الجـــمـــهـــوريـة الجـزائـــريـــة الديمـقـــراطـيـــة الـــشـــعـــبـيـــة

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــعليـــم العـالي والبـحث العلـمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique industrielle

Par : Benhamma Fatima

Sujet

Injection de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2025, devant le jury composé de :

M. Saad Saoud Merwan	**MCB**	**Univ-BBA**	Président
M. Falleh Abdallah	**MCB**	**Univ-BBA**	Examinateur
Mme Bouguerra Zahira	**MCB**	**Univ-BBA**	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma mère et à mon père, symboles d'affection et d'amour, qui ont sacrifié tout leur temps pour mon bonheur et ma réussite. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

A mes frères Dyabe et Yhya, mes grands-parents et tous ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion pendant la réalisation de ce travail.

A mon mari qui m'a chaleureusement soutenu et encouragée tout au long de mon parcours.

A toute ma famille et belle-famille, à mes proches, à mes amis qui m'ont toujours donné de l'amour et du courage, et à qui je souhaite plus de succès.

Remerciement

Avant tout, je tiens à remercier le Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné le souffle de vie, le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études, et c'est grâce à Lui que ce travail a pu être réalisé.

Tout d'abord, un grand merci à Madame Bouguera Zahira, ma directrice de thèse, pour ses précieux conseils, sa présence indéfectible, ses avis éclairés et son soutien constant tout au long de cette recherche. Son expertise et ses observations pertinentes ont été déterminantes pour l'avancement de cette thèse.

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Je tiens également à remercier l'ensemble du corps enseignant du département d'électromécanique en général, et du département d'automatique en particulier, dont la qualité de l'enseignement a marqué mon parcours universitaire.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à ma famille, pour son soutien moral indéfectible, sa patience infinie et ses encouragements constants.

Enfin, je remercie mes collègues et amis pour leur soutien, leur partage et leur bonne humeur contagieuse, qui ont grandement contribué à rendre cette aventure encore plus enrichissante.

Sommaire

Liste des figures……...I
Liste des tableaux……..III
Liste des symboles……IV
Liste des abréviations……V
Introduction générale……..1

Chapitre I Généralité sur les énergies renouvelables

I. 1 Introduction 3
I. 2 Les énergies renouvelables dans le monde 3
I. 3 Applications des énergies renouvelables 4
I. 3. 1 L'énergie éolienne 4
I. 3. 1. 1. Avantages 6
I. 3. 1. 2 Inconvénients 6
I. 3. 1. 3 Applications 6
I. 3. 2 Énergie hydraulique 7
I. 3. 2. 1 Avantages 7
I. 3. 2. 2 Inconvénients 7
I. 3. 3 Biomasse 8
I. 3. 3. 1 Avantages 8
I. 3. 3. 2 Inconvénients 8
I. 3. 3. 3 Applications 8
I. 3. 4 La géothermie 9
I. 3. 4. 1 Avantages 9
I. 3. .4 .2 Inconvénients 10
I. 3. 4. 3 Applications 10
I. 3. 5 L'énergie solaire 10
I. 3. 5. 1 Avantages 12
I. 3. 5. 2 Inconvénients 12

I. 3. 5. 3 Applications 13
I. 4 Différentes technologies photovoltaïques 13
I. 4. 1 Cellules au silicium cristallin 13
I. 4. 1. 1 Cellules monocristallines 13
I. 4. 2 Cellules à base de couches minces 14
I. 4. 3 Cellules organiques et plastiques 14
I. 5 Conclusion 15

Chapitre II Modélisation du panneau photovoltaïque

II. 1 Introduction 16
II. 2 Spectre du Rayonnement solaire 16
II. 3 L'effet photovoltaïque 18
II. 4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque 19
II. 5 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque 21
II. 5. 1 Courant de court-circuit (I_{CC}) 21
II. 5. 2 Tension en circuit ouvert (V_{CO}) 22
II. 5. 3 Facteur de forme (FF) 22
II. 5. 4 Rendement (η) 23
II. 6 Association des cellules photovoltaïques 23
II. 6. 1 Association des panneaux photovoltaïques en série 24
II. 6. 2 Association des panneaux photovoltaïques en parallèle 24
II. 6. 3 Association des panneaux photovoltaïques mixte (série et parallèle) 25
II. 7 Protection de générateur photovoltaïque 26
II. 8 Influence de variation des paramètres internes et externes 26
II. 8. 1 Effet des paramètres internes 27
II. 8. 1. 1 Variation de la résistance en série 27
II. 8. 2 Variation de la résistance parallèle 28
II. 8. 3 Diode d'idéalité 29

II. 8. 2 Paramètres externes..... 30
II. 8. 2. 1 Effet de la température..... 30
II. 8. 2. 2 Effet de l'éclairement 31
II. 8. 3 Effet d'ombrage..... 32
II. 9 Étage d'adaptation de l'énergie photovoltaïque 33
II. 9. 1 Hacheur parallèle (survolteur ou BOOST) 34
II. 9. 2 Hacheur dévolteur (série) 36
II. 9. 3 Hacheur dévolteur - survolteur (série−parallèle) 36
II. 10 Régulateurs MPPT- P&O 37
II. 11 Conclusion 39

Chapitre III Connexion du système photovoltaïque au réseau électrique

III. 1 Introduction……..40
III. 2 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau..... 40
III. 3. 1 Modélisation du réseau électrique..... 43
III. 3. 2 Modélisation du filtre (RL) 44
III. 4 Stratégie du control de l'onduleur..... 44
III. 4. 1 Boucle à verrouillage de phase PLL..... 45
III. 4. 2 Régulateur de la tension continu 45
III. 4. 3 Commande par hystérésis du courant..... 46
III. 5 Résultats de simulation..... 46
III. 6 Conclusion..... 52
Conclusion générale……..53
Références Bibliographiques
Annexe
Résumé

Liste des figures

Chapitre I Généralité sur les énergies renouvelables

Figure I. 1. Evaluation des capacités électriques renouvelables de 2017 à 2022 [1] 3
Figure I. 2. Programme des énergies renouvelables en Algérie [2] 4
Figure I. 3. La chaine de conversion éolienne 5
Figure I. 4. Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol 6
Figure I. 5. Centrale hydraulique 7
Figure I. 6. Principe fonctionnement d'énergie biomasse 9
Figure I. 7. Principe fonctionnement d'énergie géothermie 10
Figure I. 8. Principe fonctionnement d'énergie photovoltaïque 11
Figure I. 9. Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011). 11
Figure I. 10. Carte de l'Irradiation Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) 12
Figure I. 11. Cellule monocristalline 13
Figure I. 12. Cellule multicristalline 14
Figure I. 13. Cellule solaire organique 14

Chapitre II Modélisation du panneau photovoltaïque

Figure II. 1. Spectre du rayonnement solaire 17
Figure II. 2. Rayonnement direct, diffus, global et albédo 17
Figure II. 3. Principe de fonctionnement de l'effet photovoltaïque 18
Figure II. 4. Schéma équivalent du modèle à une diode 19
Figure II. 5. Schéma électrique équivalent d'un groupe de cellules 21
Figure II. 6. Caractéristique courant-tension de panneau solaire 21
Figure II. 7. Court-circuit 22
Figure II. 8. Circuit ouvert 22
Figure II. 9. Système photovoltaïque 23
Figure II. 10. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_{ss} modules en série 24
Figure II. 11. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_{pp} modules en parallèle 25
Figure II. 12. Caractéristique regroupement mixte (série et parallèle) 25
Figure II. 13. Protection des panneaux solaires : (a) fonctionnement normal, (b) fonctionnement à l'ombrage 26
Figure II. 14. Modèle de simulation du panneau photovoltaïque 27
Figure II. 15. Caractéristiques P-V en cas de variation de la résistance en série 27
Figure II. 16. Caractéristiques I-V en cas de variation de la résistance en série 28

Figure II. 17. Caractéristiques P-V en cas de variation de la résistance parallèle 28
Figure II. 18. Caractéristiques I-V en cas de variation de la résistance parallèle 29
Figure II. 19. Caractéristiques P-V en cas de variation de la diode d'idéalité 29
Figure II. 20. Caractéristiques I-V en cas de variation de la diode d'idéalité 29
Figure II. 21. Caractéristiques P-V sous variation de température 30
Figure II. 22. Caractéristiques I-V sous variation de température 30
Figure II. 23. Caractéristiques sous variation de l'éclairement 31
Figure II. 24. Caractéristiques I-V sous variation d'irradiation 31
Figure II. 25. Simulation de panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage 32
Figure II. 26. Caractéristiques P-V sous ombrage 32
Figure II. 27. Caractéristiques I-V sous ombrage 33
Figure II. 28. Etage d'adaptation 33
Figure II. 29. Schéma d'un hacheur survolteur 34
Figure II. 30. Circuits boost équivalents : (a) mise en marche et (b) arrêt 35
Figure II. 31. Schémas d'un hacheur série 36
Figure II. 32. Schéma d'un hacheur série-parallèle 37
Figure II. 33. Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O 37
Figure II. 34. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation 38

Chapitre III Connexion du système photovoltaïque au réseau électrique

Figure III. 1. Caractéristiques techniques des différents systèmes de configurations 41
Figure III. 2. Structure multi string avec un onduleur central ; (a) convertisseurs DC/DC en parrèle, (b) convertisseurs DC/DC en parrèle 42
Figure III. 3. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique 42
Figure III. 4 . Schéma fonctionnel de base d'une PLL 45
Figure III. 5. Schéma bloc de la régulation du bus continu 45
Figure III. 6. Schéma de la régulation du courant par hystérésis. 46
Figure III. 7. Profile de La température 46
Figure III. 8. Profile de l'éclairement 47
Figure III. 9. Courant photovoltaïque 47
Figure III. 10. La tension photovoltaïque 48
Figure III. 11. La puissance photovoltaïque 48
Figure III. 12. La tension continue 49
Figure III. 13. Courant de réseau 49
Figure III. 14. Zoom de courant de réseau 50

Figure III. 15. Les tension de réseau V_{abc} 50
Figure III. 16. Zoom des tensions de réseau 50
Figure III. 17. La tension et le courant de réseau (V_a et I_a) 51
Figure III. 18. THD de courant 51
Figure III. 19. THD de tension 52

Liste des tableaux

Tableau III. 1. Caractéristiques techniques des différents systèmes de configurations 41

Liste des symboles

Abréviations

PV	Panneau Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension
PI	Proportionnel intégrateur
P&O	Perturbation et observation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PLL	Phase locked loop
THD	Total Harmonic Distortion

Symboles

I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{co}	Tension du circuit ouvert
I_{ph}	Photo-courant
P_{max}	Puissance maximale
Rs	Résistance série
Rp	Résistance parallèle
V_{pm}	Tension à Pmax
V_{dc}	Tension de liaison continue
K_i	Coefficient de température
I_{pm}	Courant à P_{max}
T	Température effective de la cellule
G	Radiation solaire (W/m²)
G_n	Radiation solaire nominale (W/m²)
K	Constante de Boltzmann
N	Nombre des cellules
Q	Charge de l'électron
n	Le facteur de qualité de diode
V_{ref}	Tension de référence du réseau PV
V_{PV}	Tension mesurée du réseau PV
I_a, I_b, I_c	Courant de réseau
V_a, V_b, V_c	Tension de réseau

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle, le pétrole, le gaz naturel et le charbon constituent les principales ressources énergétiques de la consommation mondiale. La combustion de ces combustibles fossiles émet d'énormes quantités de gaz à effet de serre, principalement du dioxyde de carbone (CO2), qui provoque le réchauffement de la planète. Pour faire face à ce problème, le monde s'oriente vers l'utilisation des énergies renouvelables, qui sont propres, inépuisables et renouvelables. Plusieurs types d'énergies renouvelables sont disponibles, tels que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, la biomasse et la géothermie, chacune d'elle a ses caractéristiques. A partir 2010, ces énergies commencent de progresser de plus en plus. Sa proportion dans le mix énergétique global du monde a augmenté, atteignant 14,6% en 2023 [1].

L'énergie solaire a été la filière productrice d'électricité ayant le plus progressé dans le monde pour la 19^{e} année consécutive selon Ember [1]. Elle devient de plus en plus accessible grâce à sa grande disponibilité, à sa facilité d'installation, à la baisse des coûts de production et aux progrès technologiques. Elle peut d'être installée dans les zones urbaines, les zones rurales, avec de petites ou grandes capacités, en fonction des exigences.

L'un des principaux enjeux de l'énergie solaire est la fluctuation de sa production énergétique en réponse aux changements d'irradiation et de température. Diverses stratégies ont été envisagées pour assurer la stabilité de la production d'énergie photovoltaïque, telles que le recours à des batteries pour accumuler l'énergie excédentaire durant la journée et la restituer durant les nuits ou les journées moins ensoleillées. Cette option impose un coût additionnel pour l'acquisition des batteries, ainsi qu'un espace sécurisé pour leur installation. La deuxième solution consiste à la combiner avec d'autres sources d'énergie, comme l'énergie éolienne. C'est une solution très pratique, mais il faut vérifier la disponibilité du vent dans la zone d'installation. La troisième solution consiste à l'intégrer au réseau électrique. L'énergie supplémentaire sera injectée dans le réseau, à condition que le déficit énergétique soit récupéré par le réseau lui-même.

Les convertisseurs électriques occupent une place essentielle dans la chaîne de conversion photovoltaïque. On utilise souvent des convertisseurs DC/DC pour mettre en œuvre diverses méthodes de recherche du point de puissance maximale (MPPT), permettant au système photovoltaïque de produire sa puissance optimale, peu importe les conditions météorologiques. L'utilisation des onduleurs est indispensable pour fournir de l'énergie à une

charge alternative ou pour la connexion au réseau électrique. Ils supervisent les puissances actives et réactives injectées dans le réseau électrique.

Ce travail détaille l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique via une chaîne de conversion qui se compose d'un convertisseur DC/DC pour appliquer un contrôle de suivi de puissance maximale, en utilisant la méthode de perturbation et d'observation P&O. Le courant DC à la sortie de ce convertisseur passe par un onduleur contrôlé pour contrôler la puissance injectée dans le réseau électrique. Le courant continu à la sortie de ce convertisseur passe par un onduleur contrôlé pour contrôler la puissance injectée dans le réseau électrique, un filtre RL pour réduire ses harmoniques. Pour se faire, nous avons trois chapitres essentiels ;

Le premier chapitre, discute les différentes formes d'énergies renouvelables, leurs avantages et inconvenants.

Le deuxième chapitre modélise une cellule solaire mathématique, en utilisant un modèle à une seule diode. Il analyse ensuite, l'impact de la variation des paramètres internes et externes (l'éclairement, température, l'idéalité de diode, résistance parallèle et série) sur les caractéristiques I-V et P-V. à la fin de ce chapitre, la technique de perturbation et observation (P&O) est détaillée pour commander le convertisseur DC/DC lié à la sortie de générateur photovoltaïque, afin de maximiser l'énergie produite.

Le troisième chapitre, discute la connexion de générateur photovoltaïque au réseau électrique à travers un onduleur triphasé commande par hystérésis. Les résultats de simulation sont présentés et discutés.

CHAPITRE I

Généralité sur les Energies Renouvelables

I. 1 Introduction

La rareté des sources traditionnelles et leur capacité à répondre aux besoins des générations futures ainsi que l'instabilité des prix de l'énergie amènent de nombreux pays à s'inquiéter pour leur sécurité énergétique. Cette situation a incité les gouvernements à reconsidérer leurs politiques énergétiques, en cherchant à diversifier les sources d'énergie et à accélérer la transition vers des systèmes plus durables. A partir 2010, Le choix de l'utilisation des énergies renouvelables est adoptée pour satisfaire la demande mondiale d'énergie et leur production augmente plus en plus. Les avancées technologiques significatives dans le domaine des énergies renouvelables et leurs coûts de production inférieurs à ceux des sources conventionnelles ont contribué à accroître le recours à ces énergies.

Ce chapitre expose les diverses formes d'énergies renouvelables, en présentant leurs avantages et inconvénients. L'énergie solaire est au centre de nos préoccupations, ce qui nécessite l'examen du potentiel solaire et les diverses technologies de cellules solaires.

I. 2 Les énergies renouvelables dans le monde

Une énergie renouvelable est une énergie inépuisable et renouvelable avec le temps, produite à partir de sources naturelles comme le soleil, le vent, l'eau ...etc, offrant de nombreux avantages par rapport aux systèmes de production d'énergie conventionnels, tels que la sécurité environnementale, la fiabilité et la présence abondante. Au cours de ces dernières années, la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale augmente à un rythme élevé et devient une ressource énergétique importante du monde. En 2022, plus de 175 GW de capacité photovoltaïque, plus de 75 GW d'énergie éolienne, 20 GW d'hydroélectricité et 5 GW de bioénergie ont été mis en place, montré dans cette figure :

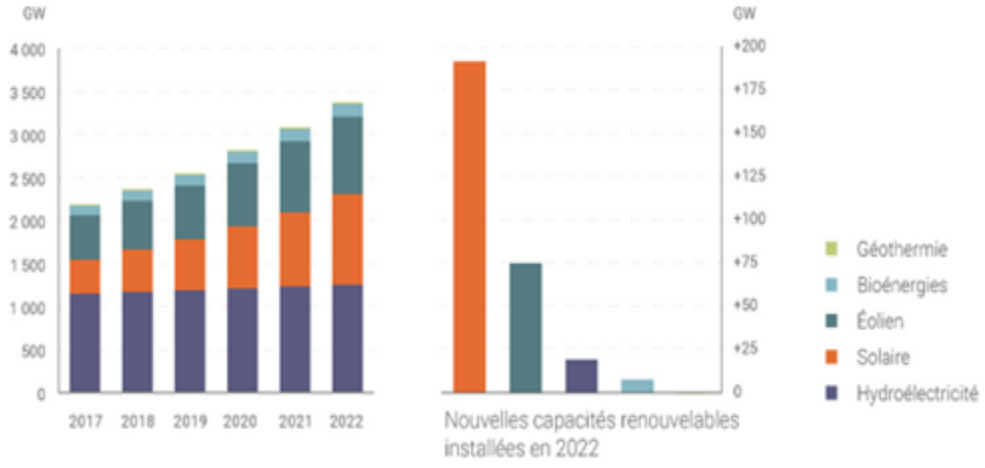

Figure I. 1. Evaluation des capacités électriques renouvelables de 2017 à 2022 [1]

La part des énergies renouvelables dans l'ensemble du mix énergétique mondial a certes progressé à 14,6% en 2023 (contre 14,2% en 2022) [1].

Dans le cadre de son développement énergétique, le gouvernement algérien a initié en 2011 le projet des énergies renouvelables, qui vise à établir une capacité d'énergie renouvelable atteignant environ 22 000 MW, prévue pour 2030. Une majorité de l'énergie à mettre en place est d'origine solaire, estimé à 13 575 MW, en raison du vaste potentiel solaire en Algérie.

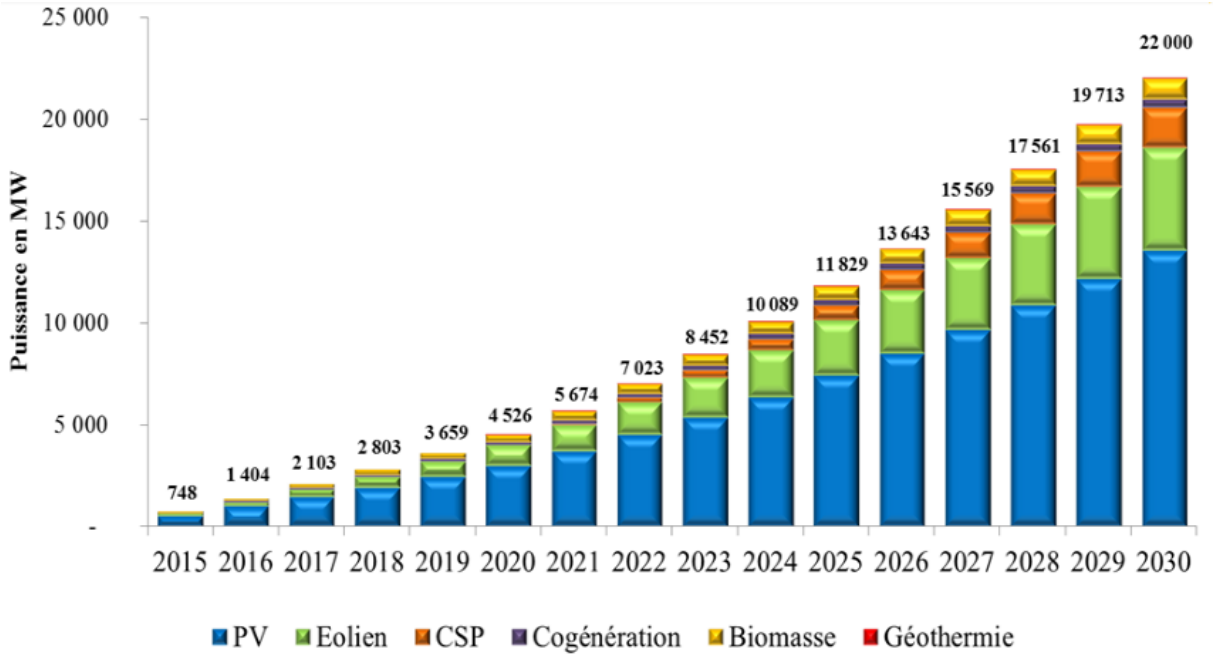

Figure I. 2. Programme des énergies renouvelables en Algérie [2]

I. 3 Applications des énergies renouvelables

Les utilisations de l'énergie renouvelable se concentrent sur la production d'électricité, alors que d'autres utilisations telles que le chauffage et la climatisation de l'eau ainsi que l'utilisation dans les moyens de transport sont encore sous-exploitées. Pour la production de l'électricité, les énergies renouvelables les plus utilisés sont ; l'énergie solaire, l'énergie éolienne, énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie.

I. 3. 1 L'énergie éolienne

L'inégalité de la chaleur reçue par la terre due à l'ensoleillement provoque le déplacement des masses de l'aire produisant le vent. Ce vent fait tourner les pales des turbines éoliennes,

convertissant une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui sera transformé ensuite en énergie électrique à travers les génératrices comme les génératrices synchrone à aiment permanant, les génératrices synchrone a double alimentation, asynchrone à cage d'écureuil.. etc. Il existe deux types d'éoliennes :

* Les éoliennes terrestres : sur la terre ferme.
* Les éoliennes offshores : en mer.

