

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Définir le Réseau Intelligent
Application : wilaya de SAIDA**

Présenté par :

**HABANI Omar
HACHEMANE Abdel Hamid**

Devant le jury composé de :

Pr. L. BOUMEDIENE

Pr. F. LAKDJA

Dr. M.YAHYAOUI

Président

Encadreur

Examineur

Soutenu le /09/2021

Promotion 2020-2021

Remerciement

Louange à Dieu qui nous a permis de mener à bien cette recherche modeste et nous a fourni la santé et le bien-être à la lumière des circonstances difficiles que le monde a traversées, et des morts a cause de covid19 , puissent Allah les accueillir en vaste paradis.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Pr LAKDJA Fatiha**, nous la remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

Nous adressons nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Merci





DEDICACE

Je dédie ce travail

A ma mère, pour son amour, ses

Encouragements et ses sacrifices

A mon père, pour son soutien, son affection

Et la confiance qu'il m'a accordée

A la mémoire de mon cher grand-père

A tous les membres de ma famille

A tous mes amis

Et tous ceux qui m'aiment....

HABANI OMAR

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents, que Dieu les protège.

À mes chers frères et mes petites sœurs et toute ma famille.

Une dédicace spéciale à tous mes amis, et pour tous ceux qui me connaissent, en particulier mon cher ami Hâdef hamza, ahmed amiri, abdelkader majdoubi et abderahman mebarki.

*À la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon binôme, mon ami et mon frère **HABANI OMAR.***

HACHEMANE ABDEL HAMID

Résumé

L'accès à l'énergie constitue une priorité stratégique dans le monde entier et avec la forte consommation de l'énergie qui est due principalement à la croissance démographique, le développement industriel, transport, ... etc., les pays sont amenés à revoir leurs politiques énergétiques tout en utilisant un mix-énergétique en s'appuyant sur les énergies renouvelables.

Généralement, l'intégration directe de sources d'énergies renouvelables dans les réseaux électriques existants peut créer de nouveaux défis, dus principalement à la variabilité et à l'incertitude de ces sources d'énergies. Pour arriver à ce but, l'introduction du concept de réseau intelligent a permis de relever ces défis en permettant l'intégration économique de ce type d'énergie.

Le travail réalisé dans ce mémoire se concentre principalement sur la représentation de réseau de la wilaya de Saida qui est une solution innovante aux problèmes du réchauffement climatique et de la pollution environnementale. Ces systèmes comprennent des producteurs d'énergie et de multiples charges électriques.

Ce mémoire met en œuvre la simulation d'un micro-réseau avec plusieurs sources d'énergies renouvelables qui y sont connectées et pour deux cas différents connectés (Ongrid) et déconnecté (offgrid) au réseau principal.

Les résultats obtenus sous power-world montrent le fonctionnement du micro-réseau selon différents types de charges.

Mots clés : Ecoulement de puissance, Energie renouvelable, Réseaux Intelligent, Logiciels, stratégie.

Abstract

The access to energy is a strategic priority in the world, and with the high consumption of energy, which is mainly due to population growth, industrial development, transport...ect, countries are encouraged to review their energy policies while using energy mix based on renewable energy.

Generally, the direct integration of renewable energy sources into existing electricity grids can create new challenges, mainly due to the variability and uncertainty of these energy sources, to achieve this goal, the introduction of smart grid concept made it possible to meet these challenges by allowing the economic integration of this type of energy.

The work carried out in this dissertation mainly focuses on the representation of grid Saida state which is an innovative solution to the problems of global warming and environmental pollution. These systems include power generators, multiple electrical loads.

This thesis implements the simulation of a micro-grid with several renewable energy sources connected to it and in two different cases connected (Ongrid) and disconnected (Offgrid) to the main grid.

The results obtained under Power World show the functioning of the micro-grid according to different types of loads.

Key words: Power Flow, Renewable energy, Smart Grid, Software, strategy.

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des Acronymes.....	VII
Introduction générale	1

***Chapitre I : Les EnR et leurs Problématiques d'intégrations
Dans le Réseau électrique***

I.1 Introduction	4
I.2 Définition de réseau électrique	4
I.2.1 Architecture des réseaux électriques	5
I.2.2 Différents types de réseaux électriques.....	6
I.3 Problématique du fonctionnement des réseaux électriques	8
I.4 Différents types de GED d'origine renouvelable	8
I.4.1 Solaire.....	8
I.4.2 Éolienne.....	9
I.4.3 Hydraulique.....	10
I.4.4 Biomasse.....	10
I.4.5 Géothermie	11
I.5 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables	11
I.6 Production électrique décentralisée :.....	12
I.7 Problématique d'intégration des EnR dans le Réseau électrique :.....	14
I.7.1 Modes de raccordement :.....	14
I.8 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution :.....	14
I.9 Répondre aux défis de l'intégration des énergies renouvelables aux réseaux électriques :.....	16
I.10 Conclusion :.....	16

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

II.1. Introduction	17
II.2. Historique du développement des smart grids	17
II.3. Réseaux électriques intelligents (smart grid).....	17
II.3.1. Les enjeux stratégiques	19



Table des matières

II.3.2. Objectifs principaux du réseau électrique intelligent.....	20
II.3.3. Les caractéristiques du réseau électrique intelligent	20
II.4. Comparaison des réseaux classiques et des réseaux électriques intelligents.....	21
II.5. Les grands projets smart grids dans le monde.....	22
II.5.1. En monde.....	22
II.5.1.1. Intégration du véhicule électrique.....	23
II.5.2. En Algérie.....	24
II.5.2.1. La ville de Sidi Abdellah	24
II.5.2.2. Alger smart city	25
II.5.2.3. Tipaza Smart City.....	26
II.5.2.4. Guenzet smart city.....	27
II.6. Intérêt du réseau intelligent	28
II.7. Types de réseaux intelligents.....	28
II.8. Exemples de réseaux intelligent.....	29
II.9. Les différentes technologies	31
II.9.1. Les énergies primaires fossiles.....	31
II.9.2. Les énergies renouvelables.....	32
II.10. Compteur intelligent électrique.....	33
II.10.1. Définition.....	33
II.10.2. Niveau de performance des compteurs intelligents.....	34
II.10.3. Présentation d'un modèle de système de comptage évolué	34
II.10.3.1. Les principales fonctionnalités des systèmes de comptage évolués.....	35
II.11. Systèmes de stockage.....	35
II.12. Conclusion.....	36

Chapitre III: Ecoulement De Puissance Et Outil de Simulation

III.1. Introduction.....	37
III.2. But de l'étude de l'écoulement de puissance.....	37
III.3. Principe de l'écoulement de puissance.....	38
III.3.1. Classification des jeux de barres.....	38
III.4. Equations d'écoulement de puissance.....	40
III.4.1. La matrice d'admittance.....	40
III.4.1.1. Formulation des équations de tension.....	42
III.4.1.2. Formulation des équations d'écoulement de puissance.....	42
III.4.1.3. Formulation de l'équation des pertes en puissance active.....	43
III.4.1.4. Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive	43



III.4.2. Les méthodes utilisées pour le calcul de l'écoulement de puissance.....	44
III.4.2.1. Méthode de Newton-Raphson.....	44
III.5. Historique de logiciel de Power World Simulator.....	45
III.5.1. Vue d'ensemble.....	46
III.5.2. Modes de fonctionnement.....	46
III.6. Conclusion.....	48

Chapitre IV : Simulations et résultats

IV.1. Introduction	49
IV.2. Présentation de réseau de 13 nœuds.....	52
IV.3. Calcul de l'écoulement de puissance pour le réseau à 13 nœuds.....	53
IV.3.1. Simulation avec réseau principale.....	53
IV.3.2. Discussion des résultats.....	56
IV.3.3. Simulation du champ PV sans réseau principale.....	57
IV.3.4. Discussion des résultats.....	58
IV.4. Smart city SAIDA	59
IV.4.1. Les solutions.....	59
IV.4.1.1. Augmenté la capacité de production au niveau PV = 70 MW.....	59
IV.4.1.2. Création d'une source géothermique (station thermique se Sidi Aissa).....	60
IV.4.2. Discussion des résultats.....	61
IV.5. Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	64
Références Bibliographiques.....	66
Annexe	72



Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1) :	Représentation verticale (sens unique) des réseaux électriques classique.....	5
Figure (I.2) :	Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production.....	5
Figure (I.3) :	Schéma d'un réseau électrique.....	5
Figure (I.4) :	Schéma simplifiée d'un réseau électrique.....	6
Figure (I.5) :	Schéma général de la production, du transport et de la distribution d'énergie.....	7
Figure (I.6) :	Panneaux Solaire Photovoltaïque thermiques.....	9
Figure (I.7) :	Les systèmes solaires.....	9
Figure (I.8) :	Chaine énergétique de la centrale éolienne.....	10
Figure (I.9) :	Centrale hydroélectrique.....	10
Figure (I.10) :	Bilan de cycle biomasse.....	11
Figure (I.11) :	Centrale géothermique.....	11
Figure (I.12) :	Schéma fonctionnel d'une Production décentralisée.....	14

Chapitre II

Figure (II.1) :	Exemple des réseaux électriques intelligents.....	19
Figure (II.2) :	Exemple d'un système de transfert d'énergie bidirectionnel entre le réseau électrique, la maison et le véhicule.....	23
Figure (II.3) :	La situation de La Ville Nouvelle de Sidi Abdellah Source (slideplayer, 2015).....	24
Figure (II.4) :	Situation géographique de la commune de Guenzet Source google.com traité par l'auteur.....	27
Figure (II.5) :	Micro réseaux ou ' Micro grid'.....	30
Figure (II.6) :	Du « Smart Grid » au « Smart Home » en passant par le « Smart City».....	31
Figure (II.7) :	un compteur communicant ' Linky'.....	33
Figure (II.8) :	Schéma d'un modèle couramment retenu pour un système de comptage évolue en électricité.....	34

Chapitre III

Figure (III.1) :	Exemple d'un Réseau électrique avec cinq nœuds.....	39
Figure (III.2) :	Exemple d'un réseau bouclé à 4 nœuds.....	40
Figure (III.3) :	Schéma représentative d'Interface de ruban de power world 2021.....	46
Figure (III.4) :	Schéma représentative de mode distinct de Simulator (Edit Mode).....	47
Figure (III.5) :	Schéma représentative de mode distinct de Simulator (Run Mode).....	48

Chapitre IV

Figure (IV.1) :	La répartition des centrales photovoltaïques par région géographique.....	50
Figure (IV.2) :	La localisation de willaya de Saïda par rapport aux gares d'arrivée (Sidi Bel Abbas, Tiaret, Mécheria).....	51

Figure (IV.3) :	La répartition de centrale photovoltaïque au niveau de Saida par (MAPS).....	52
Figure (IV.4) :	Architecture du réseau a étudié.....	52
Figure (IV.5) :	Schéma de réseau principal au niveau de Saida avant l'intégration de l'énergie Solaire sur logiciel Power World 21 (à 13 nœuds).....	53
Figure (IV.6) :	Schéma de réseau principal au niveau de Saida après l'intégration de l'énergie Solaire sur logiciel Power World 21 (à 13 nœuds).....	55
Figure (IV.7) :	Schéma de Simulation du champ PV sans réseau principale au niveau de Saida sur logiciel Power World 21 (à 1 Nœuds).....	57
Figure (IV.8) :	Schéma représentatif du réseau intelligent au niveau de Saida à 11 Nœuds.....	60

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau (II.1) :	Comparaison des réseaux classiques et du réseau électrique intelligent.....	21
-------------------------	---	----

Chapitre III

Tableau (III.1) :	Propriétés des nœuds.....	39
--------------------------	---------------------------	----

Chapitre IV

Tableau (IV.1) :	La répartition des différentes centrales réalisées durant la période (2011-2016).....	49
Tableau (IV.2) :	L'écoulement de puissance sans énergie renouvelable.....	54
Tableau (IV.3) :	Les paramètres des Puissances totales sans énergie renouvelable.....	54
Tableau (IV.4) :	l'écoulement de puissance avec énergie renouvelable.....	55
Tableau (IV.5) :	Les paramètres des Puissances totales avec énergie renouvelable.....	56
Tableau (IV.6) :	l'écoulement de puissance sans réseau principale.....	57
Tableau (IV.7) :	Les paramètres des Puissances totales sans réseau principale.....	58
Tableau (IV.8) :	L'écoulement de puissance de réseau intelligent au niveau de Saida.....	60
Tableau (IV.9) :	Les paramètres des Puissances totales du réseau intelligent au niveau de Saida à 11 Nœuds.....	61

Liste des acronymes

- **CA**: Courant alternative.
- **BT** : Basse Tension.
- **CC**: Court-circuit.
- **ENR**: Energies Nouvelles ou Renouvelables.
- **GED**: Génération D’Energie Dispersée (Distribuée).
- **HT**: Haute Tension.
- **MT**: Moyenne Tension.
- **NTIC**: (Nouvelles Technologies de l’Information et de la Communication).
- **PD**: production décentralisée.
- **PGi** : Puissance active générée par le générateur thermique au nœud "i".
- **P_{Loss}**: Puissance active perdue.
- **PV**: Photovoltaïque.
- **Q_{Loss}**: Puissance réactive perdue.
- **QGi** : Puissance réactive générée par le générateur thermique au nœud "i".
- **Smart meter** : le compteur intelligent.
- **UE12** : (1^{er} novembre 1993 – 31 décembre 1994): Allemagne (DE), Belgique (BE), Danemark (DK), Espagne (ES), France (FR), Grèce (EL), Irlande (IE), Italie (IT), Luxembourg (LU), Pays-Bas (NL), Portugal (PT) et Royaume-Uni (UK).
- **UE15** : (1^{er} janvier 1995 - 30 avril 2004): UE-12 + Autriche (AT), Finlande (FI) et Suède (SE).
- **V2G**: véhicule to grid.
- **OPF** : Optimal Power Flow.
- **PVQV**: PV et QV Curve Tools.
- **ATC** : La capacité de transfert disponible.
- **SCOPF** : Sécurité contrainte OPF.

Introduction Générale



Introduction générale

L'histoire de la production d'électricité a été effectivement commencé par la création de la première centrale électrique par Thomas Edison en 1879 à Manhattan, ensuite la généralisation de l'électricité à travers l'Europe, en remplaçant la vapeur pour faire tourner les machines, puis il est venu une nouvelle époque connue par la découverte de nouvelles sources d'énergies électriques comme l'éolienne, et l'apparition de la première centrale nucléaire en 1963, enfin la découverte de l'électricité d'origine solaire. Néanmoins, malgré toutes ces découvertes la production électrique reste en la demande qui ne cesse d'augmenter.

En réalité, le développement technologique de l'énergie électrique ne cible pas seulement la satisfaction de la demande, mais aussi il traite les problèmes de la pollution et l'effet de serre. Des recherches ont été réalisées dans ce sens, ils sont aboutis à l'utilisation des énergies renouvelables comme une solution alternative à la place des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables sont des énergies écologiques car faiblement émettrices de gaz à effet de serre. L'exploitation des énergies renouvelables permet de fournir de l'électricité aux sites isolés et d'éviter la création de nouvelles lignes. Ce sont les raisons pour lesquelles la plupart des États font des énergies renouvelables une priorité de leur politique énergétique.

Le développement des énergies renouvelables décentralisées (éolien, photovoltaïque, petite cogénération, etc.) raccordées aux réseaux électriques va profondément modifier la structure, la planification et l'exploitation du système électrique. Dans un futur proche, les réseaux auront pour rôle non seulement de distribuer l'électricité produite, mais également de mutualiser l'ensemble des productions décentralisées. En plus, le rendement des énergies renouvelables reste toujours faible, à cause de son utilisation dans les endroits isolés ou décentralisés.

Afin de continuer à favoriser l'intégration du renouvelable les réseaux doivent être gérés de manière plus réactive et respectueuse des contraintes d'équilibre. Ceci est à la base du concept de **Smart Grid**.

Pour rentabiliser les EnR, le défi a été d'intégrer ces dernières dans les réseaux électriques, ce qui est généralement n'est pas facile, car il faut réunir plusieurs conditions entre autres:

- Le redimensionnement du réseau classique pour s'adapter aux nouvelles installations d'EnR.
- L'adaptation des infrastructures à l'intégration des EnR sur les réseaux électriques (dispositifs de contrôle, de communication ...etc.).
- Les gestionnaires de réseau doivent garantir une bonne intégration des EnR pour arriver à une gestion optimale du réseau électrique.
- Assurer une bonne stabilité du réseau électrique.

Sur ce principe, le sujet de ce mémoire portera en particulier à définir le réseau intelligent comme premier point. En second point, nous étudierons un exemple réel de micro-grid par simulation qui est le réseau de la wilaya de SAIDA.

A savoir que, la wilaya de Saida possède de bons et différents potentiels. Nous pouvons proposer parmi plusieurs ressources renouvelables quelle possède comme l'énergie géothermique, solaire, éolienne et hydraulique. Tout cela ouvre la voie au projet de ville intelligente.

L'organisation générale du présent travail est divisée en quatre chapitres.

- ❖ Le premier chapitre donnera une vision globale en s'intéressant aux généralités et au fonctionnement des réseaux électriques. En posant la question de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique avec un autre concept, celui de la production électrique décentralisée, et en prêtant attention aux avantages et inconvénients des énergies renouvelables.
- ❖ Le deuxième chapitre nous allons présenter les différents aspects des réseaux électriques intelligents, ainsi que les différentes caractéristiques et contraintes liée à leur mise en œuvre. Aussi nous allons donner un aperçu sur les différents composants de ces systèmes.
- ❖ Le troisième chapitre, présentera la modélisation de quelques éléments essentiels dans notre étude, ensuite nous citerons une méthode simple et directe sur le calcul de

l'écoulement de puissance, cette dernière sera utilisé comme application pour l'étude de notre sujet.

❖ Dans le quatrième chapitre, nous nous forcerons à rechercher et étudier à réaliser un réseau intelligent de la wilaya de Saida, en utilisant l'outil de simulation le logiciel Power World (version 21). L'objectif à atteindre est d'essayer de construire un réseau intelligent composé uniquement d'énergies renouvelables dans la wilaya plus précisément Solaire photovoltaïque aux niveaux de la wilaya de SAIDA de la daïera de HSASSNA, commune AIN-SKHOUNA d'où le but d'aboutir au réseau dit smart city.

❖ Enfin, une conclusion générale résume les résultats finaux de cette étude et des perspectives.

Chapitre I

Les Energies Renouvelables
Et leurs Problématiques
D'intégrations Dans
Le Réseau électrique



Les EnR et leurs Problématiques d'intégrations Dans le Réseau électrique

I.1. Introduction

La fonction principale d'un réseau électrique est la liaison des différentes centres de consommation aux centrales de production toute en satisfaisant la demande en énergie électrique et en assurant la continuité de la fourniture d'énergie demandée.

Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter, les réseaux électriques ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Cette complexité de structure pose des problèmes néfastes sur les consommateurs ainsi sur le coût de la production.

L'apparition des défauts dans un réseau d'énergie électrique et l'augmentation de la consommation des énergies entraîne une nouvelle technologie qui s'appelle réseau intelligent (smart grid) pour garantir que la quantité d'énergie disponible sur le réseau soit en permanence égale à celle consommée.

Dans ce chapitre se concentre sur les généralités et le fonctionnement des réseaux électriques. En posant la question de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique avec un autre concept, la production électrique décentralisée, et en faisant attention aux avantages et inconvénients des énergies renouvelables.

I.2. Définition de réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs en passant par des lignes électriques et des transformateurs. Il est défini par le type de courant électrique qu'il utilise, la valeur de tension et la fréquence. [1]

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.

La figure (I.1) montre une représentation verticale (sens unique) des réseaux électriques classiques où le transfert de la puissance électrique générée prend un seul sens durant toute la chaîne (production, transport et distribution).

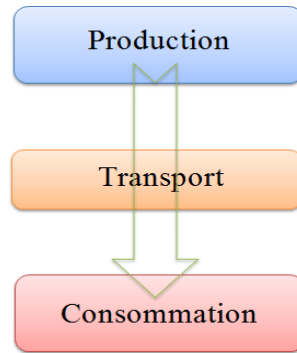


Figure (I.1) : Représentation verticale (sens unique) des réseaux électriques classique.

I.2.1. Architecture des réseaux électriques

La conception et l'utilisation de chaque architecture du réseau électrique permettent d'atteindre plus ou moins une grande disponibilité de l'énergie électrique. Le coût économique du réseau dépend naturellement de sa complexité. Le choix d'une architecture de réseau est donc un compromis entre des critères techniques et économiques.

En fonction de la densité et de la nature des unités de production, un réseau aura une architecture semblable à celle de la figure (I.2).

