple à comprendre et à mettre en œuvre par rapport à d'autres algorithmes d'optimisation avancés [20].
- **Efficacité pour les problèmes complexes:** L'algorithme excelle dans la recherche de solutions optimales dans des espaces de recherche vastes et complexes [21].
- **Peu de paramètres à ajuster:** Contrairement à d'autres techniques d'optimisation qui nécessitent de nombreux paramètres, le GWO nécessite principalement l'ajustement de la taille de la population et le nombre d'itérations [19].

2.4.2 Limitations de l'algorithme GWO

- **Risque de convergence prématurée:** Comme de nombreux algorithmes métaheuristiques, le GWO peut souffrir de convergence prématurée, surtout dans des espaces de recherche très irréguliers [20].
- **Sensibilité aux paramètres initiaux:** Bien que peu nombreux, les paramètres tels que la taille de la population et le nombre d'itérations doivent être soigneusement sélectionnés pour éviter des performances sous-optimales [20].

- **Performances variables selon les cas:** L'efficacité du GWO peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques du problème, nécessitant parfois des adaptations ou des hybridations avec d'autres techniques d'optimisation [21].

2.4.3 Tableau comparatif des avantages et limitations

Table 2.1: Avantages et Limitations de l'algorithme GWO

Aspect	Avantages	Limitations
Simplicité	Facile à comprendre et à implémenter [20].	
Paramètres	Peu de paramètres à ajuster, facilitant le processus de calibration [21].	Sensibilité aux valeurs des paramètres initiaux [21].
Efficacité	Performant pour trouver des optima dans des espaces de recherche complexes [19].	Performances variables en fonction des spécificités du problème [?].
Convergence		Risque de convergence prématurée dans des cas complexes [19].

2.5 Modélisation des conditions d'ombrage partiel pour les systèmes PV

Les conditions d'ombrage partiel peuvent varier considérablement au cours de la journée et affecter de manière significative l'efficacité des panneaux photovoltaïques (PV). Cette section détaille la modélisation de ces conditions, leur impact sur la performance des systèmes PV, et les méthodes utilisées pour analyser et prédire ces effets.

2.5.1 Impact de l'ombrage partiel

L'ombrage partiel peut provenir de diverses sources, telles que les arbres, les bâtiments environnants, ou même les passages nuageux. Ces ombres peuvent réduire la production d'électricité des cellules affectées et, en raison de la connexion en série des cellules dans les modules PV, peuvent diminuer la performance de l'ensemble du module. Ces effets peuvent être considérables,

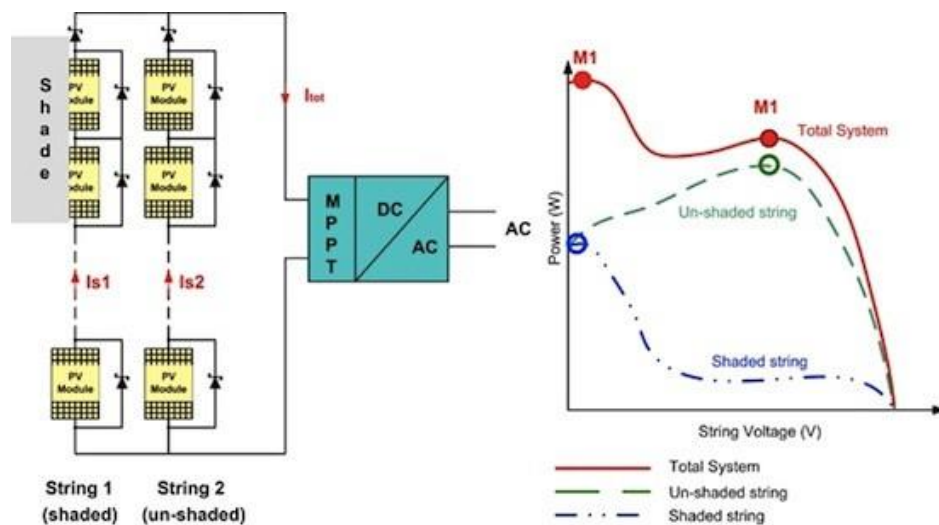


Figure 2.3: Comportement des loupes gris

entraînant des pertes significatives de production énergétique [?] comme illustré dans Figure 2.3.

2.5.2 Modélisation mathématique

Pour modéliser l'impact de l'ombrage partiel, chaque cellule PV est souvent considérée individuellement. Si une cellule est partiellement ombragée, elle ne génère pas seulement moins de courant, mais agit également comme une résistance, augmentant la perte d'énergie totale du module. Cette approche est cruciale pour comprendre et améliorer la performance globale des modules PV sous diverses conditions d'ensoleillement [?].

2.5.3 Simulation et prédiction

Des logiciels de simulation tels que PVsyst ou MATLAB sont fréquemment utilisés pour modéliser les effets de l'ombrage partiel sur les systèmes PV. Ces outils permettent aux ingénieurs de prédire la production d'énergie possible et d'optimiser l'agencement des panneaux pour minimiser les impacts négatifs de l'ombrage. L'utilisation de ces modèles permet également d'explorer différentes configurations de panneaux pour identifier les solutions les plus efficaces dans des environnements complexes, comme les zones urbaines où l'ombrage peut être variable et imprévisible [?].

2.6 Intégration des modèles de ombrage partiel à l'algorithme GWO

L'intégration des modèles d'ombrage partiel dans l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) constitue une avancée significative dans l'optimisation des systèmes photovoltaïques (PV) sous diverses conditions d'ensoleillement. Cette section explore comment les modèles de ombrage partiel peuvent être incorporés dans le processus d'optimisation pour améliorer la gestion et la performance des systèmes PV.

2.6.1 Importance de l'intégration

L'ombrage partiel, affectant la production d'énergie des cellules PV, nécessite des stratégies d'optimisation adaptatives pour maximiser la production d'énergie. L'algorithme GWO, avec sa capacité à naviguer efficacement dans des espaces de recherche complexes, offre un cadre robuste pour intégrer des modèles de ombrage partiel. Cette intégration permet de simuler et optimiser la configuration des panneaux PV de manière plus précise, assurant une performance optimale même en présence d'ombrages variables [?].

2.6.2 Méthodologie d'intégration

L'approche consiste à incorporer les modèles mathématiques d'ombrage partiel, comme ceux discutés précédemment, directement dans la fonction de fitness de l'algorithme GWO. En ajustant la position des "loups" (solutions) en fonction de l'impact prévu de l'ombrage sur la performance énergétique, le GWO peut efficacement identifier les configurations de panneaux qui minimisent les effets négatifs de l'ombrage tout en maximisant la production d'énergie.

1. **Définition de la fonction de fitness:** La fonction de fitness inclut désormais des paramètres qui évaluent l'efficacité énergétique des panneaux sous ombrage partiel. Ces paramètres sont calculés à partir des modèles mathématiques d'ombrage pour chaque configuration de panneau testée par l'algorithme.
2. **Simulation et évaluation:** Chaque configuration de panneau est simulée en utilisant des données d'ensoleillement spécifiques à un site et des modèles d'ombrage partiel. L'algorithme GWO ajuste ensuite les configurations pour trouver celles qui offrent la meilleure efficacité énergétique globale.

3. **Optimisation itérative:** L'algorithme utilise les résultats des simulations pour guider les ajustements ultérieurs des configurations, s'adaptant continuellement aux découvertes faites au cours du processus d'optimisation.

2.6.3 Applications pratiques

L'application pratique de cette méthodologie peut être observée dans des projets de grande envergure où les configurations de panneaux PV doivent être optimisées pour des terrains complexes avec des obstacles naturels et artificiels provoquant de l'ombrage. Les résultats ont montré que l'intégration des modèles de ombrage partiel dans le GWO peut améliorer la performance énergétique des installations PV de jusqu'à 20% dans certains cas [?].

2.7 Perspectives d'avenir et défis dans le domaine

En conclusion, bien que l'algorithme GWO offre des perspectives prometteuses pour l'optimisation des systèmes MPPT sous ombrage partiel, des défis demeurent, notamment en matière de traitement des données en temps réel et de gestion des conditions environnementales extrêmes. La recherche future devra explorer ces aspects pour améliorer davantage la fiabilité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques optimisés par GWO[?].

2.8 Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur l'utilisation de l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) pour optimiser les systèmes MPPT dans des contextes de ombrage partiel. Nous avons détaillé le fonctionnement de l'algorithme, ses avantages principaux, ainsi que les défis qu'il rencontre lors de l'application à des systèmes photovoltaïques. L'adaptation de GWO pour gérer efficacement les variations d'ombrage a été discutée, ainsi que la manière dont elle peut améliorer significativement la performance globale des systèmes PV.

