

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

---



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda



Faculté de 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 :

---

## Étude et Simulation d'un Micro-Grid

---

Présenté par :

**GUERROUDJ Abdelhak**

**BELKHIRA Amjed baha eddine**

Devant le jury composé de :

**Dr. MOHAMMED CHIKOUCHE Tarik** Président

**Pr. LAKDJA Fatiha** Encadreur

**Dr. BOUANANE Abdelkrim** Examineur

20/09/2020

Promotion 2019-2020

# 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.

Nous remercions **Pr LAKDJA Fatiha**, notre encadreur, de nous avoir proposé ce sujet et d'avoir dirigé ce travail .Ou nous étions sans cesse à l'écoute de ces suggestions et ces critiques constructives.

Nos remerciements vont également à Monsieur **HATTI Mustapha**, maitre de recherche "A" de l'unité de développement des équipements solaires (UDES) à Bou-Ismaïl (Wilaya de Tipaza) pour sa disponibilité et son aide.

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

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents, que Dieu les  
protège.

À mes chers frères et ma sœur et toute  
ma famille.

Une dédicace spéciale à tous mes amis,  
et pour tous ceux qui me connaissent,  
en particulier mon cher ami Hachemi  
Mohamed et Benyamina Abbas.

À la fin je dédie très chaleureusement  
ce mémoire à mon binôme.

- G. Abdelhak

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents, que Dieu les  
protège.

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

Une dédicace spéciale à tous mes amis,  
et pour tous ceux qui me connaissent,  
en particulier mon cher ami Hachemi  
Mohamed, et Benyamina Abbas.

À la fin je dédie très chaleureusement  
ce mémoire à mon binôme.

- B.Amdjed

## Résumé

Généralement, l'intégration directe de sources d'énergies renouvelables dans les réseaux électriques existants peut créer de nouveaux défis, dû principalement à la variabilité et à l'incertitude de ces sources d'énergie, 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 micro réseau qui est une solution innovante aux problèmes du réchauffement climatique et de la pollution environnementale. Ces systèmes comprennent des producteurs d'énergie, de multiples charges électriques ainsi que des systèmes de stockage.

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

Les résultats obtenus sous Matlab/Simulink et powerworld montrent le fonctionnement du micro-réseau selon différents types de charges.

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

## Abstract

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 micro-grid which is an innovative solution to the problems of global warming and environmental pollution. These systems include power generators, multiple electrical loads, and storage systems.

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 Matlab / Simulink and Power World show the functioning of the micro-grid according to different types of loads.

**Keywords:** Power Flow, Renewable energy, Smart Grid, Software.

**Table des matières**

Table des matières ..... I  
Liste des figures ..... IV  
Liste des tableaux ..... VI  
Liste Des Acronymes ..... VII

**Chapitre I : Les Energies Renouvelables Et leurs Problématiques D'intégrations**

**Dans Le Réseau électrique**

Introduction générale..... 1  
I.1.Introduction..... 4  
I.2 Structure classique d'un réseau électrique ..... 4  
I.3 Structure d'un réseau électrique actuel ..... 5  
I.4 Capacités des énergies renouvelables dans le monde ..... 6  
I.5 Les Grandes Familles des énergies Renouvelables ..... 6  
    I.5.1 L'énergie solaire..... 6  
    I.5.2 L'énergie éolienne ..... 8  
    I.5.3 L'énergie hydroélectrique ..... 9  
    I.5.4 L'énergie de la Biomasse ..... 9  
    I.5.5 Energie géothermique ..... 10  
    I.5.6 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.8.1 Impact sur le sens de transit de puissance ..... 14  
    I.8.2 Impact sur la stabilité du système ..... 15  
    I.8.3 Impact sur la qualité du système ..... 15  
        I.8.3.2 Flicker ..... 16  
        I.8.3.3 Les harmoniques ..... 17  
    I.8.4 Impact sur le plan de la protection ..... 17  
        I.8.4.1 Courant de court-circuit..... 18

## Table des matières

---

I.8.4.2 Influence sur la sélectivité des protections .....	18
I.9 Un défi pour les gestionnaires de réseaux.....	19
I.10 L'incertitude et la variabilité de la production éolienne et solaire .....	19
I.11 Répondre aux défis de l'intégration des énergies renouvelables aux réseaux électriques	20
I.12 Vers un réseau électrique plus intelligent .....	20
I.13 Conclusion .....	21

### Chapitre II : Définir le Micro-Réseau

II.1 Introduction .....	23
II.2. Historique du développement des smart grids.....	23
II.3. Définition du réseau Intelligent (Smart grid) .....	24
II.3.1. Smart metering ou compteurs intelligents.....	25
II.3.2. Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents.....	26
II.3.3. Les moteurs et accélérateurs de la mise en œuvre des réseaux électriques intelligents : .....	26
II.3.4. Les grands projets smart grids dans le monde .....	27
II.3.5. Risques, menaces et politique de sécurité.....	32
II.3.6. Types de réseaux intelligents .....	33
II.3.6.1 Au Niveau des gestionnaires de réseaux de transport (GRT) .....	33
II.3.6.2 Au niveau des gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) :.....	33
II.3.6.3 Au niveau local .....	33
II.4. Maison Intelligente « Smart home ».....	33
II.5. Micro-Réseaux « Micro grid » .....	34
II.5.1 Avantages et inconvénients des micro-réseaux .....	35
II.5.2 Configuration d'un micro-réseau .....	35
II.6. Ville Intelligente « Smart city » .....	36
II.6.1 Smart city en Algérie .....	37
II.7 Véhicules électriques « la partie mobile du réseau intelligent » .....	39
II.8 Conclusion .....	40

### Chapitre III : Ecoulement De Puissance Et Outil de Simulation

III.1. Introduction .....	42
III.2. But de l'étude de l'écoulement de puissance .....	42
III.3. Principe de l'écoulement de puissance.....	43
III.3.1 Classification des jeux de barres .....	43

## Table des matières

---

III.4. Equations d'écoulement de puissance .....	45
III.4.1. La matrice d'admittance .....	45
III.4.1.1. Formulation des équations de tension .....	47
III.4.1.2. Formulation des équations d'écoulement de puissance .....	47
III.4.1.3 Formulation de l'équation des pertes en puissance active .....	48
III.4.1.4. Formulation de l'équation des pertes en puissance réactive .....	48
III.4.2. Les méthodes utilisées pour le calcul de l'écoulement de puissance .....	49
III.4.2.1. Méthode de Newton-Raphson.....	49
III.5. Historique de logiciel de Power World Simulator .....	50
III.5.1. Vue d'ensemble.....	51
III.5.2. Modes de fonctionnement .....	51
III.6. Conclusion.....	52

### Chapitre IV: Simulations Et Résultats

IV.1 Introduction .....	54
IV.2 Première application : Présentation de réseau de 5 nœuds .....	54
IV.3. Calcul de l'écoulement de puissance pour le Micro réseau à 5 nœuds.....	55
IV.3.1 Connecté au réseau Principal (On Grid).....	55
IV.3.1.1 Discussion des résultats .....	57
IV.3.2 Déconnecté du réseau Principal (Off Grid) .....	58
IV.3.2.1 Discussion des résultats .....	60
IV.3.3 Comparaison des deux cas .....	61
IV.4 Deuxième application : Exemple de micro-grid dans l'environnement MATLAB Simulink .....	61
IV.4 .1 Description .....	62
IV.4 .2 Discussion des résultats.....	63
IV.5 Conclusion .....	67
Conclusion Générale .....	69
Références.....	72

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure (I.1) : Représentation verticale (sens unique) des réseaux électriques classique. ....	5
Figure (I.2) : Représentation horizontale (bidirectionnelle) des réseaux électriques actuels. ....	5
Figure (I.3): Capacités des énergies renouvelables dans le monde (hors hydroélectricité), fin 2015. ....	6
Figure (I.4) : Panneaux Solaire Photovoltaïque .....	7
Figure (I.5) : Les systèmes solaires thermiques .....	7
Figure (I.6) : Chaîne énergétique de la centrale éolienne.....	8
Figure (I.7): Eolienne à Axe Horizontal.....	8
Figure (I.8): Eolienne à Axe Vertical .....	8
Figure (I.9): Centrale hydroélectrique .....	9
Figure (I.10):Bilan de cycle biomasse.....	10
Figure (I.11):Centrale géothermique Enel (Italie).....	10
Figure (I.12):Schéma fonctionnel d'une Production décentralisée .....	13
Figure (I.13) : Sens de transit de puissance dans le réseau de distribution avant et après l'insertion des GED.....	15
Figure (I.14) : Exemple d'un creux de tension.....	16
Figure (I.15) : Exemple d'une fluctuation de tension.....	17
Figure (I.16) : Forme d'onde déformée par les harmoniques.....	17
Figure (I.17) : Court-circuit sur une ligne avec un générateur synchrone.....	18
Figure (I.18):Impact de DEG sur la sélectivité du défaut.....	18

### Chapitre II

Figure (II.1): un compteur communicant ' Linky ' .....	25
Figure (II.2): Projets Smart grid du Ministère du Japon début 2010.....	27
Figure (II.3) : Répartition de la production d'électricité par source d'énergie au Japon .....	28
Figure (II.4) : Les projets Smart grid en Inde .....	30
Figure (II.5) : Valeur totale des projets financés par U.S. Smart grid.....	31
Figure (II.6): Les projets Smart grid en Europe 2010 .....	32
Figure (II.7): La Maison intelligente ou ' Smart Home ' .....	34
Figure (II.8): Micro réseaux ou ' Microgrid ' .....	34
Figure (II.9): Configuration typique d'un micro-réseau autonome.....	36
Figure (II.10): La ville intelligente ou ' Smart city ' .....	37
Figure (II.11): Plan de Tipasa la ville intelligente .....	38
Figure (II.12) : Schéma du concept Vehicle-to-Grid (V2G) .....	40

### Chapitre III

Figure (III.1) : Exemple d'un Réseau électrique avec trois nœuds. ....	45
Figure (III.2): Exemple d'un réseau bouclé à 4 nœuds .....	45

### Chapitre IV

Figure (IV.1):Architecture du réseau étudié .....	55
Figure (IV.2) : Micro réseau connecté au Réseau principal .....	55

## Liste des figures

---

Figure (IV.3) : Le profil de tension au niveau de chaque nœud.....	57
Figure (IV.4) : Micro réseau déconnecté du réseau principal .....	58
Figure (IV.5) : Le profil de tension au niveau de chaque nœud.....	59
Figure (IV.6) : Les puissances actives au niveau de chaque ligne pour les deux cas.....	60
Figure (IV.7) : Modèle simplifié de micro-réseau à petite échelle.....	62
Figure (IV.8) : La puissance Produite par les panneaux Solaire .....	63
Figure (IV.9) : La puissance secondaire.....	64
Figure (IV.10) : Puissance consommée par la charge .....	64
Figure (IV.11) : La puissance de batterie .....	65
Figure (IV.12) : Battery_SOC .....	66

**Liste des tableaux**

**Chapitre I**

Tableau (I.1) : Différents avantages et inconvénients des énergies renouvelables ..... 12

**Chapitre II**

Tableau (II.1) : Comparaison: Réseau intelligent et réseau conventionnel ..... 26  
Tableau (II.2) : Projets Smart grid sous le NSGM en Inde ..... 29  
Tableau (II.3) : Les projets financés par U.S. Smart grid ..... 31

**Chapitre III**

Tableau (III.1) : Propriétés des nœuds. .... 44

**Chapitre IV**

Tableau (IV.1) : Les paramètres des lignes ..... 55  
Tableau (IV.2) : Les résultats affichés par le logiciel Powerworld ..... 56  
Tableau (IV.3) : Tableau des tensions..... 56  
Tableau (IV.4) : Tableau des puissances transmises ..... 57  
Tableau (IV.5) : Les résultats affichés par le logiciel Power World ..... 58  
Tableau (IV.6) : Tableau des tensions..... 59  
Tableau (IV.7) : Tableau des puissances transmises ..... 59

### 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.
- **MATLAB**: MATrix LABoratory
- **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<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> 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 commencée 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 deçà de 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.

Il est à noter, que les EnR ont également leurs petits défauts. Leur coût d'investissement est relativement important, aussi sujettes de la nature. En effet, des journées sans vent ou sans grande luminosité peuvent contrarier fortement la production de l'éolien et du solaire. En plus, le rendement des énergies renouvelables reste toujours faible, à cause de son utilisation dans les endroits isolés ou décentralisés.

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.

La réunion des actions précédentes permettent de concevoir le réseau intelligent, qui est un réseau capable de s'adapter et faciliter l'intégration des EnR sans contraintes, un réseau qui dispose les moyens de communication entre les différents intervenants, qui gère et contrôle l'ensemble des dispositifs. [1]

## Introduction générale

---

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

- ❖ Le premier chapitre donnera une vision globale sur les énergies renouvelables et les problèmes liés à l'intégration de ces énergies renouvelables dans les réseaux électriques.
- ❖ Le deuxième chapitre définira le micro réseau, en plus de ses fonctionnalités très utiles pour les consommateurs comme autoproduction (consommateur), Smart meeting et sa contribution à la protection de l'environnement par la diminution de l'émission de CO<sub>2</sub> puis passer à l'utilisation des voitures électriques (V2G).
- ❖ 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.
- ❖ Dans Le quatrième chapitre, deux exemples de simulation sont présentés le premier c'est un micro réseau de 5 nœuds simulé dans deux cas ongrid et offgrid l'aide de logiciel Power World version 21, le deuxième exemple c'est un micro réseau pour une cité avec 3 maisons et source PV et batterie de stockage qui alimente ces charges.
- ❖ 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

**I.1.Introduction :**

La tendance vers la dérégulation devient de plus en plus répandue dans le monde, notamment dans les pays développés. D'ailleurs, la préoccupation accordée à l'aspect environnemental et au développement durable à encouragé les producteurs à développer la production d'électricité sur la base des énergies nouvelles et renouvelables et des solutions de haut rendement énergétique. [2]

Ces évolutions sont les deux facteurs essentiels qui favorisent l'introduction des nombreux producteurs de taille petite ou grande aux réseaux électriques aux niveaux de tension inférieure au cours de ces dernières années. [3]

Ce nouveau phénomène peut être positif et négatif à la fois. D'une part, l'insertion des GED (Génération D'Énergie Dispersée) est présentée comme un facteur de renforcement des moyens de production du système. D'autre part, elles apportent également des impacts négatifs à échelle du système en le fragilisant notamment dans les situations critiques.

Traditionnellement, le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production au réseau.

Le raccordement de production aux réseaux de transport apporte des intérêts économiques et énergétiques, mais il sera pénalisé sur le plan de l'exploitation du système.

Dans ce chapitre, nous allons citer les différentes énergies renouvelables, définir la production décentralisée et nous terminerons ce chapitre, en abordant les impacts de l'insertion des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique.

**I.2 Structure classique d'un réseau électrique :**

Le réseau électrique a pour rôle d'acheminer l'électricité depuis les centres de production (centrales nucléaires, thermiques et renouvelables) vers les centres de consommation (industriels, collectivités, résidentiels) et d'assurer à tout moment l'équilibre entre la production et la consommation.

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).

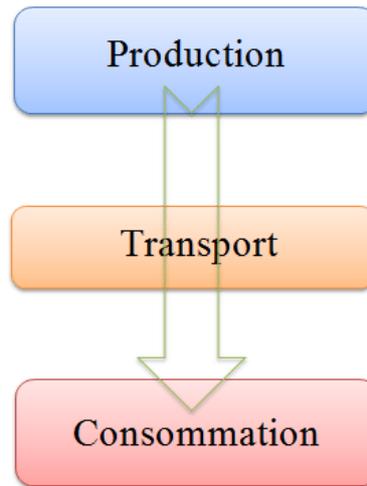


Figure (I.1) : Représentation verticale (sens unique) des réseaux électriques classique.

### I.3 Structure d'un réseau électrique actuel:

Les réseaux électriques actuels sont confrontés au développement de nouveaux moyens de production et à une évolution des usages. On peut citer en particulier le développement des moyens de production d'électricité issue d'énergies renouvelables, souvent décentralisés, et dont la production est variable au cours du temps, les consommations liées aux équipements électroniques (usages spécifiques de l'électricité) ou encore l'insertion des véhicules électriques sur le réseau.

La figure (I.2) présente quelques changements significatifs dans la structure actuelle du réseau électrique par rapport à celle classique. Les réseaux électriques actuels permettent le transfert de l'énergie dans les deux sens, afin de donner l'occasion d'intégration à d'autres sources parmi lesquelles les sources d'énergies de type renouvelable. [4] [5]

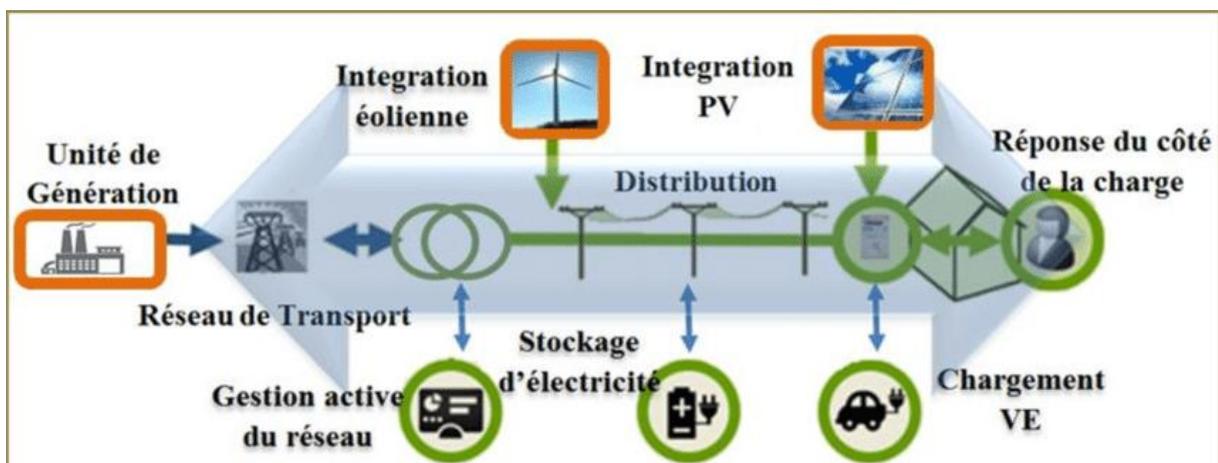


Figure (I.2) : Représentation horizontale (bidirectionnelle) des réseaux électriques actuels.