Nous pouvons noter que les unités de production peuvent être raccordées aux différents étages selon la puissance mise en jeu. Les transformateurs jouent un rôle très important pour passer d'un niveau de tension à un autre donc pour passer d'un type de réseau à un autre. [2]

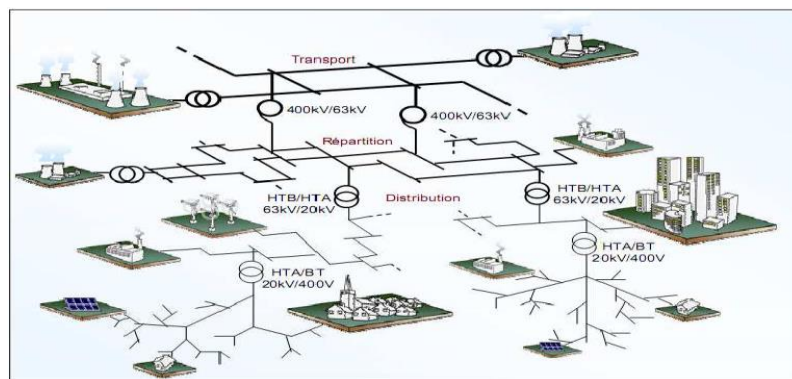


Figure (I.2) : Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production. [2]

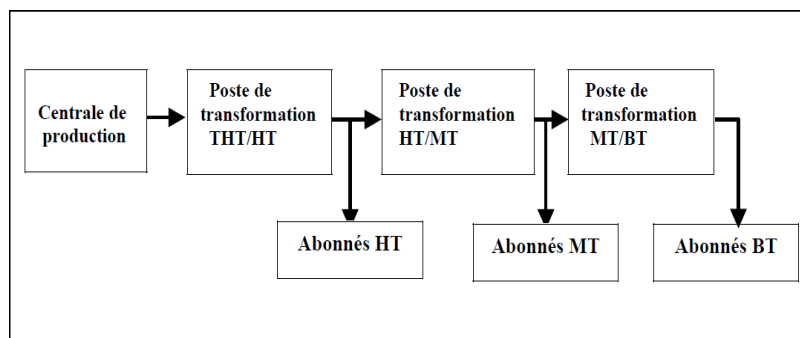


Figure (I.3) : Schéma d'un réseau électrique.

I.2.2. Différents types de réseaux électriques

Les réseaux électriques sont partagés en trois types, qui sont représenté sur la figure (I.4):

- Le réseau de transport.
- Le réseau de répartition.
- Le réseau de distribution

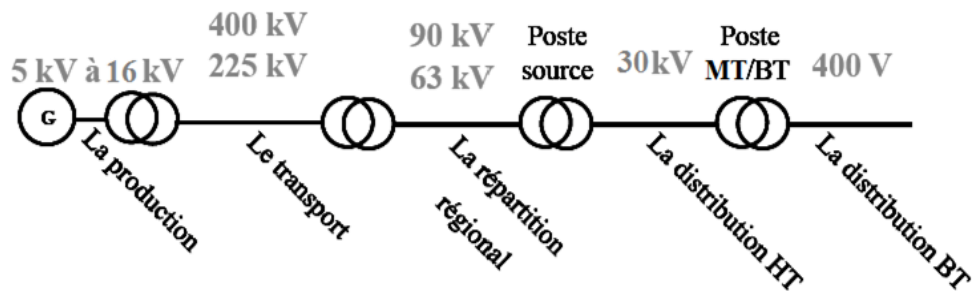


Figure (I.4) : Schéma simplifiée d'un réseau électrique.

A. Réseaux de transport et d'interconnexion

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :

- ✓ De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport).
- ✓ De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion).
- ✓ La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 KV pour les réseaux THT
- ✓ Neutre directement mis à la terre.
- ✓ Réseau maillé.

B. Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions pour les réseaux HT

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation. [3]

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres. Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- La tension est 90 kV ou 63 KV.
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre.
- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 KV.
- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 KV.
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

C. Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usagers du courant électrique.

[4]

➤ Réseaux de distribution à moyenne tension

- HTA (30 et 10 kV le plus répandu).
- Neutre à la terre par une résistance.
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens.
- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains.
- Réseaux souterrains en boucle ouverte.

➤ Réseaux de distribution à basse tension

- BTA (230 / 400 V).
- Neutre directement à la terre.
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés.

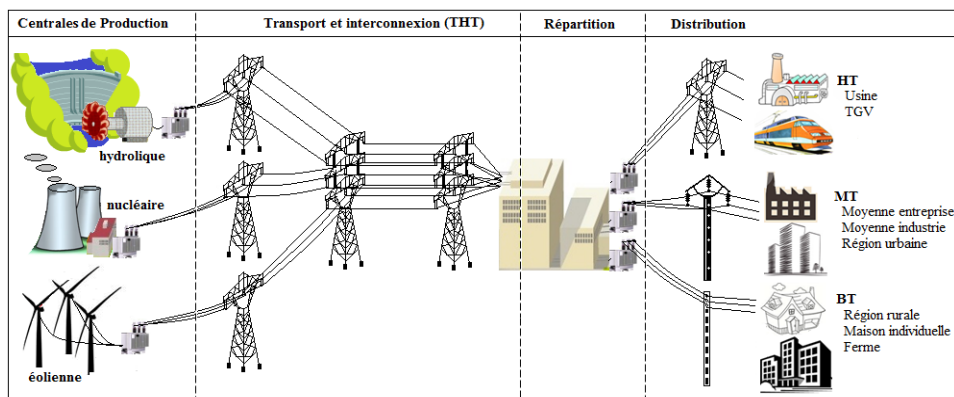


Figure (I.5) : Schéma général de la production, du transport et de la distribution d'énergie. [5]

I.3. Problématique du fonctionnement des réseaux électriques

Les réseaux de transport et d'interconnexion (THT) assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée. Par ailleurs, le maillage du réseau contribue à la sécurité d'alimentation et permet de faire face, dans des conditions économiques satisfaisantes, aux aléas locaux ou conjoncturels qui peuvent affecter l'exploitation (indisponibilité d'ouvrage, aléas de consommation, incidents...). Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation. [3]

Par ailleurs, la qualité du service est également un souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique, cette qualité nécessite de maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises du cahier des charges.

Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car :

- ✓ Références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.
- ✓ La fréquence est, de même, fixée par les groupes de production qui doivent rester synchrones en régime permanent.
- ✓ La sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport.

Sachant que, compte tenu de l'inertie mécanique relativement faible de certains composants des systèmes électriques (groupes de production et moteurs) et de la grande vitesse de propagation des phénomènes, les réseaux THT créent un couplage dynamique très fort entre les moyens de production, d'une part, et les charges (consommation), d'autre part. Au-delà de l'examen du problème de la répartition économique et en sécurité de la puissance, l'étude du fonctionnement de ces vastes systèmes interconnectés et fortement couplés est donc absolument nécessaire. Elle portera sur leur réglage et leur stabilité. [4]

I.4. Différents types de GED d'origine renouvelable

I.4.1. Solaire

Bien qu'elle ne soit pas l'énergie renouvelable représentant la puissance installée la plus importante, l'énergie solaire est de loin l'énergie renouvelable qui compte le plus d'installations. Dans la très grande majorité des cas, l'énergie solaire est convertie en

électricité à l'aide d'installation Photovoltaïque (PV) qui permet de transformer le rayonnement solaire en courant continu.

L'autre solution, beaucoup plus rare et généralement pour des installations de puissances importantes, consiste à concentrer les rayonnements solaires pour produire de la chaleur qui est ensuite convertie en électricité. Le PV a l'avantage de présenter un coût d'installation modéré (face aux autres types de GED) grâce à un faible taux d'équipement et une implantation sur site peu contraignante. Les PV sont les GED les plus présentes sur le réseau de distribution, la majorité des installations ne dépassent pas quelques kilo Watt. [6]



Figure (I.6): Panneaux Solaire Photovoltaïque thermiques.



Figure (I.7): Les systèmes solaires.

I.4.2. Éolienne

Les éoliennes injectent de l'énergie sur le réseau électrique en convertissant, successivement, l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique.

Bien que les investissements soient importants, l'énergie éolienne connaît une forte croissance ces dernières années. En effet, les technologies à maturité et les puissances de production toujours plus importantes, couplées à des subventions gouvernementales et à des prix de rachat du kilowatt intéressants permettent au secteur d'attirer les investisseurs.

Les éoliennes connectées sur le réseau de distribution sont principalement raccordées en HTA. Il existe néanmoins des installations de faible puissance connectées sur le réseau BT, appelées micro éoliennes. Bien que les sociétés commercialisant des micro-éoliennes soient de plus en plus nombreuses, ces installations restent pour le moment relativement marginales. Le micro-éolien urbain, se déclinant sous de nombreuses formes (toit de bâtiment, tête de réverbère, bordure de route, etc.) trouve pour le moment difficilement sa place. Les installations éoliennes sont connectées au réseau HTA pour des puissances comprises entre 12 MW et 36 kW, les parcs excédant 12 MW sont raccordés au réseau de transport. Les micros éoliennes de puissance inférieure à 36 kW peuvent être connectées en BT. [6]

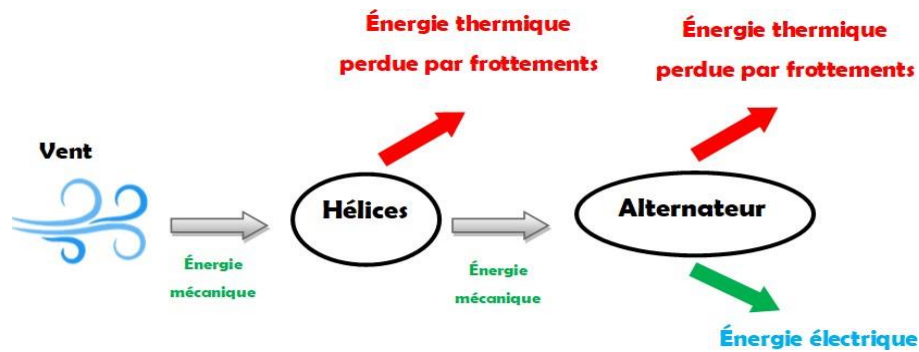


Figure (I.8): Chaîne énergétique de la centrale éolienne.

I.4.3. Hydraulique

Les installations hydrauliques utilisent l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau. Ce sont le débit et la hauteur de la chute d'eau qui dimensionnent la puissance de l'installation. Les centrales hydroélectriques peuvent être dites « au fil de l'eau », elles privilégient alors le débit à la hauteur, ou au contraire, de type « chute d'eau » où la puissance sera d'avantage issue de la hauteur. La puissance des installations hydroélectriques varie fortement, pouvant aller de 22 GW, pour le barrage des trois gorges en Chine, à quelques kilowatts. Les installations assimilables à des GED sont appelées microcentrales hydrauliques. [6]

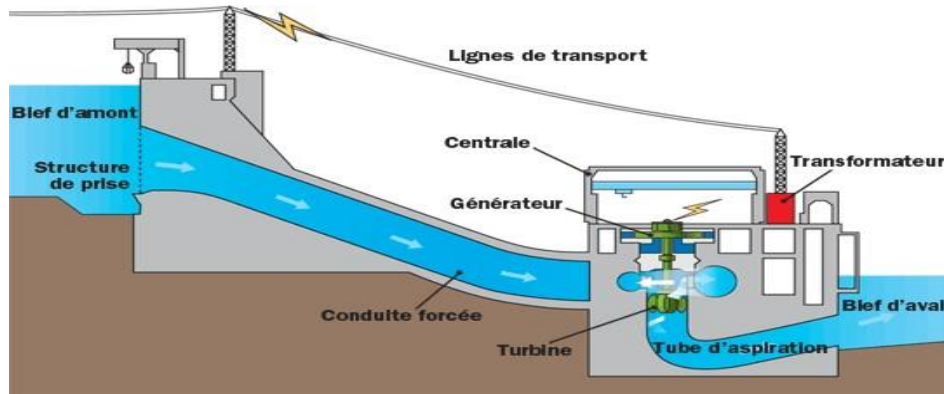


Figure (I.9): Centrale hydroélectrique

I.4.4. Biomasse

La production d'énergie électrique à partir des centrales thermiques à biomasse consiste à utiliser des combustibles d'origine organique renouvelables afin de produire de la chaleur pour entraîner une turbine. Bien que quelques petites installations soient présentes sur le réseau de distribution, les centrales à biomasse sont assez rarement considérées comme étant des GED puisqu'elles présentent majoritairement des puissances nominales supérieures à 12 MW et sont donc connectées sur le réseau de transport. [6]

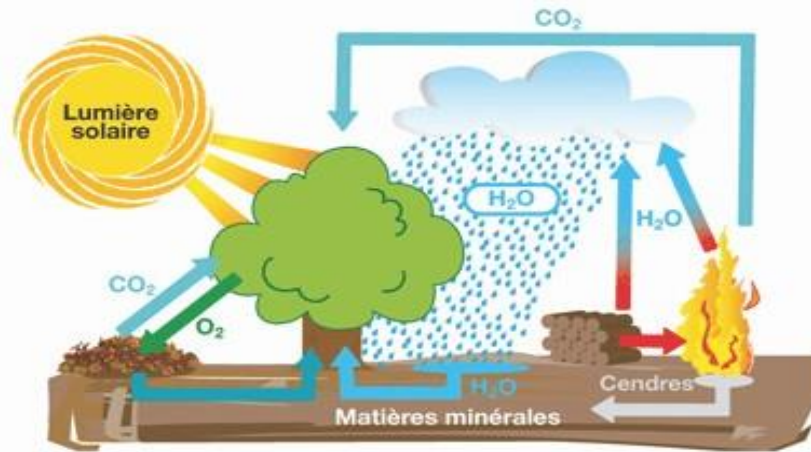


Figure (I.10): Bilan de cycle biomasse.

I.4.5. Géothermie

La géothermie consiste à utiliser la chaleur des nappes d'eau souterraine pour entraîner une turbine. Fréquemment exploitée en cogénération chauffage / électricité, elle permet d'alimenter un réseau d'eau chaude et de produire de l'électricité. La géothermie reste un moyen de production d'électricité marginal en Algérie. En revanche, elle est beaucoup plus exploitée dans les pays à fort potentiel géothermique. [6]



Figure (I.11): Centrale géothermique.

I.5. Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables

Les énergies	Avantages	Inconvénient
L'énergie Solaire	<ul style="list-style-type: none"> -Une bonne source d'énergie renouvelable. -Peut de soutiens et durent long temps. -Une énergie non-polluante. -La lumière ne coute rien. 	<ul style="list-style-type: none"> -Il n'y a pas de lumière la nuit. -A besoin de beaucoup d'espace. -Le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux. - Panneau fragile.

L'énergie Hydraulique	-Une énergie naturelle non- Polluante. -L'eau est autour du monde entier.	-Une perturbation de l'équilibre écologique. -Grand barrage couteux
L'énergie Éolienne	-Il y a toujours du vent dans un même endroit, donc jour et nuit. -Tout le mécanisme est dans l'éolienne donc pas de grandes usines. -Une énergie renouvelable donc non-polluante.	- Un impact visuel. -Le prix. -La migration des oiseaux
L'énergie Géothermique	-Pollution non-toxique -Beaucoup d'énergie pour peu de place	-Répartitions des sources. -Le transport de l'énergie des usines. -Installation couteuse
La biomasse	- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être Produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable. -Biodégradable rapidement -Produits issus de la biomasse ont souvent non-toxiques. -Elle dégage autant de CO2 qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO2 lors de la photosynthèse) -La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables -La biomasse est disponible partout La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.	-Leur rendement énergétique est assez faible. -Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole. -Dégage du CO2 -Une surexploitation de la biomasse peut entrainer une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement. -Provoque la pollution des eaux et des sols -Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

I.6. Production électrique décentralisée

La production décentralisée ou dispersée se définit par opposition à la production classique, par unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification, et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, et assurer un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Ces unités centralisées sont dites « dispatchables ». [7]

Par rapport aux unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 100 MW, ne sont pas planifiées de manière centralisée, ni actuellement coordonnées, elles sont généralement raccordées au réseau de distribution (<15 MW) et ne sont pas non plus actuellement destinées à assurer des services systèmes.

Cette production décentralisée se développe dans tous les pays, sur base d'unités de cogénération, d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des

producteurs indépendants.

De nombreuses raisons, techniques et économiques, justifient le développement de ce type de production, parmi lesquelles nous relevons les suivantes :

- ✓ la technologie disponible actuellement offre les garanties de fiabilité pour des unités de 100 kW à 150 MW.
- ✓ la production est réalisée à proximité de son utilisation, de manière à réduire les frais de transport.
- ✓ le gaz naturel, vecteur énergétique souvent utilisé en production décentralisée, est supposé être facilement disponible dans la plupart des centres de consommation et conserver un prix stable.
- ✓ les systèmes basés sur le gaz sont construits en beaucoup moins de temps et représentent des investissements nettement moins importants en comparaison avec les grosses centrales classiques utilisant un autre vecteur d'énergie primaire.
- ✓ les rendements énergétiques supérieurs des systèmes de cogénération ou à cycle combiné (gaz et vapeur) permettent une réduction des frais de fonctionnement.

Les avantages

- ✓ Possibilité d'alimenter en électricité des sites de consommation très éloignés du réseau existant, et dont les consommations ne justifient pas des installations de production de fortes puissances.
- ✓ Valorisation de sources d'énergie primaire fatale (solaire, éolien).
- ✓ Autonomie partielle du système local en cas d'incident majeur sur le réseau.

Les inconvénients

- ✓ Participation faible ou nulle au réglage de la fréquence et de la tension du réseau électrique.
- ✓ Faible capacité à participer à la reconstitution du réseau, risque d'îlotage non maîtrisé.
- ✓ Certaines énergies comme l'éolien ou le solaire, sont caractérisées par une forte intermittence, faible prévisibilité, commandabilité faible ou nulle.

Généralement, les productions décentralisées utilisent des sources renouvelables, notamment : la géothermie, la petite hydraulique, le solaire et l'éolien. [8]

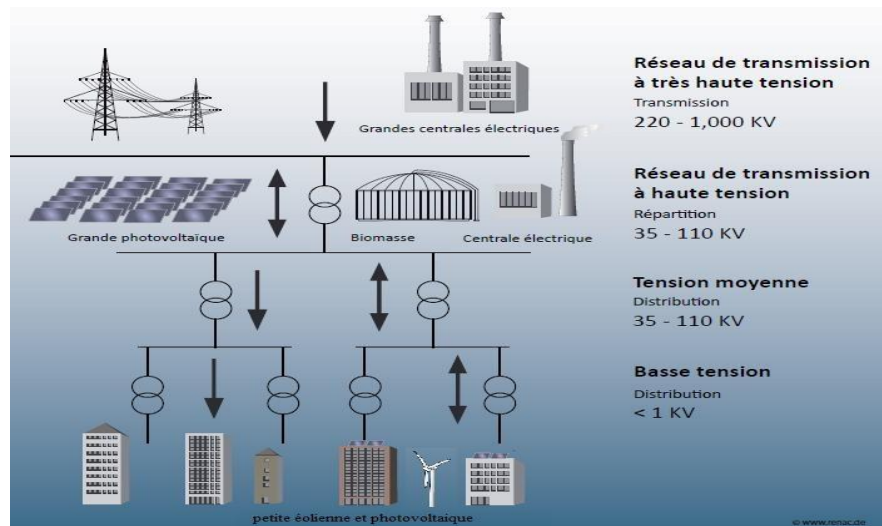


Figure (I.12):Schéma fonctionnel d'une Production décentralisée.

I.7. Problématique d'intégration des EnR dans le Réseau électrique

L'arrivée des EnR, en particulier sur les réseaux de distribution, change la situation (production variable, possible inversion de flux de puissance dans les lignes) et peut générer un certain nombre de problèmes et de contraintes dont il faut limiter les effets.

I.7.1. Modes de raccordement

Les gestionnaires de réseaux proposent deux modes de raccordements d'une installation photovoltaïque au réseau, soit en vendant la totalité de la production ou seulement le surplus.

a) Injection de la totalité de la production au réseau

L'intégralité de la production est vendue au tarif d'achat réglementé. Un point de branchement spécifique à la production est alors créé par le gestionnaire du réseau. Toute la consommation est par ailleurs comptabilisée par le compteur de production existant.

b) Injection du surplus de la production au réseau

La production électrique consommée sur place par les appareils en cours de fonctionnement (appelée autoconsommation) n'est pas comptabilisée par le compteur de production, mais vient réduire le décompte de la consommation. Seul le surplus de la production par rapport aux consommations instantanées est vendu. [9]

I.8. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution

Dans la littérature plusieurs études qui ont été faites afin d'identifier et d'évaluer les

impacts de la production décentralisée sur le réseau. 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 : Impacts de la GED sur les situations critiques du système électrique, Impacts 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, 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.

- **Impacts sur le profil de tension** : 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.
- **Impacts sur la stabilité du système** : Les génératrices de productions décentralisées 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 la quelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération.
- **Impacts 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.
- **Impacts sur l'observabilité et de 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.

- **Impacts 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.

- **Impacts 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.

[7]

I.9. Répondre aux défis de l'intégration des énergies renouvelables aux réseaux électriques :

Jusqu'à présent, l'opérateur de réseau devait s'assurer d'ajuster la production d'électricité aux variations de consommation afin de garantir un équilibre permanent entre les deux. Le développement de nouveaux usages de l'électricité (climatisation, multiplication des équipements électroniques, téléphonie mobile, etc.) et les transferts d'usage attendus notamment dans le secteur du transport (véhicules électriques) nécessitent de maîtriser la consommation actuelle de manière à ne pas saturer le parc de production et les réseaux électriques. [10]

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique en commençant par définir les réseaux, leurs classifications et leurs architectures, en plus d'une définition des énergies renouvelables et des problèmes de leur intégration dans le réseau électrique

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier l'une des solutions à la problématique d'intégration des énergies renouvelables nommé Réseau intelligent (Smart Grid).

