



# Mémoire de Master

## Présenté au

**Département:** Génie Électrique

**Domaine:** Sciences et Technologies

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux Electriques

Réalisé par :

**BOUTELDJA DJAHIDA**

## Thème

---

**Etude et simulation d'intégration des énergies renouvelables dans un réseau électrique**

---

Soutenu le: **03/07/2023**

Devant le Jury composé de :

Mr :	SAOUDI KAMEL	Prof.	Univ. Bouira	Président
	YAHIOU ABDELGHANI	M.C.A	Univ. Bouira	Rapporteur
	TOUAFEK MOHAMED YACOUB	M.C.B	Univ. Bouira	Examineur

## **Dédicaces**

A la mémoire de mon grand-père maternel. Puisse le bon Dieu lui accorde le paradis éternel, ses prières et son soutien a fait de moi ce que je suis.

À ma chère maman, qui m'a donné de l'amour et qui a fait ses efforts pour m'élever, m'éduquer et surmonter les difficultés de la vie, mon père  
Et à tous les membres de ma famille surtout Thafrara , Ithri et mes chères  
amies Djamila et Hassiba

Sans vous le chemin serait trop long, sombre et difficile, je vous aime très  
fort.

## Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Dieu tout puissant qui a vu mon courage et ma patience durant toutes ces années d'études.

J'exprimerai profonde gratitude envers Mr Yahiou Abdelghani Merci de m'avoir présenté ce sujet pour la première fois et de m'avoir suivi pendant la mise en œuvre de ce mémoire aussi je remercie Mr Mellah Hacene pour ses remarques, informations et conseils.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu revoir ce modeste travail.

A travers cet article, je tiens à remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis la première année du primaire jusqu'à aujourd'hui, et tous les élèves de la promotion 2023 de réseaux électriques.

## Résumé :

Ce travail et la recherche présente un système de génération photovoltaïque connecté au réseau électrique triphasé avec l'ajout d'un filtre pour améliorer la qualité énergétique. Le but de cette recherche est de modélisation et la commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique par un convertisseur DC/DC de type BOOST et un convertisseur DC/AC. On a fait une modélisation du champ PV, de le hacheur DC/DC et de l'onduleur DC/AC, Et nous avons commande le convertisseur DC/DC en utilisant deux technologies de la technologie MPPT, à travers les résultats, nous avons fait la différence entre eux, et qui est le meilleur.

## Abstract:

This work and research present a photovoltaic generation system connected to power grid with the addition of a filter to improve energy quality. The aim of this research is to model and control a photovoltaic system connected to the electricity grid by a DC/DC converter of type BOOST and a DC/AC converter. We modeled the PV field, the DC/DC chopper and the DC/AC inverter, and we controlled the DC/DC converter using two technologies of MPPT technology, through the results, we have distinguished between them, and who is the best.

## الملخص:

يعرض هذا العمل والبحث نظام توليد ضوئي متصل بالشبكة الكهربائية الثلاثية مع إضافة مرشح لتحسين نوعية الطاقة، والغاية من هذا البحث هي النمذجة والتحكم في شبكة الطاقة الشمسية الموصولة بشبكة كهربائية بواسطة المحول DC/DC نوع BOOST ومحول DC/AC.

تم العمل بنمذجة توليد ضوئي PV ومحول DC/DC ومحول DC/AC وقمنا بالتحكم في محول DC/DC باستعمال تقنيتين من تقنيات MPPT ومن خلال النتائج استخلصنا الفرق بينهما.

# *Table des Matières*

Remerciements.....	3
الملخص:.....	4
Table des Matières .....	5
Liste des figures .....	8
Liste des tableaux.....	10
Listes des Acronymes et Symboles.....	11
Introduction Générale .....	12
1.1. Introduction.....	13
1.2. Energie renouvelable .....	13
1.3. Différents types des énergies renouvelables .....	13
1.3.1. Hydraulique .....	13
1.3.2. Solaire .....	16
1.3.3. Eolienne .....	16
1.3.4. Biomasse.....	17
1.3.5. Géothermie .....	18
1.4. Principaux sources d'énergies renouvelables .....	19
1.4.1. Energie éolienne .....	19
1.4.1.1. Evolution d'énergie éolienne dans le monde .....	20
1.4.1.2. Types d'éolienne .....	20
1.4.2. Energie solaire .....	21
1.4.2.1. Technologies des énergies solaires.....	21
1.5. Notions de base du rayonnement solaire .....	22
1.5.1. Définitions et types .....	22
1.6. Gisement solaire.....	23
1.7. Production de l'énergie électrique .....	23
1.7.1. Historique .....	23
1.7.2. Effet photovoltaïque .....	24
1.8. Cellule solaire photovoltaïque .....	25
1.8.1. Principe de fonctionnement .....	26
1.8.2. Types des cellules PV .....	27
1.8.2.1. Cellules monocristallines .....	27
1.8.2.2. Cellules poly cristallines .....	27

1.8.2.3. Cellules amorphes .....	27
1.9. Module photovoltaïque .....	28
1.10. Panneau photovoltaïque .....	29
1.10.1. Association en série .....	29
1.10.2. Association parallèle.....	30
1.10.3. Association mixte (série parallèle) .....	31
1.11. Conception d'une installation .....	32
1.11.1. Types d'installation .....	32
1.11.1.1. Systèmes autonomes.....	32
1.11.1.2. Systèmes reliés au réseau .....	32
1.11.2. Système de conversion .....	33
1.11.2.1. Le convertisseur .....	33
1.12.2.2. L'onduleur .....	33
1.11.3. Domaines d'application des systèmes PV raccordés au réseau.....	33
1.12. Ombrage.....	33
1.13. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	35
1.13.1. Avantages .....	35
1.13.2. Inconvénients .....	35
1.15. Conclusion .....	35
2.1. Introduction.....	37
2.2. Structures Réseau électrique .....	37
2.2.1. Types de réseaux électriques .....	38
2.2.1.1. Réseaux de transport et d'interconnexion .....	38
2.2.1.2. Réseaux de répartition .....	39
2.2.1.3. Réseaux de distribution .....	39
2.3. Supervision des réseaux .....	40
2.4. Nécessité de l'intégration dans le réseau électrique .....	41
2.5. Qualité de la tension et perturbations du réseau électrique.....	41
2.5.1. Qualité de la tension .....	41
2.5.2. Différents perturbations dans le réseau électrique.....	42
2.6. Installation Photovoltaïque .....	42
2.6.1. Qu'est-ce que les installations PV Fournissent?.....	42
2.6.2. Caractéristiques dynamiques des installations PV .....	43
2.7. Raccordement au réseau .....	43
2.7.1. But des études de raccordement .....	43

2.7.2.	Exigences vis-à-vis des producteurs d'énergie PV .....	44
2.7.3.	Vérification des seuils électriques .....	44
2.7.3.1.	Contraintes d'intensité.....	44
2.7.3.2.	Contraintes de tension .....	45
2.7.4.	Importance des hypothèses utilisées dans les études .....	45
2.8.	Impacts liés à l'intégration de la production PV sur les réseaux électriques .....	45
2.8.1.	Impact sur la stabilité du système .....	46
2.8.2.	Impact sur la qualité de service .....	46
2.8.3.	Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système .....	46
2.8.4.	Impact sur la continuité de service .....	46
2.8.5.	Impact sur la tenue de tension .....	46
2.8.6.	Impact sur la tenue de fréquence .....	46
2.8.7.	Harmoniques.....	47
2.8.8.	Îlotage .....	47
2.9.	Notion de Smart Grid.....	47
2.9.1.	Vers un réseau électrique intelligent.....	48
2.10.	Rendement énergétique.....	50
2.11.	Conclusion .....	50
Chapitre 3 :.....		52
Modélisation et simulation d'un système .....		52
PV raccordé au réseau électrique .....		52
3.1.	Introduction.....	52
3.2.	Modélisation et simulation du comportement de la chaîne PV .....	52
3.2.1.	Résultats et discussions.....	56
3.2.1.1.	Simulation L'influence des différents paramètres sur un module PV.....	56
3.3.	Simulation d'un système PV raccordé au réseau électrique.....	60
3.3.1.	Simulation du système PV connecté au réseau par la commande MPPT.....	61
3.3.1.1.	Simulation du système PV connecté au réseau par la commande (P&O).....	61
3.3.1.2.	Simulation du système PV connecté en réseaux par la commande (In Cond) .....	65
3.4.	Conclusion .....	71
Conclusion Générale .....		72
Références bibliographiques .....		73

## Liste des figures

Figure.1. 1.Energie hydrolienne.....	14
Figure.1. 2.Energie marémotrice. ....	14
Figure.1. 3. Barrages hydraulique .....	15
Figure.1. 4. Schéma d'absorption des rayons solaires.....	16
Figure.1. 5. Champ des éoliennes .....	17
Figure.1. 6. Bilan de cycle biomasse .....	18
Figure.1. 7. Centrale géothermique Enel (Italie).....	19
Figure.1. 8. ferme d'éoliens .....	20
Figure.1. 9. éolienne type horizontale .....	21
Figure.1. 10. éolienne type verticale.....	21
Figure.1. 12. Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque .....	25
Figure.1. 13. Cellules photovoltaïques .....	26
Figure.1. 14. Présentation schématique le principe d'une cellule solaire .....	27
Figure.1. 15. Les images de différent type de la cellule photovoltaïque.....	28
Figure.1. 16. Câblage des cellules dans un module .....	28
Figure.1. 17. Panneau photovoltaïque .....	29
Figure.1. 18. Association des modules en série .....	29
Figure.1. 19. Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques .....	30
Figure.1. 20. Association des modules en parallèle.....	30
Figure.1. 21. Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des cellules identiques .....	31
Figure.1. 22.Association mixte des modules .....	31
Figure.1. 23. Caractéristique résultante d'un groupement mixte .....	32
Figure.1. 24. Causes d'ombrage .....	35
 Figure.2. 1. Réseau de transport .....	 38
Figure.2. 2. Exemple d'un réseau de distribution.....	39
Figure.2. 4. Modèle conceptuel du smart Grid vu par NIST [29] .....	48
 Figure.3. 1.Circuit équivalent au modèle à sept paramètres .....	 53
Figure.3. 2.Onglet de paramètres de la cellule solaire .....	55
Figure.3. 3. Modélisation du module BP-MSX 60 par l'outil Simscape .....	56
Figure.3. 4. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V .....	57
Figure.3. 5. Influences de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.....	59
Figure.3. 6. Influence de la résistance parallèle.....	59
Figure.3. 7. Influence de la résistance série .....	59
Figure.3. 8. Influence du facteur d'idéalité.....	60
Figure.3. 9. Simulation système PV raccordé au réseau électrique .....	61
Figure.3. 10. Simulation de la commande de perturbation et d'observation (P&O).....	62
Figure.3. 11. Rapport cyclique de command l'élévateur parallèle. ....	63
Figure.3. 12. La tension de sortie de générateur PV .....	63



Figure.3. 13. tension de sortie de l'élévateur parallèle .....	63
Figure.3. 14. Courant injecté au réseau par la méthode (P&O) .....	64
Figure.3. 15. Tension injectée au réseau par la méthode (P&O) .....	64
Figure.3. 16. Puissance injectée au réseau par la méthode (P&O) .....	64
Figure.3. 17. Simulation de la commande d'incrémentatation de la conductance (In Cond) .....	66
Figure.3. 18. tension de générateur PV par la méthode In Cond .....	67
Figure.3. 19. tension de sortie de l'élévateur parallèle par la méthode In Cond .....	67
Figure.3. 20. puissance de générateur PV par la méthode (In Cond) .....	68
Figure.3. 21. courant injecté au réseau par la méthode (In Cond) .....	68
Figure.3. 22. tension injectée au réseau par la méthode (In Cond) .....	68
Figure.3. 23. puissance injectée au réseau par la méthode (In Cond) .....	69
Figure.3. 24. puissance de générateur PV par les deux méthodes MPPTs .....	70

## Liste des tableaux

Tableau.2. 1. Domaines de tension.....	37
Tableau.3. 1. Caractéristiques électriques du module BP MSX 60 .....	55
Tableau.3. 2. Comparaison entre deux méthodes MPPTs.....	70

## Listes des Acronymes et Symboles

AC : Courant alternatif

BT : Basse tension

HT : Haute tension

DC/AC : Direct Courant/Alternatif Courant

RPD : Réseau Public de Distribution

MPPT : recherche du point de puissance maximale

PPM : Point de puissance

PV : Photovoltaïque

ENR : Energies Nouvelles ou Renouvelables

GED : Génération D'Energie Dispersée(Distribuée)

E : Eclairement ( $\text{W/m}^2$ ).

C° : Degré Celsius

A : facteur d'idéalité de la jonction.

R<sub>p</sub> : Résistances parallèle shunt. ( $\Omega$ )

R<sub>s</sub> : Résistance série ( $\Omega$ ).

I<sub>cc</sub> : Le courant de court-circuit (A).

V<sub>co</sub> : La tension de circuit ouvert (V).

N<sub>s</sub> : Nombre de modules dans le panneau en série.

P&O : Perturbation et observation

In Cond : Incrémentation de la conductance

GPV : Générateur photovoltaïque

## Introduction Générale

Dans le passé, les êtres humains vivaient de l'énergie, qui était produite par le bois et des animaux, plus tard, une autre source d'énergie a été découverte, qui est l'énergie fossile (pétrole - gaz naturel -charbon). Les êtres humains ont utilisé cette énergie dans de nombreux domaines. Elle est même devenue une source majeure de production d'énergie. Et ils ont subi beaucoup de dégâts sur terre, sur mer et dans les airs, et leur niveau a commencé à baisser. Donc, Les scientifiques ont découvert les énergies renouvelables, qui ont une variété de sources d'énergie (solaire, éolienne, nucléaire, etc..) et sont respectueuses de l'environnement.

L'énergie solaire est divisée en plusieurs parties (géothermie, etc.), notre sujet est l'énergie solaire photovoltaïque, qui se base sur les rayons du soleil pour générer de l'électricité utilisable par les consommateurs.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Il peut même être converti en électricité sous forme de courant continu, il peut donc être utilisé directement par effet photovoltaïque.

Les paramètres climatiques comme la température, la poussière et l'éclairement sont des paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent grandement sur la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Nous divisons notre travail en trois chapitres suivants :

- Dans le chapitre 1, nous avons décrit les généralités sur l'énergie Renouvelable et les types de l'énergie renouvelable, les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables,
- Dans le chapitre 2, nous donnerons un aperçu des systèmes photovoltaïques, de la construction des cellules photovoltaïques, de l'effet photovoltaïque, des principes de fonctionnement, les types des réseaux électriques et l'impact liés à l'intégration entre le réseau électrique et le système PV.
- Dans le chapitre 3, nous exposons la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que l'étude de simulation avec les logiciels MATLAB Conçu pour démontrer l'impact des énergies renouvelables sur le réseau.

Enfin, nous concluons notre article par des conclusions générales résumant les intérêts de notre recherche.

# Chapitre 1 :

## Energies Renouvelables

### 1.1. Introduction

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont autant de ressources naturelles utilisables pour générer de l'énergie électrique, grâce aux différentes technologies que l'on peut regrouper par filières économiques en fonction de la ressource considérée. Des sources d'énergie renouvelables en quantités supérieures aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, sans augmenter la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère au cours de leur développement. Ils représentent également l'accès à l'électricité pour plus de 2 milliards de personnes vivant dans des zones reculées. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

L'énergie solaire est une énergie renouvelable générée à partir du rayonnement solaire par des capteurs ou des centrales solaires photovoltaïques.

Dans ce travail nous nous intéressons à l'énergie photovoltaïque qui est une préface à notre étude de l'infusion de cette énergie dans les réseaux.

### 1.2. Energie renouvelable

L'énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle suffisamment vite pour être considérée comme inépuisable et inépuisable à l'échelle naturelle. Les sources d'énergie renouvelables proviennent de phénomènes naturels réguliers, constants ou aléatoires provoqués par les étoiles, principalement le soleil (photovoltaïque), le vent (éolien), les marées (marées) et la chaleur du sous-sol (géothermie) [1].

Aujourd'hui, nous assimilons souvent à tort énergie renouvelable et énergie propre.

### 1.3. Différents types des énergies renouvelables

L'énergie renouvelable provient de diverses sources, dont certains notables sont les suivantes :

#### 1.3.1. Hydraulique

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui utilise le mouvement de l'eau généré par le soleil et la gravité, le cycle de l'eau, l'énergie cinétique générée par le mouvement de l'eau, que ce soit dans les rivières, l'énergie marémotrice, les barrages, les courants océaniques et les turbines marémotrices.

### ❖ Hydrolienne

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau courante en électricité. L'énergie de la masse d'eau qui tombe est convertie en énergie mécanique dans une turbine à eau qui entraîne un alternateur où l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique (figure 1.1).



Figure.1. 1.Energie hydrolienne.

### ❖ Marémotrice

L'énergie marémotrice est issue des mouvements d'eau causés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil.

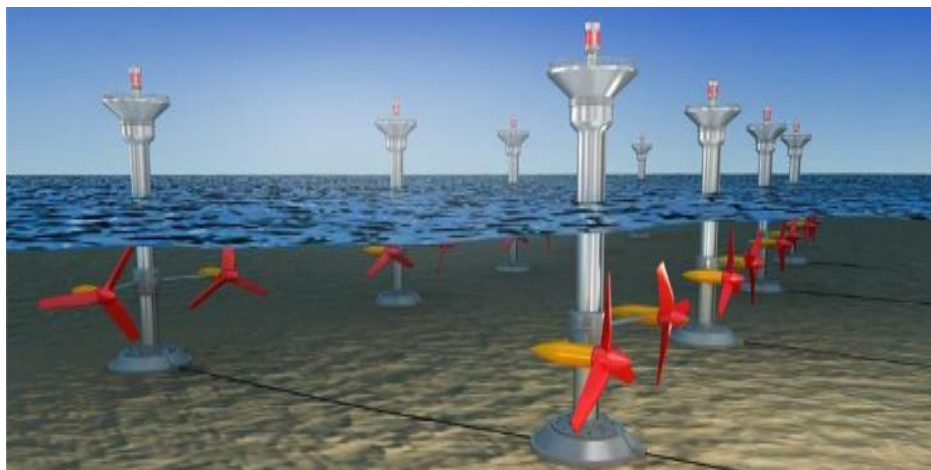


Figure.1. 2.Energie marémotrice.

### ❖ Barrages hydrauliques

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à stocker de l'eau.

Une centrale hydroélectrique est située en contrebas du barrage. La force de la chute de l'eau entraîne une turbine, qui entraîne ensuite un alternateur. Ce dernier générera alors du courant alternatif, qui sera envoyé à un transformateur de la centrale hydroélectrique.



Figure.1. 3. Barrages hydraulique

### Avantages

- Une énergie propre
- l'une des meilleures chaînes de production
- Possibilité de « stocker » de l'électricité pour les turbines
- L'hydraulique est une source d'énergie renouvelable avec une efficacité énergétique exceptionnelle

### Inconvénients

- restrictions géographiques
- Aléas climatiques (sécheresse)
- Les différents usages de l'eau doivent être harmonisés
- Impacts sur l'environnement lors de la construction d'une centrale électrique

### 1.3.2. Solaire

Le photovoltaïque est un autre moyen d'exploiter l'énergie solaire pour générer de l'électricité à partir des rayons du soleil, Ils sont convertis directement en courant électrique en utilisant des cellules à base de matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés de conversion lumière/énergie. Chaque cellule fournit une basse tension et les cellules sont assemblées en modules et panneaux [2].

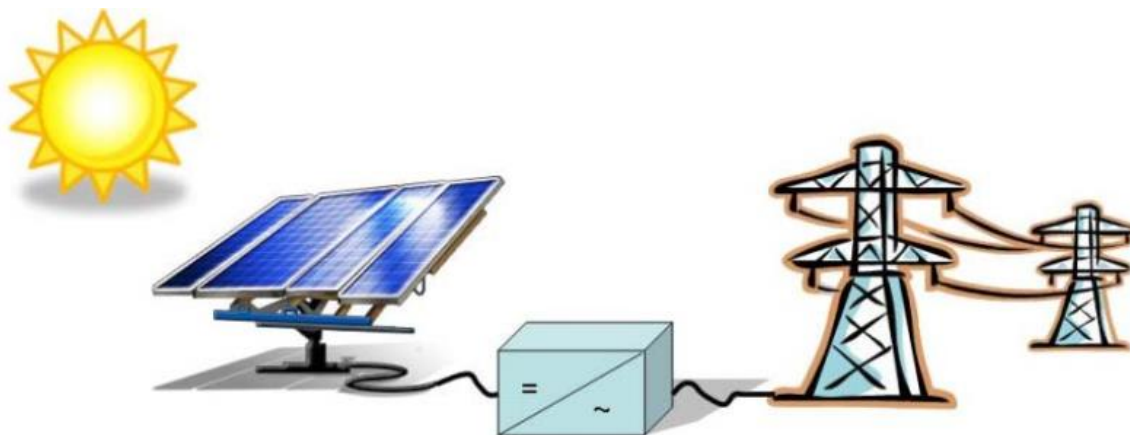


Figure.1. 4. Schéma d'absorption des rayons solaires

#### Avantages

- Acceptation publique
- Convient aux pays chauds et aux zones reculées
- Energie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Frais de maintenance relativement faibles.