### I.4 Capacités des énergies renouvelables dans le monde :

La capacité électrique renouvelable installée annuellement, dépasse la nouvelle capacité électrique (nette) tous combustibles fossiles confondus. Il est estimé qu'à la fin de 2015, la capacité de production électrique renouvelable installée permettait d'assurer 23,7 % de la production électrique mondiale (3,7% éolien, 2% biomasse, 1,2% solaire photovoltaïque, 0,4 % géothermique et solaire thermodynamique). L'hydroélectricité assurant 16,6 % de la production renouvelables, la Figure (I.3) représente les capacités des énergies renouvelables dans le monde, l'Europe, les pays BRICS (le Brésil, la Fédération de Russie, l'Inde, la Chine et l'Afrique du Sud) et les sept premiers pays (hors l'hydroélectricité) à la fin de 2015.[6]

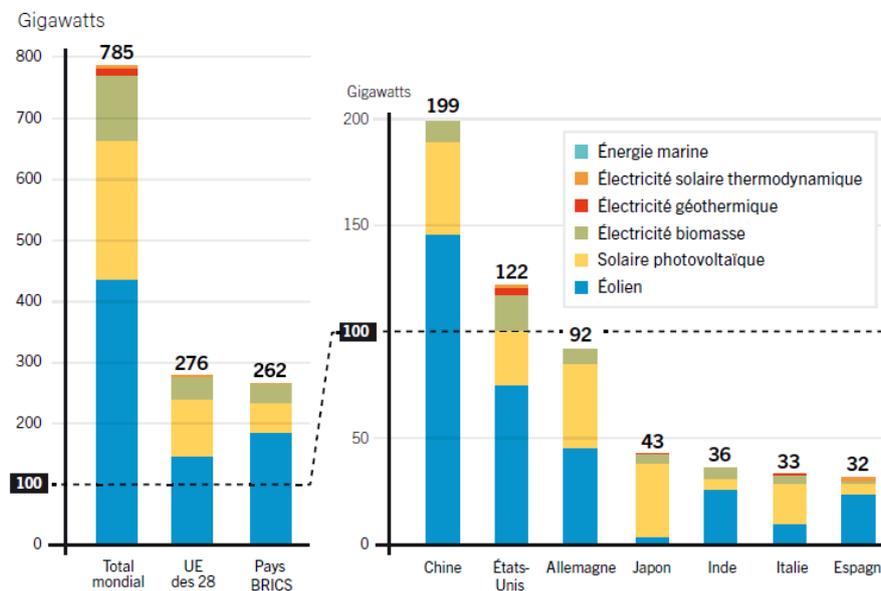


Figure (I.3): Capacités des énergies renouvelables dans le monde (hors hydroélectricité), fin 2015[6].

### I.5 Les Grandes Familles des énergies Renouvelables :

#### I.5.1 L'énergie solaire

On appelle énergie solaire, l'énergie que l'on peut tirer du rayonnement Soleil. Ce dernier est utilisé selon plusieurs procédés :

**L'énergie solaire thermique** : qui consiste à convertir les rayonnements solaires à partir des panneaux solaires à une énergie thermique ou nous pouvons produire l'électricité avec la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

*L'énergie solaire photovoltaïque* qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. Au niveau des sites isolés ou non raccordés au réseau conventionnel, nous pouvons ainsi assurer :

- L'électrification rurale et le pompage de l'eau (50%),
- Les télécommunications et la signalisation (40%),
- Les applications domestiques (10%).

L'Energie solaire passive est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage. [7]



**Figure (I.4) : Panneaux Solaire Photovoltaïque**



**Figure (I.5) : Les systèmes solaires thermiques**

### I.5.2 L'énergie éolienne :

L'Énergie éolienne qui consiste à transformer la force de vent exercée sur les pales par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice à une énergie électrique.

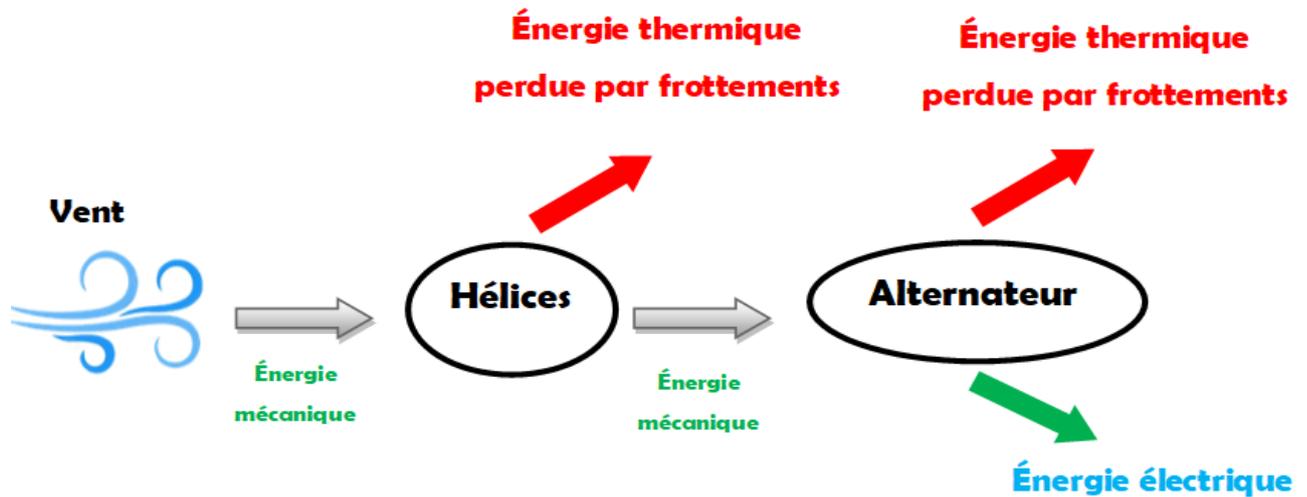


Figure (I. 6) : Chaîne énergétique de la centrale éolienne

Il existe deux types d'éoliennes :

- Faible puissance : pour alimenter en électricité une maison, ou une installation comme le pompage d'eau.
- Grande puissance : pour une production d'électricité pouvant atteindre 2500 à 6000 KWh, et pouvant être rattachée à un réseau de distribution. [7]

Il existe deux technologies d'éoliennes :



Figure (I.7): Eolienne à Axe Horizontal



Figure (I.8): Eolienne à Axe Vertical

### I.5.3 L'énergie hydroélectrique :

Le principe consiste à utiliser l'énergie mécanique de l'eau pour faire tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité.

Cette forme d'énergie est essentiellement produite en contrebas des barrages hydrauliques et parfois à travers des cours d'eau et canaux artificiels à l'aide de microcentrales. La puissance produite dépend de la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. [7]

Il existe aussi de par le monde d'autres procédés de génération électrique à travers l'exploitation de l'eau comme l'utilisation des mouvements des vagues marines et des marées, ou des courants sous-marins et autres nouvelles techniques d'énergie de la mer comme l'énergie thermique des mers et l'énergie osmotique des mers. [7]

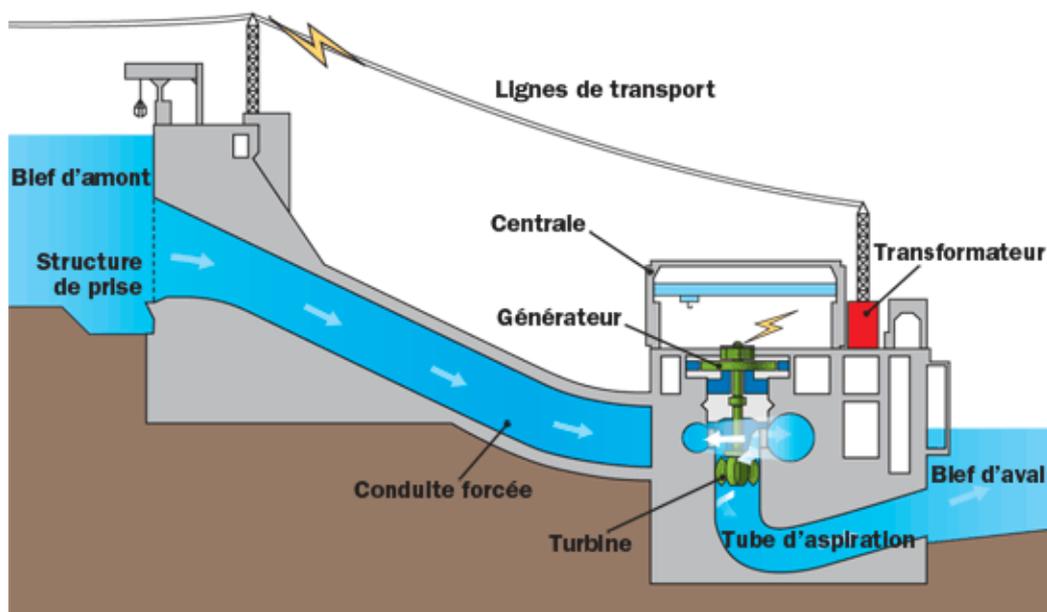


Figure (I.9): Centrale hydroélectrique

### I.5.4 L'énergie de la Biomasse :

La biomasse désigne toute matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface Terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois – énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au Monde.[8]

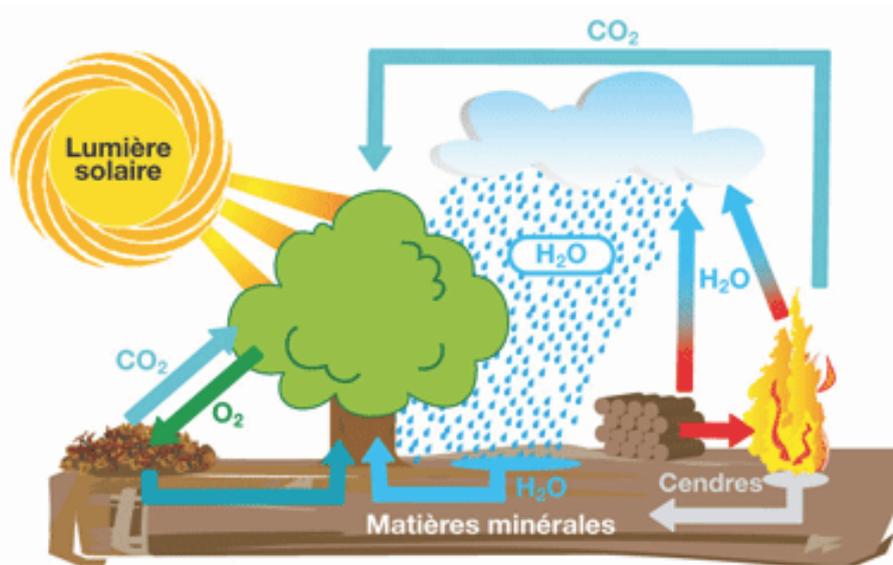


Figure (I.10): Bilan de cycle biomasse

### I.5.5 Energie géothermique

Le principe consiste à exploiter les anomalies de températures existant dans le sous-sol à travers l'utilisation des eaux thermales pour le chauffage, ou la production d'électricité dans des centrales géothermiques utilisant la vapeur d'eau qui sort en surface (geysers) ou extraite du sous-sol par des forages.

C'est une énergie très propre et peu coûteuse mais très localisée dans de rares régions où il existe des anomalies géothermiques.[7]



Figure (I.11): Centrale géothermique Enel (Italie)

**I.5.6 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables**

Les énergies	Avantages	Inconvénient
L'énergie Solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Une bonne source d'énergie renouvelable.</li> <li>-Peut de soutiens et durent long temps.</li> <li>-Une énergie non-polluante.</li> <li>-La lumière ne coute rien.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Il n'y a pas de lumière la nuit.</li> <li>-A besoin de beaucoup d'espace.</li> <li>-Le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux.</li> <li>- Panneau fragile.</li> </ul>
L'énergie Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Une énergie naturelle non-polluante.</li> <li>-L'eau est autour du monde entier.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Une perturbation de l'équilibre écologique.</li> <li>-Grand barrage couteux</li> </ul>
L'énergie Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Il y a toujours du vent dans un même endroit, donc jour et nuit.</li> <li>-Tout le mécanisme est dans l'éolienne donc pas de grandes usines.</li> <li>-Une énergie renouvelable donc non-polluante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un impact visuel.</li> <li>-Le prix.</li> <li>-La migration des oiseaux</li> </ul>
L'énergie Géothermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pollution non-toxique</li> <li>-Beaucoup d'énergie pour peu de place</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Répartitions des sources.</li> <li>-Le transport de l'énergie des usines.</li> <li>-Installation couteuse</li> </ul>

<p>La biomasse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être Produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.</li> <li>-Biodégradable rapidement</li> <li>-Produits issus de la biomasse ont souvent non-toxiques.</li> <li>-Elle dégage autant de CO2 qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO2 lors de la photosynthèse)</li> <li>-La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables</li> <li>-La biomasse est disponible partout</li> <li>La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Leur rendement énergétique est assez faible.</li> <li>-Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.</li> <li>-Dégage du CO2</li> <li>-Une surexploitation de la biomasse peut entrainer une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.</li> <li>-Provoque la pollution des eaux et des sols</li> <li>-Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.</li> </ul>
---------------------	---	---

**Tableau (I.1) : Différents avantages et inconvénients des énergies renouvelables [9]**

**I.6 Production électrique décentralisée :**

Les GED (Générateurs d'Énergie Dispersion) sont des sources de productions intermittentes (éolien, photovoltaïque entre autres) ou non (centrale thermique, groupe diesel entre autres) qui sont connectées au réseau de distribution. Leur puissance installée doit être inférieure à 12 MW au point de livraison lorsque l'installation est raccordée dans une zone qui n'est pas interconnectée avec le réseau métropolitain (exemple départements et territoires d'outre mer, entre autres) et inférieure à 17 MW sinon. Les parcs de production, éoliens par exemple, de plus grande puissance sont généralement connectés directement au réseau de transport ou tronçonnés en lots plus petits [10]

La production décentralisée se différencie de la production centralisée par les caractéristiques suivantes :

**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.[11]

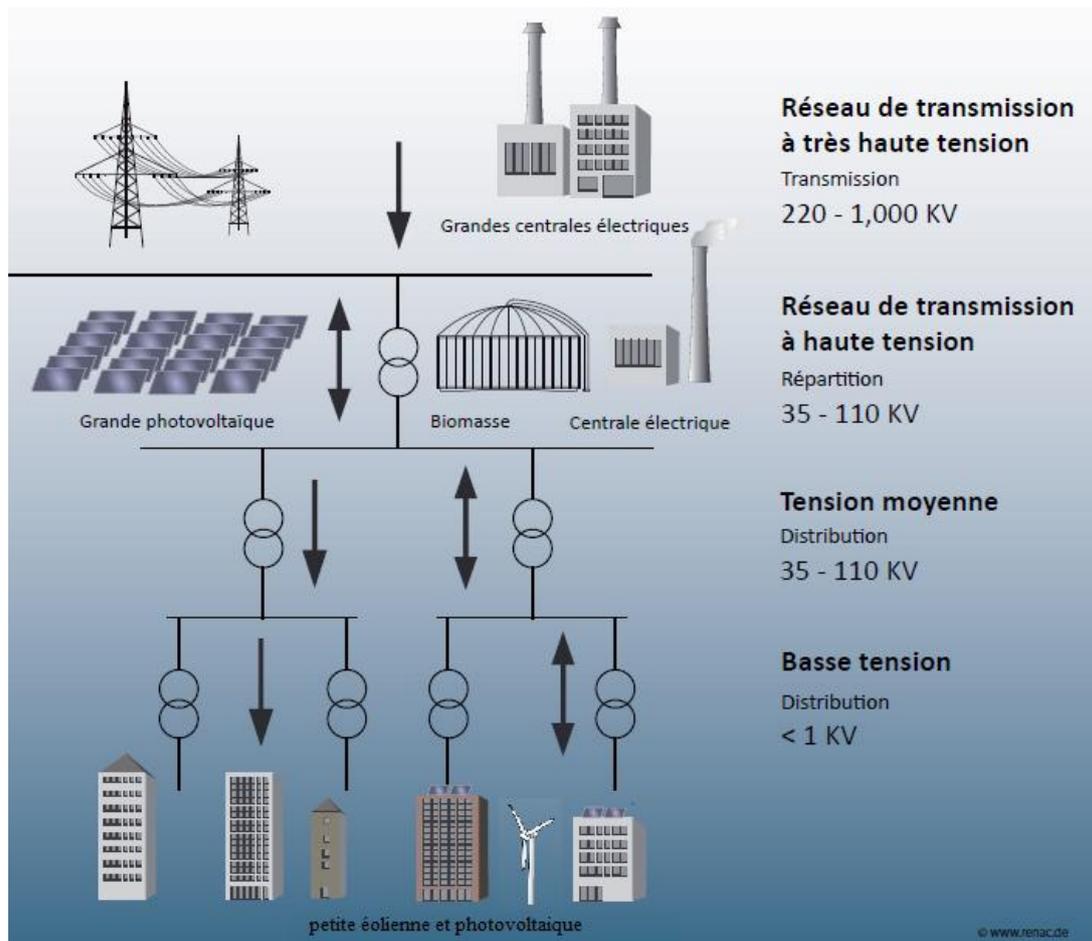


Figure (I.12):Schéma fonctionnel d'une Production décentralisée

## **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**

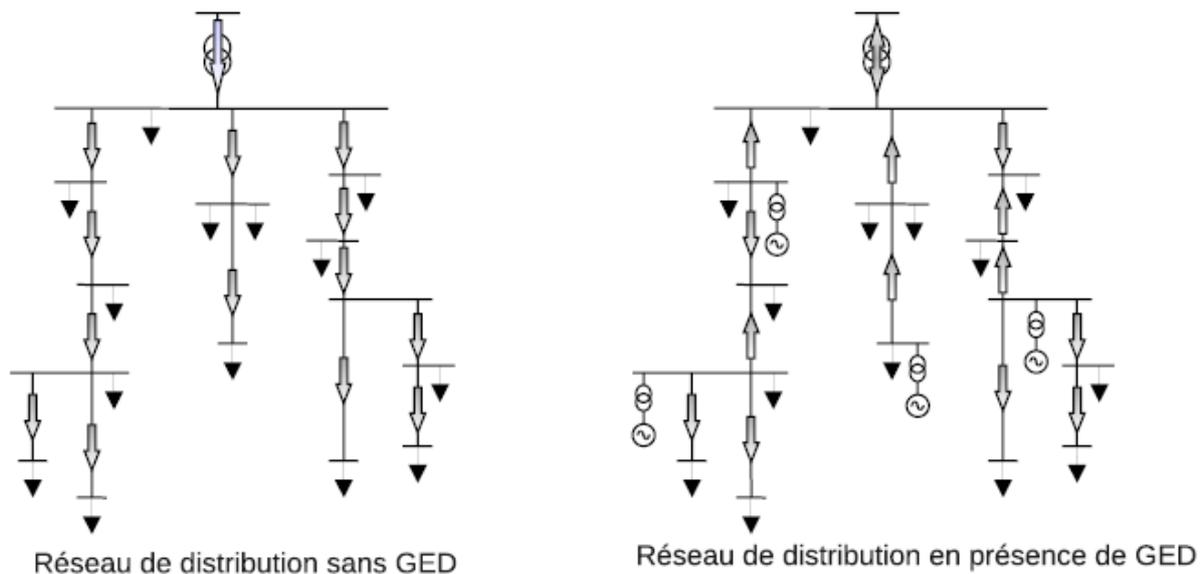
La production électrique consommée sur place par les appareils en cours de fonctionnement (appelée autoconsommation) n'est pas comptabilisée par le compteur de production, mais vient réduire le décompte de la consommation. Seul le surplus de la production par rapport aux consommations instantanées est vendu.[12]

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

### **I.8.1 Impact sur le sens de transit de puissance**

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des PD 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.

Sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de PD augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales.[13]



**Figure (I.13) : Sens de transit de puissance dans le réseau de distribution avant et après l'insertion des GED**

### I.8.2 Impact sur la stabilité du système :

La régulation des réseaux électriques est l'ensemble des moyens mis en œuvre afin de maintenir les grandeurs de fréquences et de tension proches de leurs valeurs nominales sur l'ensemble du réseau.

La stabilité des réseaux électriques est une qualité de cette régulation par laquelle les situations modérément perturbées reviennent progressivement à un état d'équilibre.

Une instabilité généralisée du réseau peut conduire à des dégâts matériels et/ou à la mise hors tension d'une partie ou de l'ensemble du réseau.

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 laquelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération [14]

### I.8.3 Impact sur la qualité du système

L'effet de l'intégration de la GED sur la qualité de l'énergie concerne trois aspects majeurs :

- Les creux et l'élévation de la tension.
- Flicker.
- Les harmoniques.