Chapitre II

Réseaux électriques intelligents



Réseaux électriques intelligents

II.1. Introduction

Les réseaux électriques actuels sont inéluctablement destinés à connaître une profonde mutation dans les prochaines années. En effet, dans un contexte de développement d'énergies renouvelables intermittentes et probablement diffuses, de développement de nouveaux usages électriques et de nécessité d'optimiser l'efficacité des réseaux, il faudra continuer à assurer le meilleur équilibre possible entre la production et la consommation. La solution à ces difficultés est l'utilisation des nouvelles infrastructures dite Smart Grid (réseau électrique intelligent).

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents aspects des réseaux électriques intelligents, ainsi les différentes caractéristique et contraintes liée à leur mise en œuvre. Aussi nous allons donner un aperçu sur les différents composants de ces systèmes.

II.2. Historique du développement des smart grids

L'histoire des réseaux et des systèmes électriques conventionnels permet de comprendre les raisons de leur développement actuel, leur mode de fonctionnement mais aussi leur limitation par rapport à un avenir énergétique en pleine évolution. L'arrivée des énergies locales essentiellement renouvelables a donné lieu à des adaptations pour permettre l'insertion de ces énergies dans le système électrique initialement non conçu pour les accueillir. Historiquement, les réseaux électriques ont une architecture centralisée et une communication unidirectionnelle du producteur au consommateur.

Le déploiement des smart grids accompagne la modernisation des réseaux et des infrastructures vers une architecture décentralisée. L'objectif est d'intégrer une multitude de sources d'énergie renouvelable de toutes tailles, et de permettre de nouveaux modes d'utilisation et de stockage de l'électricité (véhicules électriques). A l'intérieur de ce réseau électrique évolué, le consommateur final disposera des outils et services lui permettant de connaître sa consommation et d'interagir en temps réel. L'approche est donc orientée vers une demande « active », grâce à des compteurs intelligents (smart meters) et des échanges bidirectionnels.

L'évolution du réseau électrique a été très lente ; il a longtemps été conçu autour de sa fonction première : couper, protéger, transformer, évoluant pour « seulement » devenir plus compact, plus performant grâce à une technologie de mieux en mieux maîtrisée. Cette évolution a rarement été suffisante pour en justifier le remplacement sur le terrain. [11]

Le protocole de Kyoto élaboré en 1996, en imposant des limites aux émissions de CO₂, a inévitablement contraint l'évolution des réseaux électriques aux critères suivants :

- Moins de pollution au niveau de la production par le développement et le recours aux Énergies renouvelables.
- Moins de pertes d'énergie.
- Moins d'unités de production grâce à un meilleur lissage de la demande.
- Une meilleure utilisation de l'énergie.
- Une consommation réduite, chaque fois que possible.

II.3. Réseaux électriques intelligents (smart grid)

Il existe actuellement plusieurs définitions des réseaux électriques intelligents et également plusieurs objectifs pour une même définition des réseaux électriques intelligents. Toutefois, l'ensemble des définitions s'accorde à dire que la communication bidirectionnelle est une des clés des futurs réseaux intelligents.

A. Définition 1

La dénomination d'un réseau de distribution d'électricité dit « intelligent » est celui qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser la production, la distribution, la consommation et qui a pour objectif d'optimiser l'ensemble des mailles du réseau d'électricité qui va de tous les producteurs à tous les consommateurs afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la qualité de l'énergie de l'ensemble.[12]

B. Définition 2

Le Software Engineering Institut de l'université de Carnegie Mellon définit le smart grid, ou réseau intelligent, comme un terme utilisé pour se référer à un réseau électrique dont les opérations sont passées d'une technologie analogique à l'utilisation d'une technologie numérique intégrée permettant la communication, la détection, la prévision et le contrôle. [12]

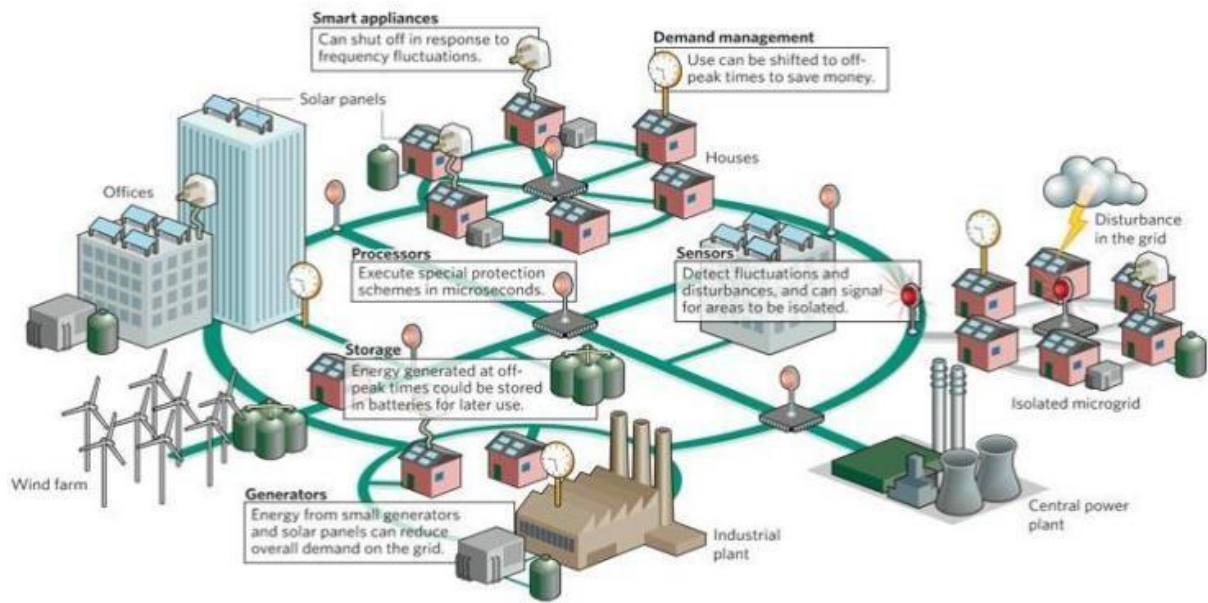


Figure (II.1) : Exemple des réseaux électriques intelligents.

II.3.1. Les enjeux stratégiques

Le développement des réseaux électriques intelligents représente un certain nombre d'enjeux :

A. Un Enjeu Industriel

Avec l'adaptation des matériaux et technique actuels nécessaire à cette nouvelle intelligence. En accédant à ce réseau innovant ; il est primordial d'assurer la fonctionnalité de tous les éléments qui y ont un rôle ; et donc développement modifications ; améliorations et arrangement sont nécessaire en vue d'un usage conforme. [13]

B. Un Enjeu social

Ceci par l'implication des consommateurs dans la gestion de leur consommation grâce aux (compteurs intelligents). L'utilisateur interagit donc avec le réseau intelligent : une nouvelle notion prend alors tout son sens : celle de consommateur.

C. Un Enjeu économique

Par la coopération nouvelle entre les grands acteurs économique de ce secteur de l'électricité modernisé. Et par le rôle de l'état dans le développement des réseaux électriques intelligents en tant que service public.

D. Un Enjeu environnementale

Par l'intégration de nouvelles formes d'énergies renouvelables et surtout décentralisés : également par la réduction au maximum des impacts sur le changement climatique et les perturbations qui touchent l'environnement.

II.3.2. Objectifs principaux du réseau électrique intelligent

Nous pouvons définir l'objectif principal associé à ses réseaux, comme spécifiées par l'U.S. Département of Energies National Energie Technologie Laboratoire dans sa stratégie pour un réseau moderne. Un réseau électrique intelligent se doit :

- De faire participer de façon active les consommateurs.
- D'accueillir l'ensemble des générateurs (centralisés ou non) et des systèmes de stockage (comme les véhicules électriques).
- De permettre de nouveaux produits, services et marchés.
- D'offrir une qualité d'énergie pour supporter l'économie numérique.
- D'optimiser l'utilisation de l'existant et de fonctionner efficacement.
- D'anticiper et de répondre à des perturbations sur le système.
- De résister aux attaques ou aux catastrophes naturelles.

II.3.3. Les caractéristiques du réseau électrique intelligent

A. Fiabilité

Le réseau intelligent fera usage de technologies qui améliorent la détection des erreurs et permettent l'auto-guérison du réseau sans l'intervention de techniciens. Cela permettra d'assurer un approvisionnement plus faible en électricité, et de réduire la vulnérabilité aux catastrophes naturelles ou des attentats. [14]

B. La flexibilité dans la topologie du réseau

La nouvelle génération de transmission et de distribution sera mieux en mesure de gérer les flux d'énergie possibles bidirectionnels, permettant la génération distribuée comme des panneaux photovoltaïques sur le toit des bâtiments.

C. L'efficacité

De nombreuses contributions à l'amélioration globale de l'efficacité de l'infrastructure énergétique sont prévues à partir du déploiement de la technologie smart grid, y compris la gestion de la demande.

D. Réglage de la charge

La charge totale connectée au réseau électrique peut varier considérablement au fil du temps. Imaginez l'augmentation de la charge. Si une émission de télévision populaire commence et des millions de téléviseurs fonctionnant instantanément traditionnellement pour répondre à une augmentation rapide de la consommation d'énergie plus vite que le Temps de démarrage d'un générateur, certains générateur de secours sont mises sur un mode vielle dissipatif un réseau intelligent peut avertir tout les téléviseurs individuelle ,ou un autre plus grande de clients, de réduire la charge temporairement (pour permettre à un générateur d'avoir plus de temps pour démarrer) ou en continu (dans le cas de ressources limitées).

E. La durabilité

La flexibilité accrue du réseau intelligent permet une plus grande pénétration de très variables sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne même si certains aliments et sont autorisés au niveau local (la distribution), l'infrastructure du niveau de transport ne peut pas l'accueillir. Les fluctuations rapides de la production distribuée, comme dues à un temps nuageux ou en rafales.

II.4. Comparaison des réseaux classiques et des réseaux électriques intelligents

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques qui distinguent les réseaux électriques classiques et les réseaux électriques intelligents.

Tableau (II.1) : Comparaison des réseaux classiques et du réseau électrique intelligent. [15]

Caractéristiques	Réseaux électriques	Réseaux électriques intelligents
Participation des consommateurs	Les consommateurs ne sont pas informés ou impliqués	Les consommateurs ne sont pas informés et potentiellement actifs
Intégration de source et de système de stockage	Dominé par le producteur d'énergie centralisée	Déploiement d'un grand nombre de producteurs distribués
Nouveaux produit services et marchés	Limité, peut d'intégration du marché pour les consommateurs	Grande intégration du marché, augmentation de l'utilisation du marché de l'énergie pour le consommateur

Qualité de l'énergie	Centrée sur les pannes réponse lente aux problèmes opérationnelles de gestion d'actif	Priorité sur la qualité de l'énergie avec une grande variété de qualité et de prix rapide résolution de problème
Optimisation des actifs	Peu d'intégration des données opérationnelles de gestion d'actifs	Nombreuse acquisition de données élargies et des paramètres du réseau.
Auto cicatrisation	Prévention pour réduire l'impact des dégâts en se concentrant sur la protection des infrastructures suite à une panne	Détection automatique et correction des problèmes centrés sur la prévention pour minimiser l'impact sur le consommateur
Résistance aux attaques	Très vulnérable aux attaques	Résistance aux attaques avec restaurations rapides en cas de problèmes

II.5. Les grands projets smart grids dans le monde

II.5.1. En monde

Les projets pilotes de Smart Grid indispensables, pour l'application à grande échelle d'une nouvelle technologie, plusieurs pays ont réalisés des projets pour avoir de l'expérience et de développer les connaissances en cette nouvelle technologie. L'objectif visé par les projets pilotes est de tester et évaluer la fiabilité des techniques de communication dans un Smart Grid, dévaluer les différentes fonctions des systèmes de monitoring et de contrôle dans un Smart Grid, en temps réel.

Le pays le plus impressionnant en termes de projets Smart Grid réalisés, est l'Allemagne, avec 8 grands projets pilotes du Smart Grid, dont nous citons, le projet Smart Area Aachen, qui a pour objectifs de réduire les pertes du réseau, réduire la consommation, multiplier les installations décentralisées, tels que les systèmes photovoltaïque à injection dans le réseau. Et aussi de réduire les émissions du CO₂. Plusieurs partenaires entre industries et établissements de recherches ont participé pour le succès de ce projet, tels que l'ABB, Nexans, IFHT, IAEW, L'université RWTH Aachen, etc. [16-17]

D'autres projets ont été réalisés en Allemagne pour le développement du Smart Grid, parmi eux : le projet MeRegio, E-DeMa, Smart Watts et Model City Mannheim. Ce dernier est une plateforme de teste du Smart Grid, elle vise essentiellement la réduction de la demande durant la période de la Pointe sur le réseau, via l'utilisation des systèmes

photovoltaïque décentralisés. Cette plateforme repose sur les systèmes informatiques pour la gestion de la demande, la production des clients. Le projet Model City Mannheim a été réalisé à l'aide d'un partenariat entre plusieurs acteurs, comme MVV Energie group, moma, Smart Watts, intelligence, etc. [18]. Selon [19]. Les projets sur la gestion de la demande représentent 39% des projets pilotes, 35% pour les projets d'intégration des énergies renouvelables, 14% pour les véhicules électriques et 12% pour les autres services du Smart Grid.

Au Canada plusieurs projets ont été réalisés dans le cadre de développement des Smart Grid. Parmi ces projets, Ontario's Smart Metering Initiative, ce projet a pour objectif d'installer des Smart Meter dans toute la région d'Ontario (maisons et entreprises). Ce projet a été réalisé dans le cadre d'un partenariat de six entreprises, tels que London Hydro SAP, IESO (Independent Electricity System Operateur), etc. [20]

II.5.1.1. Intégration du véhicule électrique

Concernant la mobilité verte, 1 000 bornes de recharges publiques seront installées sur l'ensemble du territoire, mais l'intégration des véhicules électriques dépasse cette incitation à rouler électrique : le projet vient d'intégrer le Power Manager de Honda, un système de transfert d'énergie bi-directionnel entre le réseau électrique, la maison et le véhicule.



Figure (II.2) : Exemple d'un système de transfert d'énergie bidirectionnel entre le réseau électrique, la maison et le véhicule.

L'automobiliste y deviendra à la fois consommateur et contributeur au réseau. L'électricité stockée sur la batterie du véhicule électrique, une fois pleine, pourra être utilisée dans le logement ou revendue au réseau en cas de forte demande. Seul un réseau intelligent particulièrement performant peut gérer ces transferts d'énergie bidirectionnelle. [21]

II.5.2. En Algérie

II.5.2.1. La ville de Sidi Abdellah

❖ Présentation de la ville nouvelle

La Ville Nouvelle de Sidi Abdellah, située à 25 km à l'ouest d'Alger, Elle fait partie du Sahel d'Alger, compris entre la plaine de la Mitidja (au Sud) et la plaine littorale (au Nord) [22]. Le périmètre de cette nouvelle ville s'étend sur une superficie de 7.000 hectares dont 4.000 réservés pour le périmètre de protection et 3.000 urbanisables, englobant les communes de Mahelma, Rahmania, Douera, Souidania et une partie de Zéralda. Elle abritera à terme une population de 280.000 habitants et verra la création de 85.000 emplois. [23]



Figure (II.3) : La situation de La Ville Nouvelle de Sidi Abdellah
Source (slideplayer, 2015).

La Ville Nouvelle de Sidi Abdellah est un nouveau pôle urbain attractif d'Alger, son rôle majeur est d'être un lieu de compétitivité, d'innovation et d'excellence, elle assurera le rééquilibrage de la croissance métropolitaine Algéroise [23]. Elle est capable de participer au fonctionnement économique du potentiel métropolitain et de prendre en charge toutes les dimensions (économiques, sociales et résidentielles) complémentaires à celles d'Alger [24]. Elle compte 27 agglomérations où des projets sont prévus pour la réalisation de près de 54.000 unités de logements. Outre le pôle urbanistique, Sidi Abdellah compte de nombreux

pôles notamment pharmaceutique et biotechnologique (148 hectares), de santé (51 hectares) et de loisirs et sport (732 hectares). [25]

❖ La démarche mise en place par le projet de Ville Nouvelle :

La ville nouvelle de Sidi Abdellah s'inscrit dans le cadre d'une politique urbaine et d'aménagement du territoire dont l'objectif est de limiter l'hyper concentration humaine dans la capitale, génératrice de difficultés de gestion urbaine (réseaux, équipements, circulations) et mettre un terme à l'extension de la ville aux détriments des meilleures terres agricoles et de l'environnement. Les pouvoirs publics comptent faire de Sidi Abdellah, une ville intelligente et intégrée, pour être un exemple à suivre dans la réalisation des autres villes nouvelles et projets de réhabilitation des villes anciennes [26]. Ils ont définis des orientations pour la ville de Sidi Abdellah comme :

- _ Préservation des ressources.
- _ Développement des transports en commun et des circulations douces.
- _ Organisation d'un cadre de vie qualitatif : la conception de la Ville Nouvelle, réservant près de 25 % de sa superficie aux espaces verts, avec ses zones d'activités localisées en périphérie, offre un environnement de qualité. [27]

II.5.2.2. Alger smart city

"Alger, Smart City" est un projet en cours, géré par la Wilaya d'Alger (Algérie). Sa feuille de route a été définie et progresse actuellement, il a été lancé il y a 2 ans dans le but d'améliorer la qualité de vie des citoyens, en misant sur la mobilisation des acteurs locaux du secteur des nouvelles technologies et la création ex nihilo d'un écosystème de startups innovantes [28]. La planification de cette initiative a été entamée le 1er juin 2017 par l'envoi de l'appel à partenariat aux différents acteurs de la Smart City jusqu'à l'exécution du plan d'action concret.

L'objectif de la Smart City d'Alger est d'optimiser la gestion de la ville. Cela nécessite une implication directe des différentes parties prenantes dans la ville, y compris, et sans se limiter, les services de transport, d'énergie, d'urbanisme, d'eau, de sécurité, de santé et de logistique, entre autres. Avec l'utilisation et l'exploitation des technologies de l'information, pour augmenter les services offerts aux citoyens de la ville. Les technologies de l'information seraient au cœur de la conception de la Smart City et comprendraient les aspects liés à

l'acquisition de données (capteurs, etc.), à la transmission de données (réseaux sans fil, etc.), à la gestion des données (stockage, Cloud, grandes données, etc.), et à l'optimisation des activités de la ville (intelligence artificielle, analyse, etc.), appliquée aux différents composants de la Smart City. L'aspect fondamental de la conception de Smart City est de tirer parti des bases de données de la ville, d'optimiser le partage des données entre les différents départements de la ville, ainsi qu'avec les citoyens de la ville. [29]

Jonathan Trent, directeur de OMEGA Global Initiative et chercheur à la NASA « *L'Algérie est dans une position avancée pour faire sa Smart City et elle n'est pas obligée de reproduire les expériences éprouvées dans les pays développés, mais plutôt apprendre en faisant sa propre expérience* ». [28]

Dans le cadre d'une meilleure maîtrise du concept de Smart City, les responsables des institutions publiques ont entamé la préparation du projet en organisant plusieurs séminaires et colloques dans le but de lancer les premiers jalons de mise en place du projet. Alger a accueilli le Sommet mondial sur la technologie et l'investissement des villes intelligentes. Le principal objectif de l'organisation était de mettre en lumière les stratégies mondiales et régionales de croissance des villes intelligentes [30]. L'équipe du Projet Alger Ville Intelligente a identifié des priorités comme des défis et des enjeux : -Accélérer les échanges entre l'écosystème d'Alger et l'écosystème technologique mondial. -Optimiser les synergies entre sociétés technologiques mondiales et les entreprises technologiques locales. -Renforcer la confiance des entreprises locales.

II.5.2.3. Tipaza Smart City

Un autre projet de la récolte des déchets ménagers dans des horaires bien précis a été également opéré dans la wilaya de Tipasa, selon M. Hatti, affirmant qu'un laborieux travail de sensibilisation a été mené auprès des citoyens pour les faire adhérer à ces actions inscrites dans le projet de la ville intelligente.

Le projet "Tipasa Smart City" comprend d'autres actions, à l'image des quartiers pilotes pour l'efficacité énergétique, des applications internet pour la circulation routière, l'établissement d'une carte géographique de la ville, ainsi qu'une base de données offrant tous les détails de la ville (administrations, hôpitaux, sites touristiques...), a indiqué M. Hatti, ajoutant qu'un jumelage avec une ville intelligente italienne est également en cours d'élaboration pour un échanges d'expertises et d'expériences. [31]

II.5.2.4. Guenzet smart city

❖ Présentation :

Un système intelligent a été mis en place depuis près d'une année pour permettre à cette commune de réaliser jusqu'au 55% d'économie d'énergie « Système de contrôle et de supervision ».

