

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA
Faculté des Hydrocarbures, des Énergies Renouvelables,
Des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Énergies Renouvelables



Mémoire

MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Énergies Renouvelables en Electrotechnique

Présenté par : Mohand Aarab DAMACHE

Ishak HAFSA

Thème

**Conception et optimisation d'un système intelligent de
gestion de l'énergie pour une centrale photovoltaïque
autonome de 10MW**

Soutenu Publiquement

Le : 03 /06 /2026

Devant le jury :

Dr. Hania ABOUB	MCB	Président	UKM-Ouargla
Dr. Zhour ABADA	MCA	Encadreur	UKM-Ouargla
Mr. Mohand Akli KEEBI	ING	Co-Encadreur	Sonatrach-ENI
Dr. Chouaib.AMMARI	MCA	Examineur	UKM-Ouargla

Année Universitaire : 2025/2026

Dédicaces

Je dédie ce travail humble à :

*Mon grand-père **Ghazi Amer** et ma grand-mère **Ghazi Fetta***

رحمهما الله وأسكنهما فسيح جناته

Mes chers parents ceux qui ont toujours été à mes côtés, et ceux que je considère comme des modèles de travail et de persévérance. À vous qui avez illuminé mon chemin par vos prières et votre amour.

*À mon cher oncle **Ghazi Farouk** qui m'a soutenu tout au long de mon parcours universitaire et pour les facilités qu'il m'a fournies*

À mes frères et sœurs. Merci pour votre soutien continu et votre présence, qui me donne de la force.

Aux honorables ingénieurs qui nous ont aidés tout au long de notre existence et qui n'ont ménagé aucun effort pour nous fournir leurs précieux conseils :

Mr. Belhadaf Mohamed

Mr. Daghbouj Adil

Mr. Hofani Abdelbaki

Mr. Ben Habouche Amazigh

Aux amis et collègues les plus fidèles : chacun par son nom, ce qui a donné au voyage d'étude un goût plus agréable.

Damache Mohand Aarab & Hafsa Ishak

Remerciements

*Nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude à notre superviseur, **Dr. Zhour ABADA**, pour sa précieuse supervision, sa patience et ses conseils, qui ont été un phare pour nous. Nous adressons également nos sincères remerciements à notre superviseur, **Mr. Mohand Akli KEEBI**, pour sa supervision sur le terrain et son soutien technique tout au long de la période de stage pratique.*

*Nous adressons également nos remerciements particuliers à **Mr. Abdessalem BELARIBI** qui a joué un grand rôle pour faciliter notre arrivée et mener ce stage pratique dans les meilleures conditions.*

Nous ne pouvons pas manquer d'exprimer notre profonde reconnaissance et notre respect aux ingénieurs et aux employés de l'entreprise (SONATRACH-UNI)

Abdelbaki HOUFANI

Mohamed BELHADEF

Adil DEGHBOUT

Ben habouche Amazigh

Que nous avons rencontrés pendant la période de stage. Nous les remercions pour leur patience et leurs conseils bienveillants, ainsi que pour les informations précieuses qu'ils nous ont fournies, qui ont contribué de manière significative à enrichir notre mémoire.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à mener à bien cette recherche.

Merci à tous.

Damache Mohand Aarab & Hafsa Ishak

Table des matières

Dédicaces	I
<i>Remerciements</i>	II
Liste des figures.....	V
Liste de tableaux.....	VI
Liste des abréviations et nomenclatures.....	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1 Introduction	2
I.2 Les systèmes photovoltaïques.....	2
I.3 Le générateur photovoltaïque	3
I.3.1 La structure de générateur photovoltaïque	3
I.3.2 Caractéristiques électriques du générateur PV	4
I.3.3 Les cellules photovoltaïques	5
I.3.4 Types d'assemblage des modules photovoltaïques	9
I.4 Facteurs influençant les performances.....	11
I.4.1 Facteurs environnementaux	11
I.4.2 Facteurs techniques	12
I.5 Les installations Photovoltaïques.....	13
I.5.1 Les installations photovoltaïques raccordées au réseau (on-grid).....	13
I.5.2 Les installations photovoltaïques autonomes (off-grid).....	13
I.6 Conclusion	14
Chapitre II : Les méthodes d'optimisation d'un système photovoltaïque et état de l'art	
II.1 Introduction.....	15
II.2 La gestion et L'optimisation d'un système énergétique	15
II.3 Les méthodes d'optimisation	15
II.3.1 Les Méthodes Classique	15
II.3.2 Les Méthodes intelligent	17
II.3.3 Les méthodes hybrides	19
II.4 La comparaison entre les méthodes d'optimisation.....	20
II.5 L'état de l'art	21
II.6 La méthode d'optimisation appliquée.....	26
II.6.1 Principe de fonctionnement de l'algorithme	26
II.7 Conclusion	27

Chapitre III : Étude descriptive de la centrale photovoltaïque BRN de 10 MW	
III.1	Introduction.....28
III.2	Présentation de centrale photovoltaïque BRN 10MW.....28
III.2.1	Localisation géographique de centrale BRN28
III.2.2	Description générale de centrale29
III.2.3	Caractéristiques climatiques de la région30
III.3	Les composants principaux de centrale31
III.3.1	Les panneaux photovoltaïques.....32
III.3.2	Onduleur33
III.3.3	Boîte de jonction.....34
III.3.4	Transformateur (0.5 KV/20KV).....35
III.3.5	Tableau de Commutation35
III.3.6	Transformateur (20 KV/60 KV).....36
III.4	Bilan énergétique de la centrale.....37
III.5	Le système de contrôle et de commande de la centrale.....38
III.5.1	Fonctionnement automatique du contrôle MPPT38
III.5.2	Système de supervision (SCADA)39
III.6	Conclusion39
Chapitre IV : Résultats de simulation et discussion	
IV.1	Introduction.....40
IV.2	Architecture globale du système sous Simulink40
IV.2.1	Description des composants du système40
IV.3	Résultats de simulation et l'interprétation42
IV.3.1	La variation des conditions climatiques42
IV.3.2	Résultats du système sans contrôleur MPPT.....43
IV.3.3	Résultats du système avec contrôleur MPPT45
IV.4	La comparaison globale des performances de la centrale.....48
IV.5	Conclusion49
	Conclusion générale.....50
	References.....53

Liste des figures

Figure I. 1 système photovoltaïque.	3
Figure I. 2 Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques.	5
Figure I. 3 Structure de la cellule photovoltaïque.	6
Figure I. 4 Panneau constitué de cellules monocristallines.....	7
Figure I. 5 Panneau constitué de cellule poly cristalline.....	7
Figure I. 6 Panneau constitué de cellules au silicium amorphe.....	8
Figure I. 7 Assemblage en série des modules photovoltaïques.....	10
Figure I. 8 Assemblage en parallèle des modules photovoltaïques.....	10
Figure I. 9 Assemblage série-parallèle (hybride) des modules photovoltaïques.....	11
Figure I. 10 Les installations photovoltaïques raccordées au réseau.	13
Figure I. 11 Les installations photovoltaïques autonomes.	14
Figure II. 1:Comment fonctionne l'algorithme génétique	17
Figure II. 2:Schéma détaillé de l'algorithme MPPT incrémental conductance et intégral régulateur. ..	27
Figure III. 1: Centrale photovoltaïque BRN.	28
Figure III. 2 : Localisation géographique de centrale BRN.....	29
Figure III. 3: Schéma des composants du système de la production (BRN).	31
Figure III. 4: Module photovoltaïque..	32
Figure III. 5: Onduleur Huawei 2000.	33
Figure III. 6: Raccordement d'un onduleur.	34
Figure III. 7: Boite de jonction.	34
Figure III. 8: Transformateur (0.5 KV/20 KV).....	35
Figure III. 9 : Tableau de communication	36
Figure III. 10: La variation d'irradiation en fonction du temps.....	37
Figure III. 11: La variation de Température en fonction du temps.....	37
Figure III. 12: La variation de L'énergie produit en fonction du temps.	38
Figures IV. 1: Schéma global de la centrale photovoltaïque de 10 MW sous Simulink.....	40
Figures IV. 2:Caractéristiques électriques du champ PV.....	41
Figures IV. 3:La variation des conditions climatiques.....	42
Figures IV. 4:La variation de la tension.....	43
Figures IV. 5:La variation du courant.	43
Figures IV. 6:La variation de puissance.....	44
Figures IV. 7:La variation de la tension.....	45
Figures IV. 8:La variation de la puissance.....	45
Figures IV. 9:La variation de la tension.....	46
Figures IV. 10:La variation de courant	47
Figures IV. 11:La variation de puissance.....	47

Liste de tableaux

Tableau I. 1 Types des cellules : rendement, avantages, inconvénient.	9
Tableau II. 1 comparaison entre les méthodes d'optimisation.	20
Tableau III. 1:Donnée de la centrale.	29
Tableau III. 2: Caractéristique métrologie	30
Tableau III. 3:Fiche technique du panneau	32
Tableau III. 4: Les caractéristiques de l'onduleur.	33
Tableau IV. 1:La comparaison des caractéristiques de système (sans et avec MPPT).	48

Liste des abréviations et nomenclatures

Symboles	Signification
CO ₂	Dioxyde de carbone
SGE	Systèmes de gestion intelligente de l'énergie
BRN	Bir rebaa nord
PV	Photovoltaïque
CC (DC)	Courant continue
CA (AC)	Courant alternatif
GPV	Générateur photovoltaïque
V _{OC}	Tension –circuit ouvert
I _{SC}	Courant de court-circuit
PPM	Point de puissance maximale
V-PPM	Tension optimale
I-PPM	Courant optimale
P-PPM	Puissance maximale
MPPT	Maximum power point tracker
CdTe	Tellure de cadmium
CIGS	Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium
ITO	Indium tin oxyde
KW _C	Kilowatt crête
P&O	Perturbe et observe
RNA	Réseau de neuronal artificiel
ANF	Approche Neuro-Floue
UTM	Transverse universelle de Mercator
G (Ir)	Irradiation
t	Temps
T	Température
E _P	Energie produit
CTH	Centre de traitement d'huile
AM	La masse d'aire
P	Puissance
V	Tension

I	Courant
PWM	Modulation de largeur d'impulsion
V _{pv}	Tension des panneaux photovoltaïques
P _{pv}	Puissance des panneaux photovoltaïques
D	Duty cycle
V _{sc}	Convertisseur à source de tension
V _{ab}	Tension à deux phases
V _{mesu}	Tension mesuré
V _{ref}	Tension référence
dI	dérivé de courant
dV	dérivé de tension
dP	Dérivé de puissance

Introduction Générale

Introduction générale

Les centrales photovoltaïques est un projet ambitieux qui nécessite une planification minutieuse pour assurer la continuité de l'approvisionnement énergétique. La transition des systèmes classiques vers les systèmes de gestion intelligente de l'énergie (SGE) est devenue une nécessité inévitable, car ces systèmes visent à concilier production et demande tout en améliorant davantage la production que les systèmes classiques.

