

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A. MIRA-BEJAIA**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie électrique**

# **Projet de Fin d'étude**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Option : Electromécanique**  
**Thème**

---

## **Impacts d'intégration des énergies renouvelables sur le réseau électrique domestique**

---

**Réalisé par :**

Mr BOUHAMOUCHE ANIS

Mr FERDJELLAH ALI

**Membres du jury :**

Président : Mr FELLA

Promoteur Mr DEJRMOUNI Kamel

Examineur Mm OUZELLAG

**Promotion 2021**

## REMERCIEMENT

*Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la santé et la volonté d'entamer ce mémoire.*

*Nous tenons d'abord à remercier infiniment notre promoteur, « **DJERMOUNI Kamel** », pour ses encadrements et ses constantes orientations de notre recherche en y accordant une méticuleuse attention, ainsi que pour ses judicieux conseils, concernant l'aspect rédactionnel, qui ont contribué à alimenter notre réflexion, leurs disponibilités et leurs extrêmes amabilités malgré leurs grandes charges de travail.*

*On tient à remercier aussi le président de jury Monsieur « **FELLA** », aussi que Madame « **OUZELLAG** » Pour avoir accepté de traiter et d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont permis que ce travail voie le jour de près ou de loin. Qu'elles soient rassurées de notre profonde reconnaissance.*

## DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes très chers parents, qui sont la source de lumière qui  
m'éclaire depuis ma naissance*

*Ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes les étapes  
de ma vie.*

*Mon cher père, à qui j'exprime mes sincères et éternelles  
gratitudes pour son attention et son soutien*

*A mes chers frères : Messaoud. Sara ; Nélia ; Thinyouren ;  
Mohammed*

*A mes ami(e)s (Lahna Faouzi, Zaki, Nadji.Machouche,  
Ghazi.Bouhamouche, Zinedine, abdesslame, Toufik mob, Zineb,  
Kamel, Syphax..., et tous les résidents de la R.U. Iryahen).*

## DEDICACES

*Avec une pensée profonde que je dédie ce travail*

*A mes très chers parents qui m'ont vivement soutenu et encouragé tout au long de mon parcours d'études et toute ma vie.*

*Ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes les étapes de ma vie.*

*Mon cher père, à qui j'exprime mes sincères et éternelles gratitude pour son attention et son soutien.*

*A mes très précieux grands-parents, et toute ma famille.*

*A mes chers sœurs et frères.*

*A ma grand-mère que j'aime.*

*A mon grand-père que j'aime.*

# Table des matières

REMERCIEMENT .....	I
DEDICACES .....	II
DEDICACES .....	III
Table des matières.....	IV
Table de figure .....	VII
Liste des tableaux.....	VII
Liste des abréviations.....	VIII
Liste de nomenclature .....	IX
Introduction générale .....	1
Introduction .....	3
I.1 Les différents types des énergies renouvelables .....	3
I.1.1 Énergie éolienne .....	3
I.1.2 Énergie hydraulique.....	5
I.1.3 Biomasse .....	7
I.1.4 Energie géothermique.....	7
I.1.5 Énergie solaire.....	8
I.2 Technologies des énergies solaires .....	9
I.2.1 Solaire à concentration thermodynamique.....	9
I.2.2 Solaire thermique.....	9
I.3 Energie photovoltaïque.....	10
I.3.1 Différents types des systèmes photovoltaïques .....	11
I.4 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables .....	13
I.4.1 Avantages .....	13
I.4.2 Inconvénients.....	13
Conclusion.....	14
Introduction .....	15
II.1 Energie solaire en Algérie .....	16
II.1.1 Situation énergétique en Algérie .....	16
II.1.2 Développement des énergies renouvelables en Algérie .....	16
II.2 Potentiel solaire.....	17
II.3 Energie éolienne en Algérie .....	19

II.3.1 Ressources en énergies éolienne.....	19
II.3.2 Les vents en Algérie .....	21
Conclusion.....	21
Introduction .....	23
III.1 Impact de la production sur le réseau .....	23
III.2 Impact sur le sens de transit de puissance .....	25
III.3 Impact sur la stabilité du système .....	25
III.4 Impact sur la qualité de service .....	25
III.5 Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système .....	26
III.6 Impact sur la continuité de service.....	26
III.7 Découplage des sources auto-productrices.....	26
III.8 Impact sur le plan de protection .....	27
III.8.1 Courant de court-circuit .....	27
III.8.2 Influence sur la sélectivité des protections .....	27
III.9 Impact sur la tenue de fréquence.....	28
III.10 Impact sur la tenue de tension .....	28
III.11 Harmoniques.....	28
III.12 Îlotage.....	29
Conclusion.....	29
Introduction .....	30
IV.1 Structures de Réseaux Electriques .....	30
IV.2 Organisation d'un réseau électrique.....	31
IV.2.1 Réseaux de transport et d'interconnexion.....	31
IV.2.2 Réseaux de répartition .....	32
IV.2.3 Les réseaux de distribution .....	33
IV.3 Modélisation Des Composantes Du Réseau Electrique .....	33
IV.3.1 Modélisation des générateurs [34] .....	33
IV.3.2 Modélisation de la ligne [35] .....	34
IV.3.3 Modélisation des transformateurs [35].....	35
IV.3.4 Modélisation d'une charge [35] .....	36
IV.4 Détermination de la matrice admittance [35].....	36
IV.5 Calcul des courants [35] .....	37
IV.6 Principe de l'écoulement des puissances [35].....	38
IV.6.1 Classification des nœuds dans un réseau électrique .....	39
IV.6.2 Notion de l'écoulement de puissances .....	40
IV.6.3 Formulation du problème de l'écoulement de puissances [35] .....	40



IV.7 Modélisation du générateur photovoltaïque [36] .....	41
IV.7.1 Modèle à deux diodes [37].....	41
IV.7.2 Algorithme « perturbation et observation » ( <i>P&amp;O</i> ).....	43
IV.8 Intégration du système photovoltaïque au réseau électrique triphasé.....	46
IV.8.1 Schéma global de l'intégration .....	46
IV.8.2 Algorithme d'équilibrage et de raccordement.....	48
IV.9 Simulation et interprétation des résultats .....	49
IV.9.1 En conditions parfaites.....	50
IV.9.2 Avec perturbations.....	51
IV.9.3 Cas de coupure de réseau.....	54
Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57
Bibliographie .....	XI
Résumé .....	XIV

## Table de figure

<b>Figure I. 1</b> Schéma de différentes énergies renouvelable.....	3
<b>Figure I.2</b> Champ des éoliennes .....	4
<b>Figure I.3</b> Energie hydrolienne.....	5
<b>Figure I.4</b> Energie marémotrice .....	6
<b>Figure I.5</b> Barrages hydraulique.....	6
<b>Figure I.6</b> Energie de la biomasse. ....	7
<b>Figure I.7</b> Energie géothermie.....	8
<b>Figure I.8</b> Schéma d'absorption des rayons solaires .....	8
<b>Figure I.9</b> Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique chauffe-eau solaire.....	10
<b>Figure I. 10</b> Energie solaire (PV) .....	11
<b>Figure I. 11</b> Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....	12
<b>Figure I. 12</b> Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau .....	12
<b>Figure I. 13</b> Installation ou centrale électrique photovoltaïques hybride .....	13
<b>Figure II. 1</b> Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie. ....	16
<b>Figure II. 2</b> Irradiation globale et durée d'ensoleillement annuel en Algérie .....	18
<b>Figure II. 3</b> Ferme éolienne de Kabertène à 75 km au nord-est d'Adrar. ....	20
<b>Figure II. 4</b> Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) .....	21

## Liste des tableaux

Tableau II. 1 Potentiel solaire dans l'Algérie.....	18
Tableau IV. 1 Différents niveaux de tension.....	31
Tableau IV. 2 Types des nœuds .....	39



## Liste des abréviations

<b>EST</b>	Energies Solaires thermiques
<b>ASA</b>	Agence Spatial Allemande
<b>HT</b>	Haut Tension
<b>BT</b>	Basse Tension
<b>CDER</b>	Centre De Développement Des Energies Renouvelables
<b>DC/AC</b>	Direct Courant /Alternatif Courant
<b>DLR</b>	Centre Allemand de Recherche aérospatiale
<b>ENR</b>	Energies Nouvelles ou Renouvelables
<b>GED</b>	Génération D'Energie Dispersée (Distribuée)
<b>MPPT</b>	Recherche Du Point De La Puissance Maximal
<b>ONM</b>	Office National De Météorologie
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>SAT</b>	La Superficie Agricole Totale
<b>SAU</b>	La Superficie Agricole Utilisée
<b>SAUI</b>	La Superficie Agricole Utilisée Irriguée
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>TWH</b>	Téra Watt heure
<b>TW</b>	Téra Watt
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et observation
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque
<b>PPM</b>	Point de puissance
<b>W<sub>C</sub></b>	Watt crête

## Liste de nomenclature

$U_r$	Tension du réseau
$U_{pv}$	Tension du panneau photovoltaïque
$\Phi_r$	Déphasage de réseau
$\Phi_{pv}$	Déphasage de panneau photovoltaïque
$f_r$	Fréquence du réseau
$f_{pv}$	Fréquence du panneau photovoltaïque
E	Ensoleillement
C°	Degré Celsius
K°	Kelvin

## Introduction générale

Le terme d'énergie renouvelable est souvent assimilé à celui d'énergie propre ou « propre et sûre ». Une énergie propre ne produit pas ou peu de polluant, ou bien elle produit des polluants sans conséquences pour l'environnement.

Le réseau électrique est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Ces derniers permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Différentes technologies de productions d'énergie sont d'ores et déjà disponibles pour atteindre ces objectifs comme les éoliennes, les panneaux solaires, les centrales de cogénération d'électricité et de chaleur, etc.

Il est à prévoir que cette production d'énergie va tendre à s'accroître dans les années à venir, amenant avec elle un problème d'intégration dans le réseau actuel.

L'impact de ce type de générations sur le fonctionnement du réseau n'est pas négligeable et celles-ci amènent des problèmes de réglage, de protections, de qualité d'énergie, de contrôle de la tension, etc. Il convient donc de rechercher des solutions innovantes à ces problèmes [1].

Les travaux présentés dans ce mémoire se focalisent sur l'impact des énergies renouvelables sur les réseaux électriques, en calculant le transit de puissance.

Les travaux seront donc développés sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre expose en générale les énergies renouvelables.
- Le deuxième chapitre, expose les énergies renouvelables en Algérie, en montrant la vitesse de vent, le potentiel solaire et les différents types des énergies renouvelables les plus utilisées en Algérie.
- Le troisième chapitre, nous définissons l'impact liés à l'intégration de la production photovoltaïque sur les réseaux électriques

# Introduction Générale

---

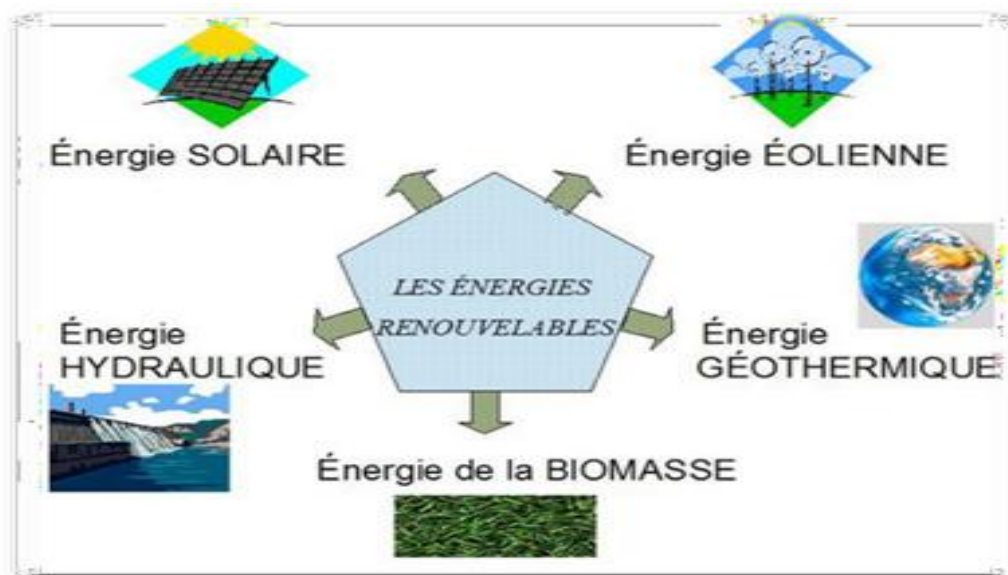
- Dans le quatrième chapitre, nous exposons la modélisation des réseaux électriques et le principe de l'écoulement de puissance, la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que l'étude de simulation avec les logiciels MATLAB pour but de montrer l'impact des énergies renouvelables dans le réseau électrique.
- Et nous terminerons avec une conclusion générale.

## Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant des sources qui se renouvellent naturellement mais dont le débit est limité ; les ressources renouvelables sont pratiquement inépuisables dans la durée mais limitées dans la quantité d'énergie disponible par unité de temps. Les énergies renouvelables utilisent des sources d'énergie qui sont continuellement renouvelées par nature que ce soit de manière constante tel-que l'énergie solaire (pour la lumière et chaleur), la lune (marées) et la terre (géothermique) ou cyclique comme les énergies du vent, d'hydrauliques de la biomasse.

Les technologies d'énergie renouvelables transforment ces phénomènes naturels en formes d'énergie utilisables, le plus souvent de l'électricité, mais aussi de la chaleur des produits chimiques ou de l'énergie mécanique. Toutes ses énergies ont tendance à être non polluantes ou peu pour la lutte contre l'effet de serre et le réchauffement climatique.

### I.1 Les différents types des énergies renouvelables



**Figure I. 1** Schéma de différentes énergies renouvelable

La diversité des énergies renouvelables est due aux différentes sources de ces dernières on peut citer [1].

#### I.1.1 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie obtenue par la force du vent grâce à une éolienne qui transforme l'énergie cinétique des courants d'air en énergie électrique. L'énergie est

principalement extraite par le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, et par le générateur, qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique [2].



**Figure I.2** Champ des éoliennes

Il existe plusieurs types d'énergies éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes... Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables [2].

### **Classification des turbines éoliennes**

Il existe deux catégories des moteurs éoliens utilisés pour capter l'énergie du vent [1] :

#### **a. Les machines à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont des hélices perpendiculaires au vent et montées sur le mât. La hauteur d'une petite éolienne est généralement de 20 m, et la hauteur d'un grand modèle est plus de deux fois la longueur de la pale [3].

Ce système compose de différentes parties :

- Rotor avec pâles ;
- Transmission mécanique avec arbre plus boîte de vitesse ;
- Génératrice ;
- Nacelle qui supporte le rotor ;
- Système d'orientation ;
- Mât qui rapporte la nacelle ;
- L'axe du générateur ;
- Machines à vent classiques ;
- Éoliennes lentes ;
- Éoliennes rapides.

### **b. Les machines à axe vertical**

Les éoliennes dites « à axe vertical » présentent un axe perpendiculaire à la direction du vent. L'axe est souvent positionné à la verticale, mais des éoliennes de ce type peuvent aussi être positionnées à l'horizontale.

Ce type d'éoliennes se décline suivant plusieurs machines [3] :

- Machines à traînées différentielles ;
- Machines à écran ;
- Machines à clapets battants ;
- Machines à pales tournantes ;
- Machines à variations cycliques d'incidences, à aubes fixes et aubes mobile.

## **I.1.2 Énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable qui utilise les mouvements de l'eau créés par le soleil et la gravité, le cycle de l'eau, l'énergie cinétique créée par le mouvement de l'eau que ce soit dans les rivières, les marémotrice, les barrages, les courants marins et les hydroliennes [4].

### **a. Hydrolienne**

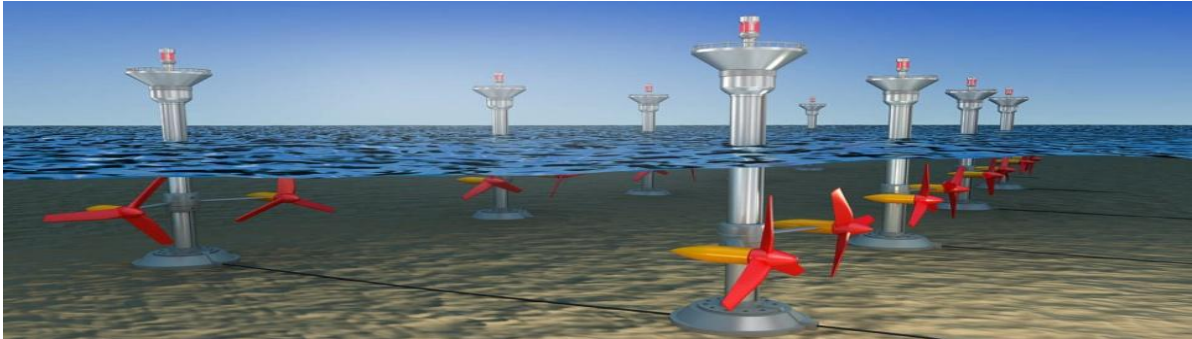
L'énergie hydrolienne représente la conversion de l'énergie des courants marins ou fluviaux en énergie électrique. En effet la conversion est réalisée par des machines nommées « hydroliennes ». Ce sont souvent des turbines immergées dont la rotation entraîne un alternateur constitué d'aimants permanents.