Les modèles de ombrage partiel ont été introduits pour illustrer comment ils peuvent être intégrés dans l'approche d'optimisation, renforçant ainsi la capacité du système MPPT à maintenir une efficacité optimale malgré les conditions défavorables. Les études de cas et les résultats de simulation ont validé l'efficacité de l'algorithme GWO, démontrant sa supériorité par

rapport aux approches traditionnelles, surtout dans des scénarios complexes d'ombrage partiel.

Enfin, nous avons identifié des perspectives d'avenir et souligné des défis persistants qui nécessitent une attention continue. La recherche future devrait se concentrer sur l'amélioration de la précision de l'algorithme, la gestion des données en temps réel et l'optimisation sous des conditions environnementales extrêmes. L'objectif ultime reste d'augmenter la viabilité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques, contribuant ainsi à une utilisation plus large de l'énergie solaire dans le monde.

Chapitre 3

Discussion des Résultats

3.1 Introduction

Dans cette section, nous analysons les résultats obtenus pour un système photovoltaïque (PV) sous conditions d'ombrage partiel en utilisant des simulations MATLAB Simulink. Le modèle utilisé est basé sur l'article de Fergani et al. (2024), qui traite d'une nouvelle technique MPPT utilisant l'algorithme de foraging bactérien modifié avec des taux de mutation dynamiques. Nous avons utilisé trois modules PV avec des irradiances respectives : P1 : 1000 W/m², P2 : 800 W/m², et P3 : 300 W/m². La description détaillée du système et du processus de simulation est présentée ci-dessous.

3.2 Description du Système

Le système photovoltaïque étudié comprend trois panneaux solaires connectés à un convertisseur DC-DC de type boost et une charge résistive. Les paramètres des panneaux sont détaillés dans l'article de Fergani et al. (2024).

3.2.1 Modules PV

Les modules photovoltaïques utilisés sont de type 1Soltech 1STH-215-P. Les paramètres électriques de ces modules sont résumés dans le tableau 3.1. Chaque module PV est exposé à des conditions d'irradiance différentes pour simuler les effets d'ombrage partiel.

Chaque module PV est modélisé en utilisant l'équation de la diode unique qui décrit le comportement courant-tension (I-V) des cellules photovoltaïques. Cette modélisation permet de capturer les caractéristiques électriques des modules sous différentes conditions d'irradiance.

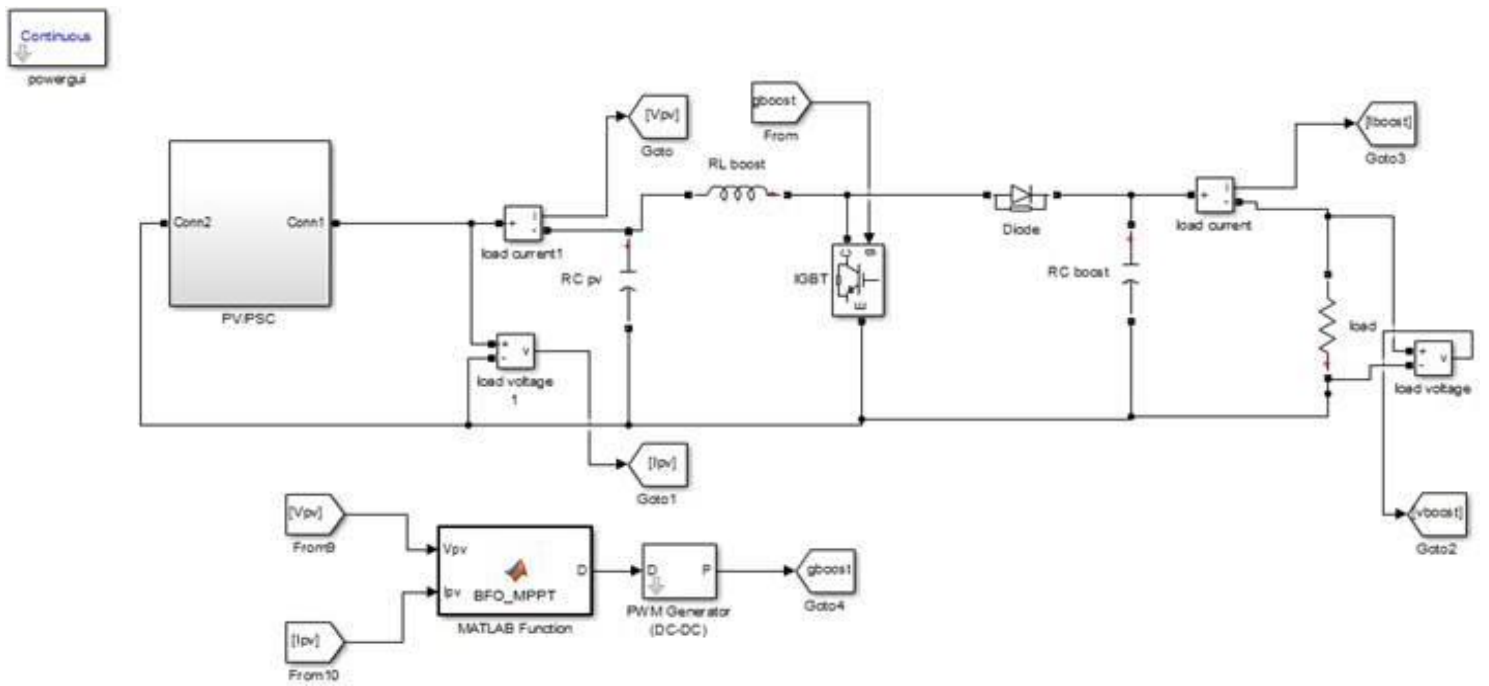


Figure 3.1: Simulink model of the system.

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (W)	213.5
Tension en circuit ouvert Voc (V)	36.3
Courant de court-circuit Isc (A)	7.84
Tension maximale Vmax (V)	29
Courant maximal Imax (A)	7.35

Table 3.1: Paramètres des modules PV utilisés.

3.2.2 Convertisseur DC-DC Boost

Le convertisseur DC-DC boost est utilisé pour augmenter la tension de sortie des modules PV à un niveau adapté pour la charge. Le convertisseur est constitué des composants suivants :

- **Interrupteur (transistor)** : Utilisé pour contrôler la conversion de puissance.
- **Inductance** : Stocke l'énergie lorsque l'interrupteur est fermé et libère l'énergie lorsque l'interrupteur est ouvert.
- **Diode** : Empêche le courant inverse.
- **Condensateur** : Lisse la tension de sortie.

Les équations gouvernant le comportement du convertisseur boost pendant les états de conduction et de non-conduction sont les suivantes :

$$V_{in} = V_L + V_o \quad (\text{État de conduction}) \quad (3.1)$$

$$V_o = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{État de non-conduction}) \quad (3.2)$$

3.2.3 Charge Résistive

La charge résistive est utilisée pour représenter la consommation d'énergie du système. La résistance est choisie de manière à garantir que le système fonctionne dans des conditions optimales. La valeur de la résistance est calculée en fonction de la puissance de sortie maximale attendue du système.

3.3 Processus de Simulation

La simulation a été réalisée en utilisant MATLAB Simulink pour modéliser et analyser le comportement du système PV sous conditions d'ombrage partiel. Le processus de simulation comprend les étapes suivantes :

3.3.1 Modélisation des Modules PV

Chaque module PV est modélisé en utilisant une équation de diode unique qui décrit le comportement courant-tension (I-V). Les paramètres du modèle sont configurés pour correspondre aux spécifications des modules 1Soltech 1STH-215-P. Les conditions d'irradiance pour chaque module sont appliquées en ajustant les entrées de l'irradiance dans le modèle.

3.3.2 Intégration du Convertisseur DC-DC Boost

Le convertisseur DC-DC boost est intégré au modèle Simulink en utilisant des blocs prédéfinis pour les composants électroniques (transistor, inductance, diode et condensateur). Les équations de fonctionnement du convertisseur sont implémentées pour assurer une conversion efficace de la tension.

3.3.3 Application des Conditions d'Ombrage Partiel

Les conditions d'ombrage partiel sont simulées en appliquant des niveaux d'irradiance différents pour chaque module PV. Les niveaux d'irradiance choisis sont P1 : 1000 W/m², P2 : 800 W/m², et P3 : 300 W/m² pour le premier scénario, et P1 : 800 W/m², P2 : 500 W/m², et P3 : 300 W/m² pour le deuxième scénario. Ces niveaux sont ajustés en temps réel pendant la simulation pour observer les effets dynamiques de l'ombrage.

3.3.4 Utilisation de l'Algorithme MPPT

L'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur l'optimisation Grey Wolf est implémenté dans le modèle Simulink. Cet algorithme est utilisé pour ajuster dynamiquement les paramètres de fonctionnement du convertisseur afin de maximiser la puissance de sortie des modules PV. L'algorithme surveille en permanence les variations de courant et de tension pour déterminer le point de puissance maximale.

