



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :

BILLAMI Cherifa

MEHTARI Meriem

Thème

**Régulation et gestion de l'énergie électrique
dans un micro-réseau intelligent**

Soutenu, le 13/07/ 2021, devant le jury composé de :

Dr. KERBOUA Abdelfettah	MCB	ESSA-Tlemcen	Président
Dr. BOUSMAHA ImenSouhila	MCB	ESSA-Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. ATTOU Nasr Eddine	Doctorant	Univ de SBA	Co-directeur de mémoire
Dr. BOUKLI HACENE Fouad	MCA	ESSA-Tlemcen	Examineur
Dr. LOUCIF Mourad	MCB	Univ de Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2020 / 2021

Remerciement

Nous remercions « Dieu » le tout puissant de nous avoir donné la patience et la volonté d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadrante madame BOUSMAHA Imen Souhil pour sa disponibilité malgré ses occupations et pour tout le temps qu'elle nous a consacré.

Nous adressons nos profonds sentiments de reconnaissance et de respect à notre co-encadreur Monsieur ATTOU Nasr-Eddine pour ses recommandations pertinentes.

Nous tenons à remercier chaleureusement le président et les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Une grande pensée à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents

Tous les mots du monde ne suffisent pas pour vous exprimer mon respect et mon amour

À ma mère, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse. Je te remercie pour tout le sacrifice que tu fais chaque jour pour moi et pour nous trois, tu as toujours été là pour nous.

À mon père, au plutôt à mon complice tu as toujours su me pousser à aller de l'avant à sortir le meilleur de moi-même. Respect, honneur, rage de vaincre étaient les 3 trucs que tu m'as appris dès mon jeune âge.

À ma sœur, quoi que je puisse dire ou faire je ne pourrai jamais exprimer l'amour que j'ai pour toi, tu as toujours été là pour moi un peu trop autoritaire parfois lol. Tu m'as toujours encouragé et défendu.

À mon petit frère (Khewitita), je te souhaite tout le bonheur du monde.

À mes deux grands-mères, merci pour l'éducation que vous m'avez donnée je vous aime d'un amour inconditionnel que Dieu vous garde pour nous.

À un prof qui m'a marqué durant ma scolarité Mr BENACHENOU, je me permets de vous tutoyer, tu n'es pas un simple prof mais un deuxième père merci pour tous.

À mes amis et collègues

Amel, tu as toujours été là à me soutenir et m'encourager merci ma meilleure amie.

Younes, merci pour ta bienveillance, ton soutien, tes encouragements tout au long de mon parcours à l'ESSTAT.

Noor, Farah, Meryem, Wafia, Ilyem, Ghizlen, Ferdous, Moho, Ismat, Fethallah, je vous souhaite tout le bonheur et le succès dans votre vie professionnelle

Brahim et Yahia, merci pour le temps que vous m'avez accordé et pour les précieux conseils

À mon binôme, le meilleur pour la fin merci pour ta patience et ta compréhension et ton soutien et de m'avoir supporté tout au long de ce projet.

Cherifa BILALI.

Dédicaces

Au nom d'Allah le clément et le miséricordieux que je remercie pour son aide et pour la volonté qu'il m'a donné pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant mes années d'études, et d'avoir éclairé mon chemin afin de réaliser ce modeste travail.

Au moment où j'achève ce travail, je pense nostalgiquement aux longues journées de recherches que j'ai troquées, pour un temps, contre de longues soirées de rédaction. Mais je pense avant tout à ceux qui m'ont soutenu et accompagné et je tiens à les remercier.

Je dédie le fruit de mes années d'études aux plus chers au monde à :

A la personne la plus chère pour moi dans ce monde, ma mère qui est la fleur de ma vie, le symbole de l'amour et la tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

C'est avec un immense plaisir que je t'écris ce paragraphe. Les efforts que tu as fait pour moi, le temps que tu m'as donné, les conseils avisés qui éclairent mon chemin... mes remerciements ne pourront jamais égaler ton grand cœur qui m'a apporté du soutien au moment où j'avais besoin d'aide.

Je ne pourrais jamais te remercier à la hauteur de ce que tu m'as donné, tu as toujours été un cadeau dans ma vie.

A mon père qui a fait de moi, ce que je suis aujourd'hui. Je lui dédie mon éternel amour et mes affections totales, lui qui a souhaité vivre longtemps juste pour voir ce que j'allais devenir. Je le remercie pour tout son soutien, sa présence et ses encouragements durant tout le long de mes études.

Ma profonde reconnaissance va à ma sœur Ahlem et mon frère Mohammed el Amine «7ou7i » qui m'ont soutenu, m'ont encouragé sans cesse et pour leur affection, qui m'a rendu la vie vraiment plus agréable.

A mon binôme : Cherifa qui a partagé avec moi ce parcours. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement et l'estime que je porte pour elle.

A mes amies et mes collègues avec qui j'ai eu l'occasion d'interagir, spécialement Sarah, HibetErrahman, Hakim et Charaf. Je remercie particulièrement Salah Eddine, Brahim, Djelloul et Imed pour leur gentillesse et leur serviabilité.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

A toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers.

Meriem MEHTARI

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Transition énergétique des réseaux électriques	
Introduction.....	5
I.1 Réseaux électriques conventionnels.....	5
I.1.1 Structure des réseaux électriques classiques.....	5
I.2 Problèmes liés aux réseaux électriques.....	6
I.2.1 Problèmes environnementaux.....	6
I.2.2 Problèmes d'instabilité électrique.....	7
I.2.2.1 Stabilité en tension.....	8
I.2.2.2 Stabilité en fréquence.....	8
I.2.3 Différentes perturbations sur le réseau.....	8
I.2.4 Problèmes liés à la qualité de l'énergie.....	8
I.2.5 Augmentation des besoins en énergie.....	9
I.2.6 Problèmes de gestion d'énergie	11
I.2.6.1 Problèmes liée à l'intermittence des énergies renouvelables....	
I.2.6.2 Problématique liée aux pics de consommation.....	12
I.2.6.3 Problèmes liée à la conduite du réseau électrique.....	13
I.2.7 Problèmes de stockage d'énergie.....	13
I.2.8 Autres problèmes.....	13
I.3 Evolution des réseaux électriques.....	14
I.3.1 Transition énergétique.....	14
I.3.1.1 Ouverture du marché d'électricité à la concurrence.....	15
I.3.1.2 Objectifs du marché intérieur de l'énergie.....	16
I.3.2 Systèmes flexibles de transport en courant alternatif « FACTS ».....	17
I.3.3 Transport de l'électricité en courant continu haute tension « HVDC ».....	18
I.3.4 Développement de la production distribuée.....	19
I.3.5 Automatisation de la distribution.....	20
Conclusion.....	20

Chapitre II Réseaux électriques intelligents

Introduction.....	25
II.1 Réseaux électriques intelligents « Smart Grid ».....	25
II.1.1 Selon La plate-forme technologique Européenne.....	25
II.1.2 Selon le département de l'énergie de l'administration américaine.....	25
II.2 Technologie de l'information et de la communication (TIC).....	25
II.3 Fonctionnement d'un réseau électrique intelligent.....	26
II.4 Objectifs des réseaux électriques intelligents.....	27
II.5 Architecture d'un réseau électrique intelligent.....	27
II.5.1 Modèle de NIST (National Institute of Standards and Technology).....	27
II.5.2 Modèle de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).....	29
II.6 Caractéristique d'un réseau électrique intelligent.....	30
II.7 Ingrédients de base d'un réseau électrique intelligent.....	30
II.7.1 Compteur intelligent ou communicant.....	30
II.7.2 Actionneurs dans les réseaux.....	30
II.7.3 Dispositifs de coupures rapides et protections intelligentes.....	30
II.7.4 Capteurs performants associés ou non aux dispositifs Existants.....	31
II.7.5 Fonctions avancées de supervision et de contrôle des réseaux.....	31
II.7.6 Dispositifs de stockage de l'énergie.....	31
II.8 Principaux enjeux des réseaux électriques intelligents.....	31
II.8.1 Enjeu industriel.....	31
II.8.2 Enjeu social.....	31
II.8.3 Enjeu économique.....	31
II.8.4 Enjeu environnemental.....	31
II.9 Points forts d'un Smart Grid.....	32
II.9.1 Pilotage de charge et gestion de la demande.....	32
II.9.2 Stratégies d'écrêtement des pointes de charge (Peak Shaving) et le remplissage des vallées (Valley Filling).....	33
II.9.3 Avantages de l'écrêtement des pointes de charge.....	33
II.9.4 Gestion et pilotage global des systèmes électriques.....	34
II.9.5 Production d'énergie distribuée.....	34
II.9.6 Stockage distribué de l'électricité.....	35
II.9.7 Gestion du consomm'acteur dans le secteur résidentiel.....	35

II.9.8	Gestion de la consommation et de la production dans les secteurs tertiaires et résidentiels.....	35
II.9.9	Flexibilité de la demande.....	36
II.10	Phénomène Big Data.....	36
II.11	Cyber-sécurité dans les Smart Grids.....	37
II.12	Intelligence artificielle dans les réseaux électriques intelligents.....	38
II.12.1	Opportunités de l'intelligence artificielle pour l'économie de la consommation d'énergie.....	38
II.12.2	Application de l'intelligence artificielle dans les réseaux locaux.....	39
	Conclusion.....	39

Chapitre III Applications des micro-réseaux intelligents

	Introduction.....	43
III.1	Principaux enjeux des micro-réseaux intelligents.....	43
III.2	Technologie des micro-réseaux intelligents.....	43
III.3	Gestion de l'énergie dans les micro-réseaux intelligents.....	44
III.4	Application des micro-réseaux intelligents.....	44
III.4.1	Compteurs intelligent « Smart Metering ».....	44
III.4.2	Maison intelligente.....	46
III.4.3	Bâtiment intelligent.....	49
III.4.4	Ville intelligente.....	50
III.4.5	Véhicules électriques.....	51
III.5	Recherches récentes.....	53
III.5.1	Révolution de stockage des données AND.....	53
III.5.2	Technologie de route intelligente « Smart Road Technology ».....	54
III.5.3	Véhicules autonomes.....	54
	Conclusion.....	54

Chapitre IV Simulation et discussions

	Introduction.....	57
IV.1	Objectifs de la simulation.....	57
IV.2	Composantes énergétiques du système.....	58
IV.2.1	Système photovoltaïque (PV)	58
IV.2.2	système éolien.....	60
IV.2.3	système de stockage.....	61
IV.2.4	charge variable.....	61
IV.2.5	Réseau principal.....	62
IV.3	Configuration du système.....	62
IV.4	Système de gestion de l'énergie (EMS)	63

IV.4.1 Stratégie de gestion de l'énergie.....	64
IV.4.2 Contraintes.....	64
IV.4.3 Organigramme de gestion de l'énergie.....	66
IV.5 Description de la simulation.....	66
IV.6 Résultats et discussion.....	68
IV.6.1 Premier scenario.....	68
IV.6.2 Deuxième scenario.....	70
IV.6.3 Troisième scenario.....	72
IV.6.4 Quatrième scenario.....	74
IV.6.5 cinquième scenario.....	76
Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	80

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des abréviations

HTB : Haute tension classe A

HTA : Haute tension classe B

BT : Basse Tension

GES : Gaz à Effet de Serre

CO2 : Dioxyde de Carbone

CH4 : Méthane

N2O : Protoxyde d'azote

AIE : Agence Internationale de l'Energie

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

EnR : Energies Renouvelables

FACTS : Flexible Alternatif Current Transmission Systems

HVDC: High Voltage DirectCurrent

CCHT: Courant Continu Haute Tension

SCADA: System of Control And Data Acquisition

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

NIST: National Institute of Standards and Technology

EMS: Energy Management System

DMS: Distribution management System

RTO: Regional Transmission Operator

ISO: Independent System Operator

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

DER: Distributed Energy Resources

GPRS: General Packet Radio service

MDE: Energy Demand Management (EDM)

DSM: Demand Side Management (DSR)

VE: Véhicules Electriques

ESS: Energy Storage System

ADN: Acide DésoxyriboNucléique

ACM: Association or Computing Machinery

GPS : Systèmes de Positionnement Global

USB : Universal serial Bus

CRE :Commission de Régulation de l'Energie

UE : Union Européenne

AMI : Advanced Metering Infrastructure ou Infrastructure de comptage avancée

CPL : Courant Porteur en Ligne

GSM : Global System for Mobile Communications

IoT : Internet of Things ou Internet des objets (IdO)

IP:Internet Protocol

RFID: Radio Frequency Identification ou Identification par Radio Fréquence

V2G: Vehicle to Grid

V2H: Vehicle to Home

V2B: Vehicle to Building

IA: Intelligence Artificielle

ARRB: Australian Road Research Board

EMS: Energy management system

PV : panneaux photovoltaïques

WT :wind turbine (éoliennes)

BESS : Système de stockage d'énergie par batterie

DER :distributedenergyresources

Liste des tableaux

Tableau IV-1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque.....	59
Tableau IV-2 Caractéristiques de l'éolienne.....	60
Tableau IV-3 Valeurs moyennes des différentes mesures prises sur le site.....	67

Liste des figures

Figure I-1 Réseau électrique conventionnel.....	6
Figure I-2 Emission de gaz à effet de serre d'une centrale à charbon.....	7
Figure I-3 Augmentation de consommation d'énergie mondiale.....	9
Figure I-4 Profil de puissance aléatoire générée par la production décentralisée.....	10
Figure I-5 Schéma représentatif d'une pointe de consommation journalière.....	12
Figure I-6 Conduite centralisée des réseaux de distribution.....	12
Figure I-7 Des énergies fossiles aux énergies vertes.....	15
Figure I-8 Exemple d'un système « FACTS ».....	17
Figure I-9 Exemple d'un système « HVDC ».....	18
Figure I-10 SCADA au cœur d'un système de gestion de la distribution.....	20
Figure II-1 Energies polluantes aux énergies vertes.....	23
Figure II-2 Modèle simplifié du Smart Grid.....	24
Figure II-3 Schéma représentatif d'un Smart Grid.....	25
Figure II-4 Schéma conceptuel du Smart Grid proposé par NIST.....	28
Figure II-5 Schéma représentatif d'une pointe de consommation.....	31
Figure II-6 Schéma représentatif des stratégies de Peak Shaving et du ValleyFilling...	32
Figure II-7 Stratégies de gestion de la demande.....	33
Figure II-8 Modèle simplifié d'une production distribuée.....	34
Figure II-9 Stockage de l'énergie photovoltaïque par des batteries.....	34
Figure II-10 Open Data au service des villes intelligentes.....	36
Figure II-11 Cybersécurité : un filet de sécurité pour les Smart Grids.....	36
Figure II-12 Intelligence artificielle dans les Smart Grids.....	37
Figure III-1 L'architecture d'un microgrid.....	42
Figure III-2 Types de raccordement d'un microgrid.....	43
Figure III-3 Exemple d'un compteur intelligent « Smart metering ».....	43
Figure III-4 Relation entre consommateur, fournisseur et gestionnaire deréseau.....	44
Figure III-5 Système de comptage évolué en électricité.....	45
Figure III-6 Open data dans les maisons intelligentes.....	46
Figure III-7 Ecosystème énergétique de la maison.....	46
Figure III-8 Environnements intelligents basés sur l'internet des objets.....	47
Figure III-9 Internet des Objets dans les villes intelligentes.....	47
Figure III-10 Bâtiment intelligent, acteur des réseaux intelligents.....	48
Figure III-11 Open Data au service des villes intelligentes.....	49

Figure III-12 Modèle de bornes de recharges des véhicules électriques.....	51
Figure III-13 Schéma simplifié du véhicule au réseau (V2G).....	51
Figure III-14 Différents modes d'usage des véhicules électriques.....	52
Figure II-15 ADN piste sérieuse pour stocker les données.....	53
Figure IV-1 Puissance délivrée par le champ PV pour 24h.....	59
Figure IV-2 Puissance délivrée par les éoliennes durant 24h.....	60
Figure IV-3 Puissance appelée par la charge en 24h.....	62
Figure IV-4 Système hybride PV-éoliennes-batteries- réseau.....	63
Figure IV-5 EMS proposé pour le micro-réseau intelligent.....	63
Figure IV-6 Organigramme de gestion de l'énergie appliqué pour le microgrid.....	66
Figure IV-7 Puissances échangées entre les sources renouvelables et le réseau sans système de stockage.....	68
Figure IV-8 Point de consigne de la puissance des générateurs.....	69
Figure IV-9 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 24h.....	70
Figure IV-10 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 24h.....	71
Figure IV-11 Point de consigne de la puissance des générateurs.....	71
Figure IV-12 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 48h.....	72
Figure IV-13 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 48h.....	73
Figure IV-14 Puissance échangée entre l'installation et le réseau pendant 48h.....	73
Figure IV-15 Point de consigne de la puissance des générateurs.....	74
Figure IV-16 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 24h.....	75
Figure IV-17 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 24h.....	75
Figure IV-18 Point de consigne de la puissance des générateurs.....	76
Figure IV-19 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 24h.....	77
Figure IV-20 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 24h.....	77
Figure IV-21 Puissance injectée au réseau pendant 24h.....	78
Figure IV-22 Point de consigne de la puissance des générateurs.....	78

Introduction générale

Introduction générale

Grâce à l'évolution des réseaux actuels et dans le but de répondre à la demande croissante en électricité et satisfaire les clients notamment en périodes de pointes, les réseaux électriques d'aujourd'hui sont devenus plus communicants. Ils bénéficient alors des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication. Le réseau électrique intelligent ou Smart Grid est l'un des développements récents dans le domaine d'électricité, il facilite l'utilisation de nouvelles sources d'énergie verte en parallèle avec les sources d'énergie conventionnelles.

Le Smart Grid révolutionne l'infrastructure actuelle du réseau électrique grâce à ces nouvelles technologies de communication permettant ainsi aux fournisseurs et aux clients de transférer, surveiller, prévoir et gérer efficacement la consommation de l'énergie. L'intégration des énergies renouvelables au sein des réseaux électriques pose des défis techniques, l'intermittence de ces ressources peut générer un impact négatif sur la stabilité et la fiabilité du système d'alimentation, ainsi sur la qualité de service fourni aux utilisateurs. Par conséquent, la surveillance et le contrôle des Smart Grids sont essentiels pour garantir un bon fonctionnement.

Toutefois, la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux connectés au réseau principal a connu une évolution rapide ces derniers temps en raison de plusieurs facteurs tels que les problèmes environnementaux, l'augmentation de la demande d'énergie et l'ouverture du marché de l'électricité. Le système de gestion de l'énergie (EMS) permet de programmer de manière optimale les ressources énergétiques et les systèmes de stockage de l'énergie afin de maintenir l'équilibre entre la demande et la production.

Via ce manuscrit, nous allons étudier la régulation et la gestion d'un micro-réseau intelligent. L'objectif est de minimiser les pics du profil de charge et les fluctuations de la production décentralisée d'une part. D'autre part, de tirer le meilleur parti des sources d'énergie renouvelables et des échanges d'énergie avec le réseau électrique. Pour cela nous avons subdivisé notre travail comme suit :

Introduction générale

Au premier chapitre nous allons exprimer les différents problèmes liés au réseau électrique conventionnel ainsi que l'évolution du réseau électrique par la transition énergétique.

Au deuxième chapitre nous allons exposer un aperçu sur l'architecture et les caractéristiques des Smart Grids ainsi que les objectifs pour les quels sont adoptés, par la suite nous parlons sur les enjeux liés à ces réseaux intelligents et les technologies développés pour emmagasiner, sécuriser et réutiliser les mégas data issus de ces réseaux communicants.

Le troisième chapitre sera focalisé sur les microgrids, ces différentes applications et la gestion de l'énergie au sein de ces réseaux, nous allons exposer par la suite les récentes avancées technologiques en matière de gestion des ressources énergétiques distribuées qui ont contribué à créer un nouveau paradigme de réseau, le réseau de distribution à micro-réseau intelligent.

Le quatrième chapitre sera dédié à la simulation d'un système de gestion de l'énergie pour un micro-réseau intelligent connecté au réseau à base de ressources renouvelables (champ photovoltaïque et éoliennes) et un système de stockage (Batteries).

Notre travail s'achèvera par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I
Transition énergétique des réseaux
électriques

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

Introduction

Les réseaux électriques sont traditionnellement exploités d'une manière centralisée. Ainsi, la plus grande partie de la production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques, ...). L'architecture centralisée des systèmes énergétiques actuels résulte d'une évolution historique qui a atteint son sommet au dernier tiers du XX^{ème} siècle, la principale raison provenait des coûts très élevés de la construction et de l'entretien des infrastructures de production, de transport et de distribution de l'électricité. Ce coût financier impliquait indirectement la notion de monopole du réseau

Les réseaux d'électricité sont restés à leur état d'origine et n'ont subi que peu de modifications, mais l'évolution croissante des besoins de l'humanité en matière d'énergie et de service ont conduit progressivement à envisager des améliorations dans la gestion et l'infrastructure des réseaux électriques. La modernisation des réseaux électriques est une nécessité pertinente et absolue pour les objectifs nationaux et internationaux en matière d'économie d'énergie. [1]

Nous présenterons dans ce chapitre l'architecture et les différents problèmes liés au réseau électrique conventionnel ainsi que l'évolution du réseau électrique par la transition énergétique.

I.1 Réseaux électriques conventionnels

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. [1]

I.1.1 Structure des réseaux électriques classiques

Le fonctionnement actuel des réseaux électriques existants est basé sur quatre segments issus de la construction du système électrique global(voir Figure I-1) :

- **La production** : c'est la transformation de l'ensemble des énergies convertibles(renouvelables ou non) en énergie électrique. La production évolue au cours

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

de la journée en mettant à contribution différentes énergies primaires (charbon, pétrole, nucléaire, hydroélectrique, gaz).

-Le réseau de transport haute tension : qui transporte l'énergie sur de grandes distances et assure l'interconnexion entre les centrales de production. Ce réseau doit être bien protégé d'anomalies de fonctionnement comme les surcharges et le court-circuit.

-Les réseaux de distribution moyenne et basse tension qui ont pour rôle de délivrer l'énergie électrique aux utilisateurs.

-La consommation : c'est le stade final du cheminement de l'énergie électrique.

Pour le transport et la distribution, l'énergie électrique transite à travers de systèmes triphasés de tensions (sinusoïdales) dont les caractéristiques sont principalement la fréquence et les valeurs efficaces de tension. Dans le monde entier, la fréquence est normalisée et ne présente que deux valeurs soit 50 Hz comme le cas de la France et 60 Hz comme le cas des états Unis. Les niveaux de tensions normalisées associés à ces quatre parties sont très différents et dépendent des usages. L'énergie électrique produite est directement injectée à très haute tension (HTB à 225 kV et 400kV) sur le réseau de transport (maillé) pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle est ensuite acheminée puis distribuée aux gros consommateurs et au réseau de distribution (radial) à moyenne tension (HTA) et basse tension (BT à 230/400V). [2]

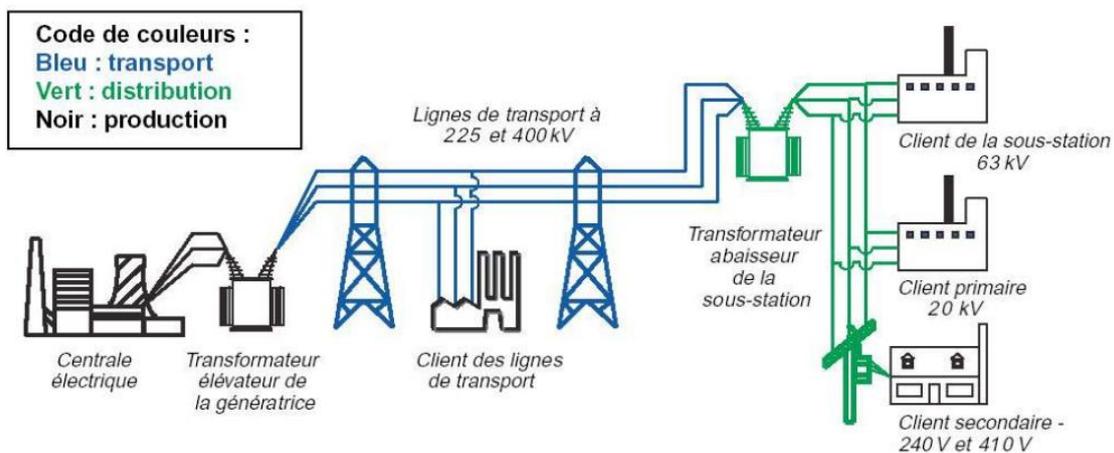


Figure I-1 Réseau électrique conventionnel [2]

I.2 Problèmes liés aux réseaux électriques

I.2.1 Problèmes environnementaux

L'influence des activités humaines sur le climat est sans ambiguïté. Les concentrations mondiales actuelles de gaz à effet de serre (GES) dépassent largement les valeurs préindustrielles, déterminées à partir des carottes de glace couvrant plusieurs milliers d'années. Entre la fin du XV^{ème} siècle et aujourd'hui, la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère a ainsi augmenté de 40 %. Si toutefois le

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

dioxyde de carbone est le principal gaz émis (76 % des émissions), il n'est pas le seul. Le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les gaz fluorés ont aussi un pouvoir réchauffant important, respectivement de 16 %, 6 % et 2 % des émissions. L'augmentation de ces gaz dans l'atmosphère provoque un effet de serre additionnel : les GES laissent passer le rayonnement solaire vers la Terre, mais piègent le rayonnement infrarouge émis par la surface et augmentent ainsi le réchauffement de l'atmosphère.