#### Inconvénients

- Coût encore élevé
- Puissance assez faible
- Disponibilité

### 1.3.3. Eolienne

L'énergie éolienne est connue depuis des milliers d'années grâce aux moulins à vent et à la navigation. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie avec des hélices spéciales qui stockent l'énergie éolienne et des machines qui la convertissent en électricité. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante [3].





Figure.1. 5. Champ des éoliennes

### Avantages

- L'énergie éolienne est propre et peut être combinée avec des panneaux photovoltaïques et des batteries pour optimiser l'alimentation électrique.
- L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable
- L'énergie éolienne n'a jamais été aussi risquée que l'énergie nucléaire
- Le développement de l'énergie éolienne n'est pas un processus continu, car les éoliennes en fonctionnement peuvent être facilement arrêtées.

### Inconvénients

- Faible disponibilité (20 à 30%)
- Difficultés de raccordement au réseau
- Surface au sol
- Acceptation du public

#### 1.3.4. Biomasse

L'énergie de la biomasse est une bioénergie alimentée par des plantes ou de la matière organique, appelée biomasse. En brûlant de l'énergie, des centrales thermiques dédiées produiront de l'électricité pour alimenter le réseau. La biomasse peut également être utilisée pour le chauffage. Regardons les avantages et les inconvénients de la biomasse.

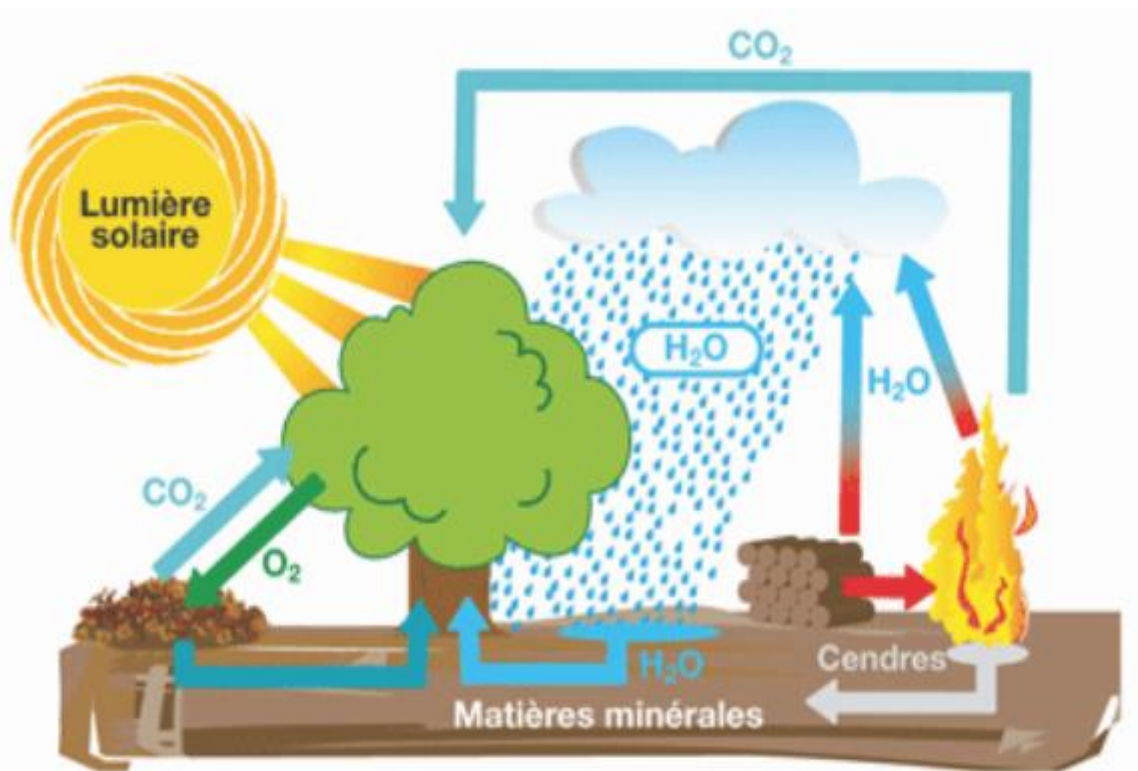


Figure.1. 6. Bilan de cycle biomasse

### Avantages

- Une énergie inépuisable.
- L'énergie de biomasse est une énergie qui préserve les réserves fossiles.
- L'énergie de la biomasse est une énorme quantité d'énergie qui utilise des ressources bon marché
- Grâce au développement de l'énergie de la biomasse, la production de méthane peut être réduite.

### Inconvénients

- L'utilisation du biogaz issu de la fermentation des matériaux de la biomasse pour produire de l'électricité rend également possible l'utilisation d'autres déchets.

#### 1.3.5. Géothermie

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Il est parfois relâché à la surface par des volcans ou des geysers. L'énergie géothermique peut être utilisée pour produire de l'électricité ou pour le chauffage et le refroidissement. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains profondément enfouis et accessibles par forage, ou de réservoirs proches de la surface.



Figure.1. 7. Centrale géothermique Enel (Italie)

### Avantages

- énergie sur place sans transport
- énergétique renouvelable protège l'environnement
- Capacité énorme par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables
- Énergie de base, indépendant des conditions climatiques

### Inconvénients

- Ressource souterraine naturelle qui nécessite des forages pour être extraite.
- le développement des ressources géothermiques accuse un sérieux retard.
- Coût d'investissement élevé par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables

### 1.4. Principaux sources d'énergies renouvelables

On peut citer les deux types :

#### 1.4.1. Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelables extraites directement du vent grâce à des dispositifs appelés éoliennes. Le vent est de l'air qui se déplace en raison des différences de température et de pression dans l'atmosphère. L'air chaud est plus léger que l'air froid. C'est pourquoi, lorsque le soleil chauffe l'océan ou le sol, l'air au-dessus se réchauffe, devient

plus léger et s'élève, poussant l'air plus frais plus haut. L'air froid plus lourd descend et déplace l'air plus chaud, qui à son tour se réchauffe, et ainsi de suite [3].



Figure.1. 8. ferme d'éoliens

### **1.4.1.1. Evolution d'énergie éolienne dans le monde**

Selon les données publiées par la World Wind Energy Association, en 2021, l'énergie éolienne mondiale augmentera de 97,3 GW, après l'augmentation de 92,7 GW en 2020, elle atteindra un niveau record. la puissance cumulée de toutes les éoliennes en service sur notre planète dépasse maintenant les 840 GW. Cette capacité leur permet de fournir plus que 7% de la consommation mondiale de l'électricité. [4]

### **1.4.1.2. Types d'éolienne**

Se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal

#### **1. Eoliennes avec axe horizontal**

Les éoliennes les plus répandues sont à axe horizontal, on peut citer :

- les moulins à vent classique.
- les éoliennes lentes.
- Les éoliennes rapides.

#### **2. Eoliennes à axe verticale**

Les éoliennes avec axe verticale peut classer on deux catégories :

- éoliennes lentes
- éoliennes rapides



Figure.1. 9. éolienne type horizontale



Figure.1. 10. éolienne type verticale

### **1.4.2. Energie solaire**

Le soleil, bien qu'à plus de 150 millions de kilomètres de nous, toujours notre plus grande source d'énergie, même si elle est intermittente jour et nuit... la source d'énergie renouvelable la plus abondante est sans aucun doute le solaire. Le soleil envoie 90 000 térawatts (TW) d'électricité à la terre, et la terre consomme 14 TW d'électricité pour la population mondiale et continuera pendant des milliards d'années. Cependant, du fait de son intermittence et de sa faible densité, il doit être possible de stocker et de concentrer l'énergie solaire sous forme de combustible. [7].

#### **1.4.2.1. Technologies des énergies solaires**

##### **1. Energie solaire thermique**

Le principe de l'énergie thermique est de convertir la chaleur du rayonnement solaire en énergie thermique grâce au fluide circulant dans les panneaux exposés au soleil. Cette source d'énergie est utilisée dans les applications commerciales, industrielles et résidentielles, les systèmes de chauffage et la production d'électricité.

L'énergie solaire thermique utilise diverses technologies : les chauffe-eau solaire, chauffage et panneaux solaires thermiques.

##### **2. Energie Solaire à concentration thermodynamique**

L'énergie solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs pour concentrer l'énergie solaire dans des tubes contenant un fluide caloporteur pouvant être chauffé à 500°C. La chaleur acquise est transférée au circuit d'eau et la vapeur produite entraîne une turbine reliée à un alternateur pour produire de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit [2]

##### **3. Energie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière pour convertir l'énergie des photons atteignant la surface de la terre en électricité. À la suite de panneaux

solaires photovoltaïques ou de centrales électriques, La lumière du soleil (photons) transfère son énergie aux électrons successifs dans un semi-conducteur (constituant une cellule photovoltaïque)[4].

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau

### 1.5. Notions de base du rayonnement solaire

#### 1.5.1. Définitions et types

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil.

Après atmosphère, il y a 3 caractéristiques :

- **Rayonnement direct** : est le rayonnement reçu directement du soleil, dont les rayons sont parallèles les uns aux autres.
- **Rayonnement diffusés** : Se compose de la lumière diffusée par l'atmosphère ou par certains obstacles (par exemple, l'air, les nuages), minimisant son intensité.
- **Rayonnement albédo** : C'est la partie du rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol, et cela dépend de l'environnement de l'installation.

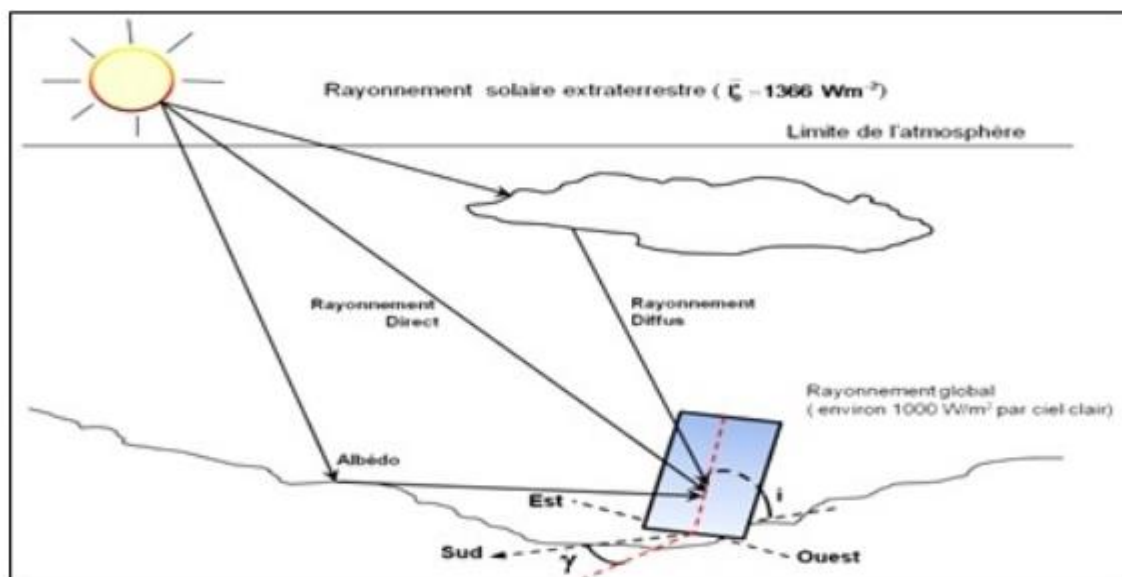


Figure.1. 11. Composantes d'éclairement global d'une surface horizontale



### **1.6. Gisement solaire**

La compréhension des dépôts solaires et du rayonnement reçu par le sol est une tâche très importante pour la conception et le dimensionnement des systèmes solaires dans différents domaines (e.g. électricité, production de chaleur, etc.).

Un champ solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible sur une période de temps donnée. Contrairement à d'autres sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire n'a pas de problèmes de dépôt et est disponible partout sur Terre. Une partie de l'énergie atteint la surface de la Terre sous forme de rayonnement électromagnétique. En dehors de l'atmosphère, la Terre reçoit en moyenne environ 5,5 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie par jour. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, son spectre est atténué et altéré. Par conséquent, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. Le rayonnement solaire au sol dépend donc de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par la lumière et n'est donc pas uniforme sur la surface de la Terre. [5].

### **1.7. Production de l'énergie électrique**

La production implique l'utilisation de diverses énergies pour entraîner des alternateurs qui produisent généralement de la tension et du courant triphasé. Ainsi, une distinction est faite entre les centrales électriques : thermique, nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire, géothermique, etc. L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables qui sont obtenues directement à partir du soleil. La production d'énergie par panneaux solaires a fait des progrès significatifs dans le monde entier.

#### **1.7.1. Historique**

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par un physicien français, Antoine César Becquerel. En 1875, le physicien Werner von Siemens a présenté un article sur l'effet photovoltaïque des semi-conducteurs à l'Académie des sciences de Berlin. La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation.

Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 et comprenaient des cellules à oxyde cuivreux puis à sélénium. La recherche d'après-guerre a amélioré leurs performances et leur taille, et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, ont développé des téléphones photovoltaïques au silicium aux laboratoires Bell. Grâce à ces batteries, on voit la

possibilité d'alimentation électrique. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites.

En 1958, le premier satellite équipé de panneaux solaires est lancé dans l'espace, et une batterie d'une efficacité de 9% est développée en même temps. Mais ce n'est que dans les années 1970 que les gouvernements et l'industrie ont commencé à investir dans le photovoltaïque. En effet, des efforts sont déjà faits pour réduire les coûts afin que l'énergie photovoltaïque puisse également être utilisée pour des applications terrestres.

En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques a été construite à l'Université du Delaware. Ainsi, dans les années 1980, le photovoltaïque au sol se développe progressivement, avec l'installation de centrales de plusieurs mégawatts. La croissance de l'industrie a été impressionnante, notamment grâce aux nombreux produits de faible puissance alimentés par l'énergie solaire, tels que : montres, calculatrices, radios et balises météo, pompes à eau et réfrigérateurs à énergie solaire.

En 1983, la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque a parcouru 4 000 kilomètres en Australie. En 1995, le Japon et l'Allemagne ont lancé des projets de toits photovoltaïques connectés au réseau, et en 2001, ils ont commencé à être largement promus. Bien que le prix se soit peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année ne cesse d'augmenter [6].

### **1.7.2. Effet photovoltaïque**

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs qui convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité. Cette conversion s'appelle l'effet photovoltaïque. Lors de l'absorption de la lumière, la génération de paires électron-trou et la séparation de ces porteurs de charge constituent un processus important pour la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique (cellules solaires).



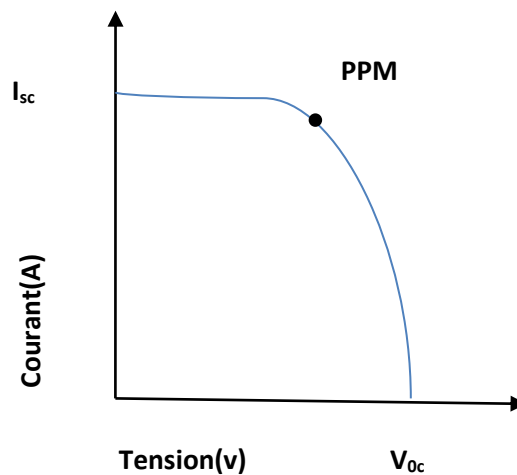


Figure.1. 11. Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque

De la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque sous éclairement, on déduit des paramètres électriques propres à la cellule, notamment :

- $I_{sc}$ : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V = 0$ )
- $V_{oc}$ : Tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I = 0$ )
- point de fonctionnement optimal PPM

### **1.8. Cellule solaire photovoltaïque**

Elle permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [5]:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.



Figure.1. 12. Cellules photovoltaïques

### **1.8.1. Principe de fonctionnement**

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. C'est un dispositif semi-conducteur capable de convertir une source d'énergie inépuisable, l'énergie lumineuse fournie par le soleil, en énergie électrique. Ce matériau comporte deux parties, l'une avec des électrons en excès et l'autre avec des électrons en insuffisance, qui sont respectivement appelées dopées de type n et dopées de type p. Lorsque le premier matériau entre en contact avec le deuxième matériau, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

Les régions initialement dopées n sont chargées positivement et les régions initialement dopées p sont chargées négativement. Un champ électrique se crée ainsi entre eux qui tend à repousser les électrons et les trous de la région n vers la région p. Une jonction (appelée p-n) se forme.

En ajoutant des contacts métalliques aux régions n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la bande interdite transfèrent leur énergie aux atomes, et chaque atome transfère un électron de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou qui peut se déplacer, créant un électron-trou - sur le trou. Si des charges sont transmises aux bornes de la batterie, les électrons de la région n se connectent aux trous de la région p via une connexion externe, créant une différence de potentiel [7].

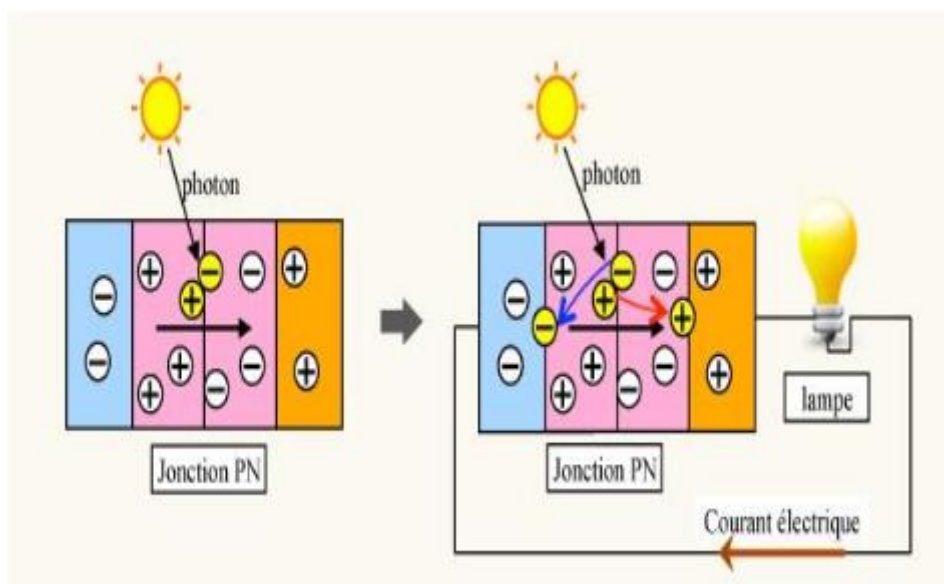


Figure.1. 13. Présentation schématique le principe d'une cellule solaire

### 1.8.2. Types des cellules PV

Les types des cellules PV sont :

#### 1.8.2.1. Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme.

Elle se caractérise par [8] :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère;
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur;
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire.

#### 1.8.2.2. Cellules poly cristallines

Les cellules polycristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe. Elle se caractérise par [8]:

- Coût de production moins élevé;
- Procédé moins gourmand en énergie;
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

#### 1.8.2.3. Cellules amorphes

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi conducteurs en couches minces. Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de cette couche varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Ces technologies initialement coûteuses étaient

réservées aux applications spatiales et aux technologies concentrées. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération.