La commune de GUENZET (wilaya de Sétif) est devenue la première ville intelligente ou "smart-city" en Algérie, la ville est d'une superficie de 147 km² avec 3 541 hab. (2008). La ville est dotée d'un système ingénieux permettant de rationaliser la consommation d'énergie. Un système intelligent a été mis en place depuis près d'une année pour permettre à cette commune d'économie jusqu'au 55% d'énergie sur une période d'une année, selon les dires d'un responsable de l'APC. [32]

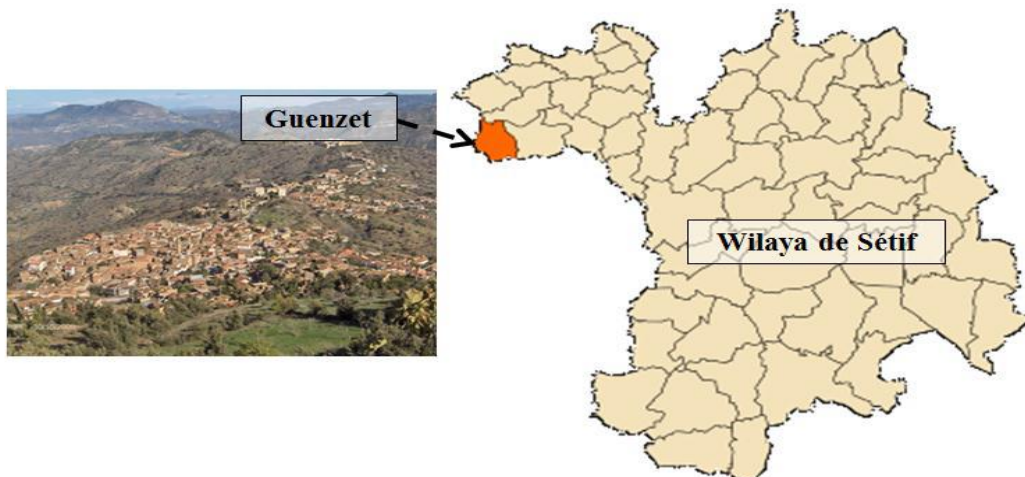


Figure (II.4) : Situation géographique de la commune de Guenzet.

Source google.com traité par l'auteur.

❖ Objectifs

Un centre de pilotage a été mis en place à distance dans la commune ce système, qui a été développé par un jeune chef d'entreprise, Abdelmoumen Benmosbah, natif de Guenzet, électronicien de formation, va permettre la gestion des équipements publics à partir d'un poste de commandement unique. Ce projet unique en son genre en Algérie concerne aujourd'hui certains services publics, à l'instar de l'éclairage public du chef-lieu communal, la station de pompage (Tansawt) de l'eau potable alimentant le chef-lieu municipal, l'éclairage de l'école Fadli et celle de Meslem et le chauffage central de ces établissements

scolaires. Ce projet vise à [32] :

- Contrôler des équipements et des écoles.
- Contrôle de la chaudière (marche/arrêt).
- Contrôle de la température de chaque classe indépendamment à partir de la salle de contrôle.
- Contrôle de l'éclairage de l'ensemble des classes.
- Contrôle de niveau d'eau des bâches à eau.
- Contrôle des équipements de l'APC.
- Contrôle des équipements des stations de pompes.
- Gestion de l'éclairage public.

II.6. Intérêt du réseau intelligent

Sachant que l'électricité ne peut pas être stockée facilement, rapidement et économiquement en grandes quantités, les technologies du « réseau intelligent » cherchent à ajuster en temps réel la production et la distribution (offre et demande) de l'électricité en hiérarchisant les besoins de consommation selon leur urgence afin de : [33]

- Optimiser le rendement des centrales.
- Éviter d'avoir à construire régulièrement de nouvelles lignes.
- Minimiser les pertes en ligne.
- Optimiser l'insertion (aléatoire) de la production décentralisée, en particulier d'origine renouvelable.
- Diminuer ou éliminer les problèmes liés à l'intermittence de certaines sources (solaires, éolien, énergie marémotrice, et à moindre titre hydroélectricité).

II.7. Types de réseaux intelligents [34]

A. Au Niveau des gestionnaires de réseaux de transport (GRT)

Il s'agit d'améliorer le télé-contrôle, la surveillance (Security analysais, etc.) et la planification (prévision des contingences, etc.). Il s'agit de poursuivre une évolution entamée

de longue date en utilisant les progrès technologiques pour faire face aux nouveaux besoins de transport, notamment suite à l'apport en réseaux de la production décentralisée de puissance réduite et moins « gérable » par le responsable d'équilibre et de sécurité réseaux.

B. Au niveau des gestionnaires de réseaux de distribution (GRD)

Le développement de la production décentralisée impose aux gestionnaires de réseaux de distribution de mettre en place des technologies qui étaient aujourd'hui essentiellement utilisées dans le réseau de transport télé-contrôle, protections bidirectionnelles, gestion d'équilibre. Il s'agit d'accélérer l'installation de technologies disponibles de longue date. Cette évolution est facilitée par la baisse du coût de ces technologies.

C. Au niveau local

Le changement le plus important pourra voir le jour l'apport de l'électronique de l'informatique et des télécommunications ouvre de nouveaux horizons à la gestion de la consommation et de la production local ce domaine spécifique s'appelle « smart home » ou plus généralement « smart consumer »

II.8. Exemples de réseaux intelligents

❖ Smart home

La « maison intelligente » est une application directe du Smart Grid, appliquée à un réseau privé. Visant à améliorer l'efficacité énergétique, le développement des bâtiments intelligents suit de près celui des Smart Grids. Elle est l'une des innovations qui seront demain notre quotidien. [35]

❖ Smart city

L'expression « ville intelligente », traduction de l'anglais Smart City, désigne une ville utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour « améliorer » la qualité des services urbains ou encore réduire ses coûts. Ce concept émergent désigne un type de développement urbain apte à répondre à l'évolution ou l'émergence des besoins des institutions, des entreprises et des citoyens, tant sur le plan économique, social, qu'environnemental.

Une ville peut être qualifiée d'intelligente quand les investissements en capitaux humains, sociaux, en infrastructures d'énergie (électricité, gaz), de flux (humains, matériels,

d'information) alimentent un développement économique durable ainsi qu'une qualité de vie élevée, avec une gestion avisée des ressources naturelles, au moyen d'une gouvernance participative et d'une utilisation efficiente et intégrée des TIC. Une ville intelligente serait capable de mettre en œuvre une gestion des infrastructures (d'eau, d'énergies, d'information et de télécommunications, de transports, de services d'urgence, d'équipements publics, de bâtiments, de gestion et tri des déchets, etc.) communicantes, adaptables, durables et plus efficaces, automatisées pour améliorer la qualité de vie des citoyens, dans le respect de l'environnement.

❖ Micro-Réseaux « Micro grid »

Appelé aussi mini Smart grids ou micro-réseaux intelligents, les micros grids sont des réseaux électriques de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement (réserve) électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Ils agrègent (associent) de multiples installations de production locales et diffuses (micro-turbines, piles à combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, mini-éoliennes, petite station hydraulique), des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision (contrôle) et de gestion de la demande. [36]

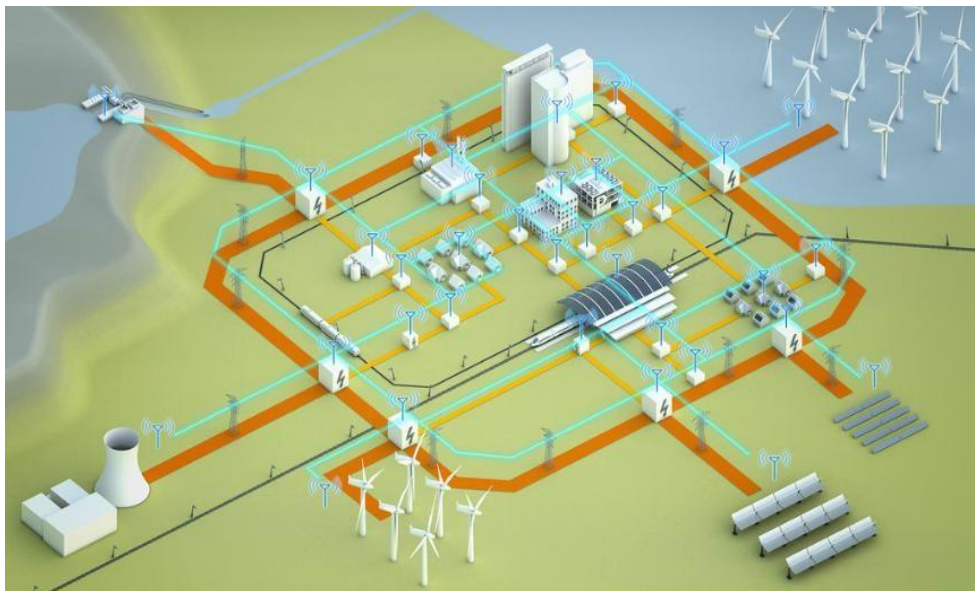


Figure (II.5) : Micro réseaux ou ' Micro grid'.

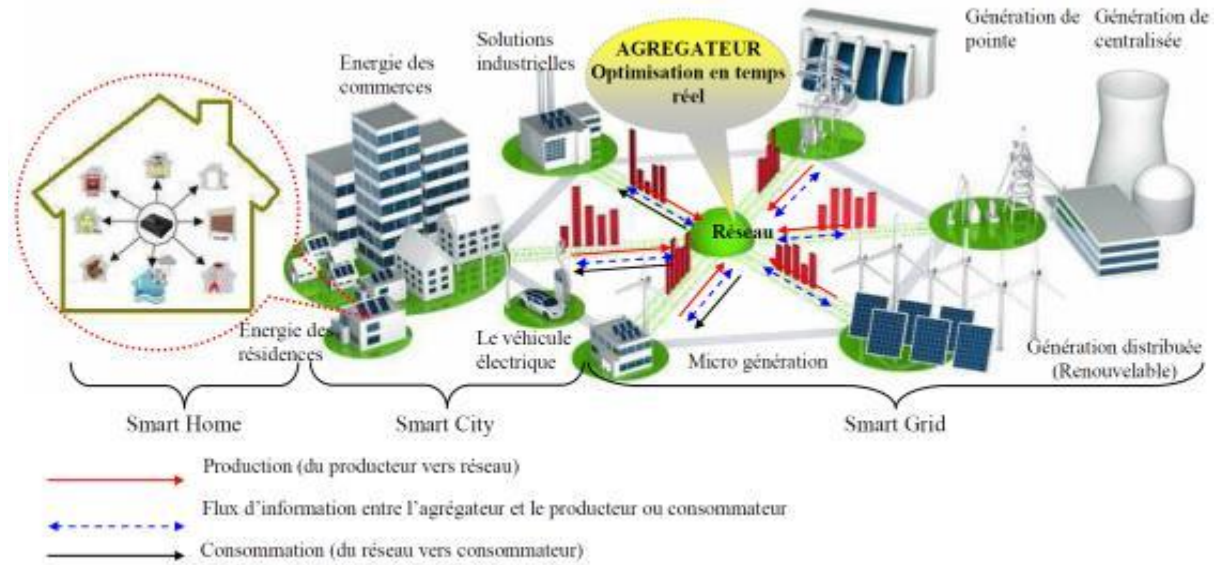


Figure (II.6) : Du « Smart Grid » au « Smart Home » en passant par le « Smart City».

II.9. Les différentes technologies

II.9.1. Les énergies primaires fossiles

❖ La production décentralisée traditionnelle

La production décentralisée traditionnelle est basée sur des technologies utilisant des énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole) bien éprouvées. Les principales technologies utilisées sont : la thermique à flamme, les turbines à gaz, les moteurs diesel, ...

❖ Les piles à combustible

Une pile à combustible est une pile où la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur, qui est généralement du platine.

L'avantage de cette technologie est qu'elle possède un caractère prédictif équivalent aux centrales thermiques classiques, par contre cette technologie n'a pas encore atteint sa maturité et n'est pour l'instant que très peu exploitée. A l'heure actuelle, on ne peut pas considérer ce type de source comme renouvelable étant donné que la plupart de l'hydrogène est produite à partir d'énergie fossile. [37]

II.9.2. Les énergies renouvelables

L'intégration des énergies renouvelable dans les réseaux intelligents est primordiale, elles permettent de diversifier les ressources et de minimiser les dépendances aux réseaux électriques urbains. Actuellement, il existe diverses sources d'énergies renouvelables, dont on peut citer :

Eolien : l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie électrique grâce aux turbines aérogénérateurs. Les deux types de générateurs principalement utilisés sont synchrones et asynchrones. En fonction de ces types, leur raccordement au réseau se fait soit directement, soit via des interfaces d'électronique de puissance. Dans les sites isolés et en tenant compte de l'intermittence de l'énergie éolienne, les turbines sont normalement associées à un système de stockage d'énergie et/ou à un moteur diesel. Il existe également deux possibilités d'installation des parcs éoliens connectés au réseau : éolien en mer (offshore) et éolien sur terre (on shore). La puissance d'un parc éolien peut varier de quelques Mégawatts à quelques centaines de Mégawatts.

Photovoltaïque : les panneaux photovoltaïques transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique. Il s'agit de cellules en matériaux semi-conducteurs fonctionnant sur le principe de la jonction P-N, réalisées actuellement pour la grande majorité à partir de silicium cristallisé. Une grande partie des systèmes PV est connectée au réseau, notamment en basse tension (BT) et associé aux bâtiments .Ils sont aussi utilisés pour l'alimentation des sites isolés en association avec un système de stockage. Le système PV peut aussi être montée dans des parcs de plusieurs hectares parfois et sont alors connectés directement à la MT. [38]

Solaire thermique : le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air. L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications : la production d'eau chaude, le chauffage des maisons, le séchage des récoltes, la réfrigération par absorption pour les bâtiments, la production de très haute température.

Géothermique : les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraine dans les zones géographiques spécifiques. Cette chaleur est soit directement utilisée, soit convertie en énergie électrique grâce à des turbines et alternateurs. La taille typique des centrales géothermiques varie de 5 à 50 MW.

II.10. Compteur intelligent électrique

II.10.1. Définition

Une nouvelle technologie dite « intelligente » se développe à grande vitesse depuis quelques années dans le secteur de l'énergie, provoquant une véritable révolution dans l'industrie des Compteurs électriques. En vue de la création de « réseaux intelligents » (smart grid), Les « compteurs intelligents » (smart meter) sont présentés aujourd'hui comme des instruments incontournables pour faire face à l'évolution du marché de l'énergie et des pratiques de consommation un compteur dit « intelligent » est un appareil électronique capable de transmettre de façon constante des informations sur la consommation d'un client à un centre de contrôle, c'est-à dire au fournisseur d'énergie. Il permet donc de relever à distance et automatiquement la consommation d'énergie (sans déplacement d'un agent) et de piloter la distribution à partir d'un point central (ouverture, fermeture, limitation de puissance, prépaiement, etc.). Ce pilotage permettrait également aux gestionnaires de réseaux de pouvoir assurer une meilleure utilisation du réseau électrique en évitant les pics de consommation. Le consommateur, de son côté, peut « lire » sa consommation en temps réel, ainsi que le coût de celle-ci. Cette vision plus claire de l'énergie utilisée pourrait théoriquement lui permettre de mieux gérer sa consommation et donc de la réduire. [39]



Figure (II.7) : un compteur communicant 'Linky'.

II.10.2. Niveau de performance des compteurs intelligents

- Fonctionnalités de base : Permettre une lecture d'index tous les mois ou tous les deux mois. Ex : Italie.
- Fonctionnalités moyennes : Débit de communication permettant une lecture d'index par jour. Ex : compteur Linky.
- Fonctionnalités plus avancées : Permettre plusieurs lectures par jour et des interactions en temps-réel.

II.10.3. Présentation d'un modèle de système de comptage évolué

Un système de comptage évolué implique :

- La mise en place de compteurs communicants capables de stocker les informations résultante mesures.
- L'établissement de systèmes de transmission de donnée permettant la circulation rapide et fiable des informations contenues dans les compteurs entre les utilisateurs, le gestionnaire de réseaux et les fournisseurs.

Le compteur est doté de capacités de communication bidirectionnelle (transmission et réception des informations) et permet la relève à distance ainsi que le pilotage de la fourniture d'énergie. Comme le montre le schéma de la figure II.8 la communication s'effectue entre un ensemble de compteur installés chez les utilisateurs et un concentrateur localisé à proximité dans le poste de distribution via la technologie du courant porteur en ligne (CPL). Qui rassemble ces données pour les transmettre au gestionnaire du réseau. A chaque compteur et concentrateur est associé un modem CPL qui code et décode les données en un signal électrique et le superpose au courant électrique à 50 hertz.

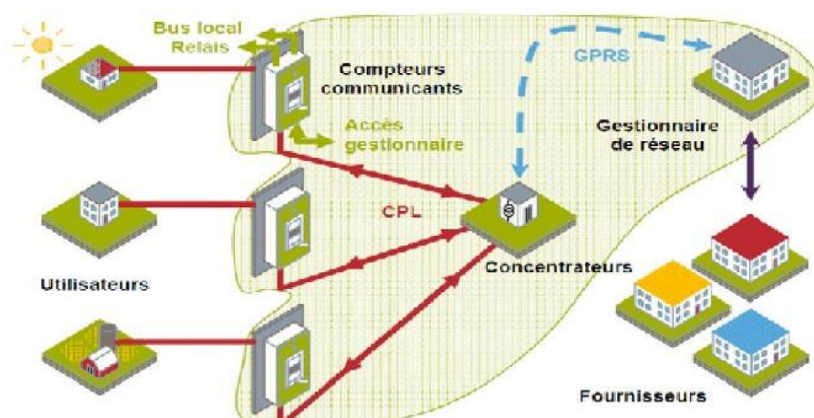


Figure (II.8) : Schéma d'un modèle couramment retenu pour un système de comptage évolué en électricité.

Ensuite, au niveau des concentrateurs, les données sont codées sous format numérique, puis sont transmises au système informatique du gestionnaire de réseau par l'intermédiaire du réseau de téléphonie GPRS.

Le système informatique du gestionnaire des réseaux est accessible par les fournisseurs d'énergie qui reçoivent régulièrement les données de comptage de leurs clients pour la facturation de l'énergie.

II.10.3.1. Les principales fonctionnalités des systèmes de comptage évolués

A fin de répondre aux exigences. Les compteurs évolués doivent être capables d'assurer :

- La relève des données du compteur à intervalle régulier.
- La télé-relève.
- La gestion de compteurs à distances (réduction de la puissance, coupure, gestion de la demande, etc.) par le gestionnaire de réseau de distribution.
- La mesure de la consommation pour une gestion décentralisée de la production.
- La gestion à distance des paramètres du compteur telles que les structures tarifaires, la puissance contractuelle, les intervalles de relève du compteur par les fournisseurs.
- Le transfert des messages à distance des acteurs du marché pour le client (consommateur/producteur) comme, par exemple, les signaux tarifaires.
- L'affichage des informations sur le compteur et : ou un télé-report à partir de la TIC installée.
- Un port de communication principal permettant le transfert d'information via le PRS, le GSM ou le CPL.
- La mesure de la qualité (y compris la continuité de l'approvisionnement et la qualité de tension).

II.11. Systèmes de stockage

L'élément clé de la gestion d'énergie dans les réseaux électriques intelligents est le système de stockage.

La batterie sert à stocker l'énergie produite par la ou les sources d'énergie. Il y a nécessité de stockage à chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique externe.

En effet :

- Cette demande est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande.
- L'apport énergétique est périodique (alternance jour/nuit, été/hivers) et aléatoire (conditions météorologiques), et c'est ce décalage entre la demande et l'apport énergétique qui exige un stockage d'énergie.
- Le stockage direct de l'énergie électrique en courant alternatif est impossible, il résulte qu'à tout instant la production doit équilibrer exactement la demande.
- Le stockage de l'énergie électrique n'est envisageable qu'en courant continu par :
 - Accumulation d'énergie dans le champ électrique d'un condensateur ou d'une super capacité.
 - Dans le champ magnétique d'une bobine à supraconducteur (SMES).
 - Ou enfin sous forme d'énergie chimique dans un accumulateur électrochimique (batteries).
- Une conversion de l'énergie peut cependant toujours être effectuée pour accumuler de l'énergie sous forme cinétique (dans des volants d'inertie) ou potentielle (par accumulation d'eau).
- A cause donc de la nature intermittente des ressources renouvelables, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommages à de nombreux cycles de charge et de décharge. La profondeur de décharge auquel un accumulateur peut être soumis dépend de son type. Ainsi, les accumulateurs plomb calcium sont utilisés pour des applications où la décharge est inférieure à 20 % par cycle (décharge faible).