**Figure I.3** Energie hydrolienne

**b. Marémotrice**

L'énergie marémotrice désigne l'énergie exploitée en tirant profit du phénomène des marées, donc des mouvements d'eau causés par les effets conjugués des forces de gravitation de la lune et du soleil.



**Figure I.4** Energie marémotrice

**c. Barrages hydrauliques**

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

La centrale hydroélectrique se situe en contre bas du barrage. La force de chute de l'eau va ainsi permettre d'actionner la turbine, qui va ensuite faire fonctionner l'alternateur. Ce dernier va alors produire un courant alternatif qui va être envoyé au transformateur électrique de la centrale hydroélectrique [5].



**Figure I.5** Barrages hydraulique



### I.1.3 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou les déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois-énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde [6].

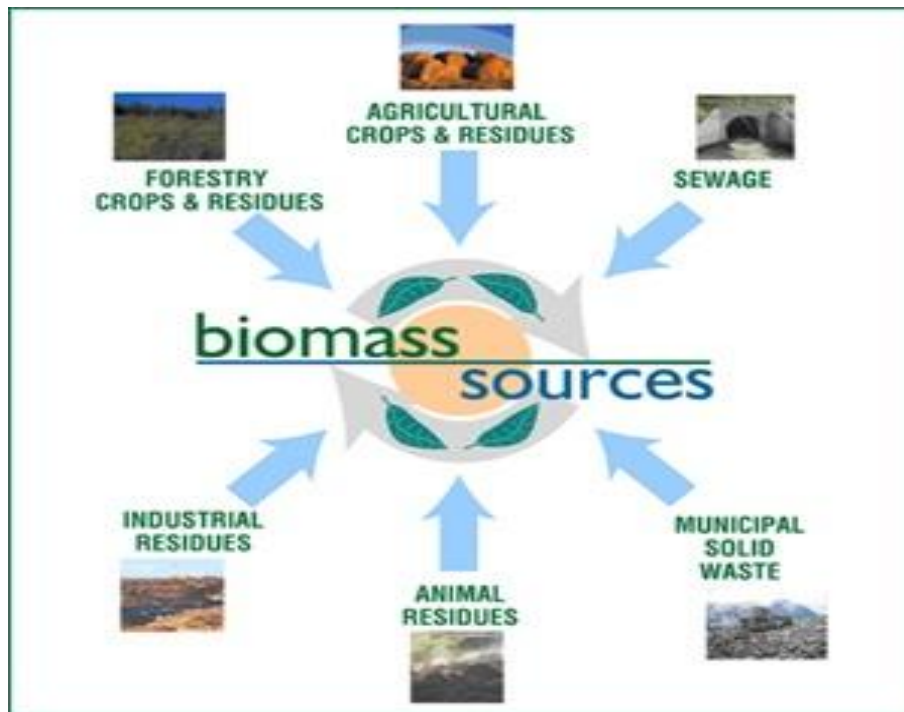


Figure I.6 Energie de la biomasse.

### I.1.4 Energie géothermique

L'énergie géothermique est une forme de conversion d'énergie dans laquelle l'énergie thermique de la terre s'écoule vers la surface, comme les coulées de lave, les geysers, les fumerolles, les sources chaudes et les marmites de boue. La chaleur est principalement générée par la désintégration radioactive du potassium, du thorium et de l'uranium dans la croûte et le manteau et les frottements générés par les bords des plaques continentales. Cette énergie est captée et utilisée pour la cuisine, le bain, le chauffage, la production d'électricité et à d'autres fins [7].

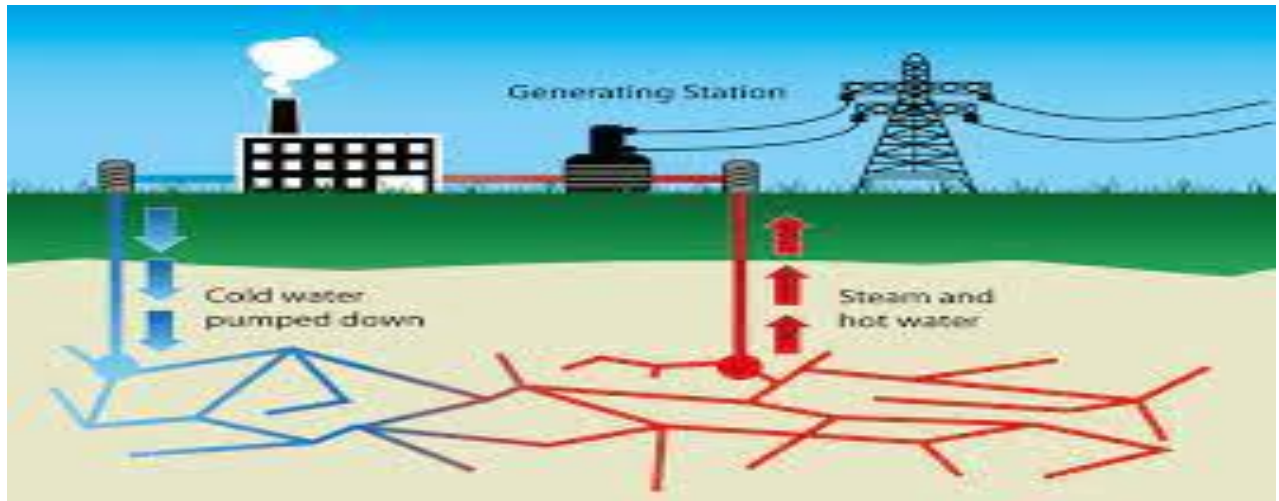


Figure I.7 Energie géothermie

### I.1.5 Énergie solaire

Le soleil est une source d'énergie extrêmement puissante. Son rayonnement peut générer de la chaleur, provoquer des réactions chimiques ou générer de l'électricité. Cette énergie est la plus grande source acceptée par la terre, mais son intensité à la surface de la terre est en réalité très faible. Ceci est principalement dû à l'énorme propagation radiale du rayonnement solaire. La lumière du soleil qui atteint le sol est composée de près de 50 % de lumière visible, de 45 % de rayonnement infrarouge et d'une petite quantité de rayonnement ultraviolet et d'autres formes de rayonnement électromagnétique : les chercheurs ont utilisé un capteur spécifique pour « absorber l'énergie de la lumière du soleil ». Les rayons sont réaffectés selon les trois principaux modes de fonctionnement [8].

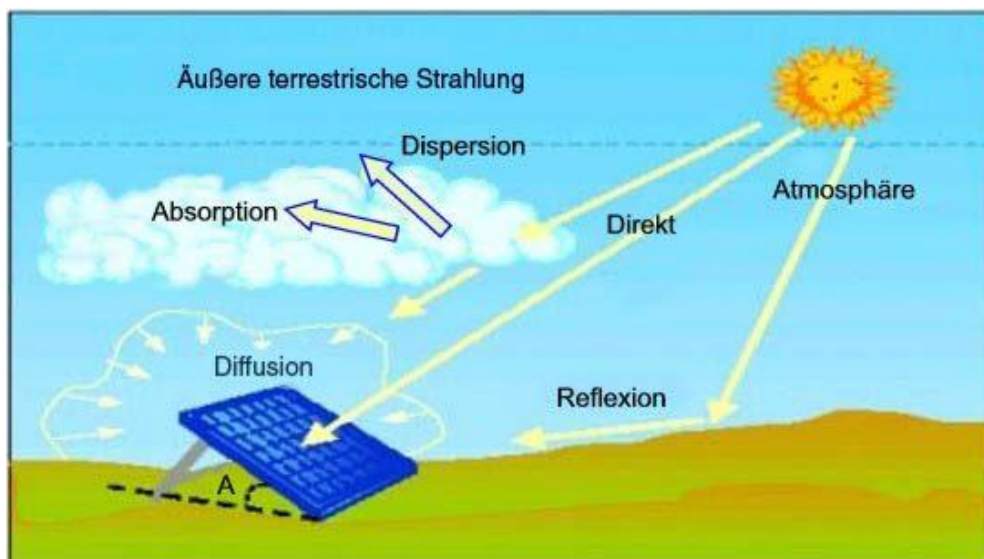


Figure I.8 Schéma d'absorption des rayons solaires

## **I.2 Technologies des énergies solaires**

L'utilisation de cette énergie est à travers un capteur spécifique afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon les trois principaux modes de fonctionnement.

### **I.2.1 Solaire à concentration thermodynamique**

L'énergie solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs pour concentrer l'énergie solaire dans un tube contenant un fluide caloporteur pouvant être chauffé à 500°C. La chaleur obtenue est transférée au circuit d'eau, et la vapeur générée active la turbine reliée à l'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 [9].

### **I.2.2 Solaire thermique**

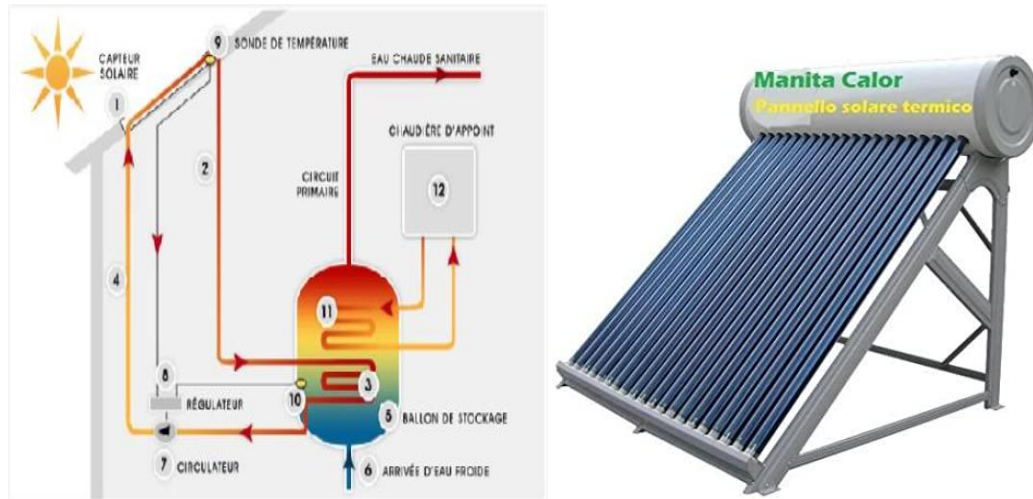
L'énergie solaire thermique (EST) est une technologie permettant d'exploiter l'énergie solaire pour en faire de la chaleur. Elle absorbe la chaleur générée par la radiation solaire, cette énergie est utilisée dans des applications industrielles, commerciales et résidentielles, les systèmes de chauffage, et même la production d'électricité.

L'énergie solaire thermique utilise diverses technologies comme les chauffe-eau solaires, chauffage, panneaux solaires thermiques [9].

#### **I.2.2.1 Chauffe-eau solaire**

Les chauffe-eau solaires, également appelés systèmes de production d'eau chaude sanitaire, peuvent constituer un moyen rentable de produire de l'eau chaude pour maisons. Ils peuvent être utilisés dans n'importe quel climat. Ils comprennent des réservoirs de stockage et des capteurs solaires.

Ce système utilise un absorbeur qui chauffe l'eau ou un fluide caloporteur soit l'eau directement. Un vitrage est placé devant l'absorbeur, ainsi le rayonnement est « capturé » : en d'autres termes, c'est l'effet de serre [10].



**Figure I.9** Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique chauffe-eau solaire

### I.3 Energie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure, c'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête ( $W_C$ ) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [11].



**Figure I. 10** Energie solaire (PV)

### **I.3.1 Différents types des systèmes photovoltaïques**

#### **I.3.1.1 Alimentations électriques faibles puissances**

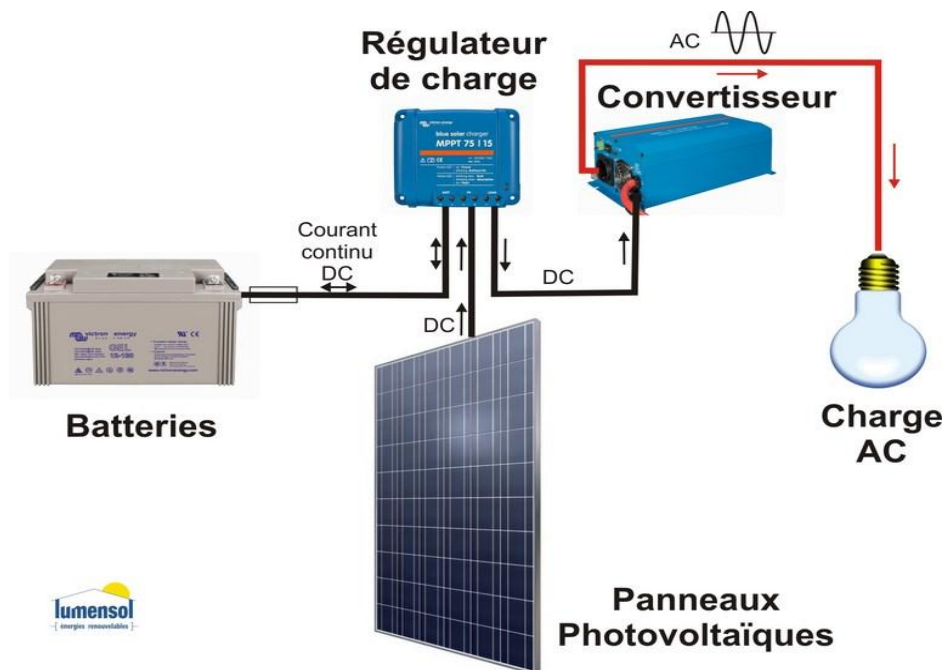
Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculettes ou les chargeurs de piles. Les modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

#### **I.3.1.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes**

Dans une installation PV isolé au réseau, le panneau photovoltaïque figure (I.11) alimente directement l'installation pour faire fonctionner les éclairages et équipement domestique. Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques. Le régulateur de charge est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie, il a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges.

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, lampadaires urbain, le pompage solaire et les maisons en zone isolés.

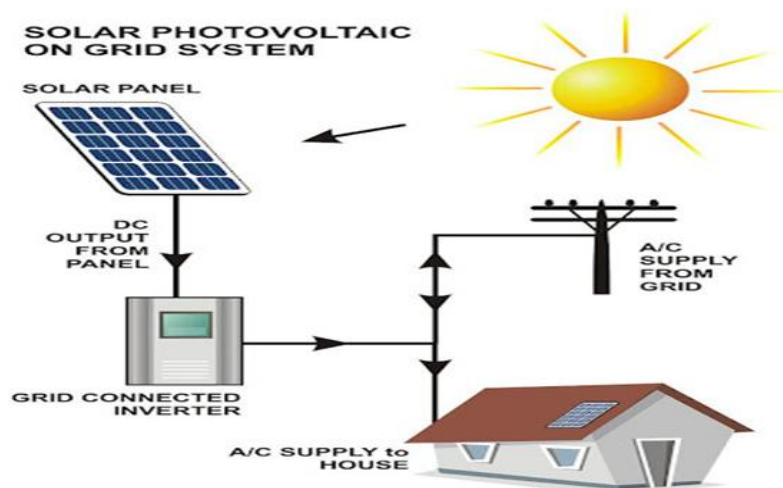
La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.



**Figure I. 11** Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome

### I.3.1.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau

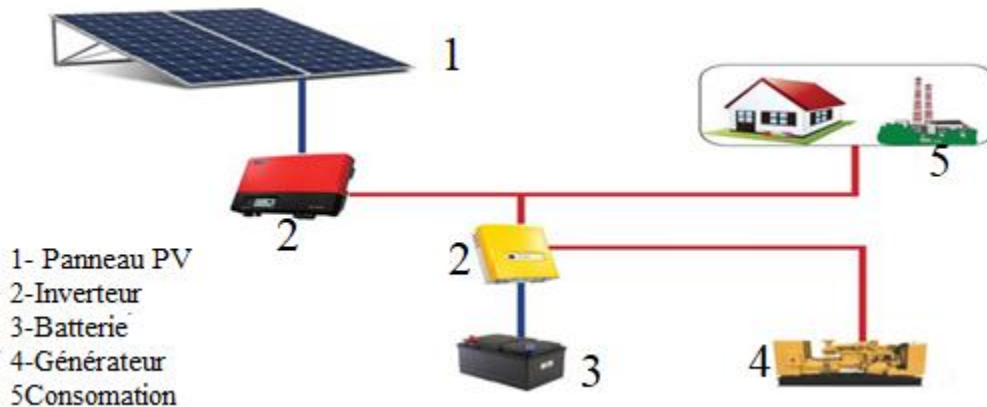
Les générateurs photovoltaïques connectés au réseau ne nécessitent pas de stockage d'énergie, éliminant ainsi le maillon le plus problématique (et le plus coûteux) dans les installations autonomes (figure I.12). En fait, c'est l'ensemble du réseau qui agit comme un entrepôt d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : l'un pour mesurer l'énergie achetée auprès du fournisseur d'énergie, et l'autre pour mesurer l'énergie restituée au réseau lorsque la production dépasse la consommation.



