

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

AND SCIENTIFIC RESEARCH



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية

-تلمسان-

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES

--T L E M C E N--

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Energie et environnement**

Présenté par :

BENSAOUDI Mohamed Samir

ARAR Salah Eddine

Thème

**Etude et simulation d'un micro réseau
intelligent (microgrid)**

Soutenu publiquement, le /10/2020 devant le jury composé de :

Pr MERAD Lotfi	Professeur	ESSA Tlemcen	Président
Dr Bousmaha Imen Souhila	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 1
Dr Abdelaoui Ghouti	MCB	ESSA Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

*Tout d'abord, louanges et remerciements au bon dieu **ALLAH** le tout puissant qui est à l'origine de toutes les merveilleuses choses dont les plus précieuses « l'amour du savoir »,*

*Nous tenons à travers ce modeste travail à remercier nos promoteurs Dr **IMEN SOUHILA BOUSMAHA** Maître de conférence et Mr **ATTOU NASR EDDINE** qui nous ont apporté leurs expériences avec la plus grande disponibilité tout au long de ces mois et leurs conseils et pertinentes remarques, qui nous ont été d'une très grande utilité*

Nous remercions vivement tous les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire et à l'intérêt qu'ils lui ont apporté. Nous leurs sommes redevables pour leur attention et leur bienveillance.

Un grand merci à nos familles qui nous ont toujours soutenus dans les meilleurs moments comme dans les pires; chers mères et pères.

Nous exprimons nos remerciements les plus sincères et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude :

• *A mes chers parents pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué ; avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance. Qu'ALLAH leurs procure bonne santé et longue vie. Mon cher papa, BENSAOUDI Ameur, et ma chère maman, LAHRACHE Saadia, je tiens à vous remercier.*

• *A mon grand frère Ahmed Khalil, et sa femme Lilia et la princesse Meriem.*

• *A mon adorable frère Aymen Salah Eddine ainsi qu'à ma très chère sœur Dr Aicha et son époux Dr Zemmiri Noerdin qui ont toujours crus en moi et encouragé, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour que je porte pour vous.*

• *A la mémoire de mes grands-parents. Qu'ALLAH vous accordez sa clémence, sa miséricorde et vous accueille dans son saint paradis.*

• *A mes chères tantes, chers oncles, cousins et cousines...*

• *A tous mes amis : AIMEN MOHAMED, Mohamed ba3li Hamza, Oussama lem7assak LBENZ (PDG), YACINE CHPIPET avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.*

• *A mon binôme SALAH avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir de travailler avec toi.*

• *A tous ceux qui me sont chères.*

• *A tous ceux qui m'aiment.*

Mohamed Samir

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, aux deux merveilleuses personnes qui m'ont aidé et guider vers la voie de la réussite :

A mes Parents, Que DIEU m'aide à les honorer et exprimer ma profonde reconnaissance pour tout ce qu'ils m'ont offert d'encouragements et de soutien.

Je le dédie aussi a :

- *CHARIKAT EL KIA WE HYUNDAY (les frères ARAR)*
- *Mes chers frères et sœurs.*
- *Mes oncles et toutes leurs petites familles.*
- *A tous mes proches.*
- *A tous mes ami(e)s : Hama , khadija, kheira avec qui j'ai passé un agréable cursus.*

SALAH EDDINE

Résumé

La raréfaction des ressources énergétiques fossiles, l'augmentation de la demande énergétique mondiale ainsi que la nécessité de réduire l'impact environnemental des émissions de gaz à effet de serre sont des enjeux majeurs. Pour y répondre, le développement des micro réseaux intelligents introduisant les énergies renouvelables et la maîtrise de la demande, notamment dans le secteur résidentiel, gros consommateur d'énergie, ainsi les stratégies intelligentes s'avère être des solutions intéressantes.

Notre travail consiste à démontrer le fonctionnement du micro réseau intelligent actuellement en cours d'utilisation et de développement un peu partout dans le monde, en mesure d'améliorer les procédés de production d'énergie et de réduire les perturbations de puissance provoquées par les sources renouvelables intermittentes et les difficultés et problèmes du réseau conventionnel.

Le modèle abordé est composé de deux sources de production à base d'énergies renouvelables (photovoltaïque et éolienne), d'un système de stockage mobile basé sur les batteries des véhicules électriques, une charge variable et enfin un générateur diesel afin de combler le déficit et assurer la régulation entre production et consommation.

Le système est simulé sur logiciel Matlab- Simulink pour des scénarios modifiant les consistances d'entrée du système, et de surveiller à chaque fois l'équilibre énergétique entre l'offre et la demande.

Mots clés : réseau conventionnel, micro réseau intelligent, énergies renouvelables, véhicules électriques, régulation production et consommation.

Abstract

The scarcity of fossil energy resources, the increase in global energy demand and the need to reduce the environmental impact of greenhouse gas emissions are major challenges. To meet these challenges, the development of micro-grids introducing renewable energies and demand management, particularly in the residential sector, which is a major energy consumer, and smart strategies are proving to be interesting solutions.

Our work consists in demonstrating the operation of the micro grid currently in use and development around the world, able to improve energy production processes and reduce power disturbances caused by intermittent renewable sources and the difficulties and problems related to conventional grid.

The model discussed is composed of two sources of production based on renewable energies (photovoltaic and wind power), a mobile storage system based on the batteries of electric vehicles, a variable load and finally a diesel generator to make up the deficit and ensure the regulation between production and consumption.

The system is simulated on Matlab-Simulink software for scenarios modifying the input consistencies of the system, and to monitor each time the energy balance between supply and demand.

Keywords : conventional grid, micro-grid, renewable energies, electric vehicles, production and consumption regulation.

ملخص

تعد ندرة موارد الطاقة الأحفورية، وزيادة الطلب العالمي على الطاقة، فضلاً عن الحاجة إلى الحد من التأثير البيئي لانبعاث غازات الاحتباس الحراري من القضايا الرئيسية. للاستجابة لذلك، فإن تطوير الشبكات الصغيرة الذكية يوفر الطاقات المتجددة والتحكم في الطلب، لا سيما في القطاع السكني، المستهلك الكبير للطاقة، لذلك أثبتت الاستراتيجيات الذكية أنها حلول مثيرة للاهتمام.

يتمثل عملنا في إظهار تشغيل الشبكة الصغيرة الذكية قيد الاستخدام والتطوير حالياً حول العالم، وهي قادرة على تحسين عمليات إنتاج الطاقة وتقليل الاضطرابات التي تسببها المصادر. مصادر الطاقة المتجددة المتقطعة وصعوبات ومشاكل الشبكة التقليدية.

يتكون النموذج الذي تمت مناقشته من مصدرين للإنتاج يعتمدان على الطاقات المتجددة (الكهروضوئية والرياح)، ونظام تخزين متنقل يعتمد على بطاريات السيارات الكهربائية، وحمل متغير، وأخيراً مولد ديزل من أجل سد الفجوة وضمان التنظيم بين الإنتاج والاستهلاك.

تمت محاكاة النظام على برنامج Matlab-Simulink لإجراء تعديلات على تناسق مدخلات النظام، ومراقبة توازن الطاقة بين العرض والطلب في كل مرة.

الكلمات المفتاحية: الشبكة التقليدية، الشبكة الدقيقة الذكية، الطاقات المتجددة، المركبات الكهربائية، تنظيم الإنتاج والاستهلاك.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumé

liste des figures

liste des tableaux

liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....01

Chapitre 1 : Transition énergétique vers les réseaux intelligents

1. Introduction.....05

1.2. Réseaux électriques actuels.....05

1.3. Problèmes liés aux réseaux actuels.....06

 1.3.a. Autres problèmes liés aux réseaux actuels.....08

1.4. La nécessité du mix énergétique.....09

1.5. Emergence des Smart Grids10

1.6. Réseaux électriques intelligents (Smart Grid).....11

1.7. Principe de fonctionnement des smart grids.....13

1.8. Les consommateurs au sein des réseaux intelligents.....14

1.9. Avantages des smart grids.....15

1.10. Architecture des smart grids.....15

 1.10.1. Modèle de NIST.....15

1.10.2. Modèle de IEEE.....	16
1.11. Caractéristiques des smart grids.....	17
1.12. Comparaison entre réseaux actuels et réseaux intelligents.....	17
1.13. Conclusion	19
Chapitre 2 : Les micro- réseaux intelligents	
2.1- Introduction	21
2.2- Micros réseaux intelligents.....	21
2.2.1- Concept des micros réseaux.....	21
2.2.2- Classification des micros réseaux intelligents	22
2.2.3- Avantages du déploiement des micros réseaux intelligents.....	23
2.2.4- Défis technico-économiques des micros réseaux.....	24
2.3- Intégration des énergies renouvelables.....	24
2.3.1- Production décentralisée.....	25
2.3.2- Causes de l'intégration des énergies renouvelables	25
2.3.3- Différents types d'énergies renouvelables.....	26
2.3.3.1- Energie solaire photovoltaïque ou thermique.....	26
2.3.3.2- Energie éolienne.....	27
2.3.3.3- L'énergie hydraulique	28
2.3.3.4- Biomasse.....	29
2.4- Stratégies de stockage de l'énergie électrique.....	30