Ce travail s'articule autour de la conception et de l'amélioration d'un système de gestion intelligente de l'énergie pour une centrale photovoltaïque autonome de 10 MW (centrale BRN). Le problème de la recherche réside dans la manière d'atteindre une efficacité énergétique maximale et de réduire les pertes, grâce à l'utilisation d'algorithmes d'optimisation avancés et de techniques de modélisation précises. Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire a été divisé en quatre chapitres de base.

Le premier chapitre couvre les généralités sur les systèmes photovoltaïques, en passant en revue les composants de base et les principes physiques de la conversion de l'énergie solaire.

Le deuxième chapitre met en évidence les moyens d'optimiser les systèmes photovoltaïques et un examen complet des dernières découvertes des études dans ce domaine.

Dans le troisième chapitre, nous abordons l'aspect pratique en présentant le site de la station BRN et son étude technique détaillée.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la simulation et l'interprétation des résultats obtenus, ce qui permet d'évaluer les performances du système proposé et l'efficacité de la stratégie de gestion intelligente appliquée.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

Les applications des systèmes photovoltaïques ont considérablement évolué depuis leurs débuts dans les programmes spatiaux. Aujourd'hui, ces technologies se développent à grande échelle pour alimenter des sites isolés ainsi que des installations industrielles majeures à travers le monde, en exploitant de manière optimale le fort ensoleillement des régions sahariennes. Ce chapitre a pour objectif de présenter les généralités sur les systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur le générateur photovoltaïque, ses caractéristiques et les principaux facteurs influençant ses performances.

I.2 Les systèmes photovoltaïques

Le mot photovoltaïque provient de la combinaison de deux mots grecs : phos, qui signifie « à partir de la lumière », et volt, l'unité de tension électrique. En résumé, photovoltaïque signifie « tension produite à partir de la lumière ». [1]

Alors Un système photovoltaïque ou système PV, est un système de production d'électricité conçu pour fournir de l'énergie solaire utilisable grâce à l'énergie photovoltaïque. Il se compose de plusieurs éléments, notamment des panneaux solaires pour absorber et convertir la lumière du soleil en électricité, un onduleur solaire pour convertir le courant continu en courant alternatif, ainsi que des éléments de montage, des câbles et d'autres accessoires électriques nécessaires à son fonctionnement. Il peut également utiliser un système de suivi solaire pour améliorer ses performances globales et inclure une batterie intégrée.

Le fonctionnement d'un système photovoltaïque repose sur le principe de la conversion du Rayonnement solaire en énergie électrique, ou Lorsqu'un rayon lumineux frappe une cellule photovoltaïque (PV) (cellule solaire), La lumière peut être réfléchiée, absorbée ou traverser la cellule. La cellule PV est composée d'un matériau semi-conducteur ; le préfixe « semi- » indique qui laisse mieux passer l'électricité que les isolants, mais moins que les métaux. Il existe différents types de cellules photovoltaïques selon le matériau et la conception. Lorsqu'un semi-conducteur est exposé à la lumière, il absorbe l'énergie lumineuse et la transfère à des particules chargées négativement présentes dans le matériau, appelées électrons. Cette énergie provoque le mouvement des électrons, créant ainsi un courant électrique au sein de la cellule. Ce courant est capté par des fils métalliques à la surface de la cellule (les lignes en forme de grille d'une cellule solaire), Le courant est de type courant continu (CC). Et peut ensuite être utilisé pour alimenter votre maison et le réseau électrique, Cela se fait après avoir converti le courant continu (CC) en courant alternatif (CA) par l'onduleur. (FigureI.1). [2]

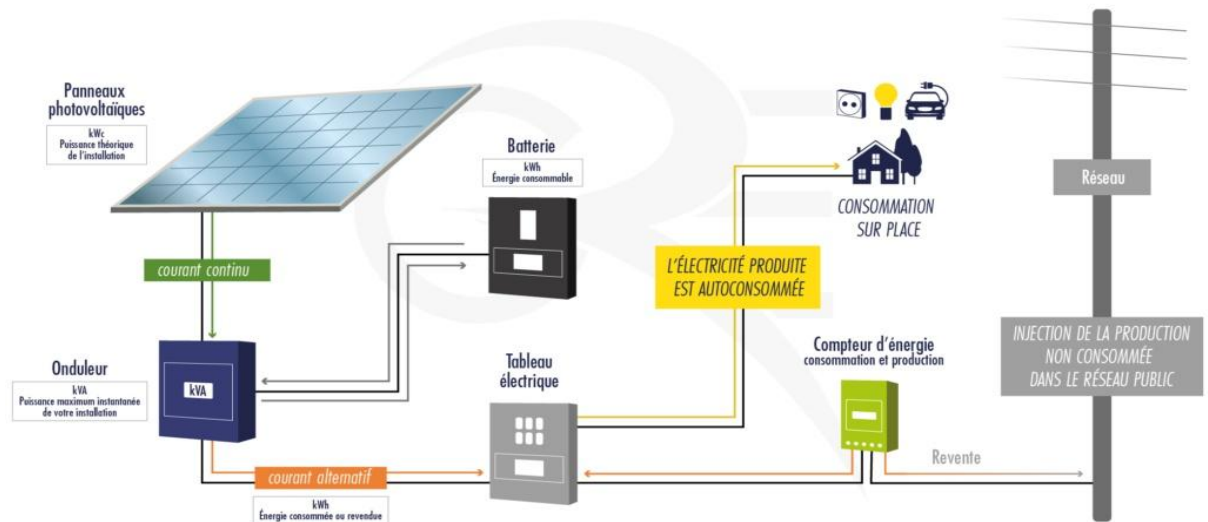


Figure I. 1 système photovoltaïque. [3]

I.3 Le générateur photovoltaïque

I.3.1 La structure de générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est l'élément principal d'un système photovoltaïque, responsable de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de courant continu. Il est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques, qui représentent l'unité de base de conversion, mais dont la puissance est très faible. Pour obtenir une puissance exploitable, ces cellules sont assemblées en modules (panneaux photovoltaïques), puis plusieurs modules sont connectés entre eux en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. L'ensemble de ces modules interconnectés forme ce qu'on appelle un champ photovoltaïque, qui constitue le générateur photovoltaïque global. Cette structure modulaire permet d'adapter la puissance du système selon les besoins. De plus, le générateur est souvent associé à des dispositifs de protection comme les diodes (by-pass et anti-retour) afin d'assurer un fonctionnement fiable et sécurisé. Ainsi, la structure du générateur photovoltaïque repose sur une hiérarchie claire : cellule → module → chaîne → champ photovoltaïque, permettant une production d'énergie efficace et flexible. [4]

I.3.2 Caractéristiques électriques du générateur PV

La figure I.2 présente deux courbes fondamentales illustrant les caractéristiques d'un panneau solaire (générateur photovoltaïque) dans des conditions idéales (éclairage solaire de 1000 W/m² et température de 25 °C)

A) Courbe courant-tension (I-V) du générateur photovoltaïque

La courbe courant-tension (I-V) représentée en rouge sur la figure, représente la relation entre le courant produit par le générateur photovoltaïque et la tension à ses bornes. Lorsque la tension est nulle ($V = 0$), le courant atteint sa valeur maximale, appelée courant de court-circuit (I_{sc}). Lorsque la tension augmente, le courant reste constant initialement, puis diminue progressivement. Lorsque le courant s'annule, la tension atteint sa valeur maximale, appelée tension en circuit ouvert (V_{oc}). Cette courbe permet d'analyser le comportement électrique du générateur photovoltaïque.

B) Courbe puissance-tension d'un générateur photovoltaïque

La courbe puissance-tension (P-V) décrit l'évolution de la puissance électrique fournie par un générateur photovoltaïque en fonction de la tension. La puissance est nulle lorsque la tension est nulle, puis augmente proportionnellement à la tension jusqu'à atteindre une valeur maximale. Ensuite, la puissance chute rapidement à zéro lorsque la tension atteint la tension en circuit ouvert (V_{oc}). Cette courbe est essentielle pour déterminer la plage de fonctionnement optimale d'un générateur photovoltaïque.

C) Point de puissance maximale (MPP)

Le point de puissance maximale, également appelé point de puissance maximale (MPP), est le point de fonctionnement auquel la puissance générée par un générateur photovoltaïque (PV) est maximale. Ce point est défini par une tension optimale (V_{PPM}) et un courant optimal (I_{PPM}), et la puissance maximale est exprimée par l'équation $P_{PPM} = V_{PPM} * I_{PPM}$. Faire fonctionner le générateur PV à ce point permet une utilisation optimale de l'énergie solaire disponible. C'est pourquoi les systèmes PV modernes utilisent des dispositifs de suivi du point de puissance maximale (MPPT) afin de maintenir le générateur en fonctionnement au plus près de ce point, malgré les variations des conditions météorologiques. Voici donc une explication

des caractéristiques électriques de base d'un générateur photovoltaïque ; seules les variations du rayonnement solaire et de la température restent à prendre en compte, selon la région étudiée.

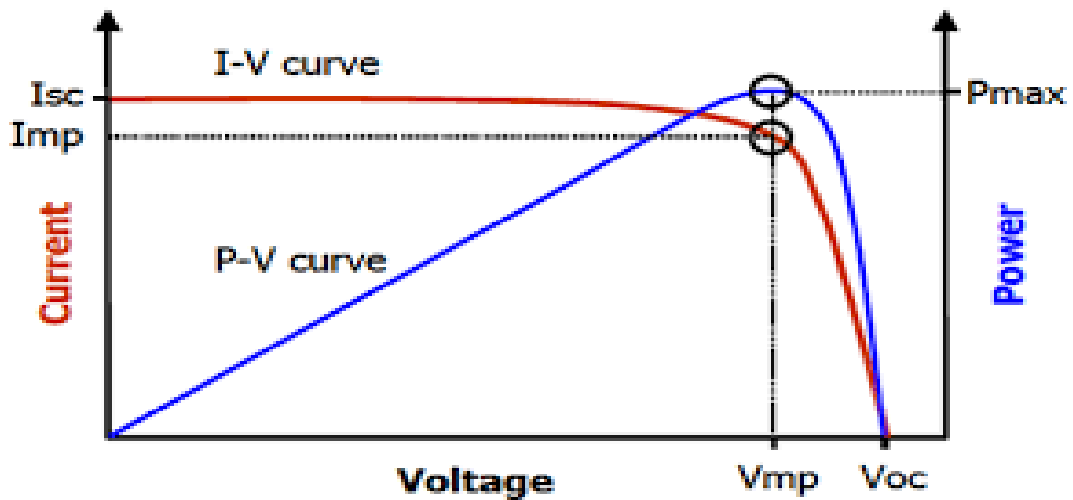


Figure I. 2 Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques. [5]

I.3.3 Les cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique composé de matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium, qui représente environ 95 % des cellules solaires. Le silicium est le deuxième élément le plus abondant sur Terre après l'oxygène et le semi-conducteur le plus utilisé en électronique [6]. Elle permet de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. [7]

- **La structure des cellules photovoltaïques**

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches superposées, comme illustré sur la figure I.3. La couche (A) est en verre et protège la cellule des agressions extérieures telles que la poussière, les graviers et autres éléments extérieurs. Juste en dessous se trouve la couche (B), une couche antireflet qui réduit la réflexion de la lumière et améliore sa pénétration dans la cellule. La couche (C) est une grille conductrice qui sert de collecteur de charges et constitue l'électrode positive. Le cœur de la cellule est composé de deux couches semi-conductrices : la couche (D), de type N, riche en électrons, et la couche (E), de type P, riche en trous. Enfin, la couche (F) est une couche métallique conductrice (conducteur) située à la base de la cellule ; elle fait office d'électrode négative et permet au courant de circuler vers le circuit externe. L'épaisseur totale de la cellule est d'environ un millimètre. L'assemblage de plusieurs cellules permet de créer un panneau photovoltaïque capable de fournir une puissance électrique suffisante.