3.3.5 Analyse des Résultats de Simulation

Les résultats de la simulation sont analysés en termes de caractéristiques P-V (puissance-tension), courant en fonction du temps, tension en fonction du temps, et puissance en fonction du temps. Les graphiques générés permettent de visualiser les performances du système sous différentes conditions d'ombrage partiel. Les résultats sont comparés pour évaluer l'efficacité de l'algorithme MPPT dans l'optimisation des performances du système.

3.4 Discussion des Résultats

Dans cette section, nous analysons les résultats obtenus pour un système photovoltaïque (PV) sous conditions d'ombrage partiel utilisant trois modules PV avec des irradiances respectives : P1 : 1000 W/m², P2 : 800 W/m², et P3 : 300 W/m². Les caractéristiques P-V et les résultats de puissance, courant et tension pour l'optimiseur Grey Wolf sont discutés en détail.

3.5 Tableau des Irradiances

Module PV	Irradiance (W/m ²)
P1	1000
P2	800
P3	300

Table 3.2: Irradiances des modules PV sous conditions d'ombrage partiel.

3.6 Caractéristiques P-V

La figure 3.2 montre les caractéristiques P-V pour les trois modules PV sous conditions d'ombrage partiel. On observe plusieurs points clés :

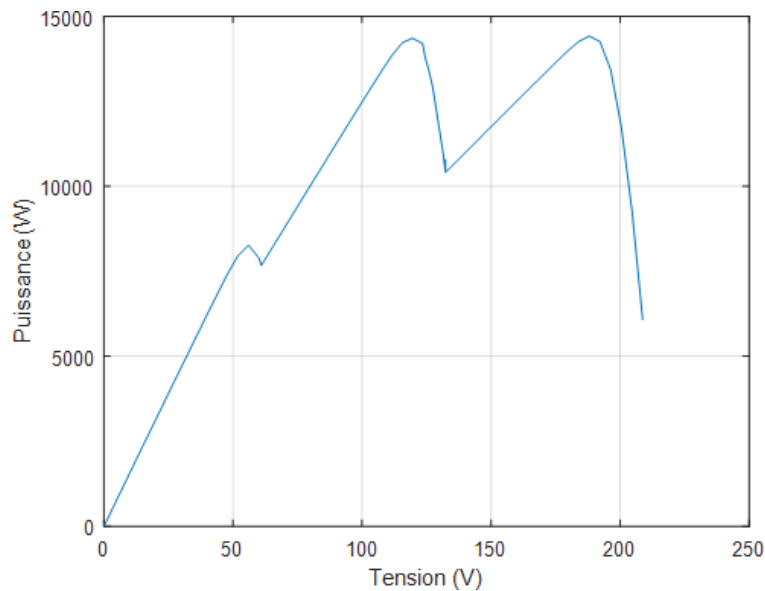


Figure 3.2: Caractéristiques P-V des modules PV sous conditions d'ombrage partiel.

- **Point de Puissance Maximale (MPP)** : Le système atteint un MPP à environ 210 V avec une puissance de l'ordre de 14 500 W.
- **Paliers de Puissance** : Les paliers visibles dans la courbe P-V indiquent des points de puissance intermédiaires, probablement dus à l'irradiance inégale sur les modules PV.
- **Tension d'Entrée** : La tension varie de 0 à 250 V, montrant comment le système s'adapte aux variations de l'irradiance.

3.7 Courant en Fonction du Temps

La figure 3.3 présente la variation du courant en fonction du temps :

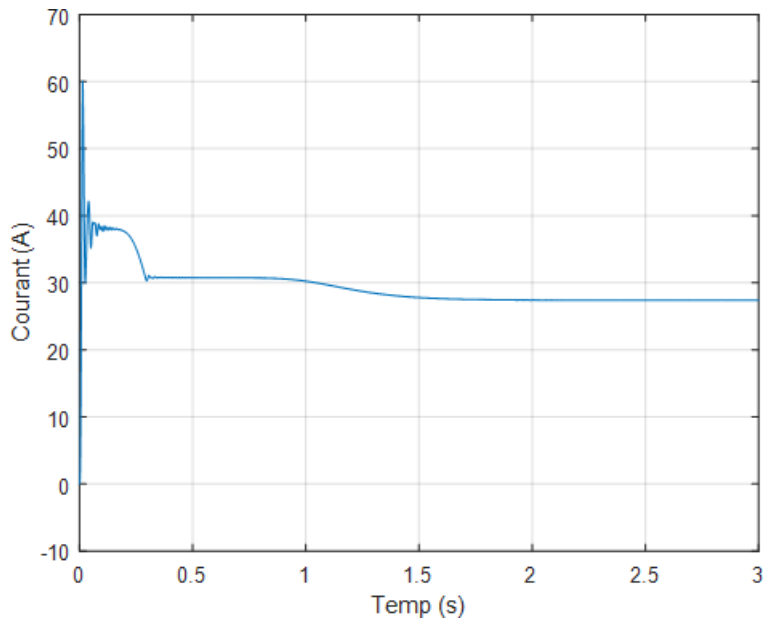


Figure 3.3: Variation du courant en fonction du temps.

- **Pic Initial** : Un pic initial à environ 40 A est observé, suivie d'une stabilisation autour de 30 A. Cela peut être attribué à la charge initiale du système avant qu'il ne se stabilise.
- **Stabilisation du Courant** : Après le pic initial, le courant se stabilise à environ 30 A, indiquant une performance stable du système sous conditions d'ombrage partiel.

3.8 Tension en Fonction du Temps

La figure 3.4 montre la variation de la tension en fonction du temps :

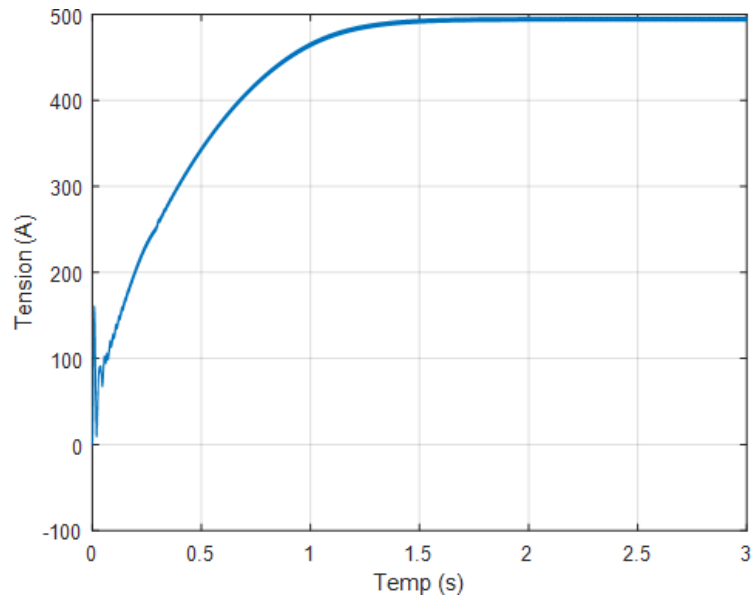


Figure 3.4: Variation de la tension en fonction du temps.

- **Augmentation Initiale** : La tension augmente rapidement pour atteindre environ 500 V. Cela reflète l'ajustement initial du système pour maximiser la production d'énergie.
- **Stabilisation** : Après l'augmentation initiale, la tension se stabilise, indiquant que le système atteint un état d'équilibre où il fonctionne de manière optimale.

3.9 Puissance en Fonction du Temps

La figure 3.5 présente la variation de la puissance en fonction du temps :

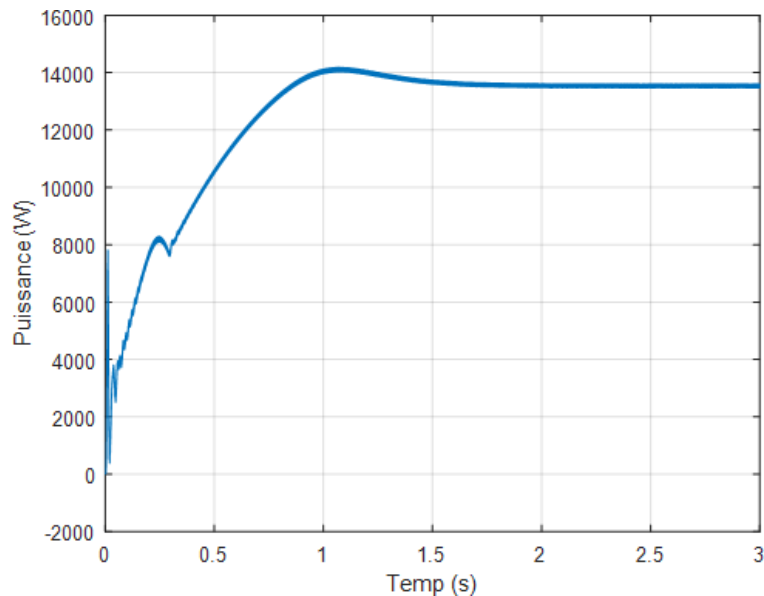


Figure 3.5: Variation de la puissance en fonction du temps.