2.4.1-	Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP).....	30
2.4.2-	Stockage d'énergie sous forme comprimée (CAES)	30
2.4.3-	Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène.....	31
2.4.4-	Batteries électrochimiques.....	32
2.5-	Le système de comptage évolué (smart metering)	32
2.5.1-	Caractéristique du smart metering.....	33
2.5.2-	Présentation du système de comptage évolué.....	33
2.5.3-	Principe de fonctionnement du CPL.....	34
2.5.4-	Principales fonctionnalités des systèmes de comptages évolués.....	34
2.6-	Applications du micro réseaux intelligents.....	34
2.6.1-	Maison communicante et bâtiment intelligent.....	34
2.6.2-	Ville intelligente (Smart-city).....	36
2.6.2.1-	Contexte de la ville intelligente.....	37
2.6.2.2-	Caractéristiques de la smart city	37
2.6.2.3-	L'Open Data au service des villes intelligentes.....	38
2.6.3-	Véhicules électriques	39
2.6.3.1-	Classification des véhicules électriques.....	39
2.6.3.2-	Infrastructure de recharge.....	40
2.6.3.3-	principe de fonctionnement	40
2.6.3.4-	Technologie V2G.....	41

2.6.3.4.a- Objectif de la technologie V2G	42
2.6.3.4.b- Utilisation du véhicule électrique comme moyen de stockage	42
2.7- Conclusion.....	43
Chapitre 3 : <i>Simulation et interprétation de résultats</i>	
3.1- Introduction.....	45
3.2- Description du Microgrid.....	45
3.2.1- Générateur diesel.....	46
3.2.2- Énergie renouvelable.....	46
3.2.3- Véhicule to grid (V2G).....	46
3.2.4- La charge.....	49
3.3- Scénarios proposés.....	49
3.3.1- Scénario 1 :Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV–EV)	50
3.3.2- Scénario 2: Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV–WT)	50
3.3.3- Scénario 3 :Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV) .	50
3.3.4- Scénario 4 :Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV) .	50
3.3.5- Scénario 5 :Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV).....	50
3.3.6- Scénario 6:Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV).....	50
3.4- Organigramme.....	51
3.5- Résultats de simulation.....	51

3.5.1- Scénario -1- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV–EV)	51
3.5.2- Scénario -2- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV–WT)	54
3.5.3- Scénario -3- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)..	55
3.5.4- Scénario -4- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)..	58
3.5.5- Scénario -5- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV).....	60
3.5.6- Scénario -6 -Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV).....	62
3.6- Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	66

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1- Schéma du parcours de l'énergie.....	05
Figure 1.2- Evolution de la consommation mondiale.....	06
Figure 1.3- Emission mondiale du CO2.....	07
Figure 1.4- Transit de puissance sur le réseau avec et sans EnR.....	07
Figure 1.5- Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire.....	08
Figure 1.6- Schématisation du réseau électrique.....	09
Figure 1.7- transition vers les smart grids.....	11
Figure 1.8- Infrastructure des smart-grid électricité.....	12
Figure 1.9- modèle simplifié du smart grid.....	12
Figure 1.10- principe de fonctionnement des smart-grids électricité.....	14
Figure 1.11- Contribution du consommateur sur les réseaux intelligents.....	14
Figure 1.12- Schéma conceptuel du Smart Grid proposé par NIST.....	16
Figure 1.13- Schéma conceptuel du Smart Grid proposé par IEEE.....	17
Figure 1.14- Comparaison des réseaux classiques et des réseaux intelligents..	18

Chapitre 2 :

Figure 2.1- Types de raccordements des micro réseaux	22
Figure 2.2- Zones d'utilisation des micro	23
Figure 2.3- Caractéristiques de la production décentralisé	24
Figure 2.4- Principe de fonctionnement du système photovoltaïque.....	26
Figure 2.5- Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique	27
Figure 2.6- Composantes d'une éolienne.....	28
Figure 3.7- Principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique.....	28
Figure 2.8- La fabrication des biocarburants.....	29
Figure 2.9- Principe de fonctionnement de STEP.....	30
Figure 2.10- Stockage sous forme comprimée.....	31

Figure 2.11- Le stockage grâce à l'hydrogène.....	32
Figure 2.12- Eléments chimiques des batteries avec leurs durée de vie.....	32
Figure 2.13- Système de comptage évolué en électricité.....	33
Figure 2.14- Système de comptage évolué en électricité.....	35
Figure 2.15- Bâtiment intelligent (Schneider Electric, Programme Homes).....	36
Figure 2.16- Schéma des leviers d'une ville intelligente.....	38
Figure 2.17- Open data au service des villes intelligentes.....	39
Figure 2.18- Fonctionnement d'un véhicule électrique.....	41
Figure 2.19- Contribution du VE à la chaîne.....	42
Figure 2.20 Utilisation du véhicule électrique comme moyen de stockage.....	43

Chapitre 3 :

Figure 3.1- Schéma de simulation d'un Micro-grid dans matlab.....	45
Figure 3.2- Profil 01.....	46
Figure 3.3- Profil 02	47
Figure 3.4- Profil 03.....	47
Figure 3.5- Profil 04.....	48
Figure 3.6- Profil 05.....	48
Figure 3.7 : Profils de recharge des véhicules électriques.....	49
Figure 3.8 : Organigramme de gestion.....	51

Scénario -1- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV–EV)

Figure 3.9- Variation de la puissance produite et générées.....	52
Figure 3.10- Production renouvelable durant la journée.....	52
Figure 3.11- L'injection de puissance de VE (V2G)	52
Figure 3.12- Chargement des VE durant la journée	52
Figure 3.13- Production du générateur diesel durant la journée.....	52
Figure 3.14- Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge.....	53

Scénario -2- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV–WT)

Figure 3.15- Variation de la charge résidentielle durant la journée.....54
Figure 3.16- Variation de la charge industrielle durant la journée.....54
Figure 3.17- Variation de la puissance produite et générées.....54
Figure 3.18- Production renouvelable durant la journée.....54

Scénario -3- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

Figure 3.19- Variation de la charge résidentielle durant la journée.....55
Figure 3.20- L’injection de puissance de VE (V2G).....55
Figure 3.21- Chargement des VE durant la journée.....55
Figure 3.22- Variation de la puissance produite et générées journée.....56
Figure 3.23- Production renouvelable durant la journée.....56
Figure 3.24- Production du générateur diesel durant la journée.....56
Figure 3.25- Profils d’utilisateurs des VE et leurs états de charge.....56

Scénario -4- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

Figure 3.26- Variation de la production PV durant la journée.....58
Figure 3.27- L’injection de puissance de VE (V2G).....58
Figure 3.28- Chargement des VE durant la journée.....58
Figure 3.29- Variation de la puissance produite et journée.....58
Figure 3.30- Production renouvelable durant la journée.....58
Figure 3.31- Production du générateur diesel durant la journée.....59
Figure 3.32- Profils d’utilisateurs des VE et leurs états de charge.....59

Scénario -5- Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV)

Figure 3.33- Variation de la production PV durant la journée.....60
Figure 3.34- Variation de la charge résidentielle durant la journée.....60
Figure 3.35- Variation de la charge industrielle durant la journée.....60
Figure 3.36- Variation de la puissance produite et générées.....60
Figure 3.37- Production renouvelable durant la journée.....60
Figure 3.38- Production du générateur diesel durant la journée.....61

Figure 3.39 -Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge	61
Scénario -6 - Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)	
Figure 3.40 -Variation de la charge résidentielle durant la journée.....	62
Figure 3.41 -Variation de la charge industrielle durant la journée.....	62
Figure 3.42 -L'injection de puissance de VE (V2G).....	62
Figure 3.43 -Chargement des VE durant la journée.....	62
Figure 3.44 -Variation de la puissance produite et générées.....	62
Figure 3.45 -Production renouvelable durant la journée.....	62
Figure 3.46 -Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge.....	63

Liste des tableaux :