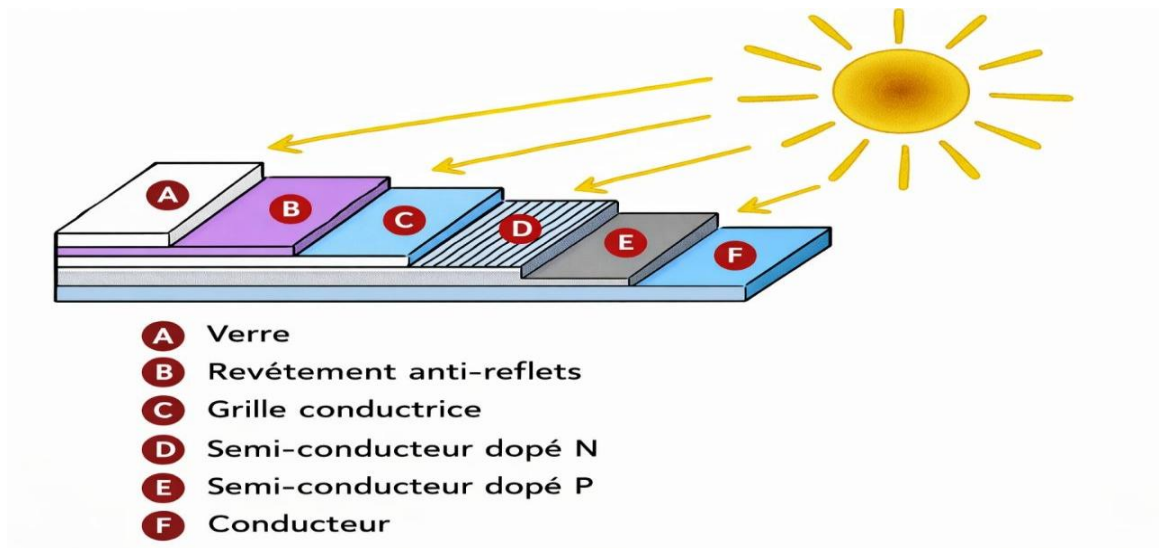


Figure I. 3 Structure de la cellule photovoltaïque. [8]

- **Type des cellules photovoltaïques**

Les cellules photovoltaïques sont l'élément principal des systèmes solaires, transformant directement le rayonnement solaire en énergie électrique grâce à des matériaux semi-conducteurs. Les avancées technologiques ont permis de développer plusieurs types de cellules selon la nature des matériaux et les méthodes de fabrication. On distingue ainsi deux grandes catégories de cellules photovoltaïques basées sur ces progrès technologiques.

- A) Cellules cristallines**

Les cellules de première type (cellules cristallines) sont basées sur une seule jonction p-n et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur (80% des panneaux sur le marché) [9, 14]. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté [15]. Le silicium cristallin est classé en trois types : monocristallin, poly cristallin et amorphe.

- **Les cellules monocristallines**

Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir de silicium monocristallin de haute pureté, découpé en wafers à partir d'un lingot de silicium monocristallin. Elles se distinguent par une couleur uniforme noire ou bleu foncé et une structure cristalline ordonnée (Figure I.4). Grâce à cette pureté, elles offrent un rendement élevé (18 à 22 %) mais leur coût de fabrication est plus important. [16]



Figure I. 4 Panneau constitué de cellules monocristallines. [17]

➤ Les cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir de silicium fondu puis refroidi lentement, formant plusieurs cristaux. Elles ont une apparence bleutée (Figure I.5) avec un motif caractéristique dû à la présence de multiples cristaux. Elles offrent un bon compromis coût-rendement, moins chères que les monocristallines avec une efficacité généralement entre 15 et 18 %. [18]



Figure I. 5 Panneau constitué de cellule poly cristalline [19]

B) Cellules à couches minces

Les cellules solaires en couches minces sont fabriquées par dépôt de fines couches de matériaux semi-conducteurs sur un substrat. Leur épaisseur varie entre 0,5 et 3 microns, soit 30 à 40 fois plus mince que les cellules traditionnelles. Elles se caractérisent par une faible épaisseur, une grande flexibilité et un coût de production réduit, Les principaux types sont le silicium amorphe (plus connue), le CdTe et le CIGS, choisis selon le rendement, l'éclairage et les contraintes de fabrication. [20]

➤ Les Cellules au silicium amorphe

Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince obtenues par dépôt d'une fine couche de silicium sur un support comme le verre. Elles sont moins coûteuses, plus faciles à fabriquer et peuvent être utilisées pour des panneaux souples (Figure I.6). Leur rendement est faible (5 à 7 %), ce qui les limite aux applications de faible puissance comme les montres et calculatrices solaires. [21]



Figure I. 6 Panneau constitué de cellules au silicium amorphe. [22]

➤ La composition d'une cellule à couches minces [23]

- Substrat : Base sur laquelle sont déposées les autres couches, il peut être en verre, plastique ou métal selon l'application et les propriétés recherchées.
- Couche de barrière d'isolation : Déposée sur le substrat pour éviter les interactions indésirables avec les couches semi-conductrices, Elle assure également une bonne adhérence des matériaux déposés.
- Couche arrière de contact : Déposée sur la barrière d'isolation et assure la connexion électrique du côté négatif, elle est généralement constituée d'un matériau conducteur comme l'aluminium ou le molybdène.
- Couches semi-conductrices : Déposées sur la couche arrière de contact, elles constituent la partie active de la cellule, composées de CdTe, CIGS ou silicium amorphe, elles absorbent la lumière et la convertissent en électricité.
- Couche avant de contact : Déposée sur les couches semi-conductrices et assure la connexion électrique du côté positif, elle est transparente et conductrice, souvent à base d'ITO ou d'autres matériaux conducteurs transparents.

➤ **La comparaison entre les types des cellules photovoltaïques**

Tableau I. 1 Types des cellules : rendement, avantages, inconvénient. [24]

Type de cellules	Silicium Mono Cristallin	Silicium Poly Cristallin	Silicium Amorphe (Couche mince)	Cellule CdTe Couche mince
Rendement industriel	12-20%	10-15%	5-10%	8-11%
Part de marché	85%		5%	10%
Garantie de puissance	90% de la puissance initiale pendant 10 ans 80% pendant 20 ans environ (Selon le constructeur)			
Durée de la vie	25-30 ans	25-30 ans	Environ 10 ans	> 25 ans
Avantages	• Technologie connue et maîtrisée • Bon rendement	• Technologie connue et maîtrisée	• Meilleur marché • Rendement moins effectué par un faible éclairage • Plus souples	• Bonne résistance à la température • Plus d'absorption de rayonnement diffus que le cristallin
Inconvénients	• Couteuse • Rendement Faible sous un faible éclairement	• Rendement Faible sous un faible éclairement	• Rendement • Durée de vie • Processus industriel pas encore optimal	• Rendement plus faible que le cristallin • Matériau toxique nécessite donc un processus de recyclage complexe

I.3.4 Types d'assemblage des modules photovoltaïques

- **Assemblage en série des modules photovoltaïques**

Le principe du montage en série consiste à connecter les panneaux photovoltaïques les uns aux autres, en reliant la borne positive d'un panneau à la borne négative du suivant, comme illustré sur la (figure I.7). Dans ce type de montage, la tension totale du générateur est égale à la somme des tensions ($U_T = U_1 + U_2 + U_3$), tandis que le courant reste identique pour chaque panneau, c'est-à-dire que le courant total est égal au courant d'un seul panneau ($I_T = I_1 = I_2 = I_3$). Cette méthode est utilisée lorsqu'une haute tension est nécessaire au fonctionnement d'onduleurs ou de transformateurs de puissance.

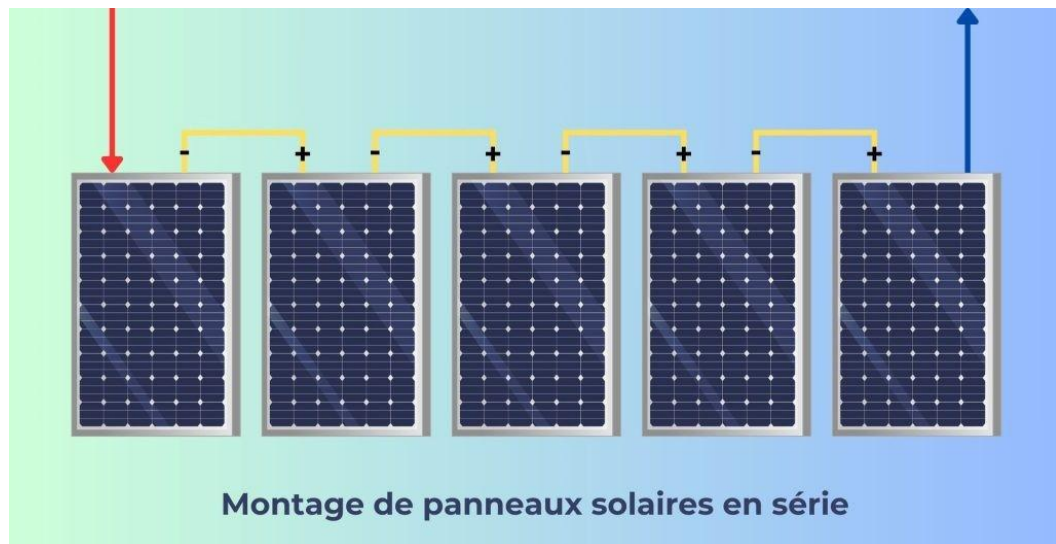


Figure I. 7 Assemblage en série des modules photovoltaïques. [25]

- **Assemblage en parallèle des modules photovoltaïques**

Le principe du branchement en parallèle consiste à relier les bornes positives (pôles) de tous les panneaux solaires entre elles, puis leurs bornes négatives entre elles, comme illustré sur la (figure I.8). Dans ce type de branchement, la tension totale du générateur est égale à la tension d'un seul panneau ($U_T = U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5$), tandis que le courant total est égal à la somme des courants de tous les panneaux ($I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5$). Cette méthode est utilisée lorsqu'il est nécessaire d'augmenter le courant disponible pour alimenter des charges exigeant un courant élevé.