Ces émissions sont reliées de manière directe au développement industriel, qui a conduit à une utilisation croissante des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) par l'industrie, l'agriculture, les transports ou l'habitat et, dans une moindre mesure, au changement d'utilisation des sols (déforestation). Entre 1970 et 2004, les émissions d'origine anthropique de GES ont ainsi augmenté de 70 %.

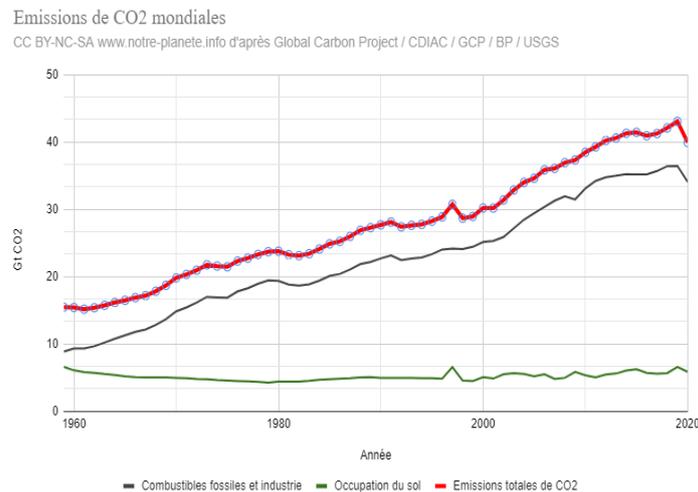


Figure I-2 Emission de gaz à effet de serre d'une centrale à charbon [2]

I.2.2 Problèmes d'instabilité électrique

Une instabilité généralisée du réseau peut conduire à des dégâts matériels (côté production, transport, distribution et clients) et/ou à la mise hors tension d'une partie ou de l'ensemble du réseau.

Les phénomènes électriques qui influencent la stabilité d'un réseau sont généralement liés à des variations de puissance. Naturellement, toutes les perturbations liées à l'exploitation d'un réseau peuvent devenir source d'instabilité du fait des impacts de tension ou de courant qu'ils produisent. Néanmoins, d'autres causes plus "structurelles" peuvent augmenter les risques de départs d'instabilités. Ainsi, les charges à puissance constante sont susceptibles de donner naissance à une instabilité, tout comme les convertisseurs ayant un filtre d'entrée. Enfin, l'interconnexion de plusieurs charges sur un même bus peut aussi générer des instabilités. [2]

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

Dans un système électrique, la variation de tension est liée à la réactivité de flux de puissance, tandis que la variation de fréquence est déterminée par le taux de changement dans le flux d'énergie réel. Le lissage de la tension et les fluctuations de fréquence peuvent ainsi être réalisées grâce au contrôle de la puissance réactive et de la puissance réelle, respectivement. Dans la stabilité d'un réseau, nous distinguons deux types :

- La stabilité en tension.
- La stabilité en fréquence.

I.2.2.1 Stabilité en tension

La stabilité en tension est l'aptitude d'un réseau d'énergie à maintenir la tension dans les plages requises au niveau de tous les nœuds du réseau, en conditions d'exploitation normales ou perturbées.

I.2.2.2 Stabilité en fréquence

La stabilité en fréquence se rapporte au synchronisme des alternateurs et à l'équilibre entre la production et la consommation de la puissance active. Pour assurer donc un fonctionnement normal d'un réseau, il faut que la puissance totale fournie par l'ensemble des machines raccordées au réseau compense exactement la totalité de la puissance demandée et les pertes dans le réseau.

I.2.3 Différentes perturbations sur le réseau

Les réseaux de distribution sont touchés par différents types de perturbations. Ces perturbations peuvent les affecter de manière permanente (harmoniques, papillotement...) ou seulement ponctuelle à la suite d'évènements. Cette seconde catégorie de perturbations est liée soit au fonctionnement du réseau en présence de défauts, soit à son fonctionnement normal. Parmi les évènements les plus courants figurent les courts-circuits, les enclenchements de départs, les connexions de batteries de condensateurs, les connexions de charges ou de productions décentralisées, les démarrages de moteur, etc. [3]

I.2.4 Problèmes liés à la qualité de l'énergie

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

-Les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker).

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

- Les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale.
- Les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter harmoniques, bruits).
- La dissymétrie du système triphasé : déséquilibre. [4]

I.2.5 Augmentation des besoins en énergie

L'Agence Internationale de l'Énergie AIE prédit une hausse de la consommation mondiale d'énergie dans le monde dans les 25 ans à venir : cette dernière pourrait croître d'un tiers entre 2013 et 2040 selon le scénario de référence de l'AIE. Cette hausse de la demande proviendrait entièrement des pays n'appartenant pas à l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), sujets à une forte croissance démographique et économique (voir Figure I-3).

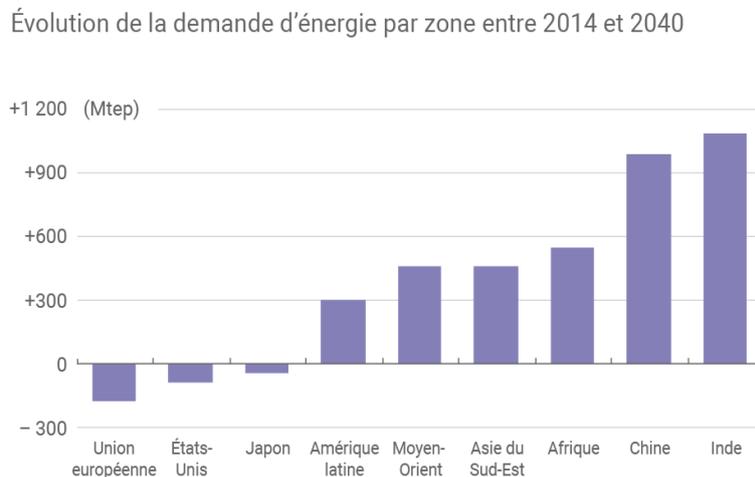


Figure I-3 Augmentation de consommation d'énergie mondiale

Au niveau mondial, la demande d'énergie devrait augmenter d'environ 1% par an d'ici 2040, soit un rythme moitié moins rapide que le taux de croissance depuis 1990. Une partie de la hausse de cette demande est imputable à la forte croissance de la consommation d'électricité (+70% entre 2013 et 2040). Malgré les efforts d'électrification, l'AIE estime qu'environ 550 millions de personnes dans le monde (pour la plupart en Afrique subsaharienne) n'auront toujours pas accès à l'électricité en 2040.

I.2.6 Problèmes de gestion d'énergie

I.2.6.1 Problèmes liée à l'intermittence des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables, essentiellement éoliens ou solaires, sont promis à un développement important, mais ils sont intermittents, et plus ou moins irréguliers et imprévisibles. La production d'énergie renouvelable photovoltaïque et éolienne,

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

est sujette à des variations de disponibilité du fait de l'intermittence de la ressource primaire (voir Figure I-4). Malgré cette contrainte, les capacités de production doivent être maintenues.

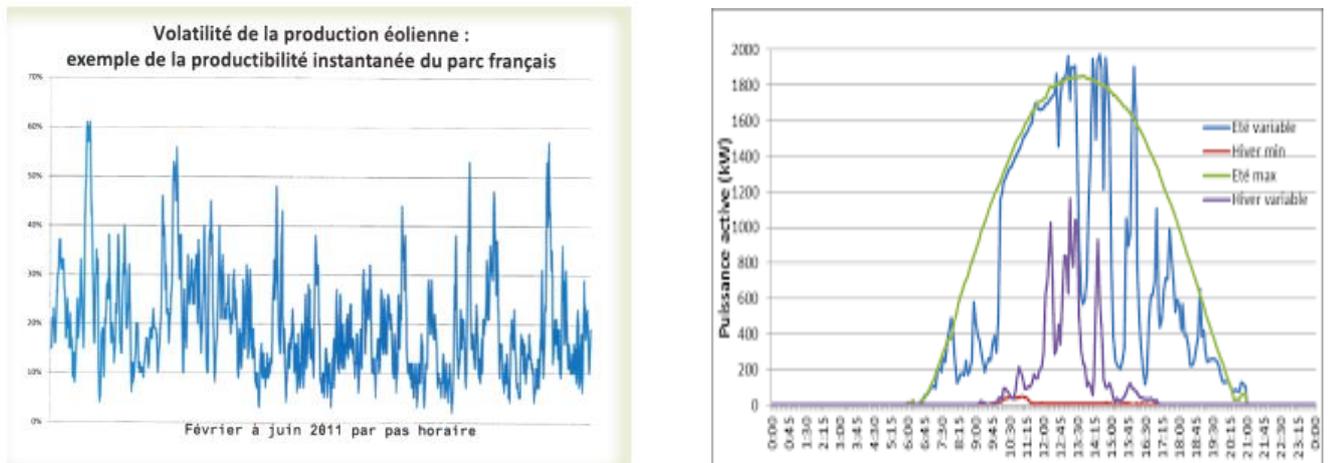


Figure I-4 Profil de puissance aléatoire générée par la production décentralisée [5]

Ainsi, des capacités de production de remplacement dans le cas où les énergies renouvelables ne peuvent pas répondre à la demande, doivent pouvoir démarrer quasi instantanément. Elles sont coûteuses et polluantes puisqu'elles sont dans leur très grande majorité à gaz. Le réseau électrique actuel devra donc être piloté de manière plus flexible pour gérer ces contraintes. [5]

Fondamentalement, l'insertion massive des énergies renouvelables (EnR) pose des problèmes d'ordre technique qui concernent en premier lieu les gestionnaires de réseaux. La première question que posent l'éolien aujourd'hui et le photovoltaïque demain, est celle de la localisation. Elle conduit à un afflux de puissance sur des réseaux qui n'étaient pas organisés et dimensionnés pour la recevoir. La seconde question relève de la gestion des moyens de production intermittents dans le système électrique. Pour des taux de pénétration relativement faibles, inférieurs à 10%, l'impact de la production intermittente reste limité et peut être pris en charge par le système électrique. En revanche lorsque leur proportion augmente, des moyens de production complémentaires doivent être mobilisés pour compenser d'éventuels déséquilibres ou défauts de capacité. [5][6]

Ceci nécessite donc de mettre en œuvre de nouveaux systèmes de pilotage et de contrôle de ces moyens de production pour amener une flexibilité opérationnelle suffisante. [7]

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

Cette intermittence est un problème majeur pour les distributeurs d'électricité qui ont besoin de sources constantes et à tout moment de quantités prévisibles d'électricité disponible.

I.2.6.2 Problématique liée aux pics de consommation

Le problème majeur de l'exploitation du réseau électrique est donc de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle d'énergie électrique, celle-ci ne peut pas être stockée en grande quantité. Les paramètres influençant la consommation d'électricité sont essentiellement la météo et l'activité économique.

Les pointes de consommation électriques sont les moments de la journée, ou de la saison, pendant lesquels la consommation d'électricité est la plus forte. On distingue donc les pointes journalières et les pointes saisonnières. Le problème majeur de l'exploitation du réseau électrique est donc de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle d'énergie électrique.

La durée de cette pointe est plutôt courte, de l'ordre de quelques heures. Elle nécessite néanmoins la plupart du temps le démarrage de moyens de production d'électricité de pointe ayant la capacité de produire rapidement et en masse. Il s'agit de centrales à fioul.

Traditionnellement, les réseaux électriques ont répondu à l'augmentation de la consommation de pointe anticipée à long terme par la construction de nouvelles infrastructures de production, de transport et de distribution.

Des consommations élevées engendrent des risques de blackout dues à la surcharge d'alimentation (et une augmentation du prix de l'électricité). Mais pas seulement, cette surconsommation a un effet négatif sur l'environnement, car il faut savoir qu'il existe un ordre de priorité dans la production d'électricité. Tout d'abord elle est produite par l'hydraulique des lacs, les centrales thermiques à cogénération, les centrales nucléaires, les centrales thermiques, et enfin l'hydraulique des rivières (voir Figure I-5). Les centrales thermiques utilisent des combustibles fossiles (ressource non renouvelable) et il y a également une émission accrue de gaz à effet de serre.

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

NOTRE DÉFI À DEUX POINTES

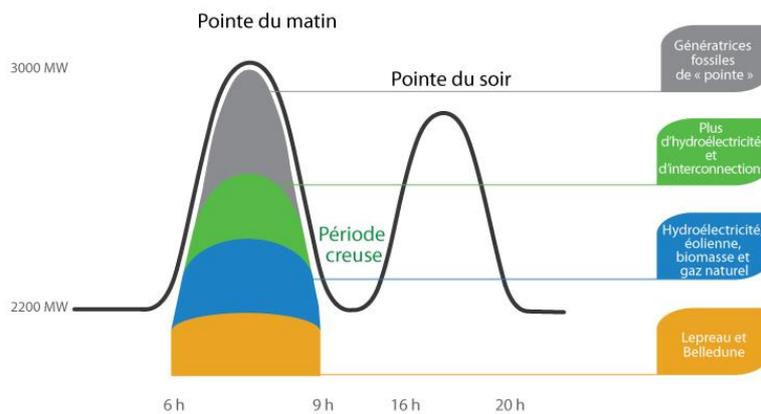


Figure I-5 Schéma représentatif d'une pointe de consommation journalière

I.2.6.3 Problèmes liée à la conduite du réseau électrique

La conduite du réseau comprend l'ensemble des actions réalisées afin de maintenir la fourniture à un bon niveau de qualité et rétablir la distribution d'électricité lorsque celle-ci a été interrompue (voir Figure I-6). De nos jours, les actions principales de conduite concernent :

- La réalimentation des consommateurs affectés par l'apparition d'un défaut.
- Le réglage de la tension.

Différentes actions peuvent être conduites afin de délivrer aux clients la tension dans des limites contractuelles. Ces actions de conduite sont réalisées à partir d'un poste de conduite de distribution qui communique, à travers un système de communication, avec des organes manœuvrables à distance (i.e. un interrupteur télécommandé sur le réseau) ou sur le terrain par des actions sur les organes manœuvrables manuellement. On constate aujourd'hui, et dans la plupart des réseaux, une convergence d'information dans un point central (le poste de conduite). Le poste de conduite représente donc un point où convergent les informations nécessaires à la conduite. [8]

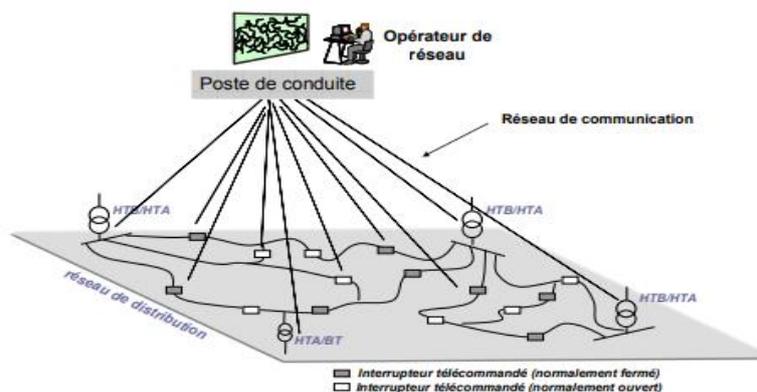


Figure I-6 Conduite centralisée des réseaux de distribution [8]

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

I.2.7 Problèmes de stockage d'énergie

Plusieurs pistes sont aujourd'hui explorées par les chercheurs pour proposer des solutions de stockage de l'électricité plus performantes. La disponibilité du stockage à un coût compétitif et à grande échelle serait un facteur clé pour répondre à l'accroissement de la pénétration des énergies renouvelables et à la variabilité de la demande. Si des technologies de stockage existent aujourd'hui, leur intégration soulève encore quelques interrogations.

En premier lieu, leur localisation et leur taille. Le stockage a en effet une fonction transversale sur le réseau. La question se pose de savoir s'il est plus efficace d'intégrer de nombreuses unités de stockage de petite taille sur le réseau de distribution au niveau de la production décentralisée et au plus près de la consommation ou quelques unités de stockage de grande dimension, éventuellement au niveau du quartier ou des sources de production renouvelables à plus grande échelle.

En second lieu, les technologies les plus adaptées aux besoins. En effet, selon le niveau d'intégration dans le réseau et la taille de l'application, différents modes d'utilisation peuvent être envisagés, ce qui implique un profil d'usage en matière de puissance appelée et de durée de l'appel de puissance (réglage en fréquence, réserve primaire, lissage de pointe, etc.). Ainsi, chaque type d'application et lieu d'intégration aura une traduction technique en matière de puissance chargée et déchargée dans le stockage, de quantité d'énergie à stocker (et donc de durée de la charge ou décharge) ainsi qu'en matière de longévité du système de stockage. En outre, les contraintes opératoires ont un impact sur le choix de la technologie. [6]

I.2.8 Autres problèmes

- Vieillesse de l'infrastructure du réseau en raison des contraintes budgétaires qui ont empêché son renouvellement et les questions de sécurité qui l'accompagnent.
- La limitation et l'insuffisance des centrales de production existantes qui dépendent totalement des générateurs à combustibles fossiles de grandes capacités qui ont un impact négatif sur l'environnement soit à cause de l'émission de l'oxyde de carbone ou le problème des déchets radioactifs.
- Le système électrique avec le concept actuel n'accepte pas l'intégration des ressources renouvelables et la production décentralisée à grande échelle de plus il est incapable de gérer la situation lors de l'occurrence des événements climatiques (tels que la chute des arbres sur les lignes de transports et les tornades).
- L'augmentation des pertes dans le réseau accompagné d'un faible rendement des centrales de production.

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

- La concentration d'une grande quantité de puissance produite en un seul endroit.
- L'augmentation de la demande en énergie et réduction de la compétitivité mondiale.
- **Pertes non-techniques (Fraudes) :**

En raison de l'augmentation du coût de l'électricité et la difficulté de paiement, le vol d'énergie devient une préoccupation majeure pour les compagnies de l'électricité à travers le monde. La grande partie de ces pertes de recettes peut être récupérée par l'installation des compteurs d'énergie électroniques, car ils peuvent détecter les différents types de fraude.

La fraude en matière d'électricité consiste de manière générale, en toute tentative de soustraction du courant du réseau électrique sans que la consommation soit officiellement comptabilisée. En effet, plusieurs consommateurs d'énergie électrique font des installations pour éviter que toute ou partie de l'énergie consommée ne soit pas enregistrée au compteur et donc facturée.

-Surfacturation :

La première chose que l'on a en tête en recevant une **facture avec un montant injustifié** est de se dire que c'est la faute du fournisseur. Cela peut arriver, mais c'est dans les faits rarement le cas.

En effet, cela ne peut être la faute du fournisseur que si celui-ci a un problème dans ses systèmes informatiques, qui factureraient automatiquement des sommes extravagantes.

Les causes principales de la surfacturation sont le courant de fuite, le compteur électrique défectueux, le vol d'électricité... elles sont nombreuses et bien souvent méconnues des consommateurs.

I.3 Evolution des réseaux électriques

Le développement des sources d'énergie a eu un impact fort sur le fonctionnement traditionnel des grands systèmes, tant au niveau des réseaux de transport que des réseaux de distribution. Cette complexité de structure, à la base des problèmes actuels rencontrés dans la conduite en ligne et essentiellement l'affaiblissement de la capacité des réseaux à garder la stabilité suite à un défaut, a favorisé l'appel des moyens de contrôle.

I.3.1 Transition énergétique

La transition énergétique consiste en une série de changements majeurs dans les systèmes de production de l'énergie et sa consommation. Elle est une partie prenante des stratégies de développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique. La

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

transition énergétique s'appuie sur les progrès technologiques et les volontés politiques au sens large (gouvernements, populations, acteurs économiques...). Les programmes mis en place se fondent principalement sur le remplacement progressif des énergies fossiles et du nucléaire par un mix énergétique privilégiant les énergies renouvelables, ainsi que sur une réduction de la consommation, une politique d'économies d'énergie et de réduction des gaspillages énergétiques, notamment via l'amélioration de l'efficacité énergétique et les évolutions comportementales en termes de consommation. Le transfert de certains usages énergétiques vers l'électrique (comme la voiture électrique) est aussi un volet de la transition énergétique.

Le concept de transition énergétique est apparu en 1980, en Allemagne et en Autriche, sous la forme d'un livre blanc, suivi à Berlin du premier congrès sur le sujet. Le passage progressif des énergies carbonées, polluantes ou à risque, aux énergies propres, renouvelables et sans danger (solaire, éolienne, géothermique, hydraulique et marémotrice), répond à une série d'enjeux complémentaires :

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Sécurisation des systèmes énergétiques (à terme, abandon du nucléaire).
- Décentralisation et réaménagement des infrastructures, avec une meilleure répartition d'emplois non délocalisables.
- Diminution de la consommation (efficacité énergétique).
- Réduction des inégalités de l'accès à l'énergie et progrès de l'indépendance énergétique.
- Protection de la santé des populations.



Figure I-7 Des énergies fossiles aux énergies vertes

I.3.1.1 Ouverture du marché d'électricité à la concurrence

Depuis l'ouverture totale à la concurrence des marchés de l'électricité, les consommateurs peuvent choisir librement leur fournisseur d'énergie. Conséquences de

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

cette ouverture, les fournisseurs non historiques, dits alternatifs, sont entrés sur le marché de détail de l'électricité et les consommateurs peuvent choisir entre deux types d'offres : Les offres de marché dont les prix sont fixés librement par les fournisseurs et les offres de marché dont les tarifs réglementés de vente sont fixés par les pouvoirs publics et proposés par les fournisseurs historiques.

L'injection d'une production décentralisée peut favoriser la concurrence sur les marchés de l'énergie, cette concurrence étant de nature à permettre une baisse du prix de l'énergie électrique. [9]

I.3.1.2 Objectifs du marché intérieur de l'énergie

La réalisation du marché unique, qui s'inscrit dans le cadre de la politique énergétique, est une priorité de longue date de la Communauté. L'objectif principal de la politique énergétique de la Communauté européenne est d'assurer une sécurité d'approvisionnement de l'énergie à un prix abordable à tous les consommateurs, dans le respect de la protection de l'environnement et de la promotion d'une concurrence saine sur le marché européen de l'énergie.

La sécurité d'approvisionnement et la protection de l'environnement ont revêtu une grande importance pendant ces dernières années. En particulier, la signature du protocole de Kyoto en 1997 sur le changement climatique a renforcé l'importance de la dimension environnementale et du développement durable dans la politique énergétique communautaire.

Sous l'effet principal de la transition énergétique, de la révolution numérique et de l'ouverture du secteur à la concurrence, le paysage énergétique connaît des transformations majeures. D'une gestion des réseaux d'énergie centralisée et unidirectionnelle, allant des sites de production aux sites de consommation, on s'achemine vers une gestion répartie et bidirectionnelle.

En 2009, l'Union européenne s'est engagée à atteindre l'objectif dit des « 3×20 » d'ici 2020 : l'accroissement du recours aux énergies renouvelables à 20% de la consommation d'énergie primaire de l'Union, la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20% par rapport aux niveaux de 1990 et l'accroissement de l'efficacité énergétique afin d'atteindre l'objectif d'une réduction de 20 % de la consommation d'énergie primaire de l'Union par rapport aux projections d'ici à 2020 auront des conséquences importantes pour le secteur énergétique. [9]

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

I.3.2 Systèmes flexibles de transport en courant alternatif « FACTS »

Ces technologies permettent de changer la forme de l'électricité et sont essentielles pour raccorder les liaisons à courant continu, gérer les flux d'énergie des réseaux maillés, les plans de tension et la qualité de l'onde.

L'augmentation des transits de puissance dans les réseaux d'énergie électrique ainsi que les contraintes environnementales ont conduit à l'introduction des dispositifs FACTS (Flexible Alternatif Current Transmission Systems) pour l'amélioration de l'exploitation des réseaux (voir Figure I-8).

Un système de transmission flexible en courant alternatif, est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la répartition des charges dans le réseau en améliorant ainsi la capacité de transit et en réduisant les pertes, pour contrôler la tension en un point ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité et des groupes de productions qui y sont connectés. Il peut également filtrer certaines harmoniques et donc améliorer la qualité de l'électricité.

Ces dispositifs sont capables de remplir diverses fonctions comme le maintien de la tension, le contrôle des flux de puissance, l'amélioration de la stabilité du réseau, l'augmentation de la puissance transmissible maximale, etc. De plus, grâce à leur temps de réponse rapide, ils sont apparus comme des outils efficaces pour l'amortissement des oscillations électromécaniques très basses fréquences. Cette nouvelle fonction des dispositifs FACTS est d'autant plus importante que les réseaux mondiaux sont de plus en plus interconnectés.