### I.8.3.1 Les creux et l'élévation de la tension :

La production décentralisée peut affecter la qualité de la tension d'alimentation de plusieurs façons. En connectant la GED à une ligne de distribution légèrement chargée, le flux de puissance peut être inversé et la tension au point de connexion commence à augmenter, cela signifie que la tension d'alimentation des clients connectés à proximité des unités GED commence à augmenter aussi. Cette augmentation de tension a un effet stationnaire et dépend fortement du rapport  $X/R$ , de la charge et de la puissance injectée par la GED. Cependant, la GED peut également avoir un effet transitoire sur le niveau de tension. [15]

Une variation rapide du courant d'une unité GED cause une augmentation ou diminution soudaine du courant de la ligne et donc un effet sur la tension de cette dernière. Par exemple, lorsque le vent commence à souffler, la production d'éoliennes augmente rapidement jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur nominale. La variation rapide de la sortie d'éolienne change le flux de la puissance dans la ligne et peut occasionner un transitoire de la tension, une variation brusque de la puissance également se produise dépasse une certaine limite supérieure, à ce stade l'éolienne se déconnecte afin de se protéger contre les surcharges et les forces mécaniques fortes. Cette déconnexion peut provoquer une augmentation du courant et par conséquent une chute de la tension d'alimentation. [15]

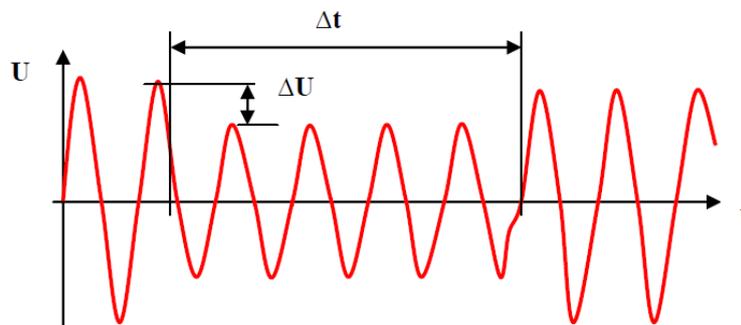
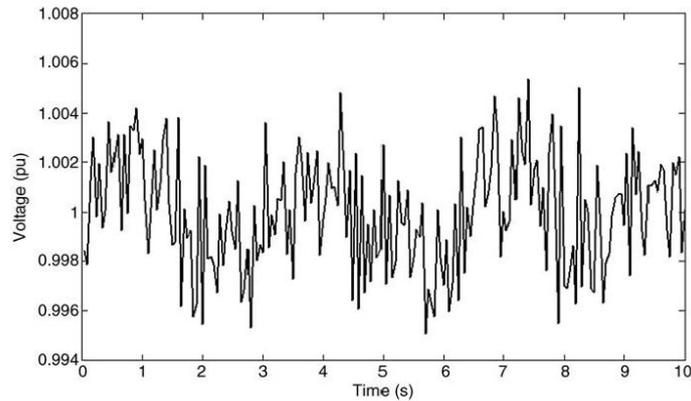


Figure (I.14) : Exemple d'un creux de tension

### I.8.3.2 Flicker :

Le terme flicker désigne les variations de tension de courte durée apparaissant dans le réseau électrique et risquant de provoquer le scintillement des ampoules électriques à incandescence.

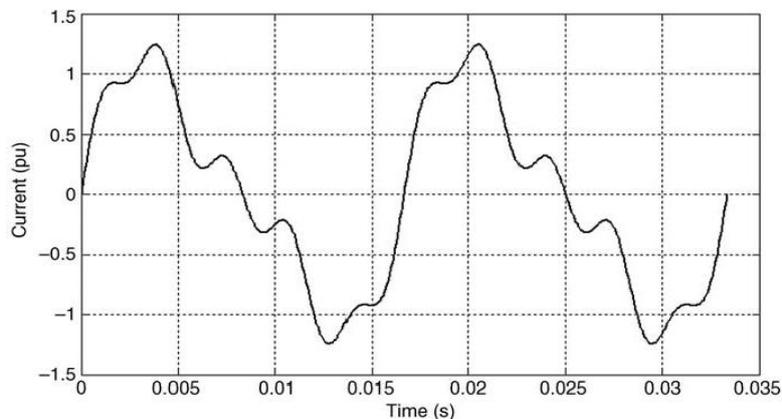
Ce phénomène peut surgir si l'unité de production d'énergie renouvelable est raccordée à un réseau ayant une faible puissance de court-circuit, les variations fréquentes de son énergie primaire causant alors des variations importantes de puissance. Ce phénomène est surtout observé pour les éoliennes à vitesse constante, car il n'existe pas de tampon entre l'énergie mécanique en entrée et l'énergie électrique injectée au réseau. [16]



**Figure (I.15) : Exemple d'une fluctuation de tension**

### I.8.3.3 Les harmoniques :

Les harmoniques de tension et de courant sont toujours présents dans un réseau de distribution. Ils sont essentiellement provoqués par la présence de charges non linéaires et de convertisseurs de puissance. Ces harmoniques provoquent une surchauffe de l'équipement, un fonctionnement défectueux du système de protection, et des interférences dans les circuits de communication. Les dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour optimiser la puissance extraite des unités de production d'énergie renouvelable (éoliennes à vitesse variables et panneaux photovoltaïques) présentent l'inconvénient d'être des sources d'harmoniques. [16]



**Figure (I.16) : Forme d'onde déformée par les harmoniques**

### I.8.4 Impact sur le plan de la protection :

La protection du réseau de distribution consiste normalement en un simple schéma de protection contre les surintensités, car il n'y a qu'une seule source d'alimentation et le flux de puissance est défini. La connexion de GED au réseau de distribution conduit à de multiples sources du courant de défaut qui peuvent affecter la détection des perturbations. [16]

**I.8.4.1 Courant de court-circuit**

L'impact sur le courant de court-circuit est surtout dû aux fermes éoliennes qui suivant la technologie peuvent, en cas de défaut sur le réseau, alimenter et donc accroître le courant de court-circuit circulant dans le réseau. La contrainte ici est de ne dépasser ni les valeurs maximales admissibles pour les différents appareillages de réseaux et les conducteurs ni le pouvoir de coupure des organes de protection. Chaque appareil de coupure possède un pouvoir de fermeture et un pouvoir de coupure sur défaut, un dépassement des valeurs de dimensionnement de l'appareil de coupure a pour conséquence un risque de non-coupure de l'arc ou de non-fermeture du courant de défaut avec un fort risque de destruction de l'appareillage. [16]

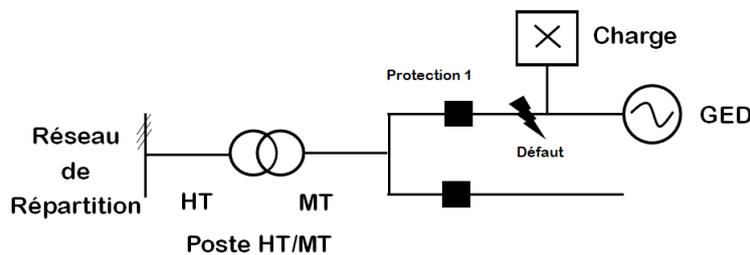


Figure (I.17) : Court-circuit sur une ligne avec un générateur synchrone

**I.8.4.2 Influence sur la sélectivité des protections**

La sélectivité des protections peut être affectée par l'introduction d'unités de production décentralisée dans le réseau de distribution dont la structure est de type radial. Pour illustrer cette influence, considérons le schéma de la figure 11 ci-après d'alimentation par une sous-station du réseau d'une charge par la liaison 2, et la connexion à la sous-station par la liaison 1 d'une unité de production décentralisée. Ces deux liaisons sont chacune protégées par un disjoncteur contre les surintensités comme c'est l'usage. [16]

Dans cet exemple, la protection de la ligne 1 déconnecte inutilement l'unité de production lors d'un défaut sur la ligne 2, car le courant du générateur lors de ce défaut est supérieur au seuil de protection en cas de défaut sur la ligne 2. Les seuils de protection doivent donc être revus pour que seule la ligne en défaut soit déconnectée. [15]

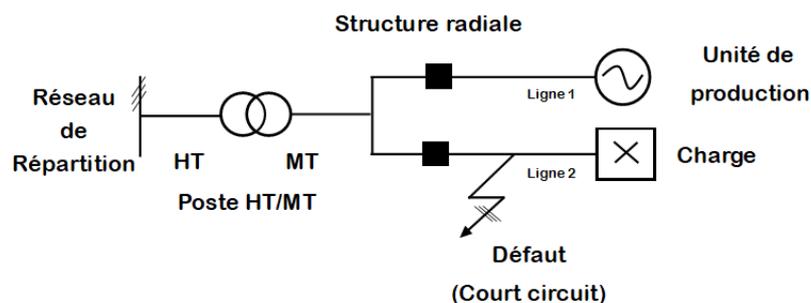


Figure (I.18):Impact de GED sur la sélectivité du défaut

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

### **I.9 Un défi pour les gestionnaires de réseaux**

L'insertion massive des énergies renouvelables (EnR) sur les réseaux électriques pose des problèmes d'ordre technique, notamment pour les gestionnaires de réseaux. Le premier concerne la localisation des installations de production. L'intégration de la production décentralisée conduit à un fonctionnement bidirectionnel des réseaux traditionnellement conçus pour n'acheminer l'énergie que dans un sens, faisant émerger des besoins de renforcement. La seconde relève de la gestion des moyens de production intermittents dans le système électrique. Pour des taux de pénétration inférieurs à 30 %, l'impact de la production intermittente reste limité et peut être pris en charge par le système électrique. En revanche, lorsque le taux de pénétration augmente, des déséquilibres peuvent survenir. [17]

### **I.10 L'incertitude et la variabilité de la production éolienne et solaire**

L'incertitude et la variabilité de la production en particulier l'énergie éolienne et solaire peuvent constituer des défis pour les opérateurs du réseau. La variabilité dans les sources de production peut nécessiter des actions supplémentaires pour équilibrer le système. Une plus grande souplesse dans le système peut être nécessaire pour tenir compte de la variabilité du côté de l'offre et de la relation avec les niveaux de génération et les charges. Parfois, la production éolienne augmente à mesure que la charge augmente, mais dans les cas où la production renouvelable augmente lorsque les niveaux de charge tombent (ou vice versa), des actions supplémentaires pour équilibrer le système sont nécessaires. Les opérateurs du système doivent s'assurer qu'ils disposent de ressources suffisantes pour accueillir des rampes importantes vers le haut ou vers le bas dans la production éolienne pour maintenir l'équilibre du système. [17]

Un autre défi se produit lorsque la génération éolienne ou solaire est disponible pendant les faibles niveaux de charge; dans certains cas, les générateurs conventionnels devront peut-être réduire leurs niveaux de génération minimum. [17]

## **I.11 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. [18]

## **I.12 Vers un réseau électrique plus intelligent**

L'évolution recherchée du système intelligent se caractérise par une multitude de composants imbriqués de la production à la consommation. Ce système ne serait plus unidirectionnel et lié à des opérateurs agissant uniquement sur la production et le réseau de transport mais serait assimilable à une véritable toile d'araignée. Les réseaux intelligents combineront à la fois un réseau d'électricité et un réseau de télécommunication, dans lesquels tous les acteurs seront liés et où les flux à la fois d'énergie mais également d'information seront bidirectionnels. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) constituent la pierre angulaire des Smart Grids. Elles devront être implémentées dans la production, le transport et la distribution d'électricité mais également chez les consommateurs. [12]

Afin de faciliter l'intégration des EnR dans le système électrique, les réseaux devront être gérés de manière plus réactive, grâce aux NTIC. Ces technologies regroupent de nombreux outils et systèmes pour la gestion des réseaux (comptage communicant, stockage de l'électricité, modèles de marché, charges contrôlables, etc.). Les nouvelles technologies de l'information et de la communication interviendront également afin d'optimiser les flux d'énergie et, notamment, d'assurer l'équilibre « offre/demande ». En développant l'observabilité, la prévisibilité, le pilotage et la flexibilité, les Smart grids permettront de mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables. [12]

### **I.13 Conclusion**

L'intégration importante des énergies renouvelables dans les systèmes électriques entraîne la mutation de ces derniers d'une structure verticale vers une structure horizontale avec des injections de puissances à tous les niveaux de tension, notamment dans les réseaux de distribution. L'arrivée des énergies renouvelables pose aux gestionnaires de réseaux de nouveaux défis techniques notamment à cause de la variabilité de la production et aussi de leurs faibles capacités à fournir les services systèmes. En vue de leurs effets sur le système électrique, leur raccordement fait l'objet d'études afin de vérifier si elles respectent les conditions techniques des différents gestionnaires de réseaux.

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

# Chapitre II

Définir le Micro-Réseau

## II.1 Introduction :

En raison de plusieurs problèmes que rencontrent les réseaux électriques actuels (l'augmentation de la consommation, la raréfaction du pétrole, le réchauffement climatique ainsi que la pollution environnementale, la faible efficacité énergétique, etc), une nouvelle tendance de la production a été développée, appelée la production décentralisée. Cette production utilise des sources d'énergie renouvelable (non conventionnelle) comme le biogaz, les cellules photovoltaïques, les fermes éoliennes ... qui sont considérées comme des énergies propres, c'est à dire que l'émission de CO<sub>2</sub> de ces moyens de production est quasiment nulle.

Malheureusement, l'utilisation de la production décentralisée peut amener autant de problèmes qu'elle peut en résoudre. Une meilleure façon d'utiliser le potentiel énergétique de la production distribuée est d'adopter une approche permettant le contrôle local des générateurs, mais aussi des consommateurs dans un sous-réseau. Ces sous-réseaux peuvent être dénommés micro-réseau ou microgrid.

Fondamentalement, un micro-réseau est défini comme étant une partie d'un réseau électrique intelligent ou smart grid. Ce micro-réseau inclue des consommateurs, de micro-sources à base d'énergie renouvelable ainsi que des systèmes de stockage locaux. Ils peuvent être exploités en étant connectés ou sans aucun apport par d'autres réseaux. Le développement de micro-réseaux est très prometteur pour l'industrie de l'énergie électrique en raison de plusieurs avantages tels que la réduction du réchauffement climatique et de la pollution environnementale, l'amélioration de la fiabilité, de la qualité et de la puissance, la réduction des pertes et par conséquent l'augmentation du rendement...[19]

Dans le présent chapitre, nous verrons un aperçu général sur les Smartgrid en particulier les microgrids, leur composants, ces avantages et inconvénients et les technologies inclus comme le Smart metering , les véhicules électrique V2G ...ect

## 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. [20]

Le protocole de Kyoto élaboré en 1996, en imposant des limites aux émissions de CO<sub>2</sub>, 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. Définition du réseau Intelligent (Smart grid)

Un réseau électrique intelligent est un réseau électrique capable d'intégrer au meilleur coût les comportements et les actions de tous les utilisateurs qui y sont reliés : producteurs, consommateurs ainsi que ceux qui sont les deux à la fois, l'objectif est d'assurer au système électrique d'être durable et rentable, avec des pertes faibles et avec des niveaux élevés de sécurité, de fiabilité et de qualité de fourniture.[21]

Le réseau électrique intelligent offre à tous les consommateurs la possibilité d'obtenir des informations précises sur leurs usages électriques. Cela permet au consommateur de mieux connaître et piloter sa propre consommation, son éventuelle autoproduction et d'améliorer son efficacité énergétique en liaison avec le réseau et ses opérateurs.[22]

### II.3.1. Smart meeting ou compteurs intelligents :

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.[23]



Figure (II.1): un compteur communicant ' Linky '

### II.3.2. Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents

Les principales différences entre un réseau électrique intelligent et un réseau électrique classique sont présentées dans le Tableau (II.1)

Réseau traditionnel	Smart Grid
Electromécanique, état solide	Digitale/Microprocesseur
Une seule direction et communication localisée.	Bidirectionnel, réseau de communication étendue.
Génération centralisée.	Adopte une génération distribuée et mixte (décentralisée).
Protection, surveillance et contrôle limités.	WAMPAC, protection adaptative plus fiable.
Surveillance manuelle et localisée.	Surveillance autonome, et à distance (utilisation du système SCADA)
Restauration manuelle lente.	Automatique, et Self-Healing
Vérification manuelle des équipements.	Surveillance des équipements à distance.
Systèmes de contrôle des défauts limités (quelques détecteurs).	Pénétration des systèmes de contrôle de défauts (détections à grande échelle du réseau électrique)
Fiabilité estimée.	Fiabilité prédictive du réseau, plus efficacement améliorée
Besoin en réserve très limité	Permet la réponse de la charge (DR), et la Gestion du cote charge DSM.

Tableau (II.1) : Comparaison: Réseau intelligent et réseau conventionnel [21]

### II.3.3. Les moteurs et accélérateurs de la mise en œuvre des réseaux électriques intelligents :

#### *Moteurs :*

- Ajouter de la stabilité aux réseaux électriques existants pour intégrer les nouvelles énergies et les nouvelles utilisations finales des énergies.
- Augmenter la puissance électrique disponible et l'efficacité énergétique des réseaux pour couvrir les nouveaux besoins tels que le véhicule électrique.
- Diminuer l'émission de CO<sub>2</sub> pour toutes les composantes de l'économie conventionnelle par l'intégration des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans les usages finaux.

**Accélérateurs :**

- Mobiliser les technologies de l'énergie et du numérique déjà existantes, tout en promouvant l'innovation, pour donner un élan de relance économique après une crise financière, économique et industrielle sans précédent.
- Renforcer l'implication des Pouvoirs publics sur des impulsions structurelles pour faire évoluer le cadre réglementaire et fiscal national et européen.
- Accroître le rôle actif du consommateur (consommateur) dans sa propre gestion de performance énergétique par une acceptation sociétale largement partagée. [24]

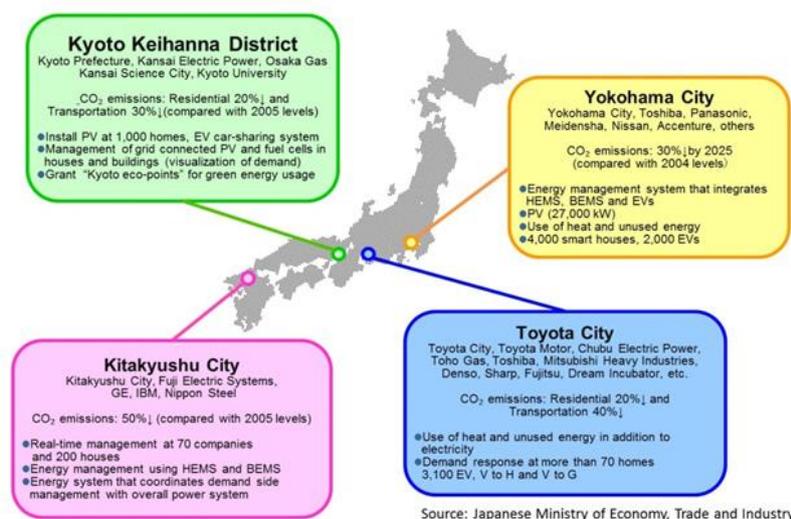
**II.3.4. Les grands projets smart grids dans le monde :**

La plupart des projets smart grids sont encore au stade de démonstration ou projets pilotes, mais depuis un ou deux ans, des projets de taille et des budgets significatifs (supérieurs à 100 millions de dollars) voient le jour.

En compte actuellement près de 90 projets et démonstrateurs de réseaux intelligents en cours dans le monde. On fait un tour d'horizon de dix projets parmi les plus importants :

❖ **JAPON : Projets du Ministère du Japon, 786 \$M, début 2010 :**

Le Ministère de l'économie et de l'industrie japonaise a lancé quatre projets smart grids à grande échelle : Yokohama City, Toyota City, Kyoto Keihanna District et Kitakyushu City. Ces projets étudient des systèmes de gestion, via des compteurs intelligents, de l'énergie consommée par les maisons et les bâtiments, et incluent l'intégration des véhicules électriques, des panneaux photovoltaïques et des batteries.