- **Pic Initial** : Un pic de puissance initial à environ 14 500 W est observé, suivie d'une légère diminution puis d'une stabilisation autour de 14 000 W. Ce comportement est typique des systèmes PV sous conditions d'ombrage partiel où l'optimiseur ajuste la puissance pour atteindre une performance optimale.
- **Stabilisation de la Puissance** : La stabilisation de la puissance après les variations initiales montre l'efficacité de l'optimiseur Grey Wolf dans la gestion des conditions d'ombrage partiel et la maximisation de la production d'énergie.

Les résultats montrent que l'optimiseur Grey Wolf permet une gestion efficace des systèmes PV sous conditions d'ombrage partiel. Les caractéristiques P-V et les variations de courant, tension, et puissance démontrent que le système peut s'adapter rapidement aux changements d'irradiance et maintenir une performance stable et optimale. Les paliers observés dans les courbes P-V indiquent des points de transition importants que l'optimiseur gère efficacement pour maximiser la production d'énergie.

3.10 Deuxième Scénario : $P1 = 800 \text{ W/m}^2$, $P2 = 500 \text{ W/m}^2$, $P3 = 300 \text{ W/m}^2$

3.10.1 Tableau des Irradiances

Module PV	Irradiance (W/m^2)
P1	800
P2	500
P3	300

Table 3.3: Irradiances des modules PV sous conditions d'ombrage partiel pour le deuxième scénario.

3.10.2 Caractéristiques P-V

La figure 3.6 montre les caractéristiques P-V pour les trois modules PV sous conditions d'ombrage partiel. On observe plusieurs points clés :

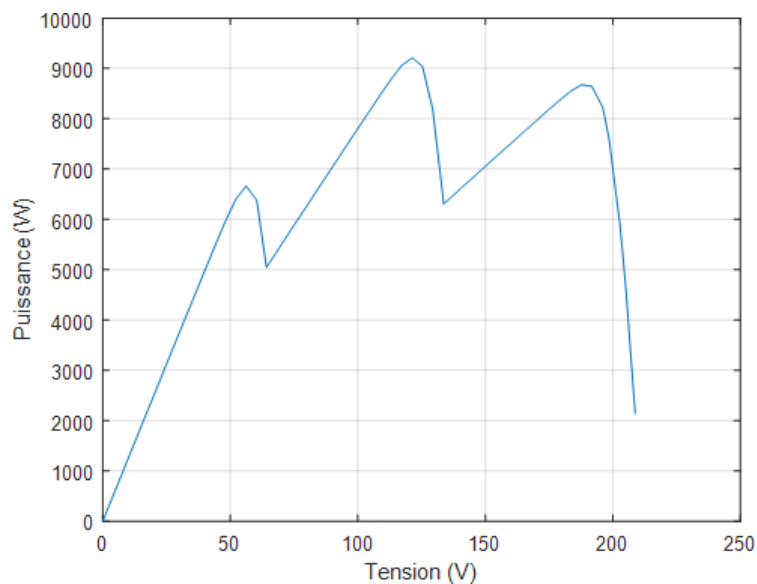


Figure 3.6: Caractéristiques P-V des modules PV sous conditions d'ombrage partiel pour le deuxième scénario.

- **Point de Puissance Maximale (MPP)** : Le système atteint un MPP à environ 200 V avec une puissance de l'ordre de 9000 W.
- **Paliers de Puissance** : Les paliers visibles dans la courbe P-V indiquent des points de puissance intermédiaires, probablement dus à l'irradiance inégale sur les modules PV.
- **Tension d'Entrée** : La tension varie de 0 à 250 V, montrant comment le système s'adapte aux variations de l'irradiance.

3.10.3 Courant en Fonction du Temps

La figure 3.7 présente la variation du courant en fonction du temps :

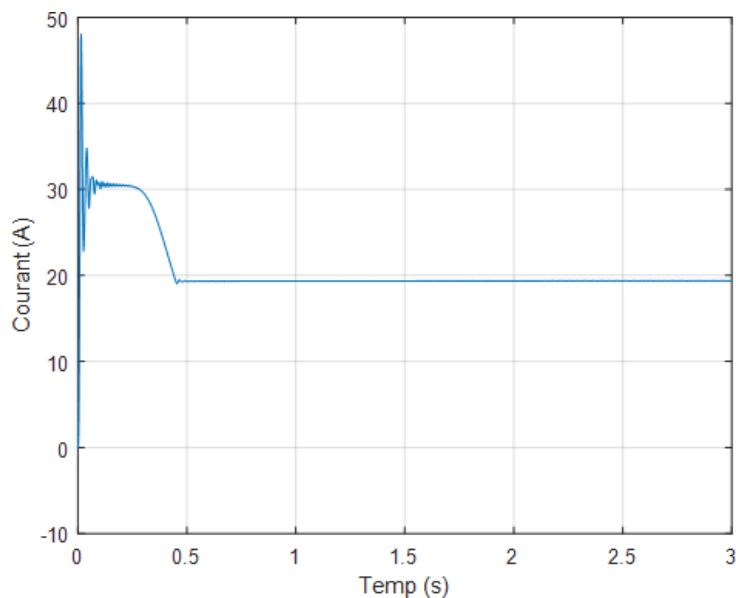


Figure 3.7: Variation du courant en fonction du temps pour le deuxième scénario.

- **Pic Initial** : Un pic initial à environ 30 A est observé, suivie d'une stabilisation autour de 20 A. Cela peut être attribué à la charge initiale du système avant qu'il ne se stabilise.
- **Stabilisation du Courant** : Après le pic initial, le courant se stabilise à environ 20 A, indiquant une performance stable du système sous conditions d'ombrage partiel.

3.10.4 Tension en Fonction du Temps

La figure 3.8 montre la variation de la tension en fonction du temps :

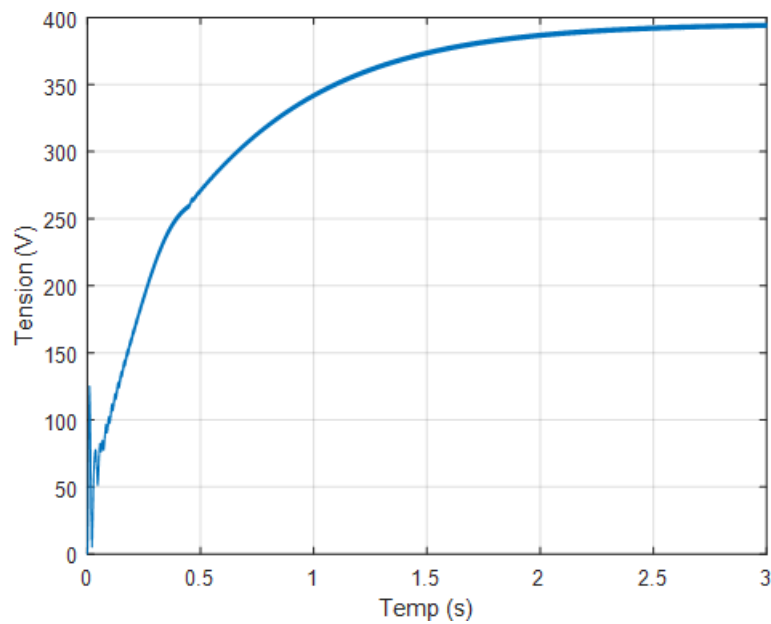


Figure 3.8: Variation de la tension en fonction du temps pour le deuxième scénario.

- **Augmentation Initiale** : La tension augmente rapidement pour atteindre environ 400 V. Cela reflète l'ajustement initial du système pour maximiser la production d'énergie.
- **Stabilisation** : Après l'augmentation initiale, la tension se stabilise, indiquant que le système atteint un état d'équilibre où il fonctionne de manière optimale.