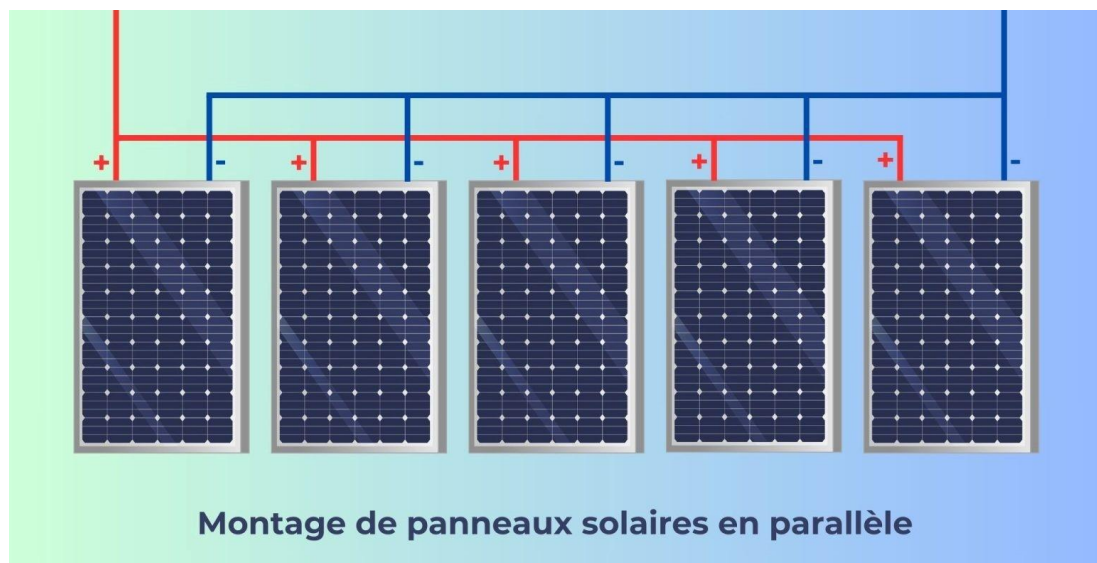


Figure I. 8 Assemblage en parallèle des modules photovoltaïques. [25]

- **Assemblage série-parallèle des modules photovoltaïques**

Ce mode de raccordement (Figure I.9) combine les connexions en série et en parallèle. Les panneaux solaires sont d'abord connectés en série pour obtenir une tension spécifique (calculée). Ensuite, plusieurs panneaux solaires sont connectés en parallèle afin d'augmenter le courant total du générateur photovoltaïque. Ce raccordement est le plus courant dans les installations photovoltaïques de moyenne et haute puissance, car il permet d'ajuster simultanément la tension et le courant pour répondre aux besoins du système.

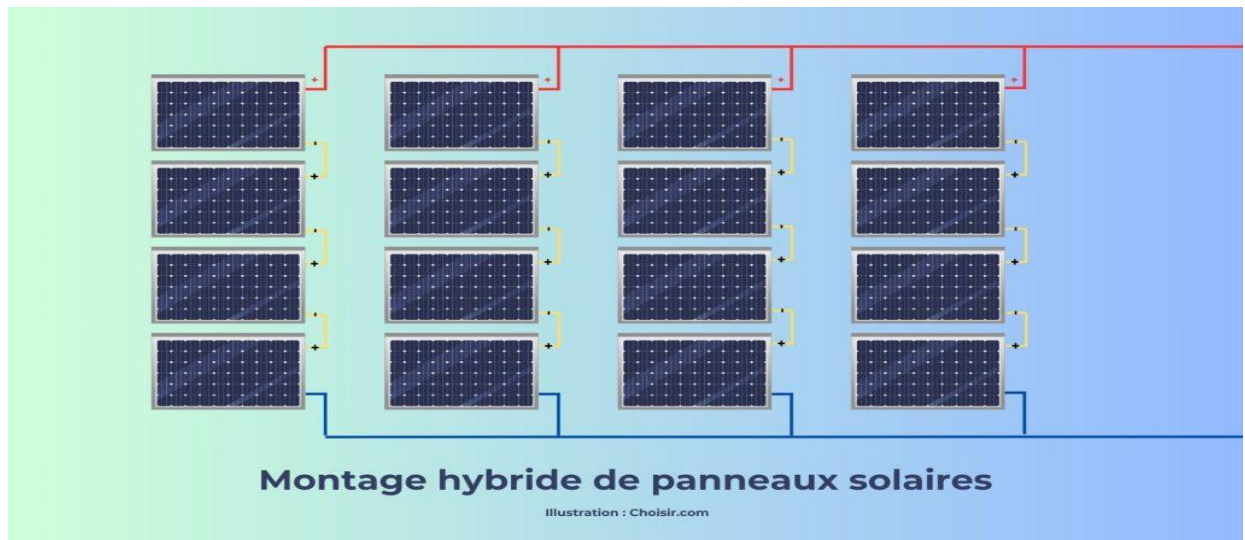


Figure I. 9 Assemblage série-parallèle (hybride) des modules photovoltaïques. [25]

I.4 Facteurs influençant les performances

L'énergie solaire est une source renouvelable et durable, mais son rendement n'est pas constant. Plusieurs facteurs environnementaux et techniques influencent la performance des panneaux solaires, réduisant parfois la production attendue. Comprendre ces variables permet d'optimiser l'installation et d'obtenir un meilleur retour sur investissement. [26]

I.4.1 Facteurs environnementaux

Ces facteurs sont [27] :

- **Puissance et qualité des panneaux solaires**

La puissance nominale des panneaux, exprimée en kilowatts-crête (kWc), détermine la quantité maximale d'énergie qu'ils peuvent produire dans des conditions idéales. Opter pour des panneaux de haute qualité assure une meilleure durabilité et efficacité. Il est recommandé d'évaluer précisément vos besoins énergétiques pour choisir des panneaux adaptés.

- **Orientation et inclinaison des panneaux**

L'orientation optimale des panneaux est plein sud dans l'hémisphère nord, ce qui maximise l'exposition au soleil. Une inclinaison comprise entre 30 et 45 degrés est généralement recommandée pour capter un maximum de rayonnement solaire. Ces paramètres peuvent varier en fonction de la localisation géographique et des spécificités du site d'installation.

- **Ensoleillement et conditions climatiques**

La production photovoltaïque dépend directement de l'ensoleillement. Les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement annuel produiront plus d'énergie. Les conditions météorologiques, telles que la nébulosité, la pluie ou la neige, peuvent réduire temporairement le rendement des panneaux. De plus, des températures ambiantes élevées peuvent diminuer l'efficacité des cellules photovoltaïques.

- **Ombres et obstacles environnants**

La présence d'ombres portées par des arbres, des bâtiments ou d'autres structures peut affecter significativement la production d'énergie. Même une ombre partielle sur un panneau peut réduire son rendement. Il est donc crucial de s'assurer que les panneaux sont installés dans un endroit dégagé, sans obstacles susceptibles de projeter des ombres au cours de la journée.

- **Température ambiante**

Bien que les panneaux solaires aient besoin de lumière solaire pour produire de l'électricité, des températures extrêmement élevées peuvent réduire leur rendement. Les cellules photovoltaïques fonctionnent de manière optimale à des températures modérées. Une bonne ventilation contribue à réduire l'excès de chaleur.

I.4.2 Facteurs techniques

Ces facteurs est [27] :

- **Entretien et maintenance**

Un entretien régulier est essentiel pour maintenir une performance optimale. La poussière, les feuilles, la neige ou d'autres débris peuvent s'accumuler sur la surface des panneaux et réduire leur efficacité. Il est recommandé de nettoyer les panneaux périodiquement et de vérifier l'absence de dommages ou de dysfonctionnements.

- **Qualité de l'installation**

Une installation professionnelle garantit que les panneaux sont correctement fixés, câblés et orientés. Des erreurs lors de l'installation peuvent entraîner des pertes d'énergie, des problèmes de sécurité ou une diminution de la durée de vie de l'équipement. Faire appel à des installateurs certifiés assure une mise en place conforme aux normes et optimise la production énergétique.

I.5 Les installations Photovoltaïques

I.5.1 Les installations photovoltaïques raccordées au réseau (on-grid)

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont directement connectés au réseau électrique public. Dans ce type d'installation, l'électricité produite par le générateur photovoltaïque est injectée dans le réseau via un onduleur qui convertit le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). Lorsque la production excède la consommation, le surplus est injecté dans le réseau ; en cas de déficit, l'électricité est prélevée sur celui-ci. Ces systèmes ne nécessitent généralement pas de batteries, ce qui les rend moins coûteux et plus simples à installer. Ils sont couramment utilisés dans les zones urbaines et industrielles en raison de leur rendement élevé et de leur facilité d'intégration. Cependant, leur fonctionnement dépend entièrement de la disponibilité de l'électricité sur le réseau. (Figure I.10)

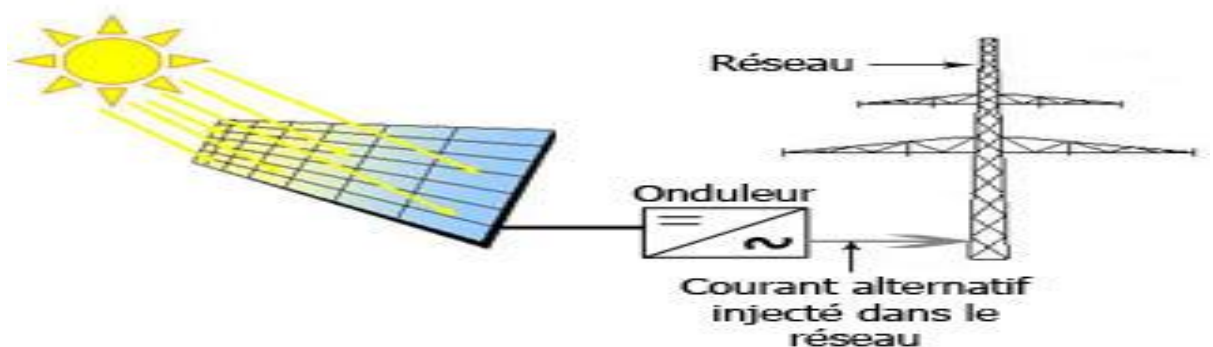


Figure I. 10 Les installations photovoltaïques raccordées au réseau. [28]