**Figure I. 12** Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau

### I.3.1.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride

En plus des générateurs photovoltaïques, ces systèmes combinent également différents types de sources d'énergie, telles que les centrales éoliennes, les générateurs diesel ou les centrales thermiques et électriques combinées. Ce type d'installation est utilisé lorsqu'un seul système photovoltaïque ne peut pas couvrir toute l'énergie nécessaire [12].



**Figure I. 13** Installation ou centrale électrique photovoltaïques hybride

## I.4 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

On cite quelques avantages et inconvénients des énergies renouvelables.

### I.4.1 Avantages

- La production d'électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique ;
- Sources qui possèdent un fort potentiel ;
- Ressources qui se renouvellent assez rapide. Elles sont inépuisables ;
- Les énergies renouvelables sont fiables ;
- Les sources d'énergies sont disponibles ;
- L'électricité est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

### I.4.2 Inconvénients

- Le coût très élevé ;
- Faible rendement de conversion ;
- Sources dont les performances sont irrégulières ;
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement ;

- Projets de longue durée ;
- Le stockage de l'électricité [14].

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables et ces différents types, on a parlé de l'énergie solaire en particulier.

On a rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et les différentes technologies solaires, puis à la fin on a constaté aux avantages et inconvénients des énergies renouvelables.



### **Introduction**

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande DLR, montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Nord du Grand Sahara.

Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m<sup>2</sup>/an limités à la partie sud de l'Europe. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit : 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien [1].

Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menace la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, ce qui place les énergies renouvelables, ENR, (hydraulique, éolien, photovoltaïque, solaire thermique, géothermie, biomasse, biogaz et pile à combustible), au centre des débats portant sur l'environnement, et plus généralement le développement durable.

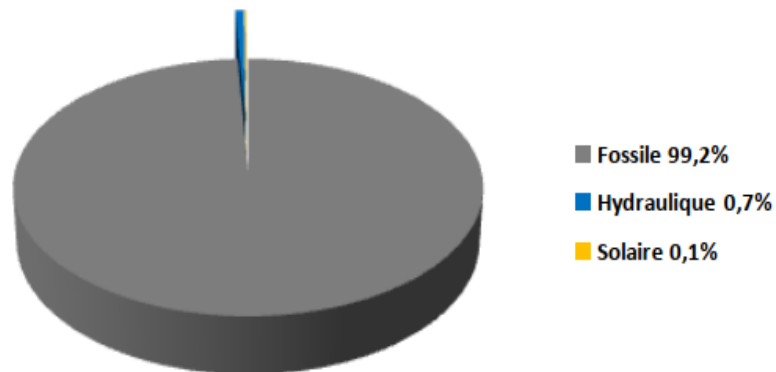
Dans ce chapitre, nous décrivons le potentiel Algérien en matière d'énergie renouvelable surtout solaire et éolien et leurs intégration dans une vision de développement à travers plusieurs scénarios énergétiques mettant l'Algérie comme un noyau de production d'énergie renouvelable et son environnement surtout européen, dont les études de la banque mondiale indique qui il sera obligé dans les années à venir d'importer son énergie du grand Sahara d'où vient l'initiative allemande pour exporter l'énergie solaire du grand Sahara à l'Europe. Sur les côtés d'Algérie, en été, il existe un vent coutumier qui appartient à la catégorie des vents thermiques ; ce vent est régulier, est dominant, souffle tous les après-midi qui suivent une matinée chaude et ensoleillée [1].

## II.1 Energie solaire en Algérie

[15].

### II.1.1 Situation énergétique en Algérie

En Algérie, 99.2% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles, notamment le gaz naturel qui est énergie la plus disponible. Le peu qui reste (0,8%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydraulique avec 0.7% et 0.1% pour la filière solaire photovoltaïque [16]. La figure (II.2) ci-après montre cette répartition des ressources sur la production d'électricité dans l'Algérie [16].



**Figure II. 1** Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie.

### II.1.2 Développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement Algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs [1].

A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. En effet, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique qui seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermies et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie. Le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique est développé en cinq chapitres [1] :

- Les capacités à installer par domaine d'activité énergétique ;
- Le programme d'efficacité énergétique ;
- Les capacités industrielles à développer pour accompagner le programme ;
- La recherche et développement ;
- Les mesures incitatives et réglementaires.

Ces étapes consacrent la stratégie de l'Algérie qui vise à développer une véritable industrie du solaire associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra à terme d'employer le génie local Algérien et d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme des énergies renouvelables, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs postes d'emplois directs et indirects.

## **II.2 Potentiel solaire**

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevés dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures/an, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique, le tableau (II.1) suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque

région de l'Algérie De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures/an (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5kwh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays [15].

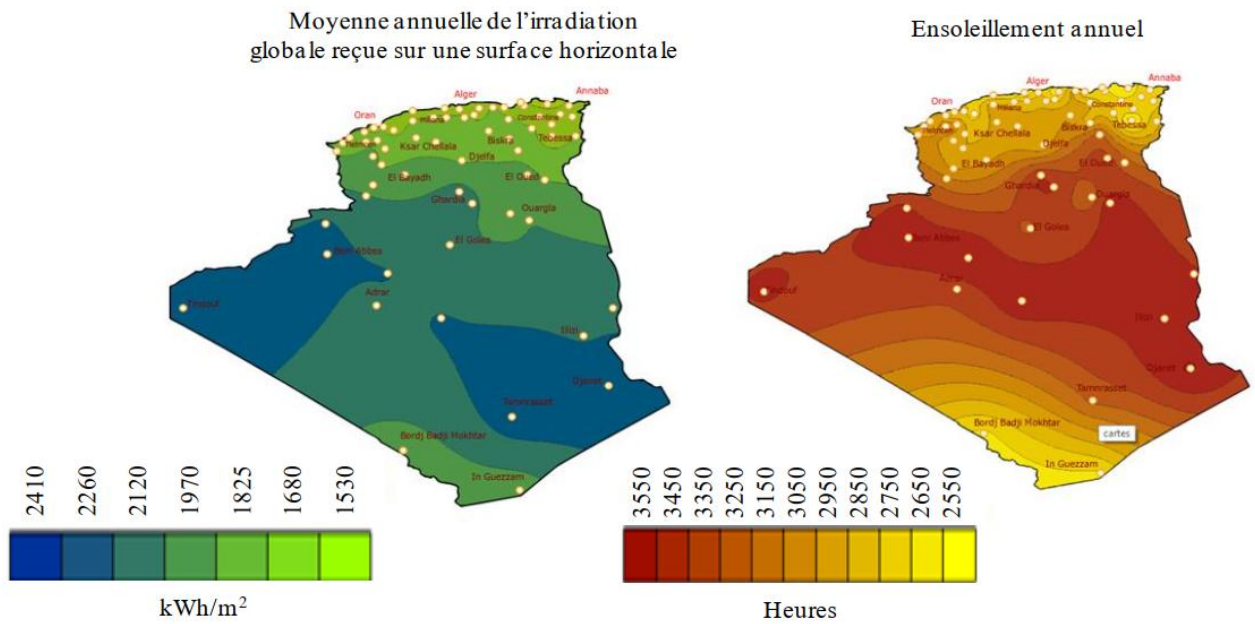


Figure II. 2 Irradiation globale et durée d'ensoleillement annuel en Algérie

Tableau II. 1 Potentiel solaire dans l'Algérie.

Regions	Regions Côtières	Haut plateau	Sahara
Superficies%	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### **II.3 Energie éolienne en Algérie**

Utilisant les données d'énergies cinétiques du vent constitue une ressource énergétique inépuisable mais fluctuante. Pour toute installation d'une éolienne dans un endroit, il faut d'abord une étude des caractéristiques du site considéré. Dans cette partie nous s'intéressons a quelques exemples.

#### **II.3.1 Ressources en énergies éolienne**

L'estimation des ressources en énergie éolienne présente une difficulté majeure. La quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour.

La quantité totale d'énergie éolienne convertibile sur un territoire, c'est-à-dire la quantité d'énergie qui peut être réellement produite par la mise en œuvre à l'échelle d'une région, des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, dépend de façon significative des caractéristiques, du rendement espéré et du dimensionnement des éoliennes. C'est pourquoi il n'ya qu'une méthode unique pour estimer et représenter l'énergie éolienne disponible.

Pour caractériser les ressources en énergie, il y a lieu de distinguer l'énergie éolienne disponible, qui est l'énergie que pourrait transformer une éolienne idéale, et l'énergie éolienne récupérable, qui dépend des caractéristiques du système de conversion utilisé, chacun de ces concepts présente des avantages et des inconvénients suivant son application [1].

Alors l'Algérie est un pays qui est placé dans un lieu trop riche avec des sources des énergies développées. L'éolienne dans les cartes régions (ouest et nord même les hauts plateaux) d'Algérie est très facile pour étudier tel que dans certaines villes Algérienne, le vent est très fort comme le Ouest Algérienne (Adrar, Tiaret et Oran...etc.).

##### **II.3.1.1 Ferme éolienne d'Adrar en Algérie**

La wilaya d'ADRAR s'étend sur une superficie de 427.968 km<sup>2</sup>, soit près d'un cinquième (1/5) du territoire national.

L'espace utile demeurant toutefois réduit, la wilaya d'ADRAR située à l'extrême sud-ouest du pays, compte onze (11) daïra et vingt-huit (28) communes. Sa population estimée à 336 046 habitants dont 76% de population rurale, soit 254 991 habitants, répartie à travers 294 Ksour (localités) éparpillés au niveau de quatre régions (Le Touat, le Tidikelt, le Gourara, le Tanezrouft).

La Superficie Agricole Totale (SAT) est de 337 650 HR, la Superficie Agricole utilisée (SAU) couvre une superficie de 31 657 HR dont 24 675 HR de Superficie agricole Utilisée Irriguée (SAUI) répartie comme suit :

- 19303 HR irriguée par système gravitaire.
- 2331 HR irriguée par système localisée.
- 3041 HR irriguée sous pivots (irrigation par aspersion).



**Figure II. 3** Ferme éolienne de Kabertène à 75 km au nord-est d’Adrar.

Venus découvrir des champs solaires dans l’immense Sahara, les experts allemands de l’énergie renouvelable ont été agréablement surpris par la présence d’une petite ferme éolienne au milieu du désert. Détail invisible, c’est la seule en Algérie [1].

La ferme éolienne de Kabertène à 75 km au nord-est d’Adrar, contient 12 éoliennes de 850 kWh chacune est en place sur les 30 hectares de périmètre de la ferme.

### **II.3.1.2 Hauts plateaux une zone stratégie pour placer une ferme d’éolienne**

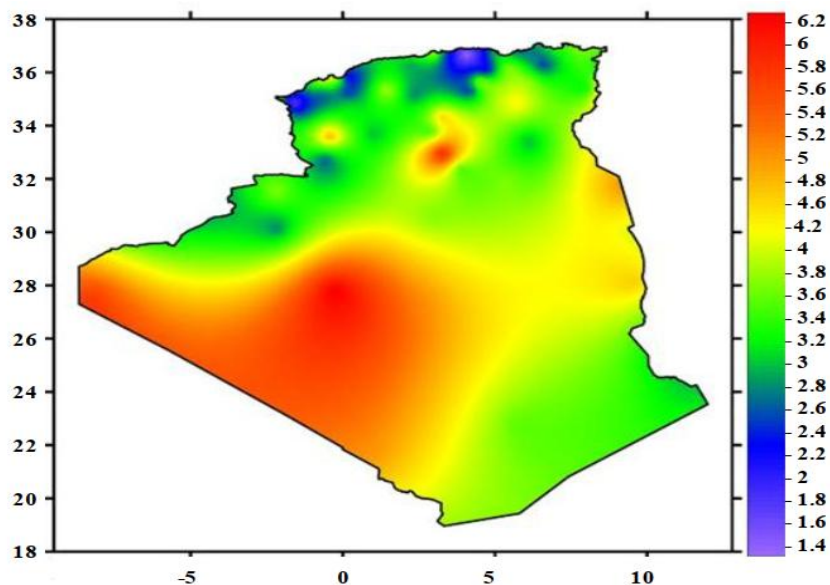
La wilaya Tiaret s’étend sur 111,45 km<sup>2</sup> et compte 201 263 habitants (recensement de 2008) pour une densité de 1 805,86 habitants par km<sup>2</sup>. L’altitude minimum est de 1 080 m.

Le plan climatique de la région de Tiaret, et le plus violents, atteignant les 120km/h, et des précipitations ininterrompues de jour comme de nuit, selon la station de météorologie d’Aïn-Bouhekif. Commune de la wilaya de Tiaret, la force du vent a été très forte [1].

### II.3.2 Les vents en Algérie

Les vents « GISEMENT EOLIEN » de l'Algérie commencent à être timidement étudiés. L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques classiques, les vents sont mesurés à un ou deux mètres du sol. Lorsque les vents dans une zone ou une région sont définis comme source d'énergie, des études approfondies doivent être faite selon les aérogénérateurs que l'on désire installer [15].

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La figure (II.4) présente cette carte qui montre la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie.



**Figure II. 4** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s)

### Conclusion

Le gouvernement Algérien a affirmé son engagement dans le développement des énergies renouvelables à travers le lancement d'un programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Donc, les énergies renouvelables deviennent au cœur de préoccupation de l'Algérie.

Ce constat est devenu aujourd'hui une réalité à travers les plans de formations programmés, les différents projets réalisés dans le domaine et les différents salons nationaux et internationaux réalisés en Algérie dans le cadre de promouvoir l'économie verte et le

développement durable. Toutes ces actions expriment la volonté de l'état Algérien d'investir dans ce nouveau créneau, surtout que le pays dispose d'un potentiel en énergies renouvelables parmi les plus importants au monde.

Dans Le prochain chapitre on étudiera l'impact lié à l'intégration de la production photovoltaïque sur le réseau électrique.



## **Introduction**

La tendance vers la dérégulation devient de plus en plus répandue dans le monde, notamment dans les pays développés. D'ailleurs, la préoccupation accordée à l'aspect environnemental et au développement durable a encouragé les producteurs à développer la production d'électricité sur la base des énergies nouvelles et renouvelables et des solutions de haut rendement énergétique [17].

Ces évolutions sont les deux facteurs essentiels qui favorisent l'introduction des nombreux producteurs de taille petite ou grande aux réseaux électriques aux niveaux de tension inférieure au cours de ces dernières années [18]. Ce nouveau phénomène peut être positif et négatif à la fois. D'une part, l'insertion des générations d'énergie distribuées (GED) est présentée comme un facteur de renforcement des moyens de production du système. D'autre part, elles apportent également des impacts négatifs à échelle du système en le fragilisant notamment dans les situations critiques.

Traditionnellement, le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production au réseau de transport. Au cours de ces dernières années, la tendance de libéralisation du marché de l'électricité a favorisé l'apparition de nombreux producteurs dans les réseaux électriques de niveaux de tension inférieure. Le raccordement de production aux réseaux de transport apporte des intérêts économiques et énergétiques, mais il sera pénalisé sur le plan de l'exploitation du système.

Dans ce troisième chapitre, nous allons citer les différents impacts de l'insertion des énergies renouvelables dans le réseau électrique.

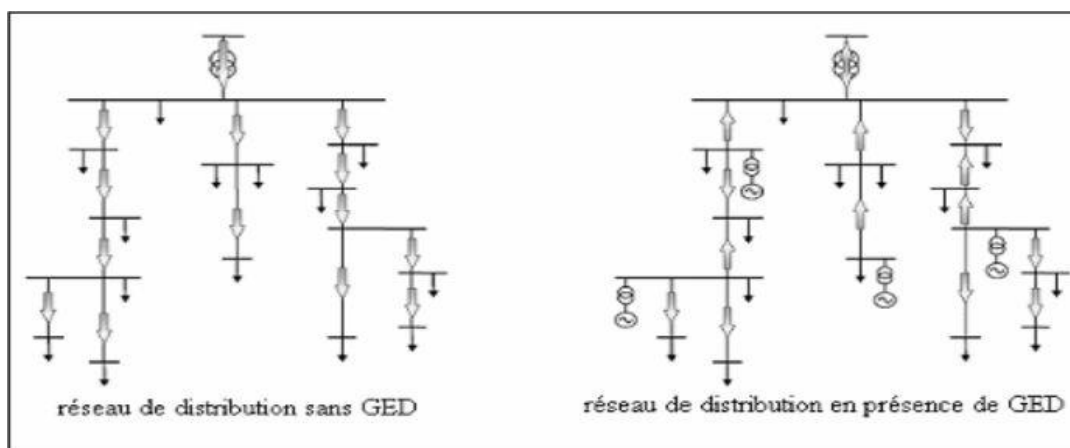
### **III.1 Impact de la production sur le réseau**

De précédentes études montrent qu'un taux de pénétration croissant de production n'est pas sans impacts prévisibles sur l'exploitation future des réseaux. En particulier, le plan de tension peut être grandement modifié par la présence de GED, au point que la tension risque de dépasser la limite supérieure en certains nœuds du réseau alors qu'elle est maintenue à une valeur normale au poste source. Le plan de protection risque également d'être affecté par un fort taux de pénétration des GED du fait de la puissance de court-circuit qu'elles apportent en aval des protections, et de l'inversion possible des flux de puissance active sur certaines lignes, ainsi que de la diminution du temps d'élimination critique de défauts.