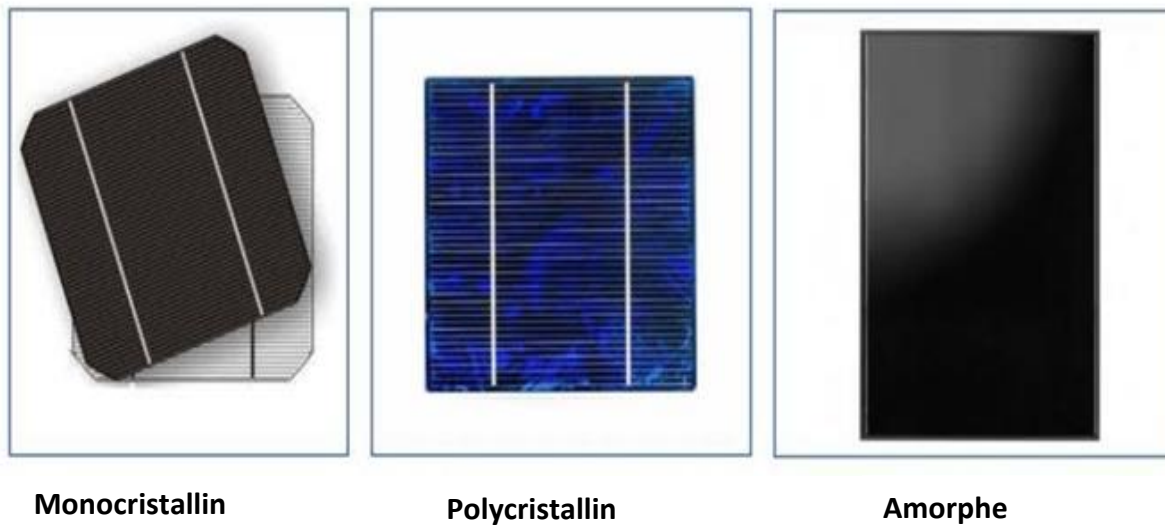


Figure.1. 14. Les images de différent type de la cellule photovoltaïque

### 1.9. Module photovoltaïque

L'ensemble des cellules sont connectées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque. La tension générée par les cellules photovoltaïques est d'environ 0,6 V et plusieurs cellules sont connectées en série pour obtenir des tensions requises plus élevées.

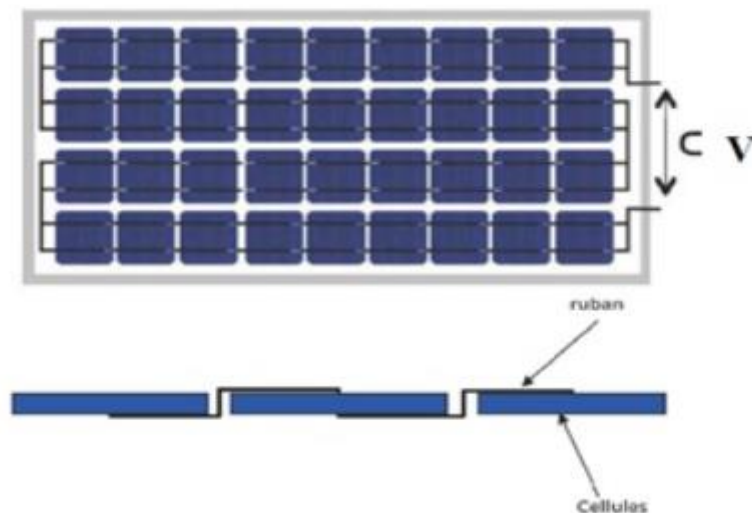


Figure.1. 15. Câblage des cellules dans un module

### **1.10. Panneau photovoltaïque**

Pour former un panneau photovoltaïque, plusieurs modules photovoltaïques doivent être connectés en série et/ou en parallèle, montés sur un cadre métallique à un angle d'inclinaison spécifique pour générer l'électricité requise. [9].



Figure.1. 16. Panneau photovoltaïque

#### **1.10.1. Association en série**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure (2.9) montre la caractéristique résultante ( $I_S$ ,  $V_S$ ) obtenue par l'association en série (indice  $s$ ) de  $n_s$  cellules identiques ( $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ ).

Avec :

$I_{SCC}=I_{CC}$ : le courant de court-circuit.

$V_{SCO}=n_s \cdot V_{CO}$ : la tension de circuit ouvert

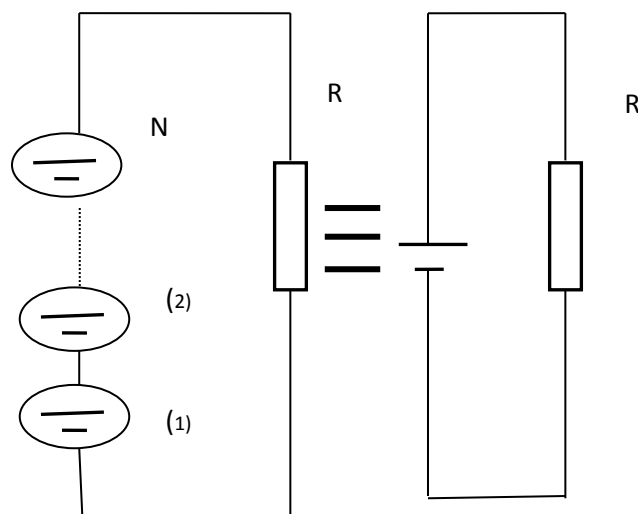


Figure.1. 17. Association des modules en série

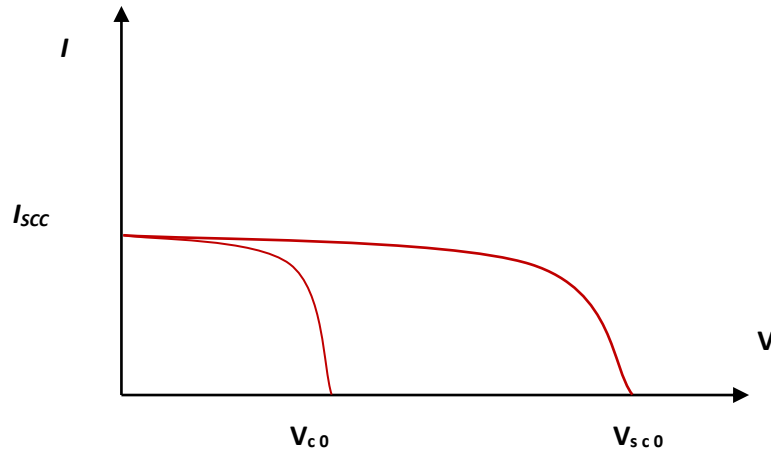


Figure.1. 18. Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques

### 1.10.2. Association parallèle

Dans ce type d'association, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure Suivante montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{PCO}$ ) obtenue en association en parallèle (indice p)  $N_p$  cellules identiques ( $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ ).

$I_{pcc} = n P I_{CC}$ : le courant de court-circuit.

$V_{PCO} = V_{CO}$ : la tension de circuit ouvert.

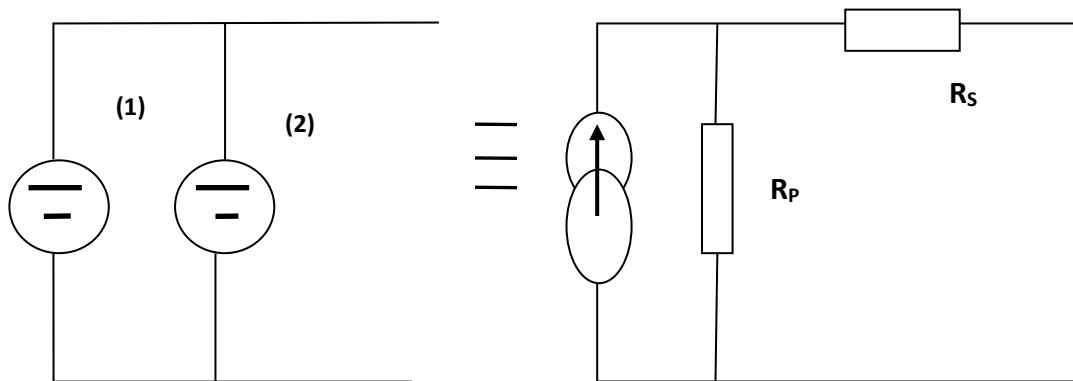


Figure.1. 19. Association des modules en parallèle

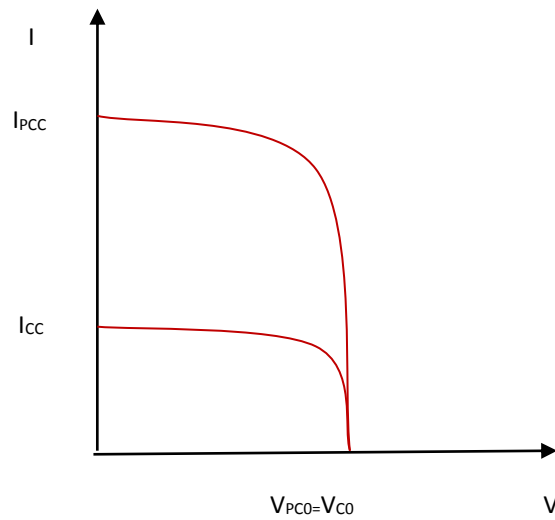


Figure.1. 20. Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des cellules identiques

### 1.10.3. Association mixte (série parallèle)

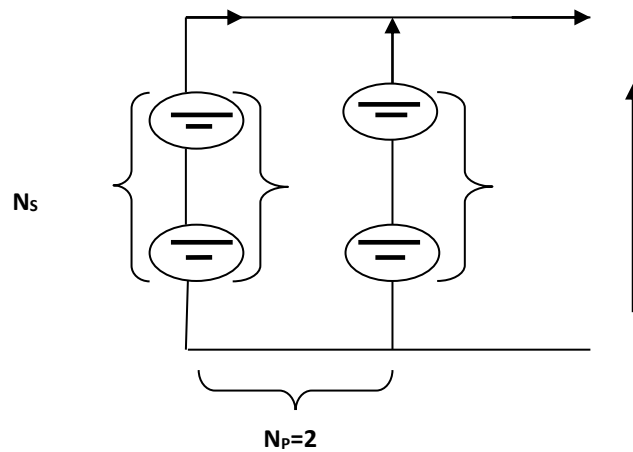


Figure.1. 21. Association mixte des modules

Un ensemble mixte est un ensemble de panneaux installés à la fois en série et en parallèle. Afin d'obtenir plusieurs kilowatts de puissance, à la bonne tension, il est nécessaire de regrouper les composants en panneaux et d'installer les panneaux en série et en parallèle pour former un générateur dit photovoltaïque.

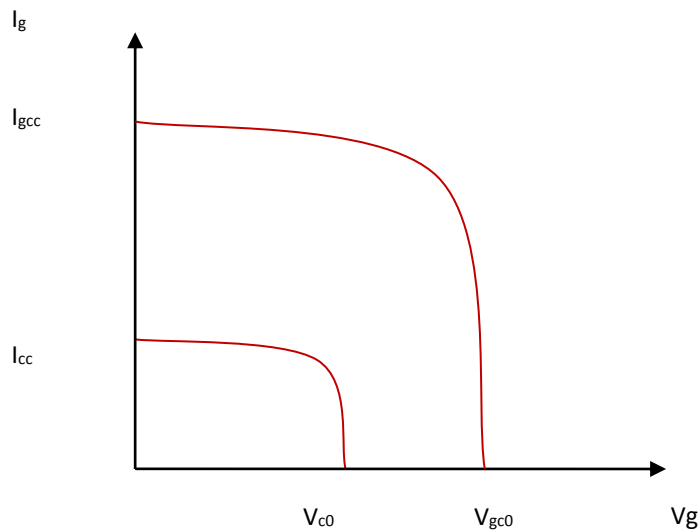


Figure.1. 22. Caractéristique résultante d'un groupement mixte

### 1.11. Conception d'une installation

La conception d'installations photovoltaïques est un processus complexe dans lequel l'optimisation joue un rôle important. Pour qu'un système photovoltaïque soit performant, il doit :

- évaluations des données géographiques et météorologiques
- besoins des utilisateurs.

#### 1.11.1.Types d'installation

Il existe 02 types d'installation :

##### 1.11.1.1. Systèmes autonomes

Ce sont des installations autonomes qui ne sont pas connectées au réseau. L'autonomie du système est garantie par le système de stockage d'énergie.

##### 1.11.1.2. Systèmes reliés au réseau

L'électricité produite par le générateur photovoltaïque est convertie en électricité alternative au moyen d'un onduleur (convertisseur DC/AC).

Ces installations comprennent 04 éléments :

- Un/ou plusieurs modules PV.
- Une ou plusieurs batteries
- Le système de régulation.
- L'onduleur



### **1.11.2. Système de conversion**

Les consommateurs électriques alimentés par les systèmes photovoltaïques peuvent être en courant continu (eau pompée) ou en courant alternatif (domestique).

#### **1.11.2.1. Le convertisseur**

C'est un composant électronique utilisé pour convertir la tension fournie par le panneau ou la tension de la batterie en tension continue.

#### **1. 12.2.2. L'onduleur**

Les onduleurs sont conçus pour convertir le courant continu en courant alternatif. Il existe deux principaux types d'onduleurs :

- onduleurs monophasés
- onduleurs triphasés.

Les grands systèmes utilisent généralement un onduleur triphasé (qui divise ensuite la puissance fournie par le système PV en trois parties, chacune alimentant l'une des trois phases).

### **1.11.3. Domaines d'application des systèmes PV raccordés au réseau**

1. Production d'énergie à grande échelle.
2. Approvisionnement énergétique industriel ou domestique.
3. Systèmes solaires domestiques.
4. Cliniques et hôpitaux.

### **1.12. Ombrage**

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque (PV) peut être considérablement réduite par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance). Mais c'est aussi lié aux conditions de mesure. En fait, de nombreux facteurs, tels que l'ombrage ou la température, peut avoir un impact énorme sur la puissance de sortie des panneaux photovoltaïques (PV). L'ombrage partiel (PS) est un problème fréquemment rencontré lors de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque.

Il ya trois types d'ombrage :

- **Ombrage direct** : Cette situation d'ombrage est provoquée par des objets situés à proximité du module et ombrage en permanence le champ photovoltaïque, empêchant la lumière d'atteindre la surface du module, ce qui entraîne des pertes de production élevées du système photovoltaïque.

- **Ombre temporaire** : Ce dernier est causé par des conditions naturelles telles que la neige, les feuilles, la saleté, etc.
- **Auto-ombre** : En règle générale, les modules en ligne doivent être espacés des autres modules d'environ 4 à 6 fois la hauteur des modules inclinés. Cela permet d'éviter une occlusion mutuelle.

Les impacts liés à l'ombre peuvent être réduits en utilisant plusieurs stratégies :

- surveiller le maximum Power Point produit par le système PV.
- l'adoption de topologie des convertisseurs.
- le meilleur choix de la configuration des modules PV.

Lorsqu'une partie d'un réseau photovoltaïque est ombragée, les modules ombragés ne peuvent pas produire autant de courant que les modules non ombragés car tous les modules sont connectés en série et/ou en parallèle. En effet, le module ombré fera fonctionner le module non ombragé dans la région de tension négative. Il en résulte une perte nette de tension dans le système. Le module fantôme absorbe l'énergie et commence à agir comme une charge électrique. En d'autres termes, les modules ombragés dissipent de l'énergie sous forme de chaleur et provoquent des points chauds. Actuellement, de nombreuses études sont menées sur les effets de l'ombre partiel dans différents systèmes photovoltaïques pour améliorer les performances électriques de ces systèmes. [10]



Figure.1. 23. Causes d'ombrage

### 1.13. Avantages et inconvénients d'une installation PV

#### 1.13.1. Avantages

- Le montage des installations photovoltaïques est simple.
- Haute fiabilité.
- Technologie silencieuse, n'entraîne aucune perturbation.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante.
- Longue durée de vie.
- Les frais de fonctionnement sont très faibles.

#### 1.13.2. Inconvénients

- Rendement réel faible,
- Nécessité de l'utilisation de l'onduleur comme l'énergie issue du générateur PV est continue.
- Dépend des conditions météorologiques.

### 1.15. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre l'énergie renouvelable et ses types, Plus spécifiquement l'énergie solaire, compte tenu des avantages et des inconvénients de chaque type

et de leur importance énergétique d'un point de vue économique, environnemental et social, nous proposons les principaux paramètres à prendre en compte lors de la conception d'une centrale photovoltaïque, les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(V)$  à différentes zones de fonctionnement, le principe d'une cellule photovoltaïque, les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque, et les modes d'association des générateurs photovoltaïques.

## Chapitre 2 :

# Interactions Entre Le Réseau De Distribution Et Les Systèmes PV

### 2.1. Introduction

La tendance à la déréglementation est de plus en plus répandue dans le monde, en particulier dans les pays développés. Par ailleurs, les préoccupations environnementales et de développement durable incitent les producteurs à développer la production d'électricité à partir d'énergies nouvelles et renouvelables ainsi que des solutions d'efficacité énergétique. [11].

Ce chapitre donne le contexte de nos recherches sur l'injection d'énergie générée par les centrales photovoltaïques dans les réseaux de distribution. A cet effet, nous présentons le réseau de distribution et l'interaction entre le réseau de distribution et le système photovoltaïque, ainsi que les impacts liés au réseau associés à l'intégration de la production photovoltaïque.

### 2.2. Structures Réseau électrique

Le réseau électrique se caractérise par le type de courant utilisé, DC/AC. Une fois le choix du type déterminé, il promet d'apporter de futures modifications ou d'utiliser le réseau [12].

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant le transport d'énergie électrique vers des consommateurs d'électricité à différents niveaux de tension à l'aide de transformateurs.

Les différents niveaux de tension du réseau sont classés selon le tableau. [13]

Nom	Abréviation	Valeur en courant continue	Valeur en courant alternative
Haute tension B	HTB	>75KV	>50kV
Haute tension A	HTA	1500V<HTA<75kV	1000V<HTA<50kV
Basse tension B	BTB	750V<BTB<1500V	500V<BTB<1000V
Basse tension A	BTA	120V<BTA<750V	50V<BTA<500V
Très basse tension	TBT	<120V	<50V

Tableau.2. 1. Domaines de tension

### 2.2.1. Types de réseaux électriques

#### 2.2.1.1. Réseaux de transport et d'interconnexion

Sa tâche est de capter l'énergie produite par l'usine et de la livrer à la zone de consommation dans le flux le plus large possible, afin que les moyens de production puissent fonctionner de manière sûre et économique. Le niveau de tension varie d'un pays à l'autre mais le niveau de tension est souvent fixé entre 220 kV et 800 kV. Comme exemple, la ligne de transport d'électricité centrale de 220kV est illustrée à la Figure (2.1).

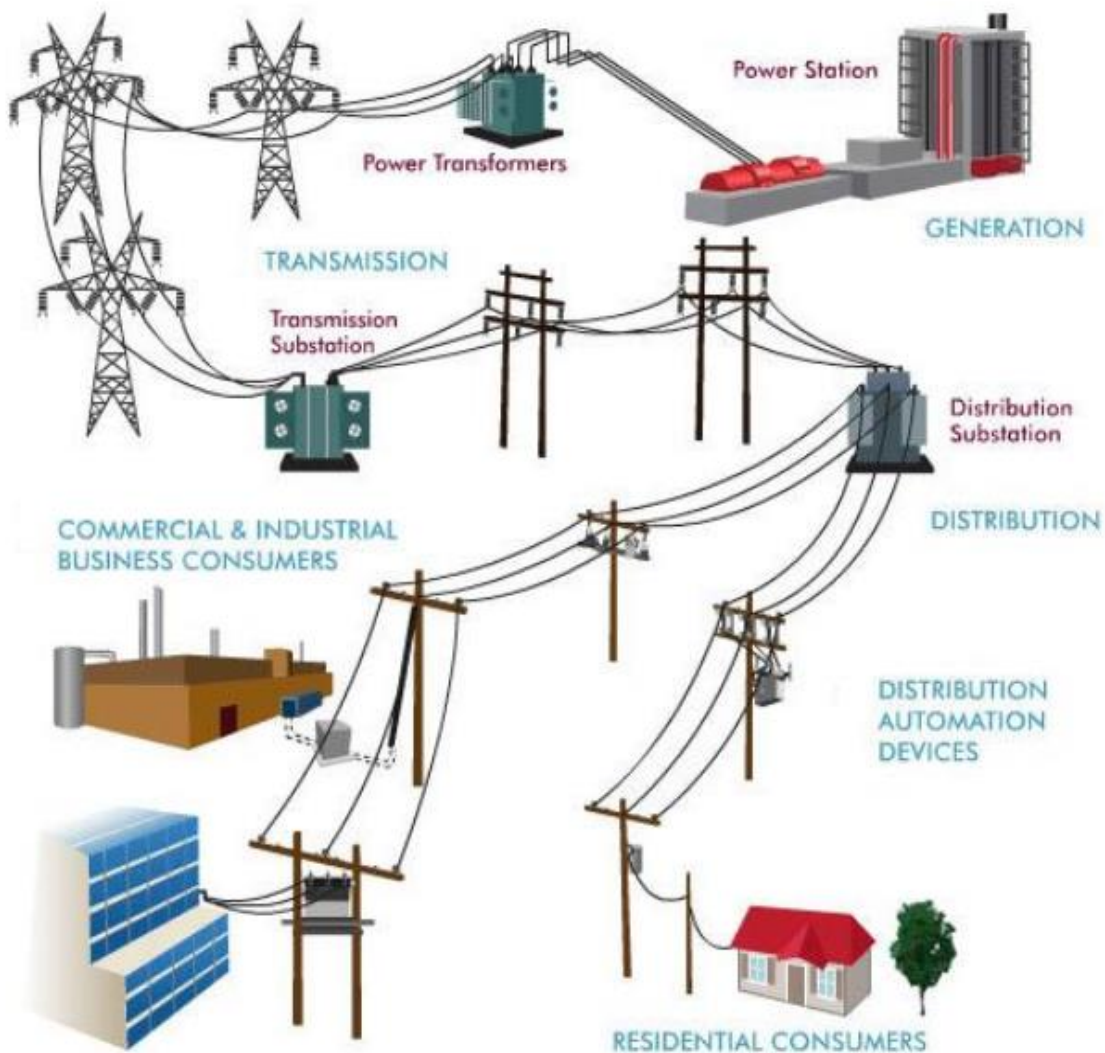


Figure.2. 1. Réseau de transport

Le réseau de transport a pour mission de :

- Transport d'énergie : la fonction de transport destinée à transporter l'électricité des centres de production distants vers les centres de consommation ;

- Interconnexion nationale : Fonctions de réseau national pour gérer la distribution en liant la production à l'emplacement géographique et à la nature de la demande temporaire ;
- Interconnexion internationale : fonction d'interconnexion internationale qui échange de l'énergie et favorise l'unité du système en cas d'urgence [14].