I.5.2 Les installations photovoltaïques autonomes (off-grid)

Les systèmes photovoltaïques hors réseau sont des systèmes autonomes, non raccordés au réseau électrique. Ils sont principalement utilisés dans les zones reculées où l'accès au réseau est difficile, voire inexistant. Dans ce cas, l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques

est stockée dans des batteries pour être utilisée lorsque la production d'énergie solaire est faible, par exemple la nuit ou en cas d'intempéries. Ce type de système comprend généralement un générateur photovoltaïque, un régulateur de charge, des batteries de stockage et parfois un groupe électrogène de secours. Ces systèmes offrent une autonomie énergétique totale, mais ils sont coûteux et nécessitent une gestion énergétique intelligente pour garantir une alimentation continue. (Figure I.11)

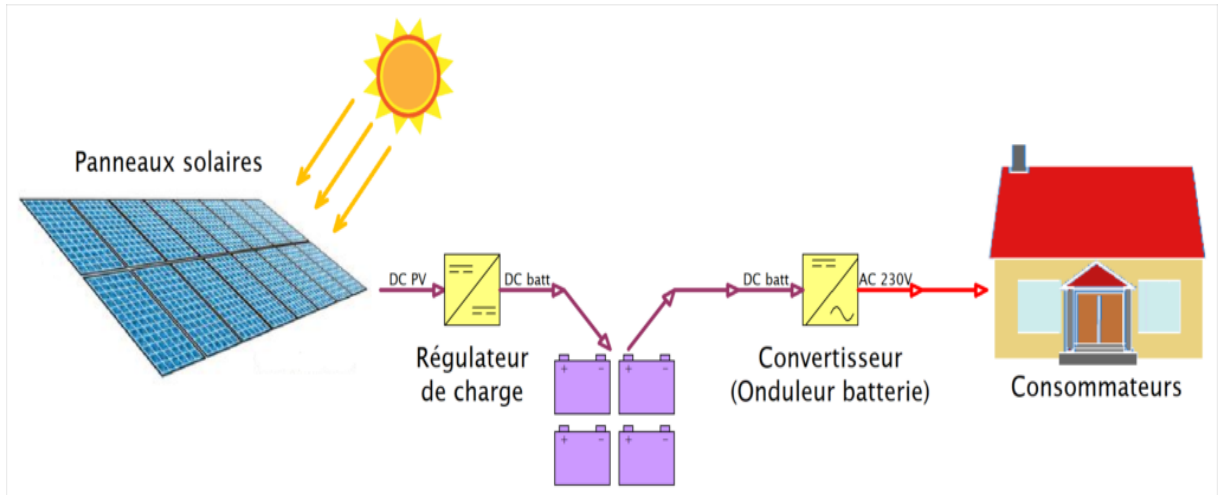


Figure I. 11 Les installations photovoltaïques autonomes. [29]

I.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé directement les concepts fondamentaux des systèmes photovoltaïques et de leurs composants. Nous avons analysé les caractéristiques électriques et les paramètres internes du générateur, tout en mettant en évidence l'impact des contraintes climatiques externes, notamment l'irradiation et la température, sur sa puissance maximale.

Nous avons également présenté les différentes structures des systèmes photovoltaïques connectés au réseau et la sélection de la structure choisie pour étudier leur connectivité au réseau.

Chapitre II : Les méthodes d'optimisation d'un système photovoltaïque et état de l'art

II.1 Introduction

L'optimisation des performances d'un système photovoltaïque constitue un axe majeur pour garantir une exploitation maximale de l'énergie produite, quelles que soient les fluctuations des conditions climatiques. Pour ce faire, l'intégration des techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est devenue indispensable dans ces systèmes. Ce chapitre est dédié à l'état de l'art des différentes méthodes d'optimisation. Nous aborderons d'abord les méthodes conventionnelles, avant de passer aux techniques de contrôle intelligent, notamment la logique floue, ainsi qu'aux méthodes hybrides qui permettent de pallier les limites des algorithmes classiques en termes de rapidité et de précision.

II.2 La gestion et L'optimisation d'un système énergétique

La gestion des systèmes est la supervision et la gestion de l'infrastructure technologique d'une usine pour assurer son efficacité et sa sécurité. Il inclut la gestion de la production, la gestion de l'énergie, la gestion et la supervision du stockage. Pour une meilleure performance, le coût le plus bas et la durée de vie du matériel la plus longue. [30]

L'optimisation des systèmes est un processus qui vise à améliorer l'efficacité et la performance d'un système, en identifiant et en ajustant des variables clés pour atteindre des objectifs spécifiques. Ce domaine utilise souvent des techniques mathématiques et algorithmiques, comme la programmation linéaire et l'intelligence artificielle, pour trouver des solutions optimales. [31]

II.3 Les méthodes d'optimisation

II.3.1 Les Méthodes Classique

A) L'algorithme de Conductance Incrémentale et Régulateur Intégral

L'algorithme de Conductance Incrémentale associé à un régulateur intégral est une méthode de contrôle conventionnelle avancée, largement utilisée pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Cette technique se distingue par sa capacité élevée à déterminer avec précision la direction de la poursuite de la puissance optimale, en se basant sur la comparaison entre la conductance instantanée et la conductance différentielle du générateur photovoltaïque. L'ajout du régulateur intégral permet d'éliminer l'erreur statique et de stabiliser le signal de commande envoyé au convertisseur statique [32].

➤ **Les Avantages**

Les avantages de cette méthode sont [33] :

- Haute précision de poursuite.
- Élimination de l'erreur statique.
- Performance en conditions dynamiques.

➤ **Les Inconvénients**

Les inconvénients de cette méthode sont [33] :

- Complexité computationnelle.
- Difficulté de réglage des paramètres.
- Sensibilité aux capteurs.

B) Méthode du gradient

La méthode du gradient est une approche fondamentale pour résoudre les problèmes d'optimisation. Elle consiste à construire une fonction d'erreur et à mettre à jour les paramètres de manière itérative en suivant la direction de descente du gradient négatif. La descente de gradient minimise une fonction de perte, tandis que la montée de gradient maximise une fonction objective, en répétant le processus jusqu'à convergence. [34]

➤ **Les Avantages**

Les avantages de cette méthode sont [35] :

- Simplicité et efficacité
- Évolutivité
- Flexibilité

➤ **Les Inconvénients**

Les inconvénients de cette méthode sont [35] :

- Sensible au taux d'apprentissage
- Minima locaux et points de selle
- Nécessite un calcul de gradient

C) La Méthode de Newton

Se réfèrent à une classe d'algorithmes d'optimisation qui utilisent des informations de gradient du second ordre pour trouver le minimum d'une fonction [36]

➤ Les Avantages

Les avantages de cette méthode sont [37] :

- Taux de convergence rapide
- Simplicité et facilité de mise en œuvre
- Large applicabilité

➤ Les Inconvénients

Les inconvénients de cette méthode sont [37] :

- Dépendance à la bonne estimation initiale
- Exigence de calculs de dérivée
- Potentiel de non-convergence ou de divergence

II.3.2 Les Méthodes intelligent

A) Algorithme génétique

Un algorithme génétique est une méthode pour résoudre des problèmes d'optimisation à travers un processus qui imite l'évolution biologique, impliquant la modification répétée d'une population de solutions individuelles (FigureII.1). [38]

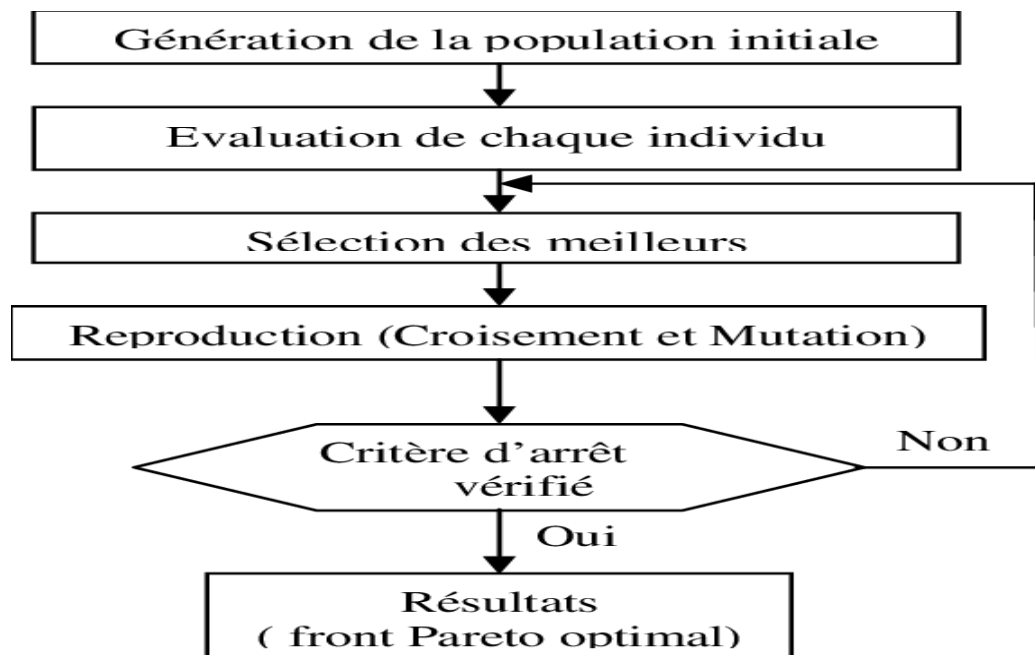


Figure II. 1:Comment fonctionne l'algorithme génétique [39]

➤ **Avantages de l'algorithme génétique**

Les avantages de l'algorithme génétique sont [40] :

- Les algorithmes génétiques sont faciles à comprendre car le concept utilise les principes communs de la biologie évolutive au niveau scolaire.
- L'algorithme est séparé de l'application, ce qui la rend très agile.
- La précision d'un tel algorithme évolue (à travers les générations) ; ainsi, vous pouvez trouver le résultat requis avec suffisamment de temps et de puissance de calcul.

➤ **Les Inconvénients de l'algorithme génétique**

Les inconvénients de l'algorithme génétique sont [40] :

- Il est très coûteux sur le plan informatique d'exécuter un tel algorithme car il doit examiner l'espace de recherche et examiner plusieurs permutations et combinaisons avant d'atteindre le résultat souhaité.
- Étant donné sa nature stochastique et la nécessité d'effectuer plusieurs itérations pour trouver la solution, l'algorithme génétique peut être chronophage car il peut prendre beaucoup de temps à converger.
- Bien que l'algorithme soit efficace pour résoudre des problèmes complexes, il est contre-productif et inefficace pour résoudre des problèmes simples.