**Figure (II.2): Projets Smart grid du Ministère du Japon début 2010 [27]**

En 2011, l'accident de Fukushima, puis l'arrêt des 54 réacteurs nucléaires du pays et la faible diminution de la demande en électricité après cet événement (- 6 %) ont renforcé la situation de dépendance énergétique du Japon. Le pays a alors dû compenser la baisse de la production d'électricité nucléaire par l'importation d'hydrocarbures (la production d'origine nucléaire représentait 26 % de la production totale d'électricité en 2010). Ainsi, afin de sécuriser la production d'électricité, entre 2010 et 2013, la production d'électricité à partir de combustibles fossiles a augmenté de 28,4 %.

Les centrales à charbon et fioul fournissent désormais près de 90 % de l'électricité consommée.

Cette forte importation d'énergies d'origine fossile représente plus de 3 700 milliards de yens (26 milliards d'euros) chaque année et a par conséquent accru le déficit commercial du Japon (97 milliards d'euros en 2014, contre 24 milliards d'euros en 2011). Ces importations ont également un impact sur les factures d'électricité des ménages (+ 20 à 30 %) et des entreprises (+ 30 %), ce qui représente une hausse de 15 à 20 % depuis l'accident de Fukushima.[27]

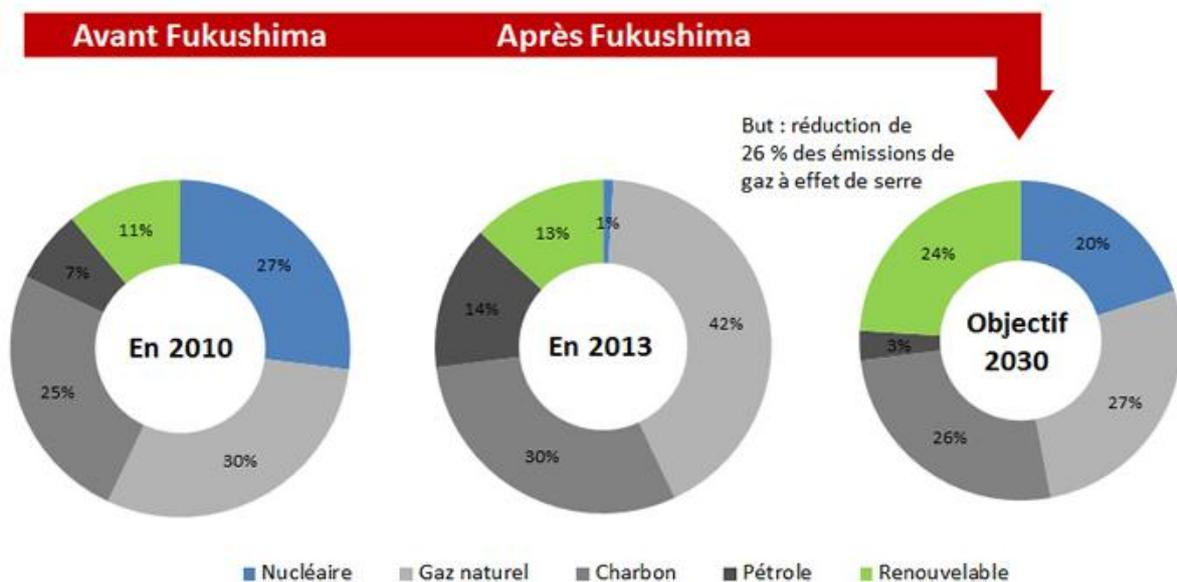


Figure (II.3) : Répartition de la production d'électricité par source d'énergie au japon

❖ *INDE : Projets Smart grid :*

Le ministère de l'Énergie (MoP) a annoncé des projets pilotes de réseaux intelligents, qui devaient être mis en œuvre par divers services publics de distribution appartenant à l'État en 2013. En juillet 2019, les 11 projets pilotes annoncés ont été déclarés comme étant soit mis en service, achevés ou exploités commercialement. Poursuivant l'engagement du gouvernement envers les plans de réseau intelligent de l'Inde dans le cadre de la National Smart Grid Mission (NSGM), qui a été créée en mars 2015, cinq projets pilotes de réseau intelligent ont été mis en œuvre avec un soutien financier aux services publics du gouvernement central et des subventions du NSGM.[30]

<b>Projets de réseaux intelligents sous le NSGM</b>				
<b>Projet</b>	<b>Fonctionnalités clés</b>	<b>Les clients</b>	<b>Date d'achèvement du projet</b>	<b>Statut</b>
<b>CED (chandigarh) Sous-division-5</b>	AMI,DTMU , SCADA	29 ,433	Encore décidé	Examen De Projet Tenu Au Chandigarh par Secrétaire spécial de l'UT le 26 juillet 2019
<b>CED, chandigarh (Ville complète excluant SD-5)</b>	AMI ,SCADA, DTMU	184,000	Encore décidé	Sanction acceptée par CED
<b>OPTCL,Odisha</b>	AMI ,SCADA, DTMU	87,000	Encore décidé	Les demandes de renseignements préalables aux soumissions ont été traitées. La date d'ouverture des soumissions a été reportée au 20 août 2019.
<b>KSEB, Kerala</b>	AMI, PLM, DTMU, EVCI, PV	90,000	Encore décidé	Lettre de sanction envoyée à KSEB le 28 septembre 2018
<b>JBVNL, Jharkhand</b>	AMI, DTMU	360,000	Encore décidé	Les soumissions ont été ouvertes le 5 juillet 2019. Évaluation technique en cours
<b>AMI RI:</b> Advanced Metering Infrastructure Residential/Industrial; <b>DT:</b> Distribution Transformer; <b>PLM:</b> Peak Load Management; <b>OMS:</b> Outage Management System; <b>PQ:</b> Power Quality; <b>POM:</b> Power Quality Monitoring; <b>DG:</b> Distributed Generation; <b>SCADA:</b> Supervisory Control and Data Acquisition; <b>DR:</b> Demand Response; <b>EV:</b> Electric Vehicles; <b>IT:</b> Information Technology; <b>HEMS:</b> Home Energy Management System; <b>HAS:</b> Home Automation System; <b>PV:</b> Photovoltaic; <b>DTMU:</b> Distribution Transformer Monitoring Unit.				

**Tableau (II.2) : Projets Smart grid sous le NSGM en Inde [30]**

Il y a actuellement cinq projets NSGM en cours de mise en œuvre sur quatre sites - deux à Chandigarh, Kochi au Kerala, Ranchi à Jharkhand et Rourkela à Odisha. Ces projets impliquent un investissement global de 6,86 milliards de roupies, dont 30% sont financés par le gouvernement. Ces projets concernent environ 750 000 consommateurs. Des offres sont attribuées pour divers composants du projet tels que l'AMI, le SCADA, la production distribuée, la réponse à la demande et les véhicules électriques (VE). [30]

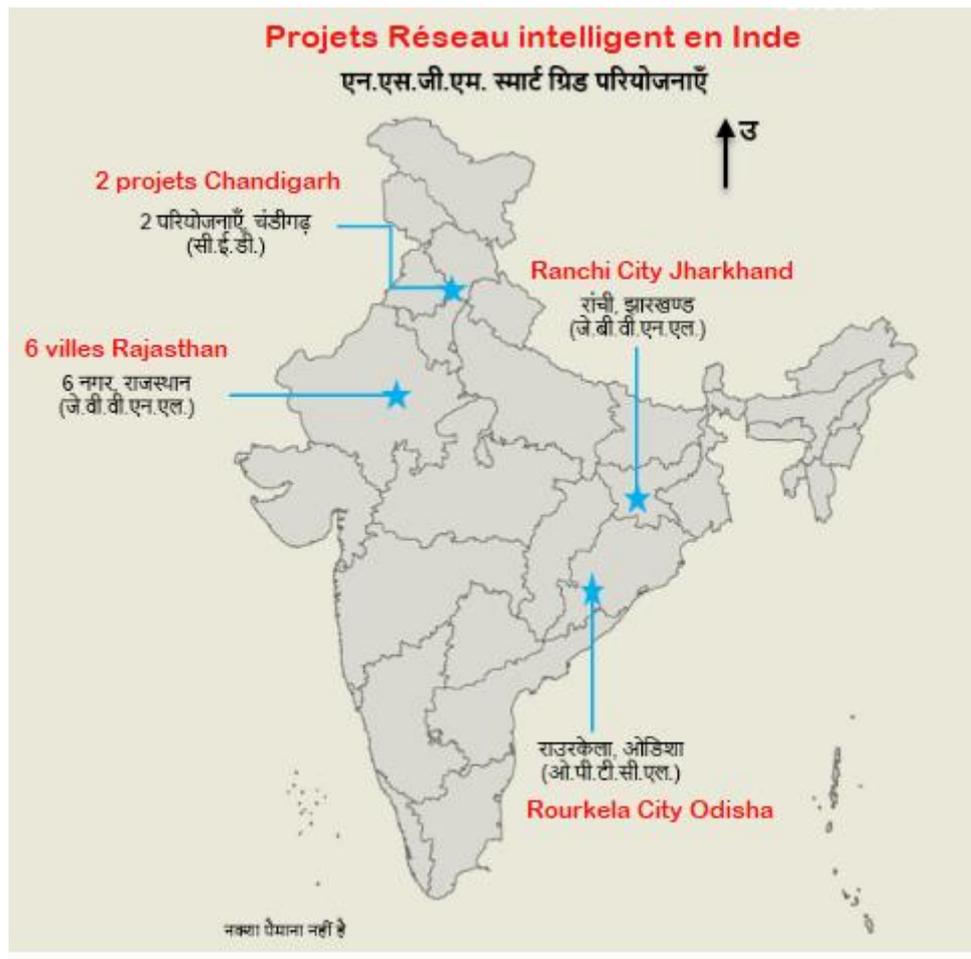


Figure (II.4) : Les projets Smart grid en Inde [29]

❖ **ETATS-UNIS :**

La sûreté du système électrique (liée à un sous-investissement chronique), l'augmentation de la consommation d'électricité et la difficulté croissante à construire de nouvelles lignes de transport d'électricité sont les principaux moteurs actuels des réseaux intelligents aux Etats-Unis. L'objectif, affiché par l'Administration américaine, est de créer un réseau électrique, avec les caractéristiques suivantes :

Les 100 projets américains en matière de Smart grids sont segmentés selon les éléments suivants :

- l' « *Advanced Metering Infrastructure* » consiste à déployer des systèmes de comptage évolué
- le « *Customer Systems* » comprend l'intégration de fonctions Smart grids dans les bâtiments, les équipements et les appareils à destination des consommateurs
- l' « *Electric Distribution Systems* » concerne la modernisation du réseau de distribution en vue du déploiement des réseaux électriques intelligents

- l' « *Electric transmission Systems* » concerne la modernisation du réseau de transport en vue du déploiement des réseaux électriques intelligents
- l' « *Equipment manufacturing* » a trait aux nouveaux équipements, matériels et logiciels permettant la modernisation des réseaux électriques existants
- l' « *Integrated and/or Crosscutting Systems* » consiste en l'intégration de solutions complexes de fonctions Smart grids. [31]

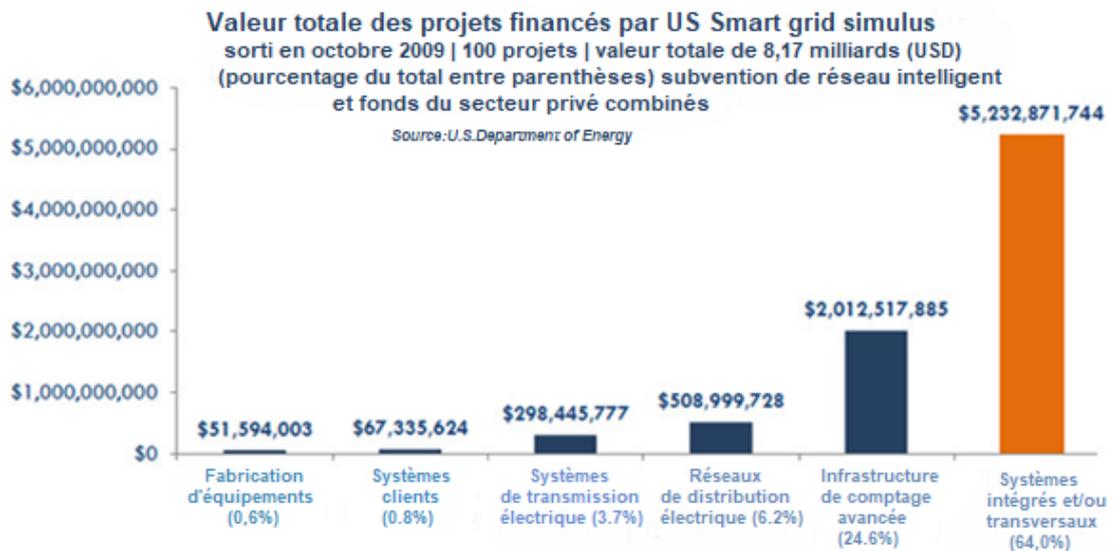


Figure (II.5) : Valeur totale des projets financés par U.S. Smart grid [32]

Segment Smart Grid	Total Des Projets	montant de la subvention pour le réseau intelligent	contribution au financement du secteur privé	valeur totale du projet de réseau intelligent	pourcentage du total
Infrastructure de comptage avancée	31	\$818.245.749	\$1,194,272,136	\$2,012,517,885	24,6%
Systèmes clients	5	\$32.402.210	\$34,933,414	\$67,335,624	0,8%
Réseaux de distribution électrique	13	\$254,260,753	\$254,738,975	\$508,999,728	6,2%
systèmes de transmission électrique	10	\$147,990,985	\$150,454,792	\$298,445,777	3,7%
fabrication d'équipements	2	\$25,786,501	\$25,807,502	\$51,594,003	0,6%
Systèmes intégrés et / ou transversaux	39	\$2,150,505,323	\$3,082,366,421	\$5,232,871,744	64,0%
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>\$3,429,191,521</b>	<b>\$4,742,573,240</b>	<b>\$8,171,764,761</b>	<b>100%</b>

Source : smart grid :2010 U.S.Project Spending, ZPryme Research & Consulting 2009

Tableau (II.3) : Les projets financés par U.S. Smart grid [32]

❖ *Europe : les projets Smart grid en Europe*

Le JRC (Joint Research Centre) a présenté le jeudi 7 juillet 2011 le premier catalogue complet de projets de réseaux intelligents en Europe. Le rapport - lancé à Varsovie lors de la conférence "Appui scientifique à une économie européenne compétitive à faible émission de carbone: énergie, transports et technologies émergentes" est basé sur une revue de 219 projets, représentant un investissement total d'environ 5,5 milliards d'euros.

Les réseaux intelligents sont des réseaux électriques intelligents qui joueront un rôle clé dans la réalisation des objectifs d'efficacité énergétique de l'UE pour 2020. Le rapport du JRC (Joint Research Centre) montre comment les réseaux intelligents peuvent aider à intégrer plus d'énergies renouvelables, accueillir des véhicules électriques, donner plus de contrôle aux consommateurs sur leur consommation d'énergie, éviter les pannes de courant et rétablir l'alimentation rapidement en cas de panne.

Le rapport souligne que la grande majorité des investissements ont été réalisés dans les anciens États membres (UE15), tandis que les nouveaux États membres (UE12) ont tendance à être à la traîne. Pour éviter les obstacles au commerce et à la coopération transfrontalière, les nouveaux membres devront intensifier leurs investissements.

Le catalogue du JCR n'est que le début d'un processus continu. À ce stade, le partage des connaissances et des meilleures pratiques est en fait une étape cruciale pour les parties prenantes du réseau intelligent, et le JCR continuera à collecter de nouveaux projets et à inclure des mises à jour sur les projets existants au fur et à mesure de leur progression. [33]

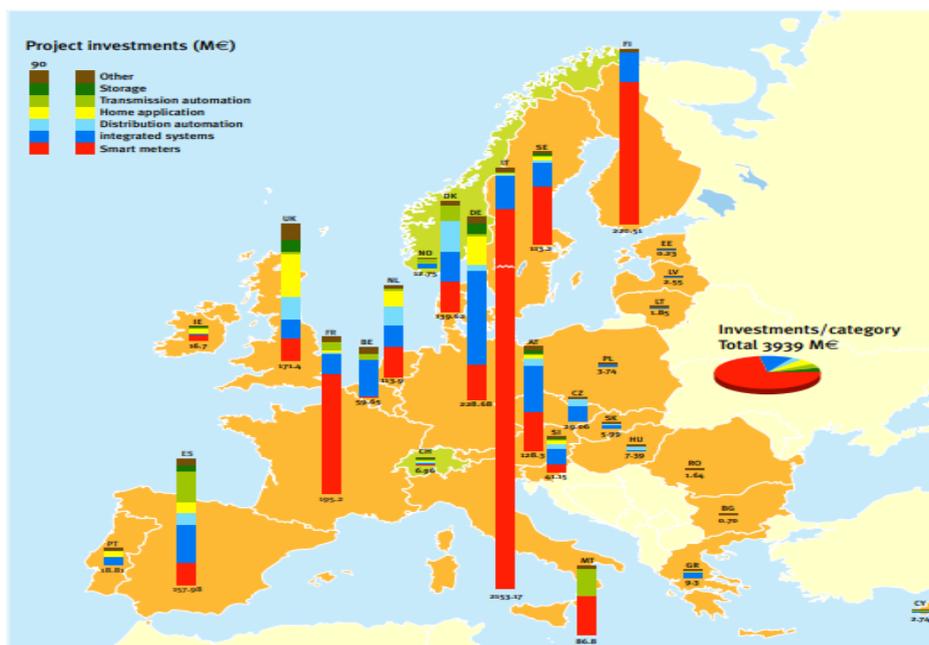


Figure (II.6): Les projets Smart grid en Europe 2010[33]

### II.3.5. Risques, menaces et politique de sécurité :

Risques et menaces sont deux concepts fondamentaux pour la compréhension des techniques utilisées dans le domaine de la sécurité. Le *risque* est une fonction de paramètres qu'on peut maîtriser à la différence de la *menace* qui est liée à des actions ou des opérations émanant de tiers.

Dans un smart grid, la sécurité concerne non seulement les éléments physiques (modems, routeurs, commutateurs...) mais aussi les éléments logiques, voire volatils, que représentent les données qui circulent dans les infrastructures de communication.