### 2.2.1.2. Réseaux de répartition

Recevant l'énergie du réseau de transport, leur rôle est de fournir de l'électricité aux clients urbains et aux grands industriels. Ces réseaux ont des niveaux de tension compris entre 45 kV et 160 kV et fournissent des services du point de transmission au point de distribution.

En Algérie, la classe de tension du réseau de distribution la plus utilisée est de 60 kV.

### 2.2.1.3. Réseaux de distribution

Desservant les postes de distribution publique, alimentant les réseaux bas tension et les postes clients. La moyenne tension se situe entre 4 kV et 45 kV, la basse tension (220/380 V) se situe entre quelques centaines de volts.

En Algérie, nous utilisons une tension aérienne de 30 kV et une tension souterraine de 10 kV comme tension moyenne et (220 / 380V) pour la basse tension, comme le montre la Figure (2.2).

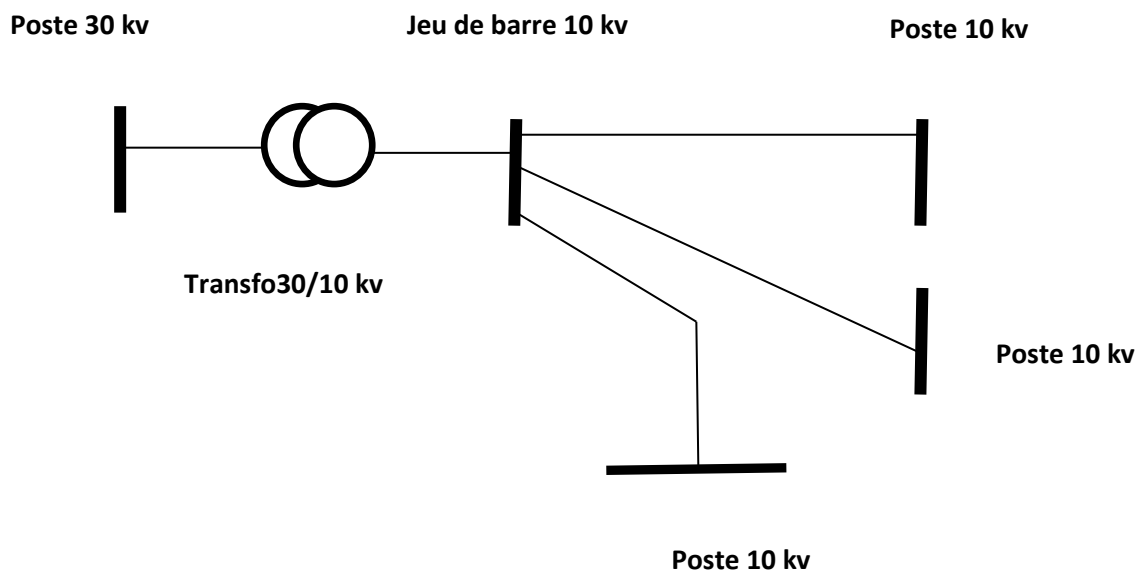


Figure.2. 2. Exemple d'un réseau de distribution

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit satisfaire ces exigences [14]:

- Veiller à la protection de l'environnement
- Assurer au client la puissance dont il a besoin
- Fournir une tension stable
- Fournir une fréquence stable
- Fournir l'énergie à un prix acceptable

### **2.3. Supervision des réseaux**

Le système électrique met en œuvre une supervision hiérarchique : le dispatching national et les centres régionaux gèrent le réseau de transport, les centres locaux gèrent le réseau de distribution. L'une des responsabilités du dispatching national est d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande au moindre coût économique. Son principal problème est en grande partie dû à la difficulté de prévoir la consommation avec une grande précision.

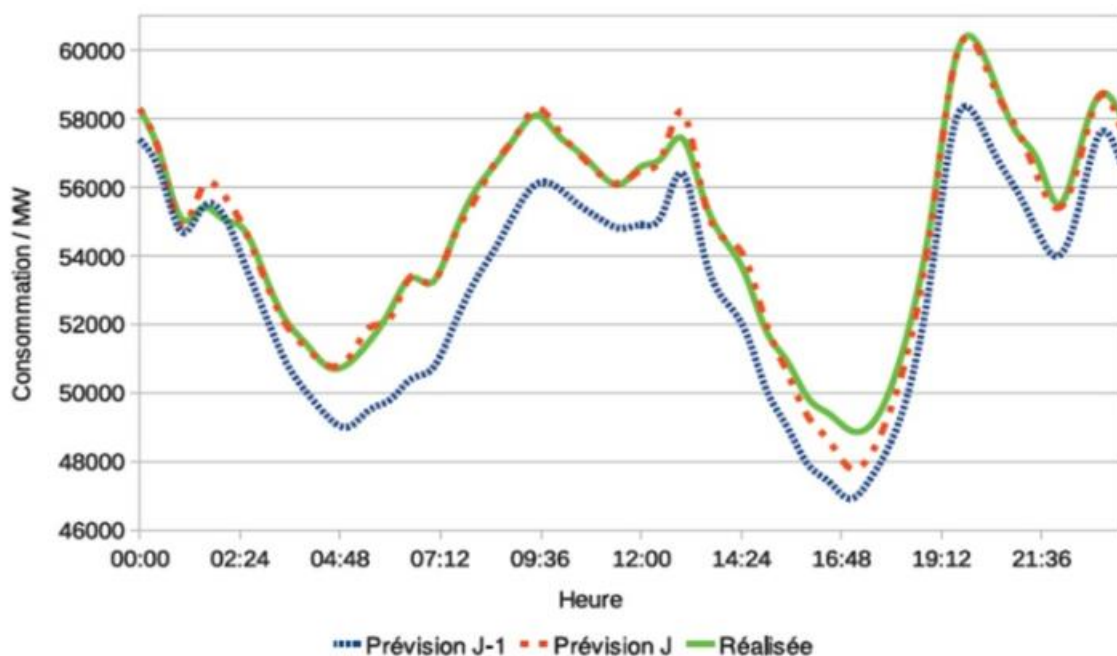


Figure.2. 3. Exemple de courbes de charge prévue et réalisée [15]

Le centre de répartition régional collecte les informations de mesure des nœuds et des sous-stations du réseau de trafic. Ces données sont traitées par un système de collecte, de



traitement des informations et de suivi - SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Les données sont ensuite visualisées et finalement interprétées par les opérateurs chargés de superviser le réseau. Les opérateurs utilisent également un logiciel appelé EMS (Energy Management System), qui facilite les études de sécurité et de stabilité prédictives ou en temps réel et facilite les décisions de gestion du réseau. Le réglage de la tension est également effectué par le centre de répartition. La tension est régulée localement par un transformateur réglable, et la puissance réactive est générée par des dispositifs tels que des compensateurs synchrones ou statiques [16].

#### **2.4. Nécessité de l'intégration dans le réseau électrique**

Une des conséquences de la libéralisation des marchés de l'électricité est le développement de la production décentralisée d'énergies renouvelables.

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux, notamment ceux impactés par le changement climatique (éolien et solaire), nécessitera des améliorations majeures de ces réseaux, ainsi que la mise en place de nouveaux équipements et de nouveaux modes de gestion. Cette intégration nécessite de maintenir une bonne qualité de l'énergie dans différentes conditions de fonctionnement du système énergétique.

L'enjeu est de maintenir la fiabilité et la qualité de l'électricité fournie aux particuliers et aux entreprises malgré la libéralisation des marchés de l'électricité et le recours croissant aux énergies renouvelables [17].

#### **2.5. Qualité de la tension et perturbations du réseau électrique**

##### **2.5.1. Qualité de la tension**

La qualité de la tension est un concept d'efficacité qui classe les équipements sensibles d'une manière adaptée au fonctionnement de l'équipement.

La tension a quatre caractéristiques principales :

- L'amplitude des trois tensions.
- Symétrie du système triphasé.
- Fréquence.
- Forme d'onde.

### **2.5.2. Différents perturbations dans le réseau électrique**

Le réseau peut être soumis à plusieurs perturbations, mesurables avec l'unité de mesure, qui peuvent endommager la machine et fragiliser toutes les installations électriques. Décrire certaines perturbations et donner un niveau cohérent d'énergie fournie. Les perturbations électriques affectant l'un des paramètres cités précédemment peuvent se manifester par [18] :

- Fluctuation de la tension (Flicker)
- Creux de tension et coupures
- Harmoniques
- Déséquilibre
- Surtension

### **2.6. Installation Photovoltaïque**

#### **2.6.1. Qu'est-ce que les installations PV Fournissent?**

Les installations photovoltaïques génèrent de l'électricité. Les modules photovoltaïques génèrent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés au soleil. Cette énergie peut répondre à des besoins énergétiques ponctuels, ou elle peut être envoyée sur le réseau pour être utilisée pour alimenter des appareils de faible puissance tels que des calculatrices ou des horloges, ou pour alimenter le réseau principal national. [16]

Les modules photovoltaïques génèrent du courant continu. De plus, en fonction de l'application, un système photovoltaïque comprendra un équipement de conversion de l'énergie électrique en courant alternatif, nécessaire au fonctionnement de la plupart des appareils courants. Le système photovoltaïque autonome comprendra également des accumulateurs pour stocker l'électricité produite les jours ensoleillés pour une utilisation la nuit et les jours nuageux. Les modules photovoltaïques sont également la source d'énergie la plus fiable dans les systèmes de production d'électricité. Sans pièces mobiles, il n'a pas été surveillé pendant des décennies. Cela est inestimable dans les régions où la main-d'œuvre qualifiée n'est pas disponible à un coût abordable. De tels endroits existent non seulement dans les pays en développement, mais aussi dans les océans et l'espace, où les premiers systèmes d'énergie solaire ont été développés pour l'exploration.

Le système photovoltaïque comporte peu de composants et est facile à entretenir. Même les utilisateurs avec peu de compétences techniques peuvent facilement les utiliser.

Les systèmes photovoltaïques sont modulaires donc le nombre de modules photovoltaïques peut être facilement ajusté en fonction de la demande de l'électricité et de l'ensoleillement disponible. Aussi, de tels modules existent en différentes tailles. Ainsi, un foyer peut dans un premier temps se contenter d'un simple pack d'éclairage comprenant un seul module qu'il peut se permettre d'acheter. Si un téléviseur est acheté après quelques années, il suffit d'ajouter un autre module photovoltaïque et/ou une autre batterie de stockage.

Enfin, ces systèmes sont très appréciés des utilisateurs pour leur silence, pour l'absence d'odeurs générées et aussi pour leur faculté de fournir de l'éclairage sans chaleur, un atout dans les pays chauds. [13]

### **2.6.2. Caractéristiques dynamiques des installations PV**

Pour les grands générateurs photovoltaïques (de la dizaine de mégawatts à la centaine de mégawatts) raccordés au réseau de transport et/ou au réseau de distribution, les services publics devraient faire face à de nouvelles exploitations non traditionnelles liées à l'exploitation en raison des différences dans les caractéristiques dynamiques du contrainte du système électrique. Par rapport aux générateurs conventionnels, les installations photovoltaïques de forte puissance.

L'intégration à grande échelle de sources photovoltaïques dans le système électrique à un point de fonctionnement donné entraînera le démantèlement des générateurs synchrones, réduisant ainsi le nombre de régulateurs de tension automatiques équipés de générateurs synchrones. La perte de ces rails auxiliaires de régulation de tension signifie un impact direct sur la stabilité de la tension du système électrique [19].

## **2.7. Raccordement au réseau**

### **2.7.1. But des études de raccordement**

Le gestionnaire du réseau public de distribution détermine l'impact éventuel du raccordement des unités de production sur [11] :

- La résistance maximale autorisée par le projet de réseau public de distribution.
- Le pouvoir de coupure des disjoncteurs, les tenues thermiques et électrodynamiques du fonctionnement du réseau public de distribution et le fonctionnement général des dispositifs de protection de ce réseau.

- Le niveau de la tension au point de livraison de l'installation de production.
- Niveau de tension aux points de livraison des autres utilisateurs du réseau public de distribution d'électricité déjà raccordés, y compris les postes HTA/BT.
- Fonctionnement du plan de protection du réseau public de distribution de l'électricité.
- Fonctionnement de transmission des signaux tarifaires.

### **2.7.2. Exigences vis-à-vis des producteurs d'énergie PV**

Le constructeur communique au gestionnaire du réseau public de distribution les caractéristiques techniques de ses installations de production, nécessaires à la définition du raccordement, et fournit, à la demande du gestionnaire, les pièces justificatives :

- La capacité de l'installation de production à fonctionner dans des conditions normales de tension (c'est-à-dire que la tension au point de livraison ne s'écarte pas de plus ou de moins de 5 % de la tension contractuelle) et de fréquence (c'est-à-dire que la fréquence est comprise entre 49,5 Hz et 50,5 Hz). dépend de réseau public de distribution et sans limite de temps [20].
- La Capacité d'une installation de production à rester opérationnelle pendant une durée limitée lorsque la fréquence ou la tension du réseau public de distribution atteint des valeurs anormales [20].

### **2.7.3. Vérification des seuils électriques**

La Vérification systématique des seuils de contraintes électriques (intensité et tension) lors du raccordement des utilisateurs, producteurs ou consommateurs, calculés par le gestionnaire de réseau [21].

#### **2.7.3.1. Contraintes d'intensité**

Chaque ouvrage électrique possède des limitations en termes d'intensité pouvant y transiter (une charge maximale). Cette charge est la somme algébrique de la consommation (+) et de la production injectée sur le réseau (-). En l'absence de contrainte sur le réseau, l'ajout d'une production sur le réseau BT a pour effet initial de diminuer les transits et donc de limiter le risque d'atteinte d'une contrainte d'intensité.

### **2.7.3.2. Contraintes de tension**

La limitation de tension se produit lorsque la tension dépasse le niveau autorisé. Ce seuil est compris entre 12,5% et 10% du niveau de tension nominal défini dans le texte réglementaire, en fonction de la chute de tension MT entre le poste source et le transformateur MT/BT [21].

### **2.7.4. Importance des hypothèses utilisées dans les études**

L'étude du seuil électrique s'appuie d'autre part sur la description du réseau existant et d'autre part sur le comptage de la description de la charge transitant par le réseau à l'instant t. Cette description de la charge est essentielle à la qualité des résultats.

## **2.8. Impacts liés à l'intégration de la production PV sur les réseaux électriques**

GED fournit de l'énergie près du point de consommation, réduisant ainsi le transfert de la puissance active et réduisant ainsi les pertes en ligne sur les réseaux de transport, mais du point de vue de l'exploitation du réseau, il est pénalisé pour augmenter le risque d'oscillations de puissance active et leurs inférences dues pour les raisons ci-dessus Il s'agit d'une diminution de la stabilité

Certains de ces GED disposent également d'une source d'énergie primaire intermittente (éolien, solaire), ce qui rend difficile la prévision aisée de la production disponible à court terme. Par conséquent, ils ne peuvent pas garantir la puissance de la sortie et fournir toute la puissance disponible sur le marché. D'un autre côté, ces sources là sont trop petites pour que les administrateurs réseau puissent les observer et les planifier, et ne participent donc pas aux services système aujourd'hui. Dans le cas d'une perméabilité élevée, cela peut poser des problèmes si les méthodes traditionnelles de réglage de la distribution deviennent inadaptées pour assurer la résistance à la pression [3].

Certains de ces GED (piles à combustible, panneaux solaires) construits pour générer du courant continu doivent être connectés au réseau par des interfaces de l'électronique de puissance, injectant des harmoniques préjudiciables à la qualité de tension fournie. Enfin, il existe des GED en aval, des postes dont les transformateurs sont équipés de changeurs de prises en charge régulés par âge composé, qui perturbent leur fonctionnement à partir des mesures de courant de puits. En fait, la puissance générée par le GED réduit le courant circulant dans le transformateur, provoquant le fonctionnement de changeur de prises, réduisant ainsi la tension de l'alimentation suivante [22].

Les principaux impacts à rappeler sont les suivants :

### **2.8.1. Impact sur la stabilité du système**

Les effets des générateurs de production peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion d'un générateur synchrone dans le réseau modifiera le temps d'élimination du défaut critique (correspondant à la durée maximale de perturbation que le système peut supporter sans perte de stabilité) [23].

### **2.8.2. Impact sur la qualité de service**

Les GED de type asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (en profondeur). D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie [24].

### **2.8.3. Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système**

Les GED, notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent [25].

### **2.8.4. Impact sur la continuité de service**

Pour les mêmes raisons que la nature intermittente, lorsque le système nécessite de l'ECS, l'ECS n'est pas disponible, ce qui peut entraîner des pannes de courant dues à des baisses de tension.

### **2.8.5. Impact sur la tenue de tension**

Nous savons que les nœuds les plus proches de la source ont une tension plus élevée et qu'à mesure qu'ils s'éloignent de la source, la tension diminue. Par conséquent, connecter la source DE à proximité de la charge modifiera naturellement la répartition de la tension sur le réseau [26].

### **2.8.6. Impact sur la tenue de fréquence**

La fréquence doit impérativement être maintenue dans les limites contractuelles. Les principaux problèmes apparaissant en cas d'excursion non maîtrisée de la fréquence sont les suivants:

- Rupture de synchronisme des alternateurs pouvant entraîner la perte de groupes en cascade.
- Limite de fonctionnement des auxiliaires de centrales.

En cas de baisse de fréquence : Saturation des circuits magnétiques de transformateurs ou compensateurs bobinent d'énergie réactive entraînant un fonctionnement dégradé et des pertes fer [27].

### **2.8.7. Harmoniques**

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque sont associés à une électronique de puissance (onduleurs) qui génère des harmoniques dans le réseau. Cependant, les systèmes photovoltaïques modernes utilisent la technologie des transistors qui produit généralement peu d'harmoniques.

### **2.8.8. Îlotage**

Alors que le réseau de distribution est coupé en amont du consommateur et que la production décentralisée reste connectée, la zone du réseau contenant du PV est isolée du reste du réseau public. Cette configuration s'appelle une île. Ce phénomène ne peut être toléré et le système photovoltaïque doit être déconnecté du réseau à ce moment [28].

## **2.9. Notion de Smart Grid**

Presque inchangée depuis près d'un siècle, l'infrastructure du réseau électrique telle que nous la connaissons aujourd'hui a réussi à répondre à nos besoins avec succès. Cependant, cette infrastructure vieillissant avec le temps, devient de moins en moins efficace, se heurte sans cesse à ses limites et s'efforce en permanence à faire face à nos exigences. De plus, ce réseau électrique produit l'électricité d'une manière centralisée et l'achemine à un grand nombre d'utilisateurs où la communication est unidirectionnelle : des producteurs vers les consommateurs. Les besoins en matière de fiabilité, de facilité de gestion de l'énergie et de production d'énergie renouvelable soulignent la nécessité d'un réseau modernisé et intelligent pour demain. Dans ce contexte, le réseau électrique intelligent ou Smart Grid ouvre la voie au futur réseau électrique qui vise à créer un système propre, sûr, sécurisé et fiable [29].