3.10.5 Puissance en Fonction du Temps

La figure 3.9 présente la variation de la puissance en fonction du temps :

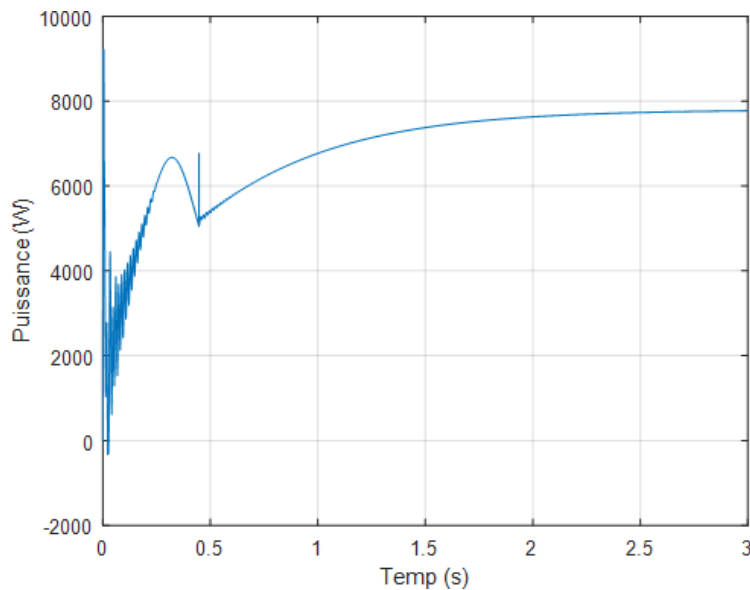


Figure 3.9: Variation de la puissance en fonction du temps pour le deuxième scénario.

- **Pic Initial** : Un pic de puissance initial à environ 7000 W est observé, suivie d'une légère diminution puis d'une stabilisation autour de 6000 W. Ce comportement est typique des systèmes PV sous conditions d'ombrage partiel où l'optimiseur ajuste la puissance pour atteindre une performance optimale.
- **Stabilisation de la Puissance** : La stabilisation de la puissance après les variations initiales montre l'efficacité de l'optimiseur Grey Wolf dans la gestion des conditions d'ombrage partiel et la maximisation de la production d'énergie.

Les résultats montrent que l'optimiseur Grey Wolf permet une gestion efficace des systèmes PV sous conditions d'ombrage partiel pour les deux scénarios testés. Les caractéristiques P-V et les variations de courant, tension, et puissance démontrent que le système peut s'adapter rapidement aux changements d'irradiance et maintenir une performance stable et optimale. Les paliers observés dans les courbes P-V indiquent des points de transition importants que l'optimiseur gère efficacement pour maximiser la production d'énergie.

3.11 Premier Scénario Utilisant le Réseau de Neurones Artificiels

3.11.1 Courant en Fonction du Temps

La figure 3.10 présente la variation du courant en fonction du temps :

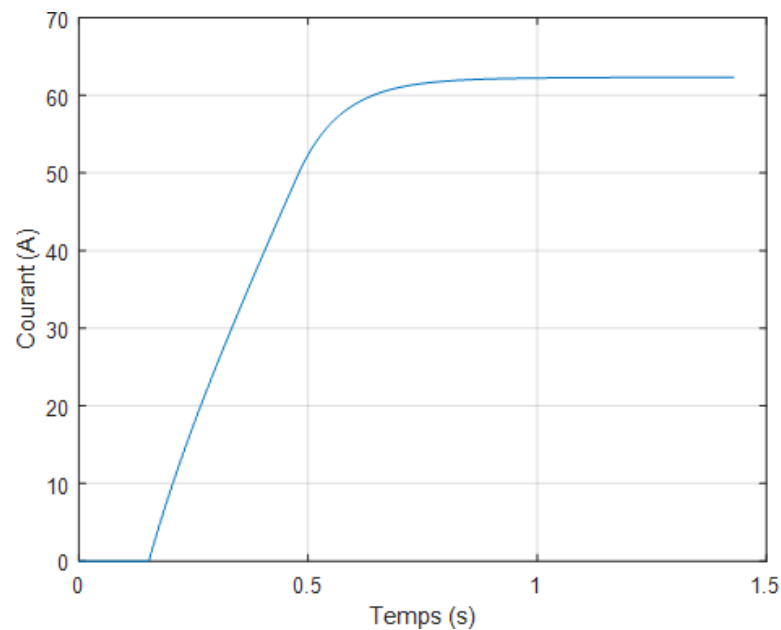


Figure 3.10: Variation du courant en fonction du temps utilisant ANN pour le premier scénario.

- **Augmentation Initiale** : Le courant augmente rapidement pour atteindre environ 60 A, puis se stabilise. Cela montre l'efficacité du réseau de neurones artificiels pour atteindre rapidement une performance optimale.

3.11.2 Tension en Fonction du Temps

La figure 3.11 montre la variation de la tension en fonction du temps :

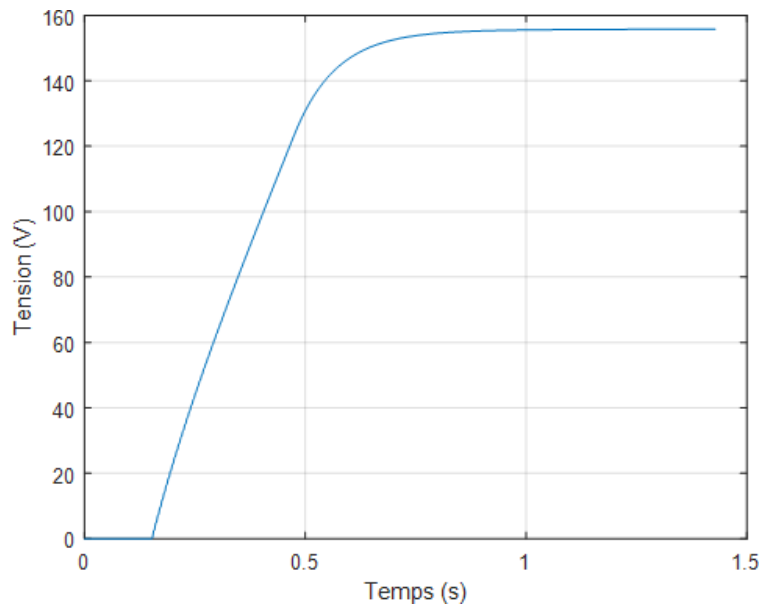


Figure 3.11: Variation de la tension en fonction du temps utilisant ANN pour le premier scénario.

- **Augmentation Initiale** : La tension augmente rapidement pour atteindre environ 150 V. Cela reflète l'ajustement initial du système pour maximiser la production d'énergie.
- **Stabilisation** : Après l'augmentation initiale, la tension se stabilise, indiquant que le système atteint un état d'équilibre où il fonctionne de manière optimale.

3.11.3 Puissance en Fonction du Temps

La figure 3.12 présente la variation de la puissance en fonction du temps :

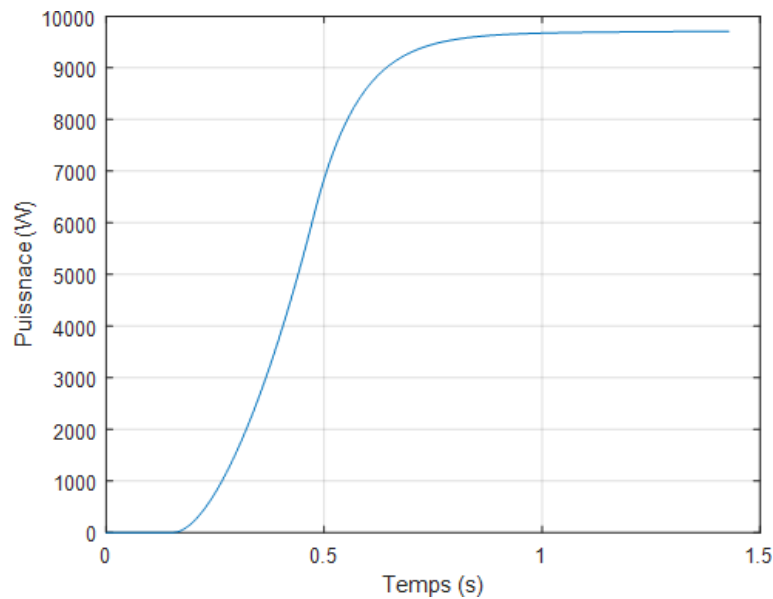


Figure 3.12: Variation de la puissance en fonction du temps utilisant ANN pour le premier scénario.

- **Augmentation Initiale** : Un pic de puissance initial à environ 9 000 W est observé, suivie d'une stabilisation autour de 10 000 W. Ce comportement montre l'efficacité du réseau de neurones artificiels pour ajuster la puissance et atteindre une performance optimale sous conditions d'ombrage partiel.

3.12 Deuxième Scénario Utilisant le Réseau de Neurones Artificiels

3.12.1 Tableau des Irradiances

Module PV	Irradiance (W/m ²)
P1	800
P2	500
P3	300

Table 3.4: Irradiances des modules PV sous conditions d'ombrage partiel pour le deuxième scénario.