Le responsable de la sécurité doit analyser l'importance des risques encourus, les menaces potentielles et définir un plan général de protection qu'on appelle *politique de sécurité*. [20]

### **II.3.6. Types de réseaux intelligents : [25]**

Nous pouvons distinguer trois catégories de démarches "réseaux intelligent"

#### **II.3.6.1 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.

#### **II.3.6.2 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.

#### **II.3.6.3 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.4. Maison Intelligente « 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. [26]

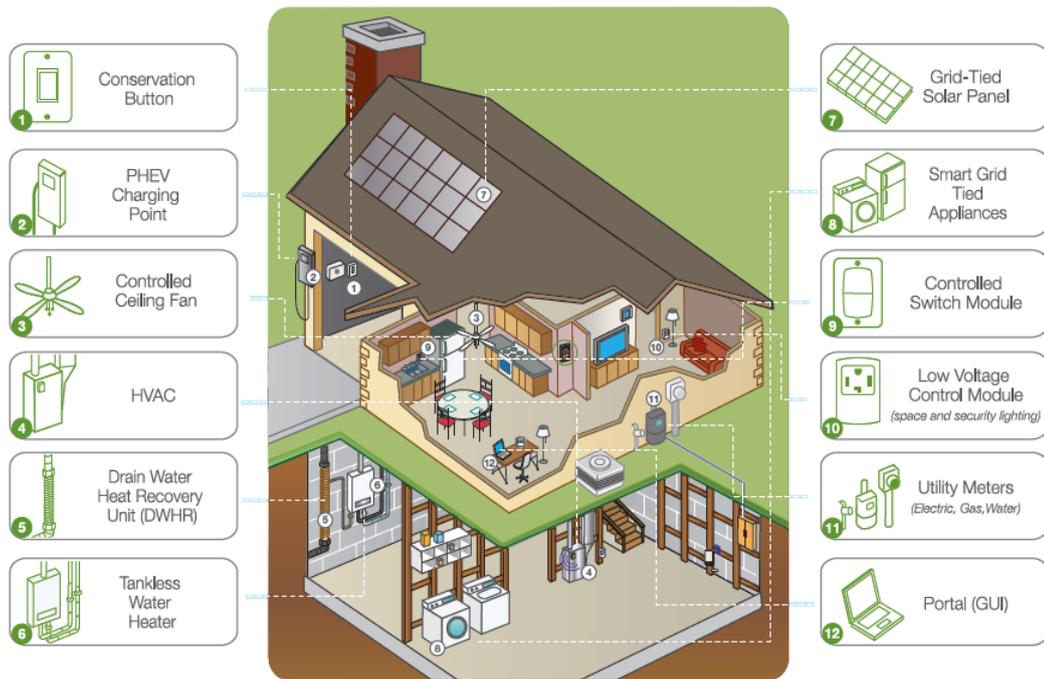


Figure (II.7): La Maison intelligente ou ‘Smart Home’

### II.5.Micro-Réseaux « Micro grid »

Appelé aussi mini Smart grids ou micro-réseaux intelligents, les micro 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.[27]

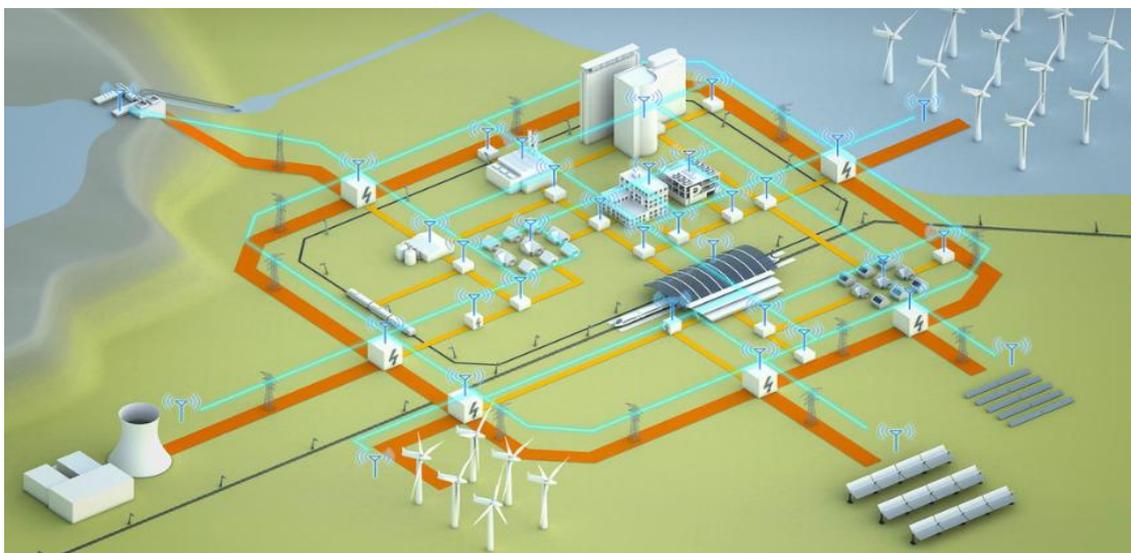


Figure (II.8): Micro réseaux ou ‘ Microgrid’

### II.5.1 Avantages et inconvénients des micro-réseaux :

Parmi les avantages et inconvénients que nous pouvons rencontrer, nous avons :

#### Avantages :

- Isolation de toute perturbation ou panne du réseau électrique ;
- Amélioration de l'efficacité énergétique.
- Réduction des émissions de gaz qui peut aider à lutter contre le réchauffement Climatique.
- Réduction de la distance physique et électrique entre les micro-sources et les Charges ce qui contribue à la réduction des pertes.
- Atteindre l'équilibre offre-demande.
- Amélioration de la puissance et de la fiabilité.
- Faire face à la pollution environnementale.

#### Inconvénients :

- Coûts élevés des installations ainsi que des ressources énergétiques décentralisées ;
- Difficultés techniques liés au manque d'expérience technique ;
- Absence de normes : puisque c'est un domaine relativement nouveau, les normes ne sont pas encore disponibles pour résoudre les problèmes de fonctionnement et de protection.
- Absence de lois ou règlement standard pour réguler le fonctionnement des micro réseaux.[19]

### II.5.2 Configuration d'un micro-réseau :

Les micro-réseaux peuvent être définis comme des sous réseaux de basse tension incluant des consommateurs, des générateurs décentralisés et des systèmes de stockage locaux. Les micro-réseaux sont destinés à alimenter des charges électriques pour une petite communauté tel que les cités universitaire, les sites industriels et commerciaux, les villages, etc. Les générateurs ou micro-source employés dans un micro-réseau sont généralement renouvelables. Ils englobent un large éventail de technologies telles que : les panneaux photovoltaïques, la biomasse ou encore l'énergie éolienne.

L'énergie solaire n'étant pas disponible à tout moment (par exemple la nuit, les jours nuageux) il est donc nécessaire d'équiper notre réseau par des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie en surplus. Les micro-réseaux peuvent fonctionner en deux modes : autonome et raccordé au réseau.

- En mode autonome, ils apparaissent comme une solution pour alimenter en énergie électrique les sites isolés.
- En mode raccordé au réseau, ils sont normalement connectés au réseau principal de distribution, mais sont capables de s'isoler de ce dernier en cas de perturbation dans le réseau principal.[19]

La Figure (II.9) met en avant la configuration typique d'un micro-réseau autonome. Cette structure offre la possibilité d'opérer en îlot isolé ou connecté au réseau commun. Sa construction varie en fonction des besoins et des contraintes liées à l'application. [28]

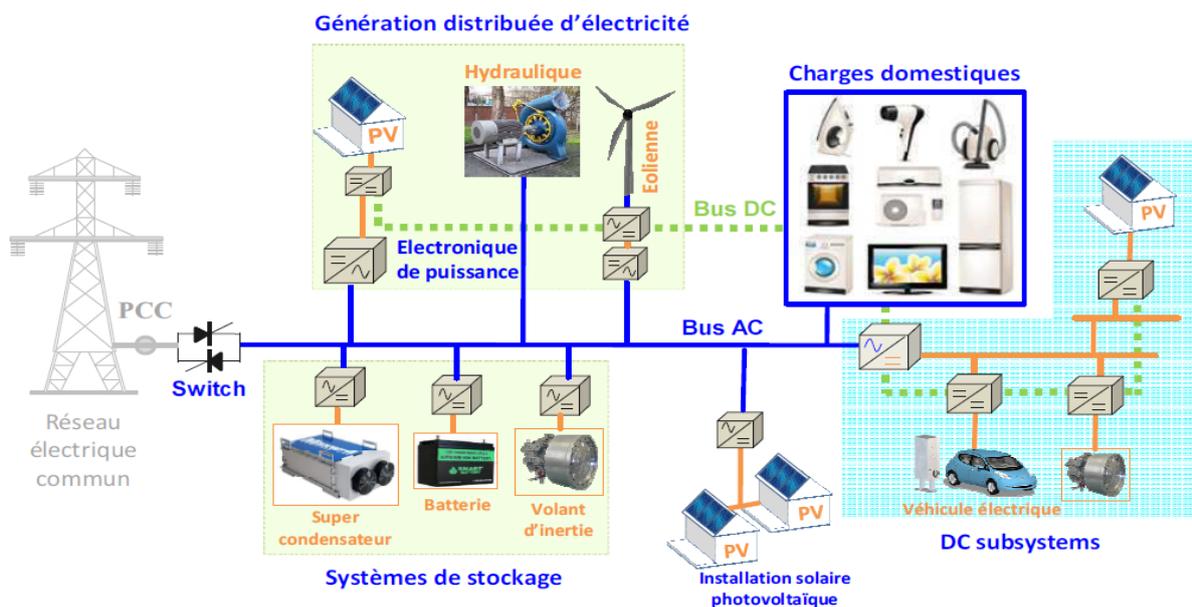


Figure (II.9): Configuration typique d'un micro-réseau autonome.

## II.6. Ville Intelligente « 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, et 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 efficace 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.[25]

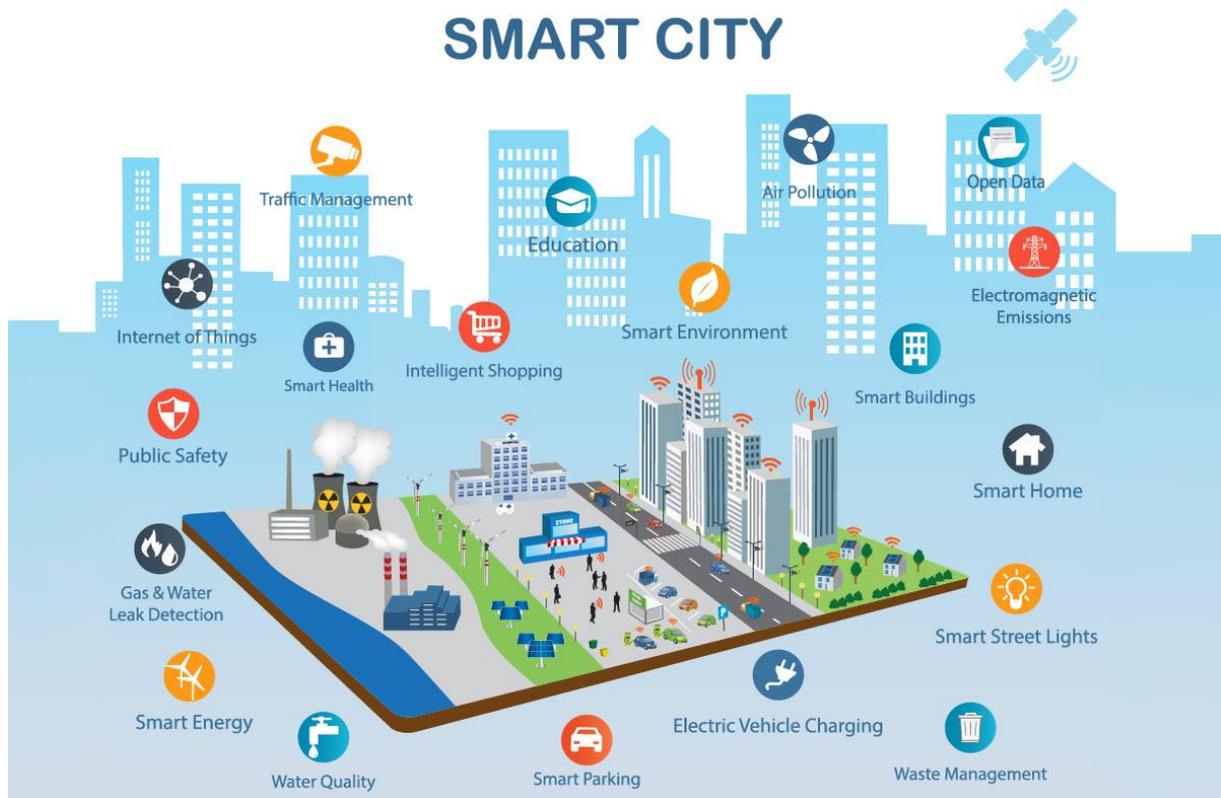


Figure (II.10): La ville intelligente ou ' Smart city'

### II.6.1 Smart city en Algérie

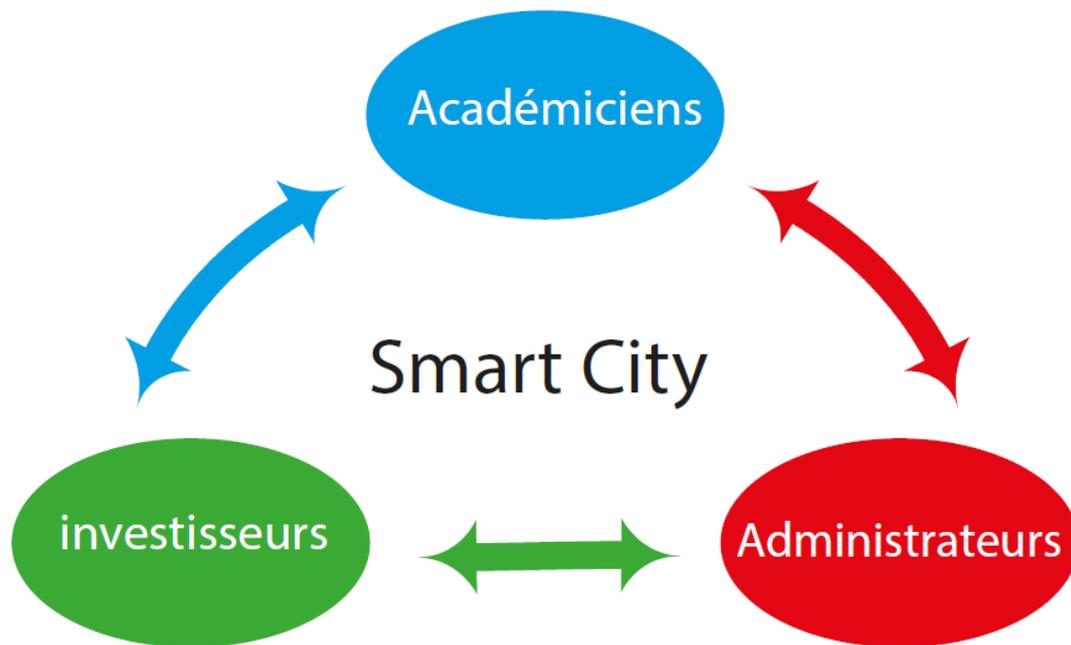
Mon collègue et moi avons eu une entrevue avec **Dr Mustapha HATTI** président de l'association **Tipasa Smart City**. Le **Dr Mustapha HATTI** est un chercheur permanent à l'Unité de développement de l'énergie solaire (UDES) de **Bou Ismaïl**. Cette rencontre nous a permis de lui poser quelques questions sur cette initiative, c'est-à-dire quels sont les principaux piliers et les objectifs que vous voulez atteindre de ce projet appelé « **Tipasa Smart City** » et ses réponses étaient les suivantes:

Tipasa Smart City est une initiative d'un groupe des cadres et d'enseignants de la wilaya de Tipasa. Son objectif est d'améliorer la qualité de vie du citoyen et de rapprocher la technologie en utilisant les sources d'origine de la wilaya.

La ville intelligente repose sur trois piliers qui sont :

- ✓ premièrement les académiciens, représentés par (les Docteurs, des chercheurs et des étudiants...)
- ✓ Deuxièmement, les administrateurs représentants de l'administration locale (directeurs de wilaya, maires...)
- ✓ Troisièmement, des représentants des investisseurs (entrepreneurs, industriels, agriculteurs...)

Ces trois piliers travaillent ensemble pour construire la Smart City



**Figure (II.11): Plan de Tipasa la ville intelligente**

A cet effet, il a cité un projet pilote d'un investisseur privé dans le transport en commun qui a mis en circulation cinq (5) bus dotés de Wifi. Une application internet informe les riverains sur les horaires de passage de ces bus et leur localisation.

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

L'Algérie compte plusieurs projets de villes intelligentes, dont celui de la capitale "Alger Smart City", à l'horizon 2035, ainsi que des nouvelles villes intelligentes, en cours de réalisation, telles Sidi Abdellah (Ouest d'Alger) et Bouinan (Blida).

## **II.7 Véhicules électriques « la partie mobile du réseau intelligent » :**

Les moteurs à combustion interne classiques sont la principale raison de la pollution de l'air et du réchauffement climatique. En ordre pour surmonter ces problèmes, les véhicules électriques (VE) peuvent être utilisés. Aussi, en utilisant des véhicules électriques à énergie durable sources pour lesquelles les actifs non renouvelables peuvent être enregistrés pour la prochaine génération. Véhicules électriques connectés à la smart grid (SG) peuvent être utilisés comme catalyseur pour réduire la pollution ainsi qu'ils peuvent être les principaux systèmes de transport.

Le véhicule électrique (VE) est un moyen de transport alternatif, ne produisant aucun gaz d'échappement et un bruit minimal. Le véhicule électrique (VE) utilise la capacité d'entraînement des moteurs électriques et des batteries, qui a une efficacité supérieure et des coûts d'exploitation inférieurs à moteur à combustion interne conventionnel. Récemment, l'introduction du concept de réseau intelligent a apporté fonctions de communication avec le système d'alimentation. [34]

Le concept de Véhicule to Grid (V2G) et Grid to Véhicule (G2V) est l'une des technologies de réseau intelligent impliquant le véhicule électrique (VE) afin d'améliorer le fonctionnement du système d'alimentation. La structure d'un système V2G et G2V typique est illustrée dans Fig (II.12).

Maintenant les véhicules électriques qui sont équipés de recharger des batteries qui deviennent populaires. Batteries, les ultra-condensateurs et les piles à combustible agissent comme des éléments de stockage dans un véhicule électrique.[34]

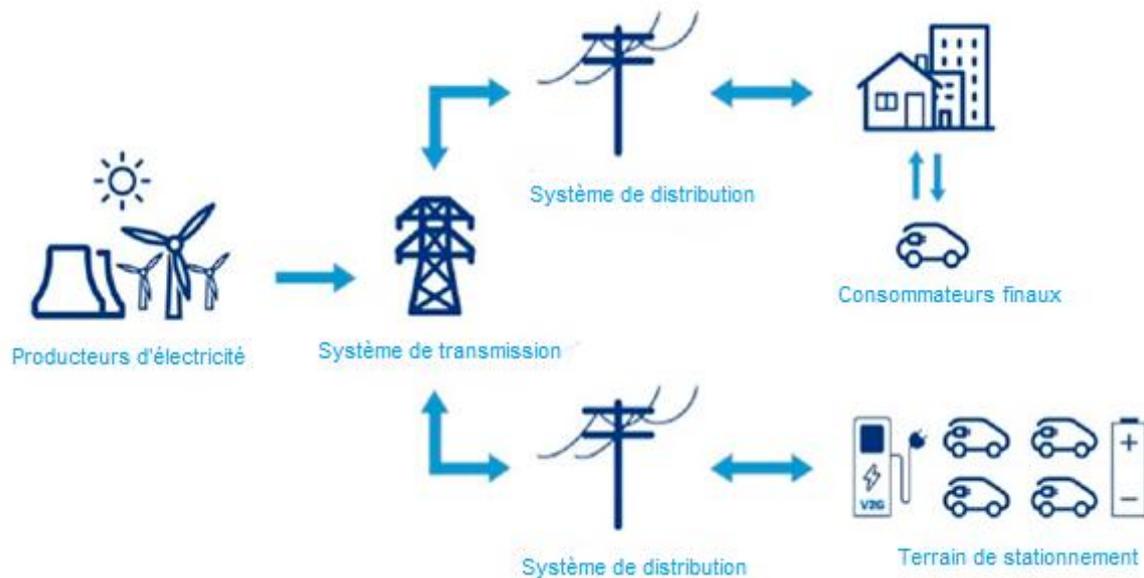


Figure (II.12) : Schéma du concept Vehicle-to-Grid (V2G)

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les smart micro grids ces avantages et inconvénients, leur contribution sur la stabilité, la fiabilité, la disponibilité et l'efficacité énergétique des réseaux électriques ainsi que les technologie inclus comme les smart city, smart home, la V2G ce qui améliore les conditions de vie des gens et contribue de manière significative à la protection de l'environnement .