Afin de gérer le réseau électrique, il est nécessaire de procéder à des changements importants sans en perturber le fonctionnement. Cela se traduit, dans le cadre du réseau électrique, par la mise en place d'un réseau de capteurs et compteurs intelligents pour acheminer les données de production et de consommation vers le gestionnaire du Smart Grid.

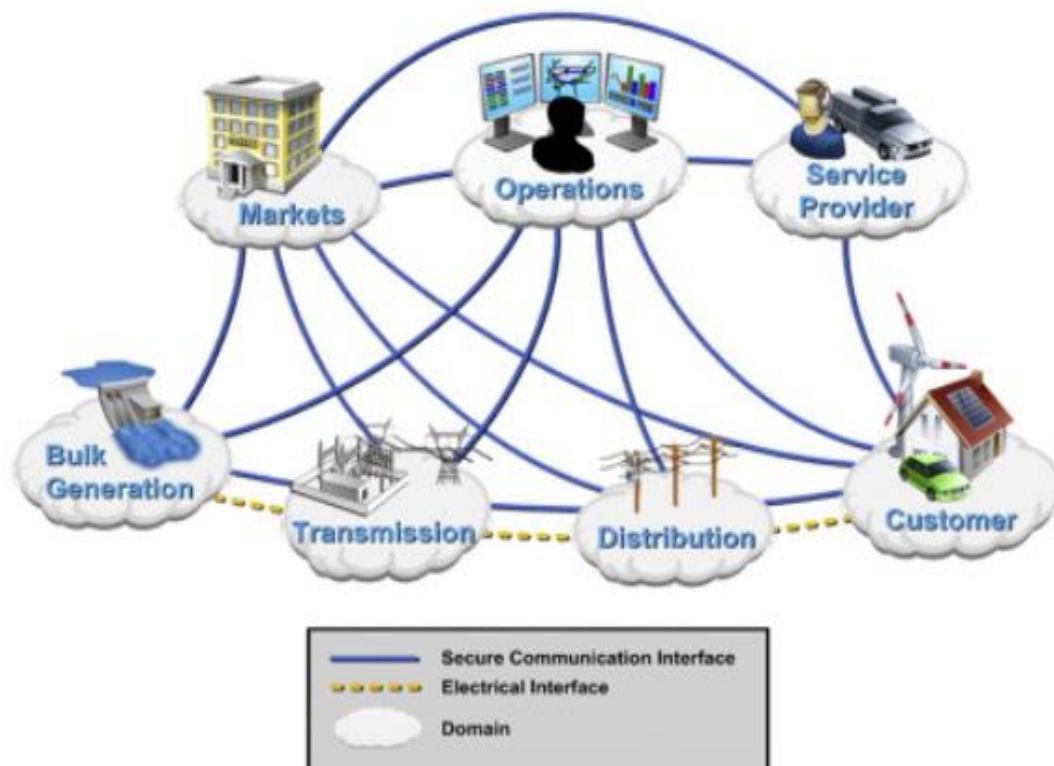


Figure.2. 3. Modèle conceptuel du smart Grid vu par NIST [29]

### 2.9.1. Vers un réseau électrique intelligent

Le réseau électrique traditionnel est composé de quatre infrastructures principales : les couches de production, de transmission, de distribution et de consommation. Cette infrastructure a survécu par de grandes centrales de production qui sont installées à des niveaux de puissance de plusieurs MW, et elle est connectée à une sous-station de transmission où le système de transmission est mis en route [30]. La ligne de transmission est chargée de fournir l'énergie nécessaire aux sous-stations de distribution afin d'alimenter plusieurs réseaux de distribution avec l'énergie produite. Par conséquent, la connexion entre les couches de production et de consommation est gérée par les couches intermédiaires. Le réseau électrique traditionnel est unidirectionnel en termes de flux d'énergie puisque les sources de production distribuées n'ont pas été autorisées à participer à ce système. De plus, le prix de l'électricité est déterminé par les gestionnaires de réseaux de services publics, où les clients n'ont pas la possibilité de choisir leur tarif d'électricité [31].

L'architecture du réseau électrique traditionnel est principalement basée sur une structure verticale pour décrire un flux d'énergie unidirectionnel. Cependant, nous définissons le réseau électrique traditionnel comme étant horizontal, car le réseau intelligent est vertical en raison de



son architecture multicouche composée d'une couche de technologies de l'information et de la communication (TIC) et d'une couche de contrôle et de gestion [30].

Les principales caractéristiques du réseau sont comparées pour les réseaux traditionnels et les réseaux intelligents dans le tableau 2.3 [32]

Caractéristiques	Traditionnel	Smart grid
Contrôle	Electromécanique	Numérique
Communication	Unidirectionnel	Bidirectionnel
Génération	Centralisée	Distribuée
Détection	Capteurs limités	Utilisation généralisée des capteurs
Surveillance	Manuel	Autonome et distant
Restauration	Manuel	Autoréparation
Options offertes aux clients	Limitées	Diverses

Tableau.2. 2: Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et le smart grid

Les caractéristiques limitées de contrôle et de surveillance du réseau traditionnel ont obligé les opérateurs de système indépendants (ISO) et les opérateurs de transmission régionaux (RTO) à améliorer les capacités de communication du réseau électrique existant pour obtenir un système plus flexible. Dans les années 80, les exigences en matière de comptage avancé ont été améliorées pour permettre de calculer la moyenne des prix de l'électricité et les limites de la sélection des tarifs ont été supprimées. À la fin des années 1990, les préoccupations environnementales se sont accrues pour empêcher la production basée sur les combustibles fossiles, qui a été l'un des jalons pour améliorer la production distribuée, la gestion de la demande et les opérations de contrôle et de surveillance décentralisées. Ainsi, des recherches sur un nouveau concept de réseau ont été lancées de manière intensive.

La production distribuée et le contrôle décentralisé ont été les principaux moteurs de l'utilisation des sources d'énergies renouvelables dans la production d'électricité. En outre, le terme de microgrid a surgi au début des années 2000, ce qui a contribué à accroître la capacité et la résilience du réseau électrique existant. Par conséquent, il a été possible de mentionner le flux d'énergie bidirectionnel et les communications bidirectionnelles dans une infrastructure améliorée du réseau électrique appelée "smart grid".

Ces améliorations ont également permis l'auto-génération et le contrôle généralisé de ce nouveau réseau électrique grâce à l'utilisation d'un grand nombre de capteurs presque à chaque nœud et ligne du réseau entier. Dès qu'une défaillance se produit dans une section du réseau, les capteurs détectent la panne et le système de protection gère le flux d'énergie en comprenant de

nouvelles voies de relais pour l'énergie. Cette capacité de contrôle est fournie par trois grandes infrastructures techniques du réseau intelligent qui sont l'infrastructure intelligente, la gestion intelligente et les systèmes de contrôle intelligents. Le système de gestion intelligente est lié aux sous-systèmes de surveillance, de gestion et de prise de décision le long du réseau électrique. Le système de contrôle intelligent assure la détection et la protection contre les défaillances, la sécurité et la protection de la vie privée, les services et l'analyse du système pendant l'exploitation du réseau électrique [29].

### **2.10. Rendement énergétique**

La puissance fournie par des panneaux photovoltaïques dépend de: l'éclairage, la température et la tension aux bornes. Aussi, dans un système à couplage direct, le point de fonctionnement n'est pas le point de puissance maximal, et le système photovoltaïque doit être surdimensionné pour assurer la puissance requise par la charge. Le plus important est de commencer par une compréhension globale des conditions climatiques de l'endroit concerné. La qualité des composants utilisés dans l'installation, la disposition de l'installation elle-même et le niveau d'expertise en ingénierie affecteront alors les performances de l'installation et donc son efficacité énergétique [19].

Utiliser MPPT (Maximum Power Point Tracker) est la solution pour optimiser l'efficacité énergétique. Cela permet de suivre le point de puissance maximale en contrôlant la tension ou le courant PV indépendamment de la charge.

### **2.11. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons montré que l'intégration des énergies renouvelables est nécessaire pour réduire la pollution par les gaz toxiques, et malgré tous ses avantages économiques, elle a un impact négatif sur le bon fonctionnement du système électrique.

Les systèmes à base d'énergie renouvelable n'ont pas de priorités gérables car leur puissance de sortie dépend de la disponibilité de la source primaire (soleil) ce qui rend problématique leur participation à la gestion du réseau. L'injection de toute l'énergie disponible et extractible (photovoltaïques) dans de telles installations de production de masse intermittente et aléatoire ne peuvent pas continuer en raison d'un impact négatif, voire inacceptable sur l'opération du système.

Afin de relever le défi d'intégrer une grande quantité de production d'électricité photovoltaïque dans le système électrique, il est nécessaire de formuler des normes et des règles pour le raccordement des opérateurs photovoltaïques, et de renforcer la rigueur d'accès au réseau.

Dans le prochain chapitre, nous allons voir une modélisation et simulation d'un système PV raccordé au réseau électrique sous MATLAB /SIMULINK.

## Chapitre 3 :

# Modélisation et simulation d'un système

## PV raccordé au réseau électrique

### 3.1. Introduction

Les outils de simulation qui simplifient la tâche de simuler le comportement du champ en fonctionnement sain et pour différents types de défauts sont disponibles tels que : PV Syst, Solar Pro, PV Cad, PVSIM, SPYCE, RET Screen, Simscape, ....

Celui que nous avons retenu au cours de ce chapitre est l'outil Simscape du Matlab grâce à sa flexibilité et sa possibilité de modéliser le comportement physique des systèmes de différents domaines.

La librairie de cet outil (version R2015a) contient des blocs permettant de modéliser des composants physiques de différents domaines tels que le domaine électrique (résistance, condensateur, interrupteur, diodes,...), électronique (cellules solaires, moteurs, capteurs, ...) et des blocs nécessaires pour le passage du domaine Simulink à celui du Simscape et inversement. L'objectif de ce chapitre est d'employer un des outils de simulation existants pour simuler la caractéristique I-V d'une chaîne PV sous différentes conditions climatiques, pour pouvoir étudier l'effet de ces paramètres sur l'évolution de cette caractéristique.

### 3.2. Modélisation et simulation du comportement de la chaîne PV

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (3.1). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation, les facteurs de diode, une source de courant produisant un photo-courant qui dépend de l'éclairement solaire

- Le courant de saturation de la première diode modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur.
- Le courant de saturation de la deuxième diode modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

- Une résistance série pour modéliser les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- Une résistance parallèle pour modéliser les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

Le modèle à deux diodes est représenté par une équation de courant implicite qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

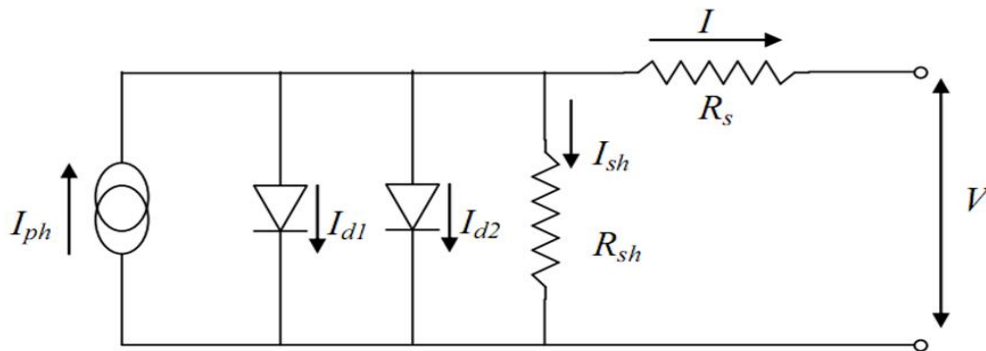


Figure.3. 1.Circuit équivalent au modèle à sept paramètres

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (3-1)$$

$I_{ph}$ : Courant photonique

$I_{d2}$ : courant de la diode 1

$I_{d1}$ : courant de la diode 2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [3] :

$$I_{d1} = I_{01} \left( \exp \left( \frac{V}{A_{11} V_t} \right) - 1 \right) \quad (3-2)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left( \exp \left( \frac{V}{A_{22} V_t} \right) - 1 \right) \quad (3-3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (4-4)$$

$q$  : La constante de charge d'électron,  $1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .

$k$  : La constante de Boltzmann,  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ .

$I_{sh}$  : Est le courant de la résistance parallèle.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [7] :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( \exp \left( \frac{V + I.R_s}{V_t.A1} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{V + I.R_s}{V_t.A2} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (3-4)$$

$I_{01}$ : Courant de saturation de la diode 1.

$I_{02}$ : Courant de saturation de la diode 2.

$A1$  : Facteur d'idéalité de la diode 1.

$A2$  : Facteur d'idéalité de la diode 2.

$R_s$  et  $R_{sh}$  : Résistances série et shunt.

$N_s$  : Le nombre des cellules en série.

$V_t$  : La tension thermique de la cellule:

$$V_t = \frac{kT}{q}$$

Avec :

$T$  : La température ambiante en Kelvin.

$q$ : La Constante de charge d'électron,  $1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .

$k$  : La Constante de Boltzmann,  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ .

La bibliothèque « *Sim Electronics* » de l'outil Simscape (version R2015a) dispose d'un bloc nommé « *Solarcell* » destiné à la modélisation du circuit équivalent de la cellule solaire par le modèle à une diode ou à deux diodes. Le modèle utilisé au cours de cette étude est le modèle à deux diode, le bloc de la cellule solaire est donc défini par cinq paramètres qui sont :  $I_{ph}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_s$ , et  $N1$  et  $N2$ .

Pour bien illustrer cette démarche de modélisation, nous avons considéré une chaîne constituée de module type BP MSX 60. Le module est constitué de 36 cellules branchées en série aussi, et occupées par deux diode de by-pass. Premièrement, nous avons identifié les sept paramètres du modèle à deux diodes, par la méthode newton, pour remplir l'onglet des paramètres du bloc de la cellule solaire (figure 3.2). Un groupe de cellules est ensuite modélisé par l'arrangement en série de 18 blocs de cellules comme indiqué par la figure 3.3. Finalement, le modèle de la chaîne interconnecté avec les blocs nécessaires pour la simulation de la caractéristique I-V et P-V est donné par les figures ci-dessous.

<b>CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES</b>	<b>BP Solar MSX 60W</b>
-------------------------------------	-------------------------

Puissance maximale (PPPM) [W]	60
Tension au PPM (VPPM) [V]	16.8
Courant au PPM (IPPM) [A]	3.56
Tension en circuit ouvert (Voc) [V]	21
Courant de court-circuit (Isc) [A]	3.87
Nombre de cellules	36 cellules
Technologies de cellules	Poly C-Si

Tableau.3. 1. Caractéristiques électriques du module BP MSX 60

Dans cette architecture, les blocs essentiels que nous avons retenus sont : Un bloc de la source de tension pour varier la tension de 0 jusqu'à la tension du circuit ouvert, un bloc associé au capteur de l'éclairement pour spécifier les conditions de fonctionnement et deux blocs pour les capteurs du courant et de la tension.

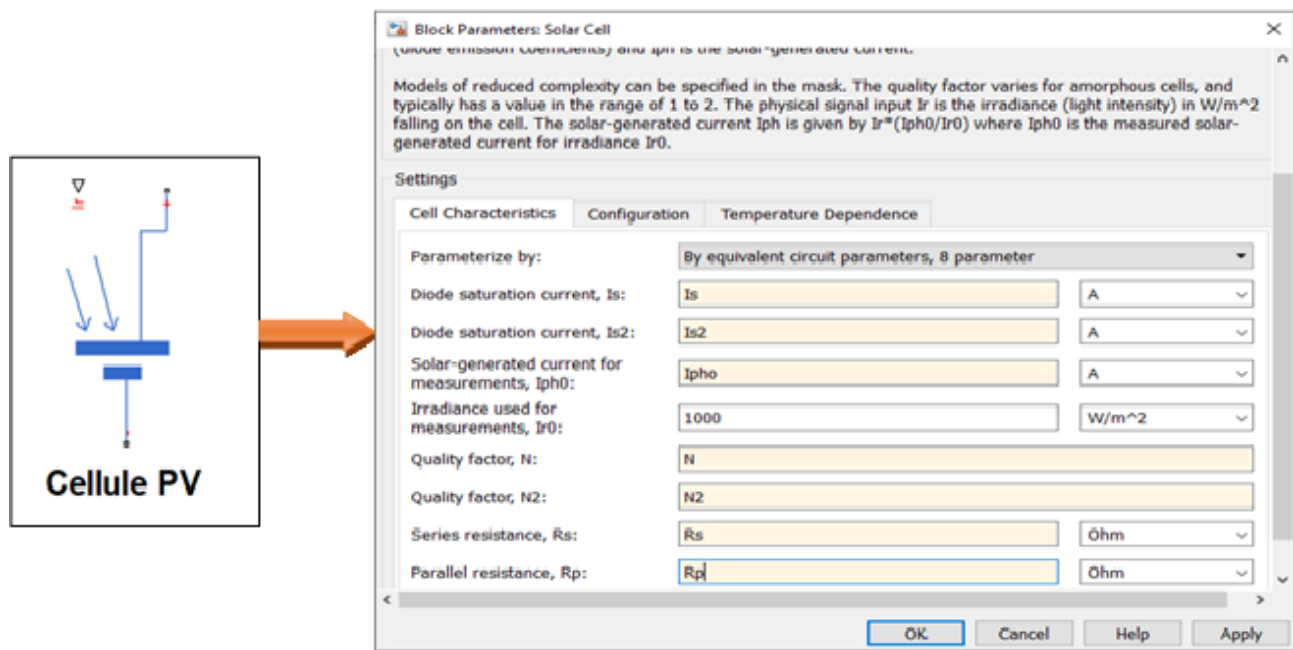


Figure.3. 2.Onglet de paramètres de la cellule solaire

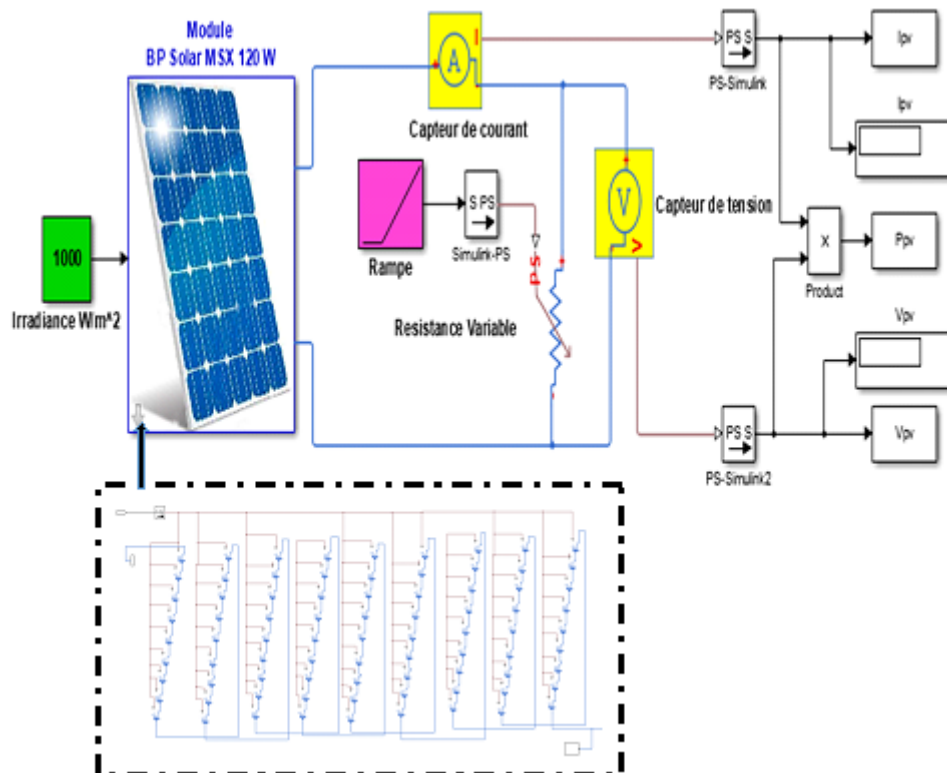


Figure.3. 3. Modélisation du module BP-MSX 60 par l'outil Simscape

### 3.2.1. Résultats et discussions

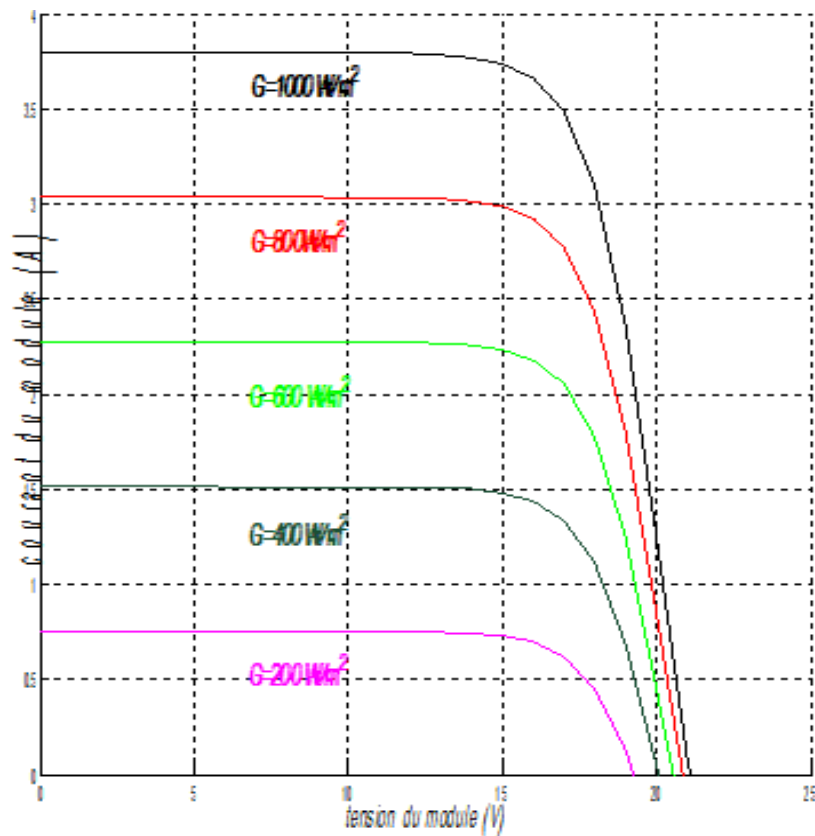
#### 3.2.1.1. Simulation L'influence des différents paramètres sur un module PV

Le modèle basé sur Simscape du module PV BP MSX 60 est utilisé pour simuler des différents paramètres (l'éclairement, température, la résistance série, la résistance parallèle et facteur d'idéalité) sur les caractéristiques I-V et P-V.