B) Réseau Neuronal Artificiel (RNA)

Réseau neuronal artificiel (RNA) est défini comme un modèle de traitement de l'information qui simule le fonctionnement du système nerveux biologique, capable de dériver une signification à partir de données complexes ou imprécises et d'identifier des motifs et des tendances difficiles à discerner pour les humains. [41]

➤ **Avantages de la méthode de RNA**

Les avantages de la méthode de RNA sont [42] :

- Auto-apprentissage
- Filtrage efficace du bruit dans les données.
- S'adapter au changement.

➤ **Les Inconvénients de la méthode de RNA**

Les inconvénients de la méthode de RNA sont [42] :

- Le problème de la boîte noire.
- Nature probabiliste des réponses.
- Durée du développement.

C) Logique floue

La logique floue est définie comme un cadre mathématique pour le raisonnement et la prise de décision en cas d'incertitude et d'ambiguïté, étendant la logique binaire en introduisant des ensembles flous qui tiennent compte de plusieurs degrés de vérité. Il permet une décision flexible et nuancée. [43]

➤ **Avantages de la méthode logique floue**

Les avantages de la méthode logique floue sont [44] :

- Entrées subjectives, résultats subjectifs.
- Tolérance élevée aux pannes.
- Très flexible.

➤ **Les Inconvénients de la méthode logique floue**

Les inconvénients de la méthode logique floue sont [44] :

- Les systèmes à logique floue ne peuvent pas apprendre.
- Le Coût.
- Difficulté dans les applications dynamiques.

II.3.3 Les méthodes hybrides

A) L'algorithme mimétique

Un algorithme mimétique est une combinaison d'un algorithme évolutif et d'un solveur local utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation en informatique. Il se compose de deux étapes : la première étape corrige les variables de conception discrètes et initialise les variables d'optimisation continue, tandis que la deuxième étape résout le problème plus efficacement en

calculant un minimum local du sous-problème continu, répétant ce processus jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. [45]

B) Approche neuro-floue (ANF)

Une approche neuro-floue est un algorithme d'apprentissage qui combine des réseaux de neurones et la logique floue pour créer des modèles basés sur des processus d'apprentissage pilotés par les données, permettant l'approximation de fonctions n-dimensionnelles et l'amélioration de modèles flous à travers des exemples. [46]

C) Hybrid P&O (HP&O)

Hybride PSO (HPSO) est une technique d'optimisation stochastique. Chaque solution candidate est représentée comme une particule caractérisée par ses vecteurs de position et de vitesse dans un espace de recherche multidimensionnel. Ces particules mettent à jour de manière itérative leurs positions et vitesses en fonction des expériences individuelles et collectives pour explorer l'espace de recherche et trouver des solutions optimales ou quasi-optimales. [47]

II.4 La comparaison entre les méthodes d'optimisation

Tableau II. 1 comparaison entre les méthodes d'optimisation.

	Les méthodes classiques	Les Méthodes basées sur l'IA	Les méthodes hybrides
Erreur statique	Elevée	Faible	Minimum (neuro-flou)
Vitesse de convergence	Rapide pour les problèmes convexes	Modérée	Rapide et stable
Cout computationnel	Faible	Moyenne	Très élevée
Robustesse aux perturbations (G, T)	Faible	Bonne	Optimal
Implémentation sur site	Simple	Complexe	Complexe
Pour les applications énergétiques	Etude théoriques	Dimensionnement PV, réseau intelligent	Optimisation des systèmes hybrides complexes.

II.5 L'état de l'art

Le sujet des (énergies renouvelables) s'est considérablement développé, en particulier ces dernières années. En analysant et résumant 20 études liées à ce sujet, nous avons pu déterminer le développement de plusieurs concepts ainsi que d'outils de contrôle et de simulation.

- S. Senthil Kumar, S. Jaisiva, M. Sivakumar. et intitulée " Stratégie de gestion énergétique optimisée pour un système d'énergie hybride autonome", Le problème et l'instabilité due à l'incertitude des sources renouvelables et la variation des charges. La méthode proposé une stratégie centralisée de gestion de l'énergie basée sur l'état de charge de la batterie pour contrôler les flux de l'énergie entre les différentes sources. Les résultats montrent une amélioration de la fiabilité, une réduction de la consommation d'hydrogène et une meilleure durée de vie des batteries. [48]
- Sameh Mahjoub, Larbi Chrifi-Alaoui, Saïd Drid, Nabil Derbel. et intitulée "Contrôle et mise en œuvre d'une stratégie de gestion de l'énergie pour un micro-réseau PV-éolien-batterie basée sur un algorithme de prédiction intelligent de la production d'énergie", Le problème principal concerne la difficulté de prévoir la production et d'équilibrer l'offre et la demande. La méthode et utilisé un algorithme intelligent de prédiction couplé à une stratégie de gestion énergétique. Les résultats montrent une amélioration de la précision de la gestion et une optimisation du fonctionnement du micro-réseau. [49]
- Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, Ahmed Elsanabary, Saad Mekhilef. et intitulée "Contrôle de la gestion de l'énergie d'un système autonome photovoltaïque/éolien/batterie .Le problème traité est la variabilité des sources renouvelables dans les zones isolées. Les auteurs ont proposé une stratégie basée sur le contrôle du flux de l'énergie et des techniques MPPT pour optimiser la production. Les résultats montrent une amélioration de la performance globale et une meilleure gestion de l'énergie dans le système. [50]
- AL-Wesabi Ibrahim, Jiazhu Xu, Abdullrahman A.Al-Shamma'a, Hassan M. Hussein Farh, Imad Abouddar, Youssef Oubail, Fahad Alaql, Walied Alfraidi dans l'article "Stratégie optimisée de gestion de l'énergie pour un micro-réseau CC autonome intégrant un système hybride à base de PV/éolien/batterie/diesel", Le problème traité est la continuité d'alimentation dans un système isolé soumis à la variabilité des ressources renouvelables. La méthode repose sur la coordination de la production et du

stockage. Les résultats obtenus montrent une meilleure stabilité d'exploitation et une gestion plus fiable des flux énergétiques. [51]

- Le travail d'Amal A. Hassan, Doaa M. Atia. intitulé "Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les micro-réseaux pour des solutions durables dans les communautés connectées ou non au réseau. Le problème consiste à réguler l'énergie en fonction des besoins à tout moment afin de réduire les coûts et d'améliorer l'efficacité du système. Cette méthode s'appuie sur des modèles mathématiques avec contraintes de fonctionnement pour optimiser l'exploitation journalière. Les résultats indiquent une meilleure utilisation des batteries, une réduction des coûts de dégradation et une amélioration de la durabilité. [52]
- Nerma Peter, Pankaj Gupta, Neddy Joel. Intitulées "Stratégies intelligentes pour protéger les microgrids", Le principal problème réside dans la complexité croissante des systèmes de protection. Les chercheurs ont développé des stratégies de protection intelligentes capables de traiter et d'analyser des quantités massives de données. Les résultats ont montré que l'intelligence artificielle améliore la vitesse de détection des défauts et la capacité à s'adapter à la protection. [53]
- Nelson Castañeda-Arias, Nelson Leonardo Diaz-Aldana, Adriana Luna Hernandez, Andrés Leonardo Jutinico. Et intitulée "Gestion de l'énergie dans les systèmes de micro-réseaux : une revue complète des approches bio-inspirées pour améliorer la résilience et la durabilité", Le problème et la complexité de coordination entre les sources renouvelables, le stockage et la demande dans un environnement incertain. La stratégie et une analyse approfondie des méthodes d'optimisation, de l'intelligence artificielle et des techniques inspirées de la nature. Les résultats montrent que ces approches améliorent la fiabilité, l'efficacité énergétique et la résilience des micro-réseaux. [54]
- Joelson Lopes da Paixão, Alzenira da Rosa Abaide, Gabriel Henrique Danielsson, Jordan Passinato Sausen, Leonardo Nogueira Fontoura da Silva, Nelson Knak Neto. Intitulé "Stratégie optimisée de gestion de l'énergie dans un micro-réseau de recharge rapide pour véhicules électriques prenant en compte la dégradation du stockage", Le problème traité concerne l'estimation de la production journalière et la gestion des événements de charge dans un environnement énergétique variable. La méthode est développée des algorithmes de modélisation et de gestion de l'énergie pour coordonner

la production et la consommation. Les résultats montrent une meilleure organisation de la demande énergétique et une exploitation plus efficace du système. [55]

- Hirohito Yamada. Intitulé "Petits réseaux DC avec contrôle coopératif décentralisé indépendant qui est réalisé en connectant les batteries directement à la ligne de base", Le problème abordé concerne la mise en œuvre d'un système de contrôle indépendant sans structure centrale complexe. L'auteur a développé un prototype expérimental basé sur la collaboration décentralisée et les propriétés de chute de batterie. Les résultats ont montré que cette architecture simplifie le contrôle et améliore l'autonomie du système. [56]
- Zineb Cabrane, Donghee Choi, Soo Hyung Lee. Dans l'article "Gestion de l'énergie d'un micro-réseau hybride AC-DC utilisant une batterie et un super condensateur, basée sur une stratégie de contrôle coordonnée", Le problème posé est la stabilité du système face aux variations de charge et de production. Les auteurs ont proposé une stratégie de contrôle coordonné entre la batterie et le super condensateur. Les résultats montrent une amélioration de la continuité d'alimentation et de la dynamique énergétique du micro-réseau. [57]
- Rekha B. Nair et Kanakasababathi Bonosami. Sous le titre de modélisation et de simulation d'un petit réseau CC autonome avec contrôleur à chute variable, Le problème abordé est l'amélioration de la régulation de la tension au niveau du bus continu. Les auteurs ont proposé un contrôleur de liaison descendante décentralisé en temps réel pour un petit réseau DC isolé. Les résultats ont montré de meilleures performances que le contrôle traditionnel et cette technologie permet une meilleure régulation de la tension. [58]
- Sherif A. Zaid, Hani Al-Balawi, Hazem M. Al-Hajjain, Abdul Wadud, Abu al-Qasim Bakr. Le sujet de l'installation de petits réseaux DC utilisant le contrôle de décroissance de la fréquence traite de l'installation d'un petit réseau solaire indépendant fonctionnant avec une charge par impulsions, Le problème étudié est la gestion simultanée de la qualité de la tension et de son stockage dans un contexte dynamique difficile. Les auteurs ont utilisé une stratégie de contrôle d'ordre partiel résolue en fréquence pour stabiliser les petits réseaux DC, les batteries et les super condensateurs solaires. Les

résultats montrent une amélioration de la stabilité et du comportement du microréseau – système de batterie hybride super condensateur. [59]