Figure I-8 Exemple d'un système « FACTS » [6]

Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.

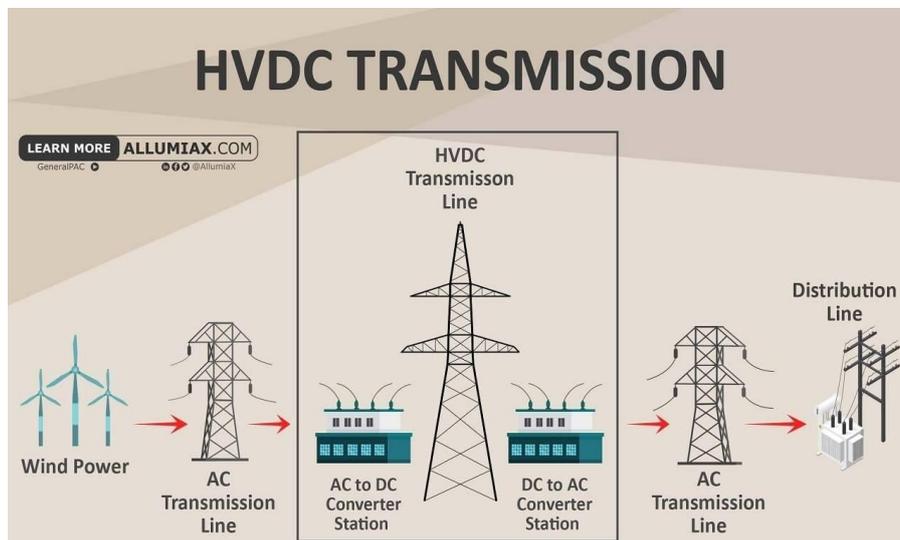
Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

- Compenser l'énergie réactive.
- Amortir les oscillations de puissance.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.
- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.
- Améliorer des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.
- Permettre un meilleur contrôle et une meilleure gestion de l'écoulement de puissance.
- Augmenter la capacité de transmission de puissance des lignes en s'approchant des limites thermiques de celle-ci. [6]

I.3.3 Transport de l'électricité en courant continu haute tension « HVDC »

Le courant continu haute tension (CCHT), en anglais HVDC (High Voltage DirectCurrent) est une technologie d'électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant continu haute tension (voir Figure I-9). Son principal intérêt est de permettre le transport d'électricité sur de longues distances, avec moins de pertes. Par ailleurs, c'est l'unique possibilité pour transporter de l'électricité par câbles enterrés sous-marins sur des distances supérieures à environ 50 km. En effet, la puissance réactive produite par le caractère capacitif du câble, s'il est alimenté par du courant alternatif, finit par empêcher le transport de la puissance active. [6]

D'autres avantages de la technologie HVDC, ils peuvent également justifier les choix sur des liaisons plus courtes : facilité de réglage, influence sur la stabilité et possibilité de régler la puissance transmise notamment.



Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

Figure I-9 Exemple d'un système « HVDC »

I.3.4 Développement de la production distribuée

La transition énergétique bouleverse le fonctionnement du réseau électrique historique. La conception des réseaux de distribution avait pour objectif de conduire l'énergie électrique de la très haute tension vers la moyenne et basse tension par une structure en arborescence.

L'intégration des EnR sur les réseaux électriques nécessite une adaptation des infrastructures et de la gestion du système électrique. L'électricité des installations d'EnR est le plus souvent erratique, décentralisée, leur développement implique un passage vers un réseau bidirectionnel et prédictible.

Les productions de type photovoltaïque ne sont pas corrélées avec la consommation. Il est donc nécessaire de disposer d'un pilotage à la demande et de moyens de stockage afin de ne pas perdre l'énergie produite. Ces parcs d'EnR, pilotés par des outils numériques, sont appelés centrales virtuelles.

Elles agissent et réagissent en temps réel afin de compenser les inconvénients des EnR par une rapidité d'adaptation et de calcul de prévision. Les données utiles pour la gestion de l'ensemble du réseau proviennent à la fois du parc d'EnR que du réseau de distribution et de la demande instantanée en énergie. En fonction de ces informations, des algorithmes d'aide à la décision déterminent le coût optimal de la production électrique et les priorités d'utilisation de cette production. Il peut également fournir des prévisions à court terme et aider le fournisseur d'électricité et le gestionnaire de réseau à se préparer aux pointes de consommation.

Plus la taille et le nombre de centrales virtuelles augmentent, plus la gestion en temps réel de la production sera complexe et pourra provoquer d'importants dégâts en cas de mauvaise décision. En développant l'observabilité, le pilotage et la flexibilité, les Smart Grids permettront de mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables. Mais les EnR ne sont pas l'unique challenge à surmonter pour créer des Smart Grids. Les interactions sont multiples et la gestion des EnR est corrélée avec celle des batteries et de la demande. Le 100 % renouvelable ne pourra se faire qu'avec les outils de communication et d'aide à la décision adéquats au Smart Grid. [10]

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

I.3.5 Automatisation de la distribution

L'automatisation de la distribution couvre un large éventail d'implémentations, de la simple télécommande modernisée, ou l'application d'appareils intelligents hautement intégrés, à l'installation de systèmes complets. Le terme automatisation lui-même suggère que le processus est autocontrôlé. L'industrie de l'électricité a adopté la définition suivante : Un ensemble de technologies qui permettent à un service public d'électricité de surveiller, de coordonner et d'exploiter à distance les composants de distribution en mode temps réel à partir d'endroits éloignés.

Les solutions d'automatisation de la distribution font appel à des capteurs et à des commutateurs numériques dotés de technologies évoluées de contrôle et de communication pour automatiser la commutation des lignes électriques, la surveillance de la tension et de l'état des équipements, ainsi que la gestion des pannes, de la tension et de la puissance réactive (voir Figure I-10) [9].



Figure I-10 SCADA au cœur d'un système de gestion de la distribution [9]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur l'architecture et les principaux problèmes liés aux réseaux électriques, ainsi que l'évolution de ces réseaux avec la transition énergétique.

Afin de continuer à favoriser l'intégration des énergies renouvelables, les réseaux doivent être gérés de manière plus réactive et respectueuse des contraintes d'équilibre. Ceci est à la base du concept de Smart Grid. [11]

Les récentes avancées technologiques en matière de gestion des ressources énergétiques distribuées ont contribué à créer un nouveau paradigme de réseau, le réseau de distribution à micro-réseau intelligent.

Chapitre I : Transition énergétique des réseaux électriques

La technologie des réseaux intelligents promet de rendre les systèmes électriques mondiaux plus sûrs, fiables, efficaces, flexibles et durables. Elle permet d'atteindre ces objectifs grâce à l'intégration des réseaux d'information et de communication. Des algorithmes intelligents pour la collecte et le traitement de l'information sont et seront développés pour fournir un contrôle automatisé du réseau électrique. [12]

Chapitre II

Réseaux électriques intelligents

Introduction

Le système d'alimentation électrique de la prochaine génération, connu sous le nom de "réseau intelligent", est une solution prometteuse à l'évolution à long terme du secteur. Le réseau intelligent devrait révolutionner la production, la transmission et la distribution d'électricité en permettant des flux bidirectionnels de l'énergie électrique. En outre, il peut compléter le système de réseau électrique actuel en incluant des ressources d'énergie renouvelables qui sont plus propres pour l'environnement que les combustibles fossiles. Il intègre ainsi au réseau les avantages de l'informatique et des communications distribuées pour fournir des informations en temps réel et permettre l'équilibre quasi instantané de l'offre et de la demande au niveau des appareils. [13]

Ce chapitre fait l'objet d'une vue globale sur le nouveau paradigme de réseau, son architecture, son fonctionnement ainsi que ses points forts et ses enjeux.

II.1 Réseaux électriques intelligents « Smart Grid »

Le Smart Grid est le nom donné au réseau électrique du futur, communicant (ou intelligent), dont les différents éléments sont reliés non seulement physiquement par des lignes haute, moyenne et basse tension, mais également virtuellement par l'intermédiaire de compteurs et autres appareils communicants. Le réseau électrique physique se double ainsi d'un réseau de communication, tirant profit du développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). [6]

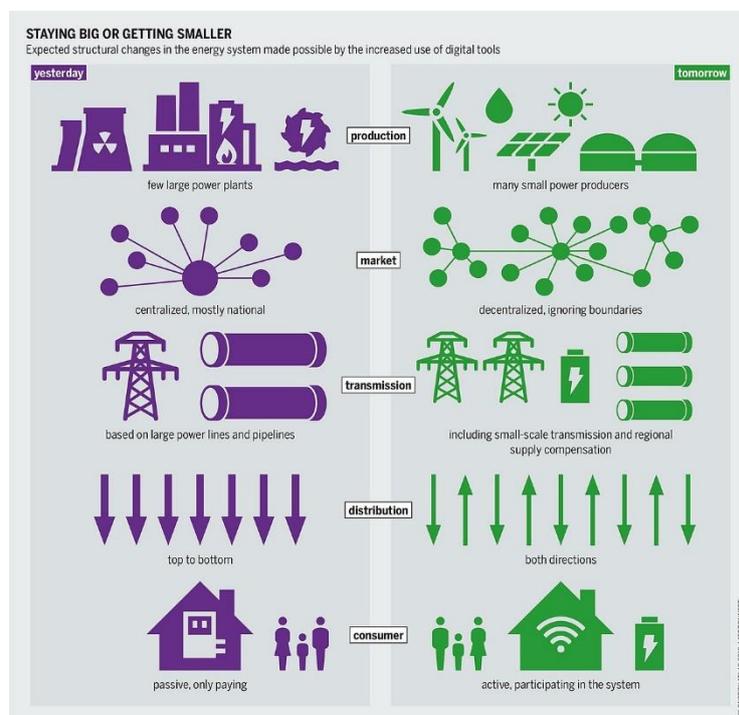


Figure II-1 Energies polluantes aux énergies vertes [6]

Il existe actuellement plusieurs définitions des réseaux électriques intelligents et également plusieurs objectifs pour une même définition des réseaux électriques

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

intelligents. Toutefois, l'ensemble des définitions s'accorde à dire que la communication bidirectionnelle est une des clés des futurs réseaux intelligents. [6]

II.1.1 Selon La plate-forme technologique Européenne

« Les réseaux intelligents », visent à intégrer de manière efficiente les actions de l'ensemble des utilisateurs (producteurs et consommateurs) afin de garantir un approvisionnement électrique durable, sûr et au moindre coût ». [14]

II.1.2 Selon le département de l'énergie de l'administration américaine

Le réseau intelligent est comme « un réseau auto-cicatrisant, qui permet une participation active des consommateurs, qui est résilient aux attaques malicieuses et aux catastrophes naturelles, intègre toutes les sources de production et de stockage, accommode de nouveaux produits, services et marchés, optimise l'utilisation des infrastructures, fonctionne efficacement et fournit une qualité d'alimentation pour l'économie numérique ».

Le système électrique sera piloté de manière plus flexible pour gérer les contraintes telles que l'intermittence des énergies renouvelables et le développement de nouveaux usages tels que le véhicule électrique. Ces contraintes auront également pour effet de faire évoluer le système actuel, vers un système où l'ajustement se fera davantage par la demande, faisant ainsi du consommateur un véritable acteur. [15]

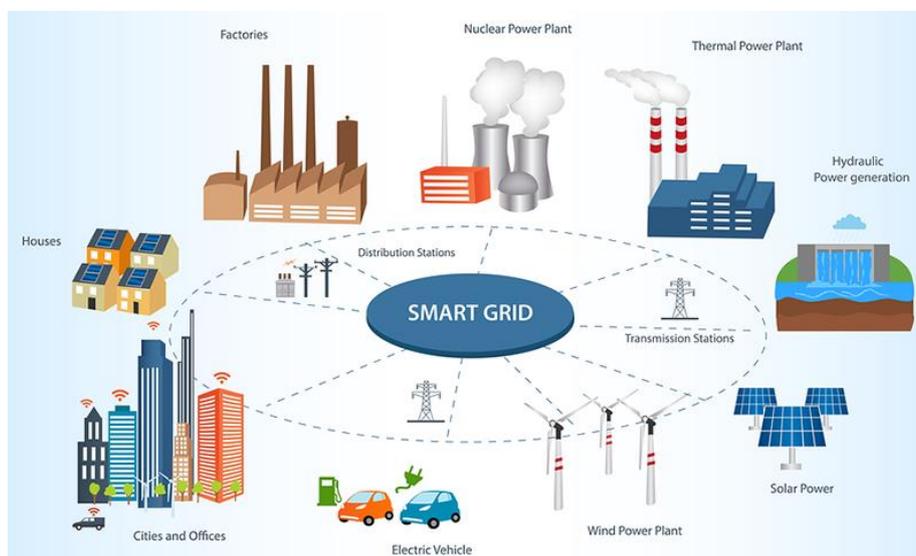


Figure II-2 Modèle simplifié du Smart Grid

II.2 Technologie de l'information et de la communication (TIC)

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) regroupent l'ensemble des outils, services et techniques utilisés pour la création, l'enregistrement, le traitement et la transmission des informations. Il s'agit donc principalement de l'informatique, d'Internet, de la radiotélévision (en direct et en différé) et des

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

télécommunications. Ainsi, la possibilité d'installer chez le client final des organes de comptage et de gestion de l'énergie qui disposent d'une communication bidirectionnelle avec les différents acteurs du réseau et même d'une intelligence embarquée qui change la vision d'avenir de ces réseaux comme montré sur la figure II-3

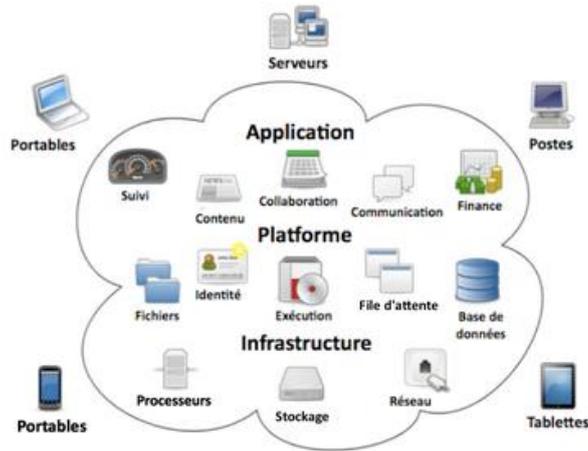


Figure II-3 Schéma représentatif d'un Smart Grid[9]

Un intérêt particulier est associé aux fonctions suivantes :

- Le compteur communicant avec ses différentes variantes bidirectionnelles, avec ou sans logiciels de pilotage de la consommation et d'offre de service.
- L'intelligence associée aux divers composants de consommation domestique, tertiaire ou industrielle en lien avec l'efficacité énergétique ou la sécurité du réseau lui-même.
- L'observabilité, la supervision et le pilotage du réseau en lien avec la production et la consommation intégrant la sécurité en temps réel.
- L'intelligence portée par des « objets » au sein du réseau électrique caractérisant la chaîne suivante : mesurer, analyser, décider, agir, communiquer.

Ces développements concernent donc un large éventail de technologies et touchent l'ensemble des acteurs qui interagissent au sein du système électrique. [2]

II.3 Fonctionnement d'un réseau électrique intelligent

Au sens large, un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue.[13]

-Un contrôle des flux en temps réel : des capteurs installés sur l'ensemble du réseau indiquent instantanément les flux électriques et les niveaux de consommation.

-L'interopérabilité des réseaux : Le réseau de transport relie les sites de production d'électricité aux zones de consommation. Le réseau de distribution s'apparente aux axes secondaires. Il achemine l'électricité jusqu'aux consommateurs finaux, par l'échange instantané d'informations.

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

-L'intégration des énergies renouvelables au réseau : les réseaux intelligents reposent sur un système d'information qui permet de prévoir à court et à long terme le niveau de production et de consommation.

-Une gestion plus responsable des consommations individuelle : les compteurs communicants fournissent des informations sur les prix, les heures de pointe de consommation, la qualité et le niveau de consommation d'électricité du foyer.

II.4 Objectifs des réseaux électriques intelligents

En réponse à ces nouvelles problématiques, les réseaux électriques intelligents se situent à la convergence des technologies des systèmes électriques et des TIC intégrées au sein du système électrique et aux stratégies de gestion de ce système complexe.

L'ADEME soutient le développement des réseaux électriques intelligents, en couvrant les enjeux suivants :

- La maîtrise de la demande avec des consommateurs plus actifs dans la gestion de leur consommation.
- L'insertion massive et décentralisée de moyens de production renouvelable sur les réseaux, tout en limitant les coûts de raccordement et le déploiement de nouvelles lignes.
- L'optimisation des réseaux de distribution et de transport.
- L'insertion de nouveaux besoins vertueux pour l'environnement, mais fortement consommateurs en puissance. [9]

II.5 Architecture d'un réseau électrique intelligent

Différents modèles d'architectures des Smart Grids sont envisagés :

II.5.1 Modèle de NIST (National Institute of Standards and Technology)

L'architecture de communication du Smart Grid selon NIST regroupe sept (07) domaines (figure II-4). Ces domaines sont connectés entre eux par un réseau internet via des protocoles de communications. [15]

A. Clientèle (Customer Domain)

Le domaine de la clientèle « Customer Domain » contient les utilisateurs finaux de l'électricité. Il peut également générer, stocker et gérer l'utilisation d'énergie, ce domaine se divise en trois sous domaines Résidentiel, Commercial et Industriel.

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

B. Marchés (Markets Domain)

Ce domaine se compose de détaillants qui fournissent de l'électricité aux utilisateurs, fournisseurs et commerçants.

C. Fournisseur de services (Service Provider)

Ce domaine fournit l'électricité aux clients et services publics. Il gère des services comme la facturation et la gestion des profils des clients, il communique avec le domaine d'opérations pour obtenir les informations de consommation, de connaissance de la situation et de contrôle du système et il communique avec les réseaux de communication domestique pour fournir des services intelligents.

D. Fonctionnement (Operation)

Ce domaine contient les gestionnaires de la circulation de l'électricité. Il est responsable du bon fonctionnement du système d'alimentation, il gère les opérations efficaces et optimales des domaines de transport (EMS) « Energy Management System » et de distribution (DMS) « Distribution Management System ».

E. Production (Bulkgeneration)

Ce domaine contient les grands producteurs d'énergie. Il peut également stocker l'énergie pour une distribution ultérieure, il est connecté au domaine du transport.

F. Transport

Il contient les transporteurs de grandes quantités d'électricité sur des longues distances. L'électricité produite est transmise au domaine de la distribution par l'intermédiaire de multiples sous stations et lignes de transmission. Le transport est généralement exploité et géré par un RTO ou un ISO.

G. Distribution

Le domaine de la distribution prend la responsabilité de délivrer l'électricité aux consommateurs d'énergie en fonction des demandes des utilisateurs et la disponibilité de l'énergie.

Dans l'architecture de NIST, chaque consommateur peut produire de l'électricité en utilisant les ressources renouvelables. Le surplus d'énergie produite est géré par le consommateur lui-même, la gestion du surplus d'énergie est décentralisée.

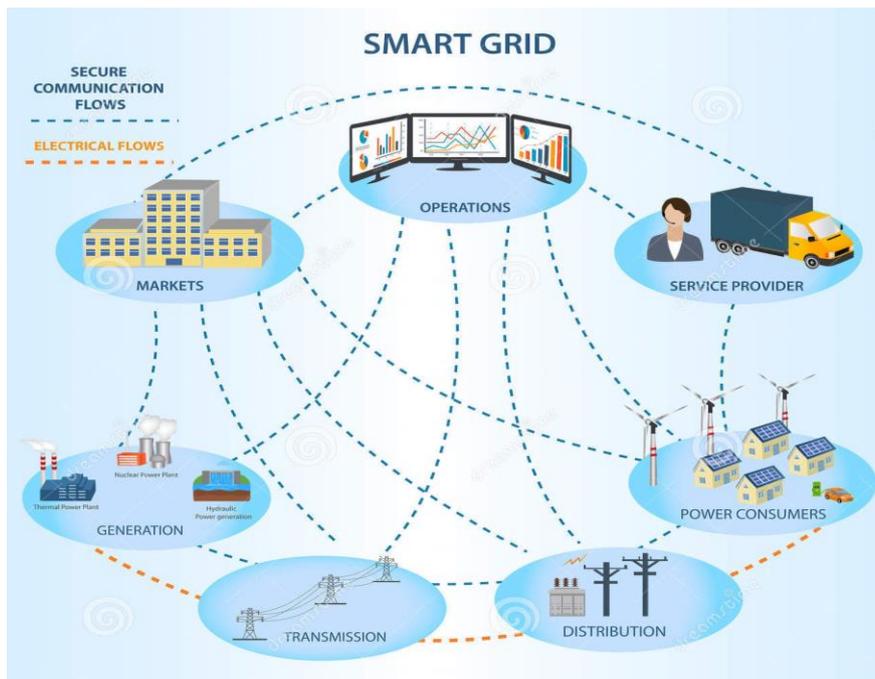


Figure II-4 Schéma conceptuel du Smart Grid proposé par NIST [15]

II.5.2 Modèle de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

L'IEEE a proposé une architecture basée sur celle de NIST, mais a défini un nouveau domaine nommé DER qui permet de gérer le surplus de l'énergie produite, la gestion du surplus d'énergie est centralisée. De plus elle définit trois (03) perspectives architecturales intégrées: [15]

A. Couche de systèmes d'énergie (power layer)

Elle sert à acheminer l'électricité par une infrastructure classique d'ouvrages électriques tout au long de la génération jusqu'au consommateur.

B. Couche de communication

Elle est l'épine dorsale formée par une architecture de communication fondée sur différents supports et technologies de communication (fibre optique, GPRS, etc.) servant à collecter les données issues des capteurs installés sur les réseaux électriques.

C. Couche d'information

L'IEEE représente le Smart Grid du point de vue des applications informatiques telles que des systèmes de dépannage à distance ou des programmes automatiques de réponse à la demande d'électricité, utilisant une information en temps réel et des flux de données associés à ces applications.

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

II.6 Caractéristique d'un réseau électrique intelligent

La technologie des réseaux intelligents offre des moyens non seulement pour répondre à ces défis, mais de les faire d'une façon plus abordable et plus durable.

Les caractéristiques des réseaux intelligents peuvent être définies en ces points essentiels :

- Auto-cicatrisation.
- Tolérance aux pannes « insensibilité aux pannes ».
- Intégration dynamique des ressources renouvelables et les moyens de stockage.
- Optimisation du fonctionnement et des ressources du réseau.
- Gestion de la demande, efficacité énergétique et prix temps réel.
- Participation du consommateur à la production de l'électricité.
- Fiabilité, qualité d'énergie, durabilité, sécurité, efficacité et flexibilité dans la topologie du réseau.

II.7 Ingrédients de base d'un réseau électrique intelligent

Le changement de paradigme énoncé précédemment a contribué à l'émergence de nouvelles technologies susceptibles d'avoir un impact sur l'évolution des réseaux, en particulier de distribution. A titre d'illustration, quelques-unes peuvent être décrites. [2]

II.7.1 Compteur intelligent ou communicant

Le smart metering permettra en outre de connaître la courbe de charge ou le profil de consommation individuel des consommateurs. Bien entendu, la relève du compteur se fait à distance et pourra donc s'effectuer plus fréquemment et plus précisément.

II.7.2 Actionneurs dans les réseaux

Ce sont en général des dispositifs, souvent à base d'électronique de puissance, qui permettent de mieux gérer les transits de puissance ou d'autres variables du réseau comme par exemple la tension.

II.7.3 Dispositifs de coupures rapides et protections intelligentes

Des progrès importants ont été accomplis dans les dispositifs de coupure comme les interrupteurs. De plus les protections sont de plus en plus performantes et s'auto-adaptent à leur environnement.

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

II.7.4 Capteurs performants associés ou non aux dispositifs existants

L'arrivée de capteurs combinés aux possibilités de communication adéquates ouvrirait des perspectives en terme de mieux contrôler le réseau de distribution en temps réel.

II.7.5 Fonctions avancées de supervision et de contrôle des réseaux

Ces fonctions se trouvent au niveau des centres de télé-conduite. Elles exploitent notamment des informations venant du réseau de distribution et permettent des actions sur ce dernier.

II.7.6 Dispositifs de stockage de l'énergie

Les possibilités de stockage sont faibles et très coûteuses, on peut s'attendre à des développements conséquents à l'avenir notamment en lien avec le développement des énergies renouvelables de type intermittentes.

II.8 Principaux enjeux des réseaux électriques intelligents

Le développement des smart grids représente un certain nombre d'enjeux :[16]

II.8.1 Enjeu industriel

Avec l'adaptation des matériaux et techniques actuels nécessaires à cette nouvelle intelligence. En accédant à ce réseau innovant, il est primordial d'assurer la fonctionnalité de tous les éléments.

II.8.2 Enjeu social

Ceci par l'implication des consommateurs dans la région de leur consommation d'énergie grâce aux compteurs intelligents, l'utilisateur interagit donc avec le réseau intelligent, une nouvelle notion prend alors tout son sens : celle de Consomm-acteur.