Les GED fournissent de l'énergie près des points de consommation, diminuant ainsi les transits de puissance active et donc les pertes en ligne sur le réseau de transport, mais sont pénalisantes du point de vue de l'exploitation des réseaux pour les raisons citées plus haut ajoutées aux risques d'oscillations de puissance active et leur corollaire qui est une stabilité dégradée [19].

Une partie de ces GED à, de plus, des sources d'énergie primaire intermittentes (éolien, solaire) qui ne permettent pas de prévoir aisément la production disponible à court terme. Elles ne peuvent donc pas garantir une puissance de sortie et proposer toute la puissance disponible sur le marché. D'autre part, ces nombreuses sources sont trop petites pour être observables et dispatchées par les gestionnaires de réseaux et ne participent donc pas, aujourd'hui, aux services système. Cela peut poser des problèmes en cas de fort taux de pénétration si les moyens de réglage classiques de la distribution deviennent inaptes à assurer la tenue en tension. Cela peut contraindre par exemple les gestionnaires de réseaux à engager des investissements non prévus initialement [20].

Une partie de ces GED produisant par construction du courant continu (pile à combustible, panneau solaire) doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance, injectant ainsi des harmoniques nuisibles à la qualité de la tension délivrée. Enfin, la présence de GED en aval d'un poste source dont le transformateur est équipé d'un régulateur en charge réglé par compound âge perturbe son fonctionnement basé sur la mesure du courant absorbé. En effet, la production de puissance par les GED réduit le courant traversant le transformateur, provoquant une action du régulateur en charge et diminuant ainsi la tension au niveau du post source.



**Figure III. 1** Flux d'énergie sur un réseau en présence de GED

Nous trouvons dans la littérature plusieurs études qui ont été faites afin d'identifier et d'évaluer les impacts de la production décentralisée sur le réseau, puis, de proposer des solutions adaptées. L'opérateur du réseau se préoccupe de ce type d'étude lors de la phase de planification ou de l'approbation d'un projet de raccordement des GED. Les principaux impacts à rappeler sont les suivants [21].

### **III.2 Impact sur le sens de transit de puissance**

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des GED dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnelles. Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de GED augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales [22].

### **III.3 Impact sur la stabilité du système**

L'influence des génératrices de productions peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à laquelle le système peut résister sans perte de stabilité) [23].

### **III.4 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].

### **III.5 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].

### **III.6 Impact sur la continuité de service**

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des GED lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance.

### **III.7 Découplage des sources auto-productrices**

Supposant à présent que le système de protection de réseau fonctionne parfaitement, encore faut-il que celui de l'installation auto productrice la découple lors de l'ouverture d'un disjoncteur de réseau situé en amont. Si les petits moteurs ralentissent rapidement après l'ouverture d'un départ, les générateurs conservent eux plus longtemps leur vitesse. La mise hors tension d'un réseau comportant des générateurs n'est donc plus assurée par l'ouverture d'un disjoncteur.

La tension peut en effet subsister pendant plusieurs secondes, c'est un équilibre qui s'établit entre les puissances disponible et consommée. Nous dirons alors qu'il y a 'flotage'.

Même s'il s'avère peu probable que de telles conditions d'équilibre soient remplies, la possibilité d'une telle situation est inacceptable pour l'exploitant de réseau, pour des raisons de sécurité. L'apparition intempestive d'une tension sur le réseau, due au démarrage d'une génératrice, elle est évidemment aussi à proscrire absolument. Le personnel technique doit en effet pouvoir intervenir au moment choisi et sans danger, après un ordre de mise hors tension du réseau. C'est le maintien de la sécurité qui conduit aux exigences les plus sévères en matière de dispositifs de couplage des autos productrices.

Ainsi, afin de permettre les travaux sur le réseau, l'installation de production doit pouvoir en être séparée par un dispositif de coupure de sécurité visible, verrouillable et accessible en permanence au gestionnaire de réseau. Si la tension n'est plus normale, la source autonome doit pouvoir être découplée automatiquement du réseau. Il existe trois filières

permettant d'assurer ce découplage : la télécommande, la protection fréquentielle et la connexion au réseau via un redresseur-onduleur piloté par le réseau.

### **III.8 Impact sur le plan de protection**

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de courts circuits et donc le réglage des seuils des protections. D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection [26].

#### **III.8.1 Courant de court-circuit**

En matière de protection, il faut tenir compte de ce que les générateurs contribuent à une augmentation du courant de court-circuit dans le réseau. Dans le cas de générateurs, directement raccordés au réseau, cette contribution est de l'ordre de 4 à 8 fois le courant nominal de la machine. Dans le cas d'un raccordement au travers d'un convertisseur électronique cette contribution peut être ramenée au courant nominal par contrôle rapide du convertisseur. Signalons toutefois qu'avec ce dernier système en cas de fonctionnement sur charge isolée du réseau suite à un incident, les protections par surintensité ne fonctionneraient pas pour éliminer un court-circuit dans le réseau.

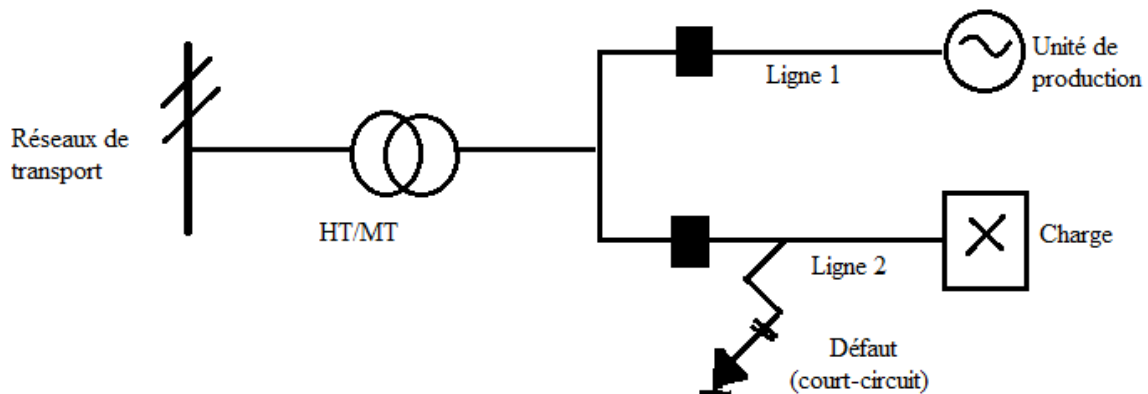
Ce problème pourrait systématiquement se rencontrer avec des systèmes photovoltaïques ou à piles à combustibles sur réseau isolé. Des précautions particulières sont à prévoir.

#### **III.8.2 Influence sur la sélectivité des protections**

La sélectivité des protections peut être affectée par l'introduction d'unités de la production dans le réseau de transport dont la structure est de type maillé. Pour illustrer cette influence, considérons le schéma d'alimentation de la Figure III.2 ci-dessous, par une sous-station du réseau d'une charge par la liaison 2, et la connexion à la sous-station par la liaison 1 d'une unité de production. Ces deux liaisons sont chacune protégées par un disjoncteur contre les surintensités comme c'est l'usage.

Dans cet exemple extrêmement simple la protection de la ligne 1 déconnecte inutilement l'unité de production lors d'un défaut sur la ligne 2, car le courant du générateur lors de ce défaut est supérieur au seuil de protection en cas de défaut sur la ligne 2. Les seuils de protection doivent donc être revus pour que la seule de la ligne en défaut soit déconnectée.

Pour toute implantation d'une unité de production dans le réseau, il faut impérativement vérifier la sélectivité des protections et le cas échéant les ajuster.



**Figure III. 2** Schémas d'alimentation d'une sous station du réseau

### III.9 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].

### III.10 Impact sur la tenue de tension

Nous savons que les nœuds proches d'une source ont une tension plus élevée, la tension diminuant au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. La connexion de sources de GED à proximité des charges modifiera donc naturellement le profil de tension sur le réseau [28].

### III.11 Harmoniques

Le système de production PV est associé à de l'électronique de puissance (onduleur notamment) qui crée des harmoniques dans le réseau. Néanmoins, les systèmes

photovoltaïques modernes profitent de la technologie de transistor qui normalement produit peu d'harmoniques mais néanmoins pose certains problèmes évoqués par [29].

### III.12 Îlotage

Quand le réseau de distribution est coupé en amont du consommateur et que les productions décentralisées restent connectées, la zone du réseau qui contient les PV est isolée du reste du réseau public. Cette configuration est appelé l'îlotage. Ce phénomène n'est pas toléré et le système de PV doit se déconnecter du réseau en ce moment-là. Cette fonctionnalité est exigée par la norme IEEE 1547 et nous l'abordons dans notre étude pour les mêmes raisons que la protection [30].

Les méthodes de détection d'îlotage : parmi les méthodes de détection d'îlotage on cite « La méthode passive ». Les catégories de la méthode passive sont :

- Protection à seuils de tension et fréquence
- Méthode basée sur la mesure du déphasage entre courant et tension
- Méthode basée sur le déséquilibre entre phases [31].

### Conclusion

La connaissance précise des dommages environnementaux est indispensable pour progresser vers un usage raisonné de l'énergie, tenant compte des nuisances potentielles. Cette connaissance doit permettre de situer le point d'équilibre entre les avantages procurés par l'énergie et ses « effets néfastes » sur les milieux, et de déterminer ainsi un niveau optimal de consommation d'énergie. Elle constitue aussi un instrument d'orientation des choix vers des filières énergétiques les plus respectueuses de l'environnement. Le raccordement de production aux réseaux de transport et de distribution apporte des intérêts économiques et énergétiques, mais il sera pénalisé sur le plan de l'exploitation du système. Le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production aux réseaux de transport et de distribution.

Dans le prochain chapitre, nous allons voir les modèles de modélisation sur le réseau électrique, d'une cellule photovoltaïque et nous citeront les principes de l'écoulement de puissance, après on va adopter une simulation sous MATLAB SIMULINK.

## Introduction

Une fois l'électricité produite, elle doit être amenée jusque chez le consommateur.

Dans un pays, le transport et la distribution publique assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation.

Les réseaux électriques sont depuis longtemps l'objet d'études dans le but de maîtriser leur bon usage pour les processus qu'ils alimentent.

Les principaux aspects abordés sont la conception, l'exploitation et l'évolution. A noter que dans ce document, le vocable « processus » est utilisé avec son sens général « d'application » pour l'utilisateur d'électricité (tertiaire, infrastructure, industrie, gestionnaire de réseau).

L'importance donnée à ces études est cependant croissante dans le contexte mondial récent. L'objectif des calculs est d'analyser et prévoir les réactions du système aux diverses sollicitations leur portée touche l'élaboration de l'architecture, les choix des caractéristiques des matériels et les règles d'exploitation.

Le processus global de mise en œuvre des calculs portant sur ces différents aspects suit une démarche scientifique classique, donc simple sur le principe mais précise et rigoureuse dans son exécution.

Dans ce chapitre seront successivement abordés la structure générale d'un réseau électrique, la modalisation de chaque constituant d'un réseau électrique, puis nous citerons par la suite la modélisation d'une cellule photovoltaïque, et enfin sera défini le principe de l'écoulement de puissance.

### IV.1 Structures de Réseaux Electriques

Le réseau électrique est caractérisé par le type de courant utilisé, DC ou AC. Une fois le choix du type déterminé, il promet d'apporter de futures modifications ou d'utiliser le réseau [32].

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures qui permet l'utilisation de transformateurs pour transporter l'énergie électrique de son lieu de production aux consommateurs d'électricité à travers différents niveaux de tension.

Les différents niveaux de tension du réseau sont classés selon le tableau (IV.1) ci-dessous [33]



**Tableau IV. 1** Différents niveaux de tension.

Nom	Abbréviation	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

Traditionnellement, le réseau électrique est divisé en trois sous-systèmes : Production, transport et distribution. Chaque sous-système est relié par une station chargée de régler le niveau de tension. En Algérie, les niveaux de tension les plus utilisés sont : la transmission 400kV/220kV, la distribution 60kV et la distribution 30kV/380V.

## IV.2 Organisation d'un réseau électrique

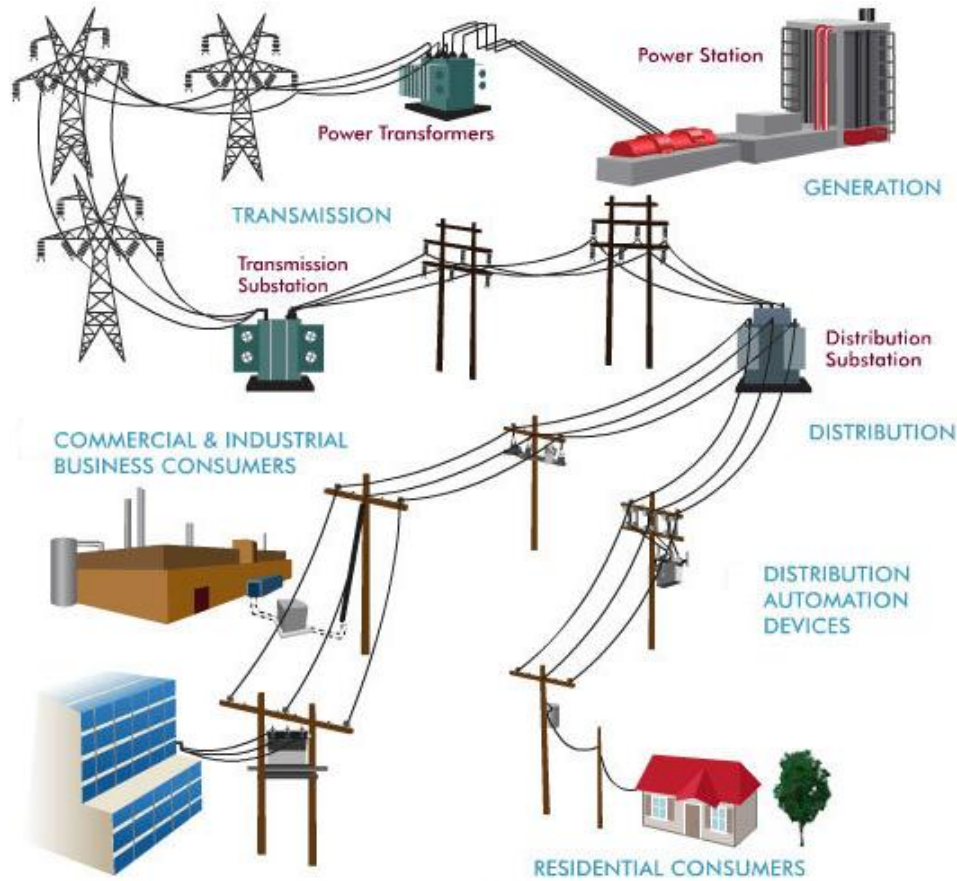
Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit satisfaire les exigences suivantes [34] :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin ;
- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas  $\pm 10 \%$  de la tension nominale ;
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas  $\pm 0,5$  Hz ;
- Fournir l'énergie à un prix acceptable ;
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses ;
- Veiller à la protection de l'environnement.

Nous distinguons trois types de réseaux électriques :

### IV.2.1 Réseaux de transport et d'interconnexion

Sa mission est de capter l'énergie générée par la centrale et de l'acheminer vers la zone de consommation avec le plus grand débit 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 généralement fixé entre 220 kV et 800 kV. Par exemple, la ligne de transport d'électricité centrale de 220 kV est illustrée à la Figure (IV-1).



**Figure IV. 1** Réseau de transport

Les missions du réseau de transport sont :

- Transport d'énergie : fonction de transport destinée à acheminer l'électricité des centres de production éloignés vers les centres de consommation ;
- Interconnexion nationale : gérer la fonction d'interconnexion nationale de la distribution électrique en liant la production à la localisation 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.

#### IV.2.2 Réseaux de répartition

Qui reçoit l'énergie du réseau de transport, leur rôle est de fournir de l'électricité aux villes et aux grands clients industriels. Les niveaux de tension de ces réseaux sont compris entre 45 kV et 160 kV, et ils assurent des services depuis les points de transport jusqu'à la distribution.

En Algérie, le niveau de tension du réseau de distribution le plus utilisé est de 60 kV.

### IV.2.3 Les réseaux de distribution

Desservir les postes de distribution publique, alimenter les réseaux bas tension et les postes clients. La moyenne tension est comprise entre 4 kV et 45 kV, et la basse tension (220/380 V) est comprise entre plusieurs 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 (IV-3).