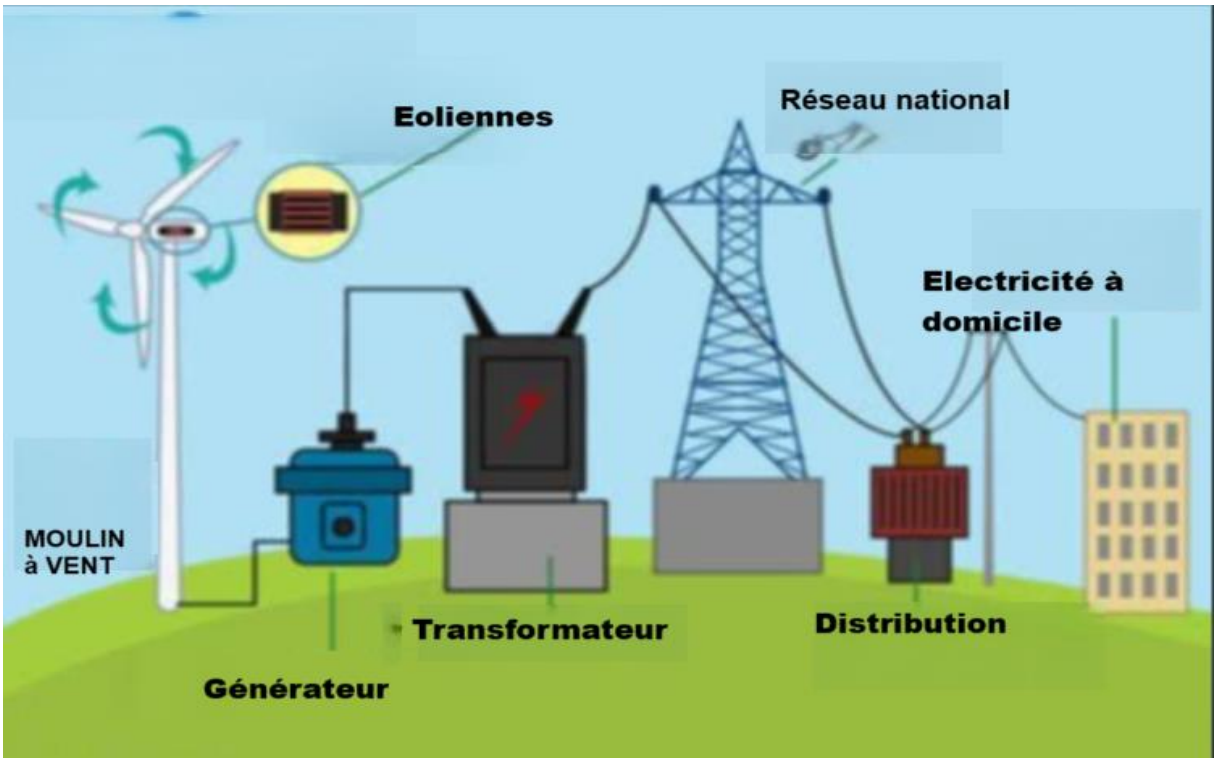

Figure I. 3. La chaine de conversion éolienne

La carte représentée ci-dessous montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel).

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s) [2].

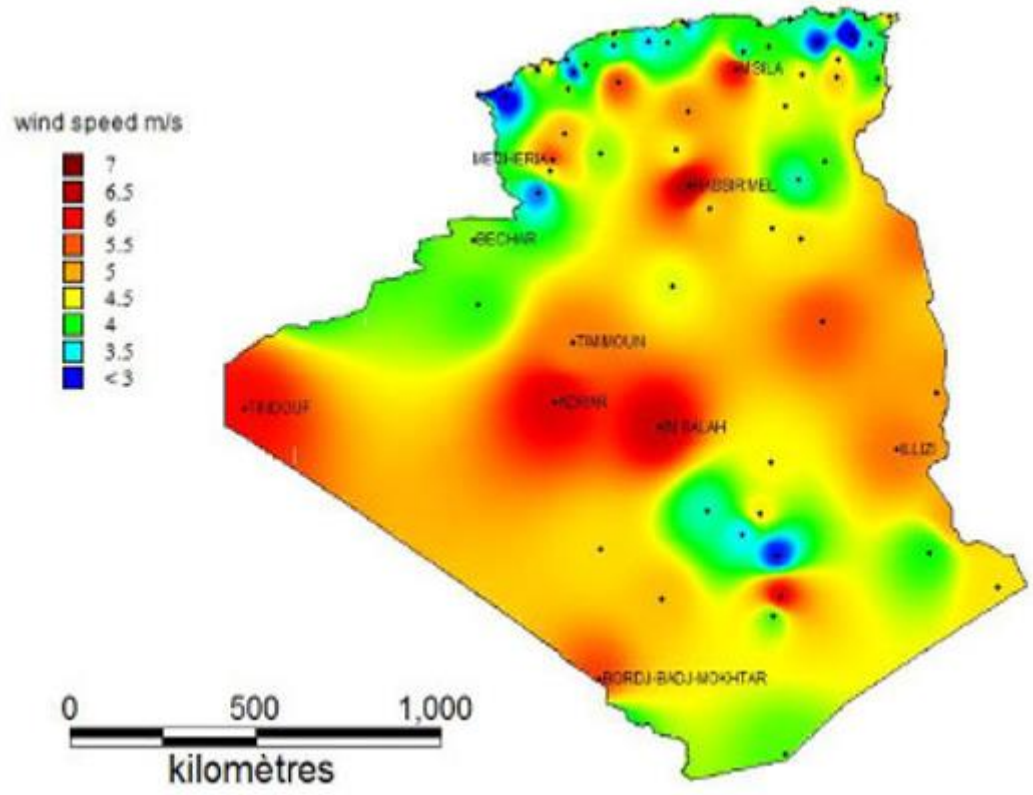

Figure I. 4. Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol

I. 3. 1. 1. Avantages

- Source d'énergie propre et renouvelable qui respecte l'environnement.
- Aucune émission de dioxyde de carbone.
- L'énergie éolienne ne requiert aucun combustible pour son fonctionnement, ce qui élimine le besoin de sources d'énergie qui sont susceptibles d'être épuisées ou dont l'exploitation est polluante [3].

I. 3. 1. 2 Inconvénients

- Dépendance aux conditions météorologiques, impact visuel et sonore.
- Manque d'énergie lors des journées ensoleillées

I. 3. 1. 3 Applications

Grands parcs éoliens : Production d'électricité à grande échelle. Éoliennes domestiques : Pour alimenter une maison ou un village isolé. Pompage de l'eau : Dans les zones rurales, pour l'agriculture.

I. 3. 2 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force de l'eau en mouvement (rivières, chutes d'eau, marées) pour produire de l'électricité. Une centrale hydroélectrique transforme l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine puis en énergie électrique grâce à un alternateur [4].Cette forme d'énergie s'appuie sur l'exploitation de deux types d'énergie : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

Il existe plusieurs types d'énergie hydraulique :

* L'hydroélectricité conventionnelle : utilisation de barrages.

* L'énergie marémotrice : utilisation des mer

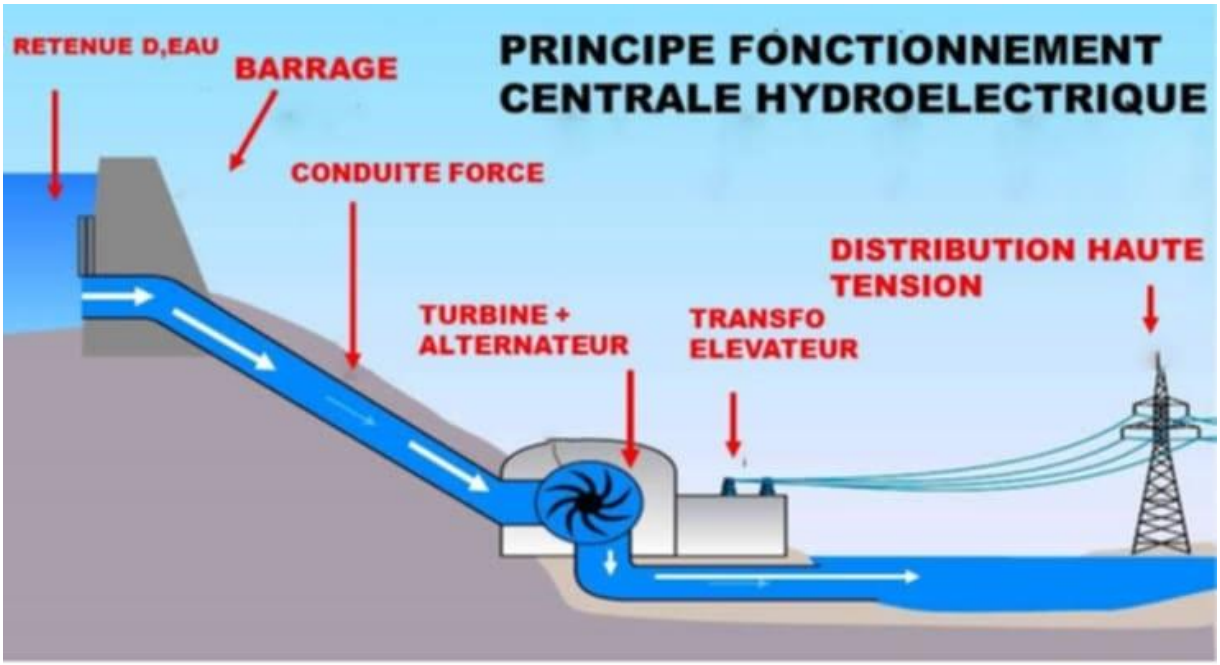

Figure I. 5. Centrale hydraulique

I. 3. 2. 1 Avantages

- Une énergie très faible comparée aux autres sources d'énergie.
- La production d'électricité est facilement gérable grâce à la régulation des vannes pour changer le flux de l'eau.

I. 3. 2. 2 Inconvénients

- Un impact environnemental lié aux interventions dans la nature dues à la construction de barrages.

- Coût d'un projet : La mise en œuvre d'une centrale requiert des investissements substantiels, ce qui peut représenter un obstacle ou un facteur de ralentissement pour la concrétisation des projets [5].

I. 3. 2. 3 Applications

Barrages : Production massive d'électricité (comme le barrage des Trois-Gorges en Chine).
Micro-centrales : Pour des villages ou petites industries près des rivières.

I. 3. 3 Biomasse

La biomasse utilise la matière organique (bois, déchets agricoles, biogaz) pour produire de la chaleur afin de fournir la vapeur nécessaire pour faire tourner des turbines pour produire de l'électricité.

La principale différence entre les deux formes d'énergie tient au fait que les combustibles fossiles ne sont transformables en énergie utilisable qu'après des milliers d'années, alors que l'énergie de la biomasse bien gérée [6].

I. 3. 3. 1 Avantages

- La biomasse permet de valoriser des déchets organiques, réduisant ainsi le volume de déchets envoyés en décharge et contribuant à une économie circulaire.
- Une énergie peu coûteuse grâce à l'emploi de combustibles produits et disponibles partout sur la planète.

I. 3. 3. 2 Inconvénients

- émettrice de CO2
- son installation doit être proche au lieu de consommation en raison des pertes pendant le transport de chaleur.
- Le transport de la biomasse peut être coûteux et avoir un impact environnemental.

I. 3. 3. 3 Applications

Chauffage : Poêles à granulés de bois.
Cuisine : Biogaz from agricultural waste (like in India, with the digesters).
Carburants : Bioéthanol pour automobiles (à la canne or au maïs).

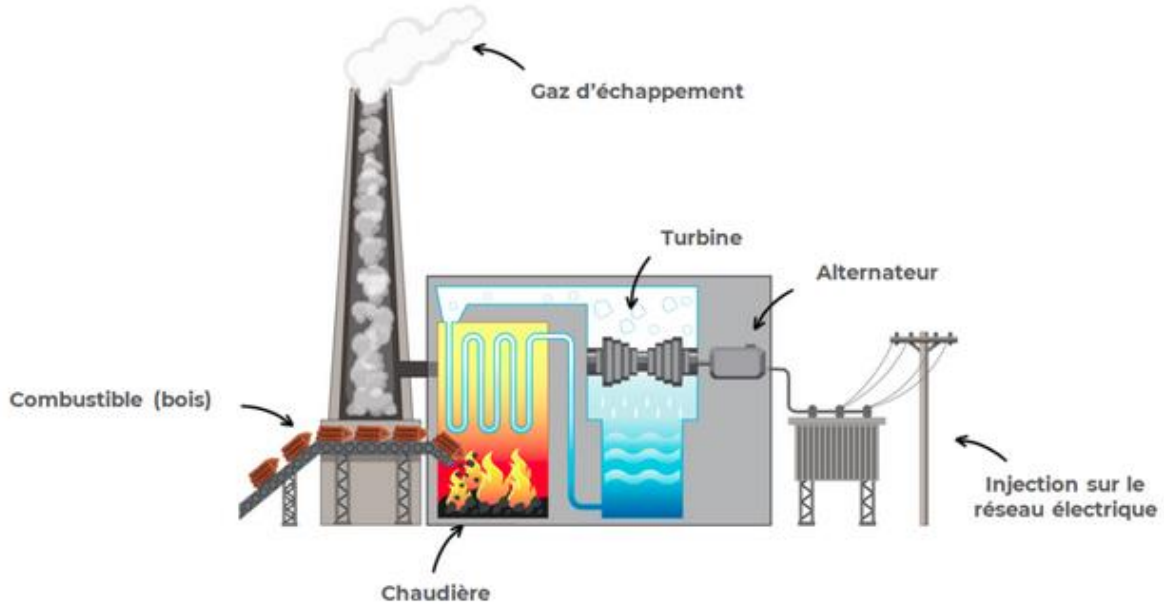

Figure I. 6. Principe fonctionnement d'énergie biomasse

I. 3. 4 Géothermie

La géothermie représente une source d'énergie renouvelable exploitant la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. Il est possible de l'utiliser pour générer de la chaleur et de l'électricité. Le procédé implique le forage de puits pour atteindre les réservoirs souterrains de vapeur ou d'eau chaude, qui seront ensuite exploités pour faire fonctionner une turbine et produire de l'électricité. Elle se caractérise par diverses catégories en fonction de la profondeur et de la température des ressources utilisées, variant de la géothermie basse énergie à la géothermie haute énergie.

Il y a des endroits comme la Chine, dans la Rome antique et dans les bassins méditerranéens qui ont utilisé la géothermique depuis des millénaires pour se chauffer ou avoir de l'eau chaude.

I. 3. 4. 1 Avantages

- La géothermie est exploitable quasiment partout, minimisant ainsi la nécessité de transport et les dangers qui y sont liés.
- La géothermie est exploitable pour diverses applications, telles que le chauffage, le refroidissement, la génération d'eau chaude domestique et la production d'électricité.
- La géothermie offre une énergie stable, contrairement aux énergies intermittentes comme le solaire et l'éolien.

I. 3. .4 .2 Inconvénients

- Le système de forages et les équipements associés peuvent être complexes à installer, très couteux et nécessitant souvent une surface importante.
- Risque de tremblement de terre
- Certaines régions ne sont pas adaptées à l'exploitation de la géothermie en raison de leur composition géologique.

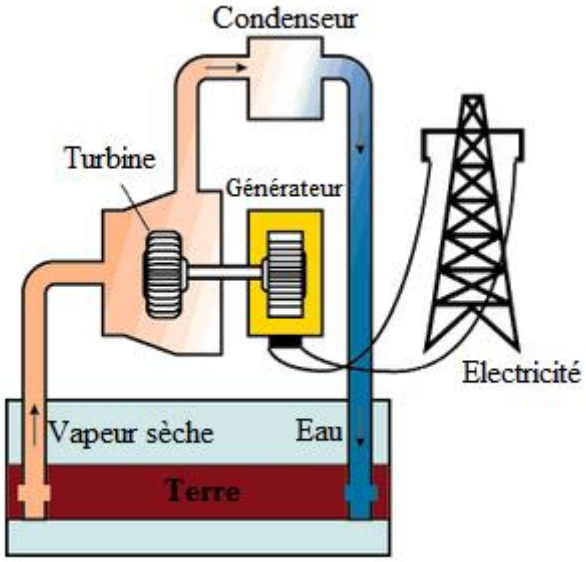

Figure I. 7. Principe fonctionnement d'énergie géothermie

I. 3. 4. 3 Applications

Chauffage urbain : Comme en Islande, où l'eau chaude du sous-sol chauffe les maisons. Électricité : Dans les zones volcaniques (ex. : Italie, Kenya).

I. 3. 5 L'énergie solaire

L'énergie solaire, tirée du rayonnement électromagnétique du soleil, est à la fois inépuisable, précieuse et renouvelable. Des panneaux solaires sont utilisés pour capter l'énergie lumineuse du rayonnement et la transformer en énergie électrique. L'énergie solaire représente une solution essentielle pour faire face aux défis énergétiques contemporains. Sa mise au point pourrait non seulement favoriser l'accès à l'énergie dans les régions les plus pauvres, mais aussi participer à la bataille contre le réchauffement climatique.

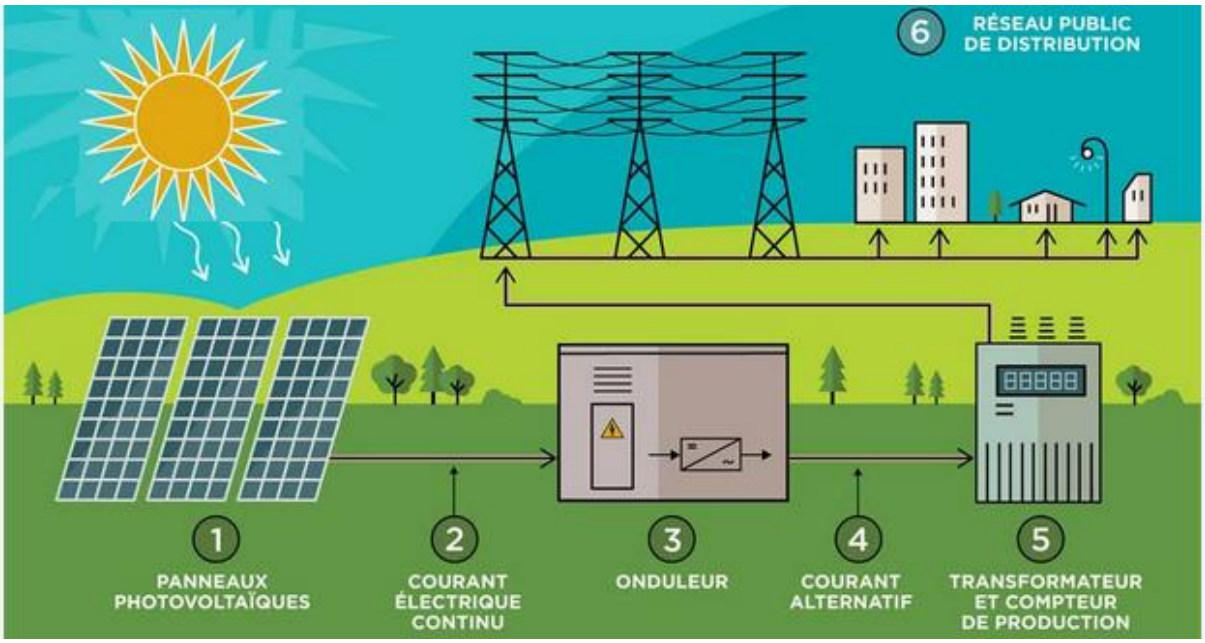

Figure I. 8. Principe fonctionnement d'énergie photovoltaïque

Du fait de sa localisation stratégique et de son vaste territoire, l'Algérie dispose du plus grand potentiel solaire dans le bassin méditerranéen. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud [2].

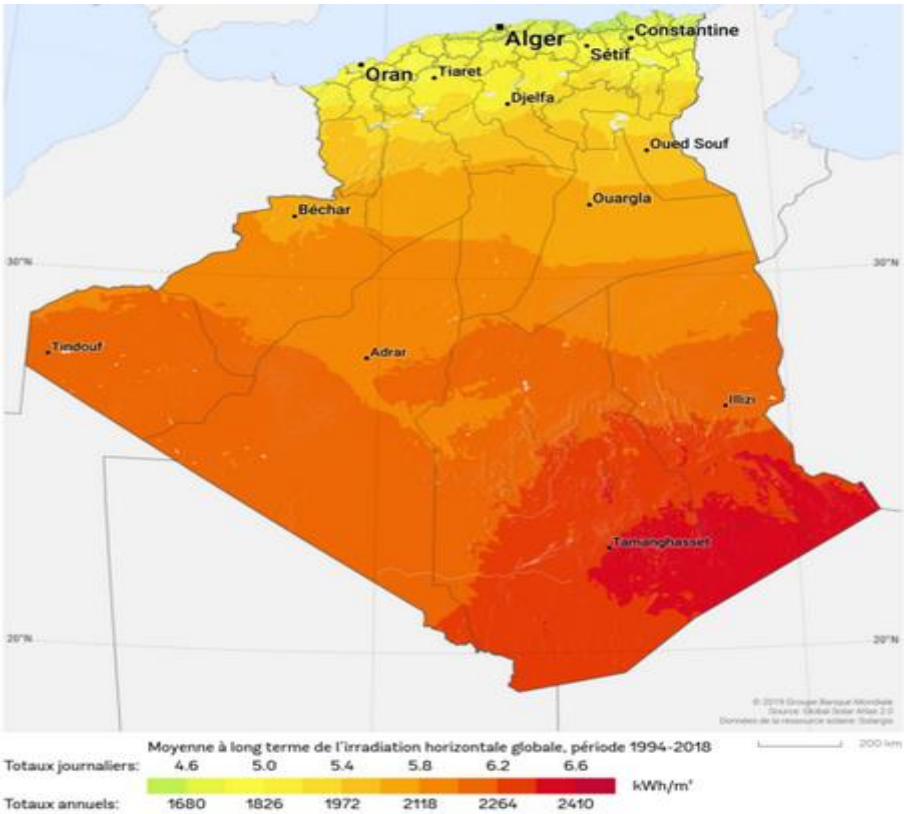

Figure I. 9. Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011)

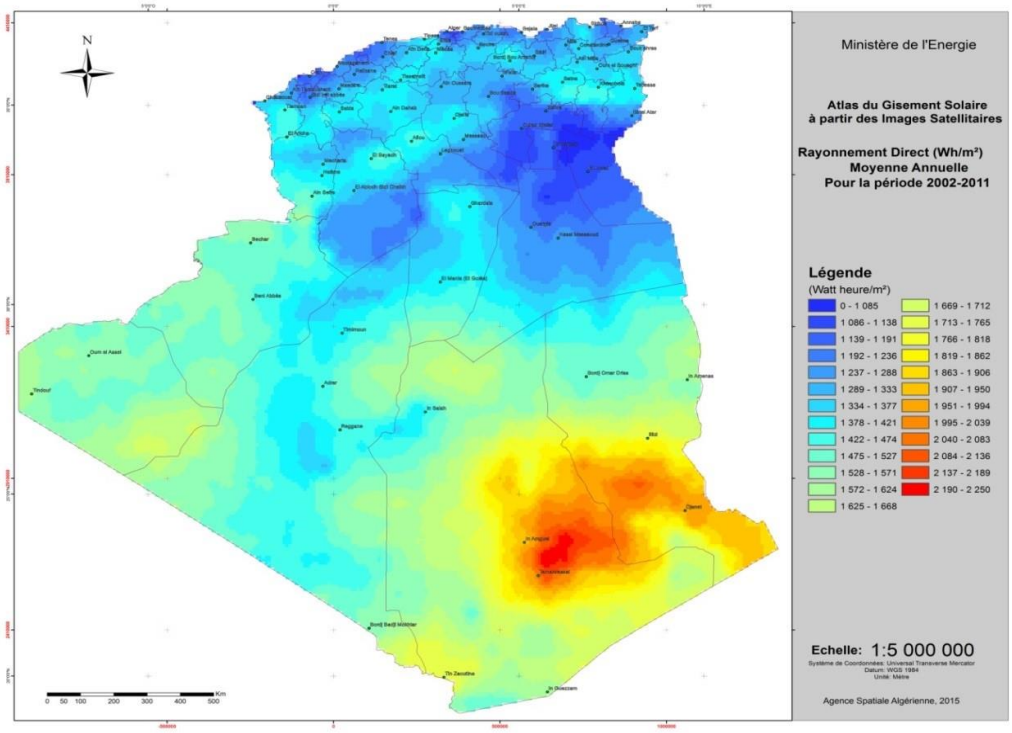

Figure I. 10. Carte de l'Irradiation Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011)

I. 3. 5. 1 Avantages

- Une énergie propre qui ne produit ni gaz à effet de serre, ni nuisance sonore.
- Adapter aux zones isolées, bâtiments due à l'absence de pièces mobiles
- Installation facile et longue durée de vie
- Les panneaux solaires demandent un entretien minimal
- La modularité des panneaux photovoltaïques facilite une installation aisée et adaptable à une diversité de besoins énergétiques [7].