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

### III.1.Introduction :

Le système électrique représente l'ensemble des machines et dispositifs qui permettent de produire, transporter, répartir, distribuer et consommer de l'électricité dans un périmètre géographique donné. Ce périmètre peut être un pays, un groupe de pays, ou un ensemble interconnecté et fonctionnant à la même fréquence [35].

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 [36].

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 [37].

### 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. [38].

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. [39]

### 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 barres de référence est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres 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 barres sert de référence pour les phases des tensions. Convention, ce jeu de barres est identifié par le jeu de barres N°1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés ( $V=1\text{pu}$  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  $\delta$ . Généralement, deux sont connues et les deux autres sont à déterminer. Nous avons généralement à faire à trois types de nœuds [40].

- ✓ **Jeu de barres de références (SLACK BUS) :** On l'appelle aussi le jeu de barres 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 barres est identifié par le jeu de barres  $N^{\circ} = 1$ , connecté à une source de tension d'où le module  $V$  et la phase  $\delta$  de la tension sont connues (généralement  $|V| = 1pu$  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 [41].
- ✓ **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 [30].
- ✓ **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 [42].

Ce tableau résume ce que nous avons dit précédemment:

Nœud	Variables spécifiées	Variables inconnues
Nœud de charge	P et Q	Module de V et $\delta$
Nœud générateur (Nœud à tension contrôlée)	Module de V et P	$\delta$ et Q
Nœud bilan	Module de V et $\delta$	P et Q

Tableau (III.1) : Propriétés des nœuds.

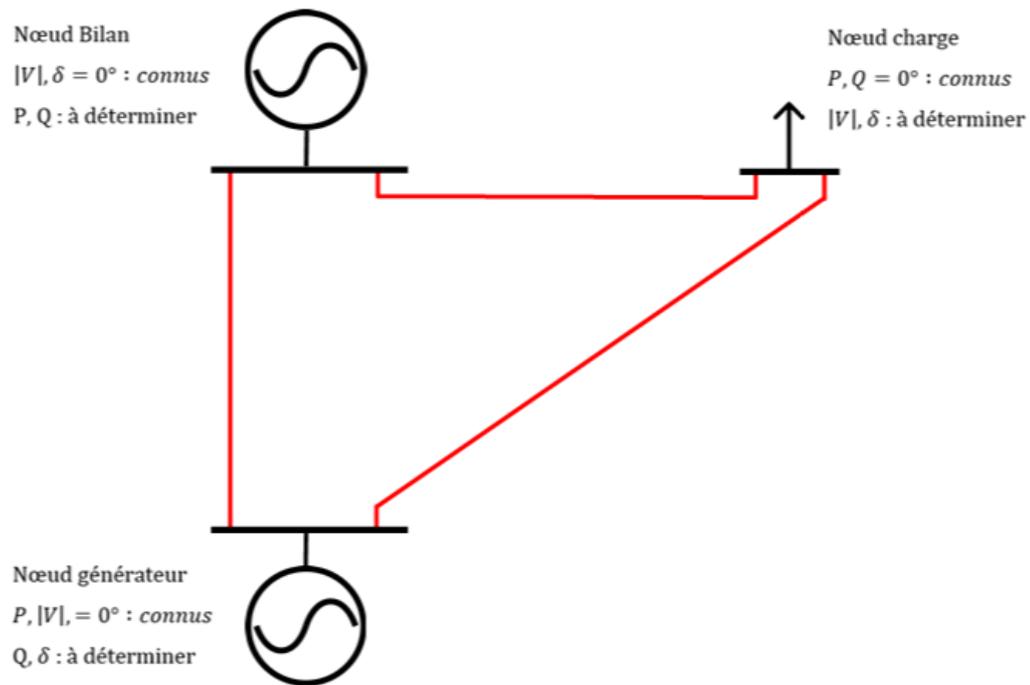


Figure (III.1) : Exemple d'un Réseau électrique avec trois nœuds.

### 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. [43]

#### 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 :

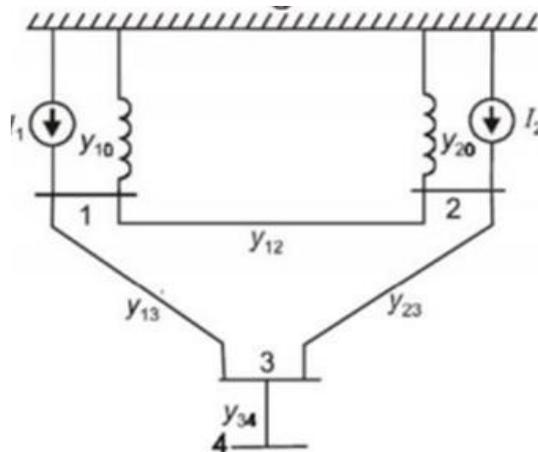


Figure (III.2): Exemple d'un réseau bouclé à 4 nœuds

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) :

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{m=1}^n Y_{im}V_m \quad (III.19)$$

Et nous avons aussi :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (III.20)$$

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

En remplaçant l'équation (III.21) dans (III.19) nous obtenons :

$$\text{Alors : } \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{m=1}^n Y_{im} V_m \quad (III.22)$$

Alors :

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

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

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

#### 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 : [36]

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

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

Ou :

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

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

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

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 :

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

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

#### 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 :

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

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

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:

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

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

### 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

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

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

- Matrice jacobéennes

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{III.42})$$

- Calcul de la matrice jacobéennes

$$J_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}$$

$$J_2 = \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|}$$

$$J_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}$$

$$J_4 = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|}$$

### 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. Simulateur à le pouvoir de l'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.

Simulateur se compose d'un certain nombre de produits intégrés à sa base est un moteur complet, robuste Puissance 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, 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.

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 [44].

### III.5.1.Vue d'ensemble

- Simulateur s'intègre parfaitement deux fonctions autrefois communément séparé du flux de puissance logiciel:
  - ✓ 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, de l'analyse des défauts, OPF, PVQV, ATC, SCOPF.
- En outre, de stabilité transitoire et distribué informatique sont récemment devenus disponibles [44].

### 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.
- **\*Run Mode :**
  - Tenez-vous 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. [44].

### **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.

# Chapitre IV

Simulations

Et Résultats

## IV.1 Introduction :

Ces dernières années, les changements dans la demande des consommateurs et la dépendance technologique dans la société ont augmentés. Le besoin d'un réseau de distribution électrique fiable et résistant aux pannes est devenu de plus en plus important. Un micro-réseau est un réseau interconnecté de systèmes énergétiques distribués qui peuvent fonctionner qu'ils soient connectés ou indépendants du réseau principal. Le micro-réseau fournit l'utilisation maximale de l'énergie existante et la gestion de la demande. Il garantit que des sources renouvelables et propres sont incluses dans le réseau. Le micro grid est le reflet du smart grid du futur.

Pour bien comprendre le rôle et le principe de fonctionnement d'un micro-réseau dans l'efficacité énergétique et la demande, nous avons fractionné ce chapitre de simulation en deux applications, qui sont :

- Réalisation et étude d'un micro-réseau de 5 nœuds, 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 éolienne et solaire.
- Dans la deuxième application nous allons simuler et analyser les résultats d'un exemple de micro-réseau configuré dans l'environnement MATLAB/Simulink.

## IV.2 Première application : Présentation de réseau de 5 nœuds :

Pour cette étude, le micro réseau conçu comprend une éolienne, une PV, une micro-turbine et une pile à combustible Pem, un réseau principal et des charges. Le micro réseau conçu est illustré à la figure (IV.1).

L'analyse sera faite pour le Micro réseau connecté au réseau principal puis déconnecté du réseau principal.

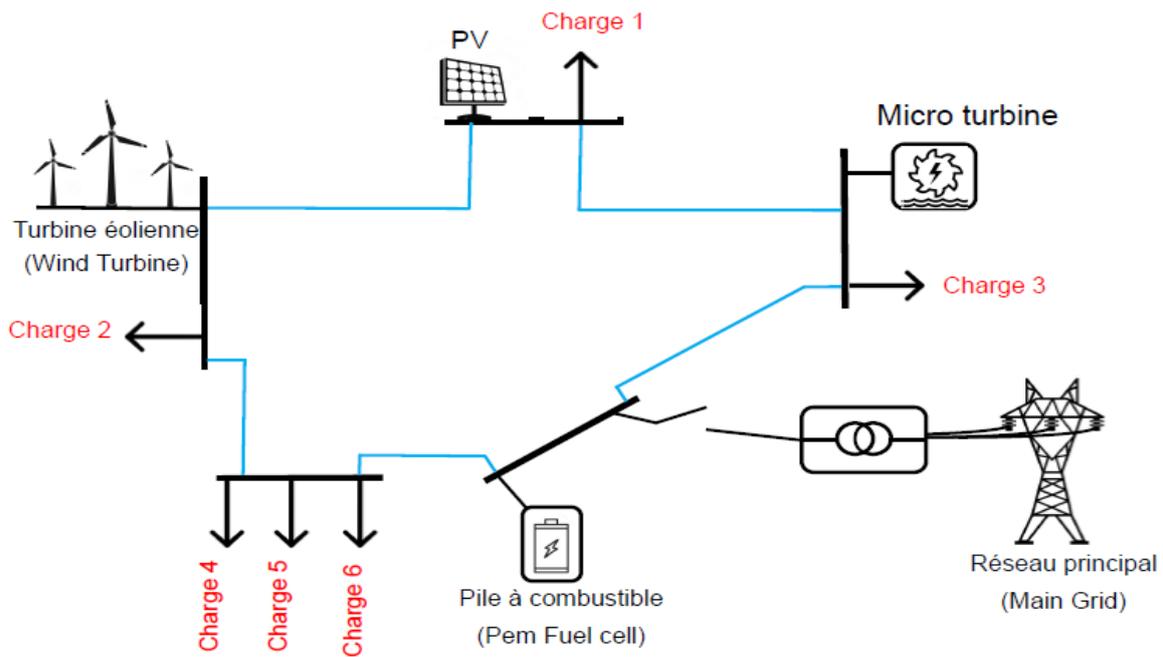


Figure (IV 1):Architecture du réseau a étudié [45]

k	m	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0,01273	0,0093	0,002
1	5	0,01273	0,0093	0,002
2	3	0,00636	0,00046	0,001
3	4	0,02546	0,0186	0,004
5	4	0,01273	0,0093	0,002

Tableau (IV. 1) : Les paramètres des lignes

### IV.3. Calcul de l'écoulement de puissance pour le Micro réseau à 5 nœuds

#### IV.3.1 Connecté au réseau Principal (On Grid) :

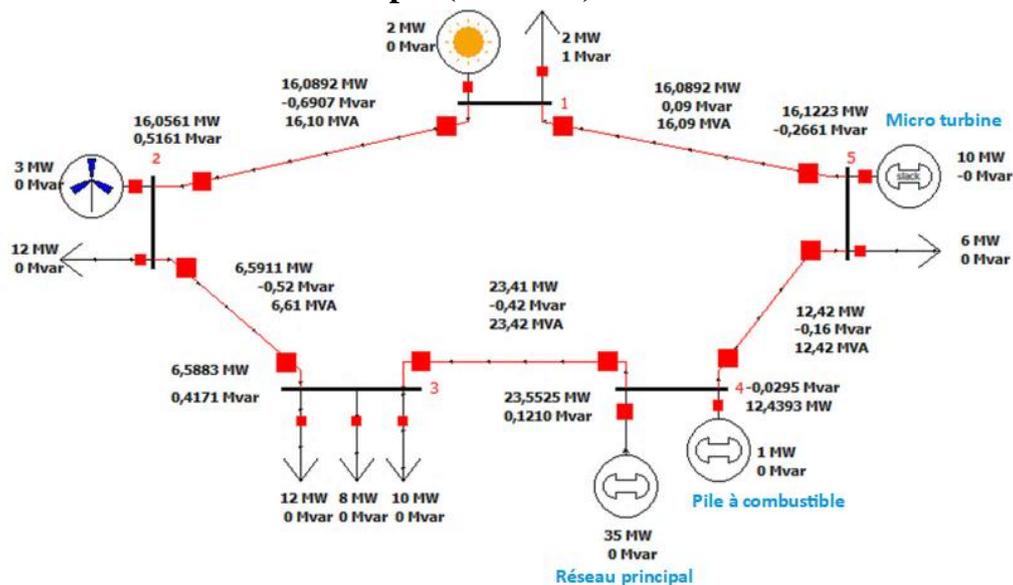


Figure (IV 2) : Micro réseau connecté au Réseau principal

BUS	1 1	354,0	MW	Mvar	MVA	% 0,9980
GENERATOR 1		2,00		0,00H	2,0	
LOAD 1		2,00		0,60	2,1	DistGen
TO	2 2	1	16,09	-0,69	16,1	0
TO	5 5	1	-16,09	0,09	16,1	0
BUS	2 2	354,0	MW	Mvar	MVA	% 0,9960
GENERATOR 1		2,54		0,00H	2,5	
LOAD 1		12,00		0,00	12,0	DistGen
TO	1 1	1	-16,06	0,52	16,1	0
TO	3 3	1	6,59	-0,52	6,6	0
BUS	3 3	354,0	MW	Mvar	MVA	% 0,9955
LOAD 1		12,00		0,00	12,0	DistGen
LOAD 2		8,00		0,00	8,0	DistGen
LOAD 3		10,00		0,00	10,0	DistGen
TO	2 2	1	-6,59	0,42	6,6	0
TO	4 4	1	-23,41	-0,42	23,4	0
BUS	4 4	354,0	MW	Mvar	MVA	% 1,0016
GENERATOR 1		1,00		0,00H	1,0	
GENERATOR 2		34,99		0,00H	35,0	
TO	3 3	1	23,55	0,12	23,6	0
TO	5 5	1	12,44	-0,03	12,4	0
BUS	5 5	354,0	MW	Mvar	MVA	% 1,0000
GENERATOR 1		9,70		-0,42R	9,7	
LOAD 1		6,00		0,00	6,0	DistGen
TO	1 1	1	16,12	-0,27	16,1	0
TO	4 4	1	-12,42	-0,16	12,4	0

Tableau (IV. 2) : Les résultats affichés par le logiciel Powerworld

En appliquant les étapes de l'algorithme de Newton-Raphson dans la simulation sur notre micro réseau à 5 nœuds, nous obtenons les solutions de l'écoulement de puissance illustrées dans le tableau (IV. 3) et le tableau (IV.4) :

Nœuds	Tension (pu)	$\delta$ (degré)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVar)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)
1	0,99796	-0,09	2,00	0,6	2,00	0,00
2	0,99596	-0,18	12,00	0	2,54	0,00
3	0,99555	-0,18	30,00	0	/	/
4	1,00158	0,07	/	/	35,99	0,00
5	1,00000	0,00	6,00	0	9,70	-0,33

Tableau (IV. 3) : Tableau des tensions.

Ligne k - m	$P_{k-m}$ (MW)	$Q_{k-m}$ (MVar)	Ligne m- k	$P_{m-k}$ (MW)	$Q_{m-k}$ (MVar)
1-2	16,0899	-0,6736	2-1	-16,0568	0,499
1-5	-16,0899	0,0736	5-1	16,123	-0,249
2-3	6,5918	-0,4990	3-2	-6,589	0,4
3-4	-23,411	-0,4	4-3	23,5518	0,104
5-4	-12,4206	-0,0819	4-5	12,4402	-0,104

Tableau (IV. 4) : Tableau des puissances transmises

La figure ci-dessous présente le profil de tension au niveau de chaque nœud :

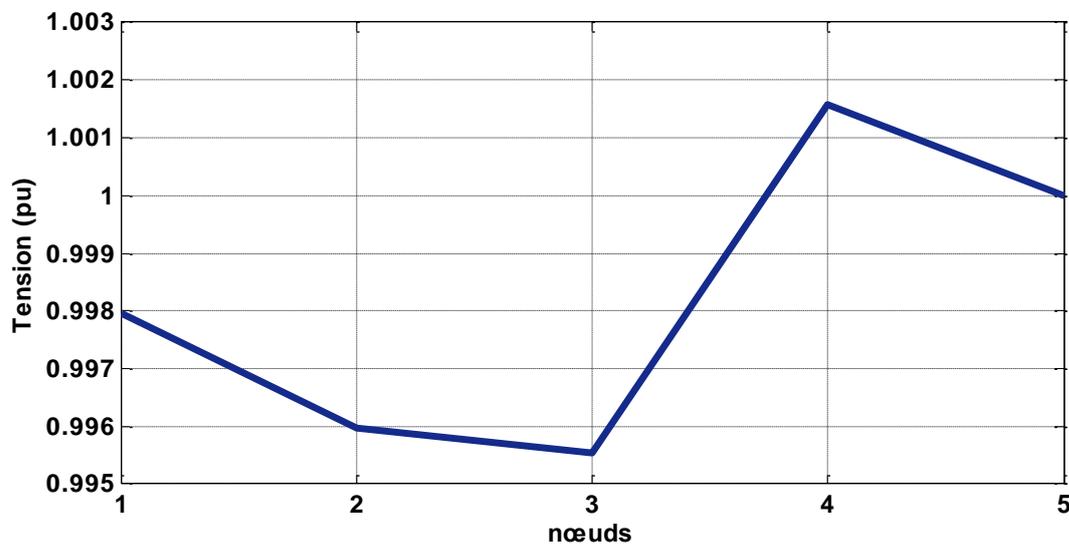


Figure (IV 3) : Le profil de tension au niveau de chaque nœud.

#### IV.3.1.1 Discussion des résultats

- A travers les résultats obtenus dans les tableaux et les figures ci-dessus, nous remarquons que la valeur la plus élevée de profil de tension est au nœud 4 avec une valeur de 1.00158 suivie par le nœud 5 puis le nœud 1 et la tension la plus basse est enregistrée au nœud 3.