II.8.3 Enjeu économique

Par la coopération nouvelle entre les grands acteurs économiques de ce secteur de l'électricité modernisé et par le rôle de l'état dans le développement de Smart Grids en tant que service public.

II.8.4 Enjeu environnemental

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

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

II.9 Points forts d'un Smart Grid

À l'heure actuelle, les réseaux électriques doivent faire face à de nouveaux besoins en énergie, cette hausse devrait être amplifiée par de nouveaux usages tels que la voiture électrique ou les pompes à chaleur.

II.9.1 Pilotage de charge et gestion de la demande

Le pilotage de la charge ou encore la gestion de la demande, consiste en un ensemble de gestes visant à transformer la demande d'énergie, soit par pilotage direct, soit indirectement via une tarification dynamique. L'objectif est le plus souvent de limiter les pics de consommation pendant les périodes de pointe. L'équilibre entre production et demande est presque uniquement assuré par l'ajustement de la production. [17]

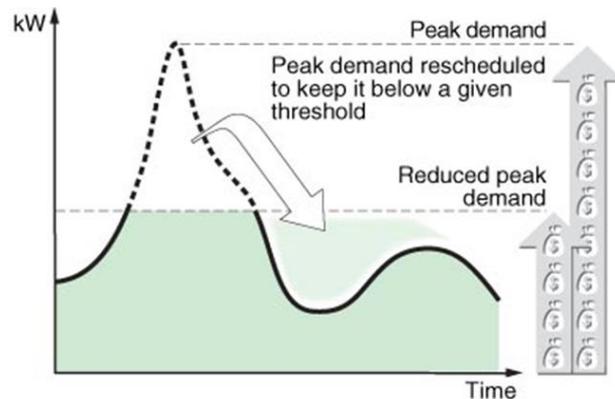


Figure II-5 Schéma représentatif d'une pointe de consommation [17]

DemandResponse est le terme anglais désignant la flexibilité de consommation électrique. Concrètement, il s'agit de la capacité des consommateurs d'énergie à moduler leur consommation électrique.

- Flexibilité (DemandResponse) à la baisse ou effacement : en cas de forte tension sur le système électrique, les consommateurs flexibles peuvent réduire leur consommation électrique.
- Flexibilité (DemandResponse) à la hausse : une hausse de la consommation électrique peut être requise pour absorber une production excédentaire d'électricité à partir d'énergies renouvelables.

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

La notion de maîtrise de la demande en énergie souvent dite MDE ou DSM ou DSR, regroupe des actions d'économies d'énergie développées du côté du consommateur final, et non du producteur d'énergie (bien que ce dernier puisse y contribuer).

La MDE répond à un ou plusieurs des enjeux et objectifs suivants :

- Réduire la quantité d'énergie appelée sur un réseau.
- Diminuer le gaspillage énergétique.
- Diminuer les émissions de gaz à effet de serre.
- Diminuer la dépendance énergétique d'un pays ou d'une collectivité.
- Limiter les risques liés au nucléaire. [19]

II.9.2 Stratégies d'écrêtement des pointes de charge (Peak Shaving) et le remplissage des vallées (ValleyFilling)

Deux stratégies majeures ont été identifiées pour une réduction efficace de la charge de pointe. L'écrêtement de la charge de pointe (Peak Shaving) voire figure II-6, grâce au stockage externe peut être réalisé en intégrant un ESS ou un VE. Cette approche peut être généralisée et appliquée à une variété d'environnements intelligents. [20]

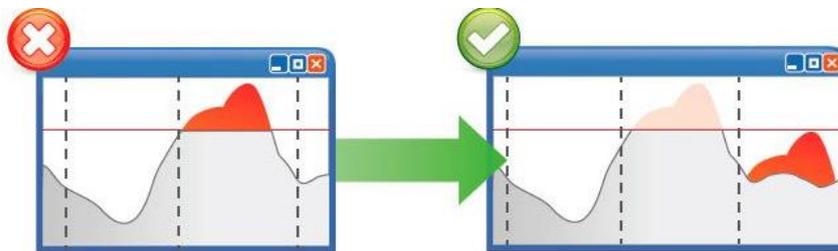


Figure II-6 Schéma représentatif des stratégies de Peak Shaving et du ValleyFilling[9]

Si les utilisateurs autorisent la charge automatique différée, l'augmentation des pics peut être évitée ("écrêtement des pics") et, en outre, la faible demande d'électricité pendant la nuit peut être augmentée, ce qui donne une meilleure efficacité des centrales électriques de base ("remplissage des vallées"). De plus, pendant les nuits d'orage, une part importante de l'électricité superflue du réseau pourrait être éliminée, voir figure II-7. [20]

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

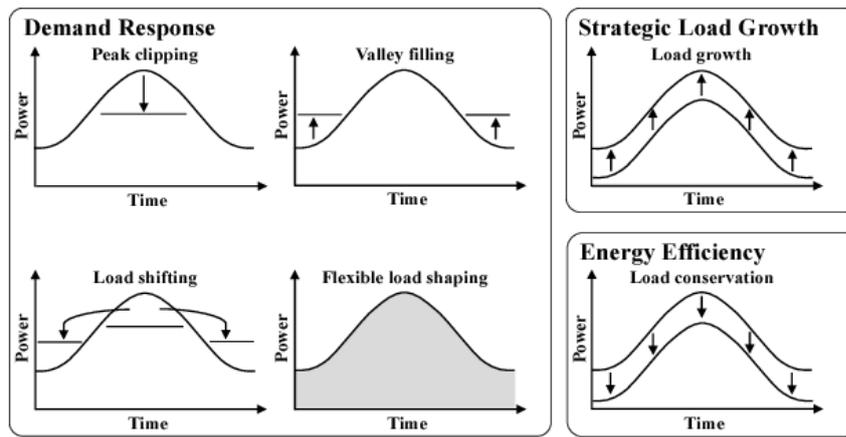


Figure II-7 Stratégies de gestion de la demande

II.9.3 Avantages de l'écrêtement des pointes de charge

L'écrêtement des pointes de charge présente de nombreux avantages comme le maintien de l'équilibre entre la production et la fourniture d'énergie est crucial.

Si la demande dépasse la production, cela peut entraîner des fluctuations de tension, une instabilité de l'alimentation et des pannes dévastatrices. Cependant, des techniques appropriées d'écrêtement des pointes de charge peuvent maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande. En outre, l'écrêtement des pointes aide les services publics à améliorer l'efficacité du système en réduisant le courant d'alimentation pendant les heures de pointe. En revanche, l'écrêtement des pointes permet de déplacer la charge de pointe à d'autres moments de la journée, ce qui réduit la charge cumulée, tout en apportant aux utilisateurs des avantages considérables en termes monétaires. [21]

II.9.4 Gestion et pilotage global des systèmes électriques

L'optimisation globale des systèmes énergétiques nécessite la mise en œuvre de technologies de « Centres de Contrôle » opérant en tant que « tour de contrôle » des flux énergétiques temps réels dans les réseaux de transport et de distribution. Ces centres de contrôle interagissent en temps réel d'une part avec les capteurs, équipements de protection et de contrôle répartis dans les postes électriques et, d'autre part, avec les clients offrant une flexibilité suffisante pour contribuer à l'équilibrage des réseaux. Ainsi que, la migration des réseaux vers les réseaux intelligents nécessite donc une refonte significative de ces systèmes d'information temps réel avec de nouveaux enjeux liés à l'intégration de très grands volumes de données. [7]

II.9.5 Production d'énergie distribuée

Aussi appelé production distribuée, comme montré sur la figure II-8, la production décentralisée est la production d'énergie électrique à l'aide d'installations de petite capacité raccordées au réseau électrique à des niveaux de tension peu élevée.

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

La production locale d'énergie est également considérée comme un moyen de favoriser la sécurité d'approvisionnement, la constance du prix de l'énergie et de contribuer de fait à l'autonomie énergétique du territoire. [22] [23]



Figure II-8 Modèle simplifié d'une production distribuée

II.9.6 Stockage distribué de l'électricité

Le fort caractère intermittent des moyens de production renouvelable nécessite la mise en œuvre de nouvelles ressources permettant un équilibrage de cette intermittence au niveau des systèmes énergétiques.

Le déploiement significatif des véhicules électriques a permis d'améliorer les technologies de stockage électrique à base de batteries tant en termes de durabilité que de coût, soit directement dans les postes électriques ou au niveau des centrales renouvelables. [22] [23]



Figure II-9 Stockage de l'énergie photovoltaïque par des batteries [9]

II.9.7 Gestion du consom'acteur dans le secteur résidentiel

Aujourd'hui, le consom'acteur peut d'ores et déjà intervenir sur son éclairage, son chauffage, son équipement informatique, technologique et électroménager, et il peut même contribuer à l'effacement de la pointe grâce aux offres déjà disponibles de

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

délestage, tout en étant acteur de sa modification graduelle de comportement. Dans ce cadre, la protection des données individuelles doit être un point de vigilance pour assurer une pénétration des nouvelles technologies de l'énergie et de l'information des plus acceptables. [23]

II.9.8 Gestion de la consommation et de la production dans les secteurs tertiaires et résidentiels

Pour les consommateurs souhaitant réduire leur facture d'électricité et prendre part au débat énergétique, la gestion active, qui couvre l'ensemble du cycle énergétique d'un bâtiment, est le meilleur choix.

Actuellement, en utilisant les offres de délestages disponibles, les consommateurs peuvent contribuer à la gestion globale d'un bâtiment et même à la réduction des pics de consommation, tout en restant maîtres de leurs comportements. Avec les nouvelles technologies de l'information et de la communication il s'agit maintenant de doter chaque bâtiment de solutions de gestion active.[23]

II.9.9 Flexibilité de la demande

Les consommateurs peuvent également participer à l'équilibre du système électrique en modifiant intentionnellement leur consommation, c'est ce qu'on appelle « la flexibilité de la demande ». Cette modification de la consommation, intentionnelle. Aujourd'hui la majorité de la flexibilité de la demande est assurée par de gros industriels qui peuvent générer une capacité de modulation de la consommation importante. Mais les consommateurs plus petits y participent également. [9]

II.10 Phénomène Big Data

L'explosion quantitative des données numériques a obligé les chercheurs à trouver de nouvelles manières de voir et d'analyser le monde. Il s'agit de découvrir de nouveaux ordres de grandeur concernant la capture, la recherche, le partage, le stockage, l'analyse et la présentation des données. Ainsi est né le « Big Data ». Il s'agit d'un concept permettant de stocker un nombre indicible d'informations sur une base numérique. [24] [25]

En effet, nous produisons environ 2,5 trillions d'octets de données tous les jours. Ce sont les informations provenant de partout.

Les réseaux intelligents produisent beaucoup plus de données que les réseaux traditionnels. [9] [24]

On peut distinguer six types de données:

- Données hétérogènes
- Données opérationnelles

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

- La sécurité des informations veille à garantir l'intégrité et la confidentialité des données, qu'elles soient stockées ou en transit.
- La sécurité opérationnelle comprend les processus et les décisions liés au traitement et à la protection des données.
- La reprise après sinistre et la continuité des opérations spécifient la manière dont une entreprise répond à un incident de cyber-sécurité ou tout autre événement causant une perte des opérations ou de données. [26]

Les Smart grids sont fondés sur une symbiose entre technologies de l'information et réseaux d'énergies. Traditionnellement, la maintenance des réseaux tenait compte d'incidents plus ou moins récurrents. Les réseaux intelligents signent l'arrivée de nouveaux composants sur les réseaux et de nouveaux usages, qui s'accompagnent de nouvelles menaces avérées. Un niveau de cyber-sécurité optimal est donc une condition sine qua non pour que les Smart grids, au travers des technologies de l'information qui y sont associées, tiennent toutes leurs promesses pour optimiser le fonctionnement des réseaux d'énergie sans pour autant dégrader leur sécurité. [12] [27]

II.12 Intelligence artificielle dans les réseaux électriques intelligents

L'intelligence artificielle est la recherche des moyens susceptibles de doter les systèmes informatiques de capacités intellectuelles comparables à celles des êtres humains.

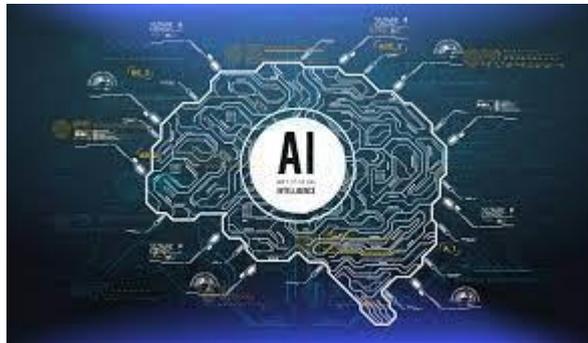


Figure II-12 Intelligence artificielle dans les Smart Grids[9]

II.12.1 Opportunités de l'intelligence artificielle pour l'économie de la consommation d'énergie

L'intelligence artificielle en efficacité énergétique présente de nombreuses opportunités pour économiser la consommation d'énergie.

A. Smart Grids pour une distribution intelligente de l'énergie

La transition énergétique requiert une cartographie de la circulation d'énergie au sein des diverses unités d'un écosystème énergétique. En effet, l'exercice permet d'identifier

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

les entrées et sorties d'énergie et les points de surconsommation. Il s'en suit d'un effort d'optimisation de la distribution d'énergie au sein du réseau. Cette complexité a amené le déploiement des Smart Grids. [28]

B. Automatisation intelligente du contrôle des charges avec la domotique

La nécessité de gérer des données de masse favorise l'utilisation de l'intelligence artificielle afin d'automatiser le contrôle des charges et assurer une consommation d'énergie plus intelligente. [28]

C. Transition énergétique continue grâce à l'intelligence artificielle

Il s'agit d'un audit énergétique optimisé à l'aide de la valorisation des données en temps réel. Ce processus intelligent permet à l'entreprise de réévaluer les opérations de gestion de l'énergie, de revoir les stratégies d'affaires en efficacité énergétique et d'optimiser les équipements de contrôle des charges ou des systèmes de gestion en mécanique de bâtiment. Ainsi, l'automatisation de cette démarche d'audit favorise l'amélioration du rendement énergétique. [28]

II.12.2 Application de l'intelligence artificielle dans les réseaux locaux

Les applications ci-dessous de l'intelligence artificielle sont identifiées pour recenser les cas d'usages de ces technologies dans les réseaux locaux.

A. Intelligence artificielle au service des producteurs d'énergie

Pour les producteurs, on constate que le champ des possibles se concentre principalement sur deux volets. L'un concerne l'optimisation de la production et l'autre concerne les opérations de maintenance et de supervision du parc de machines. Avec ces applications, très tournées vers les énergies renouvelables, les systèmes de production sont à même d'optimiser leur efficacité tout en anticipant certaines pannes machines, la production est donc plus fiable. [29]

B. Intelligence artificielle au service des gestionnaires de réseau

Pour les gestionnaires, les problématiques de prévisions sont centrales pour pouvoir anticiper productions et consommations. Dans leur rôle d'agrégateurs, la rapidité de calcul informatique peut alors être un outil d'aide à la décision. [29]

C. Intelligence artificielle au service des fournisseurs

Les fournisseurs peuvent faire émerger de nouveaux indicateurs stratégiques qu'ils ne possédaient pas jusqu'alors. L'intelligence artificielle permet aussi la personnalisation des contenus en apprenant les goûts et les habitudes des consommateurs. [29]

D. Intelligence artificielle au service des consommateurs

Chapitre II : Réseaux électriques intelligents

A la maille du consommateur, les applications d'intelligence artificielles, qui relèvent du domaine de la domotique, sont surtout utiles pour un pilotage intelligent. L'arrivée des véhicules électriques ouvrira aussi la voie à de nouveaux systèmes de recharge intelligents qui apprennent des habitudes de recharge des usagers. [29]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur l'architecture de la technologie des Smart Grids en matière de gestion des ressources énergétiques distribuées qui ont contribué à créer un nouveau paradigme de réseau.

Le développement récent des TIC offre pour ces réseaux électriques des solutions qu'il n'était pas possible d'imaginer il y a seulement quelques années. Ainsi, la possibilité d'installer chez le client final des organes de comptage et de gestion de l'énergie qui disposent d'une communication bidirectionnelle avec les différents acteurs du réseau et même d'une intelligence embarquée change la vision d'avenir de ces réseaux.

L'enjeu des Smart Grids se situe principalement au niveau des réseaux de distribution, c'est-à-dire précisément à l'échelle des microgrids. Sous l'effet des nouvelles politiques de transition énergétique et de la révolution numérique, des microgrids intelligents, qui intègrent les technologies de l'information et de la communication des Smart Grids, remplacent l'approche traditionnelle au microgrid.

Les « simples » microgrids deviennent aujourd'hui des Smart microgrids. L'ajustement qui permet d'équilibrer le système électrique se fait non seulement par l'offre mais aussi par la demande.

Chapitre III
Applications des micro-réseaux
intelligents

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

Introduction

Sous l'effet principal de la transition des réseaux électriques, le paysage énergétique connaît des transformations majeures. Les objectifs ambitieux de l'Union Européenne en matière de décarbonisation, de verdissement du mix énergétique et de sobriété énergétique à l'horizon 2030 traduisent cette nouvelle réalité :

- Réduction de 40% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990.
- Au moins 32% d'EnR dans la consommation finale d'énergie de l'UE.
- Amélioration d'au moins 32,5% de l'efficacité énergétique. [9]

Ces objectifs politiques modifient en profondeur l'utilisation de l'énergie et la gestion du système électrique. Cela constitue un changement sans précédent dans la façon de concevoir et de piloter le réseau.

Un micro-réseau peut répondre dynamiquement aux changements de l'offre d'énergie en auto-ajustant la demande et la production. [30] Le concept de « Ville intelligente et durable » cherche à exploiter le potentiel des TIC dans les systèmes de gouvernance urbaine en vue de créer des villes qui seraient non seulement économiquement et socialement évoluées, mais également conçues pour assurer la durabilité écologique. [12]

Dans ce chapitre, nous allons traiter les récentes technologies des différentes applications des microgrids, telles que : le compteur intelligent, le véhicule électrique, le bâtiment intelligent ainsi que la maison, la ville intelligente et les routes intelligentes, les véhicules autonomes et le stockage des données ADN.

III.1 Principaux enjeux des micro-réseaux intelligents

- Etendre la couverture énergétique : électrifier les zones isolées.
- Assurer la sécurité d'approvisionnement.
- Optimiser la facture énergétique.
- Produire et consommer une énergie verte.
- Maintenir l'équilibre du réseau. [31]

III.2 Technologie des micro-réseaux intelligents

Les microgrids, sont des réseaux électriques de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Ils associent de multiples installations de production locales et diffuses,

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande. Ils peuvent être raccordés directement à un réseau de distribution ou fonctionner déconnectés du réseau (îlotage), comme montré sur le figure III-1.[9]

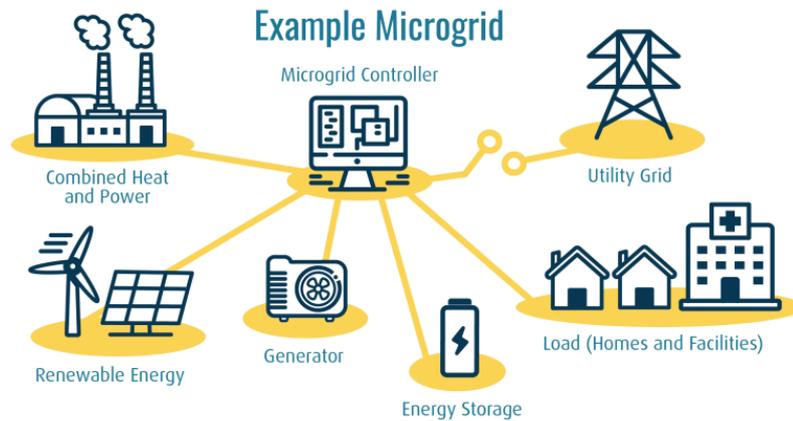


Figure III-1 Architecture d'un microgrid[32]

Pour pouvoir fonctionner, un micro-réseau doit comporter trois (03) éléments indispensables :

- Une installation de production d'énergie locale pour assurer son autonomie en cas de déconnexion du réseau public.
- Un système de stockage : batteries, réserve d'eau pour pompage-turbinage...
- Un système de gestion intelligente pour assurer l'équilibre constant entre production et demande d'électricité.

Les microgrids ne transmettent pas seulement de l'énergie mais aussi des informations. Grâce à ces informations, ces réseaux peuvent s'autogérer via des applications informatiques automatisées qui tiennent compte :

- Des pics de demande et de production.
- Des tarifs variables selon le moment de la journée et les conditions météo.
- De la capacité de production des éoliennes, panneaux solaires ou centrales hydrauliques.

Le but de cette gestion informatique : garder le microgrid en équilibre, utiliser l'énergie de la façon la plus efficace et au meilleur prix possible. [33]

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

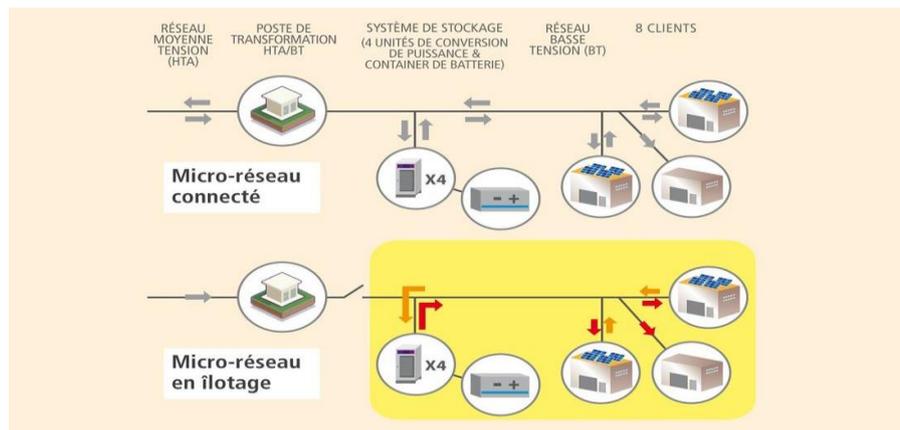


Figure III-2 Types de raccordement d'un microgrid[9]

III.3 Gestion de l'énergie dans les micro-réseaux intelligents

La gestion de l'énergie constitue l'un des enjeux clés liés au développement des réseaux intelligents. On opère ici une différenciation entre les MDE de gestion de l'énergie à travers des programmes de DR. Tous deux répondent à une notion d'efficacité énergétique. La MDE a pour objectif de diminuer la demande énergétique, moyennant à un certain coût. La DR Revêt une dimension résolument orientée vers les usages électriques, en mesure d'être modifiés en fonction des évolutions du prix de l'énergie ou des contraintes d'exploitation. La DR elle-même un terme général sous lequel on regroupe plusieurs mesures comme les tarifications dynamiques ou les programmes incitatifs (incentive-based) de gestion de l'énergie. [18] [34]

III.4 Application des micro-réseaux intelligents

Les différentes technologies d'application des microgrids sont les suivantes :

III.4.1 Compteurs intelligent « Smart Metering »

Les compteurs intelligents et leurs réseaux de communication correspondants constituent la première vague du réseau intelligent. Les gouvernements et les services publics ont reconnu les avantages et la nécessité des compteurs intelligents, comme montré sur la figure III-3. [35]



Figure III-3 Exemple d'un compteur intelligent « Smart metering » [9]

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

A. Définition

Un système de comptage évolué implique, d'une part, la mise en place de compteurs communicants capables de stocker les informations résultant des mesures d'énergie. D'autre part, l'établissement de systèmes de transmission de données permettant la circulation rapide et fiable des informations contenues dans les compteurs entre les utilisateurs, les gestionnaires de réseaux et les fournisseurs. [1]

B. Principe de fonctionnement

La communication s'effectue entre un ensemble de compteurs installés chez les utilisateurs et un concentrateur localisé à proximité dans le poste de distribution publique, via la technologie du CPL, qui rassemble ces données pour les transmettre au gestionnaire de réseaux. À chaque compteur et concentrateur est associé un modem CPL qui code et décode les données en un signal électrique et les superpose au courant électrique à 50 Hertz. Ensuite, au niveau des concentrateurs, les données sont codées sous format numérique, puis transmises au système informatique du gestionnaire de réseau par l'intermédiaire du réseau de téléphonie GPRS ou GSM. [16]

C. Relation entre le consommateur, le fournisseur et le gestionnaire de réseau

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

Lors de la signature du contrat de fourniture, le consommateur accepte que son fournisseur ait accès à ses différentes données nécessaires pour la bonne exécution de ce contrat, comme montré sur la figure III-4. [16]

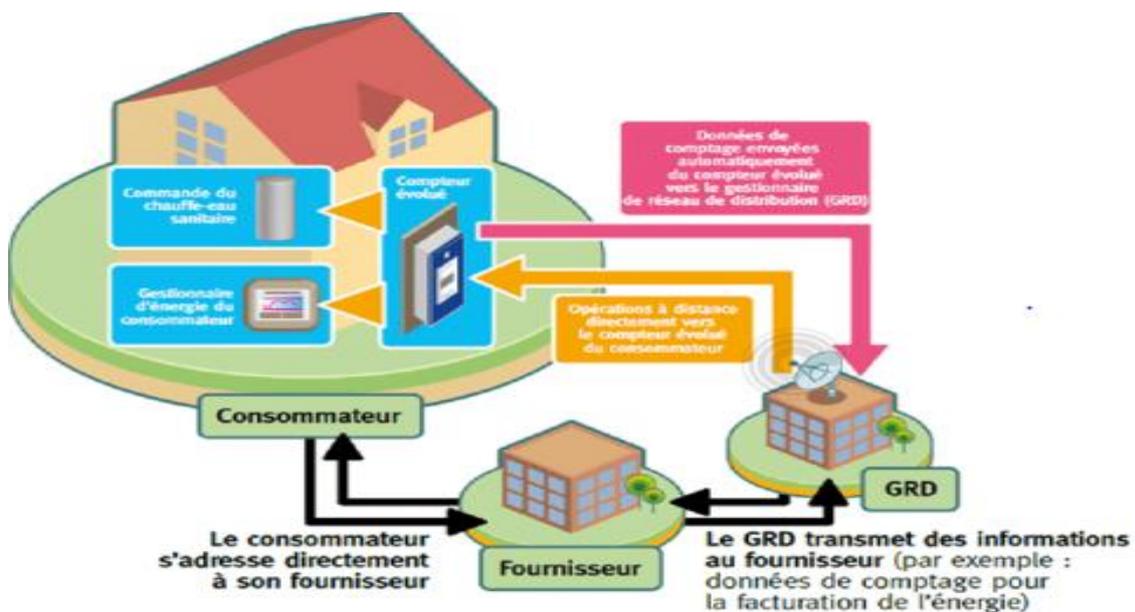


Figure III-4 Relation entre consommateur, fournisseur et gestionnaire de réseau. [16]

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

D. Caractéristiques du comptage évolué en électricité

Les compteurs évolués doivent être capables d'assurer :

- La relève des données du compteur à intervalle régulier.
- La télérelève des données du compteur à partir d'un système d'informations situé à distance.
- La gestion de compteurs à distance par le gestionnaire de réseau de distribution.
- La mesure de la consommation et, le cas échéant, de la production décentralisée.
- La gestion à distance des paramètres du compteur.
- Le transfert à distance des messages des acteurs du marché pour le client.
- L'affichage des informations sur le compteur et/ou un téléreport à partir de la TIC installée.
- Un port de communication principal permettant le transfert d'informations via le GPRS, le GSM ou le CPL.
- La mesure de la qualité.