I. 3. 5. 2 Inconvénients

- La production d'énergie est intermittente, dépendant de la quantité de lumière accessible.
- L'installation de panneaux solaires nécessite une surface importante.
- le coût de fabrication des panneaux solaires est très élevé et le rendement énergétique est souvent limité.
- la fabrication des panneaux présente des enjeux environnementaux significatifs [8].

I. 3. 5. 3 Applications

Maisons : Panneaux solaires sur les toits pour chauffer l'eau ou produire de l'électricité Agriculture : Pompes solaires pour irrigation des terres. Éclairage public : Lampadaires autonomes à l'aide de petites armoires solaires.

I. 4 Différentes technologies photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques se classent en plusieurs familles, qui présentent un rendement et un prix spécifiques. Mais peu importe leur technologie, leur rendement est faible, comprise en général entre 8 % et 23 % de l'énergie absorbée [9]. Il existe actuellement trois principaux types de technologies de cellules solaires : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

I. 4. 1 Cellules au silicium cristallin

Malgré son ancienneté, cette technologie détient 95 % du marché grâce à sa solidité et ses performances (avec un rendement de modules variant entre 17 et 23 % pendant une durée de vie d'environ 30 ans).

I. 4. 1. 1 Cellules monocristallines

Au cours du processus de refroidissement, le silicium fondu se cristallise pour ne produire qu'un unique cristal de grande taille. On procède ensuite à la coupe du cristal en tranches minces. Après divers traitements, tels que le traitement de surface à l'acide, le dopage, la création de la jonction P-N, le dépôt d'une couche anti-reflet et la pose de collecteurs, le wafer est transformé en cellule photovoltaïque [10]. Le coût de ces panneaux solaires est nettement supérieur aux autres types en raison de leur rendement élevé (15-23%).

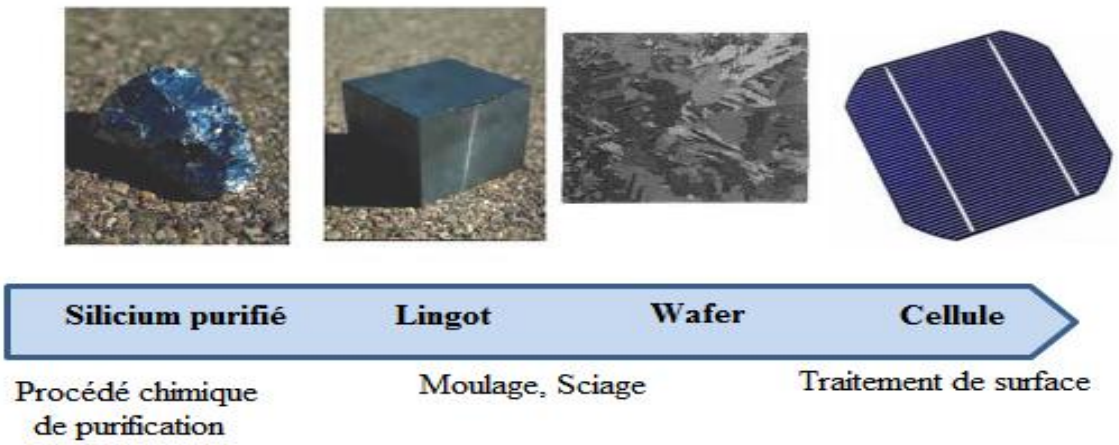

Figure I. 11. Cellule monocristalline

Les cellules multi-cristallines sont créées à partir d'un bloc de silicium comportant de multiples cristaux, ce qui donne à leur structure une nature hétérogène. Leur rendement, bien qu'il soit un peu moins élevé que celui du silicium monocristallin (de l'ordre de 10 à 15% selon les fabricants), reste compétitif grâce à un processus de fabrication plus simple et moins onéreux [11].

Figure I. 12. Cellule multicristalline

I. 4. 2 Cellules à base de couches minces

La technologie des cellules solaires à couche mince utilise des matériaux tels que le silicium amorphe (a-Si), le sulfure de cadmium (CdS), le séléniure de cuivre indium gallium (CIGS), le séléniure de cuivre indium gallium (CIGS) …etc. A basse température, le semi-conducteur est déposé à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur.

I. 4. 3 Cellules organiques et plastiques

Il s'agit d'un type de technologie photovoltaïque qui exploite des matériaux organiques (carbone) pour transformer la lumière solaire en énergie électrique. Ces cellules solaires organiques se caractérisent par leur flexibilité et légèreté et son faible coût de production, mais un rendement faible à l'environ de 6-8%.

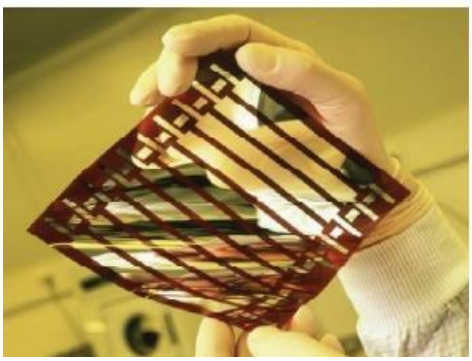

Figure I. 13. Cellule solaire organique

I. 5 Conclusion

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la biomasse, la géothermie et l'énergie solaire constituent des réponses cruciales aux défis énergétiques. Ces énergies renouvelables et écologiques contribuent à diminuer la dépendance aux énergies fossiles tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre. Malgré leur contribution faible à la consommation d'énergie mondiale due à une demande en hausse, les progrès technologiques et la baisse des coûts de production favorisent leur utilisation. Toutefois, certains obstacles demeurent, en particulier relatifs au stockage, aux dépenses initiales et à l'empreinte écologique.

CHAPITRE II

Modélisation
du Panneau Photovoltaïque

II. 1 Introduction

Le principal désavantage de l'énergie solaire est la fluctuation de sa production en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement et température), ce qui peut entraîner une perte significative d'énergie. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'appliquer une commande de suivi du point de puissance maximale (MPPT) au niveau des convertisseurs DC/DC connectés aux panneaux solaires. Cela permettra d'optimiser la production d'énergie quelles que soient les conditions météorologiques.

Ce chapitre se concentre sur trois aspects essentiels ; Le premier concerne la description du concept photovoltaïque, allant du spectre solaire et de l'effet photovoltaïque à la représentation mathématique d'une cellule solaire et la structure d'un générateur photovoltaïque. La deuxième tâche consiste à analyser l'impact des fluctuations des paramètres internes et externes sur les caractéristiques I-V et P-V des panneaux solaires. La troisième partie fournit une explication approfondie du contrôle des convertisseurs DC/DC en appliquant la méthode de perturbation et d'observation (P&O) afin d'optimiser l'énergie globale générée par le générateur photovoltaïque, quelle que soient des conditions météorologiques.

II. 2 Spectre du Rayonnement solaire

Le Soleil, une étoile de diamètre environ 109 fois supérieur à celui de la Terre (1 390 000 km), est un élément notable de notre univers. Il est composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques [12]. Le soleil est considérée comme une bombe thermonucléaire qui transforme chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre [13]. Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire est étendu et va des ondes radio aux rayons X. Le spectre continu, qui ressemble à celui d'un corps noir d'une température d'une vingtaine de milliers de degrés, d'environ 6000°K, et le spectre réel d'émission solaire, illustré dans la figure [14].

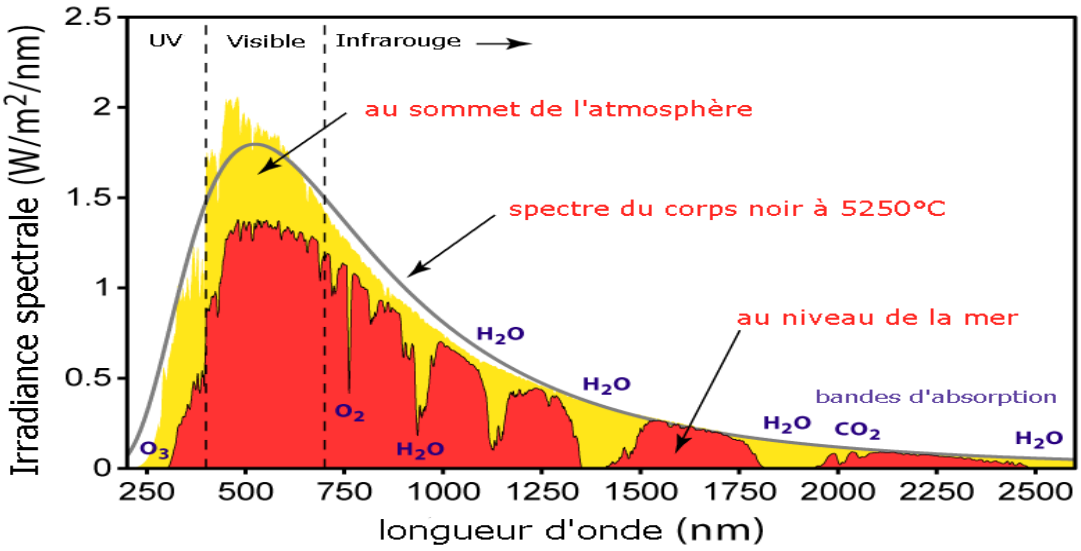

Figure II. 1. Spectre du rayonnement solaire

Ce rayonnement électromagnétique est fortement troublé par l'atmosphère. Il ne permet que la réception au sol des éléments les plus importants et les plus actuels du rayonnement solaire global qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la fraction réfléchie par le sol du rayonnement solaire global comme figuré dans la figure suivante :

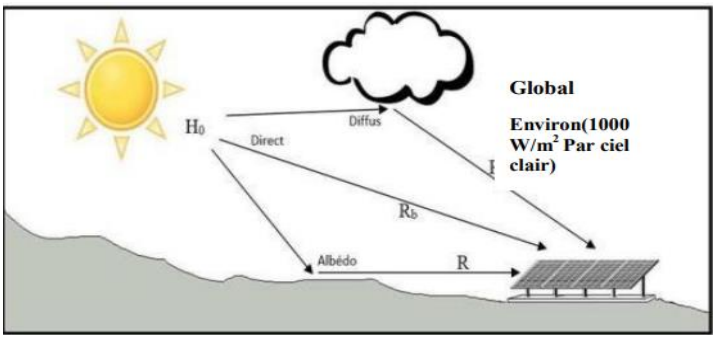

Figure II. 2. Rayonnement direct, diffus, global et albédo

Les rayonnements qui frappent les panneaux solaires réagissent avec les électrons pour produire de l'électricité. Les électrons absorbent l'énergie des photons pour arracher de leurs atomes et se déplacer librement générant un courant électrique. L'effet photoélectrique est décrit par l'équation suivante :

$$E = h\,.f - \phi \qquad \text{(II.1)}$$

E : représente l'énergie de l'électron émis

h : représente la constante de Planck (6'626×10−34 J·s)

f : représente la fréquence de la lumière incident

ϕ correspond au travail d'extraction du matériau, représentant l'énergie minimale requise pour libérer un électron.

Cette équation montre que pour qu'il y ait une émission photoélectrique, l'énergie des photons incidents (h·f) doit être supérieure ou égale au travail d'extraction du matériau (ϕ). Si l'énergie des photons excède le travail d'extraction, l'énergie excédentaire contribue à l'énergie cinétique des électrons émis [15].

II. 3 L'effet photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse solaire en électricité. Cette procédure repose sur un phénomène physique connu sous le terme d'« effet photovoltaïque », lorsque l'on met en contact étroit un semi-conducteur dopé N (qui a une forte densité d'électrons) avec un semi-conducteur dopé P (qui a une faible densité d'électrons), ce qui donne naissance à une jonction PN. Ici, les électrons excédentaires du côté N se déplacent vers le côté P.

- Côté N : Près de la jonction, une zone se charge positivement (par manque d'électrons).
- Côté P : Une zone se charge négativement (à cause de l'excès d'électrons).

Ces zones opposées génèrent un champ électrique (orienté de P vers N) ainsi qu'une tension interne (VD). C'est ce phénomène, localisé dans la zone de déplétion, qui permet l'opération des cellules solaires.

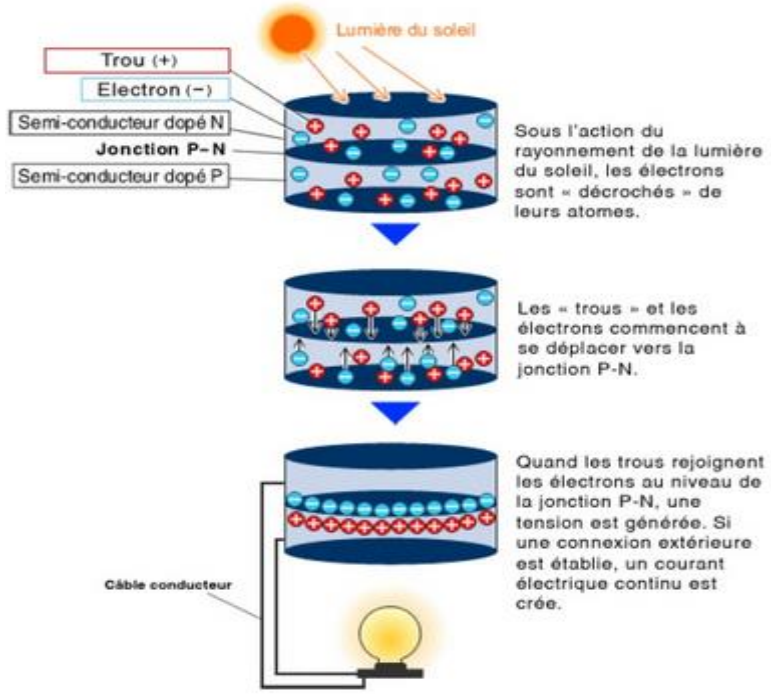

Figure II. 3. Principe de fonctionnement de l'effet photovoltaïque

II. 4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La construction d'un modèle précis nécessite une compréhension approfondie de l'architecture physique de la cellule ainsi que des caractéristiques électriques de ses éléments, en tenant compte d'un niveau de détail qui peut varier. Le choix du circuit équivalent est essentiel pour une modélisation efficace des cellules photovoltaïques. Divers modèles mathématiques ont été élaborés pour simuler le comportement complexe et non linéaire de ces cellules, qui sont le produit des jonctions semi-conductrices qui les constituent. Ces modèles se distinguent par leur méthode de calcul et le nombre de paramètres employés pour déterminer la tension et l'intensité du courant d'entrée du module. Ce mémoire exploite le modèle à une diode en raison de sa simplicité et de son efficacité pour bien présenter les caractéristiques d'une cellule solaire. Ce modèle intègre : un générateur de courant pour simuler l'éclairement incident, une diode unique pour les effets de polarisation de cellule, et deux résistances (en série et en parallèle) pour la modélisation des pertes. La figure ci-dessous illustre le schéma d'un modèle de cellule photovoltaïque :

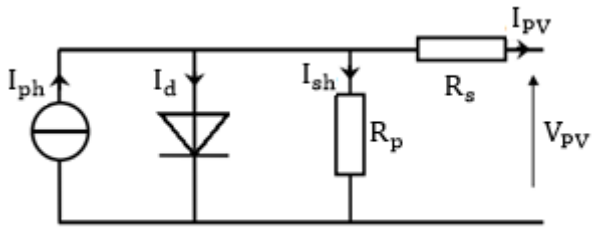

Figure II. 4. Schéma équivalent du modèle à une diode

D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad \text{(II.2)}$$

Avec :

I_{ph} : Le courant produit par la lumière incident

Il est directement proportionnel à l'irradiation du soleil

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n}.(I_{pvn} + K_i(T - T_{ref})) \quad \text{(II.3)}$$

Le courant de la diode est donné par l'équation Shockley :

$$I_D = I_{on}[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s . I_{pv})}{nKT}\right) - 1] \quad \text{(II.4)}$$

Le courant de saturation de diode est donné par :

$$I_o = I_{on}\left(\frac{T_{ref}}{\mathrm{T}}\right)^3 . \exp\left(\left(\frac{\mathrm{q}E_g}{\mathrm{nK}}\right)\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{\mathrm{T}}\right)\right) \quad \text{(II.5)}$$

Ou :

$$I_o = \frac{I_{scn} + K_i.\Delta\mathrm{T}}{\exp\left(V_{ocn} + \frac{\mathrm{q}K_v.\Delta\mathrm{T}}{\mathrm{nKT}}\right) - 1} \quad \text{(II.6)}$$

Le courant de saturation nominal à la température est donne par :

$$I_{on} = \frac{I_{ccn}}{(\exp\left(\frac{\mathrm{q}.V_{ocn}}{\mathrm{nKT}}\right) - 1)} \quad \text{(II.7)}$$

Avec :

I_{PV} : Le courant de la cellule

V : La tension de la cellule

R : La résistance série de la cellule

T, T_{ref} : La température réelle et référence de la cellule

q : La charge d'électron égale ($1.602*10^{-19}$ C)

I_o : Le courant de saturation

K : La constant de Boltzman ($1.3854*10^{-23}$ JK^{-1})

E_g : La bonde gap d'énergie de semi-conducteur (1.12 eV)

n : Le facteur de qualité de diode

G, G_{ref} : éclairement réelle et de référence

K_i : coefficient de température du courant

Une cellule produit une puissance faible, ainsi le couplage de ces cellules en série et en parallèle est crucial pour obtenir certains niveaux de puissance requis. Un panneau photovoltaïque est constitué d'un assemblage en série et en parallèle de cellules élémentaires, noté $N_s \times N_p$. Ici, N_s représente le nombre de cellules en série qui augmente la tension générale de panneau, et N_p le nombre de branches en parallèle qui augmente le courant générer par ce panneau photovoltaïque. C'est ainsi qu'on obtient le panneau photovoltaïque illustré ci-dessous :

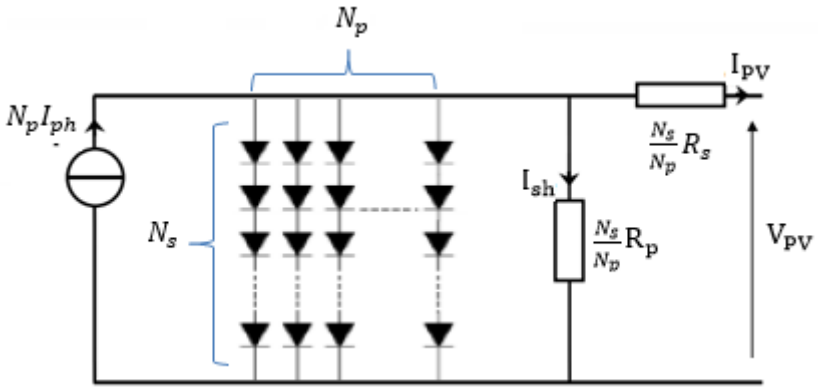

Figure II. 5. Schéma électrique équivalent d'un groupe de cellules

II. 5 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique produite par une cellule photovoltaïque correspond à la multiplication de la tension et du courant qu'elle fournit. Ces deux paramètres, courant et tension, sont influencés à la fois par les caractéristiques électriques intrinsèques de la cellule et par la charge connectée à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont représentées graphiquement par une courbe appelée caractéristique courant-tension. Comme tout dipôle électrique, une cellule photovoltaïque est entièrement définie par cette caractéristique unique, qui lui est spécifique. Un exemple de cette courbe est illustré ci-dessous [16].

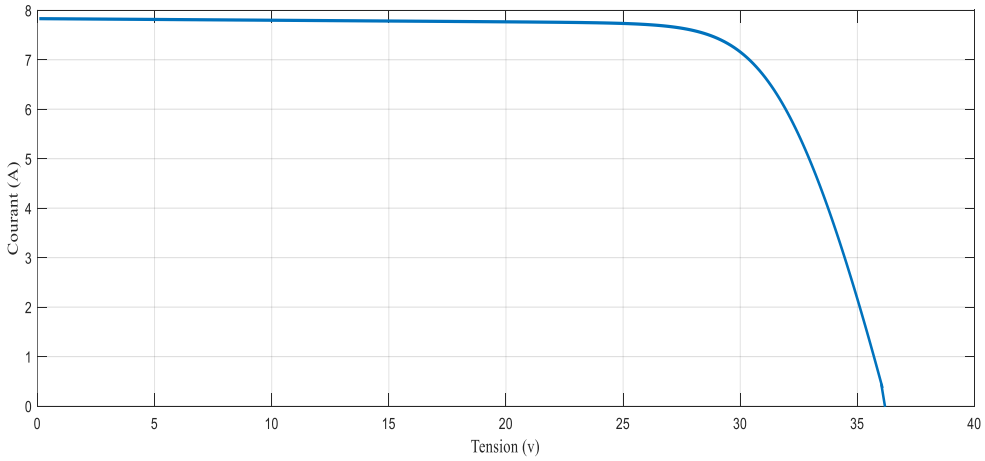

Figure II. 6. Caractéristique courant-tension de panneau solaire

II. 5. 1 Courant de court-circuit (I_{CC})

C'est le courant qui circule dans une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est en court-circuit (bornes + et – court-circuitées). Dans cette configuration, la tension aux bornes de cellule est nulle (V=0), ce qui entraîne une puissance produite nulle (P=V×I=0).