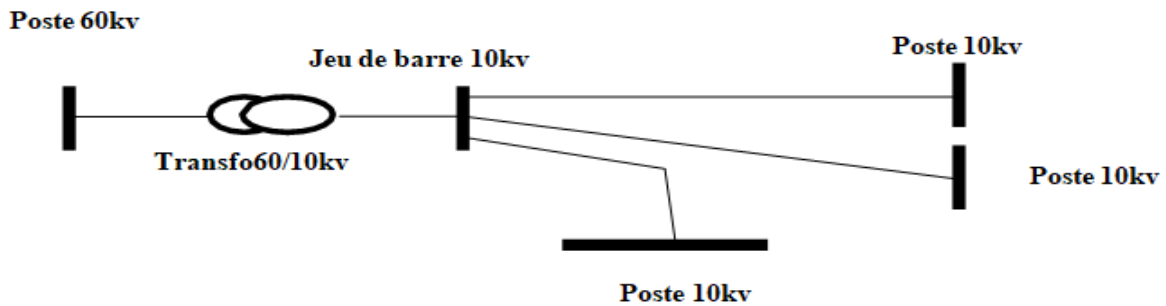


Figure IV. 2 Exemple d'un réseau de distribution

## IV.3 Modélisation Des Composantes Du Réseau Electrique

### IV.3.1 Modélisation des générateurs [34]

Dans le calcul de l'écoulement de puissance un générateur est représenté par une source de tension constante comme la montre la figure ci-dessous :

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (IV.1)$$

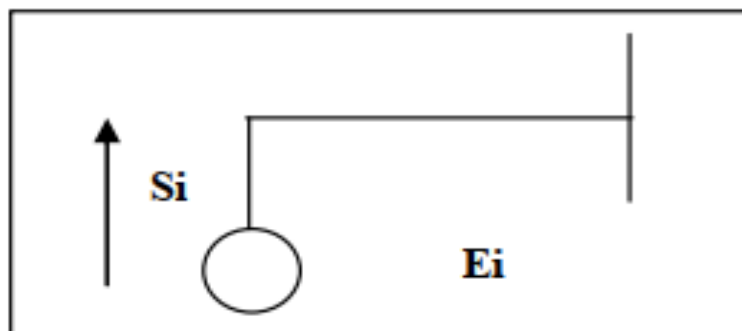


Figure IV. 3 Modélisation d'un générateur

Avec :

$S_i$  : Puissance apparente délivrée par le générateur

$p_i$  : Puissance active délivrée par le générateur

$Q_i$  : Puissance active délivrée par le générateur

$$E_i = |E_i| \exp(j\delta_i) \quad (\text{IV.2})$$

$E_i$ : Tension simple entre phase et neutre du générateur

### IV.3.2 Modélisation de la ligne [35]

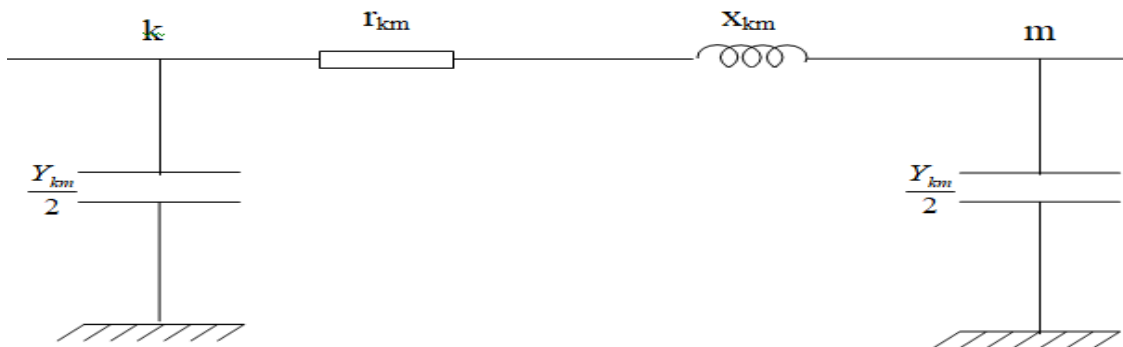
Chaque ligne peut être représentée par son impédance  $z$  ou son admittance  $Y$ . Afin de déterminer les caractéristiques de la ligne, nous considérerons la matrice de transmission du quadripôle.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

A, B, C, D : sont des paramètres complexes

$$\begin{aligned} A &= 1 + \frac{Y_z}{2} \\ B &= z \\ C &= Y(1 + \frac{Y_z}{4}) \\ D &= 1 + Y_z/2 \end{aligned} \quad (\text{IV.4})$$

Ailleurs, la ligne de transmission entre deux nœuds est représentée par le modèle  $\pi$  suivant :



**Figure IV. 4** Schéma simplifié d'une ligne en  $\pi$

L'admittance de la ligne est représentée par l'expression suivante :

$$Y_{km} = Y_{mk} = G + jB \quad (\text{IV-5})$$

Avec :

G : Conductance

B : Susceptance

$r_{km}$ : Résistance de la ligne k-m

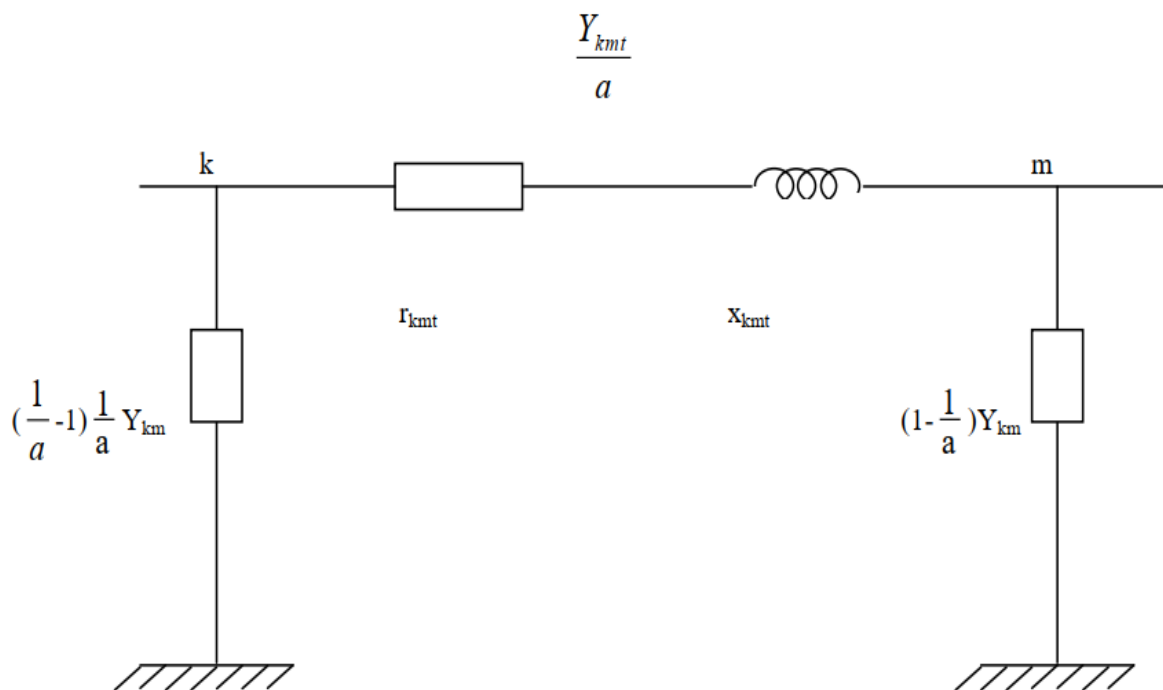
$x_{km}$ : Réactance de la ligne k-m

$\frac{Y_{km}}{2}$ : Admittance shunt de la ligne k-m

### IV.3.3 Modélisation des transformateurs [35]

Un transformateur est un appareil électrique très simple, mais il reste l'un des appareils les plus utiles. Les transformateurs peuvent modifier la tension et le courant dans le circuit. Grâce à cette machine, l'énergie électrique peut être transmise de manière économique sur de longues distances et distribuée dans les usines et les maisons.

Le circuit équivalent du transformateur, toutes ses valeurs sont exprimées en fonction du rapport de transformation du transformateur, exprimé sous la forme :



**Figure IV. 5** Modèle du transformateur en  $\pi$

L'admittance du transformateur est exprimée par :

$$Y_{kmt} = \frac{1}{r_{kmt} + jx_{kmt}} = Y_{mkt} \quad (\text{IV-6})$$

Avec :

A : rapport de transformation

$r_{kmt}$ : Résistance du transformateur placé entre les nœuds k et m

$x_{kmt}$  : Réactance du transformateur placé entre les nœuds k et m

En négligeant les pertes, le transformateur peut être représenté par la réactance  $x_{kmt}$

### IV.3.4 Modélisation d'une charge [35]

Il existe plusieurs modèles qui peuvent représenter une charge, le plus utilisée est le modèle suivant :

$$Y_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^2} \tag{IV.7}$$

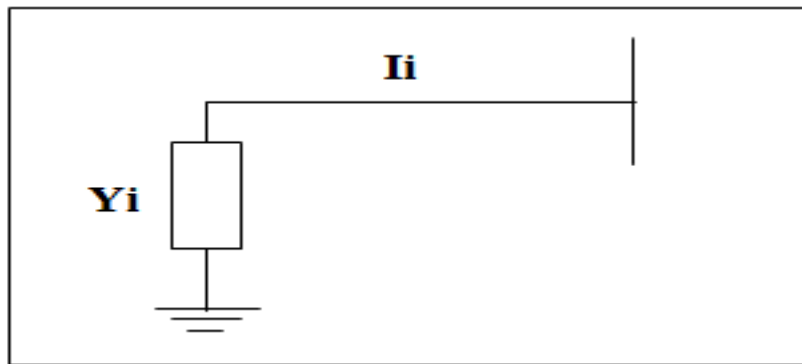


Figure IV. 6 Modélisation d'une charge

### IV.4 Détermination de la matrice admittance [35]

Le calcul des éléments de la matrice admittance est important pour procéder à un calcul d'écoulement et nous représentons le schéma d'une branche entre deux nœuds k et m par :

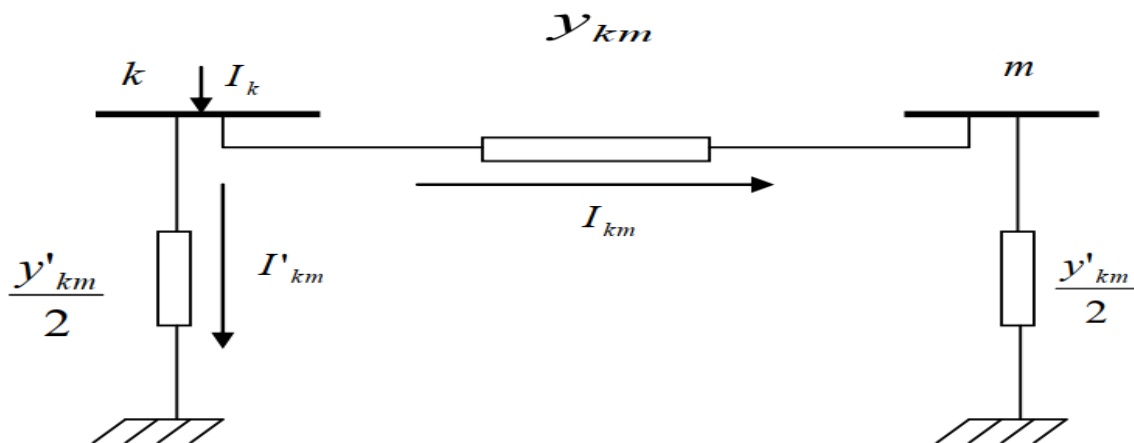


Figure IV. 7 Représentation d'une ligne reliant deux nœuds

L'admittance d'une branche est calculée à partir de son impédance et nous écrivons :

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = \frac{1}{r_{km} + jx_{km}} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - \frac{jx_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \tag{IV.8}$$

Et elle peut être écrite sous la forme :

$$y_{km} = g_{km} - jb_{km} \quad (\text{IV.9})$$

Où :

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (\text{IV.10})$$

Et ;

$$b_{km} = \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (\text{IV.11})$$

L'admittance propre de nœud k est donnée par :

$$y_{kk} = \sum_{m \neq k}^n (y_{km} + \frac{y'_{km}}{2}) \quad (\text{IV.12})$$

Où  $Y_{kk}$  est l'admittance entre le nœud k et la terre.

Et l'admittance mutuelle entre le nœud k et le nœud m s'écrit :

$$y_{km} = -y_{km} \quad (\text{IV.13})$$

#### IV.5 Calcul des courants [35]

Nous obtenons les équations qui régissent le réseau par l'application de la deuxième loi de Kirchhoff et nous pouvons écrire au nœud k :

$$I_{kk} = \sum_{m \neq k}^n (I_{km} + \Gamma_{km}) \quad (\text{IV.14})$$

Le courant transmis du nœud k vers le nœud m a pour expression :

$$I_{km} = \sum_{m \neq k}^n (y_{km} (E_k - E_m)) \quad (\text{IV.15})$$

Le courant de fuite à la terre est donné par :

$$I'_{km} = \sum_{m \neq k}^n \left( \frac{y'_{km}}{2} E_k \right) \quad (\text{IV.16})$$

Et nous pouvons écrire en fin l'expression du courant  $I_k$  au nœud k de la forme :

$$I_k = I_{km} + I'_{km} \quad (\text{IV.17})$$

$$I_k = \sum_{m \neq k}^n y_{km} (E_k - E_m) + \sum_{m \neq k}^n \left( \frac{y'_{km}}{2} E_k \right) \quad (\text{IV.18})$$

$$I_k = E_k \sum_{m \neq k}^n (y_{km} + \frac{y'_{km}}{2}) - \sum_{m \neq k}^n y_{km} E_m \quad (\text{IV.19})$$

D'où :

$$I_k = E_k Y_{kk} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n Y_{km} E_m \tag{IV.20}$$

Nous obtenons ainsi la forme généralisée du courant :

$$I_k = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n Y_{km} E_m \tag{IV.21}$$

Pour un réseau de (n) nœuds, nous aurons un ensemble d'équations de la même forme que, l'équation (IV.21)

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11} E_1 \dots \dots \dots + y_{1n} E_n. \\ I_2 &= y_{21} E_1 \dots \dots \dots + y_{2n} E_n \\ &\dots \dots \dots \\ I_n &= y_{n1} E_1 \dots \dots \dots + y_{nn} E_n. \end{aligned} \tag{IV.22}$$

Dans un réseau à (n), les tensions et les courants ont chacun (n) composantes réelles et (n) composantes imaginaires et la matrice admittance Y est une matrice de (n \* n) dont les éléments sont calculés d'après les équations précédentes.

### IV.6 Principe de l'écoulement des puissances [35]

La solution du problème d'écoulement signifie que déterminer l'équation nodale au point de base équivaut à résoudre ces équations par différentes méthodes utilisées sur le terrain. De plus, on peut les écrire sous la forme matricielle suivante :

$$I = Y * E \tag{IV.23}$$

Il y a deux lois pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance :

- Lois des mailles
- Lois des nœuds

La deuxième loi est la plus utilisée de sa rapidité et vu l'avantage qu'elle possède en réduisant à la fois le volume des informations stockées en mémoire.



### IV.6.1 Classification des nœuds dans un réseau électrique

Le transport de l'énergie électrique du lieu de production au lieu de consommation est un réseau unique formé de lignes aériennes, avec des générateurs et des consommateurs constituant des nœuds.

Cette structure de réseau nous oblige à distinguer trois types de nœuds :

#### IV.6.1.1 Nœuds producteurs (associés aux centrales)

La puissance active planifiée par le dispatching et le module de la tension sont connues par contre l'angle de déphasage et la puissance réactive sont inconnues dans ces nœuds.

#### IV.6.1.2 Nœuds consommateurs (associés aux charges)

Les charges ne sont pas caractérisées par leurs impédances mais par les puissances actives et réactives qui sont connues, les inconnues sont le module de la tension et l'angle de déphasage.

#### IV.6.1.3 Nœud Balancier

Ce nœud est associé généralement à une centrale la plus puissante, le module de la tension et l'angle de déphasage sont connus par contre les puissances actives et réactives sont inconnues ou nous sommes obligés de laisser varier la production pour satisfaire l'équation bilan.

$$\text{Production} = \text{Consommation} + \text{Pertes}$$

**Tableau IV. 2** Types des nœuds

Type de nœuds	Variables connues	Variables inconnues
Nœuds producteurs	P et E	Q et $\delta$
Nœuds consommateurs	P et Q	E et $\delta$
Nœuds Bilan	E et $\delta$	P et Q

### IV.6.2 Notion de l'écoulement de puissances

L'écoulement de puissances est le calcul et la dérivation de la tension nodulaire. Afin d'obtenir ce résultat, nous utilisons un modèle mathématique pour représenter le système énergétique.

S'il s'agit d'un système d'équations linéaires, nous pouvons obtenir une solution simple basée sur l'utilisation des méthodes de nœuds et de grilles, s'il s'agit d'un "système d'équations non linéaires", nous pouvons l'obtenir par des méthodes numériques.