Tableau 1.1: Comparaison des réseaux classiques et des réseaux intelligents...18

Liste des abréviations

- **EnR** : Energie renouvelable
- **AIE** : Agence Internationale de l'Energie
- **STEP** : Stations de Transfert d'Énergie par Pompage
- **CAES** : Compressed Air Energy Storage
- **AMR** : Automated Meter Reading
- **AMM** : Automated Meter Management
- **AMI** : Advanced Metering Infrastructure
- **CPL** : Courants porteurs en ligne
- **RJ45** : « RJ » vient de l'anglais Registered Jack
- **Mhz** : Symbole du mégahertz
- **NTIC** : Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication,
- **V2G** : vehicle-to-grid
- **GWh** : gigawatt-heure,
- **EV** : l'abréviation d'Electric Vehicle .
- **PV** : Le capteur solaire **photovoltaïque**
- **WT** : Wind Turbine
- **SOC** : State Of Charge
- **IAE** : institut d'administration des entreprises
- **GES** : gaz à effet de serre.
- **NOx** : oxydes d'azote
- **IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers
- **DER** : Distributed Energy resources
- **GIEC** : Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- **NIST** : National Institute of Standards and Technology

Introduction Générale

Introduction générale

Le Contexte énergétique mondial est caractérisé, aujourd'hui, par une demande sur les produits énergétiques, en constante hausse. [1]

En fait, les statistiques affirment qu'au cours des prochaines décennies, le développement social et industriel de la Chine induira une croissance énorme de la demande d'électricité en Chine; supérieure à la demande totale actuelle dans Les États-Unis d'Amérique et le Japon pris ensemble. Cette demande est aussi remarquable dans les pays en voie de développement, en raison de la croissance de leurs populations et de leurs besoins en nourriture, éducation et santé. [2] [3]

La limite des stocks de pétrole, de gaz ou de charbon ne fait plus de doute aujourd'hui, bien que les dates des pics de production pour les différentes ressources fassent toujours débat. En fait, les combustibles fossiles ne se trouvent que dans des régions restreintes de la terre et sont soumis à des accords et des relations politiques. Leur disponibilité et leur prix reflètent souvent les tensions politiques entre des régions géographiques importantes, et constituent un risque énorme pour les pays développés et les pays en développement.

Les coûts des ressources et de l'électricité poussent également les hommes politiques et les scientifiques du monde entier à trouver des solutions à ces menaces imminentes.

Au problème d'approvisionnement énergétique viennent s'ajouter les questions environnementales avec le réchauffement climatique attribué à l'activité humaine qui entraîne une série de recommandation pour réduire des émissions de gaz à effets de serre.

La production énergétique mondiale reposant aujourd'hui encore à plus de 80 % sur les énergies fossiles, émettrices de CO₂ et dont le déclin est par nature inévitable. En outre, les analyses des conséquences du changement climatique génèrent d'énormes prise de conscience publique et politique et en incitant ces acteurs à prendre des mesures dans cet aspect. Cette situation, inquiétante, incite à réfléchir et planifier judicieusement la quantité et le type de ressources énergétiques à utiliser à l'avenir. C'est tout l'enjeu des discussions sur la nécessité d'une transition énergétique.

Un des principaux leviers de la transition énergétique et le besoin de modernisation du réseau électrique, actuellement fortement centralisé, se trouve dans l'augmentation des moyens de génération d'origine renouvelable.

la production électrique à base d'énergie renouvelable a connu un essor particulier depuis une vingtaine d'années dans les domaines de l'éolien et du photovoltaïque. Grâce aux progrès technologiques, mais également avec l'évolution des réglementations et des politiques de subventions. [1] [3]

Pour continuer à favoriser l'implantation de générateurs EnR et amorcer ainsi l'ébauche d'une transition énergétique, une gestion plus «intelligente» des sources de production et des consommations doit être envisagée. Ceci est un des aspects du concept de Smart Grid qui sera développé au chapitre I.

Les réseaux électriques intelligents, smart grid, sont une des solutions émergentes à ces problèmes. Un smart grid n'est pas seulement un réseau électrique intégrant les nouveaux générateurs d'énergie centralisées ou distribuées.

En ajoutant une communication bidirectionnelle et de nouvelles capacités en matière de technologies de l'information et de la communication, ceux-ci posent les premières briques pour un système de gestion intelligente de l'énergie. Ce système offre de nouvelles perspectives que ce soit dans le domaine de la production comme celui de la consommation d'énergie.

L'analyse et le contrôle d'un tel système se révèlent extrêmement difficiles. Déployer une stratégie de contrôle globale sur le réseau électrique actuel s'avère un véritable défi. L'idée est à terme de considérer le réseau électrique comme une multitude de micro réseaux de plus petite taille gérés indépendamment mais doivent participer à l'équilibre global entre production et consommation.

Un des moyens de rendre plus flexible la gestion des micros réseaux peut consister à mettre en place des moyens de stockage ajoutant un degré de liberté pour contrôler les flux d'énergie consommée ou produite.

En effet, tout comme il y a une quinzaine d'années pour le solaire ou éolien, l'opportunité de raccordement de moyens de stockage est actuellement en discussion afin d'en fixer les règles

d'usage et de rétribution en fonction des services apportés : écrêtage de consommation, effacement, lissage de l'intermittence des EnR, etc. [1] [4]

L'étude menée dans ce mémoire a pour objet la simulation d'un micro réseau composé d'un générateur diesel, d'un consommateur résidentiel associé à une charge industrielle. Deux technologies sont envisagées avec un générateur solaire combiné à un générateur éolien pour produire de l'énergie renouvelable en premier lieu et un moyen de stockage à travers un park de véhicule électrique utilisant la technologie V2G (véhicule to grid).

La démarche adoptée pour la conduite de ce travail ainsi que les travaux de simulations et les différents tests réalisés seront présentés dans les trois chapitres, qui constituent ce mémoire :

Le chapitre 1 : donne dans un premier temps le développement des réseaux actuels, les enjeux et les causes de la transition énergétique.

Dans un deuxième temps, nous présentons les définitions nécessaires à la compréhension des smart grids.

Le chapitre 2 : nous allons définir les concepts de bases pour la compréhension des micro grids, les différentes catégories et leurs utilités dans la gestion de l'approvisionnement énergétique.

Le chapitre 3 : présente une simulation du système sous Matlab- Simulink d'un modèle de gestion énergétique d'un micro grid utilisant des boucles de rétroaction pour l'observation, le contrôle et l'autorégulation de la production et de la consommation d'énergie tout en gardant la stabilité du réseau.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale, et une bibliographie qui regroupe l'ensemble des documents consultés au cours du travail réalisé.

*Chapitre 1 : Transition
énergétique vers les
réseaux intelligents*

1.1. Introduction

L'augmentation de la population, la course à la croissance et le développement de l'économie mondialisée se sont accompagnés d'une explosion de la consommation énergétique depuis les années 60.

Les enjeux énergétiques prennent une forme nouvelle avec la raréfaction des ressources terrestres et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). [2]

Une transition énergétique apparaît aujourd'hui inévitable dans l'organisation de la production et de la commercialisation de l'électricité en raison des profondes évolutions de nature physique (caractère intermittent des sources d'électricité renouvelables), comme de nature économique (l'électricité devenant aussi un produit de marché). [1]

A partir d'un état des lieux, les déficiences et les atouts de ce système énergétique seront identifiées, des solutions appropriées seront apportées pour assurer un fonctionnement durable. [2]

1.2. Réseaux électriques actuels

Actuellement, les réseaux électriques existants peuvent être décomposés en 4 niveaux comme montré sur la figure 1.1:

- **les gros producteurs centralisés**, tels que les centrales à charbon, les centrales nucléaires ou les centrales hydrauliques, fournissant la majeure partie de l'électricité du réseau ;
- **le système de transport de l'énergie**, permettant de transporter de grandes quantités d'énergie à haute et très haute tension sur de longues distances ;
- **le système de distribution d'énergie**, caractérisé par des tensions plus faibles (moyenne et basse tension), et chargé de délivrer l'énergie aux usagers ;
- **les usagers, ou consommateurs**, répartis sur une grande partie du territoire, utilisant l'énergie reçue de façon très variée. [4]



Figure 1.1- Schéma du parcours de l'énergie [4]

En effet, Les usagers peuvent demander de l'énergie à tout moment. Il revient alors aux gestionnaires des autres niveaux de fournir l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins des consommateurs. L'équilibre offre-demande est un point clé dans l'utilisation des réseaux électriques.

Si la stabilité n'est pas respectée, la tension varie, ce qui entraîne une usure prématurée des installations.

1.3. Problèmes liés aux réseaux actuels

De nouvelles tendances annoncent de grands changements sur les réseaux électriques.