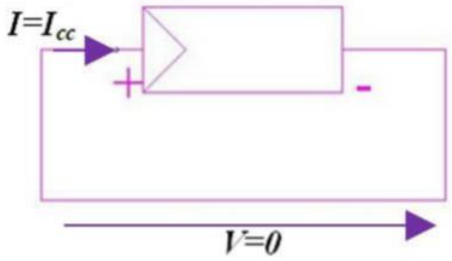

Figure II. 7. Court-circuit

II. 5. 2 Tension en circuit ouvert (V_{CO})

Il s'agit de la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est connectée à aucun circuit, c'est-à-dire lorsque ses bornes positive (+) et négative (–) ne sont reliées à aucun autre composant électrique (le courant circulant dans la cellule est donc nul).

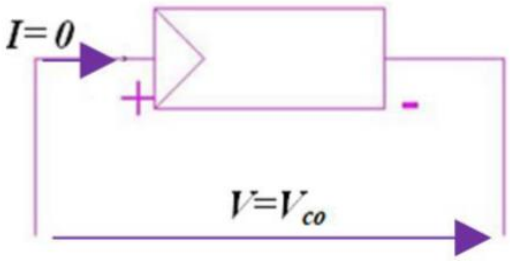

Figure II. 8. Circuit ouvert

$$V_{CO}=\frac{KTc}{q}\log\left(\frac{Iph}{Is}+1\right) \qquad \text{(II.8)}$$

Avec :

$\frac{KTC}{q}$: Représentant la potentielle thermodynamique

T_c : est la température absolue

K : la constante de charge d'électron, $1.602*10^{-23}$ C

q : la constante de Boltzmann, $1.38*10^{-23}$ J/k

I_{ph} : le courant photonique

I_s : le courant de saturation

II. 5. 3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme est un rapport qui peut évaluer la qualité d'une cellule ou d'un panneau solaire. Ce paramètre, calculé à partir de la courbe courant-tension (I-V), compare la

puissance maximale que peut fournir la cellule (P_{max}) avec le produit des valeurs en circuit ouvert (V_{oc}) et en court-circuit (I_{sc}) [17]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF=\frac{P\ max}{Vco.Icc} \tag{II.9}$$

II. 5. 4 Rendement (ɳ)

Dans le cadre de l'étude du photovoltaïque, le rendement désigne la capacité des cellules PV à convertir l'énergie solaire en électricité. Il est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, désignée par la lettre P(in), est défini comme suit :

$$ɳ=\frac{Pmax}{Pin}=\frac{FF.Icc.Vco}{Pin} \tag{II.10}$$

Il est possible d'améliorer ce rendement par une augmentation du facteur de forme, du courant de court-circuit et de la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion s'avère être un paramètre d'une importance majeure. Il convient de noter que la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

II. 6 Association des cellules photovoltaïques

Une cellule est l'élément de base d'un système photovoltaïque d'une puissance d'environ 4 W [18]. Pour obtenir des puissances plus élevés, plusieurs cellules sont connectées en série pour former un panneau photovoltaïque. Ces panneaux sont connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance requise.

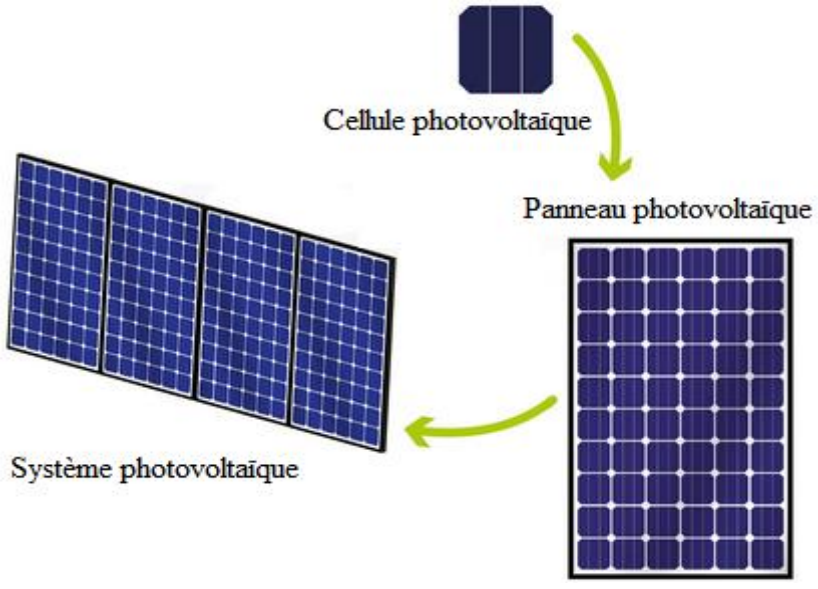

Figure II. 9. Système photovoltaïque

La capacité d'un module solaire est relativement insuffisante par rapport aux applications visées, nécessitant ainsi un assemblage en série et en parallèle de ces modules pour obtenir la puissance désirée.

II. 6. 1 Association des panneaux photovoltaïques en série

L'association de plusieurs modules solaires en série (N_{ps} modules) augmente la tension globale générée, conduisant à une augmentation de la production totale d'électricité. Dans ce connecte, toutes les modules sont parcourues par le même courant. La caractéristique électrique globale du groupe de modules en série est simplement la somme des tensions individuelles de chaque cellule. L'équation a décrit :

$$V_{co,\mathrm{ps}} = N_{\mathrm{ps}} \times V_c \qquad \text{(II.11)}$$

Précisément le comportement électrique d'un tel ensemble de cellules en série [19].

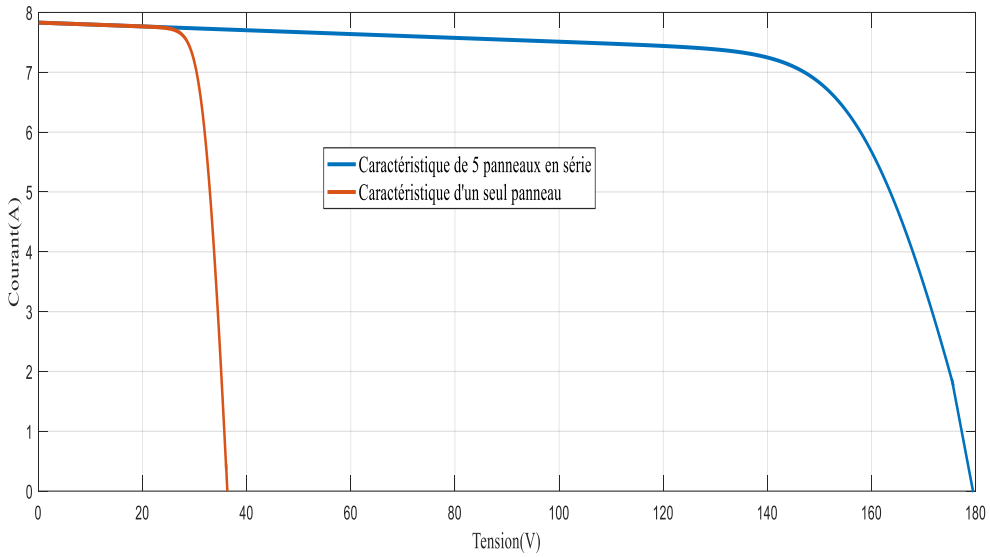

Figure II. 10. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_{ss} modules en série

II. 6. 2 Association des panneaux photovoltaïques en parallèle

Il est également envisageable de relier des modules photovoltaïques (N_{mp}) en parallèle afin d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans ce regroupement, tous les modules ayant des caractéristiques similaires sont soumis à une tension identique, et le courant global est calculé en cumulant les courants individuels comme démontré dans la figure ci-après.

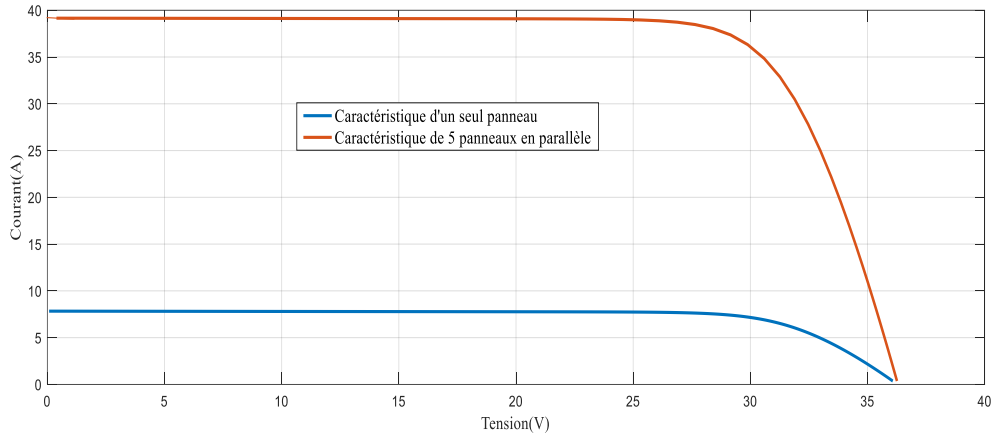

Figure II. 11. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_{pp} modules en parallèle

La formule employée pour déterminer les propriétés électriques d'un ensemble de modules N_{pp} en parallèle est la suivante :

$$I_{cc,pp} = N_{pp} \times I_{cc} \quad \text{(II.12)}$$

Avec :

I_{CC} : représente le courant de court-circuit de chaque cellule.

II. 6. 3 Association des panneaux photovoltaïques mixte (série et parallèle)

La caractéristique globale courant-tension du générateur photovoltaïque (GPV) est déduite théoriquement en combinant les caractéristiques des panneaux individuels. Comme indiqué dans la figure II. 12, la tension globale est multipliée par N_{ps} (nombre de panneaux en série), tandis que le courant est multiplié par N_{pp} (nombre de panneaux en parallèle), permettant ainsi une augmentation considérable de la puissance de sortie du système.

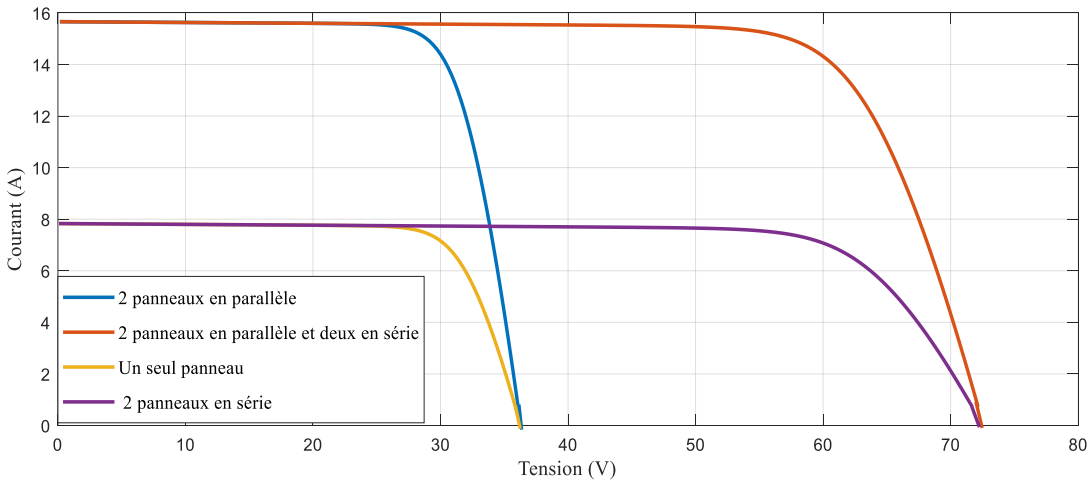

Figure II. 12. Caractéristique regroupement mixte (série et parallèle)

II. 7 Protection de générateur photovoltaïque

Pour prévenir des défaillances catastrophiques dues à la combinaison de cellules en série et de panneaux en parallèle, on utilise deux sortes de diodes :

- Les diodes by-pass sont placées dans la boite de jonction à l'arrière des modules (environ 2 à 5 diodes). Ils permettent au courant de circuler en isolant le sous-réseau où se trouvent les cellules ombrées.
- La diode anti-retour empêche le courant de circuler en sens inverse dans les panneaux solaires lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur.

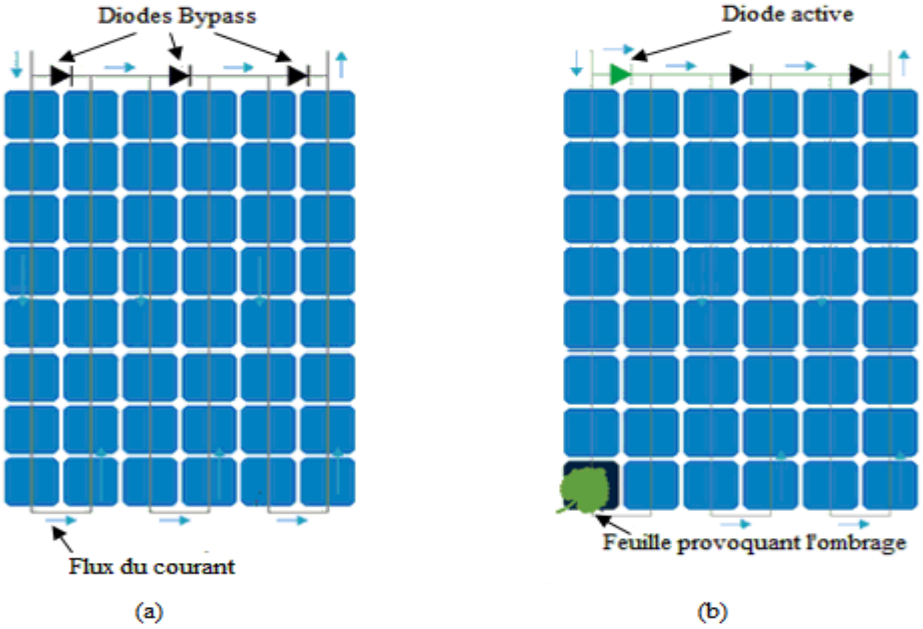

Figure II. 13. Protection des panneaux solaires : (a) fonctionnement normal, (b) fonctionnement à l'ombrage

II. 8 Influence de variation des paramètres internes et externes

Le rendement des panneaux solaires est en grande partie dépendant de l'ensoleillement et de la température. Mais les composants internes sont également très importants [20]. Afin d'étudier l'impact des facteurs internes et externes sur les performances photovoltaïques, nous avons simulé le modèle détaillé dans la figure ci-dessous en utilisant MATLAB/Simulink, utilisant le panneau solaire qui présente les caractéristiques suivantes : une puissance de 213.15 W, une tension de circuit ouvert à 36.3 V, une tension nominale de 29V, un courant de court-circuit de 7.84 A et un courant nominal de 7,35 A. Ce panneau solaire comprend 60 cellules connectées en série.

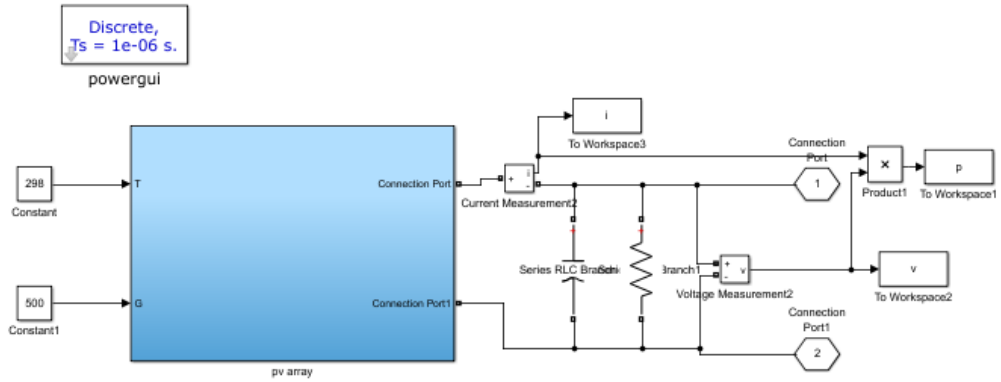

Figure II. 14. Modèle de simulation du panneau photovoltaïque

II. 8. 1 Effet des paramètres internes

Dans cette section, l'effet des paramètres internes (diode d'idéalité, résistances en série et en parallèles) est analysé.

II. 8. 1. 1 Variation de la résistance en série

La figure II. 14 illustre la courbe de courant-tension pour plusieurs valeurs de résistance en série (Rs(Ω) = 0.38391, 0.5, 1, 2). Il est évident que la résistance en série (R_s) a un impact considérable sur la puissance de sortie photovoltaïque. Lorsque la valeur de R_s est élevée, elle réduit la valeur du courant de court-circuit (Isc) sans affecter la tension en circuit ouvert. L'augmentation de la résistance en série entraîne une diminution de la courbe puissance-tension (P-V), conduisant à une modification du point de puissance maximale.

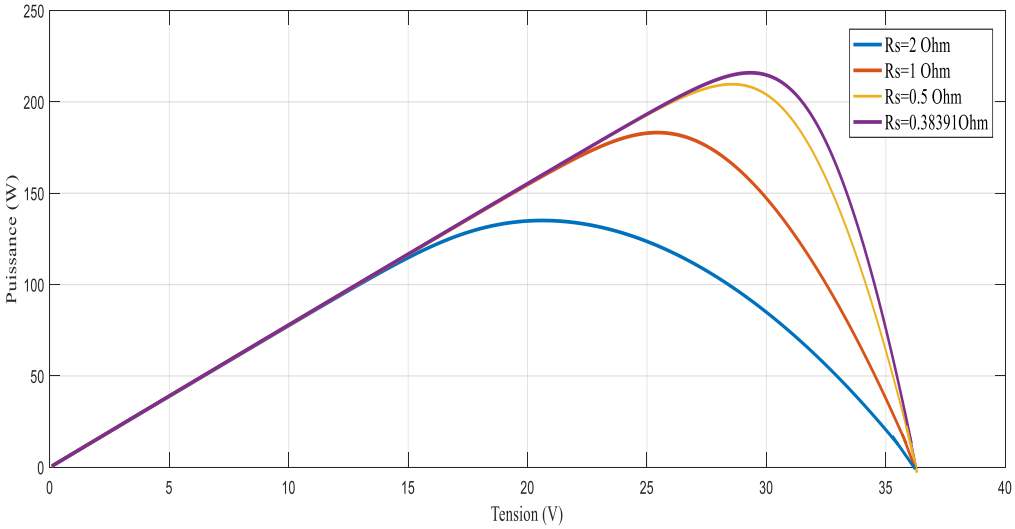

Figure II. 15. Caractéristiques P-V en cas de variation de la résistance en série

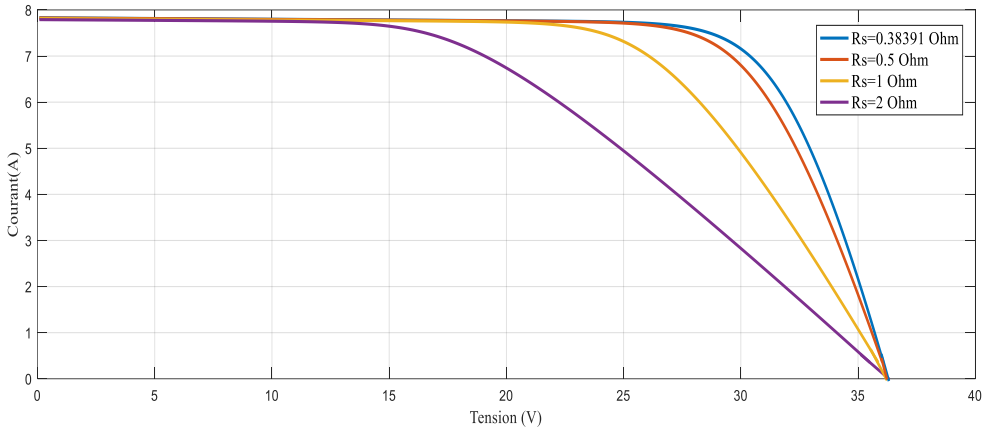

Figure II. 16. Caractéristiques I-V en cas de variation de la résistance en série

II. 8. 2 Variation de la résistance parallèle

Les figures ci-dessous montrent l'effet de la variation de la résistance parallèle sur la caractéristique PV pour différentes valeurs (313.0553, 50, 17, 7Ω). L'augmentation de la résistance en parallèle entraîne une augmentation de la tension en circuit ouvert (Voc). Cependant, l'effet de cette augmentation de la résistance en parallèle sur le courant de court-circuit est faible. Une déformation de la caractéristique est provoquée par la valeur insuffisante de cette résistance ce qui signifie une perte de la puissance produite. Donc, on constate que la résistance en parallèle doit être suffisamment élevée pour obtenir une meilleure puissance de sortie.