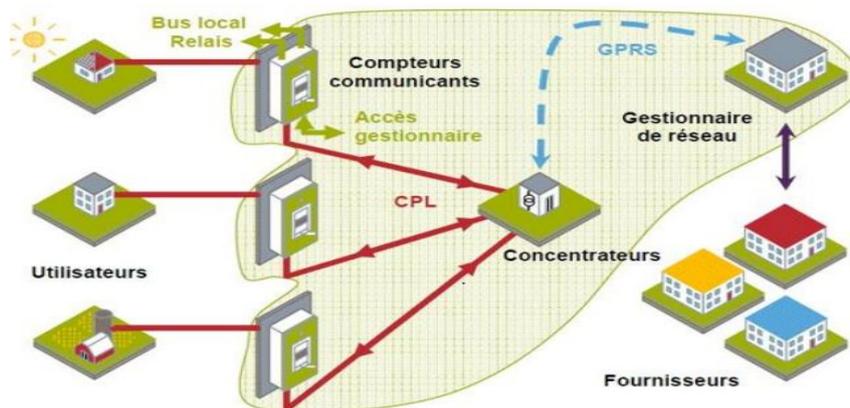


Figure III-5 Système de comptage évolué en électricité [16]

III.4.2 Maison intelligente

Une maison intelligente est une habitation dont les différents éléments (chauffage, éclairage, multiprises ...) sont pilotables depuis des applications mobiles, disponibles sur smart-phone ou sur tablette.

A. Avantages de la maison connectée

Opter pour une maison intelligente présente de nombreux avantages, citons :

- La centralisation et le contrôle à distance.
- Le confort d'utilisation.
- Les économies d'énergie.
- La sécurité.

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

Toutefois, si vous installez des objets connectés, comme montré sur la figure III-6, pensez à vérifier la compatibilité des systèmes. [27] [36]



Figure III-6 Open data dans les maisons intelligentes [9]

B. Domotique

La domotique est l'ensemble des techniques visant à automatiser les différentes tâches quotidiennes au sein d'un habitat. L'immotique est son homologue à l'échelle du bâtiment. La gestion de l'énergie n'est pas une nouvelle application des systèmes domotiques et immotiques, la maîtrise de la demande d'énergie dans l'habitat était introduite en utilisant un système domotique, ce système consiste en un ensemble d'équipements dotés de micro contrôleurs ayant des capacités de communication, un système de contrôle-commande centralisé et une interface homme-machine permettant de réaliser certaines fonctions d'optimisation, de conduite et de suivi de la consommation d'énergie. [27] [36]



Figure III-7 Ecosystème énergétique de la maison [27]

C. Internet des objets 'internet of things' « IoT »

L'Internet des objets, parfois écrit IdO ou IOT (Internet of things), désigne l'ensemble des infrastructures et technologies mises en place pour faire fonctionner des objets divers par le biais d'une connexion Internet. On parle alors d'objets connectés. Ces objets sont

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

pilotables à distance, le plus souvent à l'aide d'un ordinateur, d'un smartphone ou d'une tablette.

Ainsi, le terme Internet des objets regroupe tous les objets et appareils physiques qui possèdent une identité numérique. Il peut s'agir d'objets du quotidien omniprésents dans les logements (télévision, réfrigérateur, machine à laver, système de chauffage, porte de garage électrique), d'appareils ou de systèmes plus complexes comme des véhicules (avions, voitures autonomes) et l'éclairage d'une ville.

Les infrastructures créées permettent d'établir une passerelle entre le monde virtuel et les objets physiques grâce aux technologies de l'information et de la communication. L'interopérabilité, qui consiste à modifier le comportement d'un objet en fonction de celui d'autres objets, est l'une des principales caractéristiques de l'Internet des objets.[12]



Figure III-8 Environnements intelligents basés sur l'internet des objets [9]

D. Fonctionnement de l'internet des objets IoT

Chaque objet pilotable à distance détient sa propre carte d'identité qui le rend unique et reconnaissable. C'est ce numéro d'identification numérique qui va permettre de trouver cet objet et de lui donner des instructions à partir d'un ordinateur ou autres.

Les instructions envoyées circulent jusqu'à l'objet en question en empruntant un canal de communication : Wi-Fi, Bluetooth,ect.[37]



Figure III-9Internet des Objets dans les villes intelligentes

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

E. Défis

L'Internet des objets doit encore relever des défis. Un premier défi concerne l'interopérabilité pour que les objets se reconnaissent et communiquent via un langage commun. La standardisation des protocoles de communication et de sécurisation des accès est un levier essentiel pour développer toute l'intelligence de l'Internet des objets. Ainsi, l'agrégation de données collectées à grande échelle permet des services d'efficacité énergétique. [9]

III.4.3 Bâtiment intelligent

Le bâtiment intelligent se définit comme un bâtiment à haute efficacité énergétique intégrant, dans la gestion intelligente du bâtiment les équipements consommateurs, les équipements producteurs et les éventuels équipements de stockage. Il s'agit de mettre de « l'intelligence » sur le réseau électrique privé des bâtiments pour faciliter et améliorer la gestion de l'énergie et des appareils électriques sur le réseau, comme montré sur la figure III-10.



Figure III-10 Bâtiment intelligent, acteur des réseaux intelligents [27]

Trois évolutions majeures apparues sur les réseaux électriques auront un impact considérable sur la façon de gérer l'énergie dans le bâtiment. Le premier est la production décentralisée d'électricité à partir de sources renouvelables. Le deuxième le développement des véhicules électriques. Enfin, les compteurs communicants.

Le concept de bâtiment intelligent correspond à l'intégration de solutions de gestion énergétique. De nombreuses solutions existent et sont complémentaires :

- Une meilleure isolation des bâtiments
- De nouvelles techniques de production d'énergie
- Le développement des performances des systèmes de ventilation.
- Des systèmes de chauffage et de climatisation plus vertueux.

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

- Un choix plus réfléchi sur la localisation du bâtiment en termes de terrain d'implantation et d'orientation.
- Une mesure systématique des performances, afin d'adapter si besoin les décisions.
- Le développement de la domotique.

L'enjeu est donc de concevoir les systèmes du bâtiment qui permettront d'atteindre une meilleure performance énergétique. Il s'agit, d'une part, de déployer les principes de l'efficacité énergétique active. D'autre part, d'apporter aux acteurs les moyens de coopérer pour réaliser ensemble des projets de construction et de rénovation efficaces d'un point de vue énergétique. Les actions pouvant être mises en œuvre sont :

- Optimiser les synergies entre équipements.
- Adapter le fonctionnement des équipements à la présence des occupants et à leurs activités.
- Optimiser les approvisionnements énergétiques.
- Tirer parti des apports gratuits (orientation du bâtiment par exemple).
- Optimiser les synergies entre équipements.
- Optimiser les performances globales des équipements (génération, distribution...)
- Informer et sensibiliser.[27] [38]

III.4.4 Ville intelligente

À l'origine, une ville intelligente est une ville qui s'appuie sur la collecte et l'utilisation de données pour optimiser son organisation et sa gestion. Par le biais de capteurs, la ville appréhende les comportements et les habitudes de ses habitants afin de leur fournir, en temps réel, une meilleure information, une meilleure offre de services tout en économisant mieux les ressources.

La transition vers des villes intelligentes et durables est un impératif socio-économique et ces villes de demain seront fondées sur l'innovation technique et de nouvelles méthodes de gestion urbaine. [27]



Figure III-11 Open Data au service des villes intelligentes

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

L'Union européenne s'inspire de la vision de Rudolf Giffinger, expert en recherche analytique sur le développement urbain et régional et référent en la matière, dont les travaux indiquent que la ville intelligente doit être performante dans six domaines.

A. Une économie intelligente

C'est la compétitivité économique de la ville. Elle se mesure à travers des facteurs comme l'innovation, l'esprit d'entreprise, la productivité, la flexibilité du marché du travail.

B. Des citoyens intelligents

Autrement dit le capital humain et social de la ville. Il est question, bien sûr, du niveau de qualification de la population mais aussi de sa pluralité, de son ouverture d'esprit, de sa créativité, de la qualité des interactions sociales.

C. Une gouvernance intelligente

C'est-à-dire un mode d'administration de la ville transparent, transversal et partagé.

D. Une mobilité intelligente

Giffinger met l'accent sur l'accès local et international à la ville, l'existence d'infrastructures connectées exploitant les TIC et de systèmes de transports innovants.

E. Un environnement intelligent

On parle ici d'écologie et de gestion des ressources. La ville intelligente doit favoriser un environnement de qualité, gérer de façon durable ses ressources et œuvrer à la protection de l'environnement.

F. Un mode de vie intelligent

Il regroupe des facteurs liés à la qualité de vie : culture, santé, sécurité, etc. [9]

III.4.5 Véhicules électriques

Aujourd'hui le véhicule électrique apparaît comme un levier de relance et de modernisation. Et, la maturité technologique de la batterie lithium-ion ouvre des perspectives pour le développement à grande échelle du véhicule électrique. [21]



Figure III-12 Modèle de bornes de recharge des véhicules électriques[9]

A. Véhicule électrique relié au réseau « V2G »

Les véhicules électriques pourraient fonctionner comme une sorte d'éponge électrique, capable d'absorber les excès d'énergie produite quand la demande est faible et de la restituer au réseau quand la demande est importante. C'est le principe du « Vehicle To Grid » ou V2G, comme montré sur la figure III-13. [39]

Avantages du V2G

- Les véhicules électriques sont une source de transport moins cher (prix d'électricité est inférieur à celui du carburant).
- Il fournit des revenus supplémentaires aux propriétaires du véhicule.
- Le système de distribution d'électricité présente également des avantages car il recevra de l'énergie du véhicule pendant les périodes de pointe
- Il réduit la pollution en réduisant l'utilisation des sources non renouvelables.
- L'environnement pour le V2G peut être des maisons, les parkings, ect.

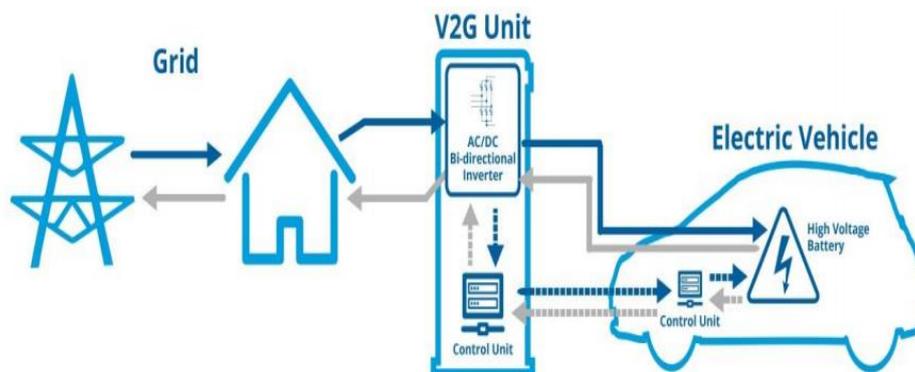


Figure III-13 Schéma simplifié du véhicule au réseau (V2G)[39]

Le V2G pourrait aider à lisser les pics de consommation, qui coûtent très cher en termes de production. Les batteries se chargeraient pendant les creux de consommation,

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

dans les meilleures conditions écologiques et économiques, absorbant ainsi une partie de la production « fatale » des énergies renouvelables, et réinjecteraient de l'énergie dans le réseau pendant les pics de consommation, évitant ainsi de démarrer des centrales thermiques au charbon ou au gaz, très coûteuses et émettrices de gaz à effet de serre. [39]

B. Véhicule électrique relié à une maison « V2H » et véhicule électrique relié à un bâtiment « V2B »

Peu exploré, le Vehicle-to-Home et le Vehicle-to-Building est un concept d'envergure où les véhicules rechargeables sont exclusivement au service des utilisateurs. L'objectif est de maximiser les gains économiques en exploitant le véhicule qui est une source d'énergie distribuée. L'avantage indéniable du « V2H » et « V2B » est sa facilité de mise en œuvre qui ne nécessite aucun investissement sur les réseaux électriques.

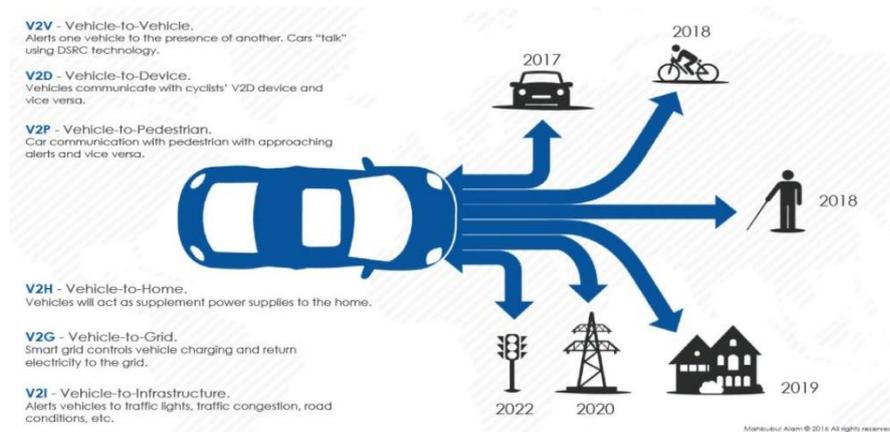


Figure III-14 Différents modes d'usage des véhicules électriques

L'objectif principal du système "Vehicle to Home" (V2H) est de stocker l'énergie provenant de ressources énergétiques locales distribuées et de l'acheminer vers les charges domestiques. Le système « V2H » est composé d'au moins d'un chargeur bidirectionnel, de charges domestiques, d'une production distribuée à petite échelle, d'un compteur intelligent, d'un réseau domestique, d'un système d'alimentation en électricité et d'un système d'alarme.

Le comptage intelligent joue un rôle très important dans le concept « V2H ». Il enregistre les données sur la consommation du système et fournit également une interface pour envoyer ou recevoir des informations des services publics. Ce concept peut être intégré à des systèmes de contrôle plus importants afin de réduire la charge des réseaux électriques de distribution. [40]

III.5 Recherches récentes

Les récentes recherches technologiques en matière de gestion des ressources énergétiques distribuées ont contribué à créer un nouveau paradigme de réseau.

III.5.1 Révolution de stockage des données ADN

La science derrière le stockage de données ADN (Acide désoxyribonucléique) est établie, l'ADN s'est avéré capable de fournir un système de stockage de données évolutif, à accès aléatoire et sans erreur.

Cependant, les avancées techniques dans l'encodage des données dans l'ADN et leur relecture, la diminution des coûts de synthèse de l'ADN et les nouvelles technologies conçues pour répondre aux besoins des utilisateurs. L'ADN offre une solution de stockage de données abondante, durable et stable, avec une densité de stockage supérieure de plusieurs ordres de grandeur aux meilleures méthodes actuelles. [41]

A. Fonctionnement de stockage par ADN

Le stockage ADN consiste à encoder des données binaires dans l'ADN. Pour ce faire, les bits individuels (chiffres binaires) sont convertis de 1 et 0 vers les lettres A, C, G et T. Ces lettres représentent les quatre principaux composants de l'ADN : l'adénine, la cytosine, la guanine et la thymine. Le médium de stockage physique est une molécule d'ADN synthétisée contenant ces quatre composants dans une séquence correspondant à l'ordre des bits dans le fichier numérique. Pour récupérer ces données, la séquence A, C, G et T représentée dans la molécule d'ADN est à nouveau décodée sous la forme de la séquence originale de bits 1 et 0. [42]



Figure II-15 ADN piste sérieuse pour stocker les données

B. Avantage de stockage par ADN

L'un des principaux avantages de l'ADN pour le stockage de données est sa grande densité. Selon les experts, un système de stockage basé sur l'ADN pourrait

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

stocker un milliard de fois plus de données que les appareils électroniques traditionnels de dimensions similaires. Dans un gramme d'ADN, il est possible de stocker 215 pétaoctets de données. Il serait donc possible de stocker toutes les données créées par les humains dans une seule pièce. De plus, l'ADN peut théoriquement conserver les données en parfait état pendant une durée extrêmement longue. [42]

III.5.2 Technologie de route intelligente « Smart Road Technology »

Les routes des villes intelligentes construites sur des technologies IoT permettent aux villes de collecter et d'analyser des données pour améliorer la gestion quotidienne du trafic et s'adapter aux besoins de transport à long terme. Grâce aux capteurs, caméras et radars IoT, les données peuvent être analysées en quasi temps réel et utilisées pour améliorer les routes encombrées, en rationalisant la circulation. Les données peuvent également être envoyées sur le cloud pour une analyse à long terme, fournissant des informations essentielles pour des efforts tels que la réduction des émissions de CO2 ou l'amélioration de l'état des routes. [9]

III.5.3 Véhicules autonomes

Les véhicules autonomes ou sans conducteur ont été testés sur les routes australiennes en 2015, lorsque les premiers essais du pays ont eu lieu à Adélaïde. L'agence nationale indépendante de recherche routière ARRB a dirigé ces essais. ARRB a impliqué des organisations partenaires, dont SAGE Automation, afin de comprendre ce qui est nécessaire pour que la technologie sans conducteur devienne une réalité sur les routes australiennes et soit sûre pour les usagers de la route.

Avec le coronavirus, les véhicules de livraison autonomes en Chine sont en plein boom. Cette tendance vue en Chine pourrait bien prédire l'avenir proche des Européens étant donnée l'évolution des chiffres de l'épidémie du coronavirus à travers le monde.[9]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur les différentes applications des microgrids. Ainsi que les récentes avancées technologiques en matière de gestion des ressources énergétiques distribuées qui ont contribué à créer un nouveau paradigme de réseau, le réseau de distribution à micro-réseau intelligent. Afin de continuer à favoriser l'intégration des énergies renouvelables, les réseaux doivent être gérés de manière plus réactive et respectueuse des contraintes d'équilibre. Ceci est à la base du concept de Smart Grid.

Chapitre III : Applications des micro-réseaux intelligents

L'objectif global de la gestion de l'énergie d'un micro-réseau est de programmer de manière optimale les ressources énergétiques afin d'obtenir un fonctionnement économique, durable et fiable un coût éventuellement faible. Ceci nous ramène, vers la simulation d'un système de gestion de l'énergie pour un micro-réseau intelligent connecté au réseau à base de ressources renouvelables (champ photovoltaïque et éoliennes) et un système de stockage (Batteries).

Chapitre IV

Simulation et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons développer un système de gestion d'énergie (EMS) sous forme d'un algorithme appliqué à un Microgrid multi sources relié au réseau, ce dernier regroupe les sources d'énergie renouvelable photovoltaïque (PV), éoliennes (WT), un système de stockage d'énergie par batteries (BESS) et une charge variable. L'objectif principal est de proposer des solutions pour la gestion optimale des ressources énergétiques à l'échelle du microgrid. Le système de gestion d'énergie (EMS) mis en œuvre, permet de gérer en temps réel de manière bidirectionnelle le flux d'énergie entre la production et la consommation, tout en assurant une énergie suffisante qui satisfait à diverses contraintes opérationnelles et économiques.

Le but du travail consiste à analyser le fonctionnement d'un mini-réseau intelligent et voir le comportement du système de gestion d'énergie mis à disposition dans le partage optimal de l'énergie tout en assurant l'équilibre entre consommation et production.

IV.1 Objectifs de la simulation

L'objectif principal de ce travail se focalise sur le développement d'un système de gestion pour un micro réseau intelligent, capable de

- Minimiser les fluctuations des énergies renouvelables.
- Lisser la courbe de charge.
- Réduire la dépendance au réseau électrique.
- Favoriser l'usage des énergies renouvelable.
- Assurer les échanges d'énergie avec le réseau (import/export).

Afin d'atteindre ces objectifs notre attention s'est concentré sur un Microgrid résidentiel relié au réseau qui combine des sources d'énergie distribuées (PV, WT, BESS), et une charge variable. L'ensemble est contrôlé par un système de gestion de l'énergie (EMS).

Différents scénarios opérationnels ont été proposés afin de visualiser et analyser le comportement et l'efficacité du système de gestion mis en œuvre au cours de la journée, tout en satisfaisons les contraintes dans la gestion optimale de l'énergie y compris le profil de demande aléatoire, la fluctuation de la production renouvelable.

- **Scénarios**

La simulation a permis de recenser plusieurs scénarios pour voir le comportement du système dans la gestion de la demande électrique dans le micro-réseau intelligent.

-Premier scénario : Production décentralisée sans système de stockage

-Deuxième scénario : production décentralisée avec système de stockage

-Troisième scénario : Fonctionnement du microgrid en absence du champ photovoltaïque

-Quatrième scénario : Fluctuation des énergies renouvelables (PV et WT)

-Cinquième scénario : Dédoublment du nombre des panneaux photovoltaïques

IV.2 Composantes énergétiques du système

Le micro-réseau intelligent comprend un champ photovoltaïque, un parc éolien, un système de stockage par batterie, un réseau de distribution d'électricité et une charge variable.

IV.2.1 Système photovoltaïque (PV)

Pour tirer le meilleur parti des énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque est utilisée en priorité pour alimenter la charge.

La puissance de sortie du PV est exprimée en fonction de la zone couverte, les conditions de rayonnement solaire et de son rendement. [45]

$$P_{PV}(t) = \eta \cdot A_p \cdot N_{PV} \cdot E(t) \quad (IV.1)$$

Où

η : Le rendement de conversion énergétique (%)

A_p : la surface des panneaux PV individuels

N_{PV} : le nombre de panneaux PV

$E(t)$: la valeur du rayonnement solaire.

Dans ce cas, les panneaux PV utilisés sont des panneaux poly-cristallins. Le système PV comprend 42 panneaux photovoltaïques. Le tableau IV.1 ci-dessous représente les caractéristiques du panneau.

Chapitre IV : Simulation et discussions

Tableau IV-1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque. [43]

Constructeur	Zytech Solar
Module	ZT300P
Courant de court-circuit I_{cc} (A)	8,59
Tension circuit ouvert V_{co} (V)	45,04
Courant au point maximum I_{mp} (A)	7,95
Tension au point maximum V_{mp} (V)	37,73
Surface des cellules (m^2)	1,752192
NOCT (C°)	47
Température standard (C°)	25
Eclairement standard (W/m^2)	1000
Rendement du module (%)	17,12

Les figures IV.1 suivantes représentent la puissance délivrée par le champ photovoltaïque dans des conditions variables de l'irradiation solaire (journée ensoleillé et journée nuageuse).