Ils devront devenir plus autonomes qu'ils ne le sont aujourd'hui. Parmi ces tendances, nous pouvons citer : [4]

- **L'augmentation de la demande en énergie** : La demande d'énergie mondiale croît régulièrement comme présentée par la Figure 1.2, du fait de plusieurs facteurs. Ainsi, l'augmentation de la population mondiale implique une plus grande consommation. L'amélioration de la vie dans les pays en voie de développement, influe fortement sur la consommation d'énergie.

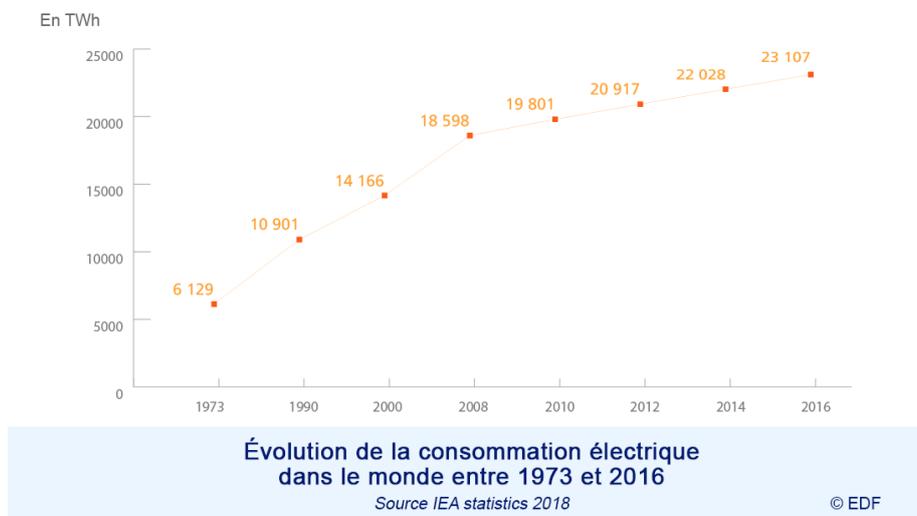


Figure 1.2- Evolution de la consommation mondiale [5]

- La préoccupation environnementale** : Selon les rapports du GIEC, les changements climatiques sont sans équivoque. Depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent sur les dernières décennies à millénaires.

Le GIEC annonce également comme très probable, le fait que ces changements soient dus à une influence humaine.

Le groupe cite notamment : le réchauffement océanique, la diminution des masses des calottes glaciaires, l'augmentation du niveau de la mer, l'augmentation de la concentration des NOx et du CO₂ dans l'atmosphère comme montré sur la figure 1.3.

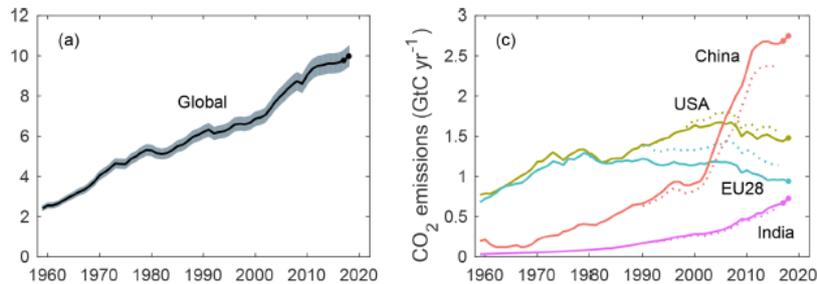


Figure 1.3- Emission mondiale du CO₂ [6]

- **L'intégration des nouvelles sources décentralisées** : Les réseaux électriques actuels ont été conçus pour transporter l'énergie de gros producteurs, que sont les centrales productrices, aux consommateurs. L'intégration des nouvelles sources décentralisées amène des modifications structurelles et comportementales sur le réseau, voir figure 1.4.

Les sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, produisent de manière stochastique, irrégulière, et peuvent donc amener une instabilité sur le réseau.

Enfin, l'intégration des véhicules électriques ou hybrides devant être rechargés sur le réseau suggère également de tenir compte de nouveaux comportements émergents. [4]

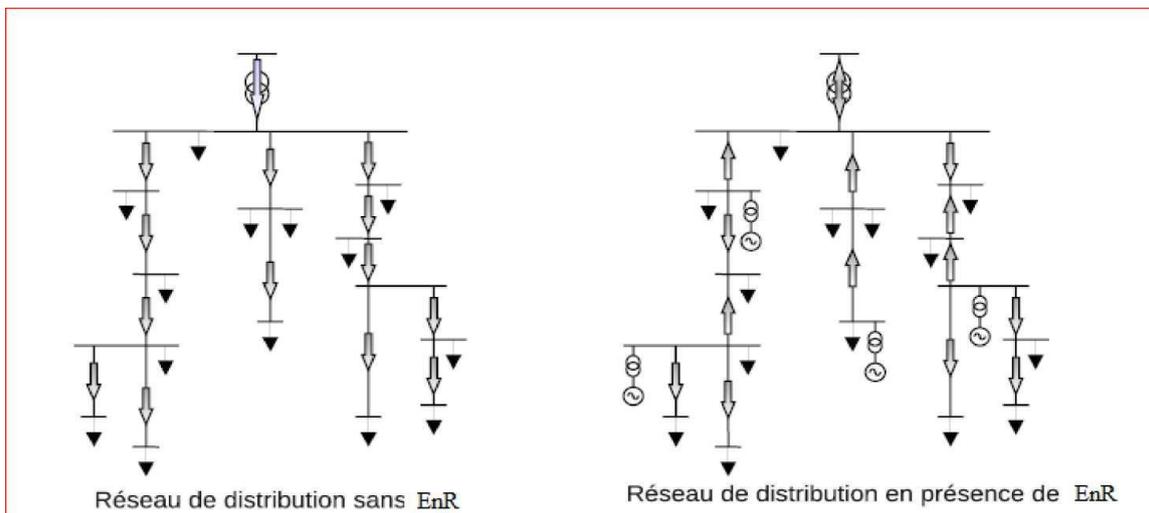


Figure 1.4- Transit de puissance sur le réseau avec et sans EnR [7]

- **Le coût de l'énergie** : L'épuisement prévisible des ressources en énergies fossiles due à la consommation excessive comme montré sur la Figure 1.5, ainsi que le début des démantèlements des centrales nucléaires va impliquer une augmentation du prix de l'énergie.

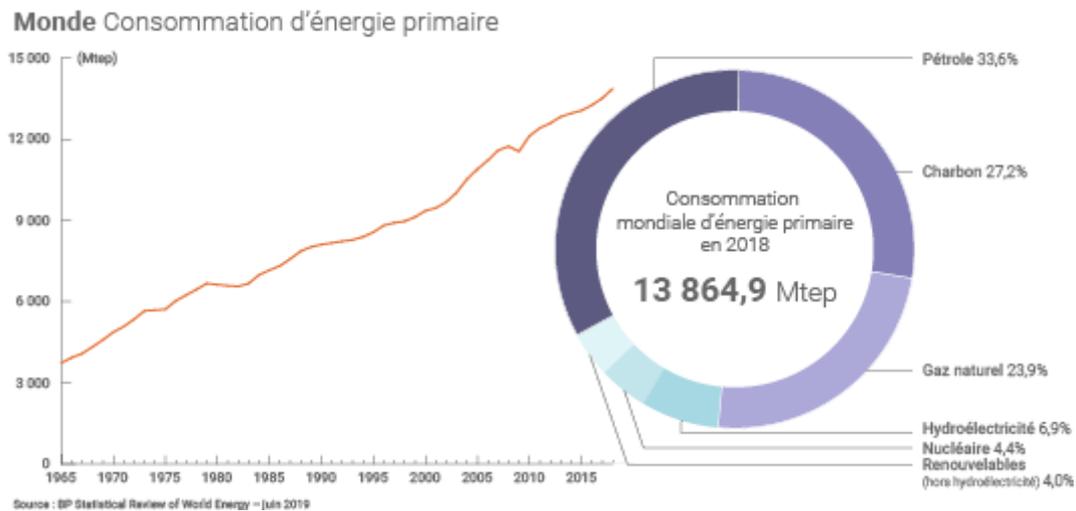


Figure 1.5- Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire [8]

Pour compenser, de nouvelles sources d'énergie ont été développées, mais celles-ci ont un prix de production plus élevé. Cette hausse de prix sera forcément répercutée sur les factures des consommateurs. Il va donc falloir trouver de nouveaux comportements sur le marché pour réduire cette augmentation de tarif afin que l'énergie puisse encore être accessible au plus grand nombre.