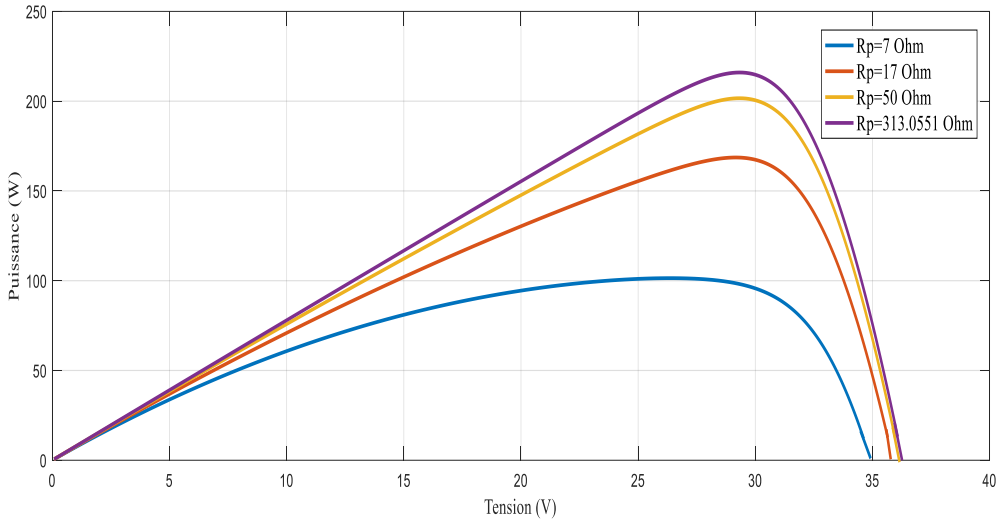

Figure II. 17. Caractéristiques P-V en cas de variation de la résistance parallèle

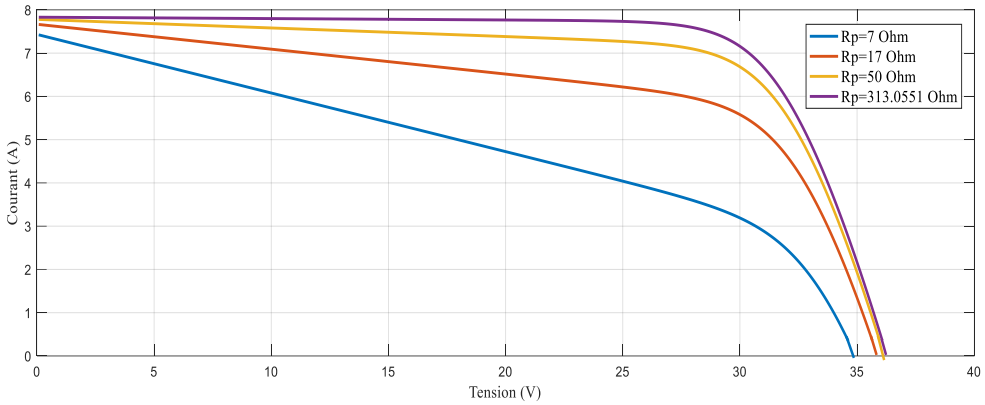

Figure II. 18. Caractéristiques I-V en cas de variation de la résistance parallèle

II. 8. 3 Diode d'idéalité

La figure II. 19 montre les courbes I-V et P-V pour plusieurs facteurs d'idéalité des diodes (n = 1, 1.2, 1.4, 1.6). Le point de puissance maximale (MPP) est plus étroit et plus apparent sur les courbes avec des valeurs de d'idéalité de diode (n) inférieures. En revanche, des valeurs de n supérieures sont associées à des courbes (P-V et I-V) plus étalées et plus planes.

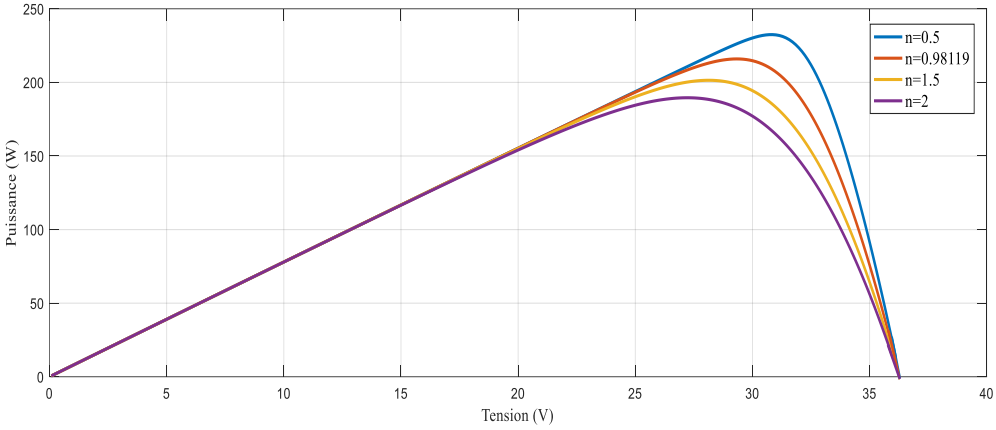

Figure II. 19. Caractéristiques P-V en cas de variation de la diode d'idéalité

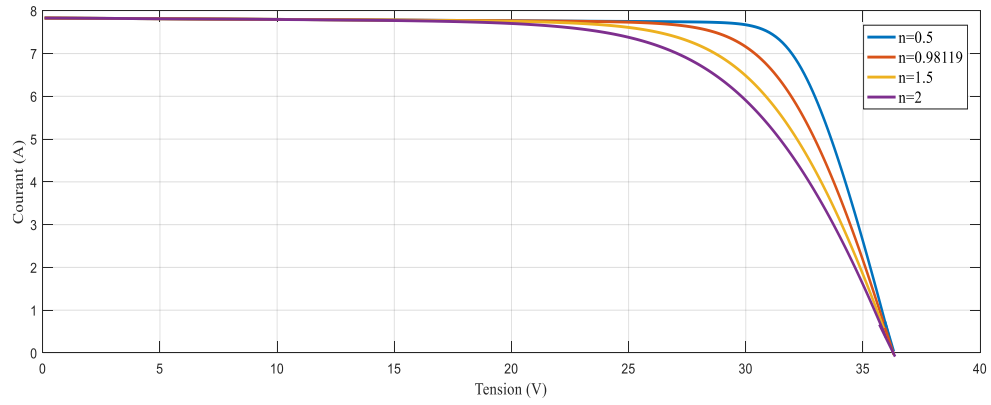

Figure II. 20. Caractéristiques I-V en cas de variation de la diode d'idéalité

II. 8. 2 Paramètres externes

Selon le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque, deux éléments sont essentiels pour déterminer son efficacité : la température et l'éclairement solaire. Cette deuxième partie examine en détail l'impact de la variation de température, l'éclairement et l'ombrage sur les performances d'un panneau solaire.

II. 8. 2. 1 Effet de la température

Les performances d'une cellule photovoltaïque en réponse à des variations de température -15°, 0°, 25°, 45° et 55°C, sont illustrées dans les figures 21 et 22. Ces résultats sont obtenus pour un ensoleillement constant de 1000 W/m². Les résultats indiquent que l'impact de la température sur le courant de court-circuit est négligeable, tandis que son influence sur la tension en circuit ouvert est significative. On constate que l'augmentation de la température provoque une réduction de la production d'énergie photovoltaïque. Un système de refroidissement est suggéré pour minimiser les pertes énergétiques associées à la température des panneaux photovoltaïque.

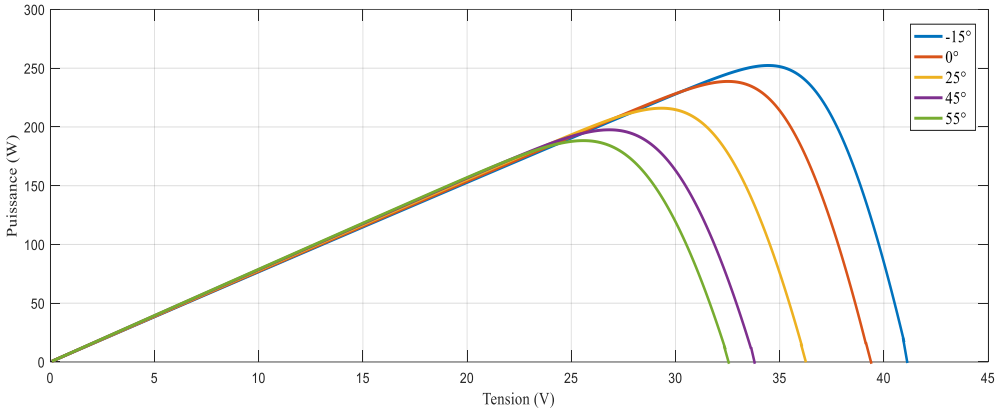

Figure II. 21. Caractéristiques P-V sous variation de température

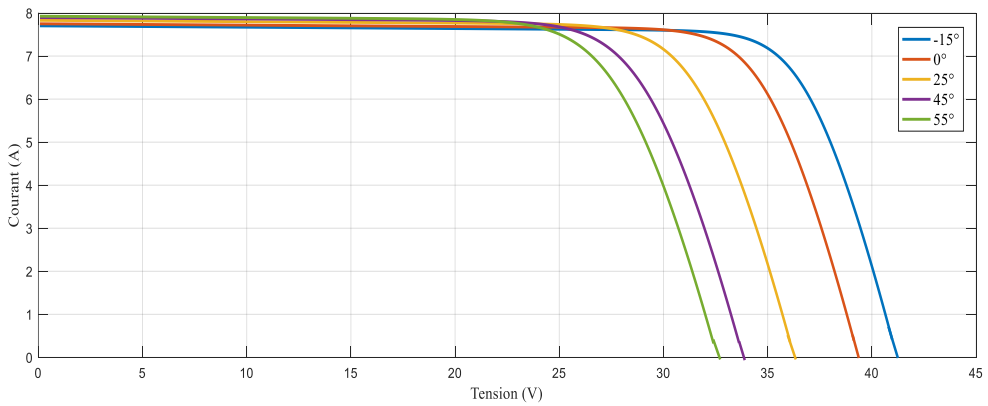

Figure II. 22. Caractéristiques I-V sous variation de température

II. 8. 2. 2 Effet de l'éclairement

L'intensité de l'irradiation solaire est un des facteurs environnementaux majeurs influençant la puissance de sortie du générateur photovoltaïque, qui est proportionnelle à la quantité d'énergie solaire qu'il capte. Les courbes indiquent l'impact de l'irradiation solaire sur les courbes I-V et P-V aux différentes intensités (400, 600, 800,1000 et 1200 W/m²), à une température constante de 25°C. On observe le courant varie de manière proportionnelle à l'ensoleillement, tandis que la tension subit une variation minime. Toutefois, la puissance connaît une hausse significative lorsque l'irradiation s'accroît. A chaque valeur d'irradiation, la sortie PV a un point de crête (MPP) qui présente la puissance de sortie maximale (Pmax = Imax × Vmax) que le module PV peut produire [21].

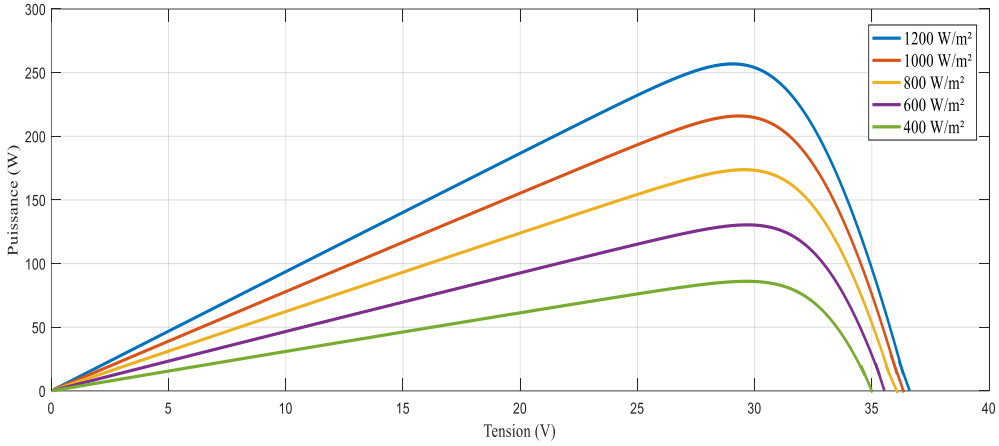

Figure II. 23. Caractéristiques sous variation de l'éclairement

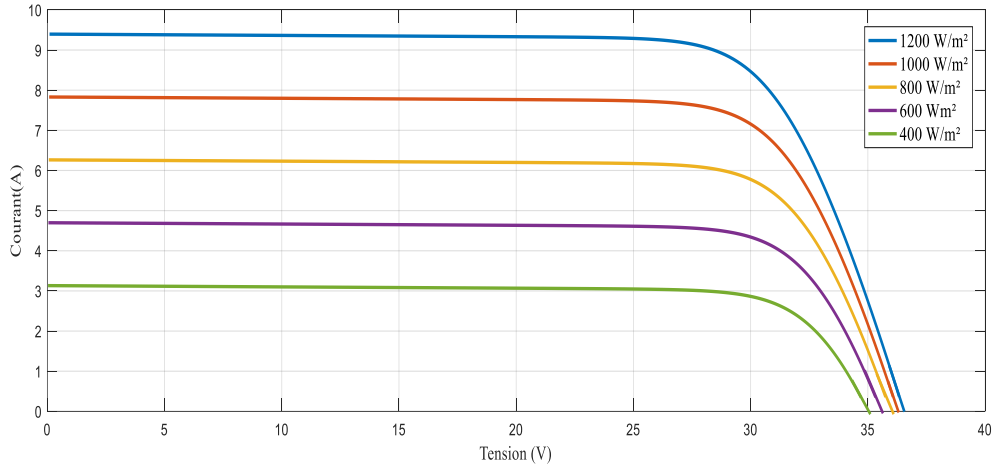

Figure II. 24. Caractéristiques I-V sous variation d'irradiation

II. 8. 3 Effet d'ombrage

La figure 25 montre un générateur photovoltaïque connecté en série fonctionnant d'abord dans des conditions normales (avec un rayonnement uniforme de 1000 W/m² sur les trois modules), puis dans des conditions d'ombrage partiel (avec des rayonnements variables de 1000, 700 et 300 W/m²). L'effet de l'ombrage est clairement visible : Les courbes PV présentent plusieurs pics et la puissance produite est considérablement réduite par rapport au fonctionnement normal. Dans ce cas, les diodes (By-pass) jouent un rôle essentiel en empêchant les cellules ombragées de consommer le courant généré par les cellules éclairées.

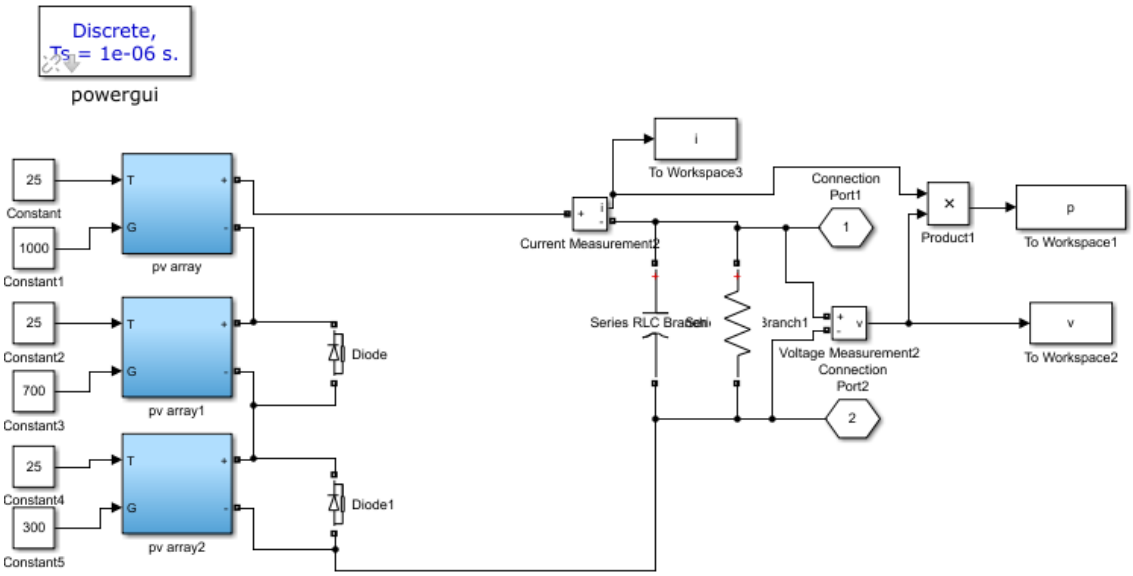

Figure II. 25. Simulation de panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage

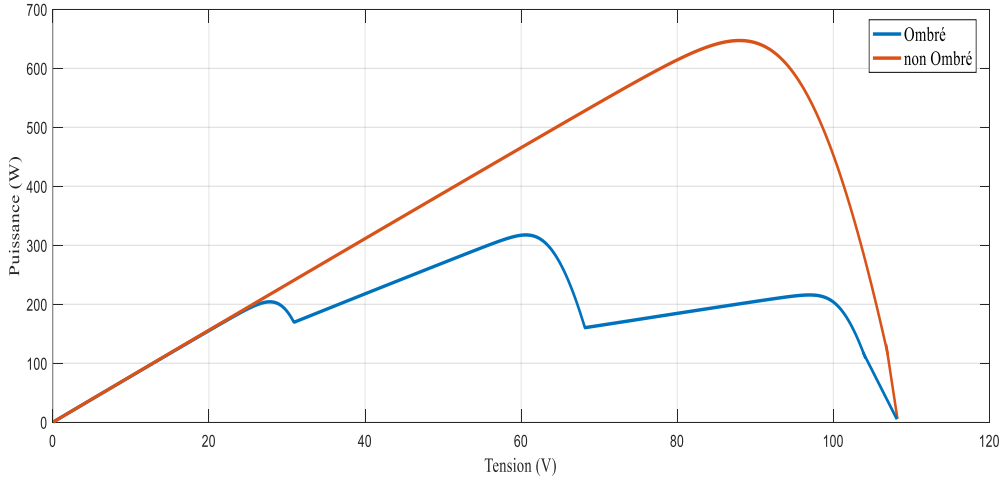

Figure II. 26. Caractéristiques P-V sous ombrage

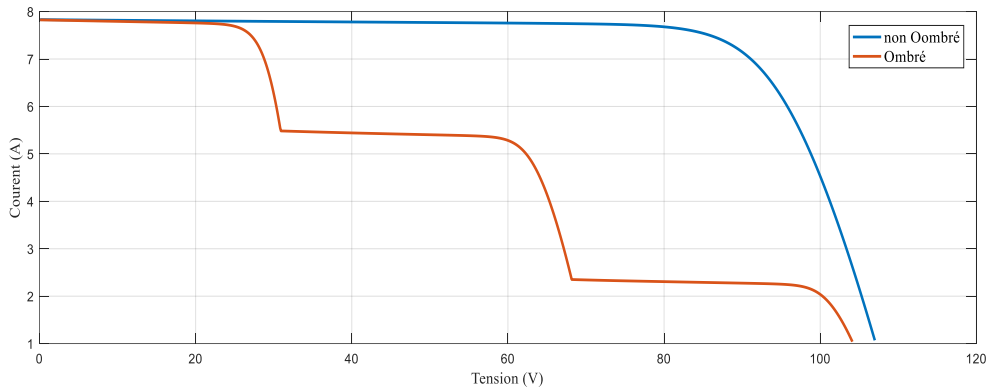

Figure II. 27. Caractéristiques I-V sous ombrage

II. 9 Étage d'adaptation de l'énergie photovoltaïque

L'efficacité d'une installation de panneaux solaires est un aspect crucial qui doit être pris en compte pour minimiser les pertes de puissance. C'est par conséquent, l'installation photovoltaïque doit être exploitée à son niveau de puissance optimale afin d'assurer un rendement maximal, indépendamment des fluctuations des conditions météorologiques. Pour que les panneaux solaires fonctionnement à leurs point de puissance maximale. Un raccordement direct des panneaux solaires à la charge ne leur permet pas d'atteindre leur rendement optimal. La meilleure combinaison consiste à installer des convertisseurs statiques, auxquels on applique le contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui permet au panneau solaire de fonctionner au point de puissance maximale (Figure II. 28). En général, le MPPT est basé sur la variation du rapport cyclique (D) de convertisseur DC/DC en fonction de l'évolution de ses paramètres d'entrée (I_{pv} et V_{pv}) jusqu'à ce que le générateur PV atteigne sa valeur de fonctionnement optimale [21].

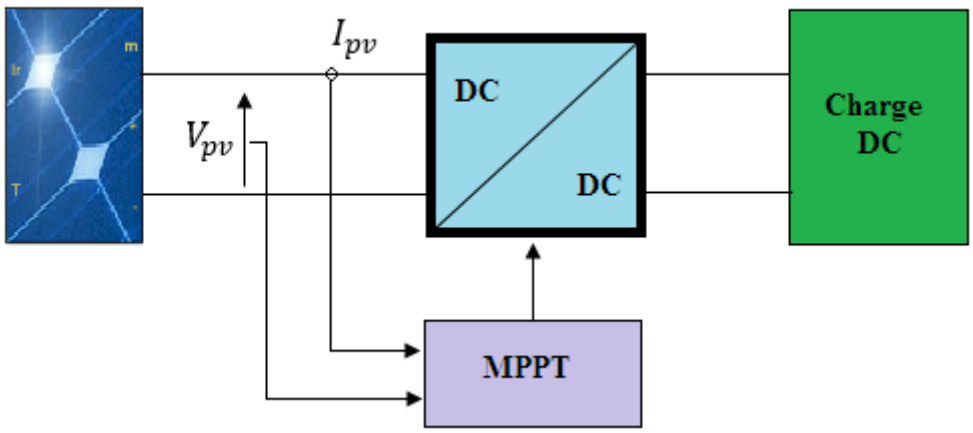

Figure II. 28. Etage d'adaptation

Un convertisseur continu-continu (hacheur), est un équipement électronique de puissance qui permet de convertir la valeur de la tension moyenne d'une source de tension continue à l'aide de commutateurs de commande électroniques. En d'autres termes, il convertit une tension continue fixe en une tension continue variable, avec une grande efficacité. Plus précisément, un hacheur utilise des interrupteurs électroniques (transistors, thyristors, etc.) afin de couper et de rétablir le courant continu à des moments précis, à des fréquences très élevées (fréquemment de 1 à 10 kHz). L'opération permet de réguler le transfert d'énergie entre une source de tension continue et une charge en ajustant le rapport du cycle de la commande de l'interrupteur.

Il existe différents types de hacheurs, tels que les hacheurs dévolteurs (qui réduisent la tension), les hacheurs survolteurs (qui augmentent la tension) et les hacheurs en H ou à 4 interrupteurs. Les hacheurs sont largement utilisés dans divers domaines, notamment la variation de la vitesse des moteurs à courant continu, la régulation de la tension dans l'électronique de puissance et la conversion de l'énergie dans les systèmes hydrides.