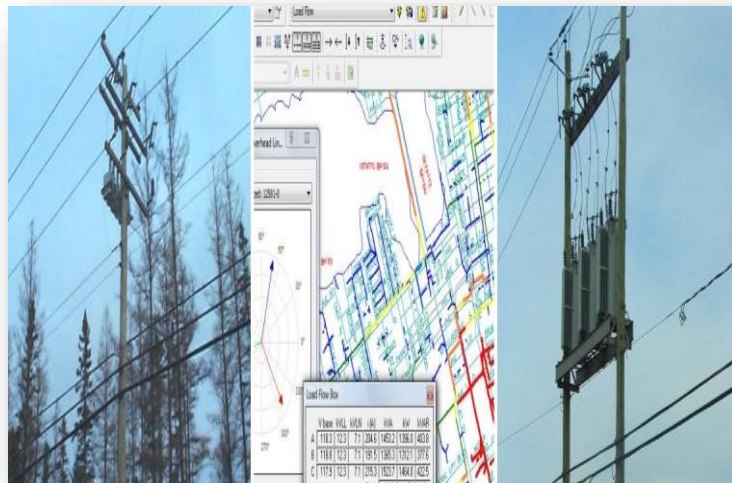
II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale Les Smart Grid, ces Comparaison des réseaux classiques et des réseaux électriques intelligents et leur contribution ainsi que les technologies inclus comme les smart city, smart home, ces derniers nécessitent une infrastructure communicative, et une gestion des ressources plus étendue, qui permet d'équilibrer la demande à la production centralisée et décentralisée.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude de l'écoulement de puissance dans lequel nous allons présenter son objectif, les différentes méthodes utilisées pour les calculs, la modélisation des éléments essentiels pour notre étude.

Chapitre III

Écoulement De Puissance Et Outil de Simulation



Écoulement De Puissance Et Outil de Simulation

III.1. Introduction

L'ingénieur en génie électrique est responsable de la mise en place, à l'exploitation des réseaux électriques qui posent de nombreux problèmes d'ordre technique et économique. L'exploitant du réseau doit assurer en tout temps et en tout lieu la couverture de l'énergie demandée, de garantir une qualité acceptable de la puissance livrée et de procurer une sécurité d'alimentation élevée avec un coût aussi faible que possible est responsable de la mise en place, la maintenance et la surveillance des équipements et des installations électriques.

L'étude de l'écoulement de puissance (load flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal et en cas de dysfonctionnement afin d'assurer une exploitation efficace, c'est-à-dire conforme aux normes techniques. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants sont déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. [40]

Dans le chapitre III, nous rappellerons tous d'abord les modèles des éléments du réseau électrique, puis nous présenterons le principe de l'écoulement de puissance en décrivant essentiellement la méthode numérique de Newton Raphson. Le choix de cette méthode est justifié par ce qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Cependant, elle requiert des capacités de stockage ainsi que des puissances de calcul importantes. [41]

III.2. But de l'étude de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance est une étape primordiale de toute analyse sérieuse d'un réseau électrique. En effet, elle nous permet de calculer les grandeurs d'un réseau en régime permanent équilibré à savoir les modules et phases des tensions en tout point du réseau.

A partir de ces dernières, nous pouvons calculer les courants dans les lignes de transport, les puissances actives et réactives transitées et les pertes de puissances provoquées lors du transport d'énergie électrique. Cette analyse est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. [42]

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de l'opération en régime permanent, d'un système de puissance, qui sont :

- ✓ La formulation d'un modèle mathématique approprié.
- ✓ La spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes dans les nœuds du système.
- ✓ La résolution numérique du système. [43]

III.3. Principe de l'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance est résolu pour la détermination en régime permanent des tensions complexes au niveau des jeux barres du réseau, à partir de lesquelles les transits des puissances actives et réactives dans chaque ligne et transformateur sont calculés. L'ensemble des équations représente le réseau électrique et de nature non linéaire.

Pratiquement, dans les méthodes de calcul d'écoulement de puissance, on exploite la configuration du réseau et les propriétés de ses équipements pour déterminer la tension complexe au niveau de chaque nœud. D'autre part, on parfaite symétrie entre les trois phases du système triphasés du réseau électrique.

III.3.1 Classification des jeux de barres

Le jeu de barre de référence est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barre est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. En plus, ce jeu de barre sert de référence pour les phases des tensions. Convention, ce jeu de barre est identifié par le jeu de barre N°1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés ($V=1$ pu et $\delta=0$). Par conséquent, les puissances P_{G1} et Q_{G1} sont inconnues, du fait qu'ils ne sont pas spécifiés d'avance. Dans le réseau électrique, les jeux de barres sont caractérisés par quatre variables ; les puissances active et réactive P et Q , l'amplitude de tension V et son angle de phase. Généralement, deux sont connues et les deux autres sont à déterminer. Nous avons généralement à faire à trois types de nœuds. [44]

- ✓ **Jeu de barre de référence (SLACK BUS) :** On l'appelle aussi le jeu de barre balancier ou swing bus. C'est un élément fictif créé pour l'étude de la répartition de la Puissance, il a pour rôle de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. D'une façon générale et par convention, ce jeu de barre est identifié par le jeu de barre $N^{\circ} = 1$, connecté à une source de tension d'où le module et la phase de la tension sont connues (généralement $|V| = 1$ et $\delta = 0$). Les puissances active et réactive sont donc inconnues et doivent être calculées après avoir résolu le problème de l'écoulement de puissance. [45]
- ✓ **Jeu de barres de contrôle (PV bus) :** Ce sont les jeux de barres générateurs de réseau où la puissance active et le module de la tension sont connus, puisqu'ils sont contrôlables, par contre la puissance réactive et l'argument de la tension sont inconnus. [46]
- ✓ **Jeu de barres de charges (PQ bus) :** Ce sont les jeux de barres de la demande clientèles. Pour ce type, les puissances active et réactive sont données, mais l'amplitude et l'argument de la tension sont à déterminer. [46]

Ce tableau résume ce que nous avons dit précédemment :

Tableau (III.1) : Propriétés des nœuds.

Nœud	Variables spécifiées	Variables inconnus
Nœud de charge	P et Q	Module de V et δ
Nœud générateur (Nœud à tension contrôlée)	Module de V et P	δ et Q
Nœud bilan	Module de V et δ	P et Q

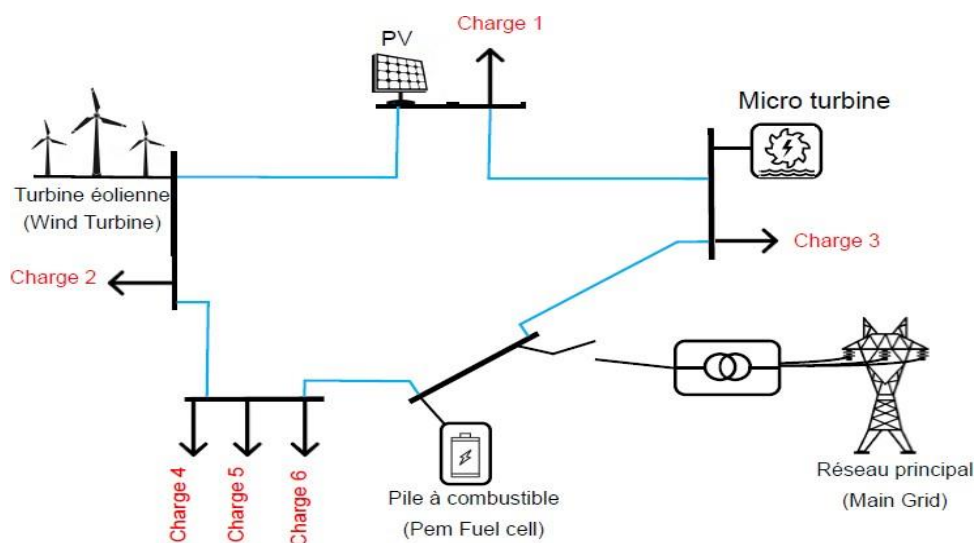


Figure (III.1) : Exemple d'un Réseau électrique avec cinq nœuds. [31]

III.4. Equations d'écoulement de puissance

Les équations du réseau électrique peuvent être exprimées par plusieurs formes, néanmoins, la méthode des tensions nodales est la plus utilisée. Les équations des courants à chaque nœud nous donnent la matrice admittance, cette dernière est ensuite utilisée pour déterminer les tensions à différents jeux de barres sous forme d'équations non linéaires qui sont résolues avec plusieurs méthodes. Les puissances active et réactive sont déduites depuis les résultats de tension obtenus. [47]

III.4.1. La matrice d'admittance

Cette matrice est obtenue en utilisant les équations de courant obtenues dans les nœuds constituant le circuit du réseau comme suit :

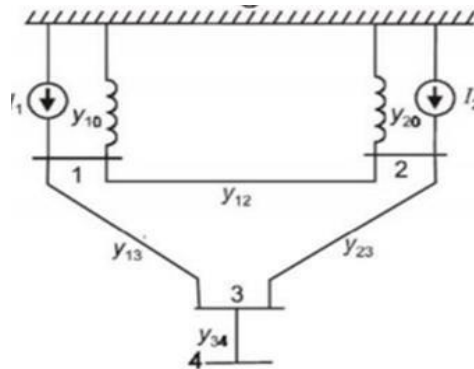


Figure (III.2) : Exemple d'un réseau bouclé à 4 nœuds.

En appliquant le théorème de Kirchhoff dans les quatre jeux de barre, on obtient les équations suivantes :

$$I_1 = y_{10} v_1 + y_{12} (v_1 - v_2) + y_{13} (v_1 - v_3) \quad (\text{III.1})$$

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13}) v_1 + y_{12} v_2 - y_{13} v_3 \quad (\text{III.2})$$

Nous posons que :

$$0 = -y_{13} v_3 - y_{23} v_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34}) v_3 - y_{34} v_4 \quad (\text{III.3})$$

$$0 = -y_{34} v_3 + y_{34} v_4 \quad (\text{III.4})$$

Ainsi on obtient les éléments de la matrice admittance :

$$Y_{11} = (y_{10} + y_{12} + y_{13}) \quad (\text{III.5})$$

$$Y_{22} = (y_{20} + y_{12} + y_{23}) \quad (\text{III.6})$$

$$Y_{33} = (y_{13} + y_{23} + y_{34}) \quad (\text{III.7})$$

$$Y_{44} = y_{34} \quad (\text{III.8})$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12} \quad (\text{III.9})$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13} \quad (\text{III.10})$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23} \quad (\text{III.11})$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34} \quad (\text{III.12})$$

Les équations finales sont :

$$I_1 = Y_{11} v_1 + Y_{12} v_2 + Y_{13} v_3 + Y_{14} v_4 \quad (\text{III.13})$$

$$I_2 = Y_{21} v_1 + Y_{22} v_2 + Y_{23} v_3 + Y_{24} v_4 \quad (\text{III.14})$$

$$I_3 = Y_{31} v_1 + Y_{32} v_2 + Y_{33} v_3 + Y_{34} v_4 \quad (\text{III.15})$$

$$I_4 = Y_{41} v_1 + Y_{42} v_2 + Y_{43} v_3 + Y_{44} v_4 \quad (\text{III.16})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

En général, nous pouvons écrire :

$$I_{bus} = Y_{BUS} * V_{bus} \quad (\text{III.18})$$

I_{bus} : Vecteur des courants injectés.

V_{bus} : Vecteur des tensions.

Y_{bus} : Matrice admittance.

III.4.1.1. Formulation des équations de tension

D'après l'équation (III.18) :

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{m=0}^n Y_{im} V_m \quad (\text{III.19})$$

Et nous avons aussi :

$$P_i - jQ_i = V_i * I_i \quad (\text{III.20})$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{III.21})$$

En remplaçant l'équation (III.21) dans (III.23) nous obtenons :

$$\text{Alors : } \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii}V_i + \sum_{m=0}^n Y_{im} V_m \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Alors : } Y_{ii}V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{m=1}^n Y_{im} V_m \quad (\text{III.23})$$

Et finalement l'équation (III.24) s'écrira :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{m=1}^n Y_{im} V_m \right] \quad (\text{III.24})$$

III.4.1.2. Formulation des équations d'écoulement de puissance

Avec les mêmes étapes qu'avec les équations de tensions, nous parvenons aux équations des puissances actives et réactives comme suit : [40]

À partir de l'équation (III.24), nous obtenant :

$$P_i - jQ_i = [Y_{ii}V_i + \sum_{m=1}^n Y_{im} V_m]V_i^* \quad (\text{III.25})$$

Ou :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_i, \quad Y_{im} = |Y_{im}| \angle \theta_{im} \quad (\text{III.26})$$

$$V_i^* = |V_i| \angle -\delta_i, \quad V_m = |V_m| \angle \delta_m \quad (\text{III.27})$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad (\text{III.28})$$

Et donc nous aurons :

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} + \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \angle \theta_{im} + \delta_m - \delta_i \quad (\text{III.29})$$

Et finalement :

$$P_i = \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \cos (\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (\text{III.30})$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (\text{III.31})$$

III.4.1.3. Formulation de l'équation des pertes en puissance active

$$\text{Nous avons : } P_{\text{loss}(im)} = P_{im} + P_{mi} \quad (\text{III.32})$$

Où :

$$P_{mi} = -|V_m|^2 |Y_{im}| \cos \theta_{im} + |Y_{im}| |V_i| |V_m| \cos (\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (\text{III.33})$$

$$P_{im} = -|V_i|^2 |Y_{im}| \cos \theta_{im} + |Y_{im}| |V_i| |V_m| \cos (\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (\text{III.34})$$

Donc nous aurons :

$$P_{\text{loss}(im)} = [2|V_i| |Y_{im}| \cos (\delta_i - \delta_m) - |V_i|^2 - |V_m|^2] |Y_{im}| \cos \theta_{im} \quad (\text{III.35})$$

Nous avons aussi :

$$Y_{im} = G_{im} + jB_{im} \quad (\text{III.36})$$

$$G_{im} = |Y_{im}| \cos \theta_{im} \quad (\text{III.37})$$

$$B_{im} = |Y_{im}| \sin \theta_{im} \quad (\text{III.38})$$

III.4.1.4. Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive

On a l'équation (III.39) :

$$Q_{\text{loss}(im)} = Q_{im} + Q_{mi} \quad (\text{III.39})$$

Où :

$$Q_{im} = |V_i|^2 |Y_{im}| \cos \theta_{im} - |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin (\theta_{im} - \delta_m + \delta_i) - |V_m|^2 |Y_{im}^0| \quad (\text{III.40})$$

$$Q_{mi} = |V_m|^2 |Y_{im}| \cos \theta_{im} - |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin (\theta_{im} - \delta_m + \delta_i) - |V_m|^2 |Y_{im}^0| \quad (\text{III.41})$$

III.4.2. Les méthodes utilisées pour le calcul de l'écoulement de puissance

Le système non linéaire des équations qui définissent le problème de la répartition des puissances nous oblige à l'utilisation des algorithmes itératifs. A partir d'une valeur initiale des tensions et des phases, nous actualisons itérativement ses valeurs, jusqu'à la vérification du critère d'arrêt.

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre les équations d'écoulement de puissance, nous citons principalement la méthode de Gauss-Seidel, la méthode de Newton-Raphson et la méthode de N-R découplée et découplée rapide.

III.4.2.1. Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Par conséquent, Cette méthode permet de réduire fortement le temps d'exécution du calcul de l'écoulement de puissance surtout pour les grands réseaux. Par contre, elle nécessite une très grande mémoire de stockage.

- **En coordonnées polaires**

$$P_i = \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \cos(\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (\text{III.42})$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^n |Y_{im}| |V_i| |V_m| \sin(\theta_{im} + \delta_m - \delta_i) \quad (\text{III.43})$$

- **Matrice jacobéennes**

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{III.44})$$

- **Calcul de la matrice jacobéennes**

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{\partial P_i}{\partial P_i} \\ J_2 &= \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} \\ J_3 &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} \\ J_4 &= \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} \end{aligned} \quad (\text{III.45})$$

III.5. Historique de logiciel de Power World Simulator

Les graines de Power World Simulator ont été plantés dans le début des années 1990, lorsque le professeur Thomas Overbye de l'Université de l'Illinois a vu la nécessité d'un meilleur outil pour aider les étudiants à comprendre le fonctionnement des systèmes électriques à grande échelle. Le logiciel de la journée s'est fortement appuyé sur des chiffres et des graphiques qui nécessitaient plus d'interprétation et d'explication.

Power World Simulator (simulateur) est un logiciel de simulation du système électrique conçu dès le départ pour être hautement interactif et convivial. Le Simulateur a le pouvoir d'une analyse technique grave, mais il est aussi tellement interactif et graphique qui peut être utilisé pour expliquer le fonctionnement du système d'alimentation à un public non spécialisé. Avec la version 21, le Simulateur est plus puissant, plus visuelle et plus facile à utiliser.

Le Simulateur se compose d'un certain nombre de produits intégrés à sa base est un moteur complet, robuste avec une puissance de débit solution capable de résoudre efficacement les systèmes de jusqu'à 100.000 autobus. Cela rend le Simulator très utile comme un logiciel d'analyse des flux de puissance autonome.

Contrairement à d'autres paquets de flux de puissance disponibles dans le commerce, cependant, le simulateur permet à l'utilisateur de visualiser le système grâce à l'utilisation de la couleur plein-animés schémas d'online complet avec zoom et de panoramique capacité. Les modèles du système peuvent être soit modifiées à la volée ou construits à partir de zéro en utilisant toutes les fonctionnalités éditeur graphique de cas de simulation. Les lignes de transmission peuvent être commutés (ou arrière) du service, la nouvelle transmission ou de génération peuvent être ajoutés, et de nouvelles opérations peuvent être établies, le tout avec quelques clics de souris. L'utilisation extensive de simulateur de graphisme et l'animation augmentent considérablement la compréhension de l'utilisateur des caractéristiques du système, les problèmes et les contraintes, ainsi que la façon de les corriger. [48]

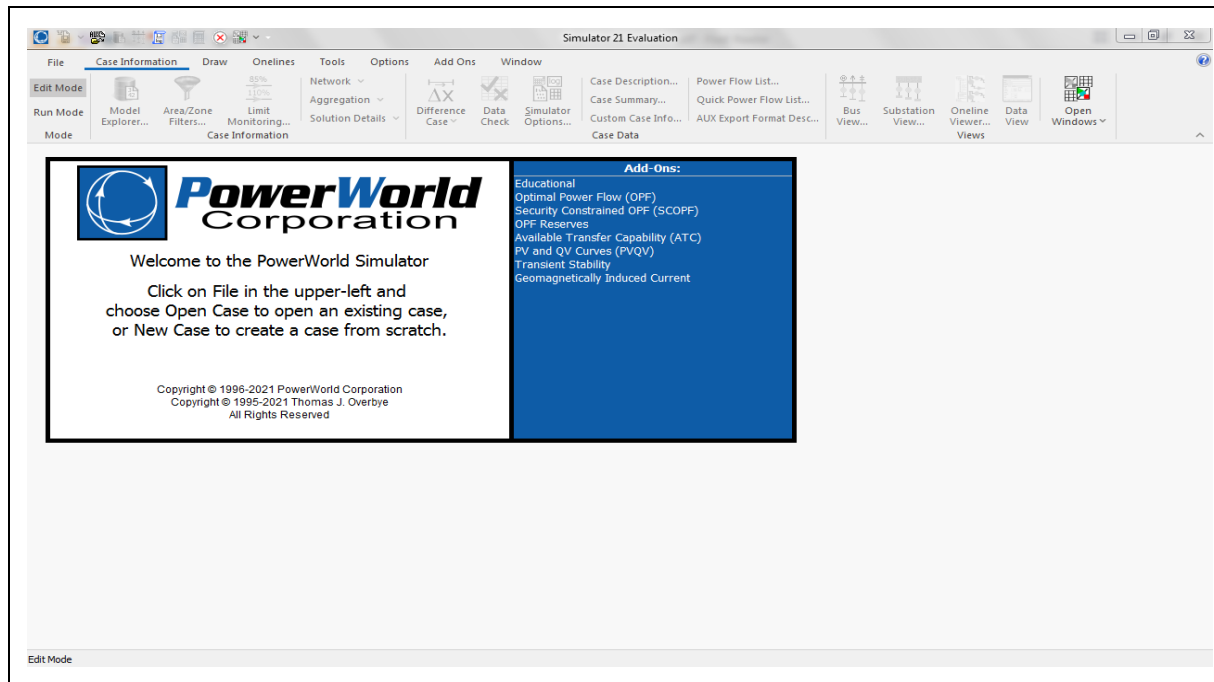


Figure (III.3) : Schéma représentative d'Interface de ruban de power world 2021.


III.5.1. Vue d'ensemble

- ✓ Simulateur s'intègre parfaitement deux fonctions ;
- ✓ Système d'alimentation graphique éditeur de case.
- ✓ Paquet de puissance de débit avec beaucoup analyses connexes outils :
- Analyse d'urgence, pas de temps de simulation, de sensibilité, Analyse des pertes, analyse des défauts, OPF, PVQV, ATC, SCOPF.
- En outre, la stabilité transitoire. [48]

III.5.2. Modes de fonctionnement

- ❖ Le système de flux de puissance est mis en œuvre en deux modes distincts de Simulator :
 - ✓ Edit Mode.
 - ✓ Run Mode
 - **Edit Mode :**
 - Tâches : * Créer de nouvelles cases d'écoulement de puissance.
 - * Modifier une case existante.
 - Compétences : - Les cases peuvent être modifiés graphiquement ou par texte.

Edit Mode Introduction

 [See Also](#)

The **Edit Mode** is used to create a new case or to modify existing cases. To switch to **Edit Mode**, click on the **Edit Mode** button in the **Mode** ribbon group on any of the ribbon tabs.