1.3.a. Autres problèmes liés aux réseaux actuels

- 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.
- 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.
- La concentration d'une grande quantité de puissance produite en un seul endroit.
- L'augmentation des pertes dans le réseaux accompagné d'un faible rendement des centrales de production.
- Augmentation de la demande en énergie et réduction de la compétitivité mondiale.
- Les pertes non-techniques telles que les fraudes et le manque d'une stratégie de contrôle.

Ce sont ces grands changements, autant comportementaux que structurels, qui ont induit le développement d'un nouveau type de réseau. [3]

1.4. La nécessité du mix énergétique

La demande d'énergie, à long terme, ne peut être satisfaite uniquement par l'exploitation des ressources fossiles, en voie d'épuisement, un mix énergétique est indispensable.

Les énergies renouvelables constituent une opportunité, particulièrement l'énergie solaire et éolienne, pour satisfaire les besoins des générations futures.

L'ensemble des sources d'énergie renouvelables se sont intégrées à un réseau électrique déjà en place depuis longtemps (électrification massive jusque dans les années 60) avec des règles de gestion précises.

La Figure 1.6.a illustre l'architecture traditionnelle d'un réseau électrique avec une structure arborescente des hautes tensions vers les basses tensions depuis la production jusqu'à la distribution en passant par les lignes de transport.

Le réseau ainsi conçu permet d'alimenter une consommation répartie sur l'ensemble du territoire à partir d'une production dite centralisée avec des générateurs de forte puissance et contrôlables dans une assez large plage de réglage.

La gestion en temps réel du réseau, assurée aujourd'hui par le gestionnaire de réseau, repose ainsi sur la capacité à garantir en permanence l'équilibre entre production et consommation avec un plan de tension correct. [9]

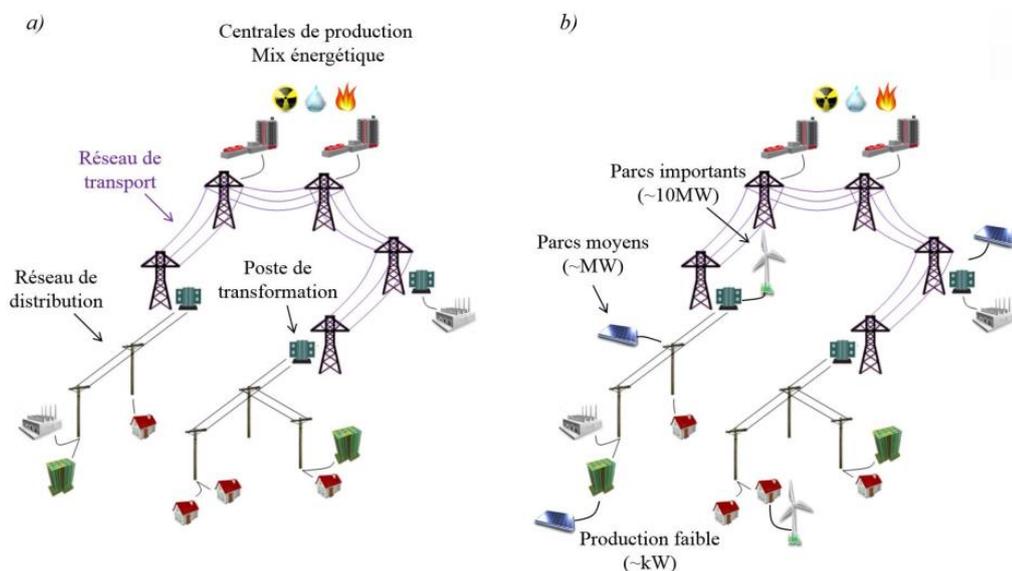


Figure 1.6- Schématisation du réseau électrique - a) jusqu'en 2000 - b) aujourd'hui [2]

L'architecture du système électrique a donc commencé à évoluer (Figure 1.6.b) avec un nombre croissant d'installations photovoltaïques ou éoliennes raccordées directement au réseau de distribution pour les productions de faibles capacités, ou directement au réseau de haute tension pour des parcs plus puissants jusqu'à la dizaine de MW. [9]

Cette stratégie est motivée par plusieurs facteurs, tels que : la vitesse du vent, la disponibilité d'un gisement solaire important, la densité d'un grand réseau de distribution électrique, la baisse des prix des systèmes photovoltaïque et éoliens ainsi que développement de réseaux de communications, comme l'internet.

L'essentiel de la production renouvelable raccordée au niveau de la distribution est constitué de centrales de faible capacité chez les particuliers. Cette production distribuée diminue les pertes dans le réseau en étant davantage proche des charges. En outre une production en phase avec la pointe de consommation permet de soulager le réseau en terme de surcharge de lignes. [10]

La gestion de ces nouveaux systèmes exige des moyens efficaces. L'utilisation des nouvelles Techniques de l'Information et de l'internet est devenue indispensable, le réseau électrique dans sa nouvelle configuration intelligente, est appelé aussi « Smart Grid ».

Les logiciels informatiques présentent une excellente alternative pour développer des programmes de gestion des systèmes à base d'un mix énergétique.

1.5. Emergence des Smart Grids

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.

Derrière ce terme un peu fourre-tout et davantage marketing que technique se cache une redéfinition profonde du système électrique.

L'Electrical Power Research Institute donne la définition suivante : Un Smart Grid est celui qui intègre les technologies de l'information et de la communication dans tous les aspects de la production, de la livraison et de la consommation d'électricité afin de minimiser l'impact environnemental, de valoriser les marchés, d'améliorer la fiabilité et le service, et de réduire les coûts et améliorer l'efficacité. [1]

Pour résumer l'idée de Smart Grid s'attache à décrire l'évolution du système électrique en regroupant des outils de comptage, de stockage de l'énergie, de conversion de puissance, des modèles de marché, le tout associé à des technologies de communication et d'échange de données.

Une couche informationnelle se superpose donc au réseau comme montré sur la figure 1.7 et il ne faut pas seulement envisager le vecteur électricité mais considérer une gestion globale de l'ensemble des réseaux comme pour le gaz ou l'eau par exemple [11] .

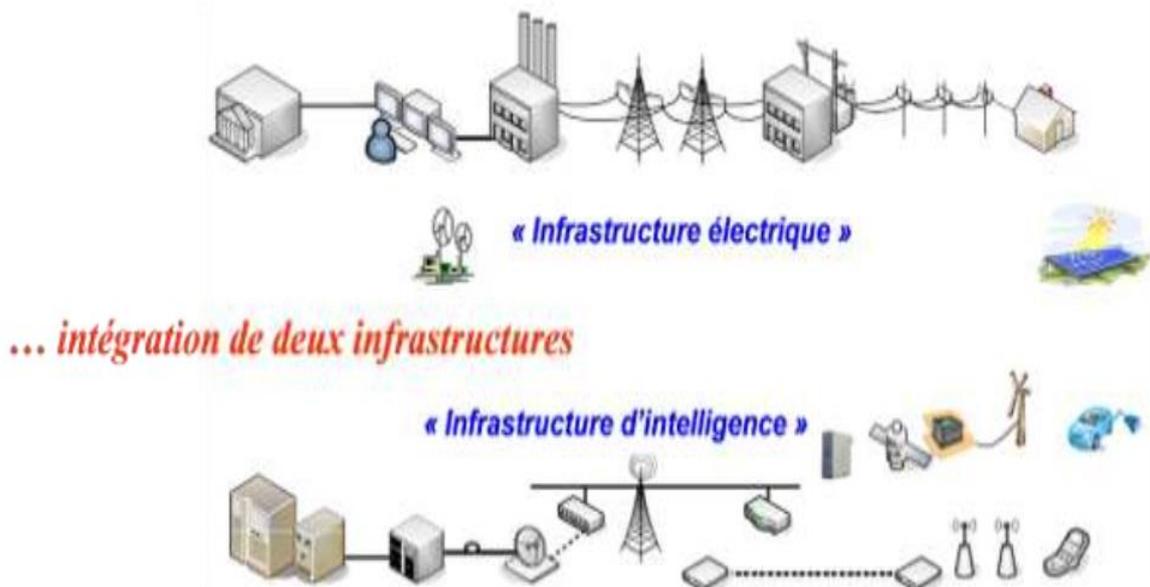


Figure 1.7- Transition vers les smart grids [7]

1.6. Réseaux électriques intelligents (Smart Grid)

Les réseaux intelligents ou Smart Grid, sont des réseaux électriques de nouvelle génération qui permettent l’approvisionnement durable en électricité avec une gestion optimale des coûts. [9]

Les réseaux intelligents font référence aux réseaux de distribution ayant recours à des solutions informatiques complexes pour optimiser les interactions entre l’offre et la demande.