II. 9. 1 Hacheur parallèle (survolteur ou BOOST)

Un hacheur parallèle est un dispositif de commutation électrique qui convertit une tension continue d'entrée en une tension continue plus élevée, composée de deux étapes qui fonctionnent ensemble pour stocker et décharger l'énergie. Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (MOSFET, IGBT) et une diode (amorçage et blocage spontanés) comme il est montré dans la figure suivante :

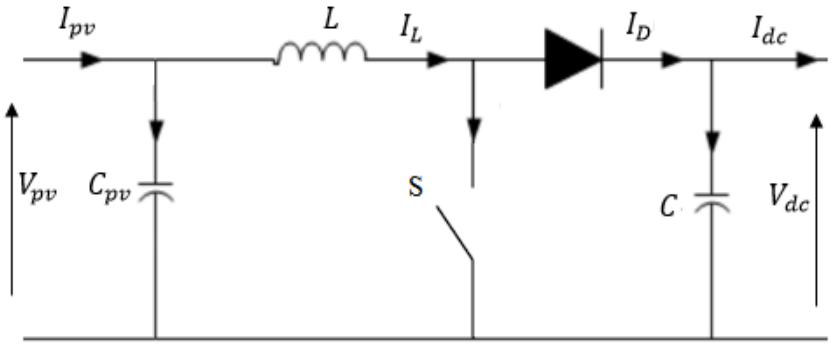

Figure II. 29. Schéma d'un hacheur survolteur

Pendant la phase de stockage, le commutateur est fermé pour stocker l'énergie dans le champ magnétique de la bobine, tandis que la phase de décharge se fait en ouvrant le commutateur pour décharger l'énergie stockée avec la source de tension. Les circuits élévateurs équivalents

pendant les intervalles d'activation et de désactivation pour un commutateur idéal sont illustrés dans la figure ci-dessous :

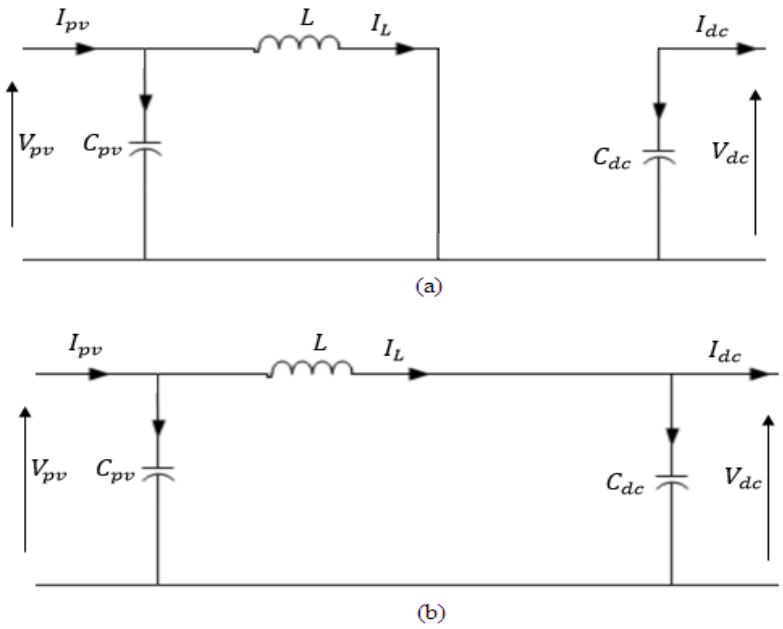

Figure II. 30. Circuits boost équivalents : (a) mise en marche et (b) arrêt

Lorsque l'interrupteur (S) est fermé (Figure 30(a)), le fonctionnement du convertisseur élévateur peut être décrit par le système d'équations suivant, bien connu dans le domaine :

$$\frac{d}{dt} I_L = \frac{1}{L} V_{PV} \tag{II.13}$$

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = -\frac{1}{C} I_{inv} \tag{II.14}$$

Dans le cas d'un interrupteur ouvert (Figure 30(b)), le système d'équations précédent peut être exprimé comme suit :

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}} I_L = \frac{1}{\mathrm{L}} (V_{PV} - V_{dc}) \tag{II.15}$$

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C} (I_L - I_{inv}) \tag{II.16}$$

On peut représenter les deux dernières équations de la manière suivante :

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}} I_L = -(1 - \mathrm{S}) \frac{1}{\mathrm{L}} V_{dc} + \frac{1}{\mathrm{L}} V_{PV} \tag{II. 17}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}} V_{dc} = -(1 - \mathrm{S}) \frac{1}{\mathrm{C}} I_L - \frac{1}{\mathrm{C}} I_{inv} \tag{II. 18}$$

I_L : est le courant d'entrée du boost (A).

V_{PV}: est la tension d'entrée du boost (V).

V_{DC}: est la tension de sortie du boost (V).

I_{DC}: est le courant de sortie du boost (A).

L : est l'inductance d'entrée du boost (mH).

C : est le condensateur de sortie du boost (µF).

S : est le signal de commutation prenant la valeur de l'ensemble discret S = [1, 0].

II. 9. 2 Hacheur dévolteur (série)

Ce nom vient du fait que la tension moyenne de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée. Pour un rapport cyclique (D) donné et en régime de conduction continue, la tension moyenne de sortie est calculée par la formule suivante [22, 23] :

$$V_{dc} = \mathrm{D}\,.\mathrm{V} \qquad \text{(II. 19)}$$

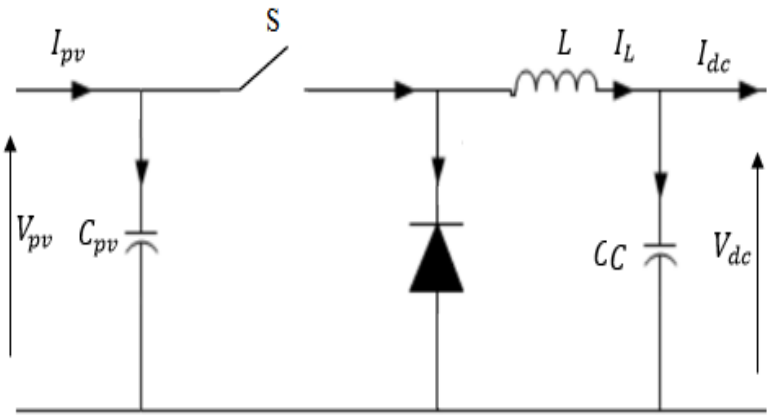

Figure II. 31. Schémas d'un hacheur série

II. 9. 3 Hacheur dévolteur - survolteur (série−parallèle)

Ce nom est donné en fonction de la tension moyenne de sortie V_{dc}, qui peut être plus faible ou plus élevée que la tension d'entrée V_{pv}. Lorsque le système fonctionne en mode de conduction continue avec un rapport cyclique D, la tension de sortie moyenne est calculée à l'aide de la relation suivante [22, 23] :

$$V_{dc} = \frac{D}{1-D}\,\mathrm{V}_{pv} \qquad \text{(II. 20)}$$

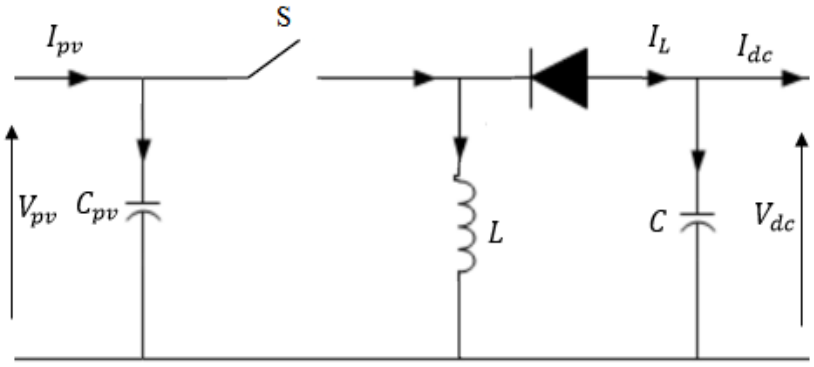

Figure II. 32. Schéma d'un hacheur série-parallèle

II. 10 Régulateurs MPPT- P&O

Le régulateur de la poursuite de point de puissance maximale (MPPT) est un algorithme qui contrôle un convertisseur électronique DC/DC pour assurer que les panneaux solaires opèrent à leur point de puissance maximale (PPM), c'est-à-dire le point où ils produisent le plus d'énergie, indépendamment des conditions environnementales, ce que permet d'optimiser l'efficacité des panneaux solaires.

L'algorithme de MPPT (P&O) exploite la courbe tension-courant-puissance des panneaux photovoltaïques pour localiser le point de puissance maximale (MPP) : il ajuste dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, en l'augmentant si le point opératoire est à gauche du MPP (pour le déplacer vers la droite) ou en le diminuant s'il est à droite (pour le ramener vers la gauche). Bien que simple et économique à implémenter, cette méthode présente des limites comme une convergence lente lors de changements soudains d'ensoleillement et des oscillations persistantes autour du MPP, générant des pertes d'énergie.)

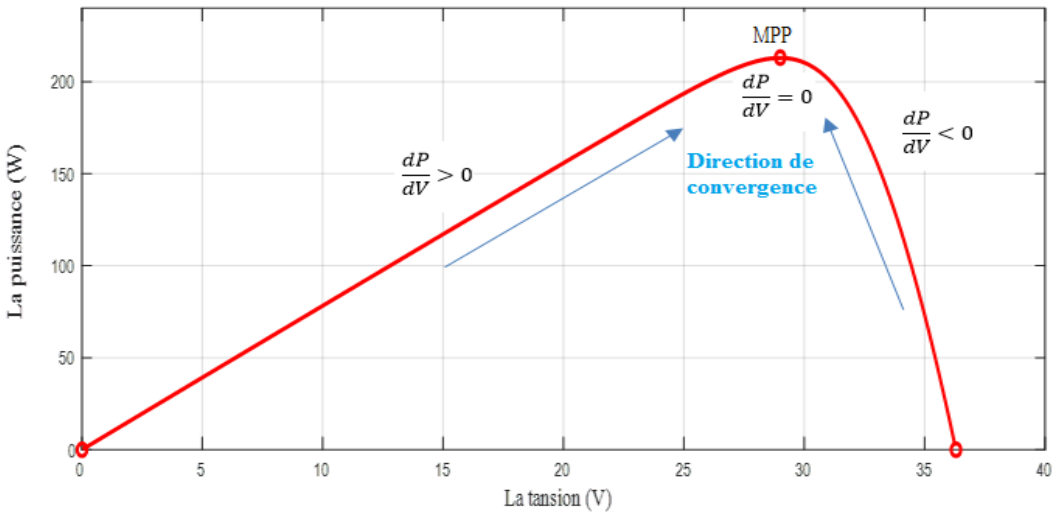

Figure II. 33. Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O

On évalue constamment la puissance instantanée P(k) par rapport à celle de l'instant précédent P(k-1). Si cet écart est positif, cela indique que le point de fonctionnement est situé à gauche du point maximal. De ce fait, la tension doit être augmentée afin d'atteindre la puissance maximale. Si ce n'est pas le cas, le point de fonctionnement se situe à droite. On ajuste la tension dans le sens contraire à celui du cycle précédent pour positionner le point de fonctionnement au niveau du point de puissance maximale. Une fois que le point de puissance maximale sera atteint, la tension oscillera autour de la tension idéale V_{pm} du fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple. Si C est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes. Si C'est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation [24].

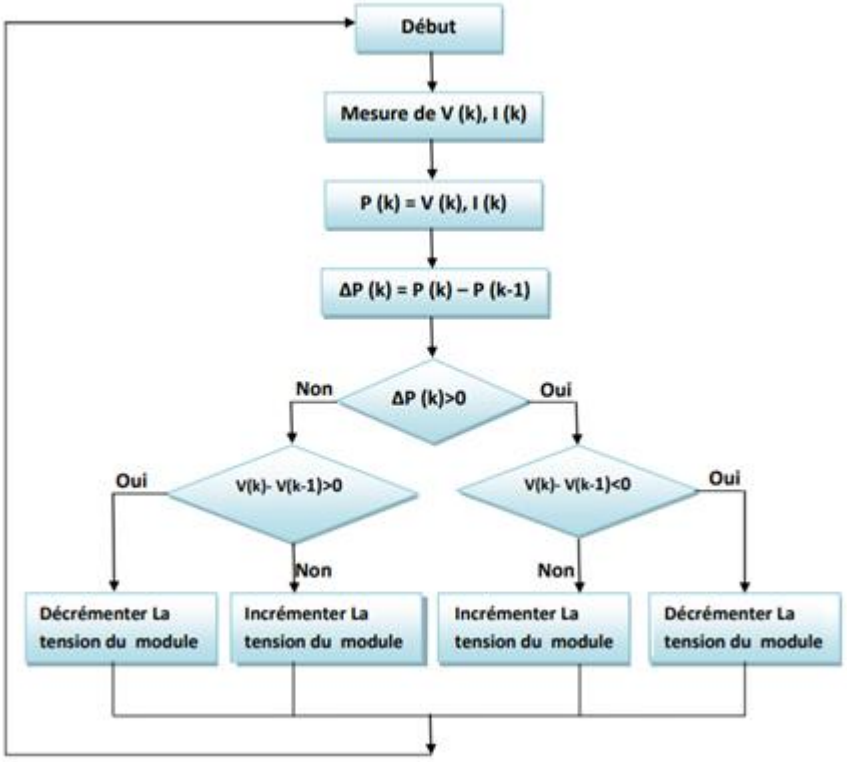

Figure II. 34. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation

II. 11 Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est basée sur l'effet photovoltaïque, qui dépend des caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que d'autres facteurs tels que l'ensoleillement, la température, l'ombre… etc. La première partie de ce chapitre explique en détail le concept photovoltaïque. La deuxième partie analyse de l'impact des facteurs internes et externes sur le rendement d'un panneau solaire. Les résultats montrent que la puissance photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et de la température. La puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement et diminue avec une température élevée. Cette puissance augmente encore lorsque les valeurs de résistance parallèle augmentent, et diminue lorsque la résistance série augmente. L'ombrage a un impact négatif sur les caractéristiques photovoltaïques. Pour chaque niveau d'éclairement ou de température, il existe un point de crête qui indique la puissance maximale du panneau solaire. La troisième partie de ce chapitre détaille le contrôle des convertisseurs DC/DC à l'aide de l'algorithme de perturbation et d'observation pour suivre ce point de puissance maximale (MPP) afin d'extraire la puissance maximale du panneau solaire quelle que soient les conditions climatiques.

CHAPITRE III

Connexion du Système Photovoltaïque au Réseau Electrique

1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est une énergie intermittente car elle dépend des conditions climatiques (Éclairement et Température). Sa production est quasi nulle pendant la nuit et les jours les moins ensoleillés. L'une des solutions les plus courantes pour stabiliser l'énergie photovoltaïque consiste à connecter le générateur photovoltaïque au réseau électrique. Cela permet d'ajouter de l'énergie supplémentaire au réseau et de récupérer l'énergie manquante pendant les nuits ou les jours moins ensoleillés.

Ce chapitre décrit la connexion du générateur photovoltaïque de 4kW au réseau électrique via plusieurs dispositifs : un convertisseur DC/DC piloté par la méthode P&O afin d'atteindre le point de puissance maximale, un onduleur régulé par hystérésis et un filtre RL destiné à réduire les harmoniques du courant.

III. 2 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le générateur photovoltaïque produit du courant continu qui est ensuite transformé en courant alternatif par un onduleur et intégré au réseau électrique. Ce courant doit se conformer aux normes du réseau électrique, notamment en ce qui concerne le taux de distorsion harmonique qui doit être inférieur à 5%. Lors des journées bien ensoleillées où les panneaux solaires génèrent suffisamment d'énergie pour la charge, l'électricité sera consommée immédiatement. L'énergie additionnelle est vendue au fournisseur d'électricité.

Dans le processus de conversion photovoltaïque, les convertisseurs électriques ont un rôle principal, que ce soit pour optimiser l'énergie ou pour l'injection de l'énergie générée dans le réseau électrique, garantissant ainsi une haute qualité et une conformité avec les normes du réseau. On identifie généralement trois types d'onduleurs qui offrent des approches techniques performantes : l'onduleur central, l'onduleur string et l'onduleur intégré au panneau.

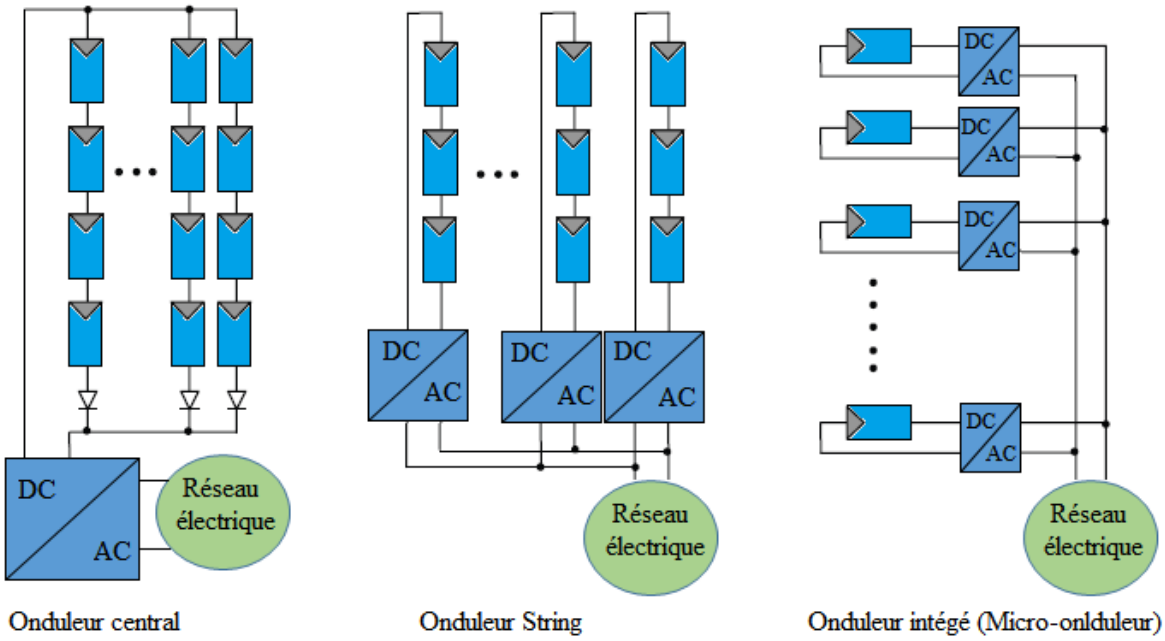

Figure III. 1. Caractéristiques techniques des différents systèmes de configurations

Le tableau ci-dessous présent les caractéristiques techniques de ces trois architectures (onduleur central, onduleur string et onduleur intégré) ;

Tableau III. 1. Caractéristiques techniques des différents systèmes de configurations [24]

	Onduleur Central	Onduleur String	Onduleur Intégré
Pertes DC (Ohmique)	~1-5% en fonction de la tension et de la distance	~1% en fonction de la tension et de la distance	Négligeable
η_{CONV}	95-97%	92-96%	87-93%
Maintenance et réparation	Simple	Difficile (recherche dysfonctionnement)	Difficile (recherche dysfonctionnement)

Concernant l'architecture de l'onduleur central, on retrouve deux configurations dérivées où chaque série de panneaux solaires est couplée à un hacheur pour assurer le suivi du MPPT. Ces hacheurs peuvent être configurés en parallèle ou en série.

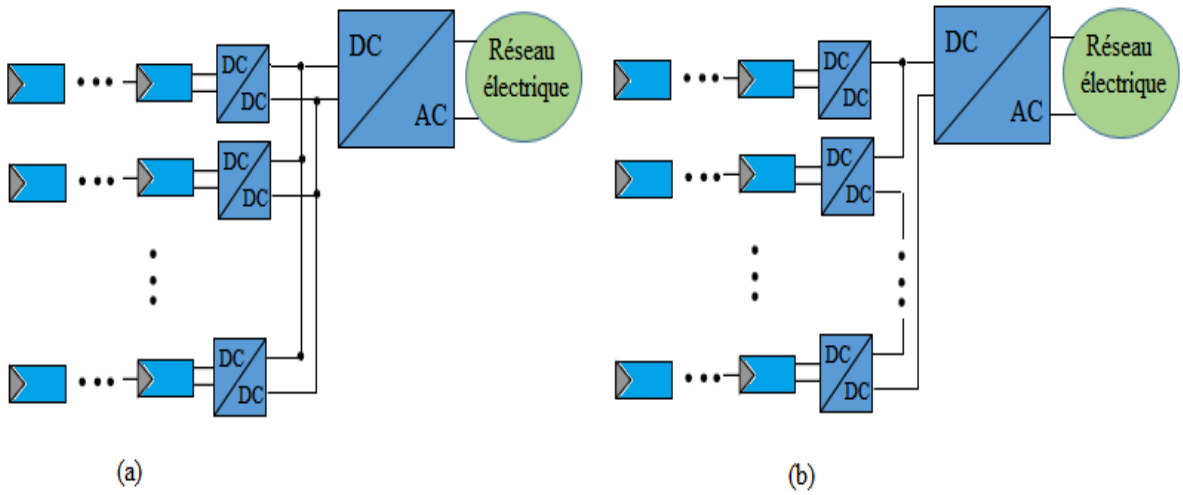

Figure III. 2. Structure multi string avec un onduleur central ; (a) convertisseurs DC/DC en parrèle, (b) convertisseurs DC/DC en parrèle

III. 3 Description du système photovoltaïque connecté au réseau

Le système étudie dans cette partie se constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/DC contrôlé par la technique 'P&O' pour maximiser l'énergie photovoltaïque. Pour la connexion au réseau électrique, on utilise un onduleur triphasé contrôlé par la technique PWM à hystérésis de courant pour injecter l'énergie photovoltaïque au réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire. Un filtre RL est associé pour éliminer les harmoniques de courant électrique.