Here is a sampling of things you can do in **Edit Mode**:

- Create a new case; see [New Case](#) for details.
- Create a new oneline diagram; see [New Oneline](#) for details.
- Add new components graphically to an existing case; see [Draw](#) ribbon tab.
- Modify the appearance of the oneline objects; see [Formatting](#) ribbon group for details.
- View and modify a case using non-graphical lists displays; see [Case Information Displays](#) for details.
- Equivalence a case; see [Equivalencing](#) for details.
- Append a subsystem to an existing case; see [Appending a Case](#) for details.

For more details on the **Edit Mode** please see [Edit Mode Overview](#).


© 2021 PowerWorld Corporation

Figure (III.4) : Schéma représentative de mode distinct de Simulator (Edit Mode).

➤ **Run Mode :**

- Flux de puissance seul.
- Des outils d'analyse de la circulation du courant et des sensibilités :
 - * Analyse d'urgence.
 - * Pas de temps de simulation.
 - * Optimal Power Flow (OPF).
 - * PV et QV Curve Tools (PVQV).
 - * La capacité de transfert disponible (ATC).
 - * Sécurité contrainte OPF (SCOPF).
 - *Analyse de sensibilité.
 - * Analyse des pertes.
 - *Analyse des défauts.
 - *Stabilité transitoire. [48]

Run Mode Introduction

 [See Also](#)

The **Run Mode** is used to solve a single Power Flow Solution, **run** one of the available load flow tools, or **run** a time-domain simulation of the power system. To access **Run Mode**, click on the **Run Mode** button in the **Mode** group of the Simulator Ribbon.

The key ribbon group associated with the **Run Mode** is the **Tools** ribbon group. This ribbon group allows you to perform a single Power Flow Solution (however, it is quicker to use the [Quick Access](#) toolbar).

Other key components of **Run Mode** include:

- The oneline diagrams, which allow you to view the case graphically. See [Online Diagram Overview](#) for details.
- The Case Information Displays, which allow you to view the entire power system case using list displays. See [Case Information Displays](#) for details.
- Dialogs to change the simulation options and the Power Flow Solution. See [Simulation Options](#) for details.
- Scaling to allow easy variation in the load, shunts, and generation at any number of buses. See [Scaling](#) for details.
- Contouring, which shows a color contour representing the variation in any power system parameter across a system. See [Contouring](#) for details.
- **Run Contingency Analysis**
- Transfer distribution factor calculations. See [Power Transfer Distribution Factors](#) for details.
- Perform a fault analysis. See [Fault Analysis](#) for details.
- **Run Available Transfer Capability** studies.
- Perform an [Optimal Power Flow](#) (OPF) or [Security Constrained Optimal Power Flow](#) (SCOPF) analysis.
- Generate [PV and QV curves](#).

© 2021 PowerWorld Corporation

Figure (III.5) : Schéma représentative de mode distinct de Simulator (Run Mode).

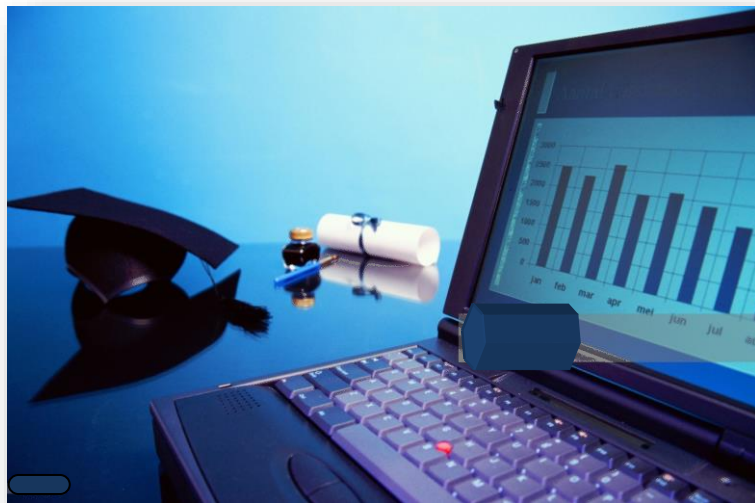
III.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu l'objectif de l'analyse de l'écoulement de puissance et leur principe de fonctionnement et les méthodes pour résoudre ce problème. Puis, nous avons détaillé la méthode de Newton Raphson qui est dans son application la plus simple, qui nécessite très peu d'étapes par rapport aux autres méthodes pour arriver au minimum et qui prend en compte les informations des dérivés secondes. Par la suite nous avons présenté les différents jeux de barres.

Deuxièmement, nous avons défini l'outil de simulation Power World qui nous permettra d'identifier différents problèmes du réseau d'étude micro grid, en utilisant l'application de flux d'énergie par la méthode Newton Raphson. Ce dernier est le but du prochain chapitre de simulation ainsi que du sujet proposé.

Chapitre IV

Simulations et Résultats



Simulations et résultats

IV.1. Introduction

L'Algérie de par sa superficie importante (2 381 741km²), dispose de l'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3500 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays. [49]

L'exploitation de ce potentiel considérable d'énergie solaire est aujourd'hui possible grâce au développement de différentes technologies de conversion disponibles sur le marché. Pour la conversion de grandes puissances, deux technologies dominent le marché actuel:

- La technologie des systèmes cylindro-paraboliques ou CSP (Concentrated Solar Power), repose sur l'utilisation de miroirs paraboliques qui ont pour fonction de concentrer le rayonnement solaire au sein de leur foyer, qui comportent des tubes récepteurs linéaires, dans lesquels circule un liquide caloporteur à hautes températures 300°C à 400°C. Cette Technologie est, sur le plan commercial rentable, elle permet la possibilité de stockage d'énergie, cependant, elle présente l'inconvénient, d'un temps important, de réalisation des projets, en raisons des structures lourdes utilisées.
- La technologie des systèmes photovoltaïques, fonctionnent selon le principe de la conversion instantané de l'énergie solaire en un courant électrique. Cette technologie a connu durant ces dernières années des progrès remarquables dans l'amélioration du rendement de la cellule solaire et la réduction des coûts de production des systèmes.

Tableau (IV.1) : La répartition des déférentes centrales réalisées durant la période (2011-2016).

Type de l'installation	Puissance MW	Région d'installation	Date de mise en service
CSP	25	Hassi R'Mel	Juillet 2011
Éolienne	10	Adrar	Juin 2014
	1.1	Ghardaïa	
	03	Djanet (Illizi)	Février 2015
	48	Parc d'Adrar: réalisation de 6 centrales PV	Octobre 2015 à Mars 2016
	13	Tamanrasset	Novembre 2015

PV	09	Tindouf	Décembre 2015
	05	In-Salah (Tamanrasset)	Février 2016
	20	Ain El-lbel (Djelfa)	Avril 2016
	20	Khnag (Laghouat)	
	15	El-Kebrit (Souk Ahras)	
	20	Sedrate Leghzal (Nâama)	Mai 2016
	30	Ain-Skhouna (Saida)	

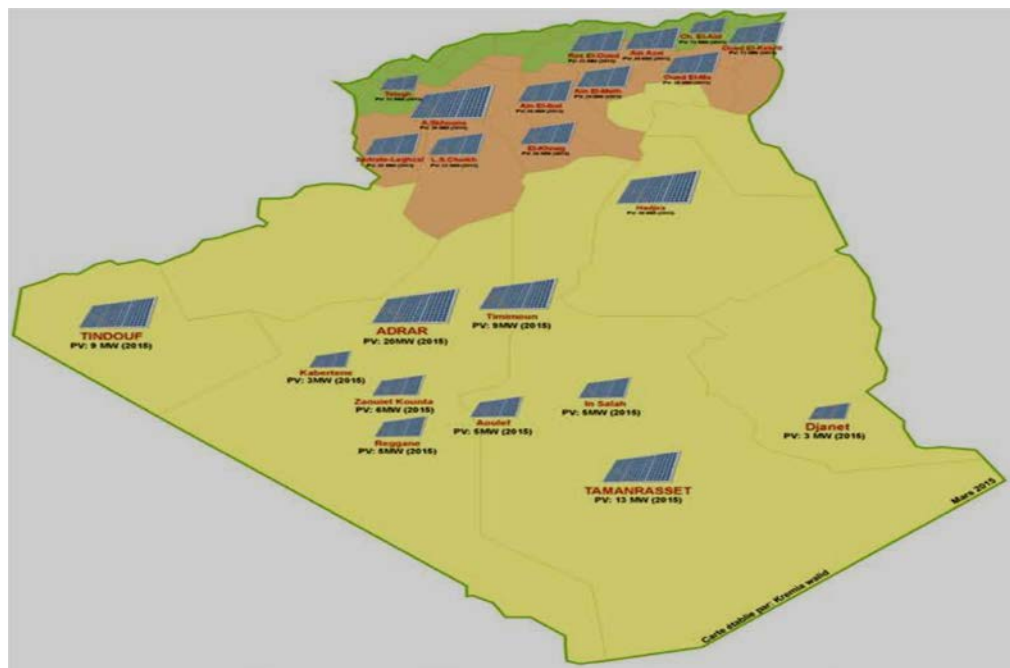


Figure (IV.1). La répartition des centrales photovoltaïques par région géographique. [50]

L'Algérie est le premier marché de l'électricité au Maghreb, avec une production totale (y compris l'autoproduction) qui a atteint en 2018 (76,7 TWh et un taux de pénétration du réseau électrique de 99,4 %).

- Le groupe public Sonelgaz a le monopole de la distribution et du transport. Il contrôle directement ou indirectement plus de 80 % de la production électrique.
- Les centrales utilisant le gaz comme énergie primaire représentent 95 % de la puissance installée. La part des EnR est de 2%. Toutefois, ces dernières ne contribuent qu'à hauteur de 1% dans la production annuelle d'électricité.
- Le groupe Sonelgaz prépare le lancement en 2021 d'un compteur électrique intelligent conçu et fabriqué localement. L'augmentation des installations de productions d'énergie d'origine renouvelable a conduit à de nouveaux défis pour les compagnies d'électricité nationales. Ces défis concernent particulièrement l'intégration de ces sources décentralisées

dans un réseau électrique existant, compte tenu des problèmes qui leur sont associés et notamment, l'intermittence de la puissance produite. [51]

Le projet de ville intelligente (SAIDA) que nous nous efforçons de réaliser vise à améliorer la gestion de la ville dans le but d'améliorer la qualité de vie de ses citoyens. Concrètement, l'aspect énergétique, qui est l'un des fondements de la civilisation, la wilaya de SAIDA est considérée comme l'un des willayas les plus importantes qui se caractérise par la vaste superficie et le climat propice à la production d'énergie solaire. A partir de cette caractéristique, on peut construire un réseau intelligent composé uniquement d'énergies renouvelables dans la wilaya plus précisément Solaire photovoltaïque aux niveaux de la wilaya de SAIDA de la daïera de HSASSNA, commune AIN-SKHOUNA.



Figure (IV.2) : La localisation de willaya de Saïda par rapport aux gares d'arrivée (Sidi Bel Abbès, Tiaret, Mécheria).

Pour bien comprendre le rôle et le principe de fonctionnement d'un réseau intelligent (Ville Intelligente) dans l'efficacité énergétique et la demande, nous avons fractionné ce chapitre de simulation en:

- ❖ Réalisation et étude d'un réseau intelligent constitué de 13 nœuds dans l'état de Saïda, en utilisant comme outil de simulation le logiciel Power World (version 21), dont le but de montrer son fonctionnement.
- ❖ Deux possibilités sont étudiées :
 - le premier le micro-réseau connecté avec un réseau principal
 - puis indépendant du réseau principal.

Le micro-réseau est constitué principalement de ressources énergétiques renouvelables, telles que l'énergie solaire. Il est produit par la centrale à énergie solaire d'une capacité de 30 mégawatts, qui sera produite d'ici 11 mois par une société allemande spécialisée dans

l'installation de panneaux photovoltaïques sur une superficie de plus de 40 hectares dans la commune d'Ain El- Skhona.



Figure (IV.3). La répartition de centrale photovoltaïque au niveau de Saïda par (MAPS).

IV.2. Présentation de réseau de 13 nœuds

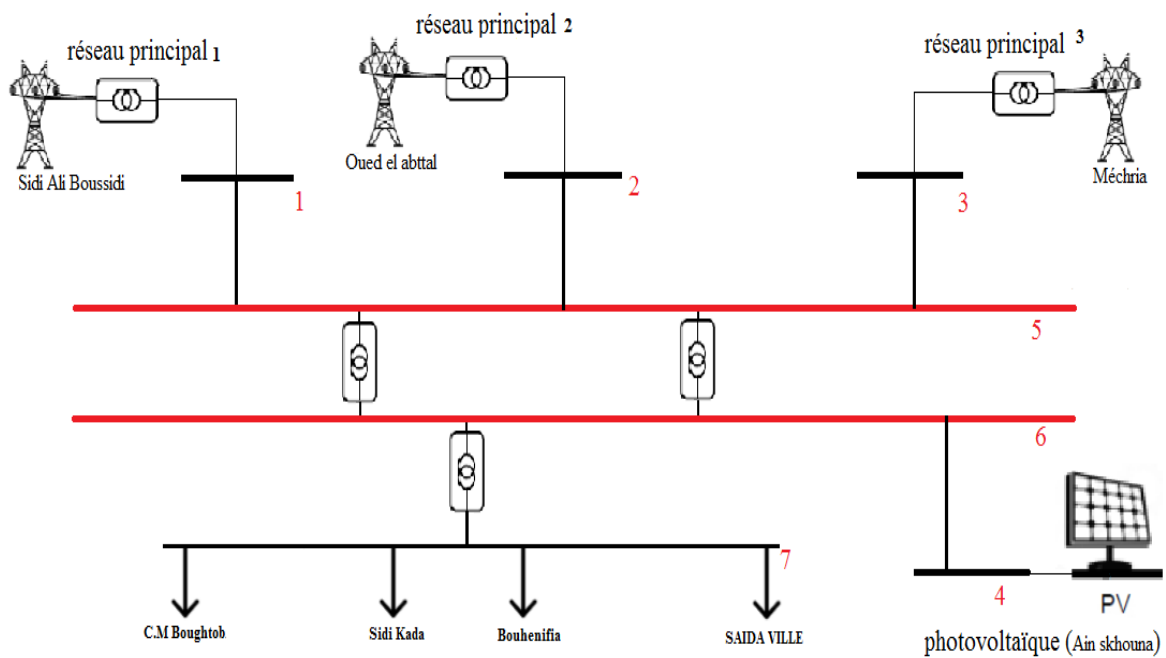


Figure (IV.4) : Architecture du réseau a étudié.

IV.3. Calcul de l'écoulement de puissance pour le réseau à 13 nœuds

IV.3.1. Simulation avec réseau principale

Dans cette partie, on va simuler le réseau de la wilaya de Saida connecté avec des postes d'arrivée (Sidi Ali Boussidi, Oued El Abttal, Mécheria).

Pour cela notre simulation va cibler tout d'abord l'impact de l'intégration de l'énergie Solaire plus précisément Solaire photovoltaïque aux niveaux de la wilaya de SAIDA de la daïera de HSASSNA, commune AIN SKHOUNA.

❖ On note que toutes les simulations qui suivent sont effectuées dans le cas de mesure réel suivant :

- **Responsabilité de pointe : hiver 2021**
- **Date : du 26 au 27 janvier 2021**
- **Heure : 20 :00 h**

A) Simulation sans intégration des énergies renouvelables :

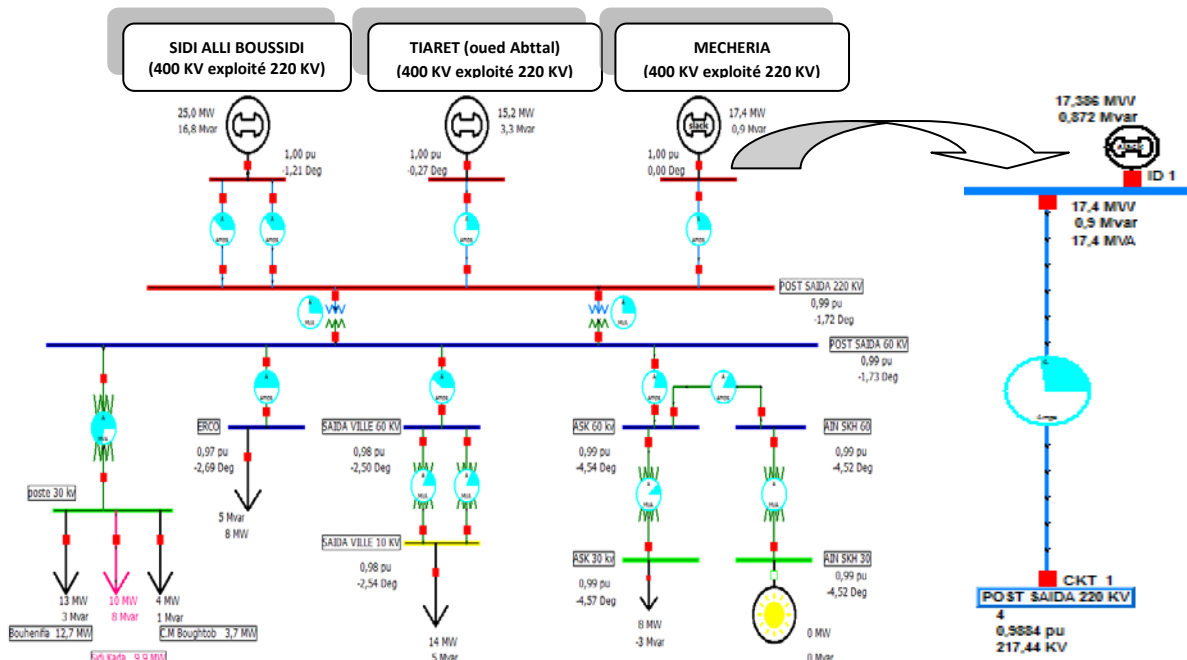


Figure (IV.5). Schéma de réseau principal au niveau de Saida avant l'intégration de l'énergie Solaire sur logiciel Power World 21 (à 13 nœuds).

Tableau (IV.2) : L'écoulement de puissance sans énergie renouvelable.

N ⁰	Nœud départ	Nœud arrive	Type	P _{ij} (MW)	Q _{ij} (Mvar)	P _{Lij} (MW)	Q _{Lij} (Mvar)
1	SIDI ALLI BOUSSIDI (400 kV exploiter 220 KV) (1)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne (1)	12,0	8,1	0,07	0,20
2	SIDI ALLI BOUSSIDI (400 kV exploiter 220 KV) (1)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne (2)	13,0	8,8	0,08	0,22
3	TIARET (oued el Abttal) (400 kV exploiter 220 KV) (2)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne	15,2	3,3	0,10	0,42
4	MECHRIA (400 kV exploiter 220 KV) (3)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne	17,4	0,9	0,18	0,53
5	POST SAIDA 220 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (5)	Transformateur (1)	28,60	9,8	0,00	0,01
6	POST SAIDA 220 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (5)	Transformateur (2)	28,60	9,8	0,00	0,01
7	AIN SKH 60 KV (7)	POST SAIDA 60 KV (5)	Ligne	-4,4	1,5	0,07	0,021
8	POST SAIDA 60 KV (5)	SAIDA VILLE 60 KV (8)	Ligne (1)	10,1	3,4	0,06	0,17
9	POST SAIDA 60 KV (5)	SAIDA VILLE 60 KV (8)	Ligne (2)	3,6	1,6	0,02	0,06
10	POST SAIDA 60 KV (5)	ERCO (10)	Ligne	8,1	5,2	0,09	0,24
11	POST SAIDA 60 KV (5)	ASK 60 KV (11)	Ligne	4,5	-1,3	0,08	0,22
12	POST SAIDA 60 KV (5)	poste 30 KV (13)	Transformateur	26,3	11,9	0,03	0,09
13	AIN SKH 30 KV (6)	AIN SKH 60 KV (7)	Transformateur (1)	00,0	00,0	00,0	0,00
14	AIN SKH 30 KV (6)	AIN SKH 60 KV (7)	Transformateur (2)	-1,0	00,0	00,0	00,0
15	AIN SKH 60 KV (7)	ASK 60 KV (11)	Ligne	3,4	-1,5	00,0	00,0
16	SAIDA VILLE 60 KV (8)	SAIDA VILLE 10 KV (9)	Transformateur (1)	6,9	2,4	00,0	0,01
17	SAIDA VILLE 60 KV (8)	SAIDA VILLE 10 KV (9)	Transformateur (2)	6,9	2,4	00,0	0,01
18	ASK 60 kV (11)	ASK 30 KV (12)	Transformateur (1)	3,9	-1,5	00,0	00,0
19	ASK 60 kV (11)	ASK 30 KV (12)	Transformateur (2)	3,9	-1,5	00,0	00,0

Tableau (IV.3) : Les paramètres des Puissances totales sans énergie renouvelable.