- La méthode numérique peut être :
  - Méthode itérative: Gausse, Gausse-Seidel, Gausse-Seidel accélérée....
  - Méthode variationnelles : Newton Raphson, découplée, découplé rapide

### IV.6.3 Formulation du problème de l'écoulement de puissances [35]

Le bilan énergétique du nœud k est donné par :

$$S_k = S_{Gk} - S_{Chk} \quad (IV.24)$$

$$S_k = E_k I_k^* \quad (IV.25)$$

De l'expression (IV.25)

$$I_k^* = \sum_{m=1}^n Y_{km}^* E_{km}^* \quad (IV.26)$$

Avec :

$$Y_{km}^* = G_{km} - jB_{km} = \begin{cases} -Y_{km} & \text{si } k \neq m \\ \sum_{m=1}^n Y_{km} + \sum_{m=1}^n \frac{Y_{shkm}}{2} & \text{si } k = m \end{cases} \quad (IV.27)$$

$$S_{km} = I_{km}^* E_k \quad (IV.28)$$

L'écoulement de puissance du nœud k vers le nœud m :

$$S_{km} = I_{km}^* E_k \quad (IV.29)$$

Ou bien :

$$S_{km}^* = E_k^* I_{km} \quad (IV.30)$$

Avec :

$$I_k = (E_k - E_m) y_{km} + \frac{E_m y_{km}}{2} \quad (IV.31)$$

Donc l'expression des puissances transmises du nœud k vers le nœud m sera :

$$S_{km}^* = E^*(E_k - E_m)y_{km} + E_{km}^*E_m(y_{shkm}/2) \quad (IV.32)$$

Les puissances injectées :

$$S_k = \sum_{m=1}^n S_{km} \quad (IV.33)$$

Et les pertes de puissances :

$$S_L = P_L - jQ_L = \sum_{k=1}^n P_k - j \sum_{k=1}^n Q_k \quad (IV.34)$$

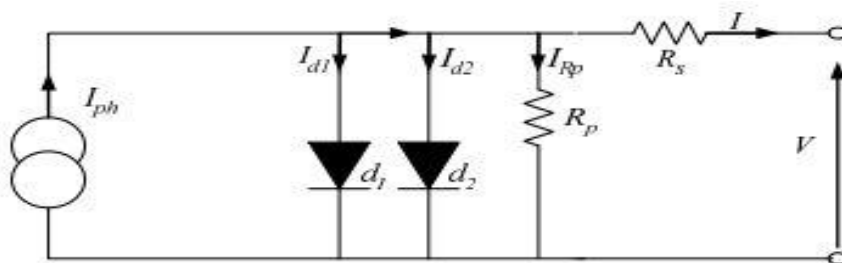
### IV.7 Modélisation du générateur photovoltaïque [36]

Les cellules solaires sont généralement connectées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir des modules photovoltaïques. Les générateurs photovoltaïques sont composés de modules interconnectés pour former une unité qui produit une puissance continue élevée compatible avec les équipements électriques ordinaires.

Les modules PV sont généralement connectés en série et en parallèle pour augmenter la tension et le courant à la sortie du générateur. Les modules d'interconnexion sont montés sur un support métallique et inclinés à un angle requis en fonction de la position. Ce groupe est généralement appelé un champ de module.

#### IV.7.1 Modèle à deux diodes [37].

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé, est représenté sur la Figure IV.8



**Figure IV. 8** Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

Comme la montre le schéma de la figure (IV.8) une photopile comporte une résistance série  $R_s$  et une résistance en dérivation ou shunt  $R_p$ . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. D'après la figure (IV.8) le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donné par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left( e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left( e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n_2 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{IV. 35})$$

Où :

- $I$  et  $V$  : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque.
- $I_{ph}$  : Photo-courant produit.
- $I_{s1}$  Et  $I_{s2}$  : Les courants de saturation des diodes.
- $n_1$  Et  $n_2$  : Les facteurs de pureté de la diode.
- $R_s$  Et  $R_p$  : Respectivement la résistance série et la résistance parallèle.
- $T$  : Température absolue en Kelvin.
- $Q$  : Charge élémentaire constante ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  C).
- $K$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k).

• Le photo-courant  $I_{phmax}$  est atteint à une insolation maximum, souvent on a ( $I_{ph} = S \cdot I_{phmax}$ ) avec  $S$ : pourcentage d'insolation. Il est évident de l'équation (IV.35), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph}(T) = I_{ph(T=298)} \cdot (1 + (T - 298) \cdot (5 \cdot 10^{-4})) \quad (\text{IV. 36})$$

$$I_{s1} = K_1 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{K \cdot T}} \quad (\text{IV. 37})$$

$$I_{s2} = K_2 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{K \cdot T}} \quad (\text{IV. 38})$$

Où

$E_g$ : est la bande d'énergie du semi-conducteur et

$$K1=1.2A/cm^2.k^3 \quad (IV.39)$$

$$K2=2.9 A/cm^2.k^{5/2}$$

#### IV.7.2 Algorithme « perturbation et observation » (P&O)

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, son principe consiste à perturber la tension  $V$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la Figure (IV.9), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V$  engendre un accroissement de la puissance  $P$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

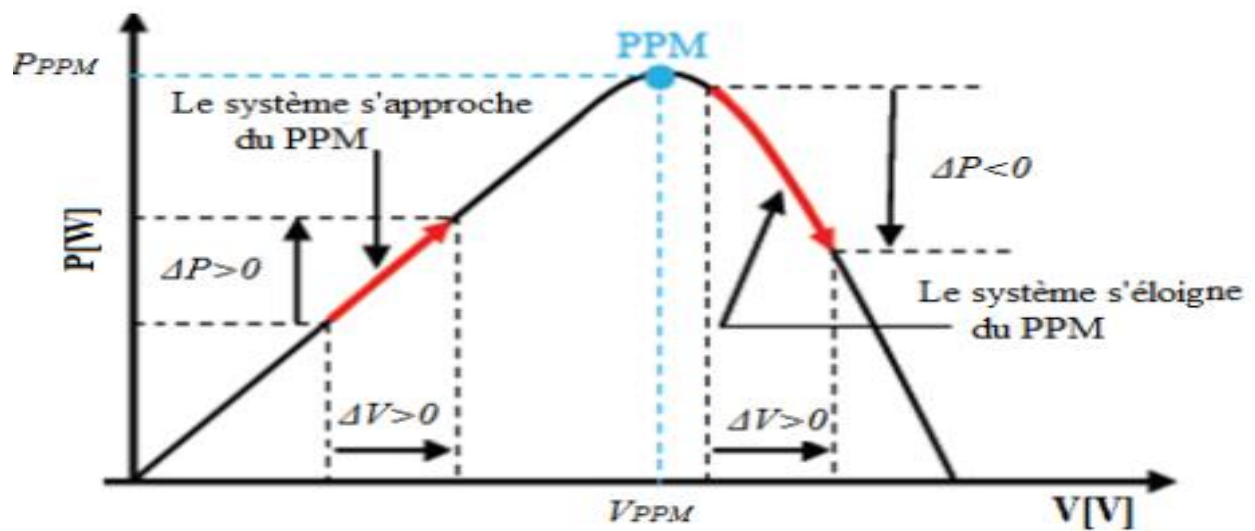
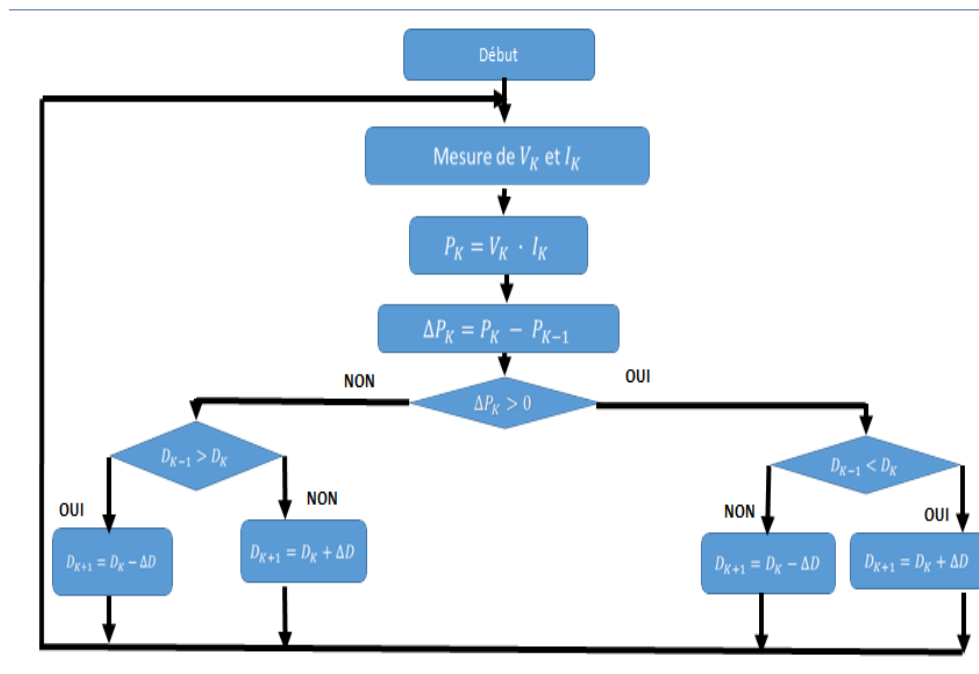


Figure IV. 9 Caractéristique  $P(V)$  d'un panneau solaire



**Figure IV. 10** Organigramme de la méthode perturbation et observation

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale de fonctionnement ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

- Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein :

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale [37].

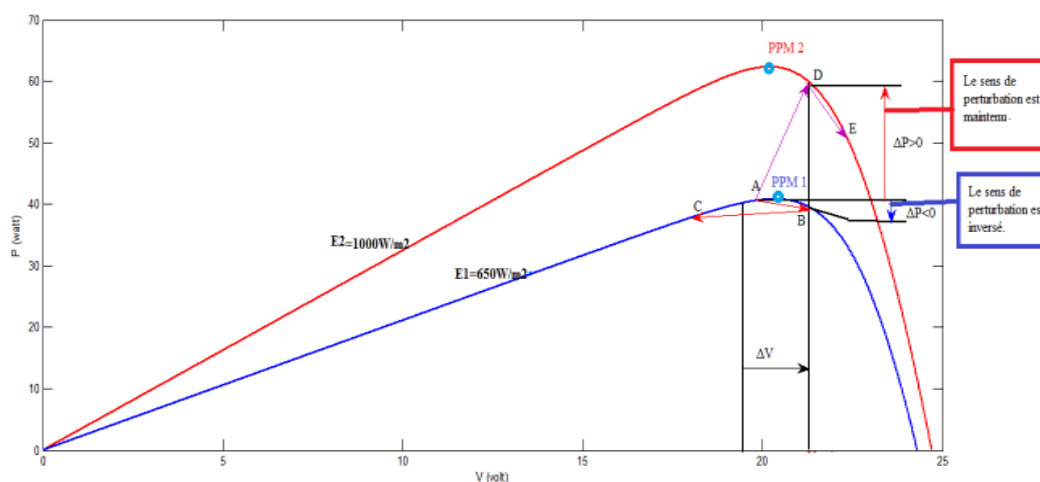
Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. Il faut

donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [37].

Ce problème est mis en évidence, par Noppadol Khaehintung, publiée en 2006 [38], où la recherche du PPM est effectuée avec deux valeurs d'incrément fixes. L'une correspondant à  $\Delta V_1=2/256$  V et l'autre à  $\Delta V_2= 5/256$  V. A partir des oscillogrammes proposés, le temps mis pour atteindre le nouveau PPM, lors d'une variation de puissance de l'ordre de 8 W, est de 200 ms pour l'incrément de faible valeur, alors que celui-ci est divisé par deux pour l'incrément de forte valeur. En contrepartie, les oscillations autour du PPM sont accentuées pour ce dernier.

Par contre, une étude comparative entre différents algorithmes de recherche a été effectuée par D. P. Hohm en 2000 [38]. Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de test qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Les principes de recherche analysés sont, outre la méthode P&O, l'incrément de conductance et une méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ). Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée basée sur le principe P&O affiche des performances très intéressantes, cependant aucune indication n'est fournie par l'auteur sur la valeur de la variable d'incrément et si cette valeur est une valeur moyenne ou une valeur liée aux conditions climatiques. En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la Figure (IV.11).



**Figure IV. 11** Divergence de la commande P&O lors de variations d’irradiation. (Les deux courbes sont relevées pour le modèle de deux diodes précédant)

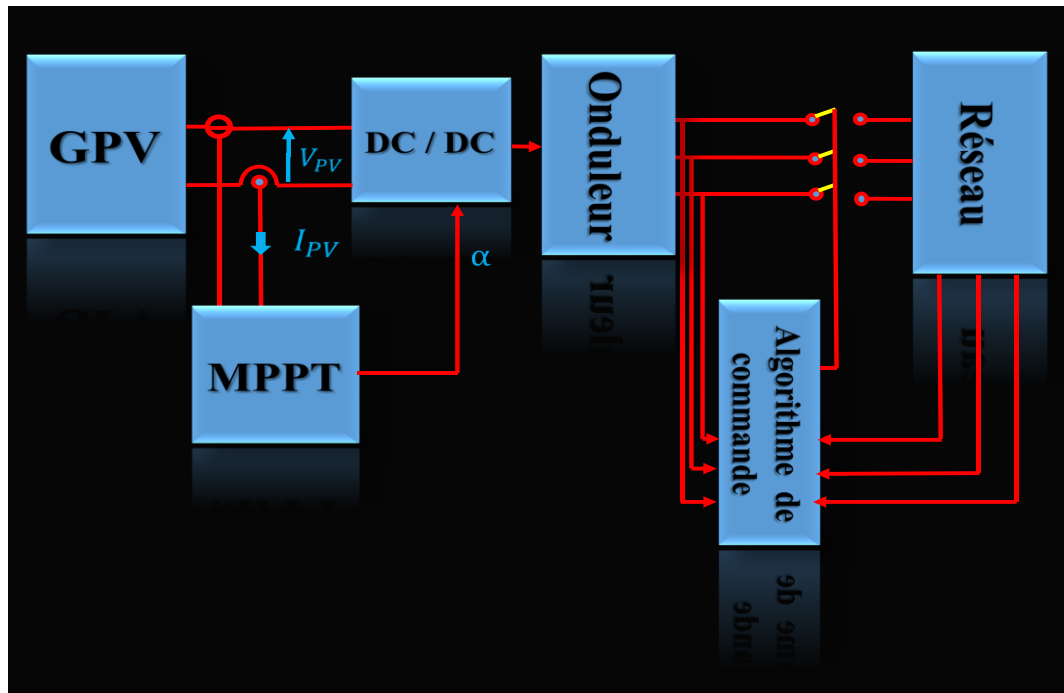
Pour comprendre, prenons l’exemple d’un éclairement donné, noté  $E_1$ , avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta V$ , cette dernière bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d’éclairement, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d’une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d’équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C.

On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d’un changement d’irradiation (évolution des caractéristiques  $P(V)$  du module de  $E_1$  à  $E_2$ ), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n’ayant pas la possibilité de voir l’erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s’éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non optimisation de la puissance momentanée.

## IV.8 Intégration du système photovoltaïque au réseau électrique triphasé

### IV.8.1 Schéma global de l’intégration





**Figure IV. 12** Schéma global explicatif de l'intégration du GPV dans un réseau

La figure ci-dessus représente un schéma global de l'intégration des phases de l'onduleur (DC/AC) à la sortie de la central PV au réseau électrique, commandé par un algorithme.

## IV.8.2 Algorithme d'équilibrage et de raccordement

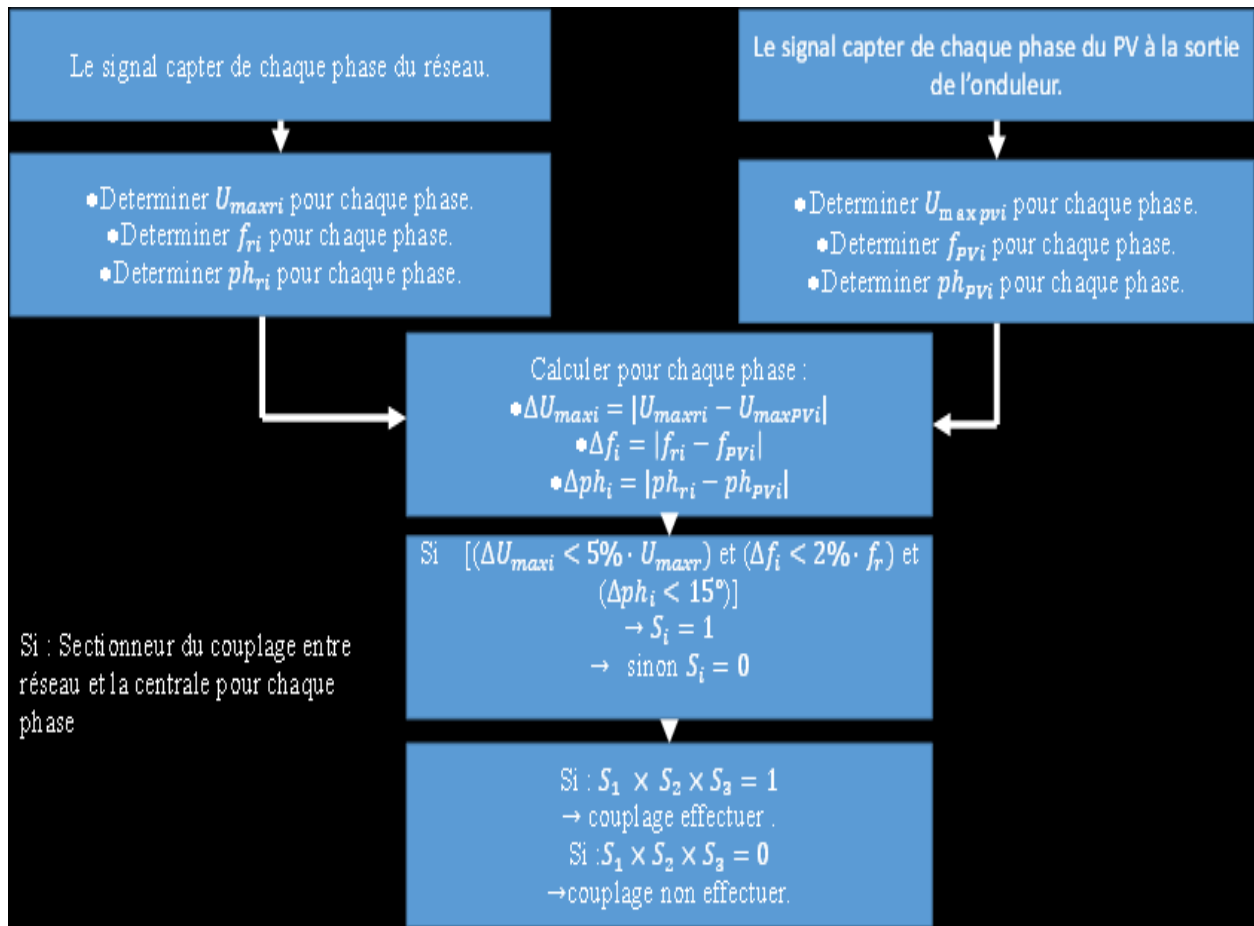


Figure IV. 13 Organigramme de l'algorithme d'équilibrage

Dans cet algorithme on étudiera le raccordement de la tension sinusoïdale triphasé ondulé à la sortie du système photovoltaïque (PV) au réseau électrique triphasé, et pour réaliser ce raccordement, il faut vérifier certaines conditions nécessaires pour avoir un équilibre entre phase.