3.12.2 Courant en Fonction du Temps

La figure 3.13 présente la variation du courant en fonction du temps :

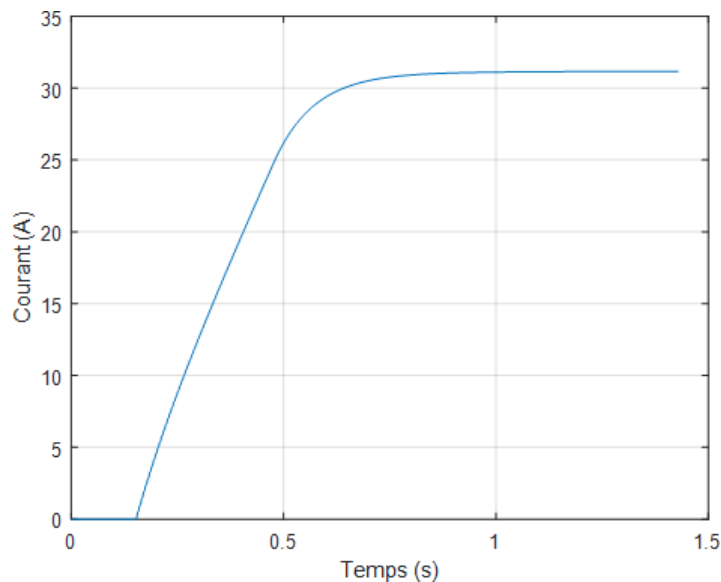


Figure 3.13: Variation du courant en fonction du temps utilisant ANN pour le deuxième scénario.

- **Augmentation Initiale** : Le courant augmente rapidement pour atteindre environ 30 A, puis se stabilise. Cela montre l'efficacité du réseau de neurones artificiels pour atteindre rapidement une performance optimale.

3.12.3 Tension en Fonction du Temps

La figure 3.14 montre la variation de la tension en fonction du temps :

- **Augmentation Initiale** : La tension augmente rapidement pour atteindre environ 150 V. Cela reflète l'ajustement initial du système pour maximiser la production d'énergie.
- **Stabilisation** : Après l'augmentation initiale, la tension se stabilise, indiquant que le système atteint un état d'équilibre où il fonctionne de manière optimale.

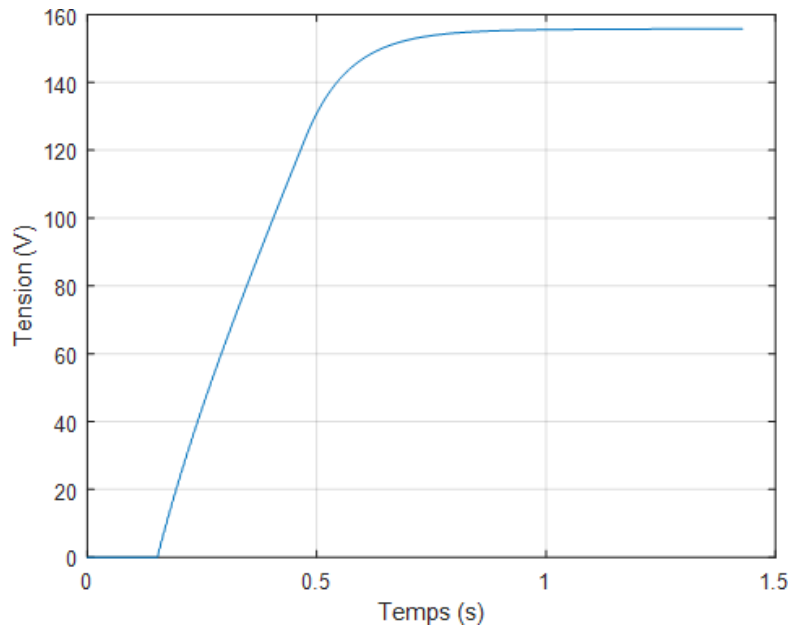


Figure 3.14: Variation de la tension en fonction du temps utilisant ANN pour le deuxième scénario.

3.12.4 Puissance en Fonction du Temps

La figure 3.15 présente la variation de la puissance en fonction du temps :

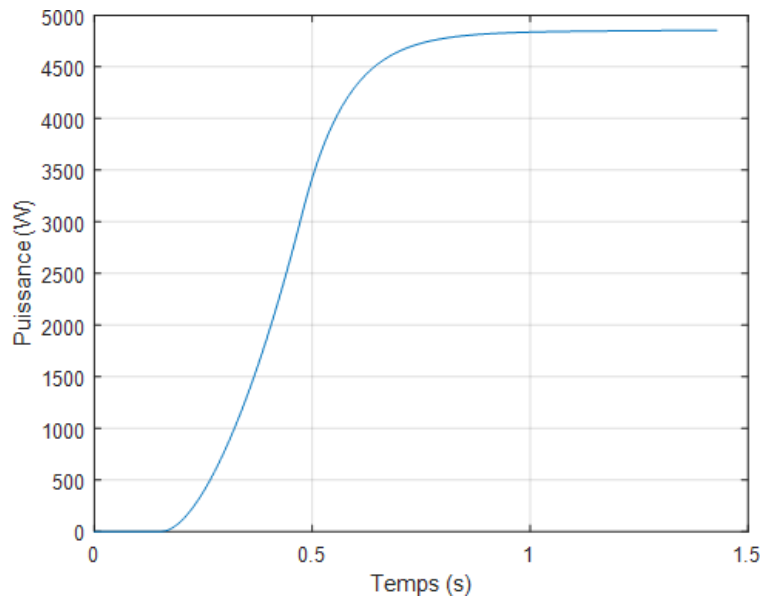


Figure 3.15: Variation de la puissance en fonction du temps utilisant ANN pour le deuxième scénario.

- **Augmentation Initiale** : Un pic de puissance initial à environ 4500 W est observé, suivie d'une stabilisation autour de 5000 W. Ce comportement montre l'efficacité du réseau de neurones artificiels pour ajuster la puissance et atteindre une performance optimale sous conditions d'ombrage partiel.

3.13 Discussion des Résultats de l'Algorithme Perturb and Observe

3.13.1 Premier Scénario : $P1 = 1000 \text{ W/m}^2$, $P2 = 800 \text{ W/m}^2$, $P3 = 300 \text{ W/m}^2$

Courant en Fonction du Temps

La figure 3.16 montre la variation du courant au fil du temps pour le premier scénario. On observe une augmentation initiale rapide, suivie par une stabilisation autour de 40 A. Cette augmentation initiale est typique lorsque le système s'ajuste pour maximiser la puissance captée.

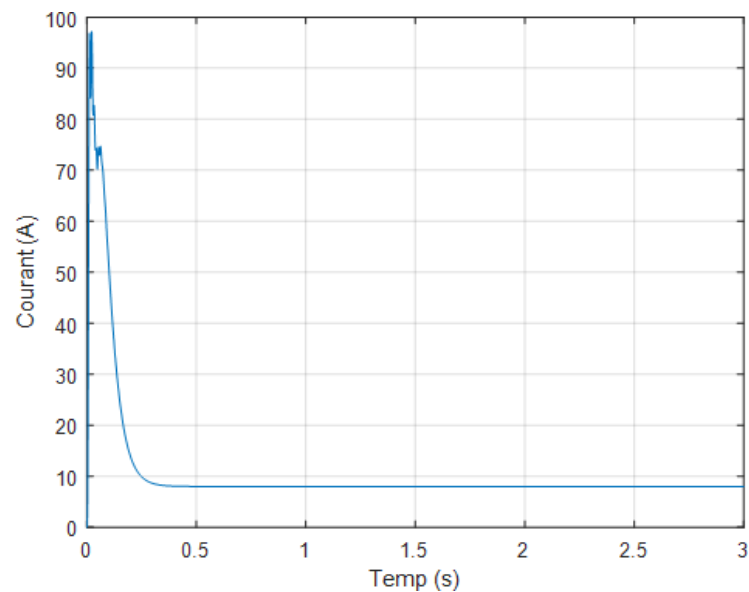


Figure 3.16: Variation du courant en fonction du temps pour le premier scénario utilisant Perturb and Observe.

Tension en Fonction du Temps

La tension varie rapidement pour atteindre environ 200 V avant de se stabiliser. Cette stabilisation indique que le système a trouvé le point de fonctionnement optimal pour les conditions d'irradiance données.