La notion des smart-grids tourne essentiellement autour de la gestion efficace et optimale des ressources, des énergies, des déplacements, de la sécurité, du confort urbain, du confort du bâtiment ainsi que le monitoring des changements climatiques.

Pour atteindre ses objectifs, les smart-grids utilisent les NTIC pour la transmission en temps réel, le traitement et le stockage des informations nécessaires au monitoring et de gestion du réseau, voir la figure 1.8.

Les gestionnaires de processeurs et de systèmes informatiques comme InfoVista, Intel, Google ou Cisco System, développent les technologies d’information indispensables au fonctionnement des réseaux intelligents [3].

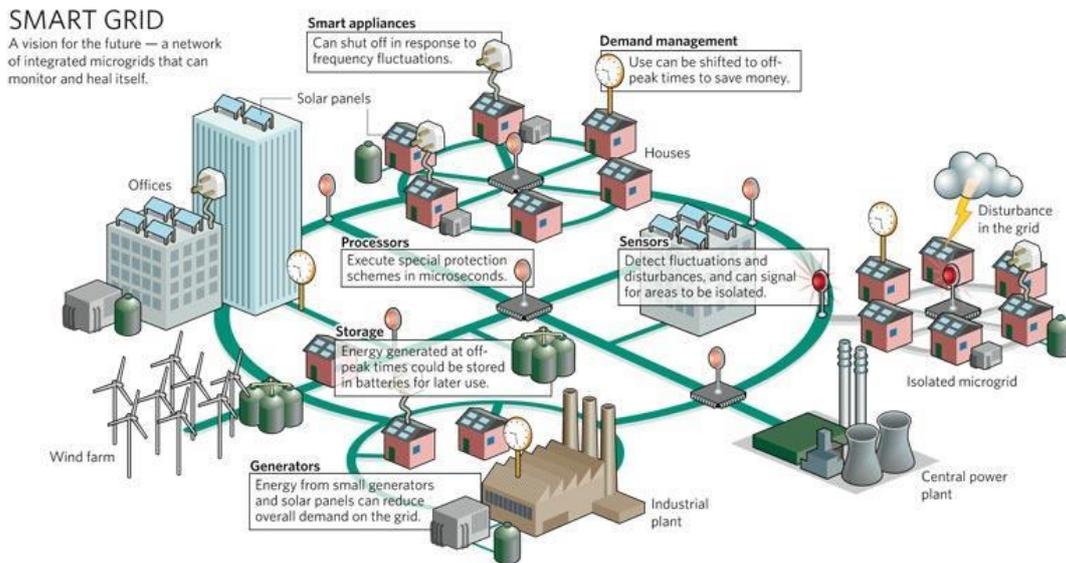


Figure 1.8- Infrastructure des smart-grid électricité [12]

Le monitoring à travers des capteurs, par exemple du flux d'électricité sur le réseau de transport et de distribution d'électricité est un élément important dans le smart-grid, Il permet de consulter l'état du réseau en temps réel, d'anticiper les incidents, de prendre de décision afin d'optimiser le réseau et le rendre plus sûr. La qualité de l'électricité peut également être contrôlée en temps réel et stabilisée.

Dans le processus de fonctionnement des smart grids, l'objectif visé est le mix énergétique, c'est-à-dire l'électricité peut être produite d'une source conventionnelle (Gaz naturel, charbon, diesel, etc.) ou des sources renouvelables (centrales CSP ou centrales photovoltaïque, parc éoliens, biomasse etc.), selon la demande et la disponibilité, comme montré sur la figure 1.9.

Au sens large, un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau : production, transport, distribution et consommation. [7]

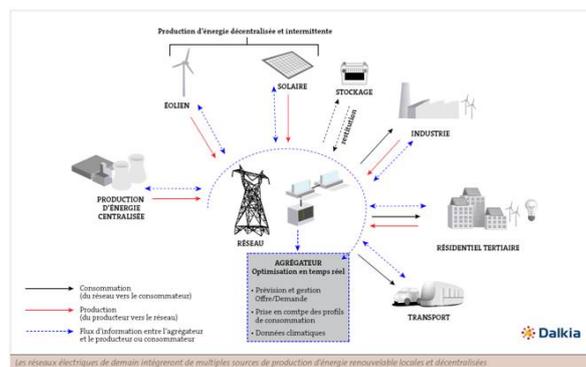


Figure 1.9- Modèle simplifié du smart grid [7]

1.7. Principe de fonctionnement des smart grids

Selon la méthode de fonctionnement des smart-grids, on distingue des modèles basés sur deux approches différentes, l'approche centralisée top-down, et l'approche ouverte bottom-up comme montré sur la figure 1.10.

L'approche centralisée top-down consiste à l'inscription du *smart-grid* au sein du réseau traditionnel de distribution d'énergie. La capacité à piloter l'offre aux différents niveaux du système (production, transport et distribution) est améliorée par l'intégration des NTIC. Les technologies de communication et d'information mobilisées dans ce type d'approche sont, généralement, fondées sur des réseaux filaires dédiés aux systèmes qu'elles servent et gérées par des environnements propriétaires pour la partie hardware comme pour la partie software.

L'approche ouverte bottom-up est basée essentiellement sur le besoin et les actions du client final du réseau. À travers le smart-grid le client final peut piloter et optimiser sa consommation d'énergie. Cette approche comprend, entre autres, le déploiement de systèmes de comptage évolués, des systèmes de pilotage des équipements consommateurs d'énergie électrique (bâtiments intelligents, domotique, etc.) ou des équipements d'effacement diffus. [13]

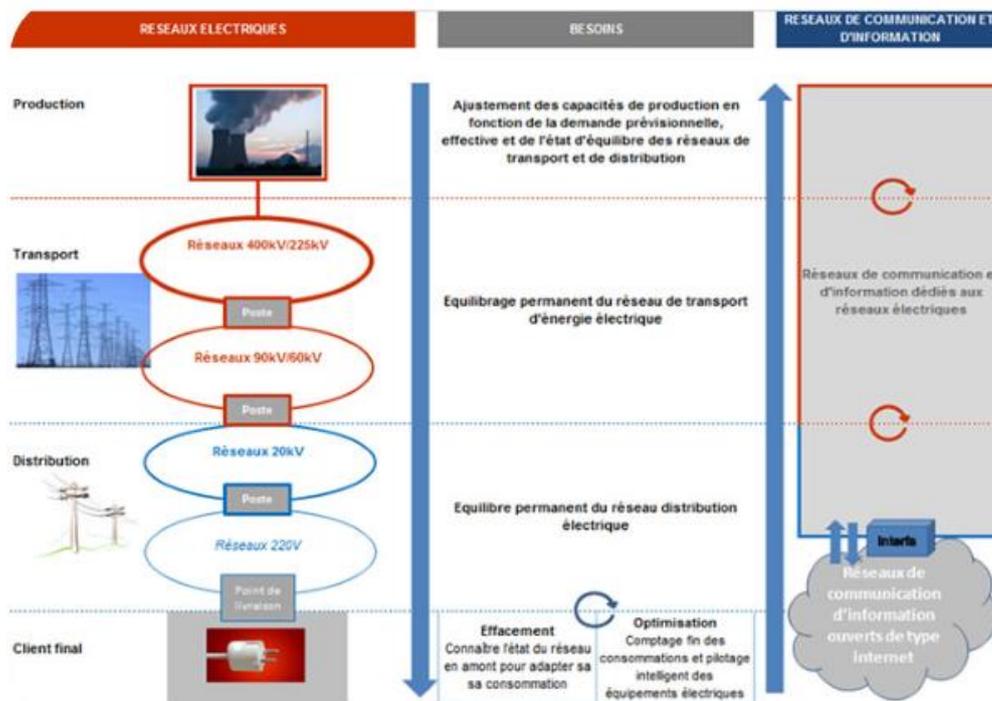


Figure 1.10- Principe de fonctionnement des smart-grids électricité [14]

1.8. Les consommateurs au sein des réseaux intelligents

A la différence des réseaux électriques classiques, le Smart Grid accorde une grande attention au client, celui-ci devient, dans cette nouvelle configuration, un producteur d'énergie à base de sources renouvelables. Chaque client peut produire de l'électricité pour ses propres besoins et injecter le surplus dans le réseau électrique ou le sauvegarder dans un parc de stockage. Ces réseaux décentralisés appelés aussi Smart Micro Grid, en utilisant au maximum les sources d'origine renouvelables, permettent de réduire la demande sur les centrales de production de l'électricité et le client est ainsi appelé consomm-acteur, voir figure 1.11. [10]