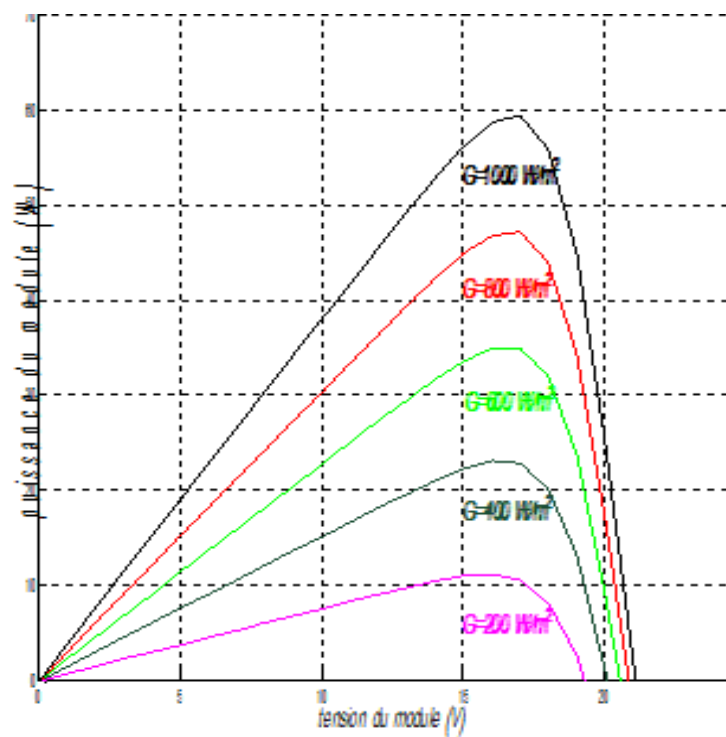
##### ❖ Simulation l'influence de l'éclairement

Tout d'abord, une température constante de 25 °C et différents niveaux d'éclairement (c'est-à-dire allant de 200 W/m<sup>2</sup> à 1 000 W/m<sup>2</sup> avec un pas de 100 W/m<sup>2</sup>) sont appliqués sur le module PV. Dans la figure (3.4), on peut observer que l'augmentation du niveau d'éclairement donne lieu à une augmentation du courant et de la puissance de sortie PV. La figure (3.4) présente les caractéristiques courant-tension et tension-puissance. On remarque que le courant du court-circuit est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert.





a-caractéristique  $I(V)$  du module

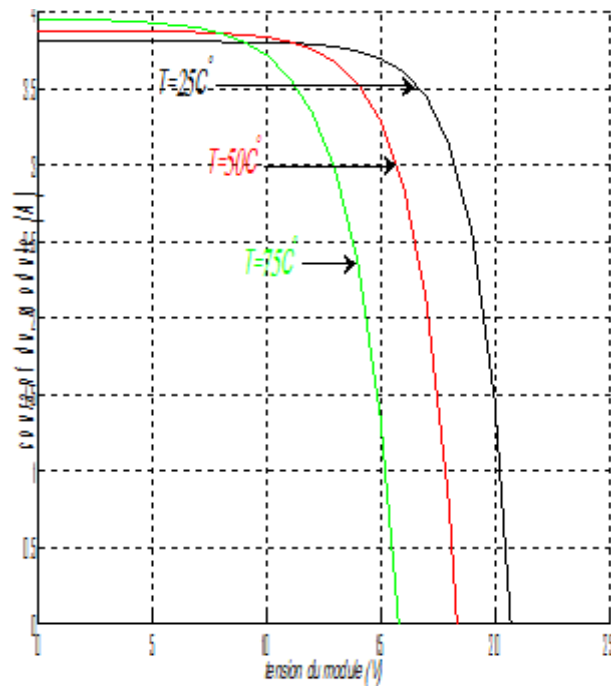


b-caractéristique  $P(V)$  du module

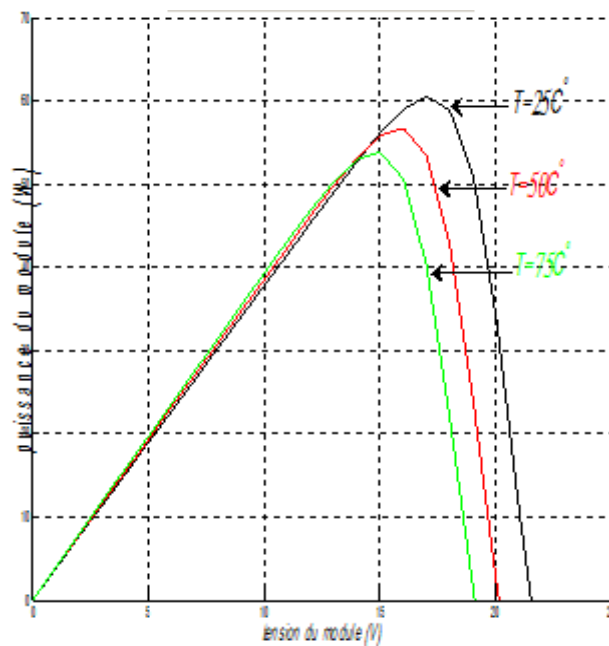
Figure.3. 4. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

### ❖ Simulation l'influence de la température

L'influence de la température est présentée dans la figure. Où l'irradiation est fixée à ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et différents niveaux de température (c'est-à-dire allant de  $25^\circ\text{C}$  à  $75^\circ\text{C}$  avec un pas de  $25^\circ\text{C}$ ) sont appliqués sur le module PV. Par conséquent, on peut noter qu'un niveau de température plus bas donne une tension de circuit ouvert plus grande et une puissance de sortie plus élevée.



a- Caractéristique I(V) du module



b- Caractéristique P(V) du module

Figure.3. 5. Influences de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

### ❖ Influence de la résistance série et la résistance parallèle

Sur la figure (3.6) on remarque que la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et le courant du court-circuit ( $I_{sc}$ ) Pas de changement, mais les propriétés se déforment rapidement sous l'action de. Cette effet provoque la diminution de la pente de la caractéristique I-V dans la région où la batterie agit comme une source de tension lorsque  $R_s$  augmente. L'augmentation de la résistance série à un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme ( $FF$ ) de la cellule.

On remarque sur la figure (3.7) illustre l'effet de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V. Aucune modification de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et le courant du court-circuit ( $I_{sc}$ ) n'est observée ; cependant, la déformation caractéristique est très rapide, cet effet se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension).

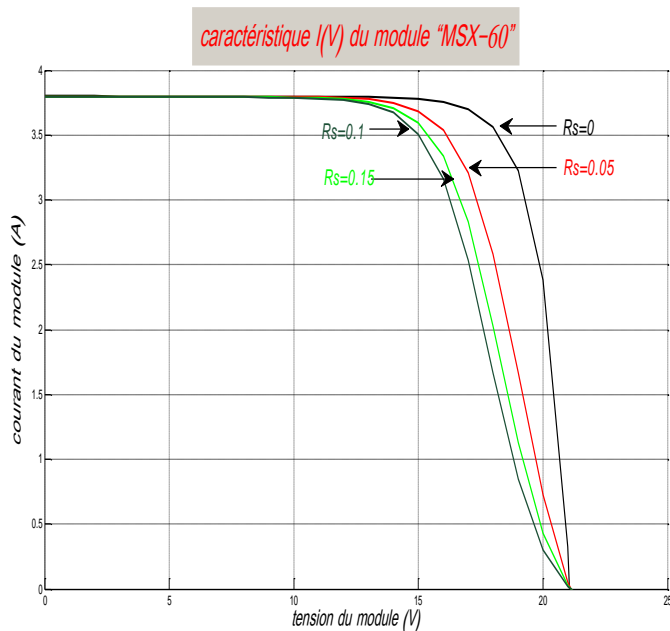


Figure.3. 6. Influence de la résistance parallèle

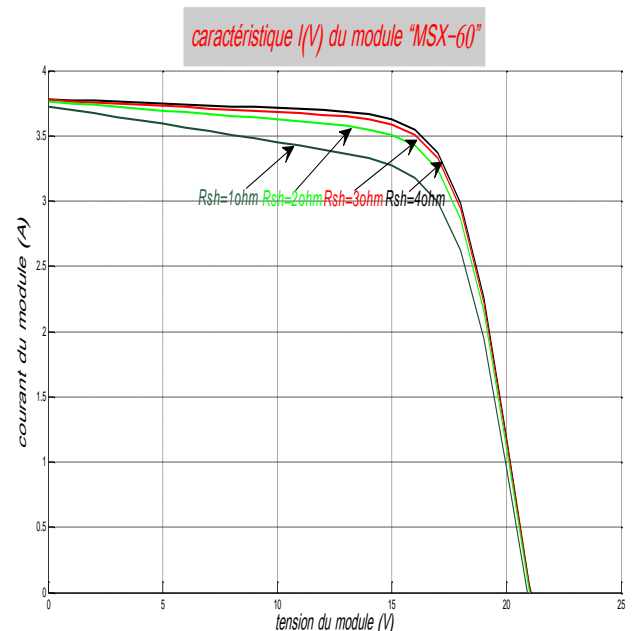


Figure.3. 7. Influence de la résistance série

### ❖ Influence du facteur d'idéalité (A)

Sur la figure (3.8) ci-dessous on remarque que L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

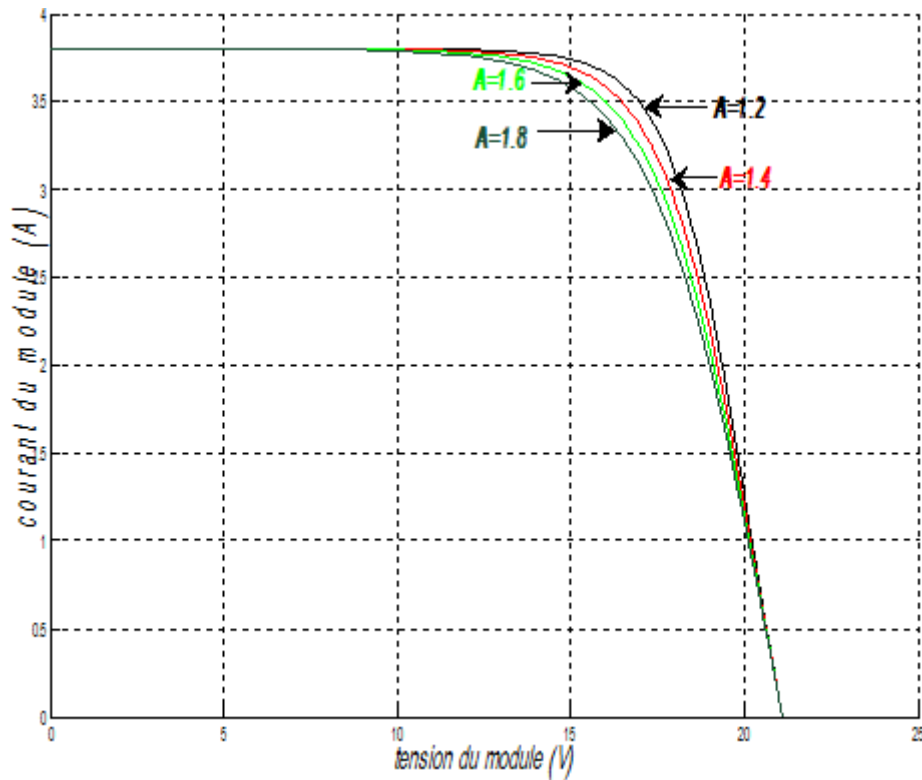


Figure.3. 8. Influence du facteur d'idéalité

### 3.3. Simulation d'un système PV raccordé au réseau électrique

Cette partie présente une approche plus simple pour modéliser un système photovoltaïque (PV) 100 kW connecté au réseau à l'aide de MATLAB/Simulink. Le modèle proposé se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un suiveur de point de puissance maximale, d'un convertisseur Boost, d'un onduleur et d'un filtre LC. L'impact de l'irradiation solaire et de la température sur la production d'énergie globale d'un système PV connecté au réseau a été étudié. Le contrôle pour maintenir une tension constante à la sortie de l'onduleur et pour la synchronisation de la fréquence de sortie avec le réseau électrique public, une boucle à verrouillage de phase et des régulateurs ont été conçus et modélisés. La méthode de modélisation est assez simple et peut être adoptée facilement pour étudier les caractéristiques du système dans différentes conditions de température et d'ensoleillement.

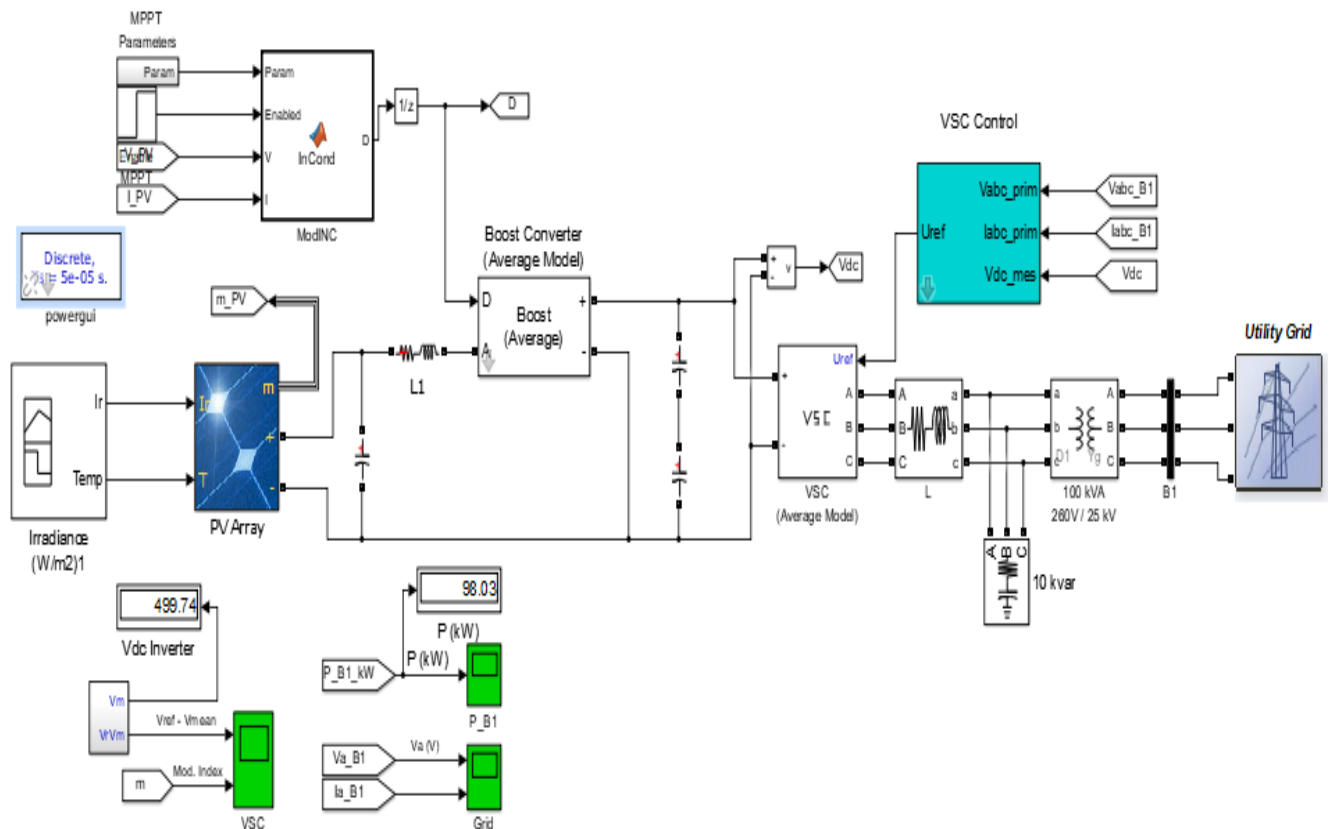


Figure.3. 9. Simulation système PV raccordé au réseau électrique

### 3.3.1. Simulation du système PV connecté au réseau par la commande MPPT

Dans cette partie, nous allons simuler un système PV connecté au réseau par la commande de deux méthodes MPPTs :

- a) Méthode de la perturbation et d'observation (P&O) [4].
- b) Méthode d'incrémentation de la conductance (In Cond) [33].

#### 3.3.1.1. Simulation du système PV connecté au réseau par la commande (P&O)

La méthode P&O est une approche qui est largement utilisée par rapport aux autres méthodes MPPTs qui existent parce qu'elle est simple. En effet, elle n'exige que la mesure de  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$ . Cette méthode peut dépister le point de puissance maximum de manière exacte malgré les variations d'éclairement et de température.

D'un autre côté, la méthode de perturbation et observation est toujours le plus utilisé dans l'industrie grâce à sa faible complexité et sa facilité d'implémentation. Comme son nom l'indique, elle fonctionne en perturbant le système soit en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module, puis en observant son effet sur la puissance de sortie du GPV. À chaque cycle, les valeurs de la tension  $V_{PV}(n)$  et du courant  $I_{PV}(n)$  sont mesurés pour calculer la

puissance  $P_{PV}(n)$ . Cette valeur de puissance  $P_{PV}(n)$  est comparée à la valeur  $P_{PV}(n-1)$  calculée au cycle précédent. Si la puissance obtenue a augmenté, la tension est ajustée dans le même sens que dans le cycle précédent. Si la puissance obtenue a diminué, la tension est ajustée dans le sens opposé comme dans le cycle précédent. La tension est ainsi perturbée à chaque cycle MPPT. L'inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions climatiques

Figure (3.10) est une description Bloc de simulation de contrôle de suivi de perturbation et d'observation (P&O).