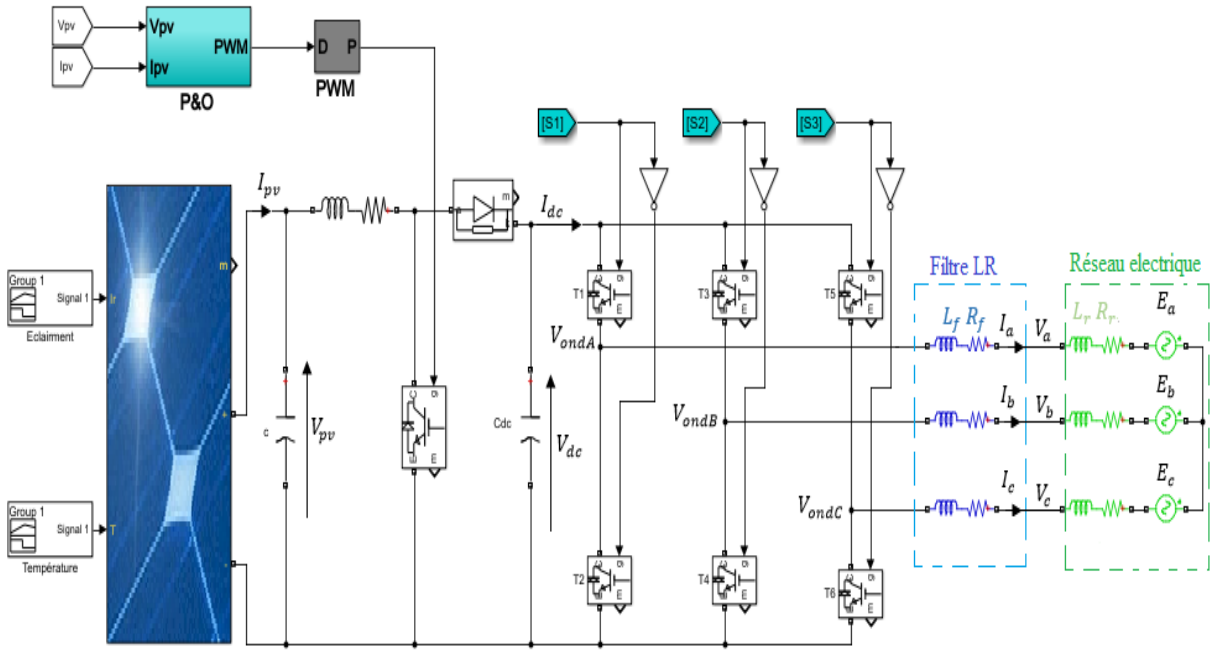

Figure III. 3. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

III. 3. 1 Modélisation du réseau électrique

Notre réseau électrique est modélisé par les équations suivantes :

$$E_a = V_m.\sin(\omega t) \quad \text{(III.1)}$$

$$E_b = V_m.\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad \text{(III.2)}$$

$$E_c = V_m.\sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \quad \text{(III.3)}$$

Avec ;

$V_m=\sqrt{2}.V$

Tel que :

V_m : Tension maximale

V : Tension efficace

III. 3. 2 Modélisation de l'onduleur triphasé

La figure (III.1) illustre la configuration d'un onduleur de tension triphasé à base d'IGBT. L'onduleur de tension triphasé (figure III. 1), est composé de six interrupteurs bidirectionnels (commandés à l'amorçage et au blocage). L'état des interrupteurs de l'onduleur (T1, T2, T3, T4, T5) dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3, S4, S5, S6).

$$S1 = \begin{cases} 1 \; si \; T1 \; passant \; et \; T2 \; ouvert \\ 0 \; si \; T2 \; passant \; et \; T1 \; ouvert \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} 1 \; si \; T3 \; passant \; et \; T4 \; ouvert \\ 0 \; si \; T4 \; passant \; et \; T3 \; ouvert \end{cases}$$

$$S3 = \begin{cases} 1 \; si \; T5 \; passant \; et \; T6 \; ouvert \\ 0 \; si \; T6 \; passant \; et \; T5 \; ouvert \end{cases}$$

Les tensions composées délivrées par l'onduleur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ond_ab} = V_{dc}(S_1 - S_2) \\ V_{ond_bc} = V_{dc}(S_2 - S_3) \\ V_{ond_ca} = V_{dc}(S_3 - S_1) \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

En conséquence, les tensions simples sont exprimées par ces équations :

$$\begin{cases} V_{ond_a} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_1 - S_2 - S_3) \\ V_{ond_b} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_2 - S_1 - S_3) \\ V_{ond_c} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_3 - S_1 - S_2) \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par cette équation :

$$I_{dc} = S_1 I_a - S_2 I_b - S_3 I_c \quad \text{(III.6)}$$

III. 3. 2 Modélisation du filtre (RL)

Afin d'améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau, un filtre RL est utilisé pour éliminer les harmoniques issues du découpage (Taux de distorsion harmonique (THD) moins de 5%). Pour calculer les courants qui traversent le filtre **(**R**,** L**)** du côté réseau, il suffit d'appliquer la loi des mailles :

$$\begin{cases} V_{ondA} - R_f I_a - \frac{1}{L_f}\frac{\mathrm{d}I_a}{dt} - V_a = 0 \\ V_{ondB} - R_f I_b - \frac{1}{L_f}\frac{\mathrm{db}}{dt} - V_b = 0 \\ V_{ondC} - R_f I_c - \frac{1}{L_f}\frac{\mathrm{d}I_c}{dt} - V_c = 0 \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

Avec :

R_r: Résistance du filtre.

L_r: Inductance du filtre.

Va, Vb, Vc : sont les tensions aux points de raccordements communs

Ia, Ib, Ic : représentent les courants sortant de l'onduleur ;

Les puissances sont donnés par cette fonction ;

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}\left(V_d I_d + V_q I_q\right) \\ Q = \frac{3}{2}\left(V_d I_q - V_q I_d\right) \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

III. 4 Stratégie du control de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est d'injecter de la puissance active dans le réseau électrique, tout en maintenant un facteur de puissance unitaire (puissance réactive nulle). Pour ce faire, la commande globale de l'onduleur se compose de trois parties : la PLL pour synchroniser la fréquence du système avec celle du réseau électrique, le contrôleur de tension DC pour stabiliser la tension à l'entrée de l'onduleur quelles que soient les conditions climatiques, et le contrôleur de courant pour injecter de la puissance active dans le réseau avec un facteur de puissance unitaire.

Pour séparer la commande des puissances active et réactive, la rotation de la référence d-q est effectuée avec le vecteur de tension du réseau (V_d=V et Vq=0). Par conséquence, les puissances injectées dans le réseau (P, Q) seront contrôlées indépendamment par les courants I_d et I_q, respectivement [24].

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} V_d I_d \\ Q_g = -\frac{3}{2} V_d I_q \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

III. 4. 1 boucle à verrouillage de phase PLL

Une PLL (Phase Locked Loop, ou boucle à verrouillage de phase) est un circuit électronique qui synchronise la phase d'un signal de sortie s(t) avec celle d'un signal d'entrée e(t) [25]. Dans les dispositifs raccordés au réseau électrique, le PLL constitue un composant crucial pour maintenir une synchronisation harmonieuse avec le réseau. Elle comprend principalement de trois blocs :

- Le détecteur de phase, 'DP'
- Le correcteur
- L'oscillateur commandé en tension, 'OCT'.

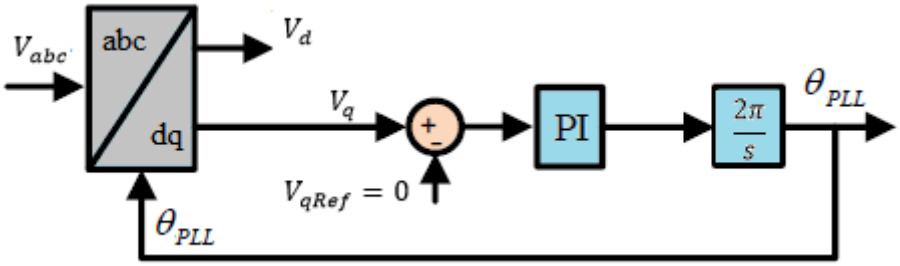

Figure III. 4 . Schéma fonctionnel de base d'une PLL

III. 4. 2 Régulateur de la tension continu

L'énergie fournie par les panneaux solaires est répartie entre le bus DC et l'alimentation du réseau, mais en cas de circuit défectueux du côté du réseau, de l'énergie peut s'accumuler dans le condensateur du bus, entraînant une augmentation de la tension au-delà des limites autorisées. Pour éviter cela, une boucle de contrôle est nécessaire pour décharger l'énergie excédentaire et assurer une tension constante, optimisant ainsi le fonctionnement de l'onduleur [26].

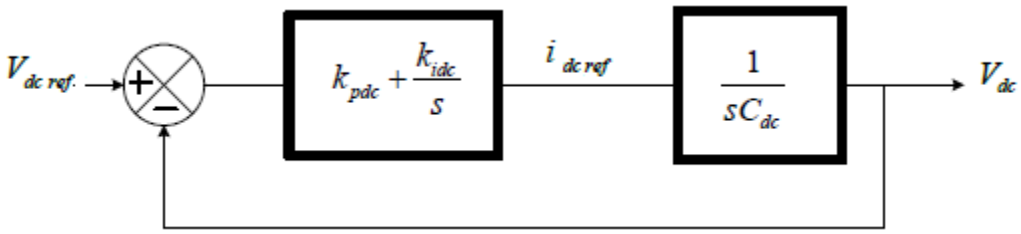

Figure III. 5. Schéma bloc de la régulation du bus continu

III. 4. 3 Commande par hystérésis du courant

Cette approche permet de conserver le courant dans une zone spécifique autour d'une valeur de référence. Lorsque le courant dépasse cette zone, la disposition des interrupteurs est ajustée. En modifiant la largeur de la bande, on influence indirectement la fréquence de commutation des interrupteurs [27]. Cette méthode est prisée pour sa rapidité, sa solidité et sa facilité d'application. La sortie du régulateur de tension est le courant de référence à injecter dans le réseau I_{dref}. I_{qref} est proposé nul pour éliminer la puissance réactive pour assurer un facteur de puissance unitaire.

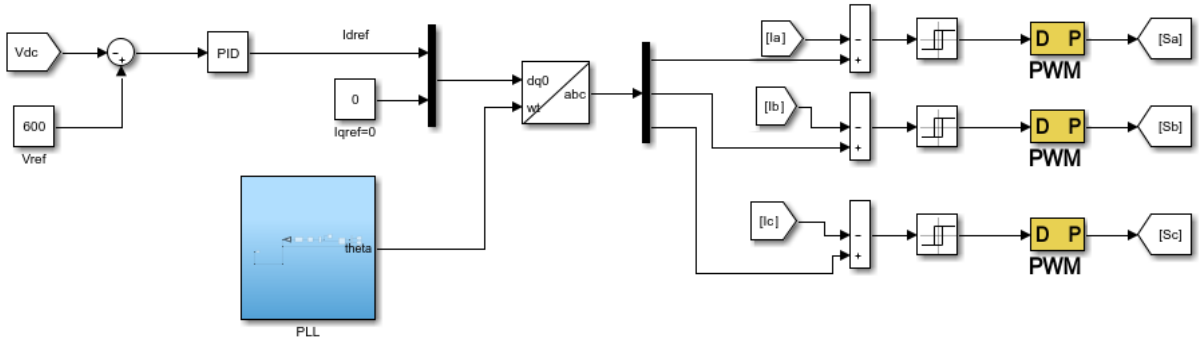

Figure III. 6. Schéma de la régulation du courant par hystérésis.

III. 5 Résultats de simulation

Le générateur photovoltaïque simulé dans cette section est composé de 4 panneaux solaires connectés en série et de 5 panneaux en parallèle. Les paramètres de ce panneau sont donnés en annexe. Pour tester l'efficacité des contrôles appliqués, une variation de l'éclairement et de la température est appliquée sur ce système, comme le montre les figures III.7 et III.8.

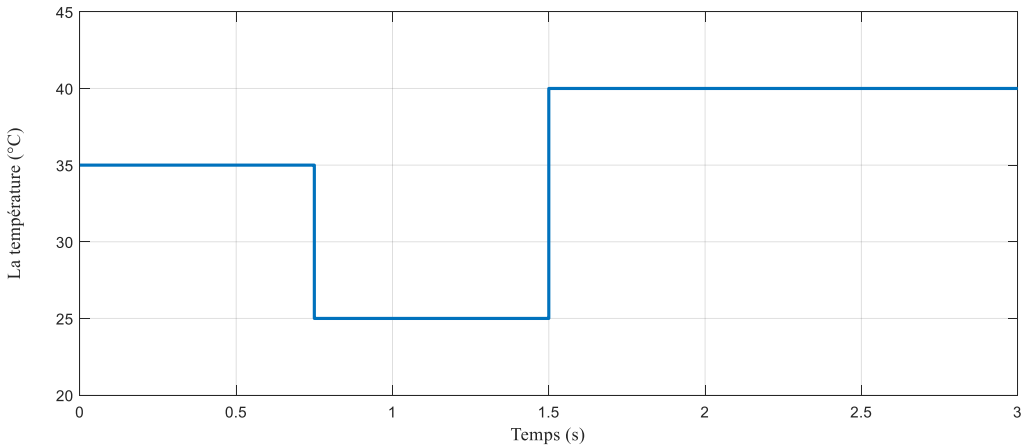

Figure III. 7. Profile de La température

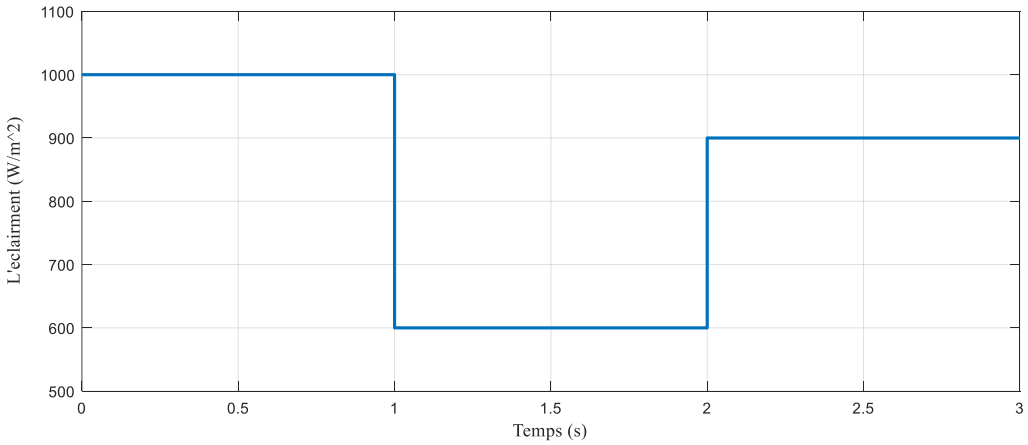

Figure III. 8. Profile de l'éclairement

Le courant photovoltaïque varie en fonction de la variation de l'éclairement. Avant 1s, l'éclairement est de 1000W/m^2, ce qui donne un courant photovoltaïque égal à 38A. Entre 1s et 2s, lorsque l'éclairement diminue, le courant chute systématiquement à 22A. Après 2s, l'augmentation de l'éclairement à 900W/m^2 provoque une augmentation considérable du courant de sortie. La variation de la température à un effet négligeable sur le courant produit.

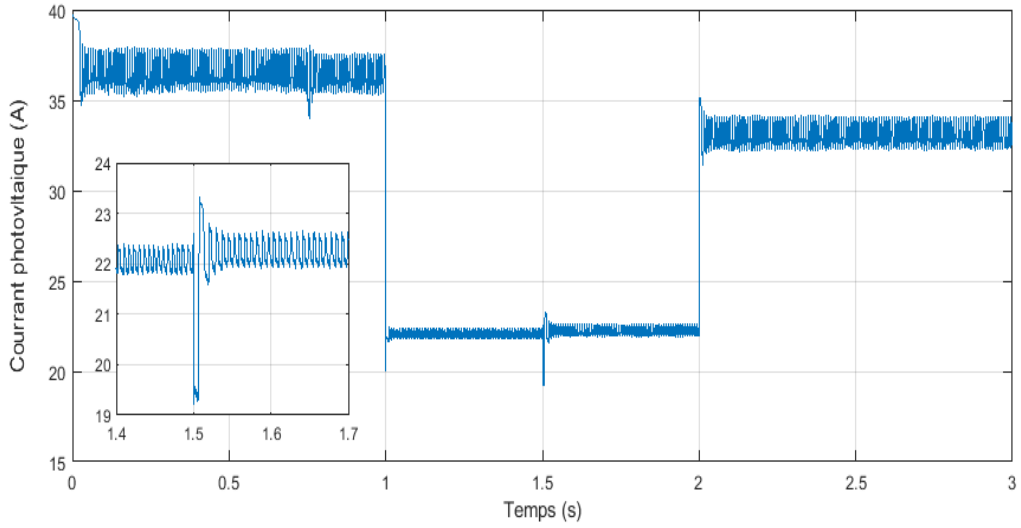

Figure III. 9. Courant photovoltaïque

La tension photovoltaïque varie légèrement en fonction de l'ensoleillement. En revanche, la diminution de la température augmente la tension. À t=0,75, la température passe de 35°C à 25°C, ce qui fait passer la tension de 116 à 120V. À t=1,5s, lorsque la température augmente à 40°C, la tension baisse.

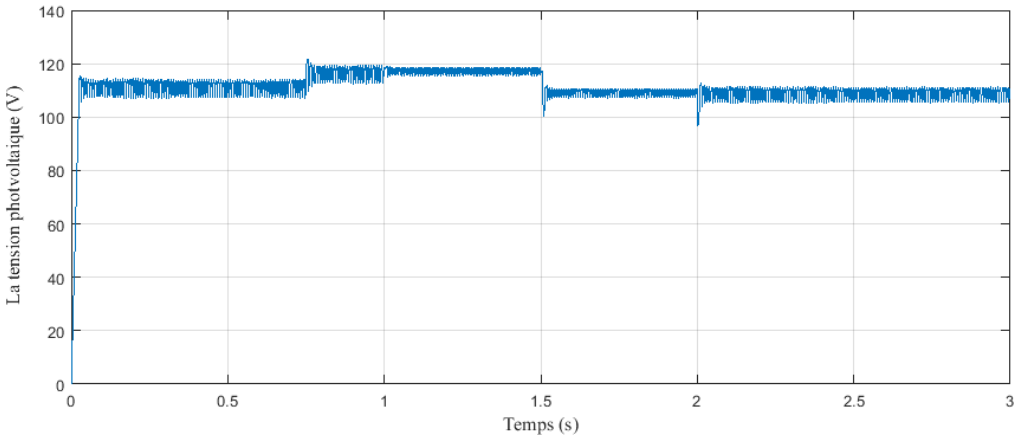

Figure III. 10. La tension photovoltaïque

La puissance photovoltaïque est déterminée par le courant et la tension du panneau solaire ($P_{pv}= V_{pv}*I_{pv}$). Par conséquent, la puissance varie en fonction des changements de courant et de tension. Quand le courant et la tension sont influencés par les variations d'irradiation et de température, la puissance se modifie aussi. L'augmentation de l'ensoleillement accroît la puissance de sortie. En revanche, la puissance est affectée négativement par la température. On observe des oscillations dans les graphiques de courant, de tension et de puissance liées à la méthode de PO, ce qui peut entraîner certaines pertes d'énergie.

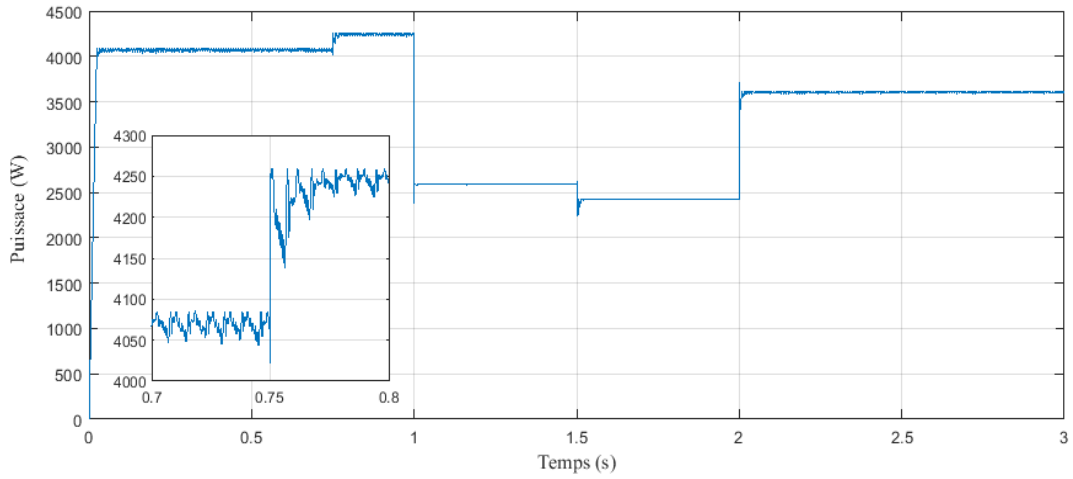

Figure III. 11. La puissance photovoltaïque

Comme l'illustre la figure III.12, la tension photovoltaïque de la figure III.10 a été accrue à 600V à la sortie du hacheur. Cette tension est constante, suivant la valeur de référence désirée (600V) avec une bonne précision et une bonne stabilité, indépendamment des fluctuations d'irradiation et de température. L'impact de la variation de température est négligeable, avec

de légers pics à t=0.75s et t=1.5s. La diminution de l'éclairement fait baisser la tension à 580V, pendant 3.5 secondes, puis revient à sa valeur de 600V. À t =1.5s, lorsque l'éclairement passe de 600W/m^2 à 900W/m^2, la tension augmente jusqu'à 620V, puis retourne à sa valeur de référence en 2.5 secondes.

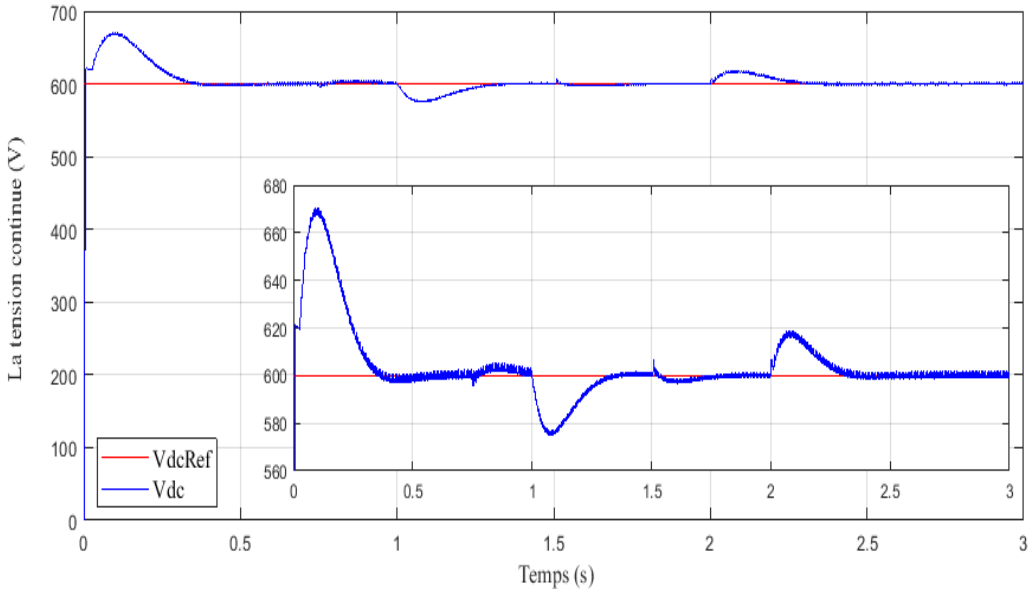

Figure III. 12. La tension continue

La figure (III. 13) montre les courants injectés au réseau électriques. Les courants du réseau sont augmentés et diminués en fonction l'éclairement et de la température, en maintenant la forme sinusoïdale. Leurs taux de distorsion harmonique (THD) sont de l'ordre de 2.56%.