IV.3.2 Déconnecté du réseau Principal (Off Grid) :

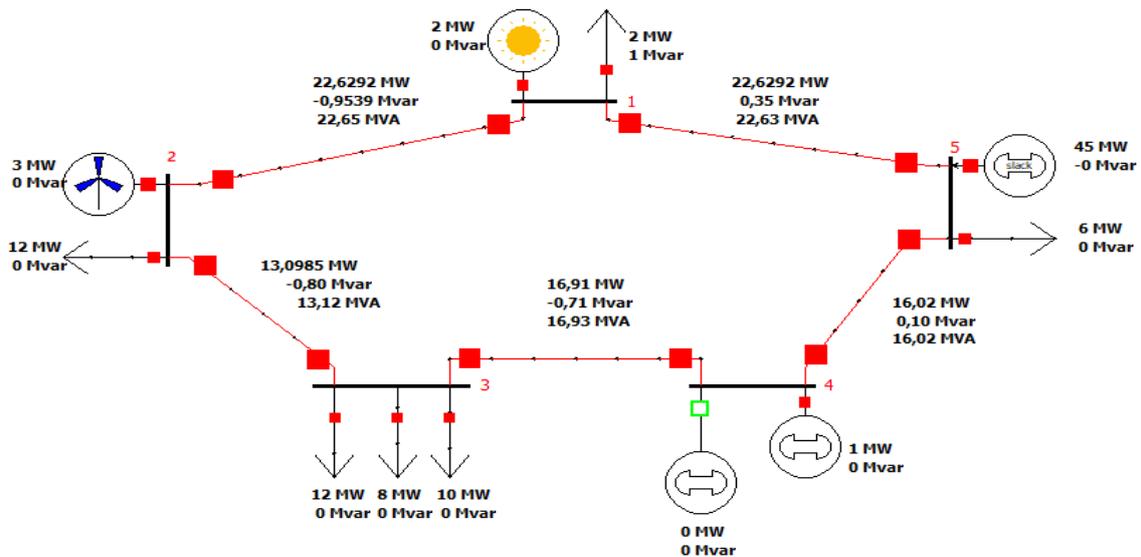


Figure (IV 4) : Micro réseau déconnecté du réseau principal

BUS	1	1	354,0	MW	Mvar	MVA	%	0,9972
GENERATOR	1		2,00		0,00H	2,0		
LOAD	1		2,00		0,60	2,1	DistGen	
TO	2	2	1	22,63	-0,95	22,6	0	
TO	5	5	1	-22,63	0,35	22,6	0	
BUS	2	2	354,0	MW	Mvar	MVA	%	0,9943
GENERATOR	1		2,54		0,00H	2,5		
LOAD	1		12,00		0,00	12,0	DistGen	
TO	1	1	1	-22,56	0,80	22,6	0	
TO	3	3	1	13,10	-0,80	13,1	0	
BUS	3	3	354,0	MW	Mvar	MVA	%	0,9935
LOAD	1		12,00		0,00	12,0	DistGen	
LOAD	2		8,00		0,00	8,0	DistGen	
LOAD	3		10,00		0,00	10,0	DistGen	
TO	2	2	1	-13,09	0,71	13,1	0	
TO	4	4	1	-16,91	-0,71	16,9	0	
BUS	4	4	354,0	MW	Mvar	MVA	%	0,9979
GENERATOR	1		1,00		0,00H	1,0		
GENERATOR	2		0,00		0,00	0,0	(OPEN)	
TO	3	3	1	16,99	0,36	17,0	0	
TO	5	5	1	-15,99	-0,27	16,0	0	
BUS	5	5	354,0	MW	Mvar	MVA	%	1,0000
GENERATOR	1		44,71		-0,41R	44,7		
LOAD	1		6,00		0,00	6,0	DistGen	
TO	1	1	1	22,69	-0,51	22,7	0	
TO	4	4	1	16,02	0,10	16,0	0	

Tableau (IV. 5) : Les résultats affichés par le logiciel Power World

Nœuds	Tension (pu)	$\delta$ (degré)	PL (MW)	QL (MVar)	PG (MW)	QG (MVar)
1	0,99715	-0,12	2,00	0,6	2	0
2	0,99434	-0,25	12,00	0	2,54	0
3	0,99351	-0,26	30,00	0	/	/
4	0,99794	-0,08	/	/	1	0
5	1	0	6,00	0	44,71	-0,41

Tableau (IV. 6) : Tableau des tensions.

Ligne k-m	$P_{k-m}$ (MW)	$Q_{k-m}$ (MVar)	Ligne m-k	$P_{m-k}$ (MW)	$Q_{m-k}$ (MVar)
1-2	22,6292	-0,9539	2-1	-22,5635	0,8035
1-5	-22,6292	0,3539	5-1	22,6947	-0,5054
2-3	13,0985	-0,8035	3-2	-13,0874	0,7055
3-4	-16,9125	-0,7054	4-3	16,9863	0,3627
5-4	16,0185	0,0959	4-5	-15,9856	-0,2716

Tableau (IV. 7) : Tableau des puissances transmises

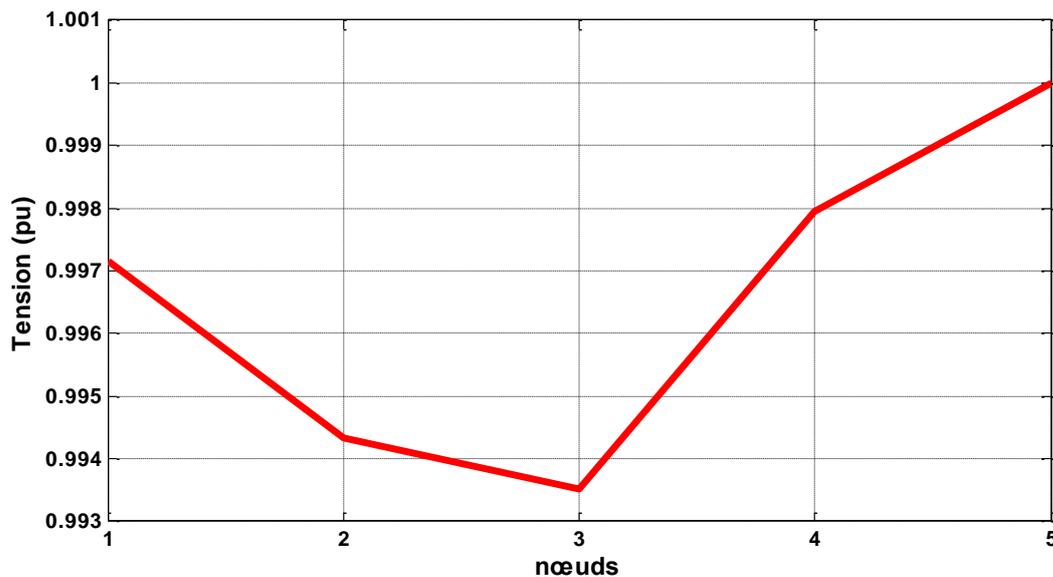


Figure (IV 5) : Le profil de tension au niveau de chaque nœud.

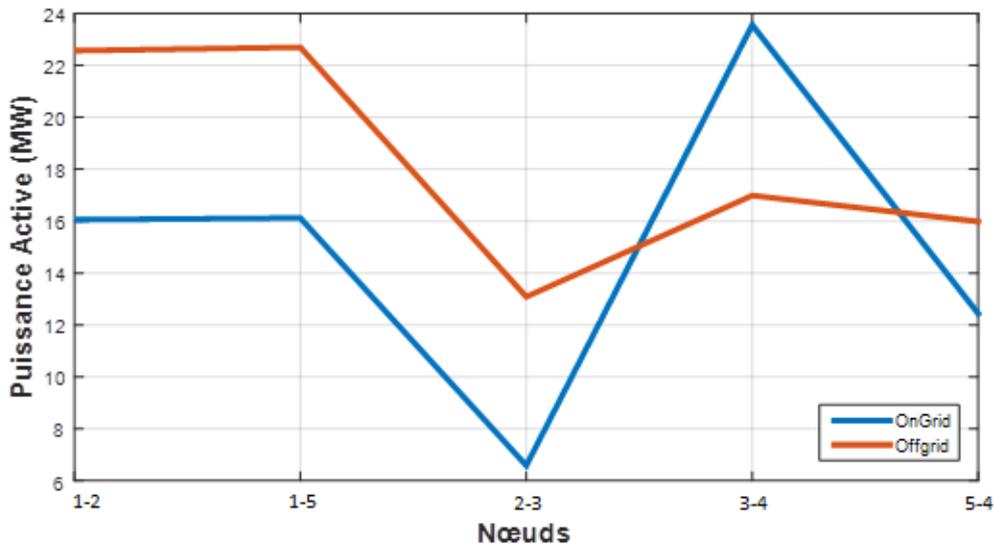


Figure (IV 6) : Les puissances actives au niveau de chaque ligne pour les deux cas

#### IV.3.2.1 Discussion des résultats

- **Analyse des tensions**

- A partir de la figure (IV.5), nous observons clairement que la tension du nœud bilan est restée au même ordre de  $1pu$ , aussi nous pouvons observer un léger changement sur les autres tensions de nœuds.

- **Analyse des puissances**

- Pour l'ongrid la valeur de la puissance active la plus élevée est enregistrée à la ligne (3-4) de valeur de 23,41 MW car cette ligne est connectée au réseau principal car le nœud 4 été considéré comme nœud de référence.
- Pour le reste des lignes, nous remarquons une valeur de 16,09 MW sur les deux lignes (1-5) et (1-2), 12,2 MW à la ligne (4-5) et la valeur la plus basse est enregistrée à la ligne (2-3) 6,59MW car 78% de la puissance nécessaire aux trois charges de nœud 3 provenait du nœud 4.
- Dans le deuxième cas le l'offgrid, nous observons que les deux grandes valeurs de puissances enregistrées sont ceux des lignes (1-5) et (1-2) de valeur de 22,6MW chacune. Ces valeurs sont justifiées par le nœud 5. Car dans le cas 'offgrid' le nœud 5 génère la puissance la plus grande, d'où on le référence comme nœud bilan.
- Quant aux deux lignes (5-4) (3-4) les valeurs de puissance étaient dans les limites de 16MW chacune et la valeur la plus basse est enregistrée à la ligne (2-3) de 6,59MW cela se justifie par le faible transit de puissance circulant dans cette ligne.

### IV.3.3 Comparaison des deux cas

- À travers les résultats de simulation obtenus, nous remarquons que la valeur de la puissance active est restée constante sur les trois lignes (1-2) (1-5) (2-3) contrairement à la ligne (3-4) où la puissance active était très élevée, surtout dans l'Ongrid', qui dépassait 23 MW en raison de sa connexion au réseau principal contrairement au déconnecter au réseau 'offgrid' dans lequel la puissance était faible environ de 16 MW.
- Pour la ligne (5-4), nous remarquons des valeurs faibles et proches dans les deux cas cela se justifie par le faible transit de puissance circulant dans cette ligne.
- Le but de cette simulation c'est de montré le fonctionnement du microgrid dans deux cas différente
- Le 1<sup>er</sup> cas connecté au réseau la puissance générée au nœud 4 à une valeur de 35,99 MW ce qui explique que ce dernier c'est un nœud de référence c'est-à-dire la majeure partie de puissance dont les charges consommes provient du réseau principal.
- Dans le second cas, le fonctionnement du réseau à 5 nœuds déconnectés totalement du réseau principal, peut produire de l'énergie afin de couvrir toute la demande locale en énergie par le biais de ses systèmes de production d'énergies renouvelables et de système de stockage. Dans ce cas le nœud 5 est considéré comme nœud de référence avec une puissance générée de 44.71MW et avec les autres sources renouvelables, il a pu répondre à tous les besoins du micro-réseau sans l'alimentation principale du réseau et c'est ce qui distingue et définit les micro-réseaux intelligents.

## IV.4 Deuxième application : Exemple de micro-grid dans l'environnement

### MATLAB Simulink

Cet exemple montre le comportement d'un modèle simplifié d'un micro-réseau à petite échelle pendant 24 heures sur une journée typique.

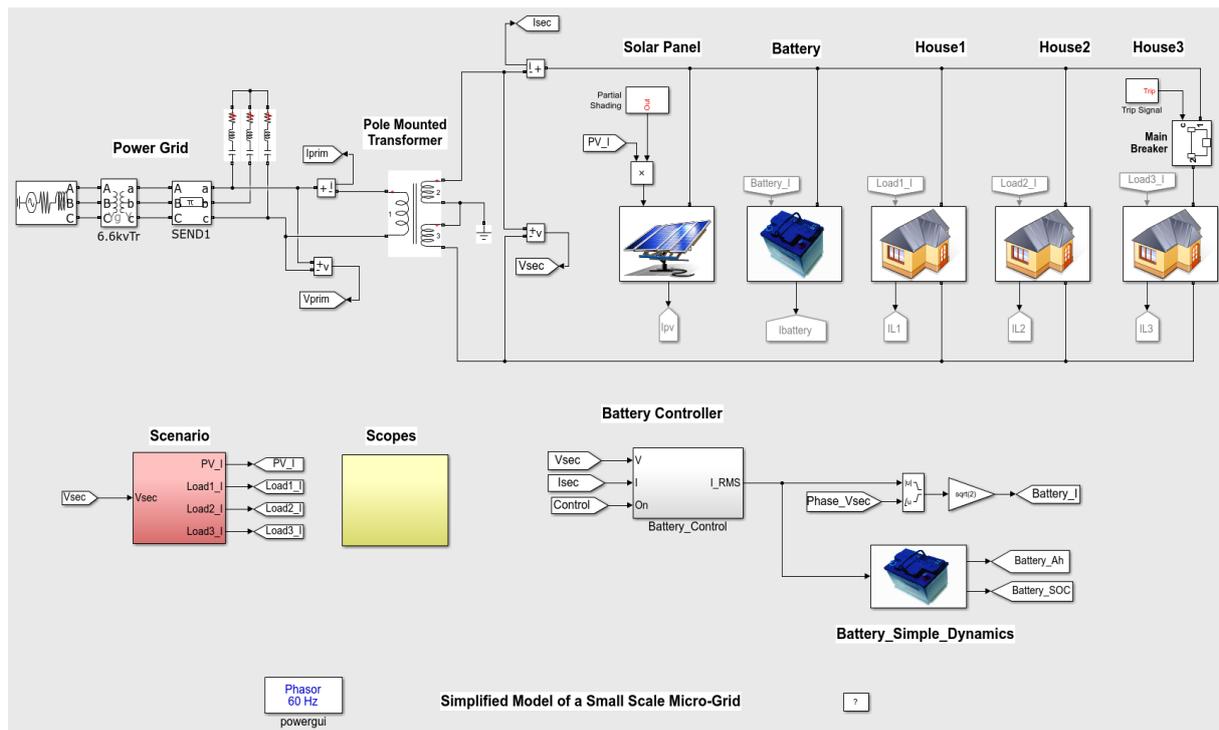


Figure (IV 7) : Modèle simplifié de micro-réseau à petite échelle [46]

#### IV.4 .1 Description :

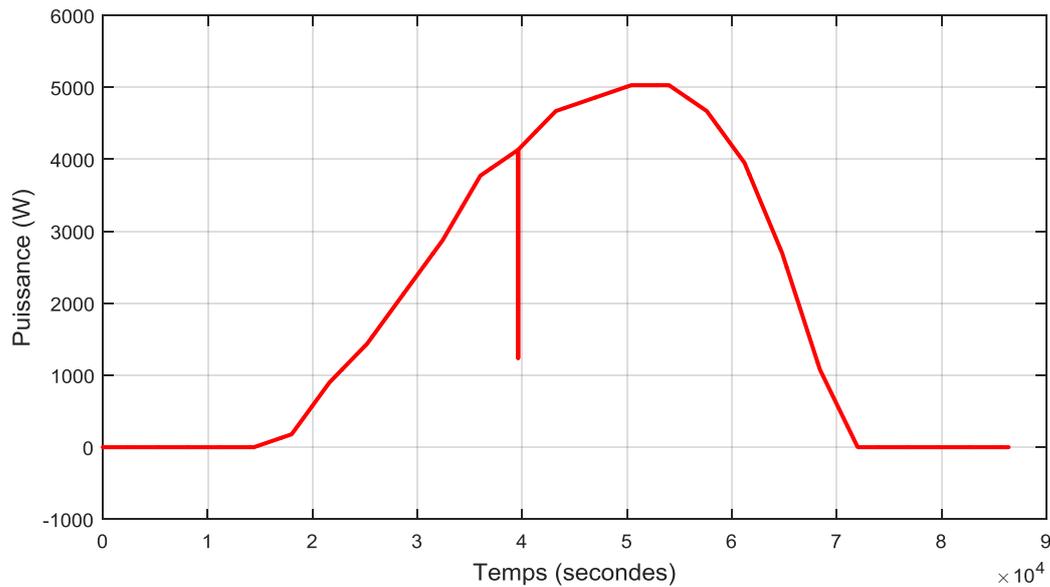
Le micro-réseau est un réseau AC monophasé. Les sources d'énergie sont respectivement un réseau électrique, un système de production d'énergie solaire et une batterie de stockage.

La batterie de stockage est contrôlée par un contrôleur de batterie. Il absorbe la puissance excédentaire lorsqu'il y a un excès d'énergie dans le micro-réseau et fournit une puissance supplémentaire en cas de panne de courant dans le micro-réseau. Trois maisons ordinaires consomment de l'énergie (maximum de 2,5 kW) en charges électriques.

Le micro-réseau est connecté au réseau électrique via un transformateur monté sur un poteau qui abaisse la tension de 6,6 kV à 200 V.

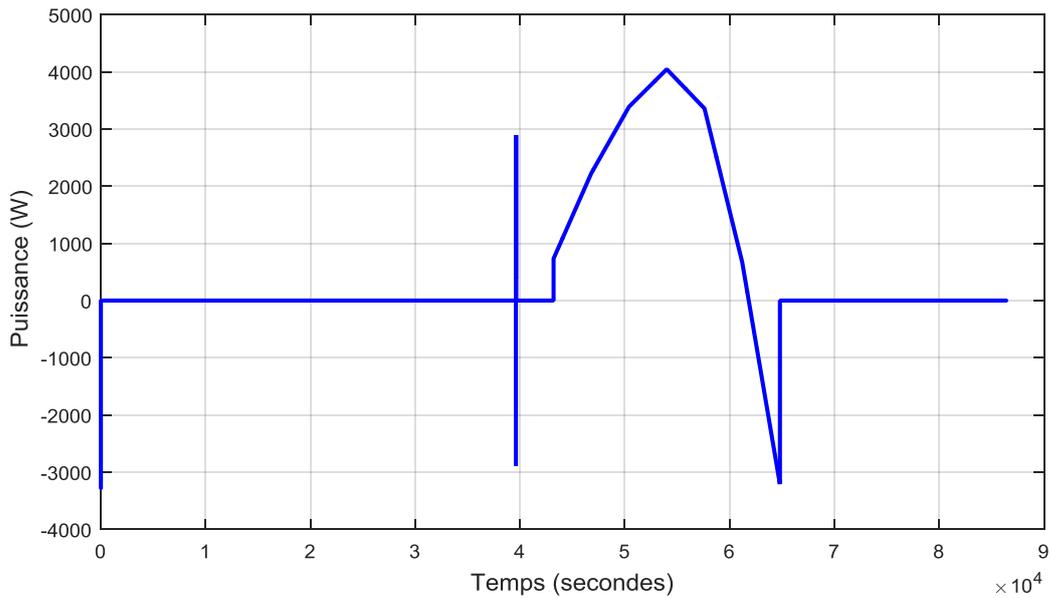
La génération d'énergie solaire et la batterie de stockage sont des sources d'alimentation CC qui sont converties en CA monophasé. La stratégie de contrôle suppose que le micro-réseau ne dépend pas entièrement de l'énergie fournie par le réseau électrique et que l'énergie fournie par la production et le stockage d'énergie solaire est suffisante à tout moment.