	P _{Totale} (MW)	Q _{Totale} (Mvar)
Les charges	56,8	18,6
Les Générateurs	57,6	21,0
Les pertes	0,78	2,39

B) Simulation avec l'intégration des énergies renouvelables

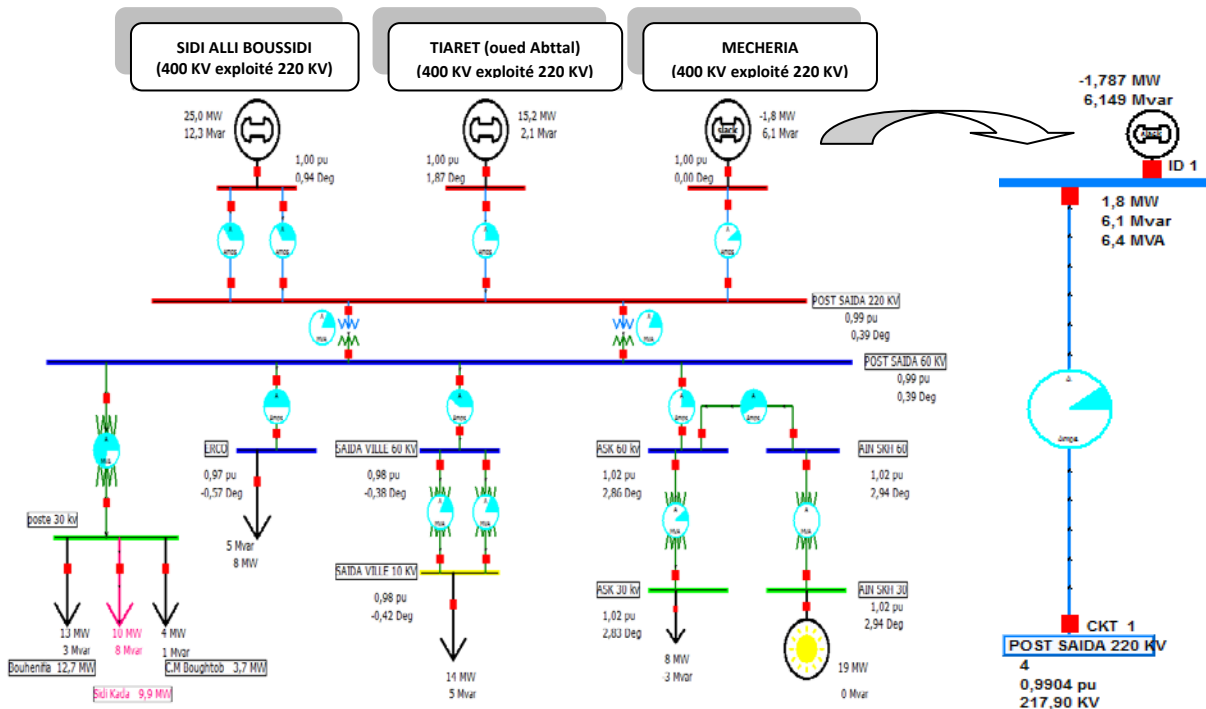


Figure (IV.6). Schéma de réseau principal au niveau de Saida après l'intégration de l'énergie Solaire sur logiciel Power World 21 (à 13 nœuds).

Tableau (IV.4) : l'écoulement de puissance avec énergie renouvelable.

N ⁰	Nœud départ	Nœud arrive	type	P _{ij} (MW)	Q _{ij} (Mvar)	P _{Lij} (MW)	Q _{Lij} (Mvar)
1	SIDI ALLI BOUSSIDI (400 kV exploiter 220 kV) (1)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne (1)	12,0	5,9	0,06	0,17
2	SIDI ALLI BOUSSIDI (400 kV exploiter 220 kV) (1)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne (2)	13,0	6,4	0,06	0,18
3	TIARET (oued el Abttal) (400 kV exploiter 220 kV) (2)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne	15,2	2,1	0,10	0,41
4	MECHERIA (400 kV exploiter 220 kV) (3)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne	-1,8	6,1	0,02	0,07
5	POST SAIDA 220 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (5)	Transformateur (1)	19,1	9,8	0,00	0,00
6	POST SAIDA 220 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (5)	Transformateur (2)	19,1	9,8	0,00	0,00
7	AIN SKH 60 KV (7)	POST SAIDA 60 KV (5)	Ligne	5,2	1,5	0,09	0,27
8	POST SAIDA 60 KV (5)	SAIDA VILLE 60KV (8)	Ligne (1)	10,1	3,4	0,06	0,17
9	POST SAIDA 60 KV (5)	SAIDA VILLE 60 KV (8)	Ligne (2)	3,6	1,6	0,02	0,06
10	POST SAIDA 60 KV (5)	ERCO (10)	Ligne	8,1	5,2	0,08	0,24

11	POST SAIDA 60 KV (5)	ASK 60 kV (11)	Ligne	-4,9	-1,3	0,09	0,26
12	POST SAIDA 60 KV (5)	poste 30 kV (13)	Transformateur	26,3	11,9	0,03	0,09
13	AIN SKH 30 KV (6)	AIN SKH 60 KV (7)	Transformateur (1)	0,00	-0,00	0,00	0,00
14	AIN SKH 30 KV (6)	AIN SKH 60 KV (7)	Transformateur (2)	18,0	0,00	0,00	0,00
15	AIN SKH 60 KV (7)	ASK 60 kV (11)	Ligne	12,8	-1,5	0,01	0,02
16	SAIDA VILLE 60 KV (8)	SAIDA VILLE 10 KV (9)	Transformateur (1)	6,9	2,4	0,00	0,01
17	SAIDA VILLE 60 KV (8)	SAIDA VILLE 10 KV (9)	Transformateur (2)	6,9	2,4	0,00	0,01
18	ASK 60 kV (11)	ASK 30 KV (12)	Transformateur (1)	3,9	-1,5	0,00	0,00
19	ASK 60 kV (11)	ASK 30 KV (12)	Transformateur (2)	3,9	-1,5	0,00	0,00

Tableau (IV.5) : Les paramètres des Puissances totales avec énergie renouvelable.

	P_{Totale} (MW)	Q_{Totale} (Mvar)
Les charges	56,8	18,6
Les Générateurs	57,4	20,5
Les pertes	0,64	1,97

IV.3.2. Discussion des résultats

- **Analyse des puissances de charges**

➤ A partir des tableaux (IV.3) et (IV.5), nous observons clairement que les puissances des charges sont restées à la même valeur de 56,8 MW et 18,6 Mvar pour la puissance active et la puissance réactive respectivement dans les deux cas avant et après l'intégration des énergies renouvelables.

- **Analyse des puissances de générateurs**

➤ À travers les résultats de simulation obtenus, nous remarquons que la valeur de la puissance active a diminuée de 57,6 MW à 57,4 MW et la puissance réactive a diminuée de 21 Mvar à 20,5 Mvar grâce à l'intégration d'énergie renouvelable au réseau principal.

- **Analyse des pertes**

➤ A travers les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus (IV.3) et (IV.5), nous constatons qu'il existe une surcharge sur le réseau principal avant la connexion d'énergie renouvelable, cette surcharge a été allégée après la connexion, et la diminution des puissances générées qui provoque une diminution des pertes dans le réseau.

➤ A partir des schémas de la simulation (IV.5 ; IV.6), lors la connexion et la déconnexion du champ PV (l'intermittence), la charge électrique auto générée est renvoyée vers le réseau d'alimentation principal, l'hypothèse bidirectionnelle est vérifiée.

IV.3.3. Simulation du champ PV sans réseau principale

Dans cette deuxième partie de la simulation nous allons déconnecter la wilaya de SAIDA du réseau principale c'est-à-dire (Sidi Ali Boussidi, Oued El Abttal, Mécheria).

Pour la seule source disponible qui est du champ PV de AIN SKHOUNA pour une puissance de l'ordre de $P = 26,5$ MW et $Q = 0$ Mvar.

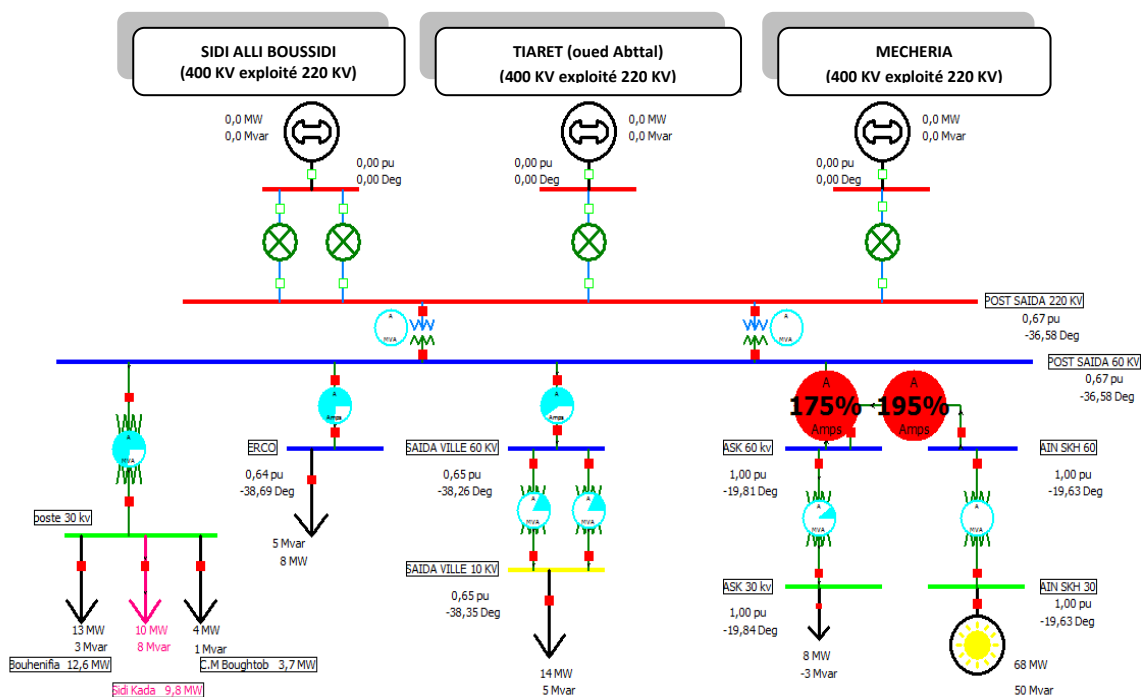


Figure (IV.7) : Schéma de Simulation du champ PV sans réseau principale au niveau de Saida sur logiciel Power World 21 (à 13 nœuds).

Tableau (IV.6) : l'écoulement de puissance sans réseau principale.

N°	Nœud départ	Nœud arrive	type	P_{ij} (MW)	Q_{ij} (Mvar)	P_{Lij} (MW)	Q_{Lij} (Mvar)
1	SIDI ALLI BOUSSIDI (400 kV exploiter 220 kV) (1)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne (1)	/	/	/	/
2	SIDI ALLI BOUSSIDI (400 kV exploiter 220 kV) (1)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne (2)	/	/	/	/
3	TIARET (oued el Abttal) (400 kV exploiter 220 kV) (2)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne	/	/	/	/
4	MECHRIA (400 kV exploiter 220 kV) (3)	POST SAIDA 220 KV (4)	Ligne	/	/	/	/

5	POST SAIDA 220 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (5)	Transformateur (1)	0,00	0,00	0,00	0,00
6	POST SAIDA 220 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (5)	Transformateur (2)	0,00	0,00	0,00	0,00
7	AIN SKH 60 KV (7)	POST SAIDA 60 KV (5)	Ligne	29,5	26,7	5,37	15,33
8	POST SAIDA 60 KV (5)	SAIDA VILLE 60KV (8)	Ligne (1)	10,1	3,6	0,13	0,37
9	POST SAIDA 60 KV (5)	SAIDA VILLE 60 KV (8)	Ligne (2)	3,6	1,7	0,04	0,14
10	POST SAIDA 60 KV (5)	ERCO (10)	Ligne	8,0	5,4	0,19	0,54
11	POST SAIDA 60 KV (5)	ASK 60 kV (11)	Ligne	-23,8	-11,3	5,23	14,95
12	POST SAIDA 60 KV (5)	poste 30 kV (13)	Transformer	26,2	11,9	0,07	0,21
13	AIN SKH 30 KV (6)	AIN SKH 60 KV (7)	Transformateur (1)	0,00	0,00	0,00	0,00
14	AIN SKH 30 KV (6)	AIN SKH 60 KV (7)	Transformateur (2)	66,5	50,2	0,00	0,00
15	AIN SKH 60 KV (7)	ASK 60 kV (11)	Ligne	37,0	23,5	0,07	0,21
16	SAIDA VILLE 60 KV (8)	SAIDA VILLE 10 KV (9)	Transformateur (1)	6,8	2,4	0,00	0,01
17	SAIDA VILLE 60 KV (8)	SAIDA VILLE 10 KV (9)	Transformateur (2)	6,8	2,4	0,00	0,01
18	ASK 60 kV (11)	ASK 30 KV (12)	Transformateur (1)	3,9	-1,5	0,00	0,00
19	ASK 60 kV (11)	ASK 30 KV (12)	Transformateur (2)	3,9	-1,5	0,00	0,00

Tableau (IV.7) : Les paramètres des Puissances totales sans réseau principale.

	P_{Totale} (MW)	Q_{Totale} (Mvar)
Les charges	56,4	18,4
Les Générateurs	67,6	50,4
Les pertes	11,16	31,94

IV.3.4. Discussion des résultats

Dans ce cas, le fonctionnement du réseau (à 13 nœuds) représenté sur la figure (IV.7), lors la déconnexion totale du réseau principal, le champ PV doit produire l'énergie afin de couvrir toute la demande locale. Le nœud 6 (le champ PV) est considéré automatiquement comme nœud de référence avec une puissance générée de 67,6 MW et 50,4 Mvar.

- **Analyse des puissances de charges**
 - A partir des tableaux (IV.5) et (IV.7) nous observons clairement que les puissances des charges sont restées presque les mêmes de l'ordre de 56,4 MW pour la puissance active et 18,4 Mvar pour la puissance réactive dans les deux cas sans réseau principale et avec réseau principale.
- **Analyse des puissances de générateurs**
 - Dans le deuxième cas le l'offgrid (sans réseau principale), nous observons que les deux grandes valeurs de puissances générées (67,6 MW, 50,4 Mvar) plus élevée par rapport l'ongrid (57,4 MW, 20,5 Mvar) (avec réseau principale), Ces valeurs sont justifiées par le nœud 6. Car dans le cas 'offgrid' le nœud 6 génère toute la puissance, d'où on le référence comme nœud bilan.
- **Analyse des pertes**
 - A travers les résultats obtenus dans les tableaux (IV.5) et (IV.7), durant la connexion du réseau principal, nous remarquons qu'il est faible, suite aux faibles pertes des lignes et à la stabilité de la tension. par contre lors la déconnexion du réseau principal, le réseau est perturbé à cause d'augmentation des pertes, (pertes actives d'une valeur de 0,64 MW à 11,16 MW et pertes réactives d'une valeur de 1,97 Mvar à 31,94 Mvar), provoquée par l'augmentation des puissances générées.
 - A partir du schéma (IV.7), la première ligne (entre post AIN SKH 60 KV et post ASK 60 kV) et la deuxième ligne (POST SAIDA 60 KV et post ASK 60 kV) ne supportent pas la puissance transmise parce que les paramètres caractérisés ne répondent pas à la puissance générée, qui provoque une surcharge très élevé sur les lignes.

IV.4. Smart city SAIDA

Suite à l'instabilité du réseau local, nous allons proposer des solutions, de tel sorte qu'elle soit la plus réel possible et qui aboutie au sujet proposé c'est-à-dire à savoir le surnom de Smart city SAIDA.

IV.4.1. Les solutions

IV.4.1.1. Augmenté la capacité de production au niveau PV = 70 MW

Selon les dires de l'ingénieur de l'entreprise, le champ peut être agrandi d'une superficie de 100 hectares car cette zone est à côté du champ, avec les meilleures conditions pour son exploitation et elle peut produire environ 70 mégawatt.

IV.4.1.2. Création d'une source géothermique (station thermique se Sidi Aissa)

Malgré l'augmentation de la capacité du champ PV (Ain-Skhouna), la nouvelle capacité du champ PV ne répondait pas aux exigences des consommateurs pour réaliser un réseau intelligent, donc nous nous sommes déplacés vers la station thermique de Sidi Aissa, dont nous avons obtenu des informations sur la température du sol, pour réaliser une centrale géothermique selon les exigences et les conditions de la région, pour garantir la qualité d'énergie et la continuité de service (l'objectif est de fournir l'énergie durant toute la journée).

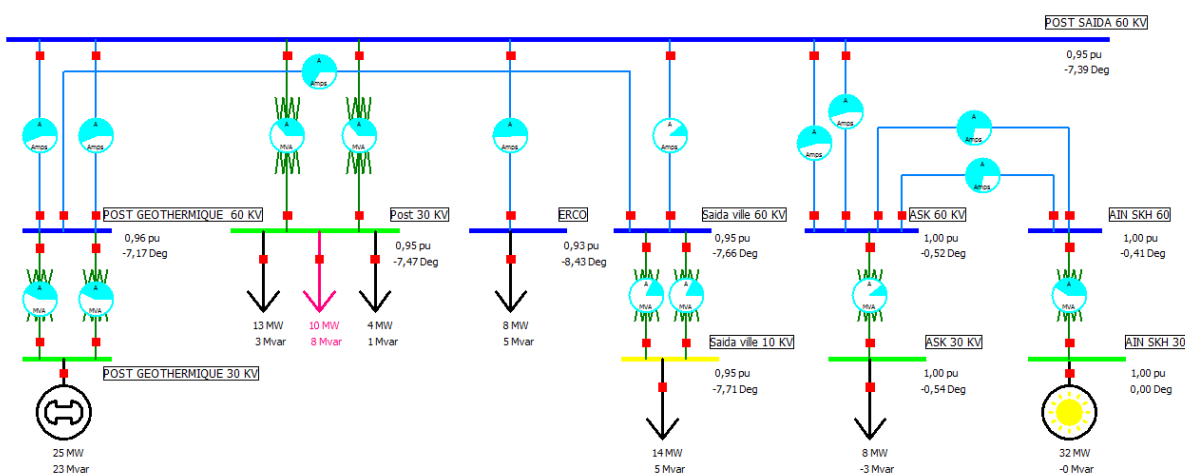


Figure (IV.8) : Schéma représentatif du réseau intelligent au niveau de Saida à 11 Nœuds.

Tableau (IV.8) : L'écoulement de puissance de réseau intelligent au niveau de Saida.

N ⁰	Nœud départ	Nœud arrive	type	P _{ij} (MW)	Q _{ij} (Mvar)	P _{Lij} (MW)	Q _{Lij} (Mvar)
1	ASK 60 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (1)	Ligne (1)	12,2	1,3	0,51	1,46
2	ASK 60 KV (4)	POST SAIDA 60 KV (1)	Ligne (2)	12,2	1,3	0,51	1,46
3	POST SAIDA 60 KV (1)	SAIDA VILLE 60 KV (6)	Ligne	2,6	-1,2	0,00	0,01
4	POST SAIDA 60 KV (1)	ERCO (8)	Ligne	8,1	5,3	0,09	0,27
5	POST SAIDA 60 KV (1)	POST 30 KV (9)	Transformateur (1)	13,2	6,0	0,01	0,03
6	POST SAIDA 60 KV(1)	POST 30 KV (9)	Transformateur (2)	13,2	6,0	0,00	0,01
7	POST géothermique (11)	POST SAIDA 60 KV (1)	Ligne (1)	6,9	8,3	0,04	0,11
8	POST géothermique (11)	POST SAIDA 60 KV (1)	Ligne (2)	6,9	8,3	0,04	0,11

9	AIN SKH 30 KV (2)	AIN SKH 60 KV (3)	Ligne	16,1	-0,1	0,04	0,12
10	AIN SKH 30 KV (2)	AIN SKH 60 KV (3)	Transformateur	16,1	-0,1	0,04	0,12
11	AIN SKH 60 KV (3)	ASK 60 KV (4)	Ligne (1)	16,1	-0,2	0,01	0,03
12	AIN SKH 60 KV (3)	ASK 60 KV (4)	Ligne (2)	16,1	-0,2	0,01	0,03
13	ASK 60 KV (4)	ASK 30 KV (5)	Ligne	3,9	-1,5	0,00	0,00
14	ASK 60 KV (4)	ASK 30 KV (5)	Transformateur	3,9	-1,5	0,00	0,00
15	SAIDA VILLE 60 KV (6)	SAIDA VILLE 10 KV (7)	Transformateur (1)	6,9	2,4	0,00	0,01
16	SAIDA VILLE 60 KV (6)	SAIDA VILLE 10 KV (7)	Transformateur (2)	6,9	2,4	0,00	0,01
17	POST GEOTHERMIQUE (11)	SAIDA VILLE 60 KV (6)	Ligne	11,2	6,1	0,06	0,16
18	Centrale géothermique 30 KV (10)	Centrale géothermique 60 KV (11)	Transformateur (1)	12,5	11,5	0,05	0,14
19	Centrale géothermique 30 KV (10)	Centrale géothermique 60 KV (11)	Transformateur (2)	12,5	11,5	0,05	0,14

Tableau (IV.9) : Les paramètres des Puissances totales du réseau intelligent au niveau de Saida à 11 Nœuds.