- Ghulam Shabbir, Ali Hasan, Muhammad Yaqoob Javed, Kamal Shahid, Thomas Mussenbrock. Dans l'article "Revue de la conception, de l'optimisation et du contrôle des micro-réseaux CC pour une intégration résiliente et efficace des énergies renouvelables", Le problème principal est d'identifier les architectures les plus adaptées aux systèmes autonomes modernes. Les auteurs ont réalisé une revue critique des différentes méthodes de conception, de gestion et de commande. Les résultats montrent que les micro-réseaux DC présentent une grande flexibilité, une meilleure évolutivité et une commande simplifiée par rapport aux architectures AC classiques. [60]
- Pan Chai. Intitulé "Recherche sur la conception et la gestion énergétiques d'un petit réseau électrique intégré avec stockage de lumière et recharge à l'aide d'un modèle de planification d'optimisation à deux couches", Le problème est de concevoir un système de micro-réseau intégré pour stocker et charger l'énergie photovoltaïque, ainsi qu'une stratégie de gestion de l'énergie basée sur un modèle d'ordonnancement optimisé à deux couches. Les auteurs ont utilisé une stratégie pour contrôler la planification de la tarification de l'électricité en fonction du temps d'utilisation. Les résultats soulignent l'importance du contrôle intelligent pour améliorer la flexibilité et la qualité du fonctionnement des micros réseaux. [61]
- Sherif A. Zaid, Hani Al-Balawi, Hazem M. Al-Hajjain, Abdul Wadud, Abu al-Qasim Bakr. Le sujet de l'installation de petits réseaux DC utilisant le contrôle de décroissance de la fréquence traite de l'installation d'un petit réseau solaire indépendant fonctionnant avec une charge par impulsions, Le problème étudié est la gestion simultanée de la qualité de la tension et de son stockage dans un contexte dynamique difficile. Les auteurs ont utilisé une stratégie de contrôle d'ordre partiel résolue en fréquence pour stabiliser les petits réseaux DC, les batteries et les super condensateurs solaires. Les résultats montrent une amélioration de la stabilité et du comportement du microréseau – système de batterie hybride super condensateur. [62]
- Sujit Kumar, M. Premkumar, Jayant Giri, Sasanka Sikhori Sharma, S. M. Muzamil Hassanein, T. Satish, Rustam Zirov. Intitulé une revue complète des méthodes de contrôle dans les systèmes de micro réseaux, il fournit une synthèse détaillée des

méthodes de contrôle primaire, secondaire et tertiaire dans le micro réseaux, Le principal problème réside dans le choix de l'architecture de contrôle appropriée pour les systèmes hybrides autonomes. Les auteurs ont comparé des méthodes centralisées, décentralisées et distribuées selon leurs avantages et limites. Les résultats montrent que la priorisation du contrôle reste essentielle pour assurer une gestion énergétique efficace et robuste. [63]

- Tariq Limouni, Reda Yacoubi, Khaled Bouzian, Khaled Jesse et Hussein Baali. La stratégie de contrôle en temps réel intelligente et les petits réseaux CC indépendants basés sur la gestion de l'énergie offrent une stratégie de contrôle en temps réel intelligente pour les petits réseaux CC indépendants, Le problème concerne la régulation de la tension en temps réel et l'équilibrage de puissance, ainsi que la prévention du système de stockage d'énergie contre les surcharges et les décharges excessives. Les auteurs ont utilisé un contrôleur intelligent visant à équilibrer la puissance et à réduire les fluctuations. Les résultats montrent que la méthode de contrôle proposée offre une excellente stabilité de tension et un temps de réponse rapide. [64]
- Kalpana Bijayeeni Samal, Mitali Mahapatra, Swagat Pati, Manoj Kumar Debnath. Intitulé "Revue des approches de contrôle des micro-réseaux : approches de contrôle conventionnelles, avancées et intelligentes", Le problème consiste à choisir un système de contrôle robuste pour gérer les variations de charge et de production. Les auteurs ont comparé les approches conventionnelles, avancées et intelligentes selon des critères de performance, de robustesse et de complexité. Les résultats montrent que les approches intelligentes représentent une solution mieux pour les micro-réseaux autonomes [65]
- Mpho Sam Nkambule, Ali Nabil Hasan, Thokozani Shongwe. et intitulée "Analyse des stratégies de contrôle intelligent pour les systèmes de gestion de l'énergie dans les micro-réseaux. Le problème principal concerne l'intermittence des sources renouvelables et la difficulté d'assurer une exploitation stable et économique. Les auteurs ont analysé plusieurs approches fondées sur l'intelligence artificielle, l'optimisation avancée et le contrôle adaptatif. Les résultats montrent que ces techniques améliorent la flexibilité, la fiabilité et les performances énergétiques du système. [66]
- Muhammad Auwal Shehu, Kulash Talapiden, Tin Trung Chau, Auwal Haruna, Mokhtar Aly, Vijayakumar Gali, Ton Duc fait, Ahmad Bala Alhassan. Intitulée "Contrôle et

gestion énergétique des micro-réseaux autonomes dans les zones reculées : un examen des avancées récentes, des défis et des perspectives de recherche future", Le problème est développé des systèmes techniquement robustes et économiquement viables malgré l'incertitude des ressources renouvelables. La méthodologie repose sur une revue couvrant la gestion du cycle de vie des batteries, l'optimisation robuste et les architectures numériques avancées. Les résultats proposent une feuille de route complète pour concevoir des micro-réseaux fiables dans les zones éloignées. [67]

II.6 La méthode d'optimisation appliquée

L'algorithme de Conductance Incrémentale associé à un régulateur intégral a été choisi pour cette étude en raison de ses performances supérieures par rapport aux autres méthodes conventionnelles classiques. Ce choix est justifié par sa capacité à suivre avec précision le point de puissance maximale (MPP) en régime permanent, à éliminer efficacement les oscillations autour de ce point grâce au régulateur intégral, et à répondre rapidement aux variations brusques des conditions climatiques.

II.6.1 Principe de fonctionnement de l'algorithme

Cet algorithme assure la poursuite du point de puissance maximale (MPP) en analysant la variation de la conductance par rapport à la conductance instantanée.

A) Logique de décision (selon le diagramme)

- Mesure et calcul : $V(k)$ et $I(k)$ pour calculer les incréments ΔV et ΔI
- Condition $\Delta V = 0$:
 - Si $\Delta V = 0$ le système est au MPP
 - Si $\Delta V \neq 0$ ajustement du dc basé sur le signe de ΔI pour atteindre le MPP
- Condition $\Delta V \neq 0$ Comparaison de la conductance incrémentale ($\Delta I / \Delta V$) à la conductance instantanée (I / V)
 - Si $(\Delta I / \Delta V) = (I / V)$: le système est au MPP
 - Si $(\Delta I / \Delta V) > (I / V)$: Incrémentement du rapport cyclique dc
 - Si $(\Delta I / \Delta V) < (I / V)$: Décrémentement du rapport cyclique dc

B) Intégration du régulateur

Pour compléter ce cycle, un régulateur intégral est utilisé pour traiter ces décisions. Il transforme les ordres d'incrémentation/décrémentation en une variation continue du rapport cyclique $dc(t)$, garantissant ainsi :

- La stabilité : Élimination des oscillations autour du point optimal.
- La précision : Converge vers le MPP avec une grande finesse, rendant la commande robuste face aux fluctuations d'ensoleillement

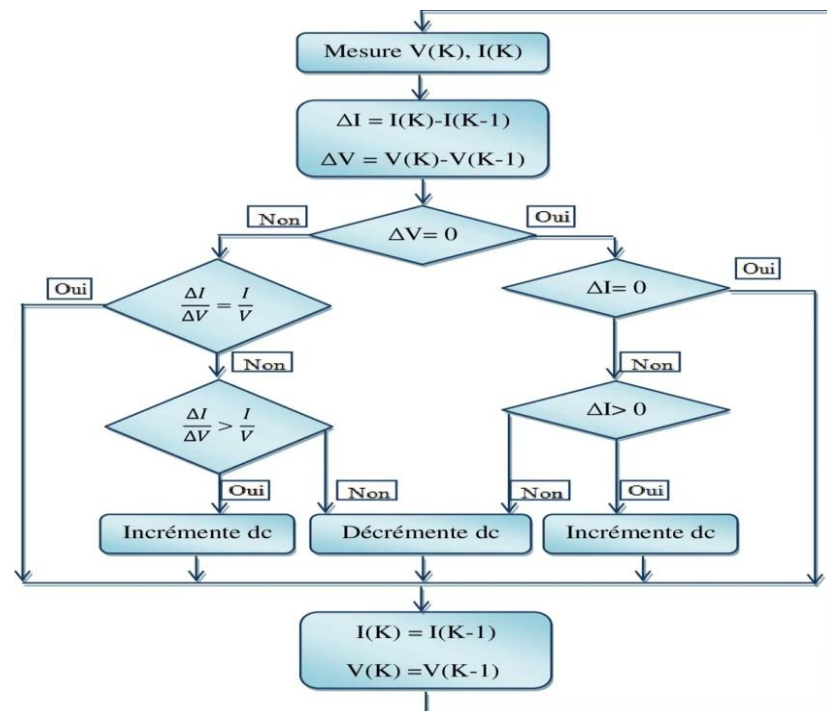


Figure II. 2:Schéma détaillé de l'algorithme MPPT incrémental conductance et intégral régulateur.

[68]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, diverses techniques d'amélioration dans leurs différents domaines ont été discutées et un processus de comparaison a été effectué entre elles, en plus de revoir certaines des études liées à ce sujet pour comprendre l'étendue des développements et les stratégies existantes. Enfin, ces résultats extraits sur la base de ceux-ci, la méthodologie utilisée est choisie et utilisée pour les chapitres suivants.

**Chapitre III : Étude
descriptive de la centrale
photovoltaïque BRN de 10 MW**

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette étude représente une contribution au domaine de la gestion de l'énergie pour les systèmes photovoltaïques, car nous nous sommes concentrés sur la conception et l'amélioration d'un système de gestion intelligent pour une centrale BRN autonome de 10 MW. À travers les quatre chapitres couverts dans la recherche, nous avons pu couvrir les aspects théoriques et techniques.

La simulation réalisée dans le dernier chapitre nous ont permis de vérifier qu'une stratégie de gestion intelligente n'est pas seulement une option technique, mais une nécessité économique et technique pour assurer la stabilité du système. Les résultats ont montré que l'amélioration des algorithmes de contrôle contribue directement à augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, en veillant à ce que la demande énergétique de la charge soit satisfaite même dans les conditions météorologiques les plus volatiles.

En conclusion, malgré les résultats encourageants obtenus, ce travail ouvre de nouveaux horizons de recherche, notamment l'intégration de l'intelligence artificielle et des techniques de prévisions météorologiques pour améliorer la pré-réponse du système. (Comme la poussière et les températures élevées) plus précisément à long terme. Développer le système pour qu'il soit hybride avec d'autres sources d'énergie renouvelable afin d'améliorer sa fiabilité.