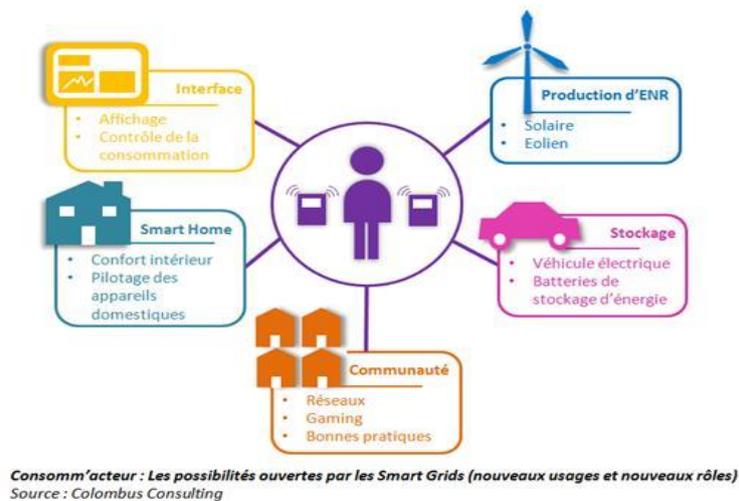


Figure 1.11- Contribution du consommateur sur les réseaux intelligents [10]

1.9. Avantages des smart grids

Selon les fournisseurs d'électricité, les smart-grids permettent d'atteindre plusieurs objectifs :

- Renforcer la sûreté du réseau de transport et de distribution électrique en permettant d'éviter ou de modérer les conséquences des incidents sur le réseau électrique.
- Renforcer les mécanismes de réponse de la demande d'électricité au prix de l'électricité, et ainsi éviter les pics de consommation d'électricité, très coûteux et très polluants.
- Permettre l'intégration au réseau électrique des sources d'énergie renouvelables intermittentes (éolien, photovoltaïque).
- Diminuer les pertes sur le réseau de transport et de distribution d'électricité en optimisant les flux d'électricité.
- Faciliter l'installation de sources de production d'électricité décentralisées chez le client final (photovoltaïque, éolien) par la pose de compteurs d'électricité intelligents enregistrant les flux d'électricité dans les deux sens. [7]

1.10. Architecture des smart grids

1.10.1. Modèle de NIST

L'architecture de communication du Smart Grid selon NIST regroupe sept domaines, voir figure 1.12 : Consommateurs (clients) et producteurs, les fournisseurs de services, les centres de contrôle du réseau, le marché de l'électricité constitué de plusieurs fournisseurs, les centres de production comme, les réseaux de transmission et de distribution de l'électricité. Ces domaines sont connectés entre eux par un réseau internet via des protocoles de-communications [15], [16].

Les fonctions des principaux acteurs du Smart Grid sont :

Client : sont des utilisateurs finaux d'électricité, à la différence du réseau électrique classique ces clients peuvent utiliser, stocker, produire et gérer leurs énergie de façon optimale. Également, ces trois clients (résidentiel, commercial et industriel) peuvent communiquer avec le gestionnaire du réseau chacun dans son domaine.

Marché : c'est le domaine clé du réseau intelligent, il offre un environnement où les opérateurs et les participants peuvent acheter ou vendre de l'électricité. Sa mission principale est la gestion du marché via la préparation de la bourse de l'électricité, l'équilibre entre l'offre et la demande au sien du réseau, etc.

Fournisseurs de service : ce domaine est essentiellement destiné au soutien des clients, ils fournissent des services de gestion de la consommation et la production des clients via la gestion de la facturation, installation et maintenance des équipements qui communique avec le réseau. Ainsi il gère la sécurité informatique du réseau internet et l'outil logiciel utilisé dans le réseau. Ce domaine peut aussi intervienne en cas où il y a un piratage du réseau pour limiter les pertes.

Centre de contrôle : celui qui gère le mouvement de l'électricité au sien du réseau via des moyens totalement informatisé.

Transmission : c'est le réseau qui transporte l'électricité, mais il peut aussi stocker et produire l'électricité.

Centre de production : celui qui produit l'électricité via plusieurs sources d'énergie, tels que renouvelable variable (éolien, solaire) et renouvelable non-variable (biomasse, géothermie, hydraulique, etc.), ainsi que les sources non-renouvelables non variables (gaz naturel, charbon, nucléaire, etc.).

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. Il interagit avec de nombreux équipements, afin de garantir la qualité et la stabilité d'électricité.

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.

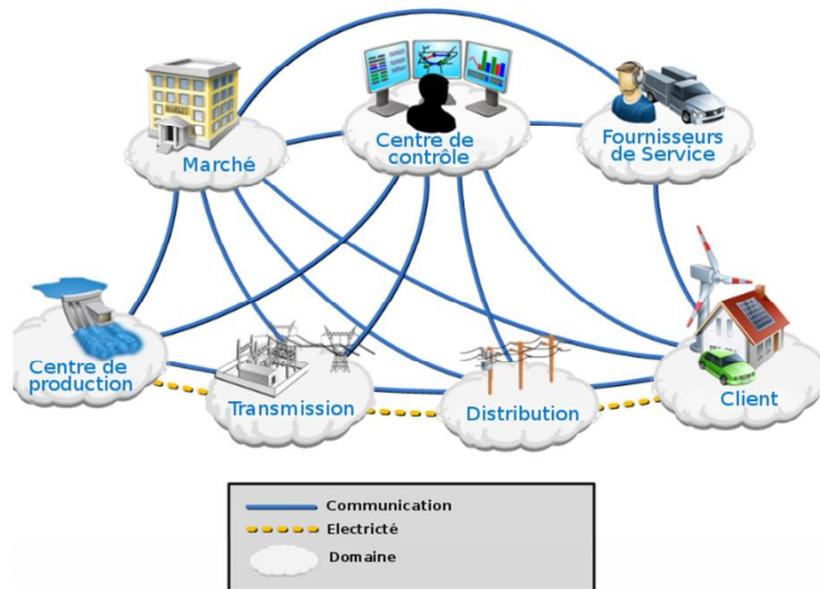


Figure 1.12- Schéma conceptuel du Smart Grid proposé par NIST [16]

1.10.2. Modèle de IEEE

L'IEEE a proposé une architecture basée sur celle de NIST, mais a défini un nouveau domaine nommé Distributed Energy resources (DER), voir figure 1. 13 : qui permet de gérer le surplus de l'énergie produite, la gestion du surplus d'énergie est centralisée. [17]

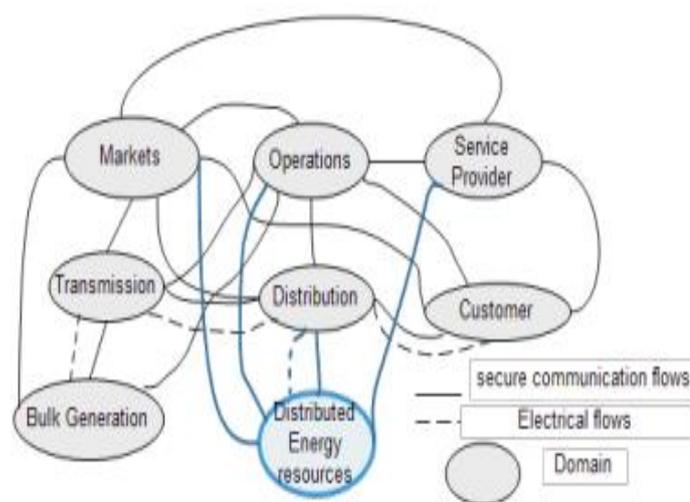


Figure 1.13- Schéma conceptuel du Smart Grid proposé par IEEE [17]

1.11. Caractéristiques des smart grids :

Un réseau intelligent se doit de :

- Faire participer de façon active les consommateurs,
- Accueillir l'ensemble des générateurs (centralisés ou non) et des systèmes de stockage (comme les véhicules électriques),
- Permettre de nouveaux produits, services et marchés,
- Offrir une qualité d'énergie pour supporter l'économie numérique,
- Optimiser l'utilisation de l'existant et de fonctionner efficacement
- Anticiper et de répondre à des perturbations sur le système,
- Résister aux attaques ou aux catastrophes naturelles.

Un des principaux problèmes soulevés par les smart grids est leur intégration dans les réseaux électriques physiques utilisés quotidiennement par des millions d'utilisateurs. [18]

1.12. Comparaison entre réseaux actuels et réseaux intelligents

Le tableau 2.1 ainsi que la figure 1.14 comparent les caractéristiques des réseaux électriques d'aujourd'hui et ceux potentiels des smart grids.