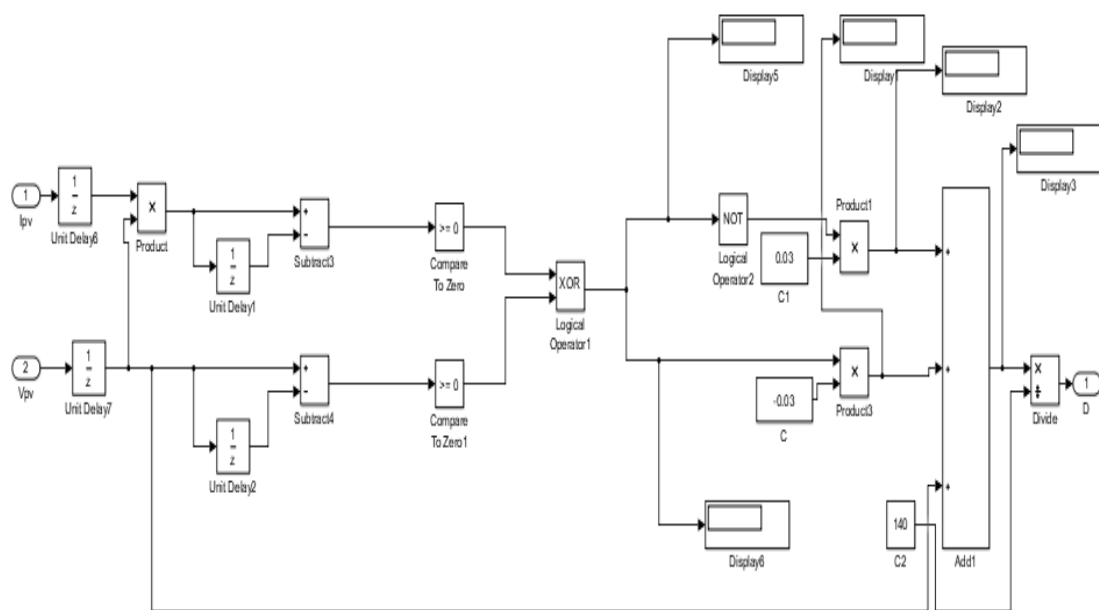


Figure.3. 10. Simulation de la commande de perturbation et d'observation (P&O)

Dans cet essai, différents changements d'échelon d'irradiation et de la température sont introduits. D'après la simulation de notre système PV connecté en réseaux électrique par la commande P&O, Les résultats obtenus par la méthode P&O sont présentés dans la figures ci-dessous.

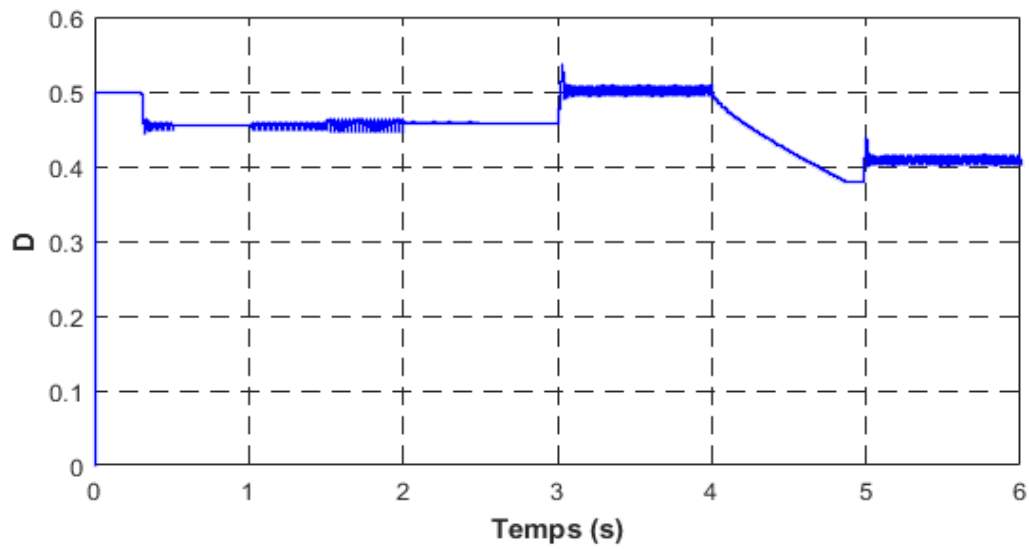


Figure.3. 11. Rapport cyclique de command l'élévateur parallèle.

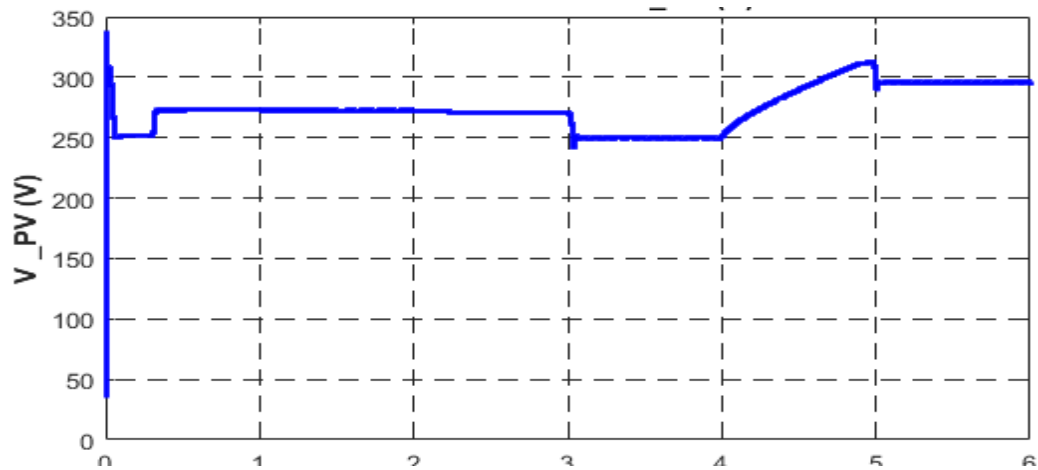


Figure.3. 12. La tension de sortie de générateur PV

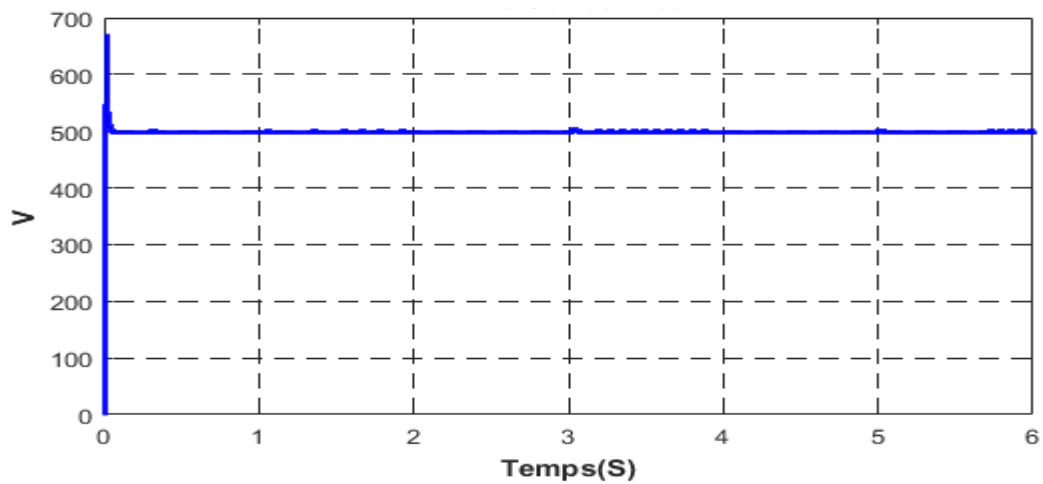


Figure.3. 13. tension de sortie de l'élévateur parallèle

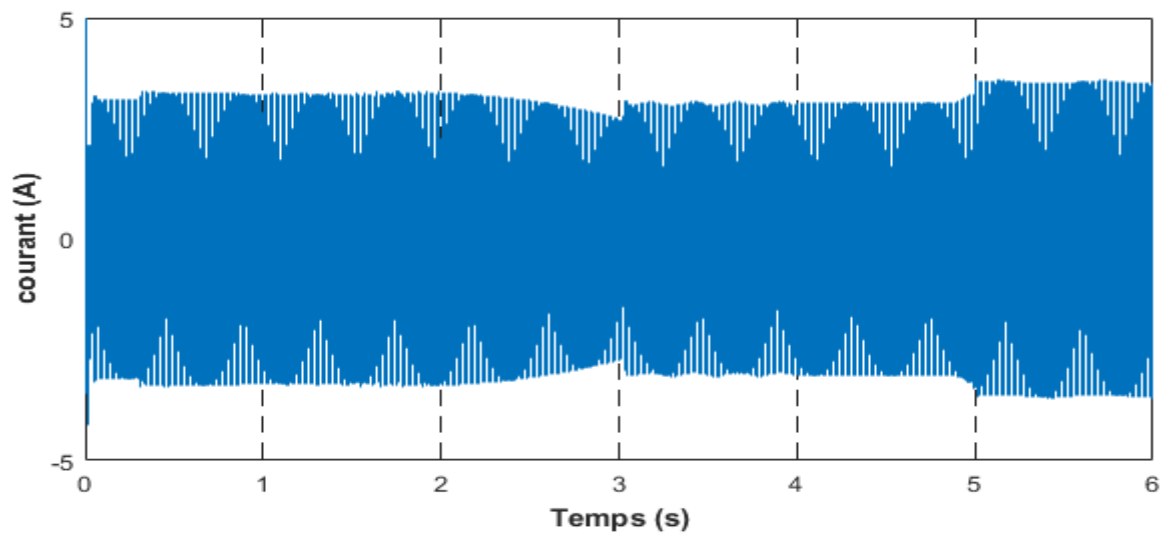


Figure.3. 14. Courant injecté au réseau par la méthode (P&O)

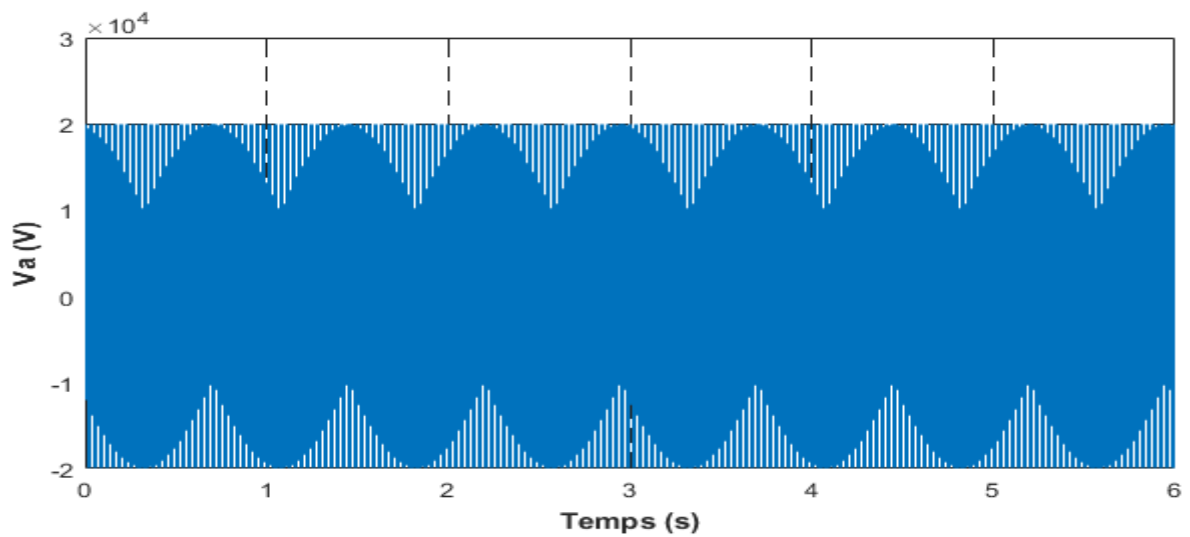


Figure.3. 15. Tension injectée au réseau par la méthode (P&O)

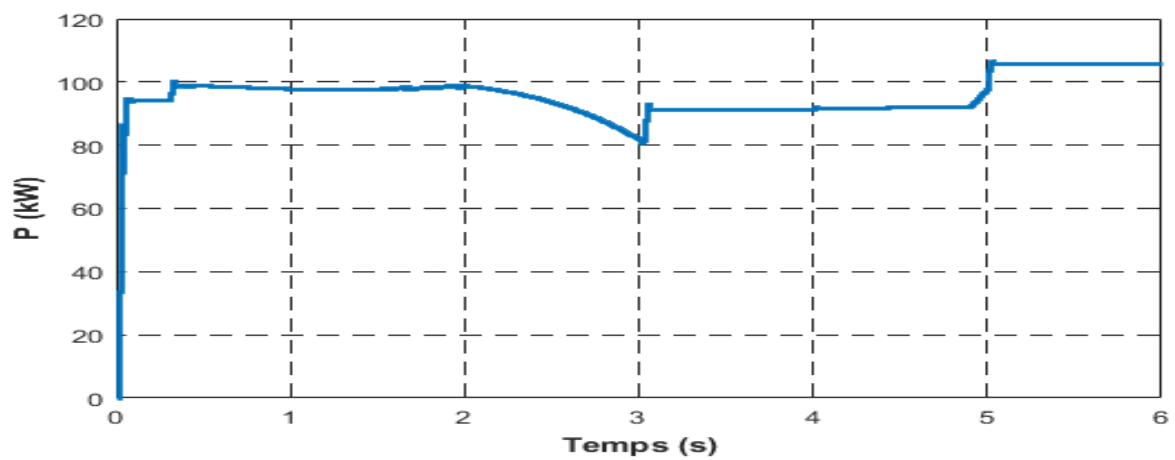


Figure.3. 16. Puissance injectée au réseau par la méthode (P&O)



Les figures ci-dessus montrent les résultats de la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau commandé par la méthode de la perturbation et d'observation (P&O). Ces résultats représentent le rapport cyclique  $D$ , la tension et la puissance générée par le générateur photovoltaïque, le courant, la tension, et la puissance injectée au réseau électrique, ainsi que la tension de sortie de l'élévateur parallèle.

Selon la figure (3.13) on remarque que l'élévateur parallèle fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

On remarque sur les résultats de simulation lorsqu'il y a un changement d'irradiation et de température, le point de fonctionnement s'éloigne du point de la puissance maximale. Étant donné que MPPT est assez rapide, il reviendra à la bonne orientation après un certain temps.

### **3.3.1.2. Simulation du système PV connecté en réseaux par la commande (In Cond)**

La méthode de d'incrémentation de la conductance (In Cond) se base sur un algorithme qui a été développé en 1995. Elle est également fondée sur principe stipulant que la dérivée de puissance de sortie  $P_{PV}$  par rapport à la tension du panneau  $V_{PV}$  doit être égale à zéro au point de puissance maximal PPM. La caractéristique (P-V) d'un générateur PV montrent qu'à gauche du PPM la puissance augmente avec la tension. Ce qui veut dire que  $\frac{dP}{dV} > 0$ , est alors à droite du point. Dans ce cas, la puissance baisse au fur et à mesure que la tension augmente, soit  $\frac{dP}{dV} < 0$ . Mathématiquement parlant; cela peut s'écrire par le biais des équations suivant:

Ces relations peuvent encore être exprimée en termes de courant et de tension du panneau par :

Et pour garder  $\frac{dP}{dV} = 0$ , on doit avoir :

La dernière équation fournit suffisamment d'information pour déterminer l'emplacement relatif du PPM, et cela en mesurant la conductance incrémentale et instantanée du panneau :  $G_{inc}$  et  $G_{inst}$ , respectivement. La méthode In Cond est facile à implémenter et largement utilisée. Elle vient remédier au problème de la divergence de la P&O dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement

Figure (3.17) illustre le bloc de la simulation de la commande de poursuite de méthode d'incrémentation de la conductance (In Cond)

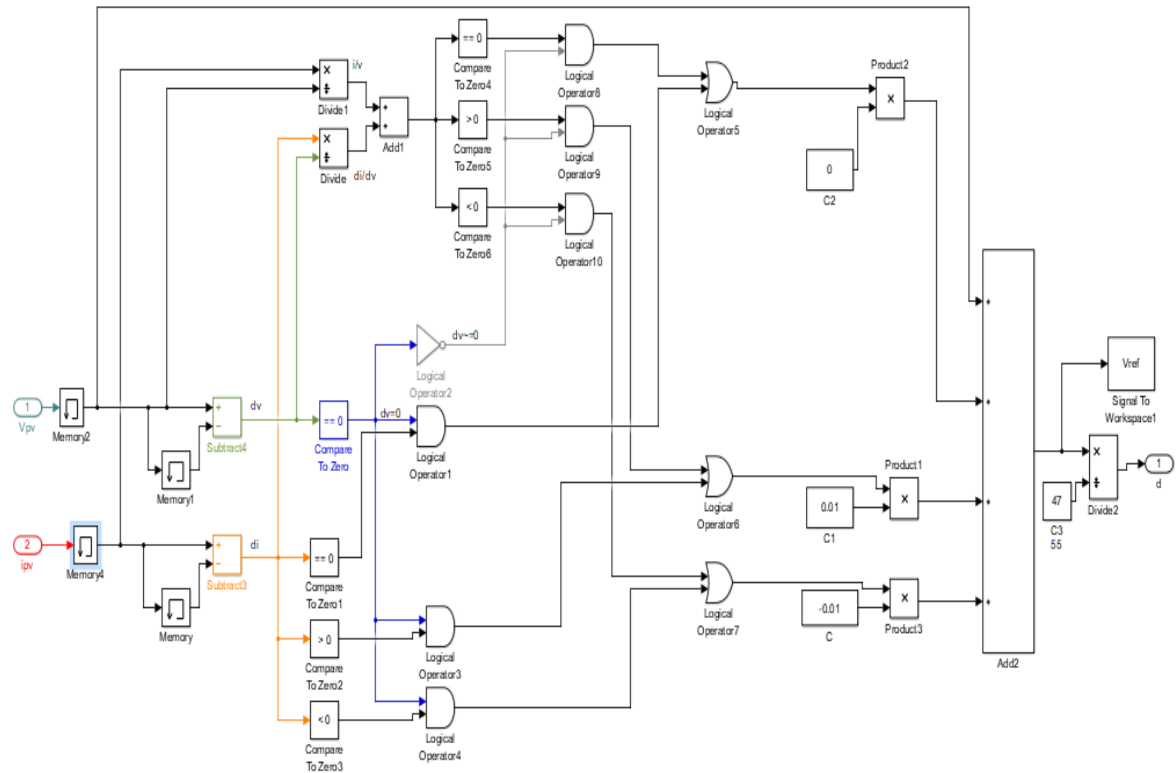


Figure.3. 17. Simulation de la commande d'incrémental de la conductance (In Cond)

Dans cet essai, différents changements d'échelon d'irradiation et de la température sont introduits (les mêmes conditions climatiques qui nous utilisons avec la méthode P&O). D'après la simulation de notre système PV connecté en réseaux électrique commander par la méthode (In Cond), Les résultats obtenus par la méthode (In Cond) sont présentés dans la figures ci-dessous