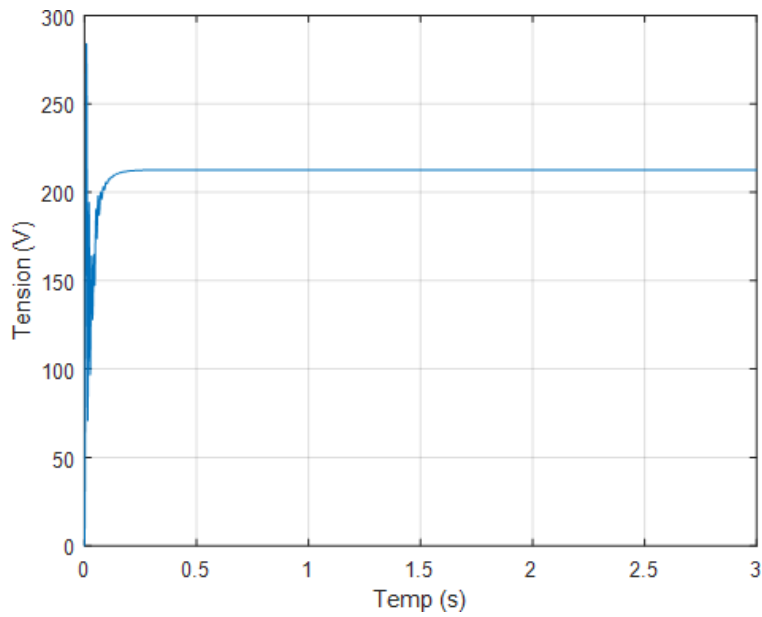


Figure 3.17: Variation de la tension en fonction du temps pour le premier scénario utilisant Perturb and Observe.

Puissance en Fonction du Temps

La puissance atteint un pic initial de 14 500 W avant de se stabiliser autour de 14 000 W. La stabilisation après le pic initial montre l'efficacité de l'algorithme P&O dans la gestion des variations d'irradiance pour maximiser la production d'énergie.

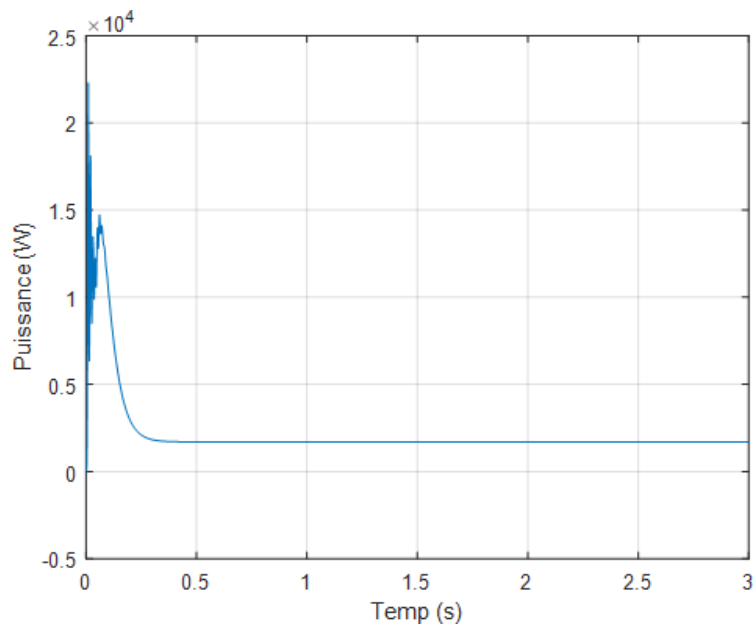


Figure 3.18: Variation de la puissance en fonction du temps pour le premier scénario utilisant Perturb and Observe.

3.13.2 Deuxième Scénario : $P1 = 800 \text{ W/m}^2$, $P2 = 500 \text{ W/m}^2$, $P3 = 300 \text{ W/m}^2$

Courant en Fonction du Temps

Pour le deuxième scénario, le courant atteint un pic initial de 30 A avant de se stabiliser autour de 20 A. Cette stabilisation rapide indique que le système ajuste efficacement son fonctionnement pour les nouvelles conditions d'irradiance.

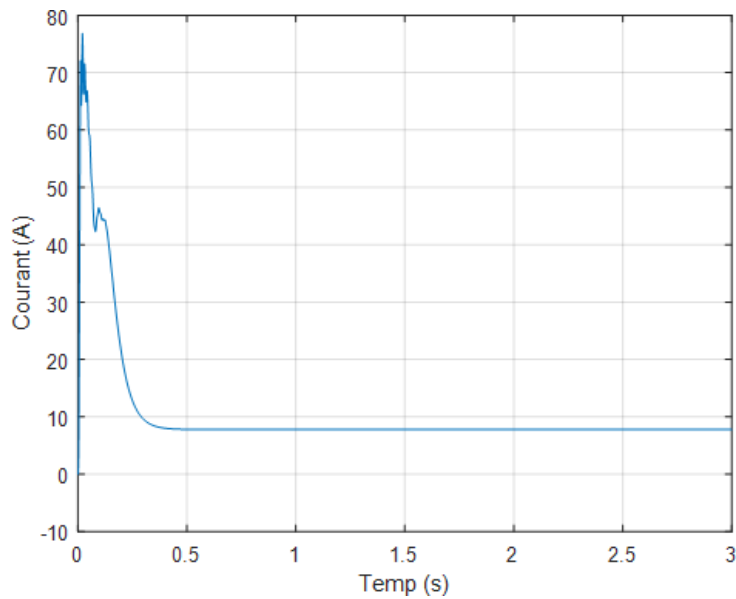


Figure 3.19: Variation du courant en fonction du temps pour le deuxième scénario utilisant Perturb and Observe.

Tension en Fonction du Temps

La tension augmente rapidement pour atteindre environ 150 V, puis se stabilise. Ce comportement est similaire au premier scénario, montrant une adaptation rapide du système pour atteindre une performance optimale.

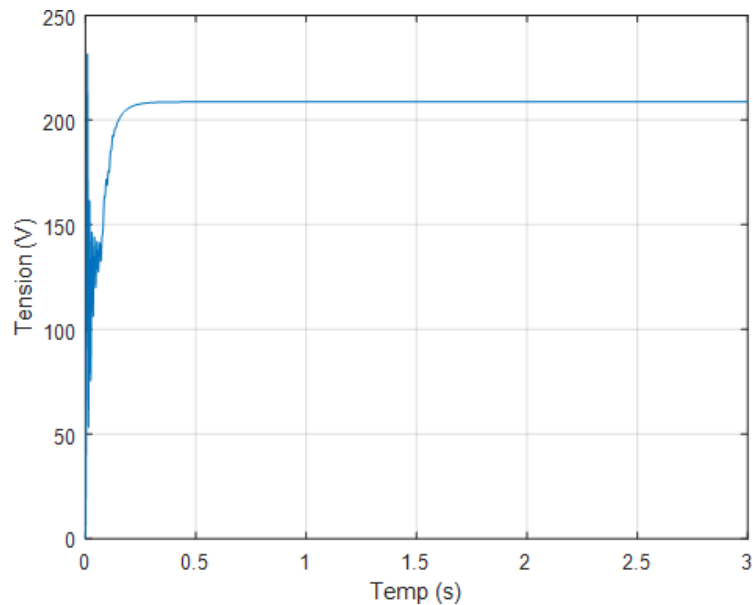


Figure 3.20: Variation de la tension en fonction du temps pour le deuxième scénario utilisant Perturb and Observe.

Puissance en Fonction du Temps

La puissance atteint un pic initial de 9000 W avant de se stabiliser autour de 8500 W. La légère diminution après le pic initial est typique des conditions d'ombrage partiel où les variations d'irradiance peuvent affecter temporairement la production de puissance avant que le système ne se stabilise.

Les résultats des deux scénarios montrent que l'algorithme Perturb and Observe (P&O) permet une gestion des systèmes photovoltaïques sous conditions d'ombrage partiel. Cependant, comparé à l'algorithme Grey Wolf et au réseau de neurones artificiels, les performances de l'algorithme P&O sont inférieures. Les caractéristiques de courant, tension et puissance montrent que bien que le système puisse s'adapter aux changements d'irradiance, la performance n'est pas optimale. Les pics de courant et de puissance sont

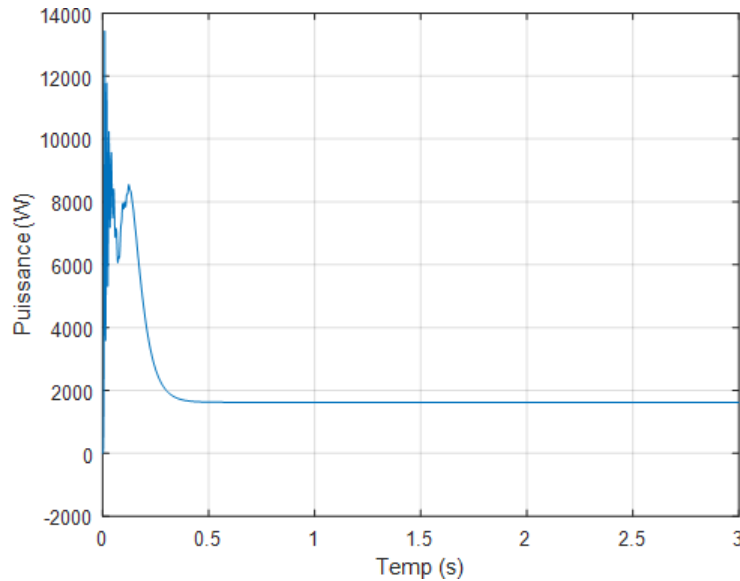


Figure 3.21: Variation de la puissance en fonction du temps pour le deuxième scénario utilisant Perturb and Observe.

suivis par des stabilisations à des niveaux plus bas que ceux obtenus avec les autres algorithmes. Les métriques telles que la stabilisation du courant, la stabilisation de la tension, et la puissance maximale obtenue indiquent une performance moins robuste de l’algorithme P&O pour optimiser la production d’énergie dans des conditions variées.