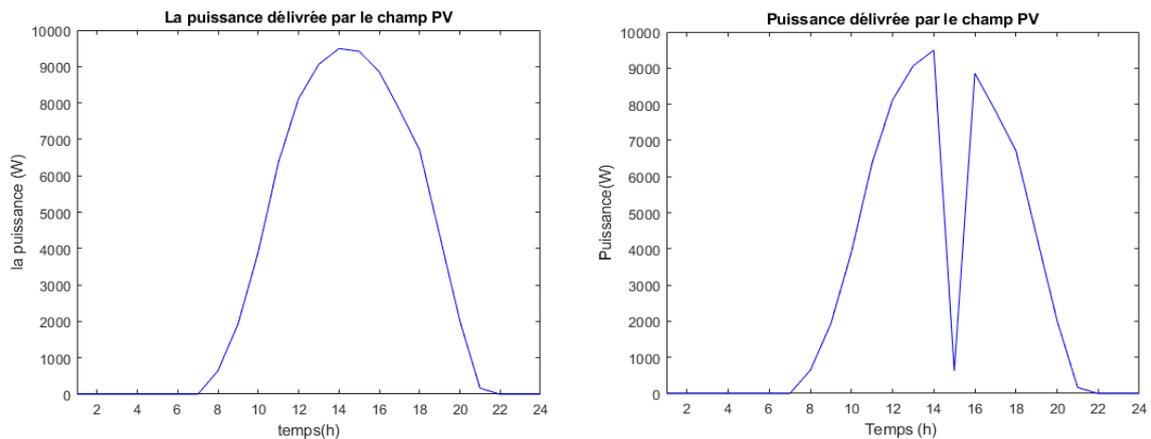


Figure IV-1 Puissance délivrée par le champ PV pour 24h

Chapitre IV : Simulation et discussions

IV.2.2 système éolien

L'énergie éolienne est utilisée comme deuxième priorité dans l'approvisionnement énergétique. Le système éolien comprend 02 éoliennes. Le tableau IV.1 ci-dessous représente les caractéristiques de l'éolienne.

Tableau IV-2 Caractéristiques de l'éolienne.[43]

Constructeur	FlexPro
Modèle	EOL/3000
Puissance nominale (W)	3000
Tension nominale (V)	24
Vitesse de démarrage (m/s)	2
Vitesse nominale (m/s)	10
Vitesse de coupure (m/s)	45
Hauteur du mât (m)	12

La puissance de sortie des éoliennes est exprimée :[44]

$$P_{max} = K \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \text{ (IV.2)}$$

Où :

P_{max} : la puissance en (KW),

K : une constante,

ρ : la masse volumique de l'air,

S : la surface couverte par les pales en (m²),

V : la vitesse du vent en mètres par seconde (m/s).

Les figures suivantes représentent la puissance délivrée par les éoliennes avec et sans présence de fluctuations.

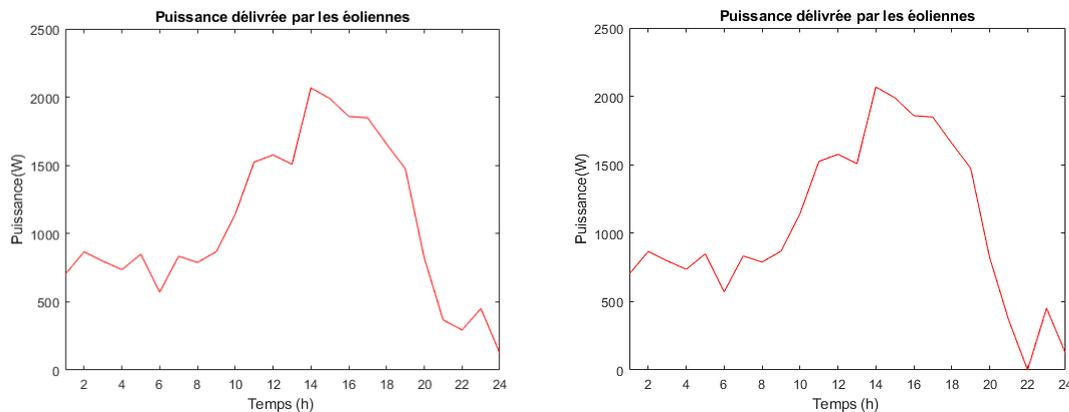


Figure IV-2 Puissance délivrée par les éoliennes durant 24h

IV.2.3 système de stockage

Le stockage de l'énergie électrique joue un rôle crucial dans le fonctionnement des micros-réseaux. Leur principale fonction est de faciliter l'intégration des énergies renouvelables de nature intermittente. Le système de stockage choisi pour cette étude est des batteries d'une capacité de 250Ah et d'une tension de 48V. Le système de stockage comprend 13 batteries, il est connecté au réseau via une interface d'électronique de puissance où l'énergie peut être injectée et/ou extraite directement du réseau. Il sera chargé lorsque la production dépasse la consommation en revanche, si la demande de la charge est supérieure à la production disponible, ce dernier se déchargera pour couvrir le déficit énergétique.

La charge et la décharge du système de stockage dépendent de la stratégie de fonctionnement du système à base des sources renouvelables. [44]

Le SOC à l'instant 't' peut être calculé par l'équation suivante : [45]

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{P_{pv}(t) + P_{wt}(t) - P_l(t)}{C_{ref}} \Delta T \quad (IV.3)$$

Où :

$SOC(t)$: L'état de charge de la batterie,

$P_l(t)$: La puissance de la charge

$P_{pv}(t)$: La puissance photovoltaïque,

$P_{wt}(t)$: La puissance de l'éolienne,

C_{ref} : La capacité de référence

ΔT : Un intervalle de temps unitaire : $\Delta t = 1$ (1 heure).

- Contrainte de l'état de charge de la batterie :

Le SOC de la batterie est compris dans des limites prédéfinies, comme le montre la contrainte suivante : [44]

$$SOC_{B_{min}}(t) \leq SOC(t) \leq SOC_{B_{max}}(t) \quad (IV.4)$$

La contrainte signifie que les batteries du système de stockage ne doivent pas être chargées ou déchargées lorsque le SOC est hors limites.

IV.2.4 charge variable

Pour des raisons de simplicité, un modèle de charge dynamique CA est utilisé, les données de charge sont basées sur la courbe de charge quotidienne.

Le profil de charge représente une administration avec une puissance maximale de 10 KW.

Chapitre IV : Simulation et discussions

La figure représente l'allure de la puissance appelée par la charge :

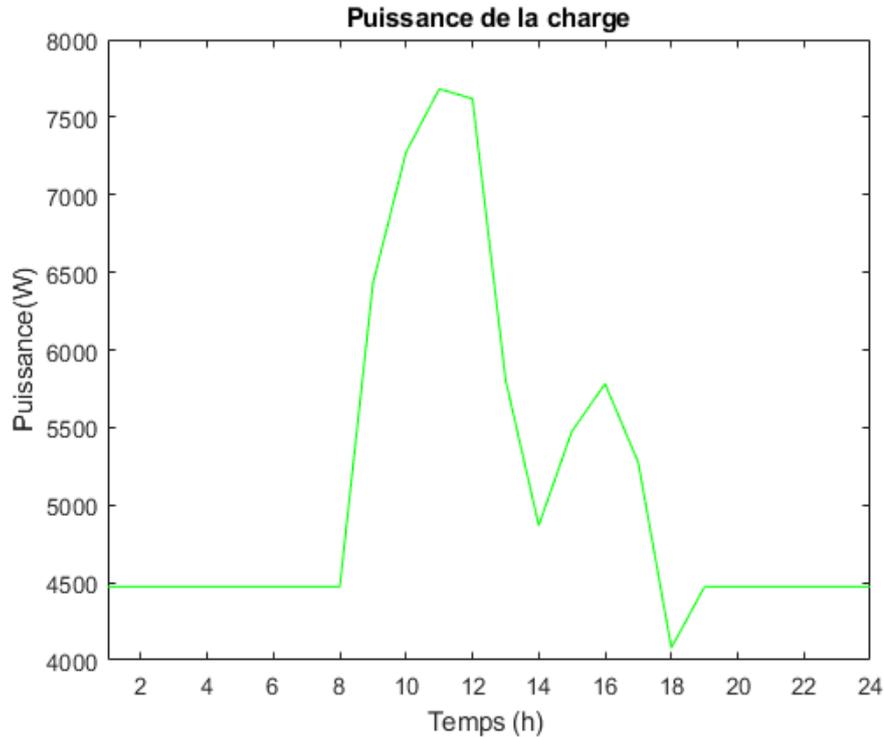


Figure IV-3 Puissance appelée par la charge en 24h

IV.2.5 Réseau principal

L'énergie électrique peut être achetée du réseau chaque fois que la production décentralisée et BESS ne sont pas suffisants pour répondre à la demande de la charge. D'autre part, lorsque la production décentralisée dépasse la consommation, l'excédent d'énergie sera envoyé au réseau.

IV.3 Configuration du système

Le système multi sources raccordé au réseau est décrit dans la figure IV.4 ci-dessous. Dans ce cas, le réseau principal fournira de l'énergie lorsque la demande de la charge dépasse la puissance de l'ensemble (PV, éoliennes et BESS). D'autre part, lorsque la puissance de la production décentralisée est supérieure à la demande de la charge, l'excédent de l'énergie peut être chargé dans les BESS. Dans ce système, le traitement de la charge/décharge de la BESS et l'import/export de l'énergie peuvent se faire de manière autonome.

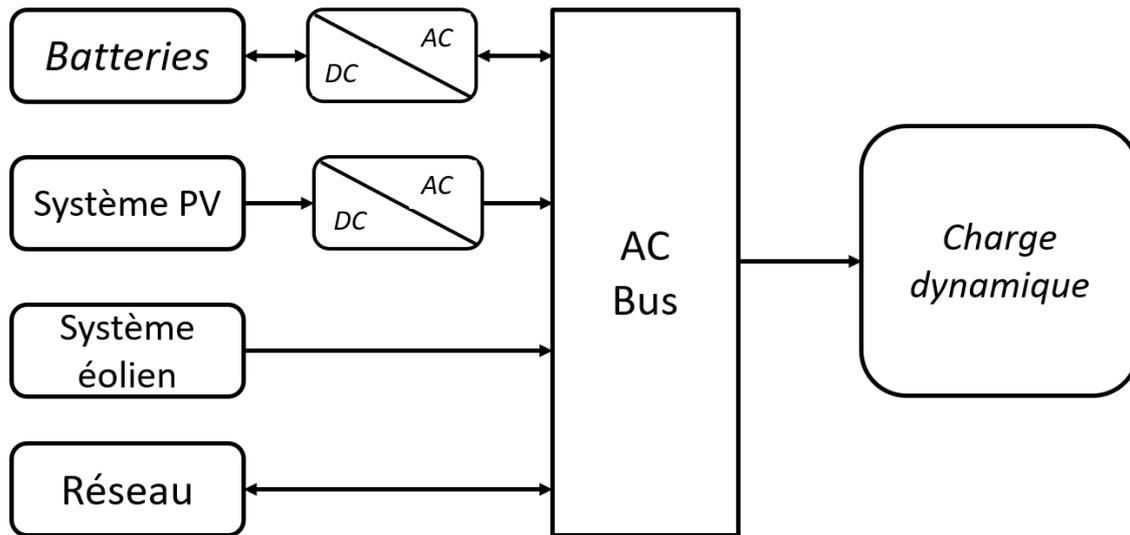


Figure IV.4 Système hybride PV-éoliennes-batteries- réseau

IV.4 Système de gestion de l'énergie (EMS)

Lorsqu'un micro-réseau comporte plus de deux DER (distributedenergyresources), il est nécessaire de disposer d'un système de gestion de l'énergie (EMS) qui optimise le partage de la puissance entre les DER. Les fonctions de l'EMS proposé sont présentées dans la Figure IV.5. Le système de gestion de l'énergie reçoit les valeurs prévisionnelles de la demande de charge et les ressources énergétiques distribuées pour chaque heure de la journée qui suit, afin d'imposer la puissance de sortie programmée des DER et de la batterie, ainsi que la puissance d'importation/exportation avec le réseau principal.

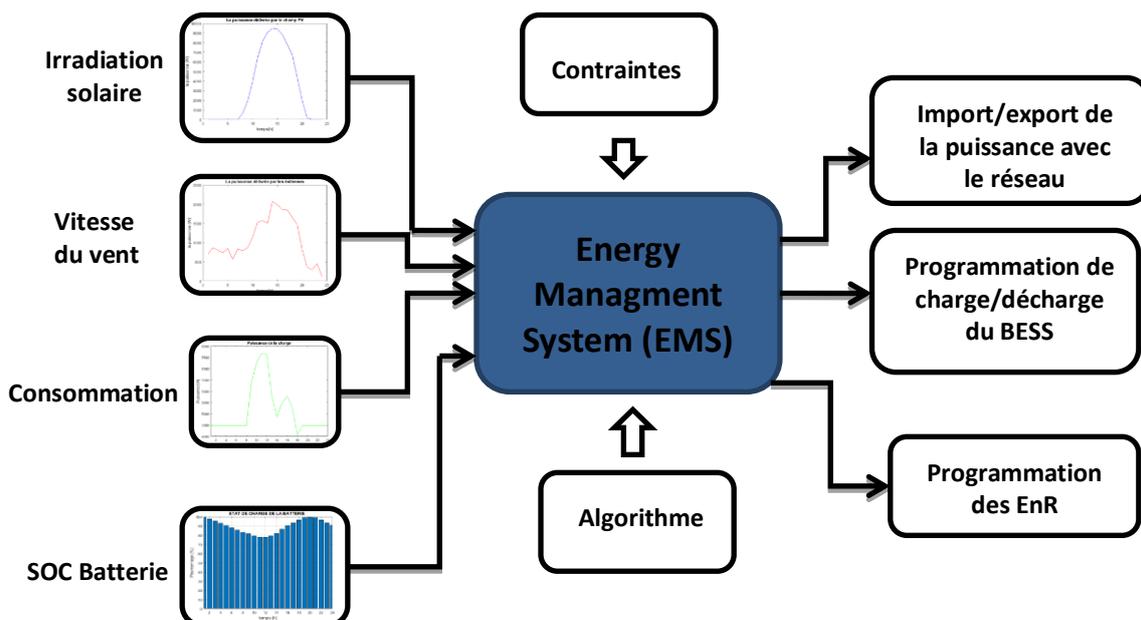


Figure IV.5 EMS proposé pour le micro-réseau intelligent

Chapitre IV : Simulation et discussions

En fonction des consignes, la gestion optimale de l'énergie est effectuée à travers un système de gestion (EMS) proposé. Dans ce travail, les objectifs opérationnels sont présentés comme suit :

- Lisser les fluctuations des énergies renouvelables et maximiser leur part dans le mix énergétique.
- Minimiser l'apport d'énergie à partir du réseau.
- Favoriser l'injection au réseau principal.

IV.4.1 Stratégie de gestion de l'énergie

Dans cette partie, la gestion de l'énergie pour ce micro-réseau s'effectue selon deux principales stratégies, la première présente un système de production décentralisée sans batterie de stockage, dont le but est de voir l'échange de l'énergie (import/export) entre le micro-réseau et le réseau principal. Alors que pour la deuxième stratégie où la production décentralisée est couplée à un système de stockage, dans ce cas l'objectif est de maximiser l'usage des énergies renouvelables et de réduire l'importation de l'énergie à partir du réseau. Ces deux stratégies sont basées sur une méthode de gestion des " contraintes " et proposées sur une base de règles prédéfinies, dont les règles principales sont les suivantes :

- L'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne sont principalement utilisées pour alimenter les charges.
- Le système de stockage de l'énergie électrique est chargé par le surplus d'énergie renouvelable.
- Le système de stockage de l'énergie électrique se décharge lorsque le système photovoltaïque et les éoliennes ne sont pas suffisants.
- Le réseau alimente la charge lorsque les systèmes de production décentralisée et le système de stockage ne sont pas suffisants.
- Lorsque le système de stockage de l'énergie électrique est chargé et que la production est supérieure à la consommation, l'excédent d'énergie renouvelable sera injecté directement sur le réseau.
- En absence du système de stockage le surplus de l'énergie est injecté au réseau et en cas de déficit, l'énergie est soutirée du réseau pour satisfaire la demande.

IV.4.2 Contraintes

- **Contrainte d'équilibre de puissance :**

Avec système de stockage:

$$P_L(t) = P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_B(t) \quad (IV.5)$$

Où :

$P_L(t)$: la puissance de la charge à t

Chapitre IV : Simulation et discussions

$P_{PV}(t)$: la puissance du système PV à t

$P_B(t)$: la puissance du BESS à t

$P_{WT}(t)$: la puissance des éoliennes à t

Sans système de stockage :

$$P_L(t) = P_{PV}(t) + P_{WT}(t) \quad (IV.6)$$

Où :

$P_L(t)$: la puissance de la charge à t

$P_{PV}(t)$: la puissance du système PV à t

$P_{WT}(t)$: la puissance des éoliennes à t

- **Contrainte de la puissance de sortie du BESS :**

$$P_{Bmin} \leq P_B(t) \leq P_{Bmax} \quad (IV.7)$$

Si $P_B(t) < 0$: le BESS est chargé.

Si $P_B(t) > 0$: le BESS se décharge

Si $P_B(t) = 0$: BESS au repos

- **Contrainte de l'état de charge de la batterie :**

L'état de charge de la batterie est compris à une limite prédéfinie comme suit :

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (IV.8)$$

SOC_{min} : état de charge de la batterie minimal

$SOC(t)$: état de charge de la batterie à l'instant t

SOC_{max} : état de charge de la batterie maximal

- **Contrainte du réseau :**

L'échange d'électricité avec le réseau principal $P_{réseau}(t)$ doit être délimité dans ce système

comme suit :

- $P_L(t) > P_{pv}(t) + P_{wt}(t)$ et $SOC(t) = SOC_{min}$ ou absence de système de stockage, Alors

$P_{réseau}(t) > 0$: La puissance est soutirée à partir du réseau, et la contrainte est définie comme :

$$P_{réseau}(t) \leq P_{réseau_{max}} \quad (IV.9)$$

- $P_{pv}(t)+P_{wt}(t)>P_L(t)$ et $SOC(t)=SOC_{max}(t)$ l'électricité est injectée au réseau.

IV.4.3 Organigramme de gestion de l'énergie

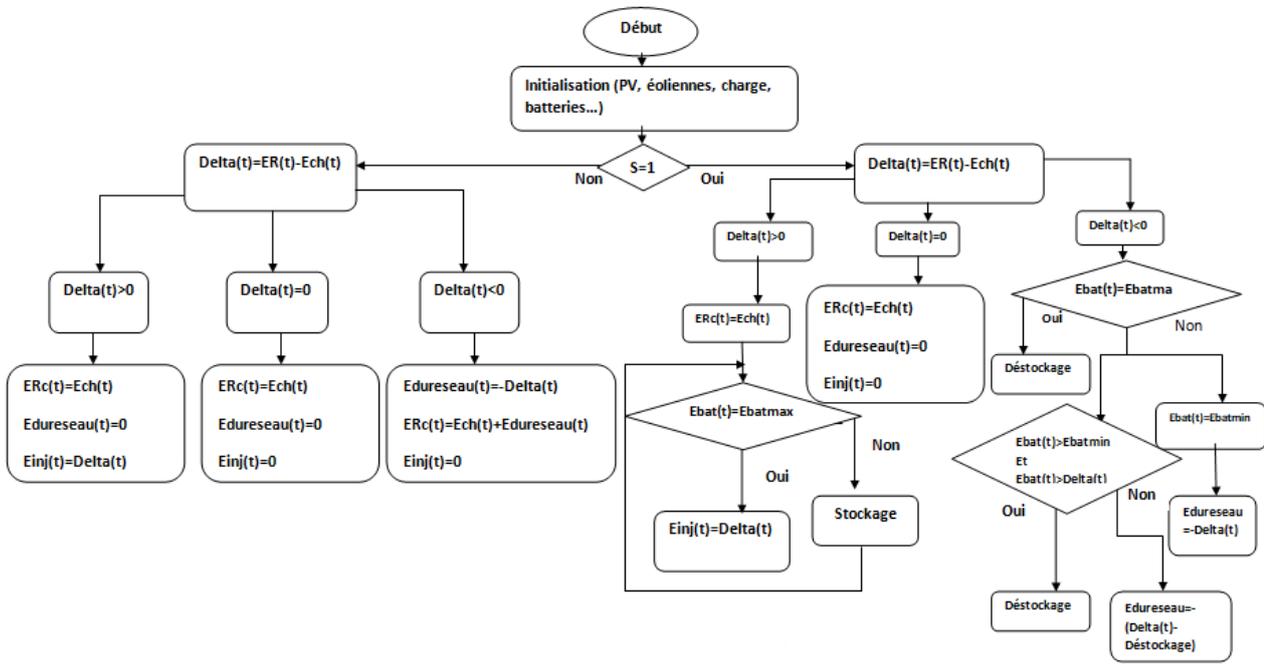


Figure IV.6 Organigramme de gestion de l'énergie appliqué pour le microgrid.

S représente l'état de système de stockage.

Lorsque $S=0$ la production décentralisée fonctionne sans système de stockage (première approche), si S égal à 1 le système fonctionne avec le système de stockage (deuxième approche).

Avec :

E_{Rc} : l'énergie de la charge,

$E_{duréseau}$: l'énergie soutirée du réseau,

E_{inj} : l'énergie injectée au réseau.

IV.5 Description de la simulation

La simulation est réalisée sous MATLAB, l'algorithme est développé sous la forme de "if-then-else", responsable de la mise en œuvre d'une stratégie de prise de décision en temps réel. Ces modes exécutent le flux d'énergie entre les différents composants du système. Cette simulation a pour but d'évaluer l'efficacité du système de contrôle proposé pour un micro-réseau en mode connecté, intégrant des sources d'énergie renouvelables photovoltaïques, éoliennes, un système de stockage par batterie et évidemment le réseau principal.

Dans cette étude, Les données sont prises d'un profil similaire utilisé par [43]. Le tableau suivant présente la variation des données météorologiques et la demande énergétique journalières.

Chapitre IV : Simulation et discussions

Tableau IV-3 Valeurs moyennes des différentes mesures prises sur le site [43]

Heures (h)	Eclaircement (Wh/m ²)	Température (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Charge (kWh)
01 :00	0	10.0625	2.86090278	4.473125
02 :00	0	9.5625	3.07486111	4.473125
03 :00	0	9.375	2.98472222	4.473125
04 :00	0	8.625	2.90451389	4.473125
05 :00	0	8.4375	3.05180556	4.473125
06 :00	0	8	2.69090278	4.473125
07 :00	0	8.375	3.03215278	4.473125
08 :00	54.4414063	9.125	2.97340278	4.473125
09 :00	160.033594	9.9375	3.07729167	6.43
10 :00	313.660156	11.375	3.43194444	7.275
11 :00	516.960938	13.5	3.929375	7.68125
12 :00	683.371094	15.8125	3.99631944	7.61875
13 :00	781.769531	17.6875	3.90736111	5.80625
14 :00	830.730469	19	4.63548611	4.86875
15 :00	828.015625	20.0625	4.53340278	5.475
16 :00	771.292969	20.0625	4.36326389	5.78125
17 :00	667.550781	19.4375	4.35013889	5.275
18 :00	561.132813	18.5625	4.10138889	4.05
19 :00	351.449219	17.375	3.86395833	4.473125
20 :00	161.761719	16.0625	3.01680556	4.473125
21 :00	13.796875	14.8125	2.42541667	4.473125
22 :00	0	13.375	2.33027778	4.473125
23 :00	0	12.375	2.535	4.473125
24 :00	0	11.0625	2.10819444	4.473125

IV.6 Résultats et discussion

La simulation réalisée sous MATLAB a pour but d'évaluer l'efficacité du système de control proposé pour la gestion du micro-réseau en mode connecté, le système de gestion a pour objectif de voir l'impact de l'échange d'énergie entre des différentes sources du micro réseau et le réseau principal en tenant compte de différentes contraintes.

IV.6.1 Premier scénario

Microgrid sans système de stockage

Dans ce scénario, la production d'origine renouvelable alimente la charge et le surplus d'énergie est injecté sur le réseau électrique, s'il y a une sous-production le réseau se chargera de subvenir aux besoins de la charge.

Après simulation on obtient les résultats suivants :

systeme PV	systeme eolien	la charge	puissance inj	puissa soutirée
0	0.7023	4.4731	0	3.7708
0	0.8670	4.4731	0	3.6061
0	0.7976	4.4731	0	3.6755
0	0.7359	4.4731	0	3.7373
0	0.8493	4.4731	0	3.6239
0	0.5714	4.4731	0	3.9017
0	0.8341	4.4731	0	3.6390
0.6464	0.7889	4.4731	0	3.0378
1.9391	0.8689	6.4300	0	3.6220
3.9163	1.1419	7.2750	0	2.2168
6.3710	1.5248	7.6813	0.2145	0
8.1201	1.5763	7.6188	2.0777	0
9.0631	1.5079	5.8063	4.7647	0
9.4936	2.0684	4.8688	6.6932	0
9.4178	1.9898	5.4750	5.9326	0
8.8549	1.8588	5.7813	4.9324	0
7.8172	1.8487	5.2750	4.3909	0
6.7106	1.6572	4.0800	4.2878	0
4.3647	1.4744	4.4731	1.3660	0
2.0158	0.8223	4.4731	0	1.6350

Figure IV-7 Puissances échangées entre les sources renouvelables et le réseau sans système de stockage

La Figure IV-8 représente l'allure des puissances issues de la gestion des différentes sources du micro-réseau ainsi que le profil de la charge.