Cet algorithme sert au raccordement en vérifiant les normes d'intégration internationale exprimée par le déphasage, amplitude et fréquence.

Chaque phase comporte trois éléments essentiels (l'amplitude, le déphasage et la fréquence) ( $U_r, U_{pv}$ ) ( $\phi_{r, \phi_{pv}}$ ) ( $f_r, f_{pv}$ ) respectivement.

D'abord on compare les éléments de chaque phase de notre système (PV) et celle du réseau, c'est-à-dire pour qu'on ait l'équilibre entre phase il faut qu'on ait presque les mêmes fréquences, amplitudes et déphasages du système (PV) et celle du réseau électrique.

Les conditions de couplage de notre installation avec le réseau :

- Pour l'amplitude de tension, si la différence d'amplitude 5% après couplage le réseau impose ses valeurs entre celle de la phase<sub>i</sub> à la sortie de système photovoltaïque et celle de réseau électrique est inférieure à 5%, donc une condition d'équilibre est vérifiée ;
- Pour la fréquence, si la différence de fréquence entre celle de la phase<sub>i</sub> à la sortie de système PV et celle de réseau électrique est inférieure à 2%, donc une condition d'équilibre est vérifiée ;
- Pour le déphasage, si la différence de déphasage entre celle de la phase<sub>i</sub> à la sortie de système photovoltaïque et celle de réseau électrique est inférieure à 15°, donc une condition d'équilibre est vérifiée.

Après avoir vérifié les différents conditions d'équilibre entre chaque deux phases, cet algorithme permis de raccorder les phases du système PV au réseau électrique triphasé.

L'algorithme joue deux rôles très importants.

- Le couplage de centrale PV au réseau électrique triphasé.
- La protection de phénomène d'ilotage : si on aura un problème ou bien une opération de maintenance sur le réseau, cet algorithme permis la déconnection directement.

#### IV.9 Simulation et interprétation des résultats

La Figure (IV.14) représente le schéma global de la simulation.

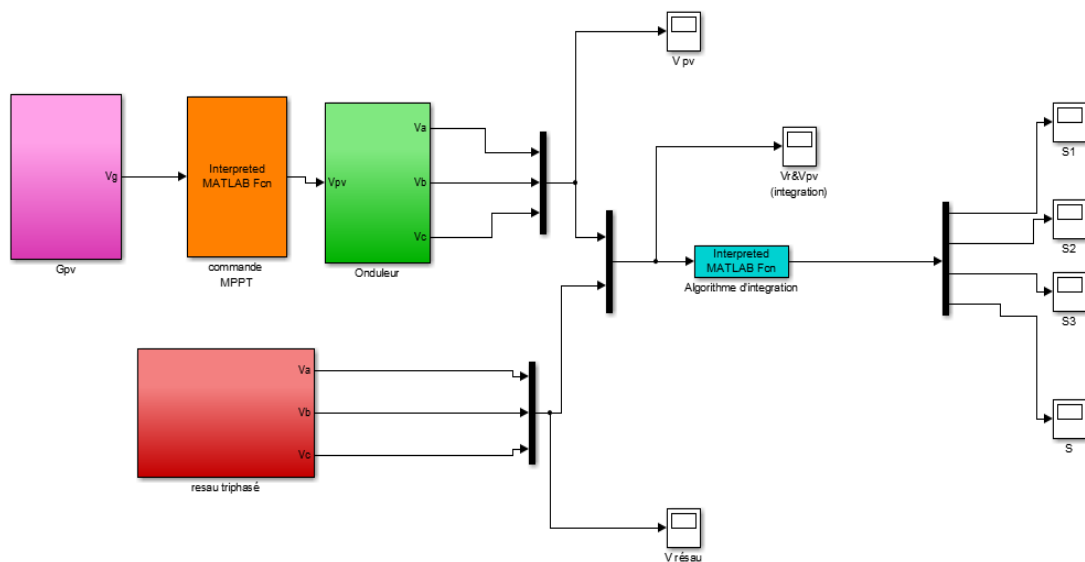


Figure IV. 14 Schéma global de simulation

$S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  sont des sorties logiques de vérification d'équilibre entre les phases 1, phases 2 et phases 3 du PV et du réseau respectivement (amplitude, fréquence et déphasage).

S représente la sortie d'état du raccordement, elle est en fonction des sortie logiques de  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ .

Pour tester l'efficacité de notre système, on a effectué trois types de test

#### IV.9.1 En conditions parfaites

En conditions parfaites, l'amplitude, le déphasage et la fréquence du réseau et du système PV sont identiques, comme le montre la Figure (IV.15).

Les figures (IV.16) et (IV.17) montrent des résultats de la simulation (algorithme d'intégration) dans les cas où les conditions sont parfaites :

$$T=25^{\circ}\text{C} = 298^{\circ}\text{K}, E=1000\text{Wh/m}^2.$$

Sur tout l'échelle  $S_1 = 1$   $S_2 = 1$  et  $S_3 = 1$ , cela implique que les conditions d'équilibrage (amplitude, déphasage et fréquence) sont vérifiées.

La sortie  $S_t$  qui fonctionne comme suit :  $S_t = S_1 * S_2 * S_3$  est égale à 1 donc les conditions de raccordement sont vérifié et vrai ce qui permet une intégration du réseau décentralisé (PV) avec le réseau domestique.

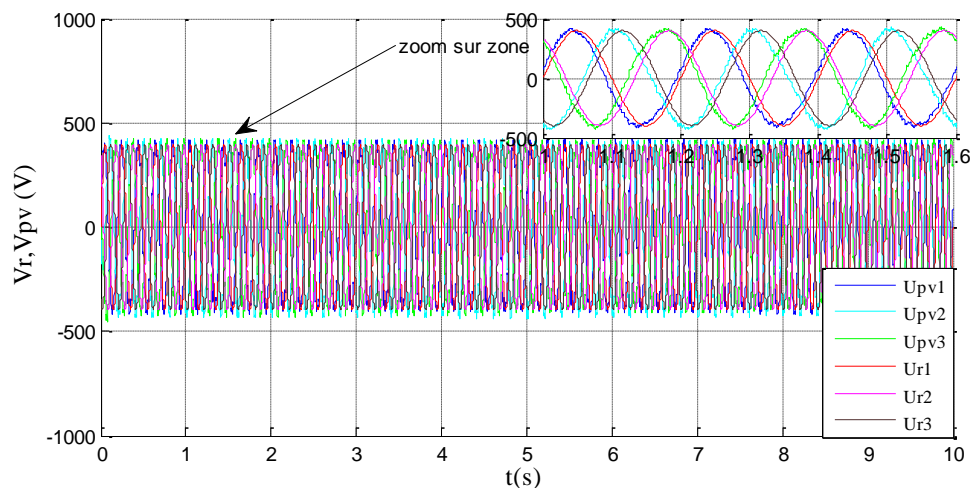
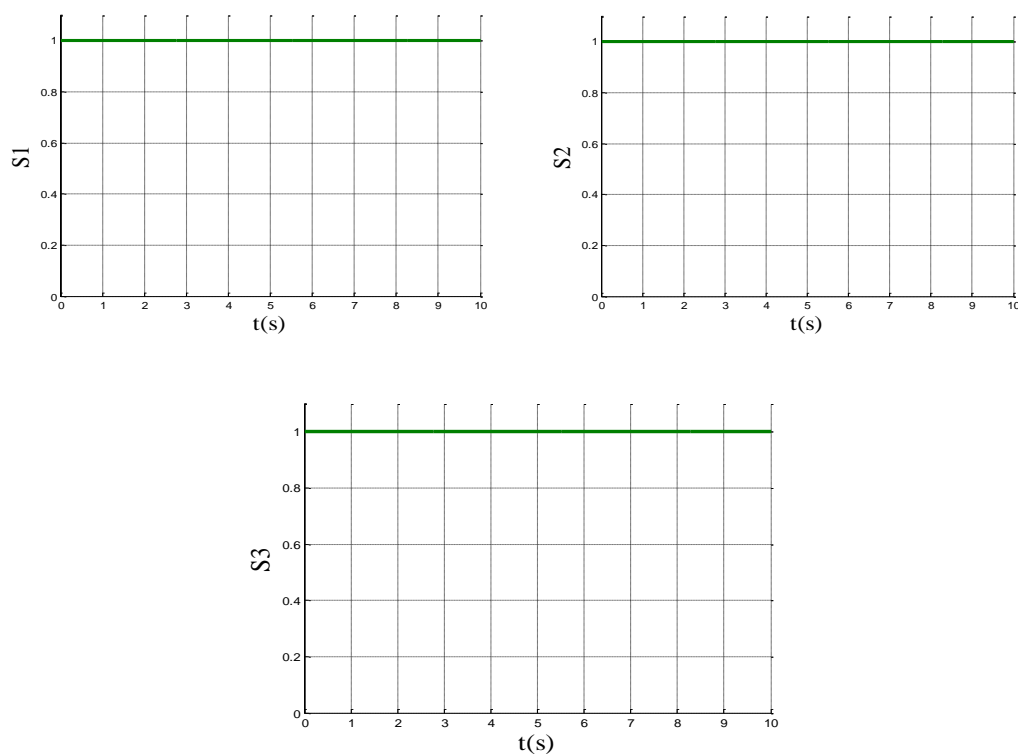
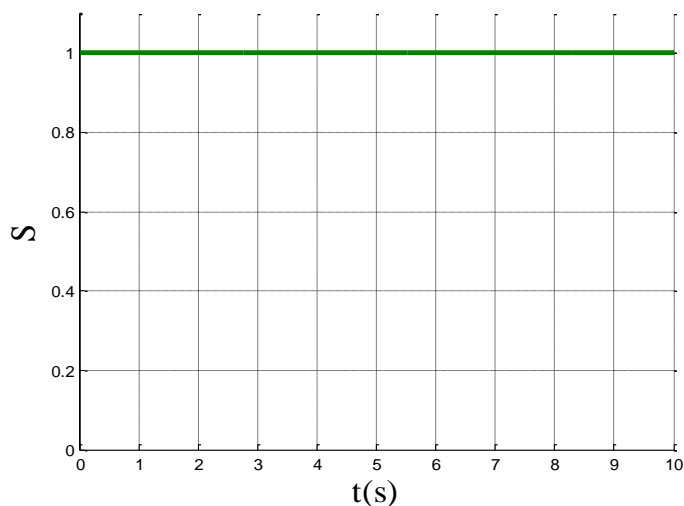


Figure IV. 15 Allures des tensions du PV et du réseau triphasé



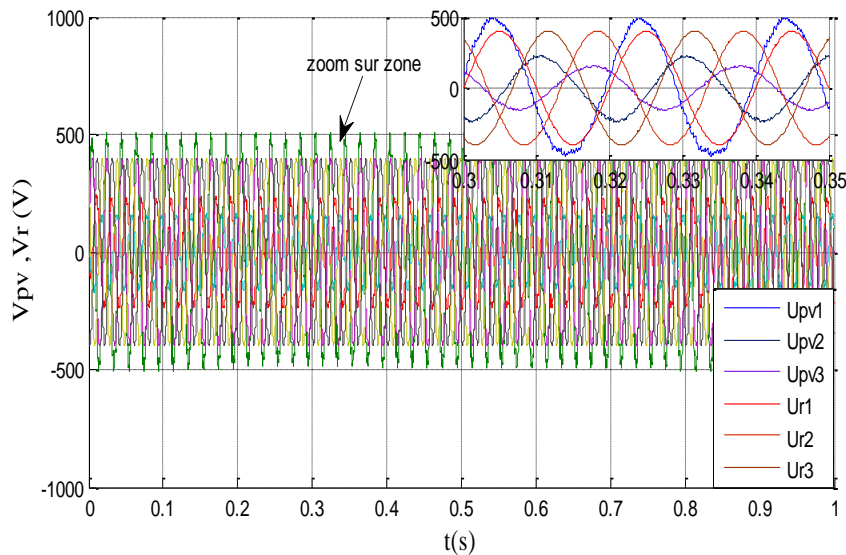
**Figure IV. 16** Etats de connexion de chaque phase (conditions d'intégration vérifiées)



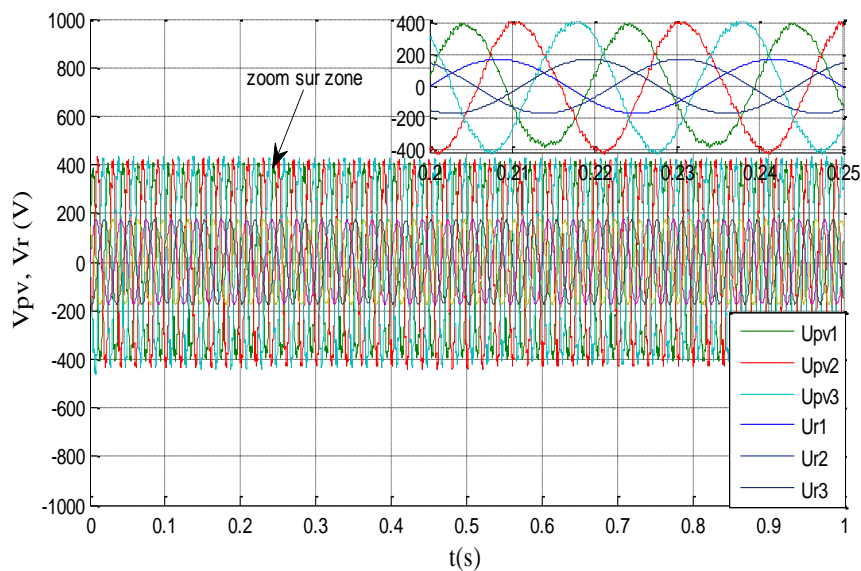
**Figure IV. 17** Etats de sectionneur de réseau & système PV (intégration parfaite)

### IV.9.2 Avec perturbations

Dans les cas de perturbations (réseau ou centrale PV) représentées par les Figures (IV.18, IV.19), on constate un décalage entre les signaux de tensions de l'onduleur de système PV et le réseau triphasé soit en amplitude, en déphasage ou en fréquence.



**Figure IV. 18** Perturbation centrale PV



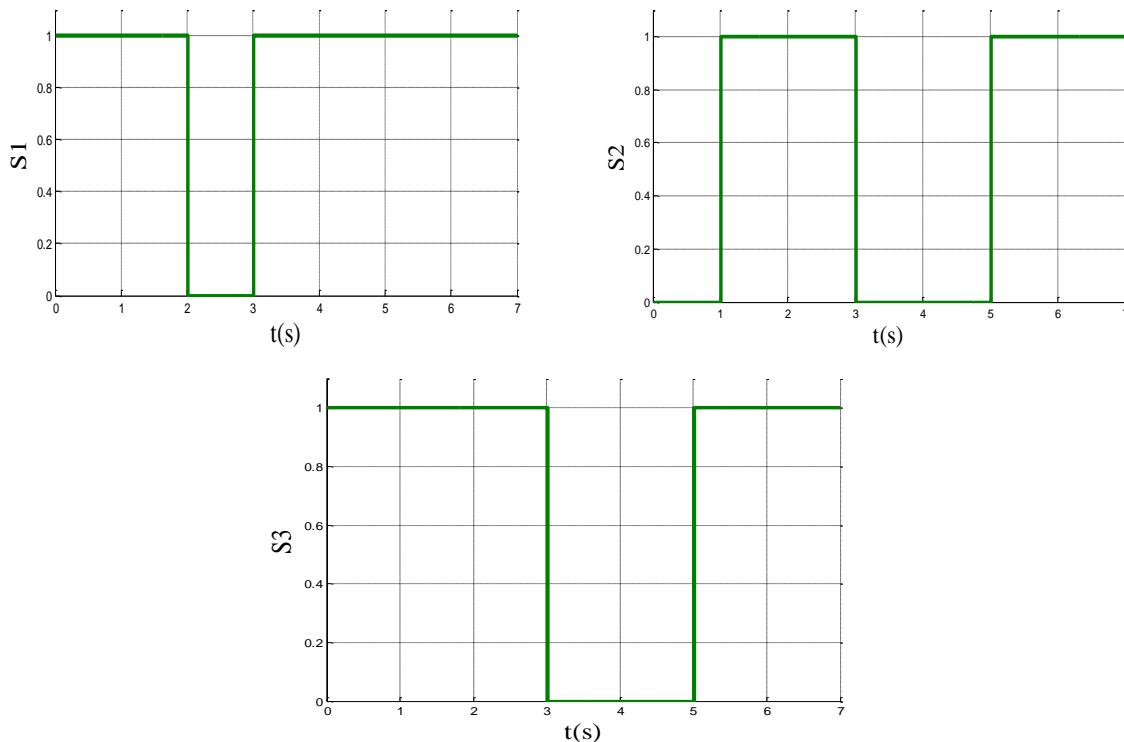
**Figure IV. 19** Perturbation réseau

Les allures obtenues lors de les perturbations à la sortie de l'algorithme de l'intégration sont représentés par les Figures (IV.20) et (IV.21)

A  $t \in [0-2]$  et  $t \in [3-7]$  la première sortie de l'algorithme d'équilibrage ( $S_1 = 1$ ) est vrai puisque les conditions d'équilibrage sont vérifiées, soit en terme d'amplitude, de déphasage et de fréquence. Par contre à l'intervalle  $[2-3]$  la sortie logique ( $S_1 = 0$ ) est fautive à cause d'une perturbation dans l'un des réseaux ou les deux en même temps. Cette perturbation influence négativement sur les conditions de raccordement posées par l'algorithme.