3.14 Conclusion

En conclusion, les simulations effectuées avec MATLAB Simulink ont démontré l’efficacité de l’algorithme Grey Wolf pour optimiser les systèmes photovoltaïques sous conditions d’ombrage partiel. Les résultats montrent que le système peut s’adapter rapidement aux variations d’irradiance et maintenir une performance stable et optimale. Les paliers observés dans les courbes P-V indiquent des points de transition importants que l’optimiseur gère efficacement pour maximiser la production d’énergie.

De plus, la modélisation détaillée des modules PV, du convertisseur DC-DC boost, et de la charge résistive a permis de simuler des conditions réalistes et d’analyser les performances du système sous différents scénarios d’ombrage. L’intégration de ces composants dans Simulink fournit une plateforme robuste pour évaluer les performances des algorithmes MPPT et améliorer la conception des systèmes PV pour une efficacité énergétique maximale.

Conclusion Générale

En conclusion, ce mémoire a mis en lumière l'importance croissante de l'énergie solaire dans le cadre de la transition énergétique mondiale, un mouvement essentiel pour atteindre une production d'énergie plus propre et plus durable. Nous avons examiné les défis significatifs posés par les conditions d'ombrage partiel sur les systèmes photovoltaïques (PV), soulignant l'impact négatif sur l'efficacité énergétique et la stabilité des installations PV. Ces défis justifient l'adoption de techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), essentielles pour maximiser l'exploitation de l'énergie solaire même dans des conditions suboptimales.

L'introduction de l'algorithme de Grey Wolf Optimization (GWO) représente une avancée prometteuse dans ce domaine, offrant une méthode robuste et efficace pour surmonter les limitations des systèmes PV sous ombrage partiel. Grâce à sa capacité à identifier le point de puissance maximale global, le GWO se positionne comme une solution optimale pour améliorer la performance et la fiabilité des systèmes photovoltaïques. Ainsi, ce mémoire pose les bases pour des explorations plus approfondies des capacités du GWO dans les applications MPPT, que nous continuerons à développer dans les chapitres suivants.

En explorant l'application de l'algorithme GWO, nous avons démontré son efficacité à naviguer dans des environnements complexes et à optimiser les systèmes PV sous diverses conditions d'ombrage partiel. Les résultats expérimentaux ont validé les avantages de cette approche, montrant des améliorations significatives des performances des systèmes PV optimisés par GWO par rapport aux méthodes traditionnelles.

Ce travail contribue à l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des systèmes photovoltaïques, en proposant des solutions innovantes pour surmonter les obstacles posés par les conditions d'ombrage partiel. Les perspectives d'avenir incluent l'amélioration continue des algorithmes d'optimisation,

l'intégration de nouvelles technologies solaires et la promotion de pratiques durables pour assurer un avenir énergétique plus propre.

Ainsi, nous espérons que ce mémoire servira de référence pour les chercheurs et les professionnels dans le domaine des énergies renouvelables, les inspirant à poursuivre des innovations et des améliorations pour relever les défis énergétiques mondiaux.

Bibliography

- [1] S. Farajdadian, S. M. H. Hosseini, Dmppt control of photovoltaic systems under partial shading conditions based on optimized neural networks, *Soft Computing* 28 (6) (2024) 4987–5014.
- [2] A. Almutairi, A. G. Abo-Khalil, K. Sayed, N. Albagami, Mppt for a pv grid-connected system to improve efficiency under partial shading conditions, *Sustainability* 12 (24) (2020) 10310.
- [3] D. K. Kishore, M. Mohamed, K. Sudhakar, K. Peddakapu, Swarm intelligence-based mppt design for pv systems under diverse partial shading conditions, *Energy* 265 (2023) 126366.
- [4] S. Chtita, S. Motahhir, A. El Hammoumi, A. Chouder, A. S. Benyoucef, A. El Ghzizal, A. Derouich, M. Abouhawwash, S. Askar, A novel hybrid gwo–pso-based maximum power point tracking for photovoltaic systems operating under partial shading conditions, *Scientific Reports* 12 (1) (2022) 10637.
- [5] S.-P. Ye, Y.-H. Liu, H.-Y. Pai, A. Sangwongwanich, F. Blaabjerg, A novel ann-based gmppt method for pv systems under complex partial shading conditions, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* (2023).
- [6] S. R. Kiran, C. H. Basha, V. P. Singh, C. Dhanamjayulu, B. R. Prusty, B. Khan, Reduced simulative performance analysis of variable step size ann based mppt techniques for partially shaded solar pv systems, *IEEE access* 10 (2022) 48875–48889.
- [7] A. H. Ali, A. Najafi, Optimization and performance improvement of grid-connected pv plant based on ann-pso and p&o algorithms, *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2022 (1) (2022) 1278492.
- [8] N. A. Windarko, M. Nizar Habibi, B. Sumantri, E. Prasetyono, M. Z. Efendi, Taufik, A new mppt algorithm for photovoltaic power generation

- under uniform and partial shading conditions, *Energies* 14 (2) (2021) 483.
- [9] M. H. Zafar, T. Al-Shahrani, N. M. Khan, A. Feroz Mirza, M. Mansoor, M. U. Qadir, M. I. Khan, R. A. Naqvi, Group teaching optimization algorithm based mppt control of pv systems under partial shading and complex partial shading, *Electronics* 9 (11) (2020) 1962.
- [10] J. Li, Y. Wu, S. Ma, M. Chen, B. Zhang, B. Jiang, Analysis of photovoltaic array maximum power point tracking under uniform environment and partial shading condition: A review, *Energy Reports* 8 (2022) 13235–13252.
- [11] M. M. Rahman, M. S. Islam, Pso and ann based hybrid mppt algorithm for photovoltaic array under partial shading condition, *Eng. Int* 8 (1) (2020) 9–24.
- [12] A. G. Abo-Khalil, W. Alharbi, A.-R. Al-Qawasmi, M. Alobaid, I. M. Alarifi, Maximum power point tracking of pv systems under partial shading conditions based on opposition-based learning firefly algorithm, *Sustainability* 13 (5) (2021) 2656.
- [13] B. Yang, T. Zhu, J. Wang, H. Shu, T. Yu, X. Zhang, W. Yao, L. Sun, Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of pv systems under partial shading condition, *Journal of Cleaner Production* 268 (2020) 121983.
- [14] A. Olabi, M. A. Abdelkareem, C. Semeraro, M. Al Radi, H. Rezk, O. Muhaisen, O. A. Al-Isawi, E. T. Sayed, Artificial neural networks applications in partially shaded pv systems, *Thermal Science and Engineering Progress* 37 (2023) 101612.
- [15] F. B. C. Larbes, Survey and classification of hybrid gmppt techniques for photovoltaic system under partial shading conditions.
- [16] M. S. Wasim, M. Amjad, S. Habib, M. A. Abbasi, A. R. Bhatti, S. Muyeen, A critical review and performance comparisons of swarm-based optimization algorithms in maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions, *Energy Reports* 8 (2022) 4871–4898.
- [17] A. Y. Taha, M. Aljanabi, A. N. Al-Shamani, Z. H. Hadi, Modified p&o mppt algorithm based grey wolf optimizer for pv system under realistic solar radiation, in: *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2804, AIP Publishing, 2023.

- [18] M. Y. Worku, M. A. Hassan, L. S. Maraaba, M. Shafiullah, M. R. Elka-deem, M. I. Hossain, M. A. Abido, A comprehensive review of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems under partial shading, *Sustainability* 15 (14) (2023) 11132.
- [19] M. Z.-E. Masry, A. Mohammed, F. Amer, R. Mubarak, New hybrid mppt technique including artificial intelligence and traditional techniques for extracting the global maximum power from partially shaded pv systems, *Sustainability* 15 (14) (2023) 10884.
- [20] B. S. V. Sai, S. A. Khadtare, D. Chatterjee, An improved mppt technique under partial shading condition using simple p&o algorithm, in: 2020 international conference on computational intelligence for smart power system and sustainable energy (CISPSSE), IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [21] R. Motamarri, N. Bhookya, B. Chitti Babu, Modified grey wolf optimization for global maximum power point tracking under partial shading conditions in photovoltaic system, *International Journal of Circuit Theory and Applications* 49 (7) (2021) 1884–1901.