Chapitre IV : Simulation et discussions

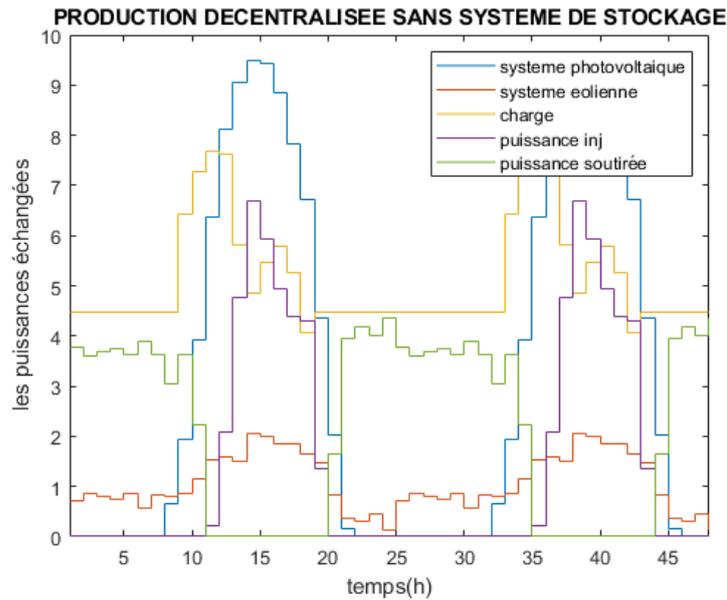


Figure IV-8 Point de consigne de la puissance des générateurs.

- De 1h jusqu'à 7h du matin, Nous observons ce qui suit :
 - Avant le lever du soleil la production par le champ photovoltaïque est nulle par cause d'absence de l'ensoleillement.
 - La production par les éoliennes est faiblement générée et non suffisante pour subvenir aux besoins de la charge, car la vitesse du vent était faible.
 - La consommation est supérieure à la production des énergies renouvelables (sources éoliennes). De ce fait, la puissance produite localement est entièrement consommée localement. Toutefois, pour satisfaire les besoins de la charge, la quantité de puissance manquante est soustrée à partir du réseau électrique (Figure IV-8), ce qui représente une sous-production du microgrid.

- De 8h jusqu'à 10h du matin, le système PV suit l'irradiation solaire et produit de l'énergie pour alimenter la charge qui augmente en parallèle. D'autre part, la production des éoliennes est moyennement générée et augmente graduellement avec l'augmentation de la vitesse du vent.
 - La consommation est supérieure à la production des énergies renouvelables. De ce fait, la puissance produite localement est entièrement consommée et le réseau principal remplit l'écart de l'énergie manquante.

- De 11h jusqu'à 19h, le champ photovoltaïque délivre une puissance importante et suffisante pour subvenir à l'appel de la charge et cela suite à l'augmentation de l'ensoleillement. Tandis que l'énergie des éoliennes reste assez faible.

Chapitre IV : Simulation et discussions

- A 11h, un pic de consommation enregistré dû à l'augmentation de la charge.
 - A 14h, un pic de l'irradiation et de la vitesse du vent, implique une production importante à partir des énergies renouvelables.
- La production à partir des énergies renouvelables dans cette phase est supérieure à la consommation instantanée donc l'alimentation du microgrid est à part entière des générateurs dispersés, et le surplus de puissance est injecté au réseau(Figure IV-8), ce qui implique une surproduction.
- De 20h jusqu'à minuit, la production photovoltaïque diminue considérablement avec le coucher du soleil. A partir de 22h, l'irradiation disparaît donc la puissance du champ photovoltaïque devient nulle et la production par les éoliennes est faiblement générée suite à la diminution de la vitesse du vent. Le réseau principal est utilisé pour remplir l'écart.

IV.6.2 Deuxième scénario

Microgrid avec système de stockage

L'objectif de ce scénario est de favoriser la consommation de l'énergie produite par le microgrid et l'inciter à s'iloter du réseau principal.

La Figure IV-9 représente l'état de charge de la batterie pendant 24h :

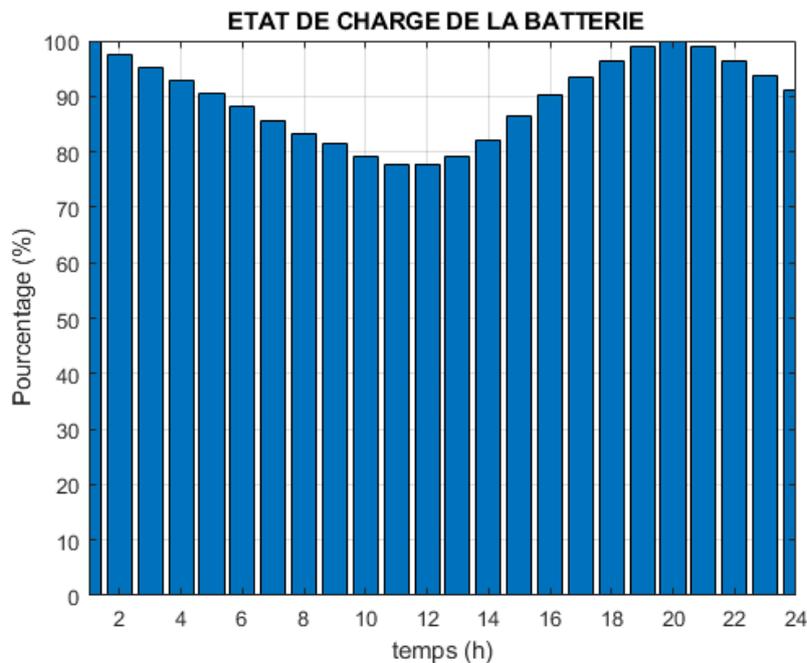


Figure IV-9 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 24h

La Figure IV-10 représente l'allure des puissances échangée entre l'installation et le système de stockage durant 24h :

Chapitre IV : Simulation et discussions

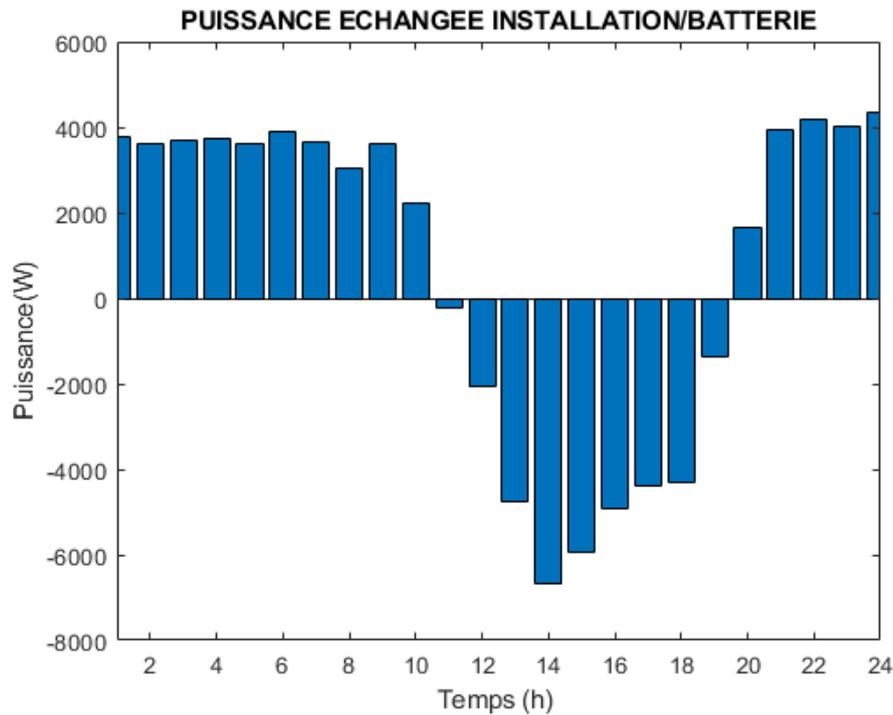


Figure IV-10 Puissance échangée entre l’installation et la batterie pendant 24h

La Figure IV-11 représente l’allure des puissances issues de la gestion des différentes sources du micro-réseau ainsi que le profil de la charge.

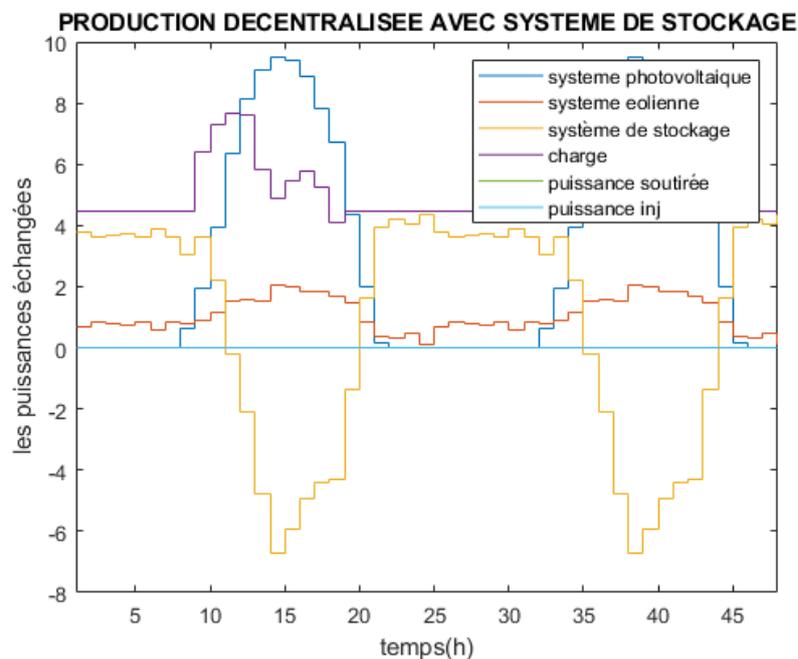


Figure IV-11 Point de consigne de la puissance des générateurs.

- De 1h du matin jusqu’à 10h, l’alimentation de la charge se fait à partir des énergies renouvelables (éoliennes et/ou Champ photovoltaïque), le manque d’énergie est rempli à partir des batteries initialement chargées voir Figure IV-9 et Figure IV-10.

Chapitre IV : Simulation et discussions

- De 11h du matin jusqu'à 19h la production à partir des énergies renouvelables (PV, WT) est supérieure à la consommation, elle satisfait donc la totalité de la charge demandée. De ce fait, le surplus de puissance est entièrement stocké dans les batteries.
 - De 20h du soir jusqu'à minuit, l'énergie du champ PV diminue avec le coucher du soleil et l'énergie éolienne n'est pas suffisante pour alimenter la charge, de nouveau il y a déstockage de l'énergie des batteries et l'échange d'énergie avec le réseau est nul, voir Figure IV-11.
- Après l'intégration du système de stockage (BESS), l'EMS favorise de remplir l'écart de la production par les batteries au lieu de faire appel au réseau principal.

IV.6.3 Troisième scénario

Absence de la production photovoltaïque

L'objectif de ce scénario est de voir comment le système de stockage et le réseau électrique vont subvenir aux besoins de la charge en cas d'absence de la production du champ photovoltaïque (Entretien par exemple).

La Figure IV-12 représente l'état de charge et de décharge de la batterie pendant 48h :

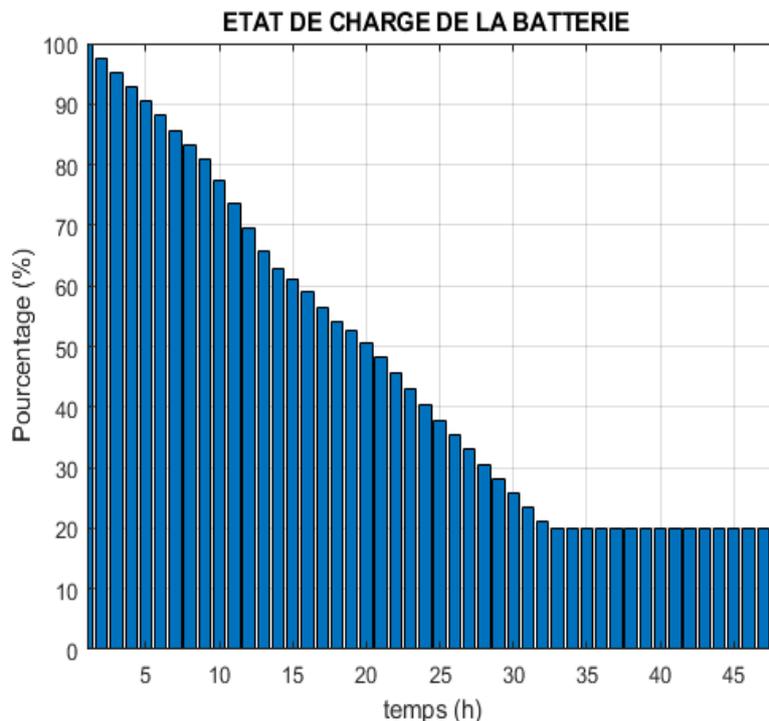


Figure IV-12 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 48h

Chapitre IV : Simulation et discussions

La Figure IV-13 représente l'allure des puissances échangée entre l'installation et le système de stockage durant 48h :

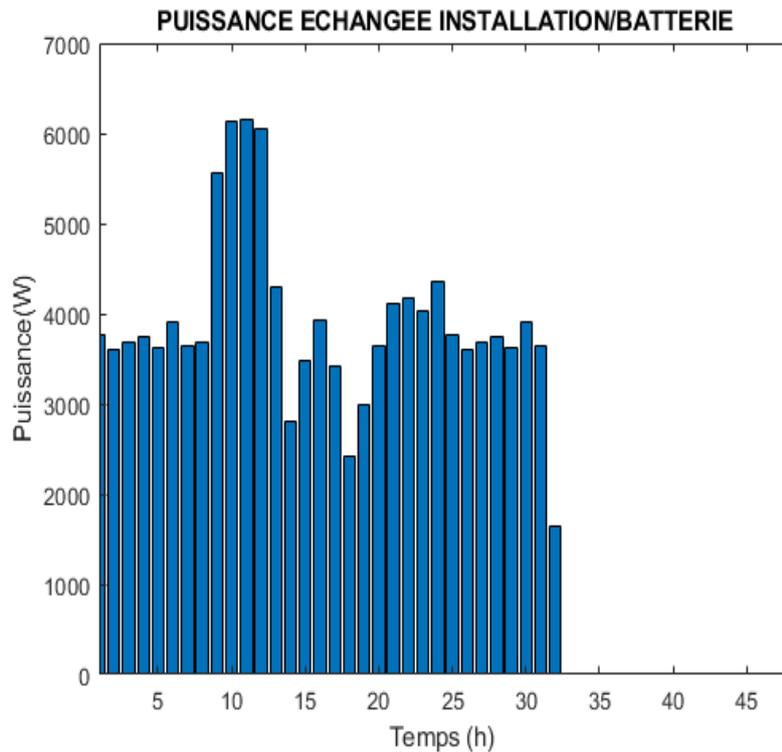


Figure IV-13 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 48h

La Figure IV-14 représente l'historique de la puissance soutirée du réseau :

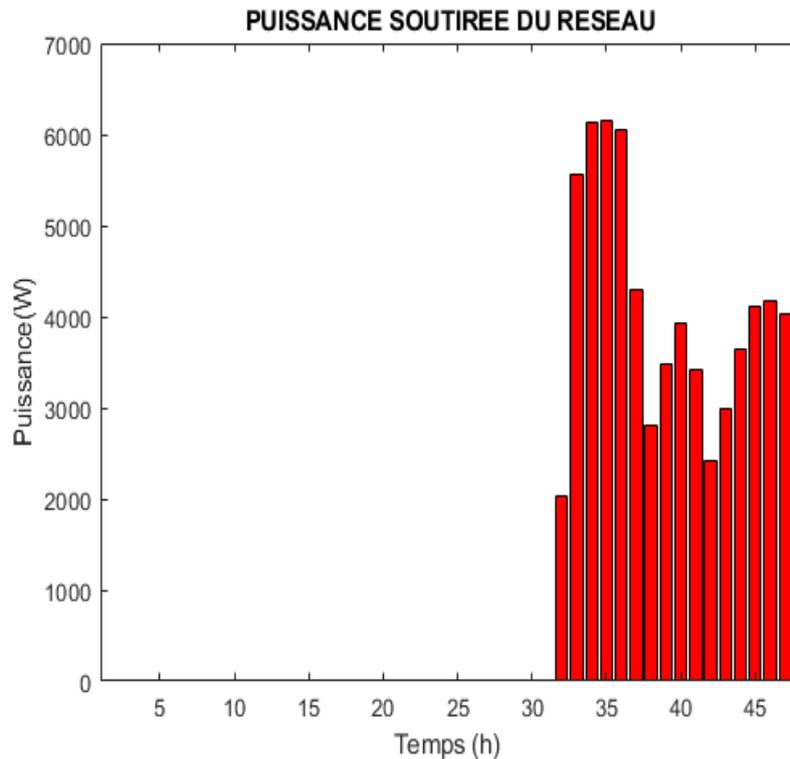


Figure IV-14 Puissance échangée entre l'installation et le réseau pendant 48h

Chapitre IV : Simulation et discussions

La figure IV.15 représente l'allure des puissances issues de la gestion des différentes sources du micro-réseau ainsi que le profil de la charge.

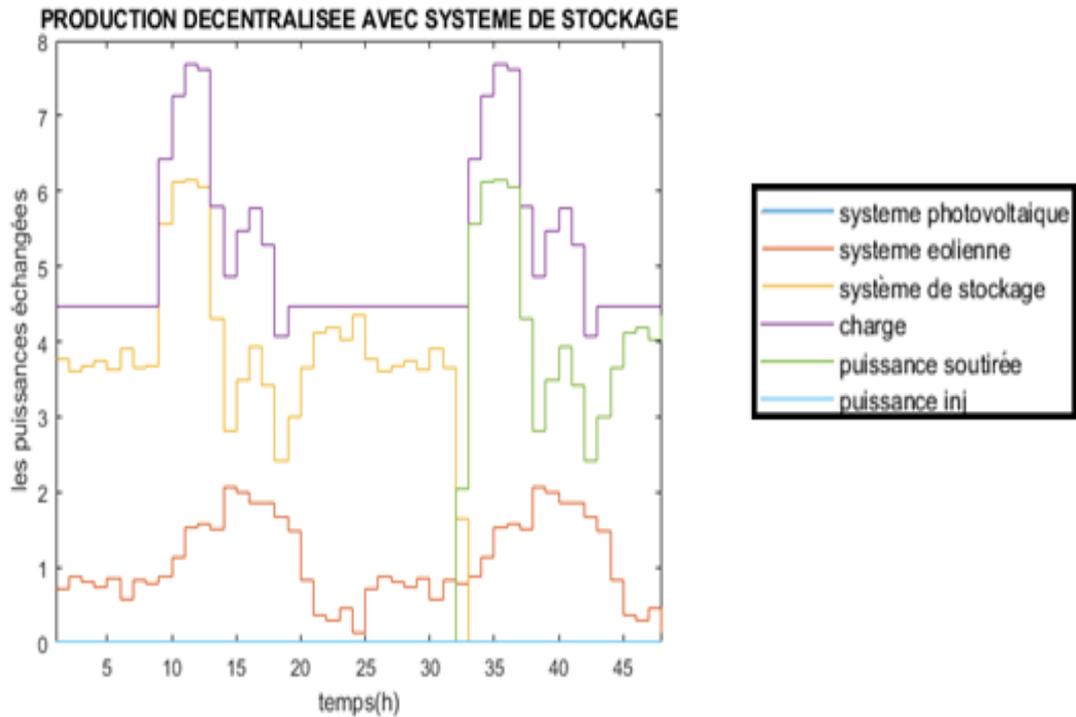


Figure IV-15 Point de consigne de la puissance des générateurs.

En cas d'entretien ou éventuelle panne générale du champ photovoltaïque, la gestion de l'énergie sera comme suit,

-De 1h du matin jusqu'à 7h du lendemain :

La demande de l'énergie est couverte à la fois par l'énergie des éoliennes et l'énergie soutirée à partir des batteries, voir figures IV.12 et IV.13.

-De 8h du matin jusqu'à minuit :

Le niveau de charge des batteries atteint son minimum, dans ce cas la charge est alimenté initialement par les éoliennes mais aussi à grande part, à partir du réseau principal (vitesse du vent faible) voir figures IV.14 et IV.15.

IV.6.4 Quatrième scénario

Fluctuation des énergies renouvelable

Nuage partiel vers 15h (Figure IV-1) et vent violent à 22h (Figure IV-2).

L'objectif de ce scénario est de voir l'impact des effets météorologiques (nuage et vent puissant) sur le système de production décentralisée.

Chapitre IV : Simulation et discussions

La Figure IV-16 représente l'état de charge et de décharge de la batterie pendant 24h

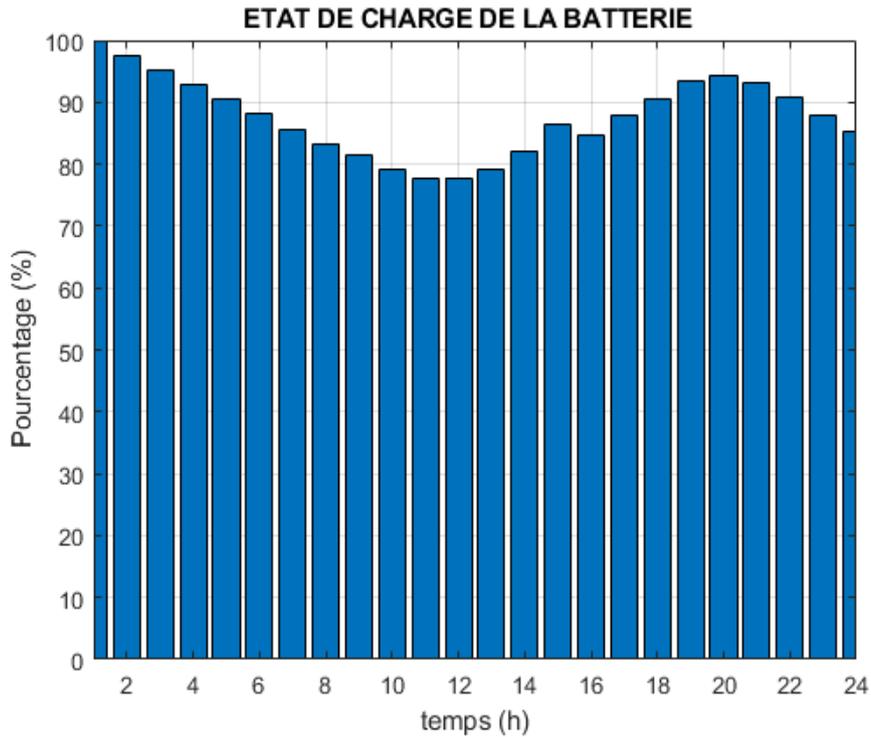


Figure IV-16Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 24h

La Figure IV-17 représente l'allure des puissances échangée entre l'installation et le système de stockage durant 24h :

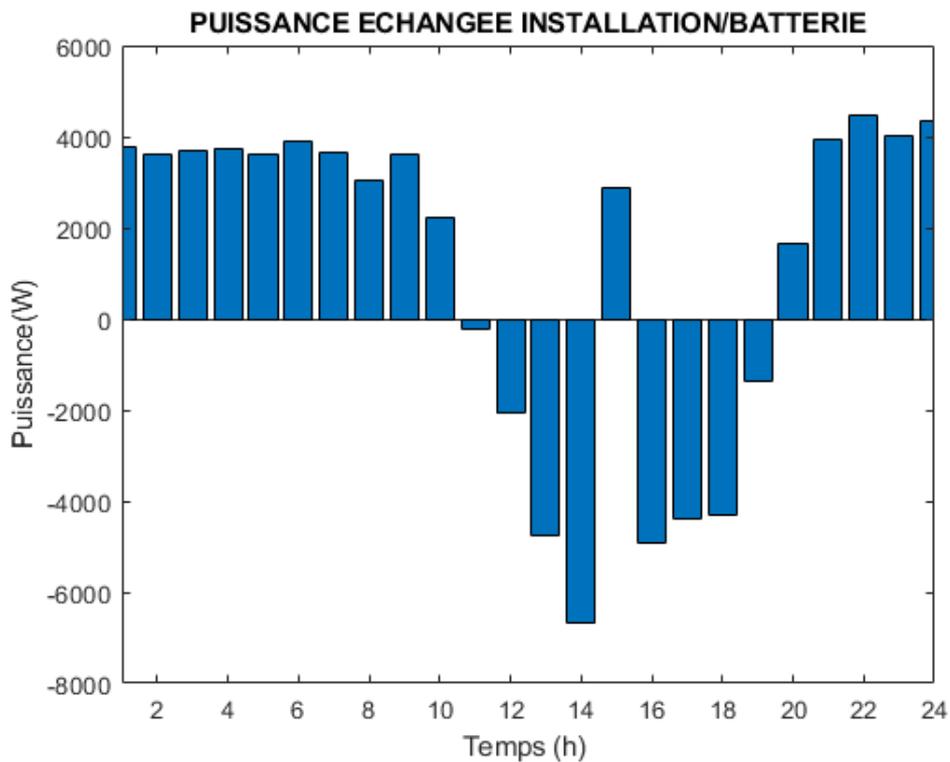


Figure IV-17 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 24h

La Figure IV-18 représente les allures des puissances issues de la gestion des différentes sources du micro-réseau ainsi que le profil de la charge

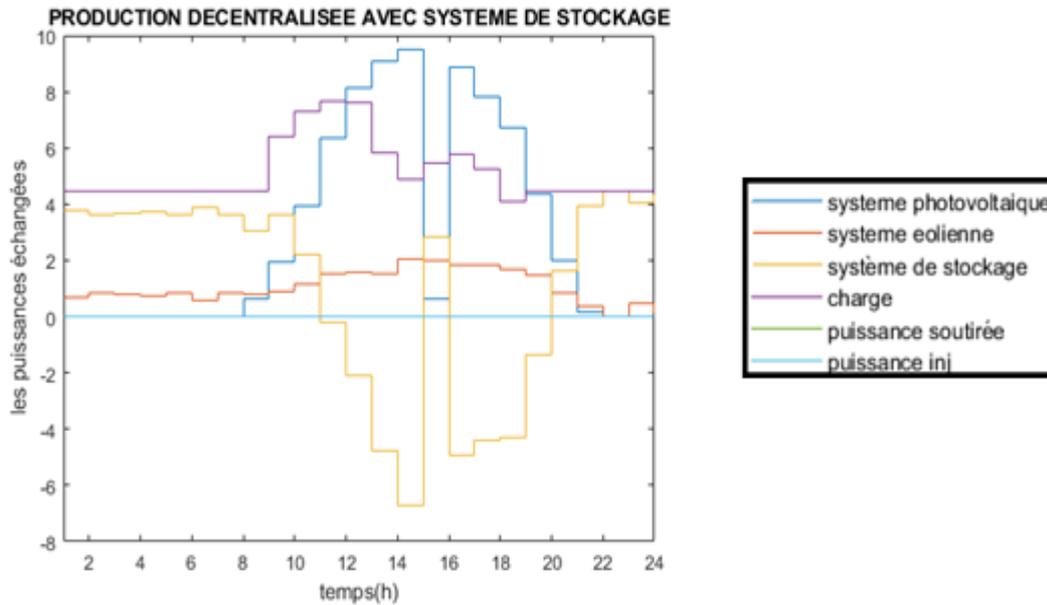


Figure IV-18 Point de consigne de la puissance des générateurs.