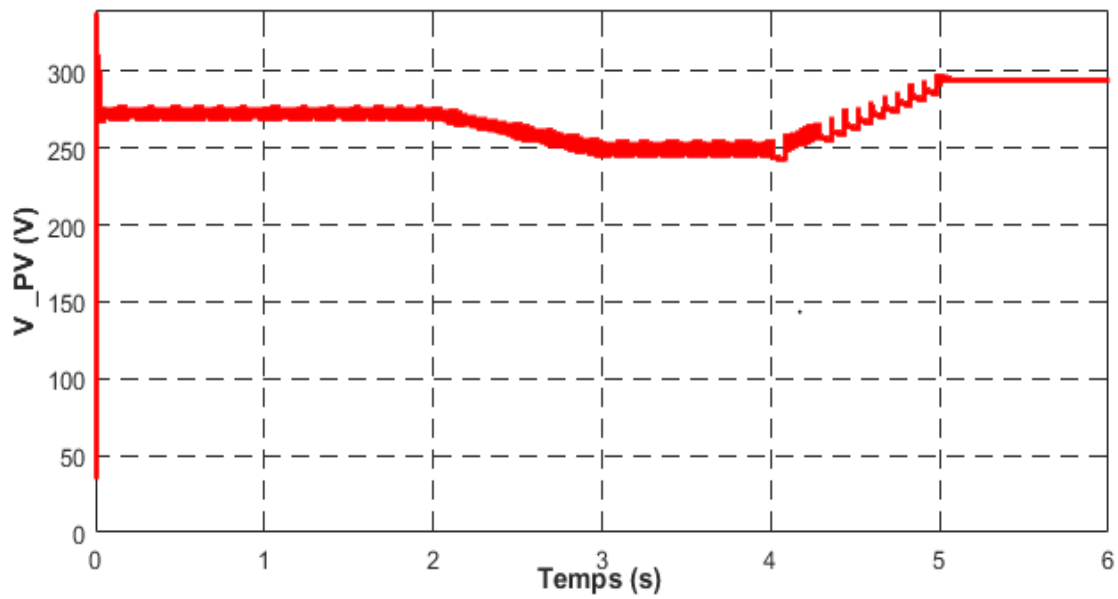


Figure.3. 18. tension de générateur PV par la méthode In Cond

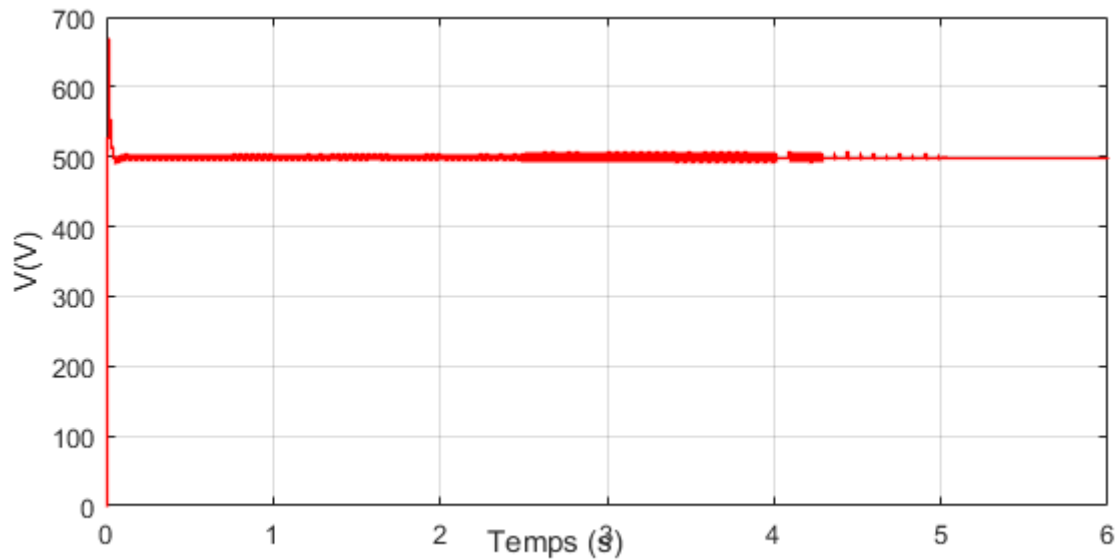


Figure.3. 19. tension de sortie de l'élévateur parallèle par la méthode In Cond

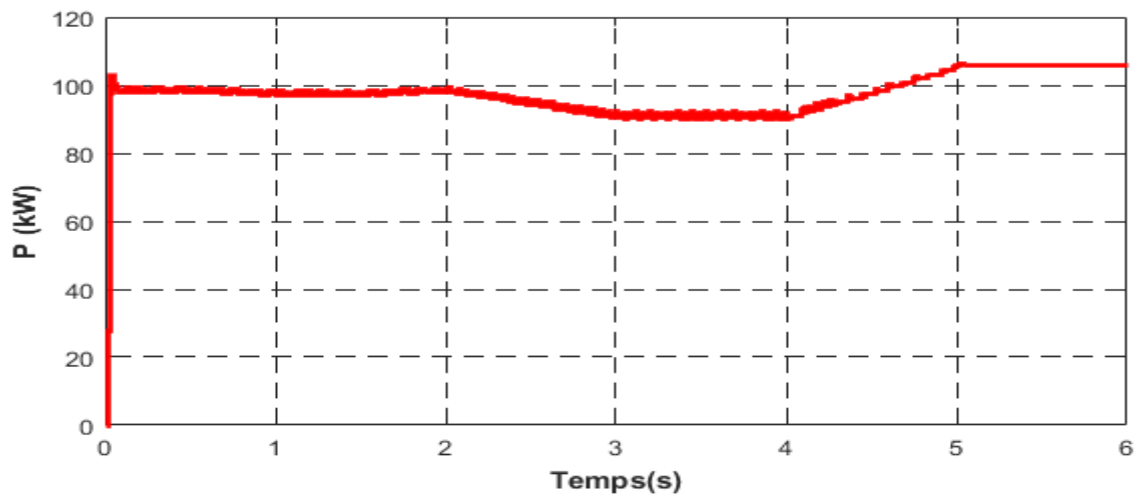


Figure.3. 20. puissance de générateur PV par la méthode (In Cond)

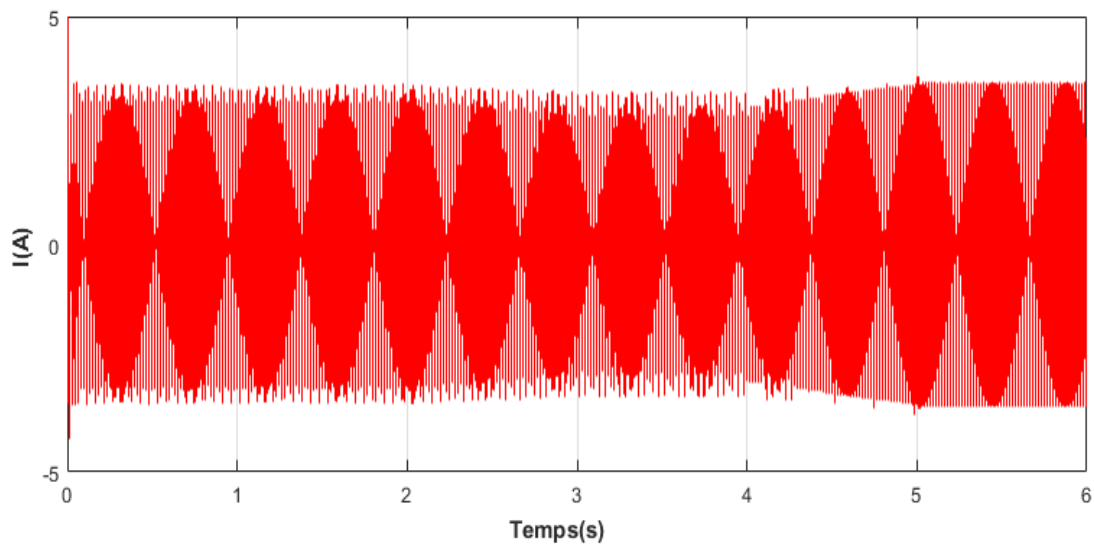


Figure.3. 21. courant injecté au réseau par la méthode (In Cond)

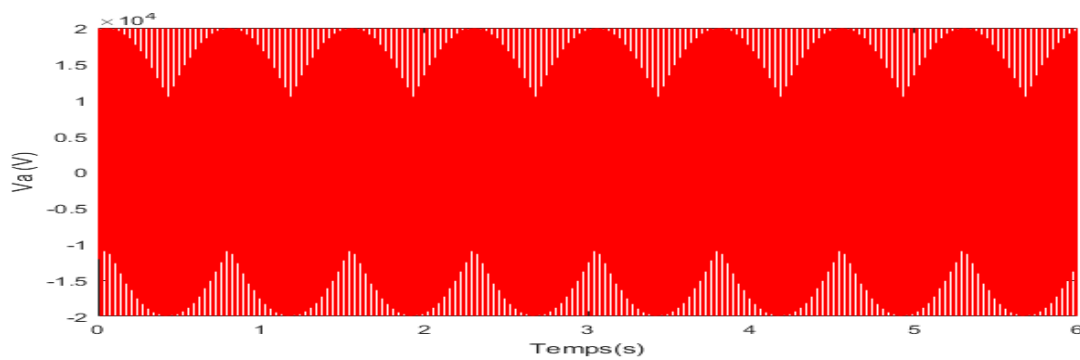


Figure.3. 22. tension injectée au réseau par la méthode (In Cond)

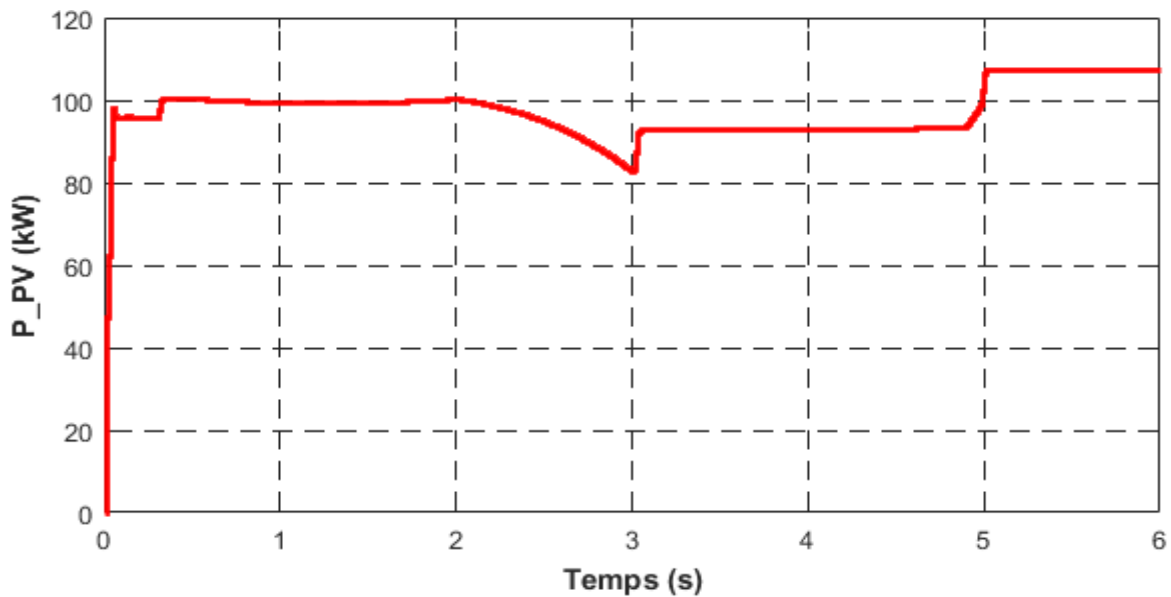


Figure.3. 23. puissance injectée au réseau par la méthode (In Cond)

Les figures ci-dessus montrent les résultats de simulation du système photovoltaïque connecté au réseau commandé par la méthode d'incrémentation de la conductance (In Cond). Ces résultats représentent le rapport cyclique  $D$ , la tension et la puissance générée par le générateur photovoltaïque, le courant, la tension, et la puissance injecte au réseau électrique, ainsi que la tension de sortie de l'élévateur parallèle.

Pour différentes valeurs d'éclairement et températures, les résultats obtenus avec la commande P&O sont meilleurs que ceux obtenus avec la commande In Cond. Il a été démontré que ce dernier a de meilleures performances, un temps de réponse rapide et une très faible erreur en régime permanent, et est robuste aux conditions atmosphériques changeantes.

#### ❖ Comparaison entre les méthodes MPPTs (P&O et In Cond)

Afin d'obtenir une bonne caractérisation de la topologie proposée, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Le système a été simulé dans différentes conditions de fonctionnement provoqué par les variations du rayonnement solaire et la valeur de degré de température. Les techniques P&O et In Cond sont les plus largement utilisées en raison de la simplicité de mise en œuvre.

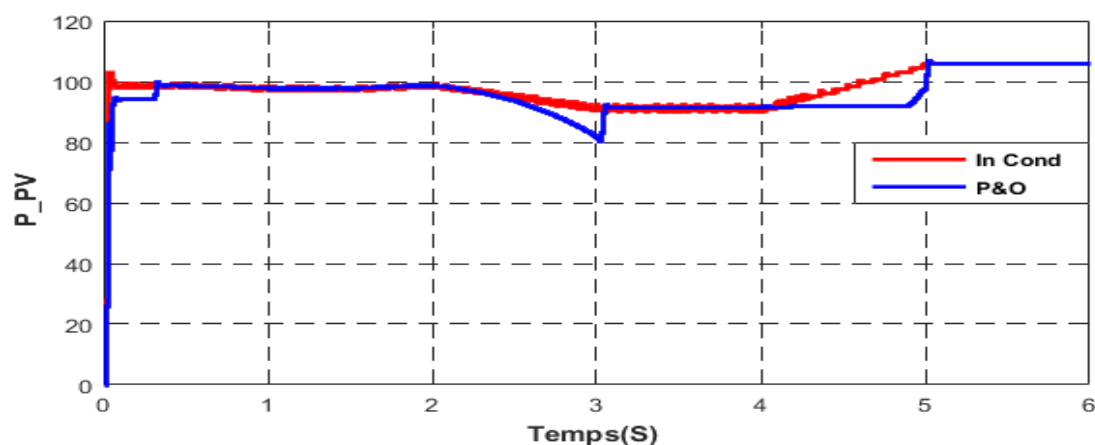


Figure.3. 24. puissance de générateur PV par les deux méthodes MPPTs

Selon la figure (3.24) on remarque la méthode In Cond plus rapide que la méthode P&O, le temps de convergence de ces méthodes égal 0.2 et 0.5 seconds respectivement. On observe aussi que lorsqu'il y a un changement d'irradiation la méthode in Cond converge rapidement vers le point de puissance maximale, en revanche on remarque qu'il y a dès l'oscillation autour de PPM dans la méthode P&O moins que la méthode In Cond. La figure (3.24) montre que les deux méthodes MPPTs permettent d'extraire le maximum de puissance sous différentes irradiances.

Le tableau (3.2) présente une comparaison entre deux méthodes MPPTs selon leur niveau de complexité, le temps de convergence, l'efficacité, Suivie avec variation brusque d'irradiation, fiabilité et l'Oscillation au PPM. Comme le montre les résultats présentés au tableau (3.2), les deux méthodes MPPTs fournissent un suivi du PPM et améliorent considérablement l'efficacité du système PV.

Critères	Méthode (P&O)	Méthode (In Cond)
Complexité	Simple	Moyenne
Efficacité	Faible	Moyenne
Précision du contrôle	Moyenne	Moyenne
Oscillation autour de PPM	Existe	Néglige
Suivie avec variation brusque d'irradiation	Non capable	Capable
Fiabilité	Faible	Moyenne

Tableau.3. 2. Comparaison entre deux méthodes MPPTs

### **3.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé une chaîne PV, sous l'outil de simulation Simscape en se basant sur le modèle à deux diodes de la cellule solaire. Nous avons ensuite présenté l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques I-V et P-V. Le but de MPPT est d'extraire la puissance de haut niveau des systèmes PV. Ce chapitre présente une de deux méthodes classiques. À partir de là, il est clair que chaque méthode MPPT a ses propres avantages et inconvénients. De plus, le MPPT devrait être capable de minimiser l'ondulation autour du MPP. Deux méthodes MPPTs sont comparées sur la base de simulations dans l'environnement Simulink en termes de temps de convergence du système PV et de considérations d'efficacité et de mise en œuvre. Par conséquent, les deux algorithmes de conductance incrémentielle (IncCond) et P&O sont simples à mettre en œuvre, mais ils présentent certains inconvénients. Ces deux méthodes ont été évaluées en simulant un système PV connecté au réseau, utilisant un hacheur élévateur Dc/Dc pour connecter le panneau PV au réseau. En particulier, les performances de chaque méthode ont été considérées sur une large gamme de conditions d'irradiation différentes.

## Conclusion Générale

Cette étude nous a permis de contrôler la gestion de l'intégration des énergies renouvelables au réseau triphasé et de déterminer comment affecter l'impact de l'énergie photovoltaïque sur le réseau.

Nous présentons des méthodes MPPT pour modéliser et simuler des systèmes photovoltaïques contrôlés de deux manières : incrément de conductance (IncCond) et méthode de perturbation et d'observation (P&O).

Avec les résultats obtenus, nous pouvons :

- La méthode In Cond plus rapide que la méthode P&O.
- la méthode in Cond converge rapidement vers le point de puissance maximale lorsqu'il y a un changement d'irradiation.
- Il y a dès l'oscillation autour de PPM dans la méthode P&O moins que la méthode In Cond.
- Les deux méthodes MPPTs fournissent un suivi du PPM et améliorent considérablement l'efficacité du système PV.
- Les performances du générateur photovoltaïque ont été évaluées selon des conditions standard (CST) : éclairement  $1000\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ .

Le développement de la capacité de production d'électricité photovoltaïque s'accompagne du développement des performances des panneaux solaires, notamment en termes de puissance et de réduction de puissance avant que la température n'augmente.



## Références bibliographiques

- [1] H.J. WAGNER. Livre "Energy Technologies", C : RenewableEnergy, 2010.
- [2] Ghaleb Fatiha, Bendjbar Kamel et Houari Souad, "Lumière et Cellule Solaire", Polycopie Travaux Pratique, Destiné aux étudiants en 3<sup>ème</sup> Année Licence, Option : Energie Renouvelable, Faculté de Physique, Département de Physique Energétique, Université d'Oran des Sciences et de la Technologie, (2015-2016).
- [3] A. ARBAOUI « Aide à la décision pour la définition d'un système Eolien adéquation au site et à un réseau faible ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2006.
- [4] Surajkumar (2022) MPPT (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/76826-perturb-and-observe-mppt>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved September 2, 2022.
- [5] Zerguine Bilal, "Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université BadjiMoktar Annaba, (2010).
- [6] Berrezzoug Hanane, «Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université Dr Moulay Tahar de Saida, (2016).
- [7] Débile Mariamne, "Etude et optimisations en environnement d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister en Electronique, Université Constantine I, (2015).
- [8] Salam Fatah, "Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecté au réseau électrique", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif-UFAS, (2011).
- [9] CharafEddine HAMADA and Med Nadjib MECHALIKH. " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau", Mémoire de Mastère, Université KASDI Merbah, Ouargla, Algérie, 2012.
- [10] Mohamed Lakhdar LOUAZENE. "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla". Thèse de doctorat, Université de Batna, 2008.
- [11] THI THU HA PHAM " influence de la production sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissances ".Thèse De doctorat INPG, 2006.
- [12] L.CHIALI " Contrôle des dispositifs FACTS appliqués au réseau Ouest -Algérien", thèse de Doctorat, Université USTO, 2010.
- [13] A.HAMMOUD "Etude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination des réseaux de distribution", Thèse de Doctorat, Université LYON, 2010.
- [14] T. WILDI, G. SYBILLE "ELECTROTECHNIQUE ", 4<sup>ème</sup> édition .2005

[15] Hristiyan KANCHEV. " Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2014.

- [16] Boris BERSENEFF. " Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur". Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [17] S. Heier, " Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", 2nd ed. Wiley, ISBN: 0-470-86899-6, 2005.
- [18] CharafEddine HAMADA and Med Nadjib MECHALIKH."Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau". Mémoire de Mastère, Université KASDI Merbah, Ouargla, Algérie, 2012.
- [19] Mohamed Mehdi AOUI. "Etude d'impact d'intégration 2200MW photovoltaïque dans le système électrique national à l'horizon 2020". Mémoire de magister. Université USTHB, Algérie, 2008.
- [20] Arrêté du 23.04.2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricités en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique
- [21] le cabinet Fractal. "Enjeux relatifs au raccordement des installations photovoltaïques aux réseaux publics de distribution". Le Syndicat des énergies renouvelables, 2010.
- [22] H.CAMBLONG " Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolien dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ". Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers2003.
- [23] Union Technique de l'Electricité et de la Communication, NF EN 50 160: "Caractéristiques de la tension à fournie par les réseaux publics de distribution ". Norme NF EN 50 160 -mai 2000, éditée par l'Union Technique de l'Electricité et de la Communication, BP 23, 92262 Fontenayaux-Roses Cedex.
- [24] G. STRBAC, N. JENKINS, M. HIRD, AND AIL. "Integration of operation of embedded generation and distribution networks ", Mai, 2002.
- [25] J. MARTIN. "Énergies éoliennes ", Ingénieur de l'École nationale supérieure des arts et métiers, Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie énergétique.
- [26] D. LE GOURIERES. "Eolienne: Théorie conception et calculs pratiques des installations", Edition Evrolles, Energie, 2012.
- [27] H.J. WANGER. «Livre Energy Technologies», C: RenewableEnergy.
- [28] F.DIOP "Physics and Engineering (EOBE) ", Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2018.
- [29] Dragan S. Markovic et al. "Smart power grid and cloud computing". In :Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013).

- [30] YasinKabalciErsanKabalci. "Modeling and analysis of a smart grid monitoring system for renewable energy sources".mémoire de magister, (2017).
- [31] Stuart Borlase.Smartgrids : " infrastructure, technology, and solutions. CRC press", 2016.
- [32] H.Farhangi. "The path of the smart grid".In : IEEE Power and Energy Magazine 8.1 (2010).
- [33] NIAZ ALI (2022). Incremental Conductance MPPT for Solar PV array with Boost converter (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67012incremental-conductance-mppt-for-solar-pv-array-with-boost-converter>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved September 2, 2022.