A  $t \in [1-3]$  et  $t \in [5-7]$  la deuxième sortie de l'algorithme d'équilibrage ( $S_2 = 1$ ) est vrai puisque les conditions d'équilibrage sont vérifiées soit en terme d'amplitude, de déphasage et de fréquence. Par contre à l'intervalle  $[0-1]$  la sortie logique ( $S_2 = 0$ ) est fautive à cause d'une perturbation dans l'un des réseaux ou les deux en même temps. Cette perturbation influe négativement sur les conditions de raccordement posées par l'algorithme.

A  $t \in [0-3]$  et  $t \in [5-7]$  la troisième sortie de l'algorithme d'équilibrage ( $S_3 = 1$ ) est vrai puisque les conditions d'équilibrage sont vérifiées soit en terme d'amplitude, de déphasage et de fréquence. Par contre à  $t \in [3-5]$  la sortie logique ( $S_3 = 0$ ) est fautive à cause d'une perturbation dans l'un des réseaux ou les deux. Cette perturbation influe négativement sur les conditions de raccordement posées par l'algorithme.



**Figure IV. 20** Etats de connexion de chaque phase (intégration perturbée)

A  $t \in [1-2]$  et  $t \in [5-7]$  l'allure d'état de  $S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 1$  veut dire que la sortie d'état du raccordement est vraie, sinon  $S = 0$  si l'un des paramètres qui n'est pas vérifié ( $S_1$ ,  $S_2$  ou  $S_3 = 0$ ).

En fait, l'intégration se fait dans le cas où les conditions d'équilibrage des trois phases des deux réseaux sont vérifiées et validées au même temps.

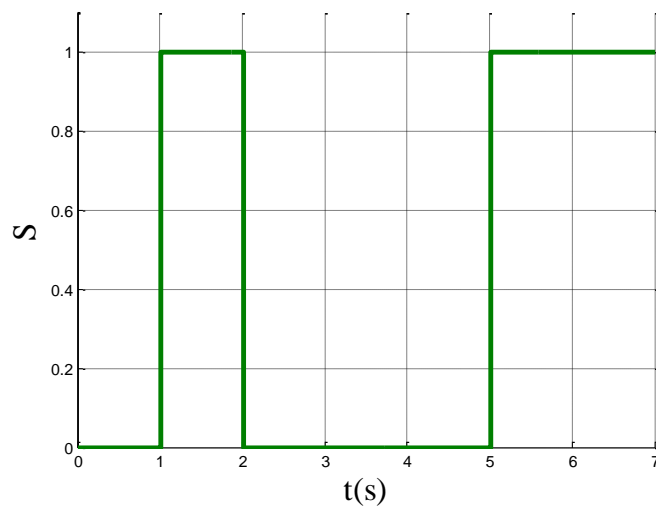


Figure IV. 21 Etats de sectionneur de réseau & système PV (intégration perturbé)

### IV.9.3 Cas de coupure de réseau

Supposant que les tensions à la sortie de l'onduleur de la centrale PV sont parfaites, et le réseau domestique est coupé, pour faire une maintenance par exemple (test de cas d'ilotage) Figure (IV.22)

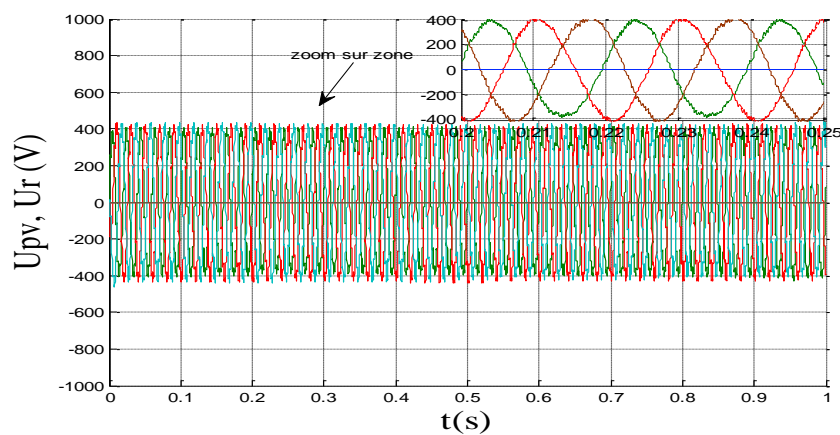
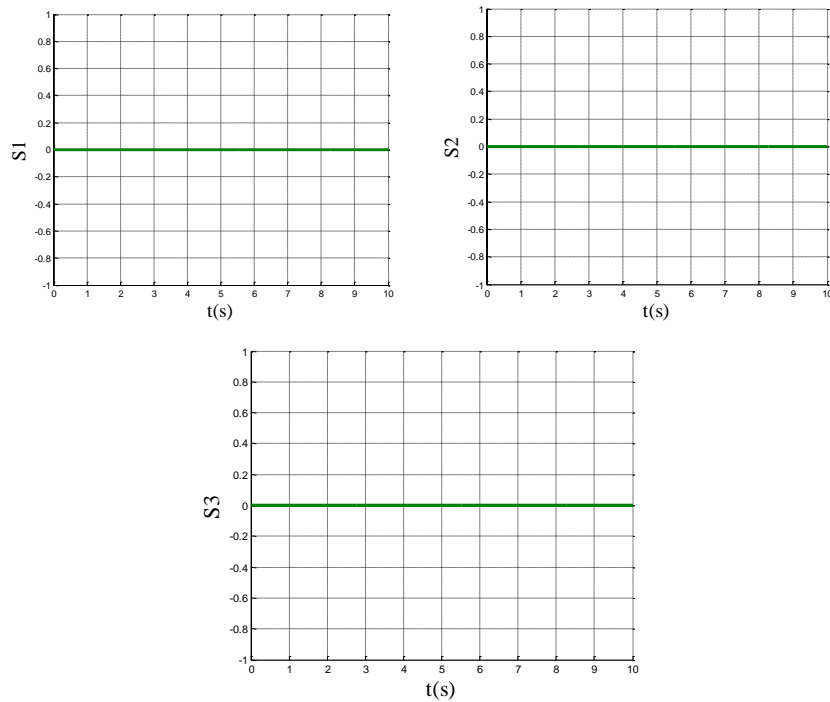


Figure IV. 22 Coupure du réseau

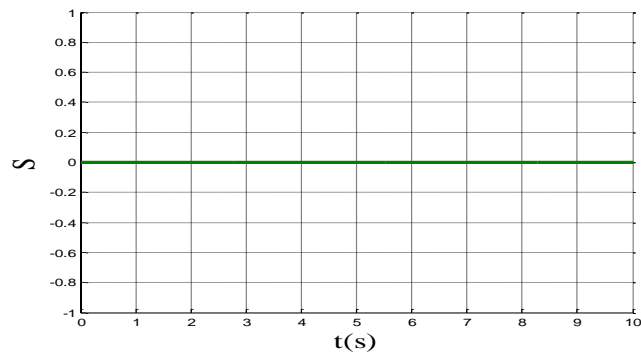
Les Figures (IV.23) et (IV.24) montrent des résultats de la simulation dans les cas de la coupure du réseau.





**Figure IV. 23** Etats de connexion de chaque phase

Sur tout l'échelle les états des sorties des allures sont fausses ( $S_1 = 0, S_2 = 0$ , et  $S_3 = 0$ ), cela implique que les condition d'équilibrage n'ont pas vérifié.



**Figure IV. 24** Etats de sectionneur de réseau & système PV (intégration éliminé)

La sortie de sectionneur  $S$  est égale à 0 c'est-à-dire l'intégration du réseau décentralisé (PV) au réseau triphasé a été éliminé à cause des conditions de raccordement qui sont pas vérifiées.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre consacré au réseau électrique de distribution et puissances transitées, On a vu qu'un réseau utilise, en plus des lignes de transport, des postes de transformations et d'interconnexion.

Pour pouvoir résoudre le problème de répartition d'énergie dans un système, il est nécessaire de connaître au moins un modèle mathématique. Cela nous permet de calculer les différentes caractéristiques du réseau (écoulement des puissances, tensions, courants, pertes). Une fois que le système électrique est modélisé, ainsi que la modélisation de source renouvelable choisie.

L'algorithme de cette application permet de commander l'intégration du réseau décentralisé (PV) au réseau triphasé lorsque les conditions d'équilibrages sont vérifiées.

Ces conditions consistent les mêmes amplitudes, déphasages et fréquences, l'absence d'une des conditions citées conduit à l'annulation du raccordement.

On peut conclure que cet algorithme joue un rôle important dans la protection d'intervenant (l'ilotage).

## Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce projet de fin d'étude ont permis le contrôle de la gestion de l'intégration des énergies renouvelables au réseau triphasé. Ces études ont permis de déterminer comment affecter l'impact de l'énergie photovoltaïque sur le réseau.

Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude bibliographique qui nous a permis de passer en revue les sources d'énergie renouvelables en général, et l'énergie solaire en particulier. Nous avons passé en revue certains concepts sur le rayonnement solaire, les différentes technologies solaires et les types d'installations utilisés sur le terrain.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des énergies renouvelables et les technologies utilisées en Algérie ainsi que les engagements effectués sur les plans de développement énergétique et fractionnel.

Tant dis qu'au troisième chapitre, on a cité les différents impacts des énergies renouvelables sur le réseau et les différents effets du raccordement au réseau sont expliqués.

En effet dans le quatrième chapitre, on a présenté une analyse d'une modélisation d'un réseau électrique et son fonctionnement. Puis nous avons défini les principes du flux de puissance en premier lieu.

En deuxième lieu on a modélisé une cellule photovoltaïque ayant deux diodes adapté par une commande numérique (commande MPPT), la tension du panneau photovoltaïque adaptée a été utilisé par un onduleur pour convertir la tension continue en tension alternative, le système a été simulé sur MATLAB/Simulink.

Dans la dernière simulation où nous adoptons le calcul de l'écoulement de puissance pour étudier l'impact des énergies renouvelables sur ce réseau par un algorithme qui permet de contrôler l'accordement du réseau décentralisé (PV) dans le réseau triphasé en satisfaisant certaines conditions.

Comme intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du système proposé sont envisageables:

1. Une régulation adéquate pour avoir des conditions d'intégration optimale.

## Bibliographie

- [1] « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ». Mars 2011 Ce document a été élaboré par le ministère de l'énergie et des mines conception et réalisation SATINFO Société du Groupe Sonal gaz.
- [2] L. Leclercq, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [3] Site web : [//www.eolienne-particulier.info](http://www.eolienne-particulier.info), « ressources d'information sur les éoliennes pour particulier », mars.2021.
- [4] A. OUDRANE, « Contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel », ENP-Oran-MA, thèse de Doctorat- (Soutenu le 05 Mars 2018)
- [5] F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » thèse de doctorat, université de Nantes, 2003.
- [6] J. jacques, Beziane « L'énergie solaire. Wood energy barometer. Systèmes solaires » n°158. Décembre 2003. EurObserv'ER.
- [7] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ». Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [8] Site web: « [http://www.energies-renouvelables.org/energies\\_renouvelables.asp](http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp)», avril 2021.
- [9] J. M. Navarro, « Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible », Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [10] L. de Schoul epnik off et G. A Piccard, « Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années ? », Travail de maturité, Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [11] C. Cédric, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [12] A. Luque and S. Hegedus, « Handbook of photovoltaic science and engineering », John Wiley& Sons Ltd, 2003

- [13] J. Abdelhak, « modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque –Eolienne », thèse de doctorat.
- [14] R. Khezzar, « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque », revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379- 388,2010.
- [15] S. M. Boudia, "Optimisation de l'Evaluation Temporelle du Gisement Energétique Eolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie", thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2013.
- [16] Observ'ER, l'Observatoire des énergies renouvelables, « La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », Quinzième Inventaire Edition 2013.
- [17] THI THU HA PHAM « influence de la production sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissances ». Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [18] SICAE\_oise « Raccordement d'une production A-coup set variations rapides de tension ». Référentiel technique 2006.
- [19] EDF « Étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production en HT », NOP-RES\_22E2005.
- [20] A. ARBAOUI « Aide à la décision pour la définition d'un système éolien adéquation au site et à un réseau faible ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2006.
- [21] 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.
- [22] E. FLORIN. MOGOS « production dans les réseaux Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers2005.
- [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 50160 - 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 ». K/EL/00262/REP.URN 02/1145, Mai, 2002.
- [25] J. MARTIN. « Énergies éoliennes », page de 2-13, Ingénieur de l'École nationale supérieure des arts et métiers, Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie énergétique.
- [26] PAUL GIPE « Le Grand livre de l'éolien », édition du Moniteur, 27 février 2007.
- [27] H.J. WANGER. « Livre Energy Technologies » 2010, sub volume C : Renewable Energy
- [28] D. LE GOURIERES. « Eolienne : Théorie conception et calculs pratiques des installations », Edition Evrolles, Energie, 2012.
- [29] J W Smith, R Dugan, M Rylander, and T Key « Advanced distribution planning tools for high pénétration pv deployment ». In *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [30] F. DIOP « Physics and Engineering (EOBE) » Spécialité de doctorat : Génie Électrique, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay École doctorale n° 575 Electrical, Optical, Bio 2018.
- [31] H. Colin (CEAINES), C. Duavauchelle (EDF), Y. Tangy (TransEnergie), B. Gaiddon (HESPUL), T. Tran-Quoc (IDEA). ESPIT. Decembre 2011.
- [32] L.CHIALI « Contrôle des dispositifs FACTS appliqués au réseau Ouest -Algérien», thèse de Doctorat, Université USTO, 2010.
- [33] A.HAMMOUD «Étude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination des réseaux de distribution», Thèse de Doctorat, Université LYON, 2010.pp.6.
- [34] T. WILDI, G. SYBILLE « ELECTROTECHNIQUE », 4ème édition .2005
- [35] F. LAKDJA «contrôle des transits de puissance par dispositif FACTS : application à un réseau d'énergie électrique», mémoire de magister en électrotechnique, option « commande des processus », ENSET, Oran.2005.
- [36] D. Bellala, « Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Conversion d'Énergie, Application aux Systèmes Photovoltaïques ». Thèse de Doctorat de l'université de Batna.
- [37] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse Doctorat de l'école Polytechnique, 2007.
- [38] P. Sabatier, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.

## **Résumé**

Le but de travail présenté dans ce projet de fin d'étude est de montrer l'impact d'intégration d'énergie renouvelable sur le réseau électrique domestique.

Dans un premier temps, on a présenté les énergies renouvelables en générales et en particulier les énergies renouvelables en Algérie, on s'est intéressé à l'énergie solaire pour sa simplicité d'exploitation et le potentiel élevé en Algérie.

En captant cette énergie grâce au PV pour produire de l'électricité. On se trouve confronté à des perturbations qui influent sur le réseau électrique domestique, on a intégré un algorithme de contrôle (d'ilotage) de raccordement entre ces deux réseaux (PV et triphasé).

Des résultats de simulation ont été obtenus et interprétés à la fin de ce travail

**Mot clé :** Intégration, impact, raccordement, réseau domestique, centrale PV.

## **Abstract**

The aim of the work presented in this end-of-study project is to show the impact of integrating renewable energy on the domestic electricity grid.

Initially, we presented renewable energies in general and in particular renewable energies in Algeria, we were interested in solar energy for its simplicity of operation and the high potential in Algeria.

By capturing this energy through PV to produce electricity. We are faced with disturbances that influence the domestic electricity network, we have integrated a control algorithm (islanding) of the connection between these two networks (PV and three-phase).

Simulation results were obtained and interpreted at the end of this work.

**Keyword :** Integration, impact, connection home network, PV plant.