	P_{Totale} (MW)	Q_{Totale} (Mvar)
Les charges	55,8	18,7
Les Générateurs	57,2	22,8
Les pertes	1,47	4,20

IV.4.2. Discussion des résultats

Dans ce cas, le fonctionnement du nouveau réseau réalisé (smart grid) dispose de deux sources renouvelables pour produire toutes les énergies qui alimentent les volontés sans le réseau principal avec une meilleure qualité énergétique et sans pertes. Avec la mise en place de deux nouvelles lignes pour réduire la charge sur les câbles et assurer la continuité du service sans défaillance technique par rapport à l'énergie transmise.

- **Analyse des puissances de charges**

➤ A partir des tableaux (IV.7) et (IV.9), nous observons clairement que les puissances des charges sont restées presque les mêmes avec 55,8 MW pour la puissance active et 18,7 Mvar pour la puissance réactive respectivement, pour les deux cas avec une seule source PV et deux sources (PV, GEO).

- **Analyse des puissances de générateurs**

- Nous notons que les deux principales valeurs énergétiques (57,2 MW, 22,5 MW) ont été générées, et dans ce cas, il est considéré comme une production bonne et précise qui répond aux besoins de la région sans gaspillage et allège la charge sur les câbles reliant la station solaire à la ville intelligente. Nous relevons que toute l'énergie réactive économisée est produite à partir de la nouvelle centrale, une centrale géothermique.

- **Analyse des pertes**

- A travers les résultats obtenus dans les tableaux (IV.7 ; IV.9), nous constatons que les pertes ont été améliorées dans le cas de l'utilisation des deux centrales pour produire de l'énergie renouvelable. Cette diminution très significative des pertes des valeurs (11,16 MW, 31,94 Mvar) aux valeurs (1,47 MW, 4,20 Mvar) est obtenue grâce à l'insertion de la nouvelle station (GEO) qui a compensé l'énergie réactive, et la mise en place de deux nouvelles lignes qui ont réduit la charge sur les câbles.

IV.5.Conclusion

Ce chapitre se compose de deux parties qui expliquent le fonctionnement de réseau électrique de la willaya de Saida. Le but de l'étude s'appuie sur le réseau principal et sans réseau principal, c'est-à-dire les énergies renouvelables disponibles dans la région uniquement, sont exploités afin de faciliter le développement d'un modèle de création d'un réseau intelligent dans la willaya, en utilisant l'outil d'application de simulation power world 21.

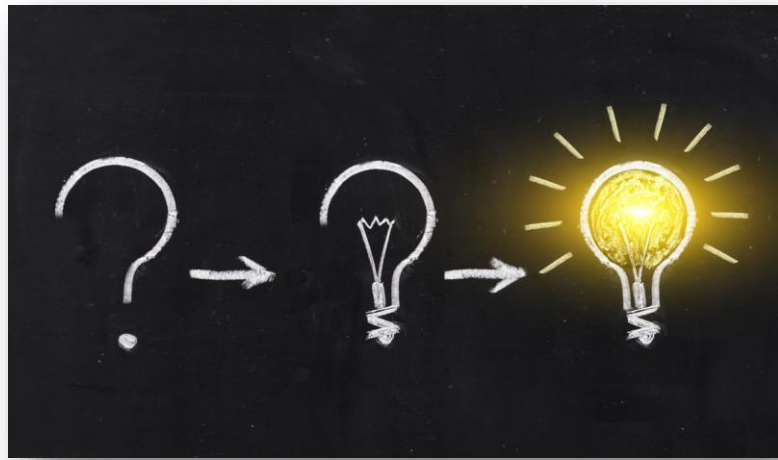
- Dans la première partie, nous avons traité le réseau de la willaya Saida, qui se compose d'un réseau principal provenant de trois willayas (Mascara, Tiaret, Mécheria), et d'une centrale solaire à Ain-Skhouna.

Pour montrer le fonctionnement de ce dernier, nous avons procédé à deux opérations de base :

- La première est la sommation de sources de production d'énergie renouvelable au niveau de la wilaya de Saida et le réseau principal, par la suite nous avons analysé ses résultats pour les comparer avec le résultat du processus qui dispose de deux sources renouvelables sans réseau principale.

- Quand au deuxième procédé, nous avons séparé le réseau principal de la willaya de Saida et nous nous sommes appuyés uniquement sur les énergies renouvelables locales. Nous avons constaté que nous ne pouvons pas compter sur une seule énergie renouvelable située à Ain-Skhouna, car cette dernière ne produisait pas d'énergie réactive.
- Dans la seconde partie, nous avons développé deux solutions, la première est d'augmenter la capacité du champ dans les conditions qui lui sont accordées, avec une valeur de production estimée à 70 mégawatts, et la seconde est d'installer une centrale géothermique à Sidi Aissa.
 - Nous avons simulé et représenté plusieurs tableaux, afin de montrer que le nouveau réseau dit intelligent (Smart city SAIDA) peut générer lui-même l'énergie et peut couvrir tout ou une partie de la demande intérieure en énergie de l'état de Saïda à travers les Systèmes de production renouvelables. Le Smart city SAIDA a prouvé son efficacité, après l'ajout d'une centrale thermique à Sidi Issa, ce qui est un pas en avant et une composante essentielle des villes intelligentes du futur.

Conclusion Générale



Conclusion générale

Aujourd'hui, grâce à l'évolution du réseau actuel dans le but de satisfaire à la demande croissante d'électricité surtout dans les périodes de pointes qui poseront des problèmes néfastes, et pour répondre à ce besoin, les réseaux électriques doivent devenir plus communicants. Ils bénéficient pour cela les Nouvelles Technologies d'Information et de Communication. Le réseau électrique intelligent ou Smart Grid est l'un des développements récents dans le domaine des systèmes électriques qui facilite l'utilisation de nouvelles sources d'énergie en parallèle avec les sources d'énergie conventionnelles.

Notre travail a été focalisé sur l'étude et l'analyse d'un réseau de la wilaya de Saida, afin d'arriver à cet objectif, nous avons partagé notre mémoire en quatre chapitres :

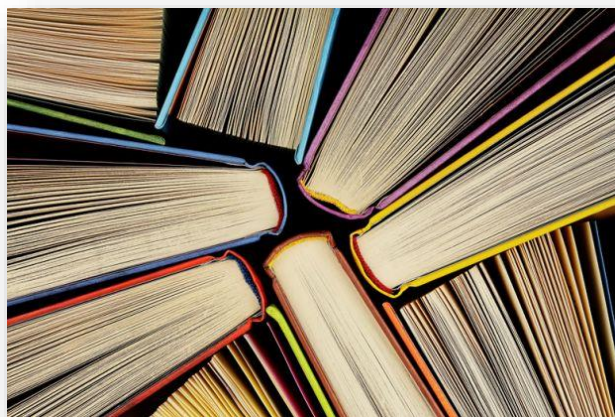
- ✚ Dans le premier chapitre, nous avons cité les différentes énergies renouvelables, définir la production décentralisée et nous avons terminé ce chapitre, en abordant les impacts de l'insertion des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique.
- ✚ Pour le deuxième chapitre, nous avons défini le Smart Grid comme étant l'une des solutions à la problématique d'intégration des énergies renouvelables ou nous nous sommes orienté en particulier à l'étude du réseau intelligent (smart Grid).
- ✚ Par la suite, le troisième chapitre nous avons rappelé d'abord les modèles des éléments du réseau électrique, puis nous avons présenté le principe de l'écoulement de puissance en décrivant essentiellement la méthode numérique de Newton Raphson.
- ✚ Nous avons consacré le dernier chapitre de ce mémoire à l'étude d'un exemple d'application qui définit le réseau intelligent (smart grid). La simulation et la présentation des résultats obtenus nous a permis d'utiliser le logiciel power world.
 - 📌 La première étape de notre travail a été consacrée à l'analyse d'un réseau de la wilaya de Saida constituant d'un réseau de 13 nœuds. L'objectif de cette structure est de satisfaire les besoins en énergies électriques des charges connectées tout en s'assurant de la qualité de l'énergie, notamment de la tension, à tout point de raccordement. Dans cette simulation nous avons pu montrer le fonctionnement d'un réseau de la wilaya de Saida en utilisant le cas 'avec réseau principal (l'on grid)' et le cas 'sans réseau principal (l'off grid)' manuellement. nous avons simulé et visualisé les différents résultats de tel sorte qu'ils nous ont permis d'étudier la gestion et le contrôle du réseau électrique contenant l'intégration des EnR.

Cette étude nous a permis de conclure les résultats suivants :

- Le micro réseau a satisfait les besoins en énergies électriques des charges connectées dans le cas sans réseau principal 'off grid' et a assuré la qualité d'énergie.
- La gestion de réseau de la wilaya de Saida favorise l'utilisation des sources renouvelables par rapport au réseau public.

Comme perspective, nous proposons ce projet a effectué au niveau de la wilaya de Saida. Sachant que cette dernière possède de bons et différents potentiels. Nous pouvons proposer parmi plusieurs ressources renouvelables qu'elle possède comme l'énergie géothermique. Tout cela ouvre la voie au projet de ville intelligente.

Références



Références Bibliographiques

- [1] **MAHAFENOHASINA Virginie Lara**, «Intégration d'une puissance moyenne solaire photovoltaïques sans stockage au réseau : application au réseau électrique de TULEAR », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du grade Master 2 en Génie Electrique, Université d'Antananarivo Ecole supérieure polytechnique, 2017.
- [2] **BEMANA NGUEOUELE Yannick**, « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public », Mémoire de Master, institut international d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2012.
- [3] **M ZELLAGUI**, « Etude des protections des réseaux électriques mt (30 &10 kV) », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [4] **A ABDELBAKI, D BELKHIRI, Y LAHOUASSA**, « Calcul de courant de court-circuit dans les réseaux électriques », Mémoire d'Ingéniorat de l'université de M'silla, Département d'Electronique, 2012.
- [5] **ADJOU DJ Labiba**, « Contribution à l'étude de l'OPF du réseau Algérien basée sur les énergies renouvelables et les FACTS », Thèse Doctorat 3^{ème} cycle LMD, Université de Djillali Liabes , Sidi Bel Abbes.
[ADJOU DJ, Labibahttp://rdoc.univ-sba.dz/handle/123456789/2454](http://rdoc.univ-sba.dz/handle/123456789/2454)(Consulté le : aout 2021).
- [6] **KANCHEV Hristiyan**, « Gestion des flux énergétique dans un system hybride de source d'énergie renouvelable : optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro-réseau électrique urbain », Thèse Doctorat Ecole centrale de LILLE, 2014.
- [7] **HAPHAM Thi Thu**, « Influences de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. Le 26 octobre 2006.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00174846/document/> Consulté le : juin 2021

- [8] **NAIMI Djemal, BOUKTIR Tarek**, «Optimisation de l'intégration des ressources énergétiques décentralisées (RED) aux réseaux de distribution dans un marché de l'électricité dérégulé », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.
- [9] **BOUGHATANE Hafid, HADDADI Yacine, MEDJOUJ Rabah**, «Sur la maitrise des investissements dans l'insertion des ressources renouvelables au réseau électrique », mémoire de master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2014.
- [10] **CAIRE Raphael**, « gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2004.
- [11] **ZEMOURI Yassine, REMILI Karim**, «Aspects économiques et sécurité informatique dans les projets Smart Grids : Etude de cas», Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Béjaia, 2013.
- [12] **CROCI Lila**, « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs», Thèse de Doctorat, Université de Poitiers French, 2013.
- [13] **N BEMANA**, «Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public », Mémoire de Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Institut Internationale Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2012.
- [14] **Y RIONNEAU**, «gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecter au réseau », Application _a l'habitat. Electric power, Université Joseph- Fourier – Grenoble French, 2009.
- [15] **BORIS Bersene**, «Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur», Sciences de l'ingénieur [physics], Université de Grenoble, 2010.
- [16] **FJODOR Lamm, PASCAL Hahulla**, «Smart Area Aachen communication infrastructure for innovative equipment »,23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon 15-June 18, 2015.

- [17] **PAUL Wang**, «Smart Grid project catalogue : part 2, By contribution to policy global », IEA Implementing Agreement for a co-operative programme on Smart Grids (ISGAN), International Smart Grid Action Network (ISGAN), 2013.
- [18] **KHATTABI Mariam**, «Advanced architectures and control concepts for more Micro grids», Raport on field test for the transfer between interconnected and islanding mode at the ecological settlement in Mannheim-Wallstadt (MVV), 2009.
- [19] **EVA Niesten, FLOORTJE Alkemade**, «How is value created and captured in smart Grids? A review of the literature and an analysis of pilot projects », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53, doi: 10.2016.
- [20] **Rapport**, «Astudy on smart grid communities in the APEC region », Asia Pacific research Center (APEC), 2015, Disponible via le lien: <http://aperc.ieej.or.jp>.
- [21] Mobilité durable, Disponible via le lien : <https://les-smartgrids.fr/>
- [22] **SOUAG M, DORBHAN S**, « La ville nouvelle de sidi abdallâh et le développement durable», Exemple d'aménagement à partir de la gestion des eaux urbaines, 2005.
- [23] **VNSA**, «Ville nouvelle de Sidi Abdellah avialable», 2016, Disponible via le lien :http://www.vnsa.dz/index.php?option=com_content&view=article&id=3.
- [24] **IKENOUNE A, AKIL M**, «Etude d'alimentation en eau potable de la ville nouvelle de Sidi Abdellah wilaya d'Alger», Master en Hydraulique, Université de Bejaia, 2015.
- [25] **DKNews**, « Sidi Abdallah : Un modèle de ville moderne et d'organisation urbanistique harmonieuse»,12-12-2016, Disponible via le lien :<http://dknews-dz.com/article/72195-sidi-abdallah-un-modele-de-ville-moderne-et-dorganisation-urbanistique-harmonieuse.html>.

- [26] **ALIOUCHE Bahia**, « Nouvelle ville de Sidi Abdellah : un projet et des contraintes », 16 - 03 – 2014, Disponible via le lien : <https://www.djazairess.com/fr/latribune/104222> .
- [27] <https://www.yumpu.com/fr/document/read/17265904/projet-de-ville-nouvelle-sidi-abdellah-euromedina> [Accessed 26/06/2021] .
- [28] **FERHAT Y, RACIM K**, « l'Algérie peut faire sa smart city », Sommet international des villes intelligentes d'Alger, 2018.
- [29] Wilaya-d'Alger, Projet « Alger, Smart City », appel à collaboration available 2017, <http://www.wilaya-alger.dz/fr/projet-alger-smart-city-appel-a-collaboration/> [Accessed 26/06/2021].
- [30] <http://www.wilaya-alger.dz/fr/sommet-mondial-smart-cities-organise-par-smart-city-alger-pour-evaluer-les-dernieres-technologies-et-strategies-dinvestissement/> [Accessed 26/06/2021].
- [31] **GUERROUDJ Abdelhak, BELKHIRA Amjed baha eddine**, « Étude et Simulation d'un Micro-Grid », Mémoire de fin d'étude master réseaux électriques, Université D.Moulay Tahar de Saida, 2020.
- [32] **ABED Mouna, DERBAL Ramzi, SIDI Hadjer**, « Les Tendances Recentes De La Ville Intelligente En Algerie, Cas D'étude : Centre Ville De Ziama Mansouriah », Mémoire de Fin d'étude Master Académique, Architecture et Environnement Urbain, Université Mohamed Seddik ben Yahia- Jijel, 2018.
- [33] **RIM Missaoui Badreddine**, « Gestion Energétique optimisée pour un bâtiment intelligent multi-sources multichargés : dierents principes de validations », Electric Power. Universite de Grenoble, French, 2012.
- [34] **LAIB Kamel**, « Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable », Mémoire De Master, Universite De Mohamed Boudiaf M'sila, 2016.
- [35] **BRAHIMI Karim, BOUCHALA Sofiane**, « Les aspects techniques des projets Smarts Grids ». Mémoire de master, Universite Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.

- [36] <http://www.smartgridscre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=microgrids&action=imprimer> [Accessed 26/08/2021].
- [37] **D. L. Ha**, « Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation », PhD en Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal, Université de Grenoble, 2007.
- [38] **CHENNAI S**, «Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle», Mémoire de Doctorat en Electrotechnique, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.
- [39] **PAX Christi**, « les compteurs intelligents prenons le temps d'y réfléchir», Publié avec le soutien du service de l'éducation permanente de la Communauté française, Bruxelles, Décembre 2009.
- [40] **MAHDAD Belkacem**, « Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC ». Mémoire de fin étude master réseau électrique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2014.
- [41] **SEDDIKI Zahira**, « Optimisation de l'écoulement de puissances dans un systeme d'energie electrique par la methode du point interieur». Mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef ,2009 .
- [42] **ZAIEM Mohamed Seghir, BENSEDDIK Bilel**, « Optimisation d'écoulement de puissance par essaim de particules d'un réseau électrique en présence de STATCOM». Mémoire master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2018.
- [43] **HAMDANI Hanene, SARI Sara Wissem** «Contribution à l'étude de l'insertion de dispositifs FACTS (IPFC) dans un réseau électrique». Mémoire de fin d'étude Master réseau électrique, Université Dr. T .MOULAY de Saida, 2019.
- [44] **LEBBIHI Mohammed lamine, BELBBEY Maamar** «Méta heuristiques Appliquées à l'étude de la répartition optimale de la puissance active dans un réseau électrique». Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar de El Oued, 2018.

- [45] **BOUARAGUIA A**, «L'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution ». Mémoire de master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2017.
- [46] **KERBAA A**, «Étude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie Électrique». Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra ,2013.
- [47] **SAADI Farhat, TENBOUKTI Hanafi** «Calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial avec insertion d'un générateur éolien». Mémoire de fin d'étude master réseau électrique, Université A.MIRA de Bejaia, 2016.
- [48] **NAAMA Bakhta, BOUZEBOUDJA Hamid, ASRAOUI Abderrahmane**, «Simulation des Réseaux Electriques par le Logiciel Power World Version 17». Travaux Pratiques, Université M .BOUDIAF d'Oran, 2015.
- [49] **GHOUARI Adel**, « Étude théorique et expérimentale des réseaux intelligents appliqués dans la gestion d'énergie des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique », Thèse Doctorat 3ème Cycle LMD, Université de Batna -2-, 2017.
- [50] **Newsletter presse n°34**, « Synthèse des plans de développement des sociétés du groupe Sonelgaz 2015 – 2025, » Sonelgaz - Direction de la Communication et des Médias, Algérie, juin 2015. Disponible via le lien: <http://www.sonelgaz.dz/presse>.
- [51] Disponible via le lien : « <https://www.businessfrance.fr> » fiche-marche-l'électricité », juin 2021.

Annexe

1. Annexe A 01 : La méthode de Newton-Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance (NLF) :

D'après la forme générale d'équations de puissance au J.d.B :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| \cdot |V_i| \cdot |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= -\sum_{j=1}^n |y_{ij}| \cdot |V_i| \cdot |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{iq} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \text{(A-01)}$$

Où

i=1 : J.d.B de référence

n: Nombre de J.d.B

i: Numéro de J.d.B

Après développement de Fipet Fiqen série de TAYLOR autour de la première approximation

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \text{(A-02)}$$

Avec F_{ip}^0 et F_{iq}^0 sont des fonctions de tension et de phase :

A partir de la relation de $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$

$$\left. \begin{aligned} \text{Avec} \quad \Delta P_i^{(0)} &= P_i - F_{ip}^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - F_{iq}^{(0)} \end{aligned} \right\} \text{(A-03)}$$

Les deux systèmes d'équation (A-02) et (A-03) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2p}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{np}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad \text{(A-04)}$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{A-05})$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta_i^{(K)} = \delta_i^{(K+1)} - \delta_i^{(K)} \quad (\text{A-06})$$

$$i \neq 1(\text{ref}), i \neq 2(\text{cont}) \quad (\text{A-07})$$

$$\Delta V_i^{(K)} = V_i^{(K+1)} - V_i^{(K)} \quad (\text{A-08})$$

L'adaptation de (A-05) avec (A-08) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + [J^{(K)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(K)} \\ \Delta Q^{(K)} \end{bmatrix} \quad (\text{A-09})$$

D'une manière générale

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{A-10})$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A-11})$$

J_1, J_2, J_3, J_4 Sont les sous matrice de Jacobienne.

Détermination des sous matrices de la Jacobienne J

A partir du système d'équations (A-01) on peut déterminer les éléments de J

Sous matrice J1:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= -|V_i||V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-12})$$

Sous matrice J2:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= |V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= 2|V_i||y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) + \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-13})$$

Sous matrice J3:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= |V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-14})$$

Sous matrice J4:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_i} &= -|V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_i} &= - \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) - 2|V_i||y_{ij}| \sin(\gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-15})$$

Les étapes de calcul

1. A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance *bus* Y .
2. On estime les valeurs initiales $|V_i|^0$ et δ_i^0 pour les J.d.B de charge et δ_i^0 pour les J.d.B de contrôle.
3. On calcule P, Q qui nous donne $\Delta P, \Delta Q$.
4. Formation de la matrice Jacobienne J .
5. On trouve l'inverse de Jacobienne.
6. On calcule

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

On obtient :

$$\delta_i^{(1)} = \Delta \delta_i^{(0)} + \delta_i^{(0)}$$

$$|V|_i^{(1)} = \Delta |V|_i^{(0)} + |V|_i^{(0)}$$

7. le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie.

$$\max(\Delta P, \Delta Q) \leq \varepsilon$$

8. On prend les résultats obtenus.