Nous espérons que cette note servira de référence utile pour les futures études sur les centrales photovoltaïques dans les zones désertiques et une contribution efficace à l'avancement de la transition énergétique.

References

- [1] <https://www.solarenergy.org/solar-electricity/>.
- [2] <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>.
- [3] <https://www.gre-enr.fr/autoconsommation-photovoltaique/>
- [4] <https://123dok.net/article/g%C3%A9n%C3%A9rateur-photovolta%C3%AFque-generateur-photovoltaique-problematique-production.zwvj9m0q>.
- [5] <https://acadpubl.eu/hub/2018-118-24/1/79.pdf>
- [6] <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>.
- [7] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [8] <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTJus1wh5qfu8i4RQ7KW-sgFqY57ImOmjBcrQ&s>.
- [9] E. Leonard, "Étude et optimisation de cellules photovoltaïques," Ph.D. dissertation, Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), Université de Nantes, Nantes, France, 2013.
- [10] H. Mathieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, 5th ed. Paris, France: Dunod, 2004.
- [11] B. Thuillier, "Étude et modélisation de systèmes photovoltaïques," Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, Lyon, France, 2001.
- [12] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, and B. Sada Sy, *Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*. Canada: Université d'Ottawa, EIER, CREPA, 1998.
- [13] M. Hadjab, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," Magister thesis, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, Algeria, 2011.
- [14] T. Mambrini, "Optimisation des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque," Ph.D. dissertation, Université Paris-Sud, Paris, France, 2014.
- [15] <http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaiques.html>.
- [16] <https://discoverthegreentech.com/enr/energie-solaire/photovoltaique/cellules/monocristallines/>.
- [17] https://www.google.com/search?q=les+cellules+monocristallines+&sca_esv=09b1523b2d059e4c&rlz=1C1GCEA_enDZ1077DZ1077&udm=2&biw=1366&bih=657&aic=0&sxsrf=ANbLn7k93ySR2VcloNJw8bQ4jdF7Ncm9g%3A1769608467835&ei=ExV6aazcMvLtkdUP1_CkqAg&ved=0ahUKEwjssfegsa6SAxXydqQEHVc4CYUQ4dUDCBI&uact=5&oq=les+cellules+monocristallines+&gs_lp=Egtnd3Mtd2l6LWltZylebGVzIGNlbGx1bGVzIG1vbm9jcmldGFsbGluZXMgMgQQ

ABgeSK0IUlwFWlwFcAF4AJABAjgBdaABdaoBAzAuMbgBA8gBAPgBAZgCAaAChgGYAwCIBgGSBwMwLjGgB12yBwMwLjG4B4YBwgcDMY0xyAcKgAgA&scient=gws-wiz-img#sv=CAMSVhoyKhBILWFVUjR6WXQxcWRreUpNMg5hVVI0ell0MXFka3IKTToOVVFpbjJQcfBzUnk4Z00gBCocCgZtb3NhaWMSEGUtYVVSNHpZdDFxZGt5Sk0YADABGAcg-Pb94gMwAkoKCAEQAhgCIAloAg

[18] <https://discoverthegreentech.com/enr/energiesolaire/photovoltaique/cellules/polycristallines/>.

[19] <https://equipement-solaire.fr/produit/panneau-solaire-bluesolar-270w-20v-polycristallin-victron-energy/?srsltid=AfmBOorGh3Ha6nBktVsUKHXFfA-Fy1qmM74wBWWbhb8flgv3pcJqmhMT>

[20] "Lexique : Cellules solaires en couches minces," Tuco Énergie. [Online]. Available: <https://www.tucoenergie.fr/lexique/lexique-cellules-solaires-en-couches-minces>.

[21] <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html>

[22] https://www.google.com/search?q=cellule+photovoltaique+amorphe&sca_esv=9063533dd0cd7df7&udm=2&biw=1536&bih=738&sxsrf=ANbLn6AniLm37nmtBrs0jMJfRnDy9PWUw%3A1781305829981&ei=5ZEsaum1O46xi-gPuYzG4Qg&ved=0ahUKEwipvO2p6YKVAxWO2AIHHTmGMYwQ4dUDCBE&uact=5&oq=cellule+photovoltaique+amorphe&gs_lp=EgtnD3Mtd2l6LWltZyIeY2VsbHVzZSBwaG90b3ZvbHRhaXF1ZSBhbW9ycGhlMgQQABgeSLKsAlDuBVil1iQJwAngAkAEAmAFzoAHpFaoBBDiILja4AQPIAQD4AQGYAiCgArEXqAIKwgIKECMYyQIY6gIYJ8ICBxAjGMkCGCfCAgoQABiABBiKBRhDwgIIEAAYgAQYsQPCAg4QABiABBiKBRixAxiDAcICCxAAGIAEGLEDGIMBwgIEEAAYA8ICBRAAGIAEmAMjkgcFMjluMTCgB7OGAbIHBTIwLjEwuAeKF8IHCjAuNy4xNy43LjHIB-IBgAgB&scient=gws-wiz-img#sv=CAMSVhoyKhBILUpJN2tNeWV1Nm5nTWfNMg5KSTdrTXlldTZuZ01hTTToOQTdOem0xMUNoNldyek0gBCocCgZtb3NhaWMSEGUtSkk3a015ZXU2bmdNYU0YADABGAcgyMO1OUoIEAEYASABKAE

[23] <https://www.discoverthegreentech.com/enr/energie-solaire/photovoltaique/cellules/a-couches-minces/>

[24] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fblog.solorea.com%2Ftechnologie-des-panneaux-solaires-photovoltaique&psig=AOvVaw2mEvjsVfQWnxdm26i7KqJW&ust=1772633545216000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCJCr5sv0g5MDFQAAAAAdAAAAABAE>

[25] <https://www.choisir.com/energie/articles/205330/panneaux-solaires-branchement-en-serie-ou-en-parallele>

[26] <https://yuma.fr/blogs/magazine/facteurs-cles-influençant-le-rendement-des-panneaux-solaires>.

- [27] <https://omeo.com/blog/quels-sont-les-facteurs-qui-influencent-ma-production-photovoltaïque/>.
- [28] <http://costelec09.free.fr/?p=photovoltaïque&r=reseau>.
- [29] <https://www.open-domotique.com/details-depannage+d+un+panneau+photovoltaïque>.
- [30] <https://www.studysmarter.fr/resumes/economie-et-gestion/administration/gestion-des-systemes/>.
- [31] <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-electrique/optimisation-de-systemes/>.
- [32] Safari, A., & Mekhilef, S. (2011). "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using buck-boost converter
- [33] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," vol. 4, no. 1, pp. 89-98, Jan. 2013
- [34] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/gradient-method>.
- [35] <https://www.tencentcloud.com/techpedia/112017>.
- [36] <https://www.sciencedirect.com/topics/psychology/newtons-method>.
- [37] <https://fullpdfword.com/reviews/u515DA/246669/4968440-newton-raphson-method>.
- [38] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/genetic-algorithm>.
- [39] What is the Genetic Algorithm?," MathWorks Help Center. [En ligne]. Disponible: <https://www.mathworks.com/help/gads/what-is-the-genetic-algorithm.html>.
- [40] <https://www.analytixlabs.co.in/blog/genetic-algorithm/>.
- [41] https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonction-dun-algorithme-genetique_fig5_279940927
- [42] <https://merehead.com/fr/blog/avantages-inconvenients-larchitecture-reseau-neuronal/>.
- [43] <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/fuzzy-logic>.
- [44] <https://www.lemagit.fr/definition/Quest-ce-que-la-logique-floue>.
- [45] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/memetic-algorithm>.
- [46] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/neuro-fuzzy-approach>.
- [47] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/hybrid-particle-swarm-optimization>.

- [48] A. Author et al., "Advanced optimization strategies for renewable energy systems," *Scientific African*, vol. 28, p. e00455, 2025.
- [49] S. Researcher, "Performance analysis of photovoltaic systems under partial shading," *ChemEngineering*, vol. 12, no. 11, p. 226, 2024.
- [50] M. Benali et al., "Smart energy management for autonomous PV plants," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 15, no. 1, 2024.
- [51] K. Ahmed, "Optimizing 10MW PV station performance using AI," *Energies*, vol. 18, no. 23, p. 6364, 2025.
- [52] J. Smith, "Modeling and simulation of large-scale solar farms," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 100163, 2025.
- [53] R. Gupta, "Hybrid MPPT techniques for photovoltaic applications," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2286, 2023.
- [54] T. Nguyen, "Intelligent control of off-grid PV systems," *Energies*, vol. 18, no. 5, p. 1060, 2025.
- [55] L. Zhang, "Energy efficiency in autonomous solar power plants," *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1883, 2023.
- [56] H. Park, "Data-driven optimization of PV arrays," *Journal of Building Engineering*, vol. 58, p. 102263, 2022.
- [57] F. Al-Otaibi, "Future of battery-free large scale PV stations," *Batteries*, vol. 11, no. 7, p. 245, 2025.
- [58] M. Rossi, "Optimization algorithms in renewable energy," *Automation*, vol. 6, no. 4, p. 73, 2025.
- [59] D. Müller, "AI-based management of renewable microgrids," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 72, p. 100014, 2026.
- [60] S. Verma, "Grid-forming inverters for solar power integration," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 16, no. 1, 2025.
- [61] P. Lopez, "Machine learning for PV power forecasting," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 9, p. 5080, 2025.
- [62] Y. Wang, "Comprehensive review of MPPT techniques," *Applied Energy*, vol. 350, p. 122840, 2024.
- [63] G. Singh, "Optimization of energy storage-less PV systems," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 16, no. 2, 2025.
- [64] T. Chen, "Digital twins for solar power plant monitoring," *Electronics*, vol. 14, no. 7, p. 1356, 2025.

- [65] R. Miller, "Stability analysis of large-scale PV stations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 165, p. 103096, 2025.
- [66] J. Doe, "Smart sensing in photovoltaic systems," *Sensors*, vol. 9, no. 10, p. 670, 2025.
- [67] A. Khan, "Decentralized control of autonomous PV systems," *Energy Reports*, vol. 11, p. 101540, 2025.
- [68] https://www.researchgate.net/figure/Algorithme-de-la-methode-Increment-de-conductance-Pratiquement-comme-la-methode-P-O_fig26_327839184
- [69] <https://fr.scribd.com/document/810186040/Compte-Rendu-Viste-BRN>
- [70] Sonatrach-Eni, "Présentation de la centrale photovoltaïque BRN 01," Document technique interne, Centrale BRN, Hassi Messaoud, Algérie, 2026.
- [71] Centrale BRN, "Les données météorologiques de la station BRN," Rapport technique de maintenance et suivi, Hassi Messaoud, Algérie, 2026.
- [72] Sonatrach-Eni, "Présentation de l'extension et exploitation BRN 02," Document technique interne, Centrale BRN, Hassi Messaoud, Algérie, 2026.