#### IV.4 .2 Discussion des résultats :



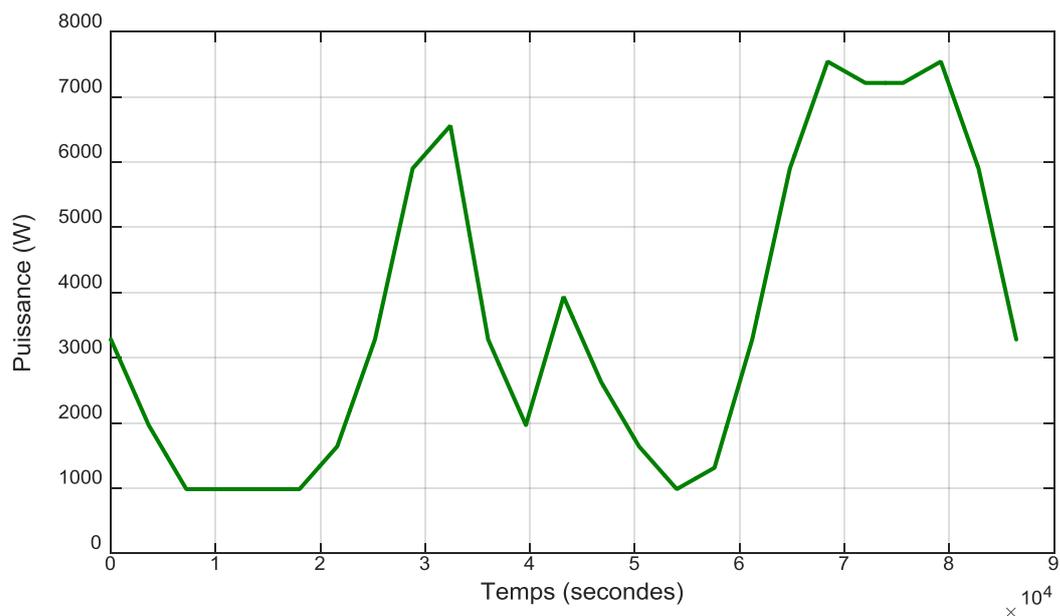
**Figure (IV 8) : La puissance Produite par les panneaux Solaire**

- Sur la figure (IV.8), la puissance du panneau solaire photovoltaïque à différentes périodes a été observée.
- À partir [de  $1,4 \times 10^4$ S à  $5,04 \times 10^4$ S] ou [4h-14h] est le temps du lever du soleil jusqu'à midi ,l'énergie produite par les panneaux solaires commence à augmenter. L'augmentation du rayonnement solaire pendant cette partie de la journée va permettre d'atteindre une puissance vers un pic de production de l'ordre de 5000 W entre [de  $5,04 \times 10^4$ S à  $5,4 \times 10^4$ S] ou [14h-15h] .
- A partir de [de  $5,4 \times 10^4$ S à  $7,2 \times 10^4$ S] ou [15h - 20h], nous observons clairement une diminution progressive de la puissance produite, et cela est dû au début du coucher du soleil, suivi d'une diminution du rayonnement solaire jusqu'à sa disparition complète à (20h), c'est-à-dire la nuit.
- Pendant les heures de [de  $7,2 \times 10^4$  S à  $1,4 \times 10^4$ S] ou [20h - 4h] la puissance des panneaux égale à zéro à cause de l'absence totale de rayonnement solaire.



**Figure (IV 9) : La puissance secondaire**

- La figure (IV.9) montre l'allure de la source de puissance secondaire. La source secondaire utilisée ici est la batterie.
- La batterie fonctionne selon deux modes différents. Le premier mode consiste à charger la batterie et cela est dû à l'heure du pointe .et le second mode est dû à l'alimentation des 3 charges.



**Figure (IV 10) : Puissance consommée par la charge**

- Dans les trois charges connectées, l'énergie consommée par ces dernières à différents moments de la journée change selon l'utilisation de différents équipements à différents moments de la journée.
- Nous remarquons à travers la courbe une variation de consommation d'énergie au cours de la journée, de minuit à 2 h, la consommation diminue de 3280 W à 1000 W.
- De  $[0,72 \times 10^4 \text{S}$  à  $1,8 \times 10^4 \text{S}]$  ou [de 2 h jusqu'à 5 h] la consommation reste constante à 1000 W, ce qui explique la présence d'un appareil qui a besoin d'énergie dans les 24 heures, comme un réfrigérateur. Avec le début de la journée, la consommation augmente à nouveau progressivement à une valeur de 5900W à 8 h  $[2,88 \times 10^4 \text{S}]$  et 6500W à 9 h du matin  $[3,24 \times 10^4 \text{S}]$  (pic de consommation).
- Nous remarquons plusieurs changements de consommation, dont le premier est à 11 h  $[3,96 \times 10^4 \text{S}]$ , avec la valeur de la consommation vers 1970W , puis une légère augmentation de la consommation, qui atteint 3940 W à 12 h  $[4,32 \times 10^4 \text{S}]$ . Puis une diminution entre 12  $[4,32 \times 10^4 \text{S}]$  et 15h  $[5,4 \times 10^4 \text{S}]$  de 3940 W à 1000, puis une remontée le soir de 15h  $[5,4 \times 10^4 \text{S}]$  à 19 h  $[6,84 \times 10^4 \text{S}]$  avec un pic de consommation de 7500 W en raison de la diminution de rayonnement solaire et de l'augmentation de la consommation , nous remarquons un troisième pic de consommation à 22 h  $[7,92 \times 10^4 \text{S}]$  qui atteint 7540 W .
- Puis une nouvelle diminution progressive de 22 h jusqu'à minuit de 7500 w à 3300W.

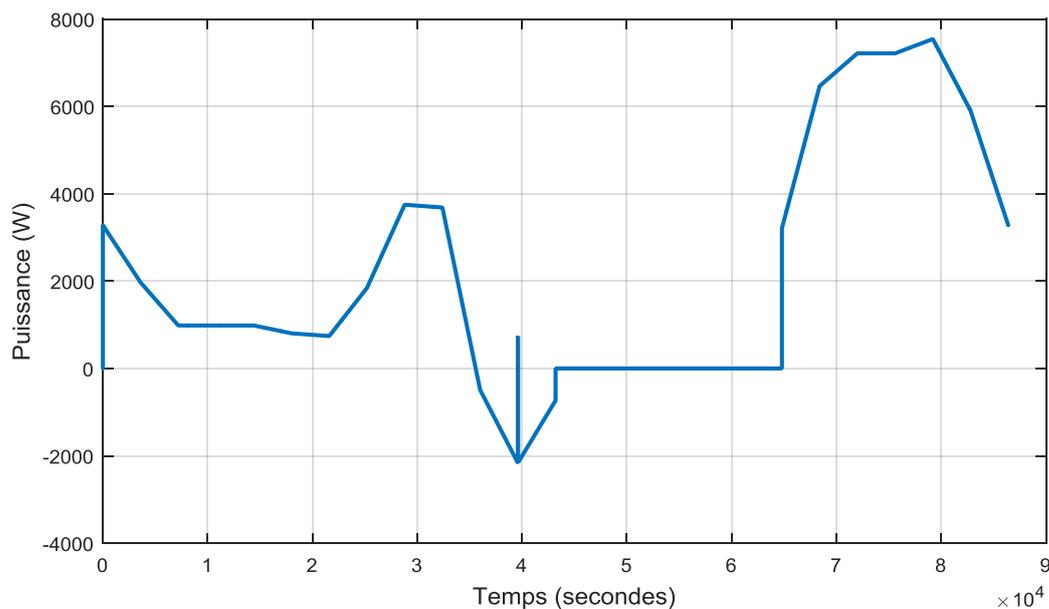
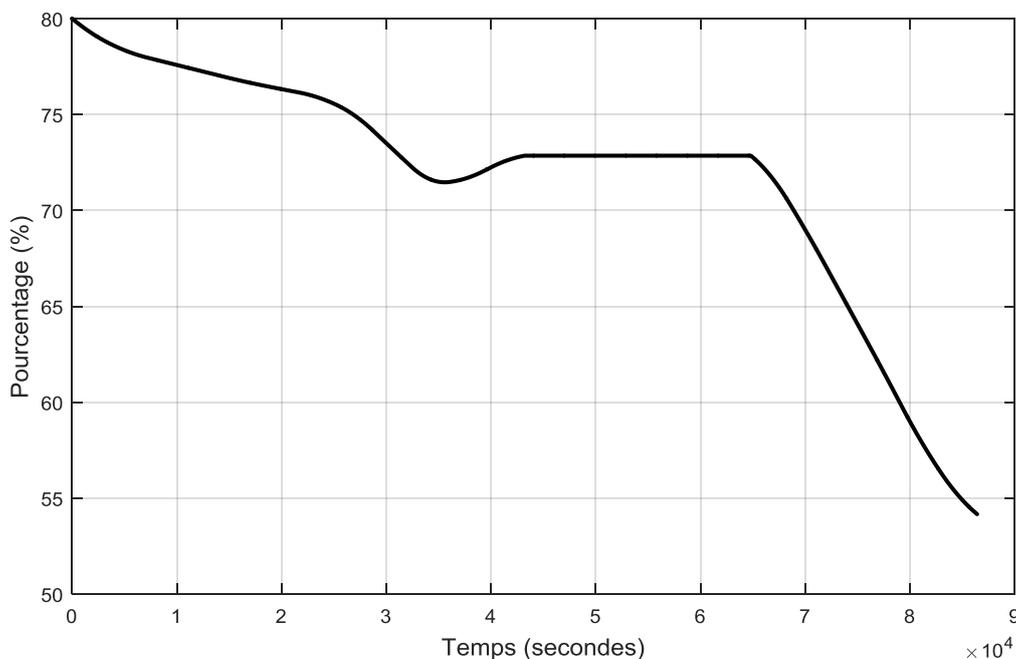


Figure (IV 11) : La puissance de batterie

- Sur la figure (IV.11), la puissance de la batterie à différentes heures de la journée est affichée.
- De 0h à 12h la puissance de batterie varie selon la demande des charges en énergie. Le système de stockage de la batterie fournit de l'énergie lorsque la production totale à partir du micro-réseau est insuffisante pour répondre à la demande de charge. Le stockage absorbera l'excès de puissance du micro-réseau lorsque la demande de charge est faible. Le contrôle de la batterie n'est pas effectué de 12h à 18h.
- De 12h à 18h la puissance de la batterie est nulle, parce que l'intensité des rayons du soleil est maximale, la puissance générée dont le micro-réseau qu'a besoin est suffisante.
- De 18h à 24h, la batterie de stockage alimente le micro-réseau car pendant cet intervalle, le panneau solaire ne produit pas le maximum d'électricité car l'intensité des rayons solaires durant cette période est moindre voire négligeable la nuit.



**Figure (IV 12) : Battery\_SOC**

- Sur la figure (IV.12), l'état de charge de la batterie pendant différentes périodes de la journée est affiché. L'état de charge est maximum à midi et il diminue avec le temps.
- De 12h à 18h, le contrôle de la batterie n'est pas effectué. Le SOC (State Of Charge) de la batterie de stockage est fixé à une valeur constante qui ne change pas lors de la charge ou la décharge du stockage.
- De 18h à 0h L'état de charge diminue de plus en plus rapidement car la batterie devient l'alimentation électrique principale pour répondre aux besoins des charges.

## IV.5 Conclusion :

Ce chapitre, constitue deux parties, ou il explique le fonctionnement d'un micro-réseau se composant de plusieurs sources d'énergies renouvelables associe au réseau principal.

Dans la première partie, nous avons traité un exemple d'un réseau à 5 nœuds avec trois sources d'énergies propre (éolienne, PV, micro-turbine) et un système de stockage par pile à combustible. Pour montré le fonctionnement d'un micro réseau manuellement avec la présence d'énergies renouvelables et du réseau principal, nous avons procéder a deux fonctionnement qui sont 'On Grid' et 'Off Grid)', pour but de générer uniquement les énergies renouvelables. Les résultats de simulation obtenus illustrés par le logiciel Power World ont prouvés la définition et le fonctionnement d'un micro-réseau.

Par la suite, dans la deuxième partie, nous avons montrés le fonctionnement direct d'un vrai micro-réseau constitué de trois maisons avec une source renouvelable qui est l'énergie photovoltaïque et un système de stockage par batterie connecté. Nous avons simulés et visualisés plusieurs graphes, pour but de montrer que le micro réseau peut produire de l'énergie afin de couvrir tout ou une partie de la demande locale en énergie par le biais de ses systèmes de production propre et le stockage. Le micro-réseau a prouvé son efficacité, ce qui sera un bond en avant et un élément essentiel dans les villes intelligentes du futur.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale

La croissance de la demande sur l'énergie électrique, a été toujours en évolution et une nécessité permanente des clients, qui rencontre souvent en face l'incapacité des producteurs d'électricité à satisfaire cette exigence. Pour compenser ce manque, nous devons introduire dans le réseau des nouvelles sources d'énergie à base de fossiles mais l'impact environnementale qui se caractérise par le dégagement de la pollution et le réchauffement de la planète. Ces raisons ont incité les producteurs d'électricité à trouver une autre solution alternative qui est l'utilisation des EnR pour satisfaire le besoin tant en qualité qu'en quantité.

Notre travail a été focalisé sur l'étude et l'analyse d'un micro réseau, 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 sommes orientés en particulier à l'étude du Micro réseau intelligent (Micro 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 de deux exemples d'applications qui définissent le Micro-Grid. La simulation et la présentation des résultats obtenus nous a permis d'utiliser deux logiciels : « le logiciel power world » et l'environnement « MATLAB/Simulink ».

La première étape de notre travail a été consacrée à l'analyse d'un micro réseau constituant d'un réseau de 5 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 micro-réseau en utilisant le cas 'Ongrid' et le cas 'offgrid' manuellement.

## Conclusion générale

---

La deuxième partie de la simulation, nous avons pris un exemple de Micro Réseau se trouvant dans l'environnement MATLAB/Simulink. Pour cette application, 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. Ce modèle se compose de 3 charges résidentielles, un champ photovoltaïque et une batterie de stockage.

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 off grid et a assuré la qualité d'énergie.
- La gestion de micro réseau favorise l'utilisation des sources renouvelables par rapport au réseau public.

Comme perspective, nous proposons le même projet effectué au niveau de la wilaya de Tipaza, pourquoi pas 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, solaire, éolienne et hydraulique. Tout cela ouvre la voie au projet de ville intelligente.

# **Références Bibliographique**

### • Les mémoires et les thèses

[1] **GUENTRI, Hocine**, « Contribution à l'étude des réseaux électriques intelligents et développement de la nouvelle économie de l'énergie ». Thèse de doctorat. Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2018.

[3] **SADI Mohammed El Amine, HAMLAT Zohra** «L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV», Mémoire de Master, Université Dr.Tahar Moulay de Saïda, 2014.

[6] **ADJOU DJ Labiba**, «Contribution à l'étude de l'OPF du réseau Algérien basée sur les énergies renouvelables et les FACTS », Thèse de Doctorat , Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2018.

[7] **FALIT Imane ,SHEIKH Kassem Ayman** «Calcul du dispatching économique d'un réseau d'énergie électrique avec intégration des énergies renouvelables» , Mémoire de Master, Université Dr. Moulay Taher SAIDA, 2017.

[8] **Mirecki A**, « Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.

[10] **ALVAREZ-Hérault, MARIE-Cecile**. « Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée», Thèse de doctorat. L'institut Polytechnique De Grenoble 2009.

[11] **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.

[12] **BOUGHATANE Hafid, HADDADI Yacine, MEDJOU DJ Rabah**, «Sur la maitrise des investissements dans l'insertion des ressources renouvelables au réseau électrique », mémoire de master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2014.

[13] **MOUZAIA Menad, IDIRI, Sofiane, AOUZELLAG, N**, « Etude de la variation de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau de distribution », mémoire de master. Université Abderrahmane Mira BEJAIA. 2013.

## Références Bibliographiques

---

[14] PHAM, Thi Thu Hà. «Influences de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance ». Thèse de Doctorat. L'institut National Polytechnique De Grenoble ,2006

[16] KOUADRA Foued. « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT ». Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine. 2008.

[19] BENOTMANE Sara , MOUALEK Farida, « Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid», Mémoire de Master, Université Aboubaker Belkaid Tlemcen,2016 .

[20] 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.

[21] SEBAA, Haddi. Contribution à l'optimisation de l'insertion des énergies renouvelables dans un réseau électrique intelligent.. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas - Setif1 ,2019.

[25] KAMEL Laib, « Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable» ,mémoire de master ,Universite De Mohamed Boudiaf M'sila, 2016.

[26] BRAHIMI Karim, BOUCHALA Sofiane, « Les aspects techniques des projets Smarts Grids ».Mémoire de master, Universite Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.

[28] SAIM, Abdelhakim. « Commande à base de descripteurs flous d'une architecture de génération distribuée», Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 2017.

[35]:KRAKOWSKI Vincent «Intégration du renouvelable et stratégies de déploiement du réseau électrique : réconciliation d'échelles spatio-temporelles dans des exercices prospectifs de long terme» thèse de doctorat, l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Research University ,2016.

[36] : MAHDAD Belkacem« Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC ». Mémoire de fin étude master réseau électrique, Université Mohamed Khider ,Biskra, 2014.

## Références Bibliographiques

---

[37] : **SEDDIKI, Zahira** « Optimisation de l'écoulement de puissances dans un système d'énergie électrique par la méthode du point intérieur ». Mémoire de magister Université Hassiba Benbouali de Chlef ,2009 .

[38]: **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. Ouargla, 2018.

[39]: **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.

[40]: **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 El Oued, 2018.

[41]: **BOUARAGUIA, A.M.**, «L'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.

[42]: **KERBAA. A.**, «Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie Électrique», Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra ,2013.

[43]: **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.

[44]: **NAAMA Bakhta, BOUZEBODJA Hamid, ASRAOUI Abderrahmane** «Simulation des Réseaux Electriques par le Logiciel Power World Version 17» Travaux Pratiques, Université M .BOUDIAF de Oran, 2015.

- **Les Articles**

[2] **Paulo Fernando Ribeiro, Carlos Augusto Duque, Paulo Márcio Ribeiro, Augusto Santiago Cerqueira**, «Power systems signal processing for smart grids»,USA, John Wiley & Sons, 2013.

[4] NARDELLI Pedro HJ, RUBIDO Nicolas, WANG Chengwei , «Models for the modern power grid». The European Physical Journal Special Topics, 2014, vol. 223, no 12, p. 2423-2437.

[15] COSTER Edward, MYRZIK Johanna MA, B KRUIJMER, «Integration issues of distributed generation in distribution grids», Proceedings of the IEEE, 2010, vol. 99, no 1, p. 28-39.

[22] FANG, Xi, MISRA, Satyajayant, XUE, Guoliang, «Smart grid—The new and improved power grid: A survey » IEEE communications surveys & tutorials, 2011, vol. 14, no 4, p. 944-980.

[34] BHARGAVI, K. M., JAYALAKSMI, N. S., MALAGI, Sheetal, « Integration of Plug-in Electric Vehicles in Smart Grid: A Review », 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC). p. 214-219., IEEE, 2020.

[45] AHMET, n. u. r. et KAYGUSUZ, Asim, « Power flow study for a microgrid by using matlab and powerworld simulator». International Journal of Energy and Smart Grid, 2016, vol. 1, no 1, p. 14-21.

- **Les sites**

[9] : <https://sites.google.com/site/lesenergiesrenouvelablesvt/avantages> , (Consulté le :11 janv. 2011)

[17] : <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=etapes-integration-enr> ,(Consulté le :03 Aout 2017)

[18] :[http://www.fondation-nature.org/sites/default/files/publications/140707\\_lintegration\\_des\\_energies\\_renouvelables\\_dans\\_le\\_reseau\\_de\\_transport\\_delectricite.pdf](http://www.fondation-nature.org/sites/default/files/publications/140707_lintegration_des_energies_renouvelables_dans_le_reseau_de_transport_delectricite.pdf) ,(Consulté le : juin 2014)

[27] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=microgrids&action=imprimer> (8 juillet 2014)

[29] <https://www.nsgm.gov.in/hi/sg-projects> (juillet 2020)

[30] <https://powerline.net.in/2019/08/03/smart-grid-update-2/> (Août 2019)

[31] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=amerique> (8 juillet 2014)

[32] <https://fr.calameo.com/read/000414633076addcc5d6b> (2010)

[33] :<https://ec.europa.eu/jrc/en/news/jrc-presents-first-complete-catalogue-eu-smart-grid-projects-7169> (09 Août 2016)

[46] **HIROUMI Mita**, (MathWorks), “Simplified Model of a Small Scale Micro-Grid”,  
<https://fr.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>

- **Les ouvrages**

[5] **CATALÃO, João PS**, « Smart and Sustainable power systems» , Operations, Planning and Economics of Insular Electricity Grids. CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

[23] **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.

[24] **LIVRE BLANC** Des industriels au service de l’intelligence énergétique « Réseaux électriques intelligents », Edition novembre 2010, Gimélec .