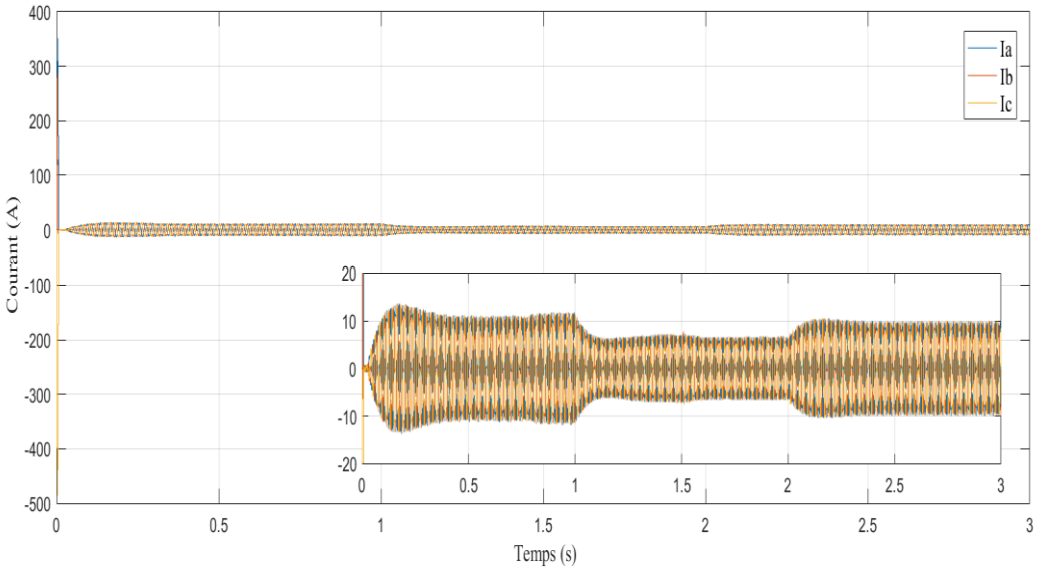

Figure III. 13. Courant de réseau

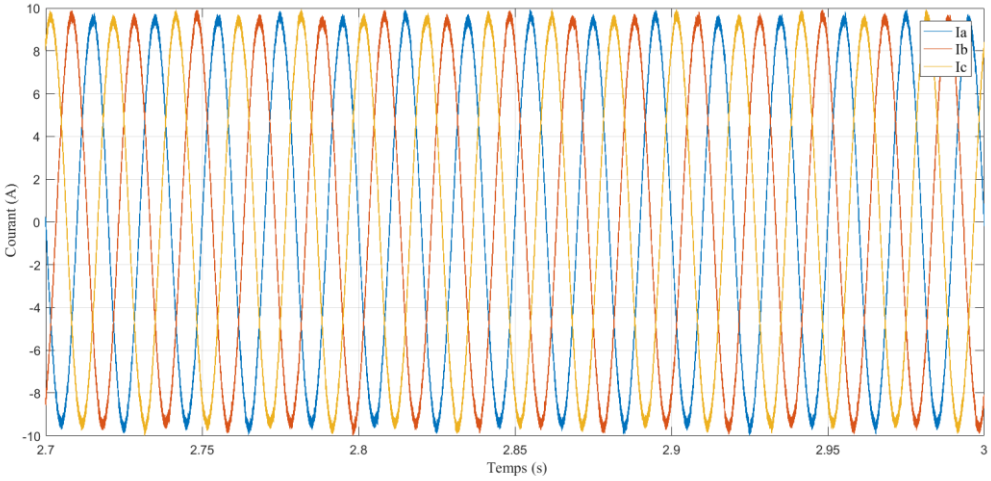

Figure III. 14. Zoom de courant de réseau

La figure III.15 représente les tensions alternatives. Elles sont entièrement sensorielles, présentant une fluctuation d'amplitude minime, autour de 0.2V. Leur THD est de l'ordre de 1.5%, comme montré en figure III.19.

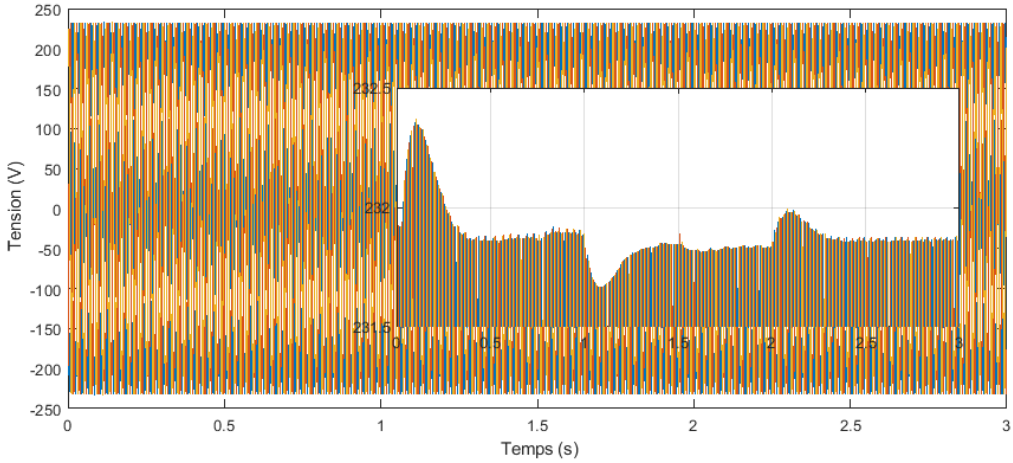

Figure III. 15. Les tension de réseau V_{abc}

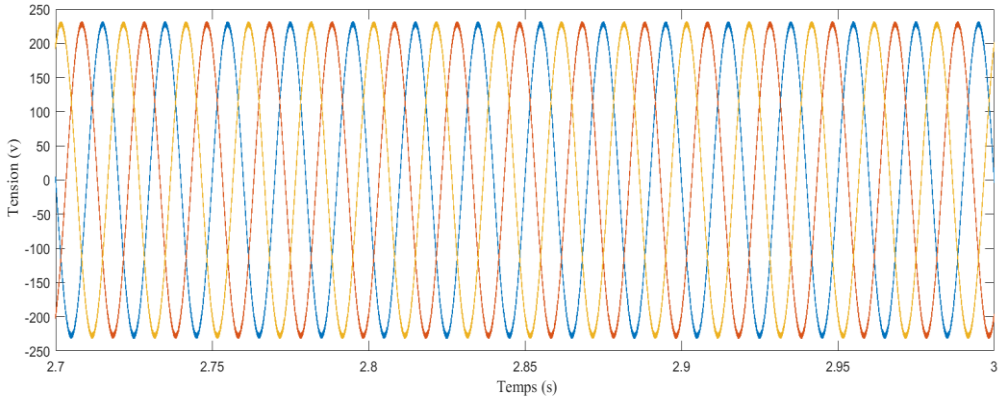

Figure III. 16. Zoom des tensions de réseau

En observant la tension et le courant du réseau qu'ils sont représentées sur la figure III.17, On constate que le courant du réseau est en phase avec la tension du réseau, ce qui prouve le fonctionnement à facteur de puissance unitaire (puissance réactive nulle).

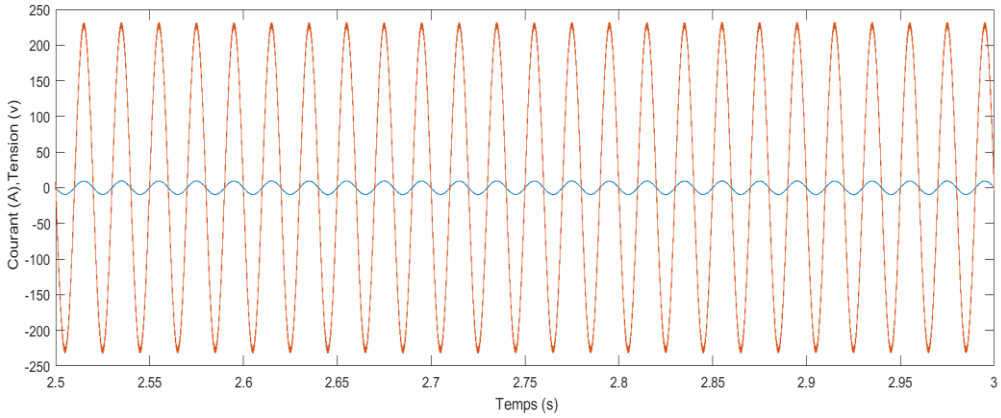

Figure III. 17. La tension et le courant de réseau (V_a et I_a)

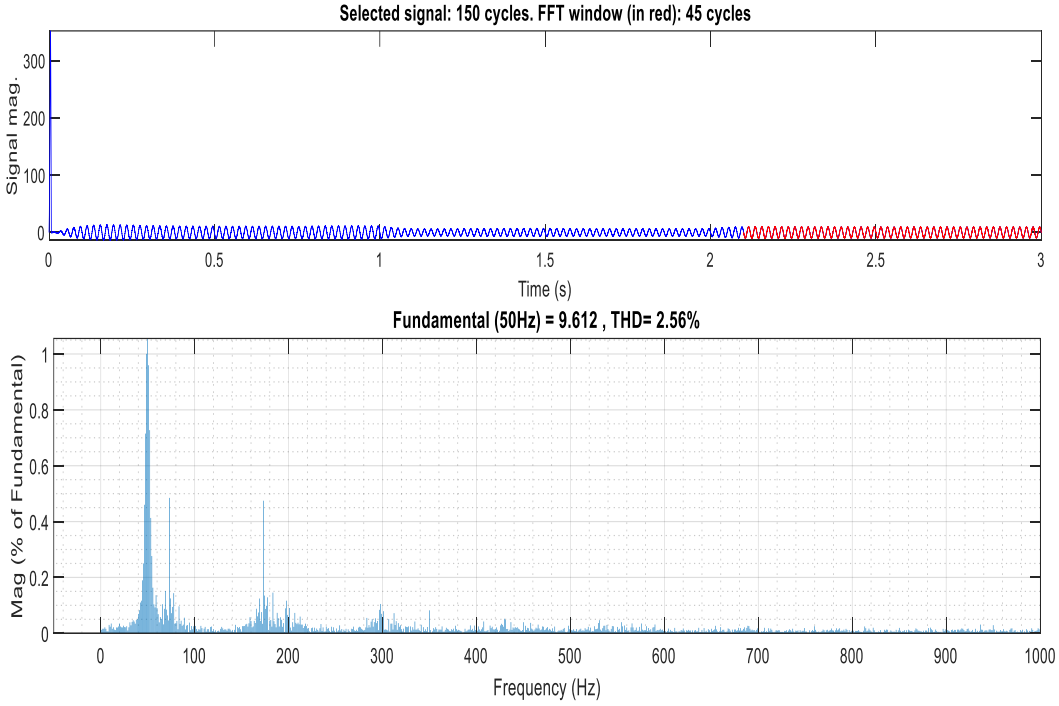

Figure III. 18. THD de courant

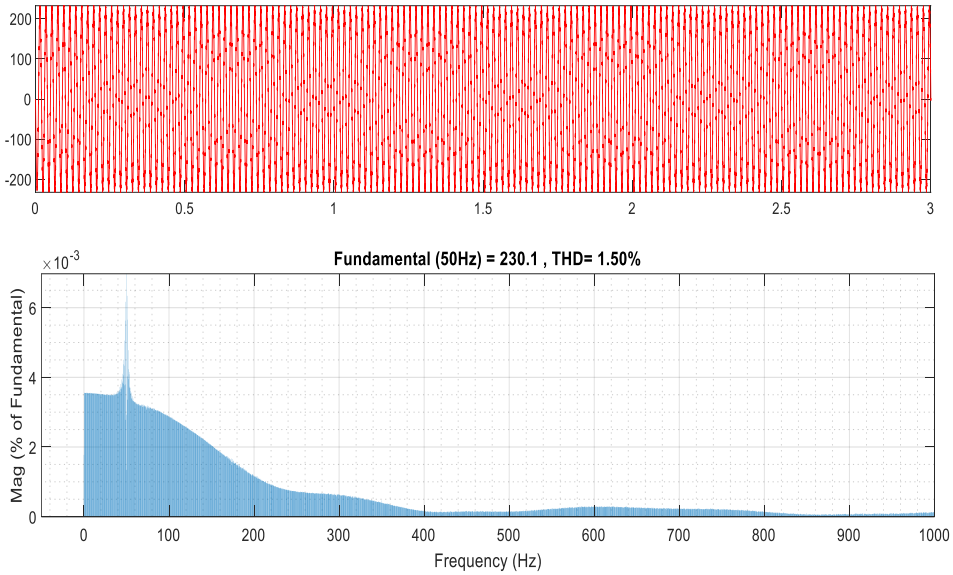

Figure III. 19. THD de tension

III. 6 Conclusion

Ce chapitre décrit la connexion d'un système photovoltaïque au réseau électrique via un convertisseur DC/DC afin d'optimiser l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, ainsi qu'à travers un onduleur pour contrôler les puissances injectées dans le réseau électrique. Les résultats de la simulation démontrent l'efficacité de P&O dans l'optimisation de la production d'énergie, bien qu'il y ait quelques oscillations non souhaitées. La commande mise en œuvre au niveau de l'onduleur permet d'intégrer l'énergie active dans le réseau avec un THD de courant inférieur à 3%.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le remplacement des ressources de l'énergie fossiles par les énergies renouvelable est une solution adéquate et obligatoire pour sauver notre monde de réchauffement climatique qui mit notre vie en danger. Ces ressources permettent de satisfaire les besoins énergiques croissante. La diversité des énergies renouvelables donne plusieurs opportunité de à les installer à n'importe zone selon leurs disponibilité, leurs cout total et le plus important leurs rendement énergétique. L'énergie solaire est une énergie disponible partout avec un cout moins cher que les autres énergies. Le progrès significatif de la fabrication de différents types de panneaux solaire encourage les sociétés à investir de plus en plus à leurs installations. Il existe plusieurs types de panneau solaire comme les panneaux cristallin, les panneaux à couche mince et les panneaux organique en plusieurs taille selon la nécessite. Le rendement d'un panneau solaire est lié directement aux propriétés de matériau utilisé à sa fabrication et aux conditions climatiques, spécialement l'éclairement et la température, ce qui donne une puissance variable. Donc, pour satisfaire la puissance demandée par la charge le générateur photovoltaïque est connecté au réseau électrique, cela permet d'injecter la puissance supplémentaire au réseau et de récupère le déficit de l'énergie dans la nuit ou les jours moins ensouillée.

Ce mémoire détaille l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique à travers un convertisseur DC/DC, contrôlé par perturbation et d'observation (P&O) pour optimiser la puissance produite par les panneaux solaires, un onduleur triphasé pour injecter la puissance photovoltaïque au réseau électrique.

Le premier chapitre, présente les différentes formes d'énergies renouvelables, leurs avantages et inconvenants et les différents technologies de panneaux solaires sur le marché.

Le deuxième chapitre détaille le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, le modèle mathématique à une seul diode, et l'impact de la variation des paramètres internes et externes sur les caractéristiques I-V et P-V. Cette analyse montre l'effet positif de l'augmentation de l'éclairement sur la puissance photovoltaïque et vers versa. L'augmentation de la température et de la résistance série diminuent la puissance produite. L'ombrage a un effet négatif sur les caractéristiques solaire. On remarque aussi qu'à chaque valeur de l'ensoleillement et de la température le panneau solaire peut donner une puissance maximale à

un point spécifique (PMM). Pour cela, la commande de suivre de ce point pour optimiser la puissance est détaillé, utilisant PO.

Le troisième chapitre, détaille la connexion de générateur photovoltaïque de 4KkW au réseau électrique à travers un onduleur triphasé commande par hystérésis. Les résultats de simulation de ce système sous des conditions de l'éclairement et la température variables sont présentés. Les résultats démontrent l'efficacité de la technique PO pour fournir une puissance maximale au générateur solaire, bien qu'avec une certaine oscillation. L'efficacité de l'onduleur à stabiliser la tension continue à la valeur souhaitée (600V). Le filtre élimine les harmoniques de courant (THD inférieur à 3%).

Enfin, pour l'amélioration de ce travail, quelques perspectives sont proposées à savoir :

- l'utilisation d'autres stratégies de commandes (MPPT) comme la logique floue, réseau de neurones..etc.
- L'utilisation d'autres stratégies de commandes de l'onduleur.
- L'hybridation de cette topologie avec d'autres sources d'énergie renouvelable.

Références bibliographiques

[1] https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sont-les-pays-qui-produisent-le-plus-delectricite-dorigine-renouvelable

[2] https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie

[3] N. Laouar et S. Abdelali, « Etude et conception d'un système hybride Pile à combustible groupe électrogène à gaz- Application à une Habitation ». Mémoire de master, Université de Ghardaïa, 2023.

[4] R. Tarfaya, «Étude des paramètres influant sur les performances optimales d'une turbine hydraulique du type Francis». Mémoire de master, Université de Badji mokhtar, Annaba, 2014.

[5] Z. Guerdouh et A. Tebba, «Asservissement d'un panneau solaire». Mémoire de master, Université de Jijel , 2020.

[6] A .Naili et L. Messaoudi, « Valorisation énergétique de la biomasse en Algérie et prospective à l'horizon 2050 ». Mémoire de master, 2018.

[7] R. Khezzar, « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque », revue des Energie Renouvelables, vol. 13, n° 3, pp. 379-388, 2010.

[8] A. Aazizi, «Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride». Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2019.

[9] M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique ». Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2008.

[10] M. Achouri, «Modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque ». Mémoire de master, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2021.

[11] B. Dessus et F. Pharabod, « L'Énergie solaire », P.U.F, Paris, 1996.

[12] Généralités et notions fondamentales sur la cellule solaire, Université de Tlemcen.

[12] H. Amar, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de Séléniure de Cuivre Indium Galium CuIn (1−x)GaxSe2 (CIGS) », mémoire de magister, Biskra, 2014.

[13] Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.

[14] L’énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs

[15] D. Hadjadj et O. Belkhiri, «Etude des Caractéristiques d’un Capteur Solaire Photovoltaïque et Evaluation de ses Performances Sous différentes Conditions Climatiques ». Mémoire de master, Université de Guelma, 2022.

[16] K. Helali, « Modélisation d’une cellule photovoltaïque : Etude comparative», Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.

[17] Vidyanandan, Dr. K.V. An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems, Energy Scan .A house journal of Corporate Planning, NTPC Ltd., issue 27, pp. 2-8, 2017.

[18] I. Haddad, «Modélisation Avancée d’un Panneau Solaire». Mémoire de master, Université de Guelma, 2019.

[19] Z. Bouguerra « The Effect of External and Internal Parameter Variations on Photovoltaic Characteristics », the 1st National Conference on Green Energy (NCGE’ 2023), Boumerdes, 2023.

[20] Z. Bouguerra, Comparative Study between Common and Individual MPPT Controller Using Fuzzy Logic Control for Hybrid System (Photovoltaic/Wind Energy Conversion System), Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, 69(1), pp. 53–62, 2025.

[21] A. Sadek, «Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien», Mémoire de Magistère, Université de Batna, 2009.

[22] A. Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2011.

[23] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[24] N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh, A. Malek, Poursuite du point de puissance maximale d’un système photovoltaïque par les méthodes de l’incrémentation de conductance et la perturbation & observation**,** Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°34, pp. 85 – 498, 2013.

[25] Z. Bouguerra and A. Benfdila, Comparative Study of Individual and Hybrid Renewable Energy Systems (Photovoltaic, Wind Energy and Hybridization). Controlled by Fuzzy Logic Control, Journal of Engineering Science and Technology Review, vol.14, no. 5, pp. 180 – 186, 2021.

[26] A. Rennane et D. Saheb Koussa, « Evaluation des performances de la boucle à verrouillage de phase (PLL) pour l'interconnexion d'une source d'énergie renouvelable au réseau électrique », R vu des Energies Renouvelables, t. 17, no 2, pp. 227-243, 2014.

[27] M. Abdelkrim, « Commande par les techniques intelligentes d'un système photovoltaïque connecté au réseau ».Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2016.

[28] Z. Ayachi et K. Djotni, « Etude et simulation d'un onduleur de tension triphasé ». Mémoire de licence, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2021.

Annexe

Paramètres du panneau photovoltaïque ‘ISoltech-1STH-215-P’

Paramètres	**Valeur**	**Description**
P_{max}	213.15	Puissance maximale
V_{OC}	36.3	Tension en circuit ouvert
V_{mp}	29	Tension au point de puissance maximale
I_{SC}	7.84	Courant de court -circuit
I_{mp}	7.35	Courant au point puissance maximale
N_s	60	Nombre de cellule par module
I_L	7.8654	Courant générer par la lumière
I_o	2.9273e-10	Courant de saturation de la diode
n	0.98119	Facteur d’idéalité de la diode
R_P	313.553	Résistance parallèle
R_s	0.39381	Résistance série
Nps	4	Nombre de panneaux solaires en série
Npp	5	Nombre de panneaux solaires en parallèle
K_T	-0.36099	Coefficient de température de V_{CO}
K_i	0.102	Coefficient de température de courant

Résumé

Ce mémoire, intitulé « Injection d'énergie photovoltaïque sur le réseau électrique », détaille le raccordement d'un générateur photovoltaïque au réseau électrique via un convertisseur DC/DC pour suivre le point de puissance maximale (MPPT), en utilisant la technique de perturbation et d'observation (P&O), un onduleur triphasé contrôlé par hystérésis pour injecter de la puissance active dans le réseau avec un facteur de puissance unitaire, et un filtre RL pour minimiser les harmoniques de courant. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité de la méthode P&O pour optimiser l'énergie photovoltaïque produite, indépendamment des variations des conditions climatiques (irradiation et température), et l'efficacité de la commande de l'onduleur pour stabiliser la tension continue à la valeur souhaitée (600V), injecter la puissance au réseau avec un facteur de puissance unitaire et un THD inférieur à 5 %.

Mots clés : systèmes photovoltaïques, MPPT, perturbation et observation, RL Filtre, THD.

Abstact

This thesis entitled "Injection of photovoltaic energy into the electrical grid", details the connection of a photovoltaic generator to the electrical grid via a DC/DC converter to track the point of maximum power (MPPT), using the perturbation and observation (P&O) technique, a hysteresis-controlled inverter to inject active power into the grid with unity power factor, and an RL filter to minimize current harmonics. Simulation results show the effectiveness of the P&O method in optimizing the photovoltaic energy produced regardless of variations in climatic conditions (irradiation and temperature), and the effectiveness of the inverter control in stabilizing the DC voltage at the desired value (600V), injecting power into the grid with unity power factor and THD below 5%.

Keywords: photovoltaic systems, MPPT, perturbation and observation (P&O), RL filter, THD.

الملخص

تستعرض هذه الرسالة المعنونة «حقن الطاقة الكهروضوئية في شبكة الكهرباء» تفاصيل ربط مولد كهروضوئي بشبكة الكهرباء, عبر محول تيار مستمر/ تيار متردد لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MMPT) باستخدام طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) وعاكس ثلاثي الأطوار يتم التحكم فيه بواسطة التباطؤ لضخ الطاقة النشطة في الشبكة مع معامل قدرة احادي و مرشح LR لتقليل التشوهات في التيار، تُظهر نتائج المحاكاة فعالية التحكم المطبق على المحول تيار مستمر/ تيار متردد في تتبع نقطة الطاقة القصوى مهما كانت تغيرات المناخ ، فعالية التحكم علي المحول تيار متردد / تيار متردد علي ضخ الطاقة في شبكة الكهرباء بعامل طاقة احادي مع عامل تشوهات THD اقل من 5%.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية , MMPT, الاضطراب والمراقبة (P&O), المرشح LR