Ce profil ressemble à celui du deuxième scénario, sauf que nous enregistrons à 15h un nuage partiel qui affecte la production du champ photovoltaïque en provoquant un creux dans sa production. De même à 22h un vent puissant vient perturber l'installation, sa vitesse dépasse le seuil de vitesse de coupure de l'éolienne ($v_{co} = 40\text{m/s}$), alors les éoliennes s'arrêtent complètement (mise en drapeau). (Figure IV-18),

Afin de remédier à ce problème, le système de stockage entre en jeu pour combler le déficit de puissance (Figure IV-16),

Lorsque le vent baisse d'intensité, les éoliennes fonctionnent de nouveau de manière automatique.

IV.6.5 cinquième scénario

Injection de l'énergie photovoltaïque au réseau (échange de puissance Microgrid-réseau).

Une augmentation de la puissance PV suite à un dédoublement du nombre de panneaux. L'objectif de ce scénario est de voir si le EMS procède à l'injection du surplus d'énergie vers le réseau principal et ce dans le cas d'un surplus d'énergie après le chargement total des batteries, vu que dans les scénarios précédents l'installation était dimensionnée de justesse.

Chapitre IV : Simulation et discussions

La Figure IV-19 représente l'état de charge et de décharge de la batterie pendant 24h :

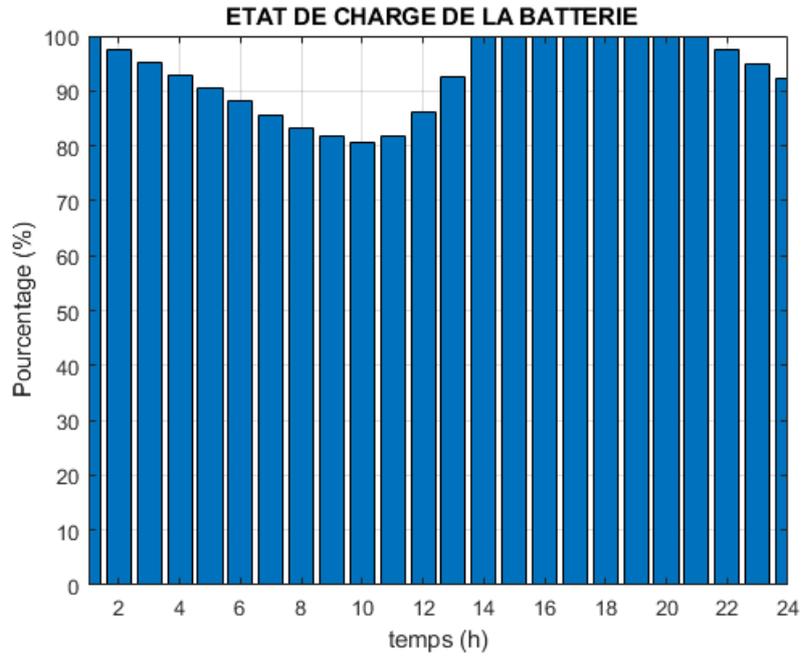


Figure IV-19 Etat de la charge de la batterie en pourcentage pendant 24h

La Figure IV-20 représente l'allure des puissances échangées entre l'installation et le système de stockage durant 24h :

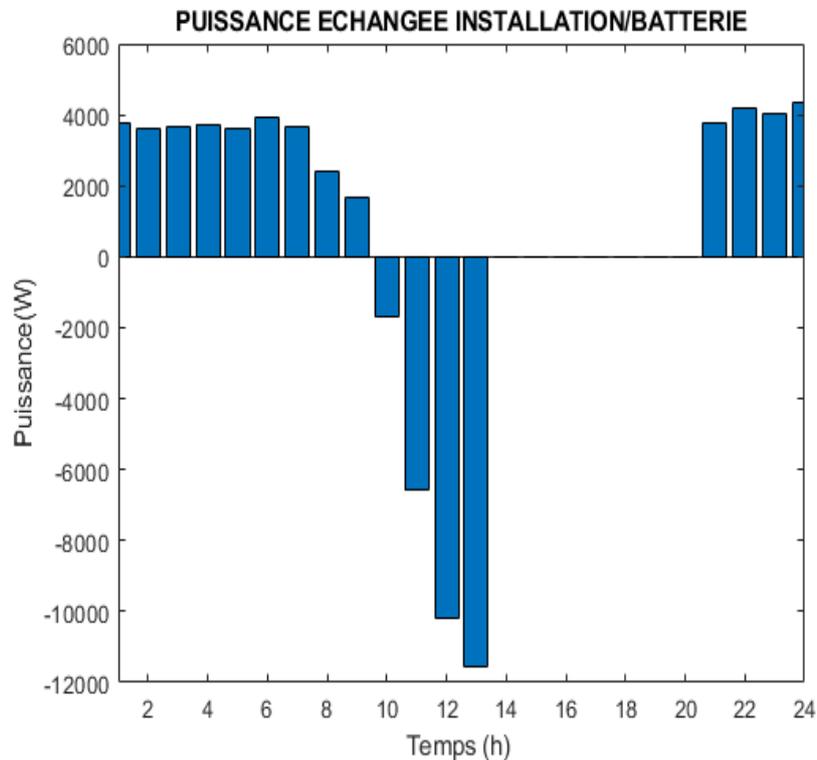


Figure IV-20 Puissance échangée entre l'installation et la batterie pendant 24h

La Figure IV-21 représente l'histogramme du surplus de puissance injectée au réseau :

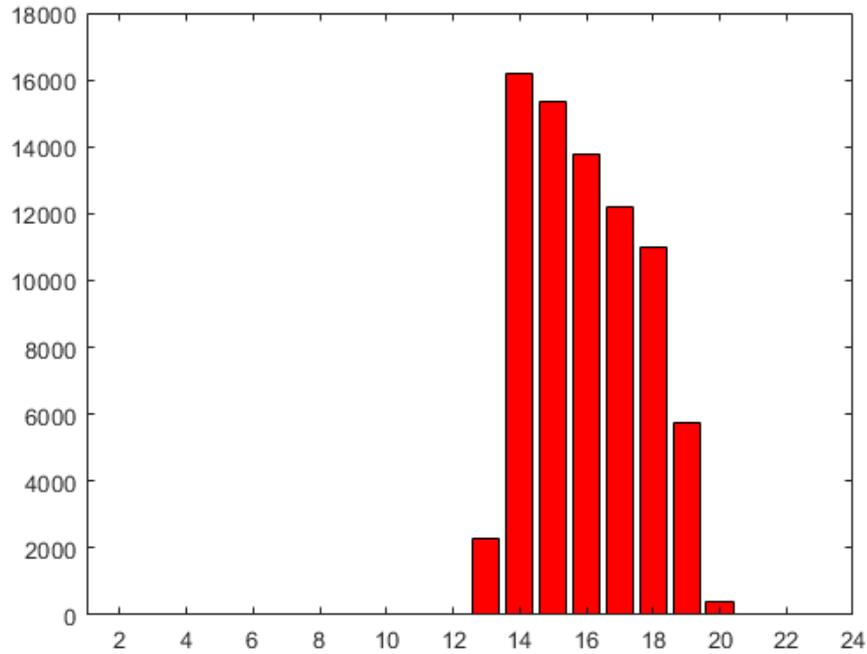


Figure IV-21 Puissance injectée au réseau pendant 24h.

La Figure IV-22 représente l'allure des puissances issues de la gestion des différentes sources du micro-réseau ainsi que le profil de la charge

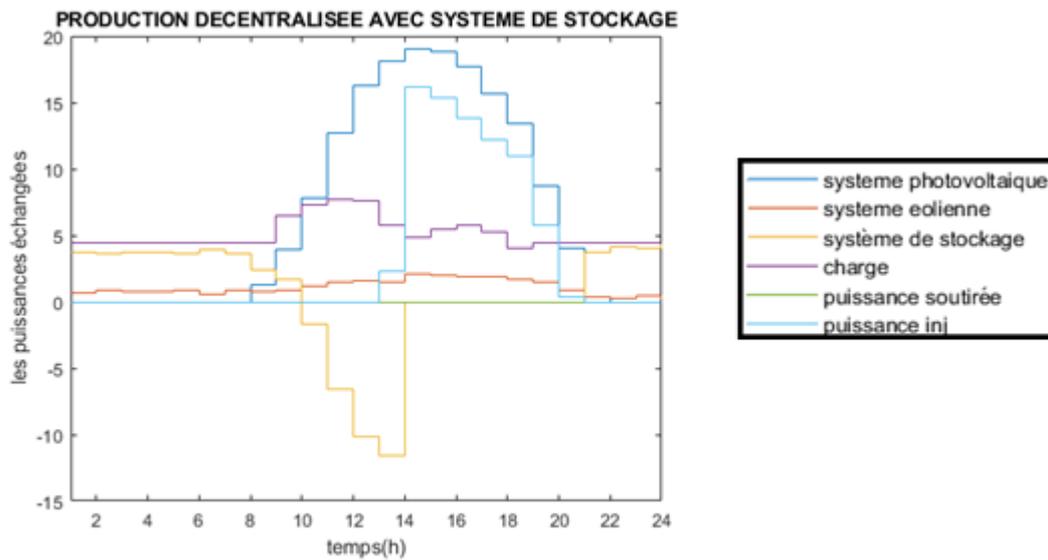


Figure IV-22 Point de consigne de la puissance des générateurs.

- De 1h jusqu'à 9h du matin, l'alimentation de la charge se fait à partir des énergies renouvelables (éoliennes et/ou Champ photovoltaïque), le manque d'énergie est comblé à partir des batteries initialement chargées voir Figures IV-19 et IV-20.

Chapitre IV : Simulation et discussions

- De 10h du matin jusqu'à 14h la production à partir des énergies renouvelables (PV notamment) est importante, elle satisfait donc la totalité de la charge demandée, le surplus de puissance est stocké dans les batteries.
- De 14h jusqu'à 21h du soir, le surplus de puissance sera injecté sur le réseau (Figure IV-21).
- De 21h jusqu'à minuit, la demande de l'énergie est couverte à grande part à partir des batteries (Energie renouvelable faible) voir Figure IV-21.

Conclusion

Notre travail consiste à adopter un système de gestion de l'énergie (EMS) appliqué à un micro-réseau en mode connecté, constitué de panneaux photovoltaïques, un parc éolien, un système de stockage par batteries et une charge administrative variable. Une stratégie de gestion basée sur des règles prédéfinies a été développée pour trouver la configuration optimale du programme d'exploitation des ressources énergétiques en tenant compte des différentes contraintes imposées.

Pour cela, plusieurs scénarios ont été présentés pour visualiser le comportement et le taux d'efficacité du système de gestion dans le partage optimal des puissances pour les différentes configurations. L'objectif est de minimiser la dépendance au réseau principal et favoriser l'échange bidirectionnel du flux d'énergie, lisser les fluctuations des énergies renouvelables et maximiser leur part dans le mix énergétique.

Les résultats de simulation présentés certifient l'efficacité du système de gestion suggéré et confirment la faisabilité de la stratégie, ainsi que sa capacité à partager correctement les puissances entre les différentes sources d'énergie et la charge demandé en obéissant aux contraintes de chaque élément.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ces dernières décennies, les réseaux électriques ont connu un développement rapide, particulièrement en raison des problèmes environnementaux critiques, la forte pénétration des sources d'énergie renouvelable et l'augmentation des besoins énergétiques en synchronisation avec l'apparition de nouvelles charges tel que les véhicules électriques. etc. La solution adoptée, par la plupart des pays, pour faire face à ces contraintes, se résume par le développement des systèmes de transmission flexible FACTS et les systèmes de transport en continu HVDC aussi bien que la décentralisation de l'énergie par l'insertion massive des énergies vertes, apportant des solutions fiables et performantes au réseau électrique.

Actuellement les réseaux sont entrain de se développer notamment avec l'apparition des réseaux électriques Intelligents (Smart Grids). Ces derniers permettent la gestion dynamique optimisée du réseau électrique, grâce à l'apport des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Le réseau intelligent (Smart Grid), constitue une solution prometteuse en terme d'efficacité, fiabilité, sûreté et intégration de nouveaux services au profit de ses usagers.

Un micro-réseau peut répondre dynamiquement aux changements de l'offre d'énergie en auto-ajustant la demande et la production. Des intégrations contrôlées et fiables des systèmes embarqués en parallèle des ressources énergétiques distribuées et des moyens de stockage dûment nécessaires pour garantir une alimentation électrique ininterrompue dont la configuration la plus efficace et la plus économique.

Dans ce travail, Nous avons d'abord commencé par une étude détaillée des différents problèmes liés aux réseaux électriques conventionnels ainsi que l'évolution de ces réseaux au sein de la transition énergétique. Nous avons ensuite établi un aperçu sur l'architecture des Smart Grids, leurs objectifs et enjeux. Après cela, nous avons exposé les différentes applications des micros grids ainsi que les récentes avancées technologiques qui ont contribué à créer un nouveau paradigme de réseau.

Nous avons par la suite procédé à la simulation du système de gestion de l'énergie élaboré par nos soins pour un micro-réseau en mode connecté alimenté principalement par ressources renouvelables (champ photovoltaïque et éoliennes) et un système de stockage (Batteries). L'objectif est de minimiser la dépendance au réseau principal et favoriser l'échange bidirectionnel du flux d'énergie, lisser les fluctuations des énergies renouvelables et maximiser leur part dans le mix énergétique.

Conclusion générale

Les résultats de simulation des scénarios proposés affirment l'efficacité du programme de gestion dans le partage optimal des puissances des différentes sources énergétiques en obéissant aux contraintes de chaque élément.

A titre de perspective nous proposons la continuité des études suivantes :

- Développement d'un système de gestion basé sur les méthodes d'intelligence artificielle.
- Simulation en temps réel d'un microgrid sous l'outil FPGA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Laib Kamel**, Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable, Mémoire de master, Université MOHAMED BOUDIAF M'SILA, 2016
- [2] **Hadj Saïd Noureddine et Sabonnadiere Jean-Claude**, Des réseaux électriques aux «Smartgrids », Encyclopédie de l'énergie Article : 073, 2015
- [3] **Mathieu Caujolle**, Identification et caractérisation des perturbations affectant les réseaux électriques HTA, Thèse de doctorat, Supélec, 2011
- [4] **Haddad Salim**, Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission, Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar- Annaba, 2011
- [5] **Fallilou Diop**, Analyses probabilistes pour l'étude des réseaux électriques de distribution, Thèse de doctorat, Université Paris Saclay, 2018
- [6] **BRAHIMI Karim et BOUCHALA Sofiane**, Les aspects techniques des projets Smart Grids, Mémoire de master, Université A/MIRA de Bejaia, 2013
- [7] LIVRE BLANC Des industriels au service de l'intelligence énergétique, Réseaux électriques intelligents
- [8] Florin Bogdan Enacheanu, Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007
- [9] Les Smart Grids, site édité par la CRE, Les Smart Microgrids, consulté le 01/05/2021 URL:www.smartgrids-cre.fr
- [10] **Guillaume Guérard**, Le monde de l'énergie, Article publié sur la majeure nouvelle énergie de l'ESILV, Ecole d'ingénieurs généraliste à Paris, 2018
- [11] **Nathalie BOSSE**, Transition écologique et énergétique, Les réseaux électriques intelligents : vers de nouveaux besoins en compétences et en formation, Céreq études, Centre de recherche en économie de Grenoble (CREG), 2016
- [12] **Manar Jaradat**, The Internet of Energy: Smart Sensor Networks and Big Data Management for Smart Grid, Jordan University of Science and Technology, Procedia computer Science, 2015
- [13] **M Y. Boualba et A. Bahakkou**, Les Réseaux Electriques Intelligents : Etat de l'art, Mémoire de master UDL SID BEL ABBES, 2019
- [14] **Hakim Sakkou**, Conception d'un compensateur actif avec multifonctions corrigeant toutes les perturbations et tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc, Mémoire d'ingénieur, Ecole de technologie supérieure-Université du Québec, 2007
- [15] **SCE-Cisco-IBM-SGRA Team**, Smart Grid Reference Architecture volume 1: Using information and communication services to support a Smarter Grid, International Business Machines, Southern California Edison Company, 2011

- [16] **Houti Zahra et Aberkane Yasmina**, Réseau de distribution d'électricité (Smart Grids), Mémoire de master, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2012
- [17] **R. CAIRE**, Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004
- [18] **C.Gellings et K.Parmenter**, Demand-side management, In: Energy Management and Conservation Handbook. CRC Press, 2016
- [19] **SianoPierluigi**, Demand response and smart grids, A survey: Renewable and sustainable energy reviews, 2014
- [20] **Patrick Jochem**,How to integrate electric vehicles in thefuture energy system? Karlsruhe Institute of Technology KIT, 2013
- [21] **BhagyaNathali Silva**, Futuristic Sustainable Energy Management in Smart Environments: A Review of Peak Load Shaving and Demand Response Strategies, Challenges,and Opportunities, School of Computer Science and Engineering, 2020
- [22] **P.Palenskyet D.Dietrich**, Demand side management: Demand response-intelligent energy systems and smart loads, IEEE transactions on industrial informatics, 2011
- [23] **H. SEBA et M. AZAREB**, Gestion de l'Energie dans un réseau électrique intelligent, Mémoire de master, UDL SID BEL ABBES, 2021
- [24] **Zhang et al**, Big data analytics in smart grids: a review, Energy Informatics, Polytechnic University of Turin, Torino, Italy, 2018
- [25] **A.Labrinidis et J. Hosagrahar**, Challenges and opportunities with big data, Proceedings of the VLDB Endowment, 2012
- [26] **D.Craigenet T. Diakun**,Definingcybersecurity, Technology Innovation Management Review, 2014
- [27] Construire les villes intelligentes et durables de demain, Spectrum Summit, Union Internationale des Télécommunications UIT, 2016
- [28] Applications de l'intelligence artificielle pour optimiser les économies d'énergies, site – Genium360, Inspiration de génie, 2019, consulté le 01/06/2021
URL: www.blogue.genium360.ca.com
- [29] **Moamar Sayeed Mouchaweh**, Intelligence artificielle et gestion intelligente de l'énergie, 2019
- [30] **Hassanien Ramadan**,Smart Charging and Discharging of Plug-in Electric Vehicles for Peak Shaving and Valley Filling of the Grid Power, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, South Valley University QenaEgypt, 2018
- [31]Les microgrids : des réseaux smart grids et décentralisés au service de la transition énergétique, 2018, consulté le 01/05/2021
URL: www.actu-environnement.com

- [32] **Franco N. Ferrucci**, Micro-réseau électrique intelligent en Polynésie française, Université de la Polynésie Française (UPF), 2016
- [33] Qu'est ce qu'un microgrid ou micro-réseau ?, energuide.be, visité le 01/05/2021
URL:www.energuide.be
- [34] **D.Olivares, C.Cañizares**, A centralized optimal energy management system for microgrids, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011
- [35] **David J. Leeds**, The Smart Grid in 2010: Market segments, applications and industry players, GTM Research, 2009
- [36] **A.Ahmadet A.Khan**, An optimized home energy management system with integrated renewable energy and storage resources, Energies, 2017
- [37] L'internet des objets au Cœur des Smart Grids, les smart Grids, Site édité par la CRE, consulté le 01/06/2021
URL:www.smartgrids-cre.fr
- [38] **H.Doukaset K.Patlitzianas**, Intelligent building energy management system using rule sets, Building and environment, 2007
- [39] **Anajlhden**, Vehicle-to-grid : la brique manquante au développement des smart grids ?, Association nationale des Auditeurs jeunes de l'Institut des Hautes Etudes de Défense nationale, 2015
- [40] **G. Sreelakshmi**, V2G Transfer of Energy to Various Applications, College of Engineering – Hyderabad - India, 2019
- [41] The future of DNA Data Storage, A Potomac Institute for Policy Studies Report, 2018, consulté le 01/06/2021
- [42] Stockage ADN: Tout savoir sur la révolution du stockage de données, LE BIGDATA, consulté le 01/06/2021
URL:www.lebigdata.fr
- [43] M. BEN LEKEHAL et Y. Amoura, Dimensionnement optimal par essaim particulière et par algorithme génétique d'un système énergétique hybride pour l'alimentation du bloc administratif du SARL BOUBLENZ, Thèse d'ingénieur, ESSA-Tlemcen, 2020
- [44] Nasreddine ATTOU, Sid-Ahmed ZIDI1, Mohamed KHATIR et Samir HADJERI, Energy Management System for Hybrid Microgrids, Intelligent Control and Electrical Power Systems Laboratory (ICEPS), Djillali Liabes University, Sidi Bel-Abbes, 2020
- [45] Luu, N.A. "Control and management strategies for a microgrid". Thèse de doctorat Université de Grenoble, Grenoble, France, 2014

Résumé

L'objectif global de notre travail consiste à établir un système de gestion de l'énergie pour un micro-réseau intelligent en mode connecté, à base de ressources renouvelables (champ photovoltaïque et éoliennes) et un système de stockage (Batteries), afin de gérer de manière optimale les ressources énergétiques et obtenir un fonctionnement fiable, durable et économique.

Mots clés : micro-réseaux intelligent, énergies renouvelables, système de gestion d'énergies, régulation dynamique de la charge.

Abstract

The overall objective of our work is to establish an energy management system for a smart microgrid in connected mode, based on renewable resources (photovoltaic field and wind turbines) and a storage system (Batteries), in order to optimally manage energy resources and obtain a reliable, sustainable and economical operation.

Keywords: smart microgrid, renewable energy, energy management system, dynamic load regulation.

ملخص

الهدف العام لعملمانا هو إنشاء نظام لإدارة الطاقة لشبكة صغيرة ذكية في وضع متصل ، بناءً على الموارد المتجددة (المجال الكهروضوئي وتوربينات الرياح) ونظام التخزين (البطاريات) ، من أجل إدارة موارد الطاقة على النحو الأمثل و تحقيق عملية موثوقة ومستدامة واقتصادية.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الدقيقة الذكية ، الطاقات المتجددة ، نظام إدارة الطاقة ، تنظيم الحمل الديناميكي