L'objectif de modernisation des réseaux implique des fonctionnalités pour faciliter le développement d'un système énergétique efficace et fiable.

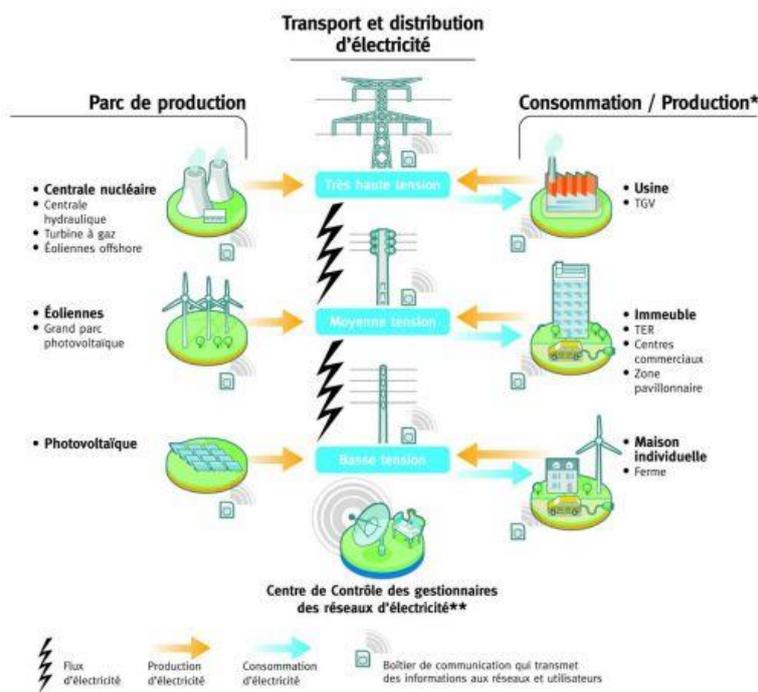


Figure 1.14: Comparaison des réseaux classiques et des réseaux intelligents [13]

Tableau 1.1: Comparaison des réseaux classiques et des réseaux intelligents [13]

Caractéristiques	Réseaux électrique actuel	Réseaux électrique intelligent
Mode de fonctionnement	Analogique	Numérique
Sens de circulation de l'énergie	Unidirectionnel	Bidirectionnel
Type de production	Production centralisé	Production décentralisé
Communication	Communicant sur une partie des réseaux	Communicant sur l'ensemble des réseaux
Client	Consommateur	Consom'acteur
Participation des consommateurs	Les consommateurs ne sont pas informés et ne participent pas	Les consommateurs sont informés et potentiellement actifs
Intégration de source et de système de stockage	Dominé par le producteur d'énergie centralisée	Déploiement d'un grand nombre de producteurs distribués
Nouveaux produits, services et marchés	Limité, peut d'intégration du marché pour les consommateurs	Grande intégration du marché, augmentation de l'utilisation du marché de l'énergie pour les consommateurs
Qualité de l'énergie	Centrée sur les pannes réponse lente aux problèmes opérationnelles de gestion d'actif	Priorité sur la qualité de l'énergie avec une grande variété de qualité et de prix, rapide résolution de problème
Gestion de l'équilibre du système électrique	Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre/ production	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande/consommation
Optimisation des actifs	Peu d'intégration des données opérationnelles de gestion d'actifs	Nombreuse acquisition de données élargies et des paramètres du réseau
Auto cicatrisation	Prévention pour réduire l'impact des dégâts en se concentrant sur la protection des infrastructures suite à une panne	Détection automatique et correction des problèmes centrés sur la prévention pour minimiser l'impact sur le consommateur

Résistance aux attaques	Très vulnérables aux attaques	Résistance aux attaques avec restaurations rapides en cas de problèmes
-------------------------	-------------------------------	--

1.13. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence la problématique mondiale d'énergie et le besoin crucial d'aborder de nouvelles alternatives à la production électrique face à l'augmentation excessive de la demande en énergie.

Ainsi, nous avons donné un aperçu général sur les réseaux actuels, les limites de ces réseaux et la nécessité de la transition vers le mix énergétique. Ceci est rendu possible par le développement de systèmes intelligents capables de minimiser les fluctuations de puissance induites par l'injection de la production distribuée et les problèmes du réseau conventionnel. De ce fait, nous avons présenté les réseaux intelligents, leurs architectures et les bénéfices apportés des smart grids.

En revanche, l'analyse et le contrôle d'un tel système se révèlent extrêmement difficiles. L'idée est à terme de considérer le réseau électrique comme une multitude de micro réseaux de plus petite taille gérés indépendamment mais interconnectés entre eux afin de participer à l'équilibre global entre production et consommation.

Une attention particulière va être portée sur les micro réseaux intelligents et leurs applications fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2:
Les micro- reseaux
intelligents

2.1- Introduction

La notion de Smart Grid introduite dans le chapitre précédent couvre de grande variété de domaines, depuis les composants proprement énergétiques, y compris la production d'énergie électrique d'origine renouvelable (EnR) qui progresse avec l'implantation de parcs éoliens et solaires venant s'ajouter aux groupes hydrauliques déjà présents en passant par le stockage, jusqu'à la communication et l'informatique, sans oublier les aspects réglementaires.

Dans ce chapitre nous allons présenter le domaine des micro réseaux, raccordés ou non au réseau électrique principal, les différents types des micros grids, l'intégration des énergies renouvelables et des technologies de stockage de l'énergie et enfin les différentes applications des micro réseaux.

2.2- Micro réseaux intelligents

Un micro-réseau est généralement composé d'un ou plusieurs générateurs (installations de production d'électricité de sources renouvelables variables, ou conventionnelles), d'installations de stockage d'énergie, de charges, de moyens de réglage, de système de compensation et de systèmes d'informations.

L'ensemble de ces technologies doit aussi permettre au microgrid de se déconnecter du réseau principal pour s'iloter. [19]

2.2.1- Concept des micro réseaux

Appelés aussi mini Smart grids ou 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 agrègent de multiples installations de production locales et diffuses (micro-turbines, piles à combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, mini-éoliennes, petite hydraulique), des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande. Ils peuvent être raccordés directement au réseau de distribution ou fonctionner en mode îloté, comme montré sur la figure 2.1. [19]

Le concept des micro réseaux est en train de s'élargir aux réseaux de chaleur et de gaz, il peut ainsi être pensé de façons multi-fluides et il peut concerner différentes échelles du territoire (bâtiment, quartier, zone industrielle ou artisanales, village, etc.). [20]

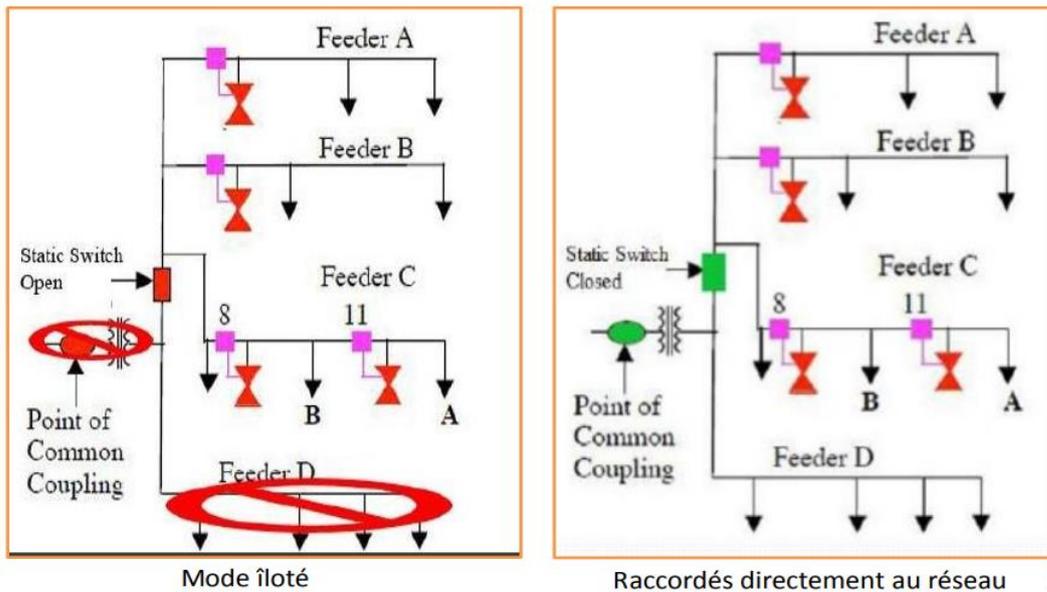


Figure 2.1 : Types de raccordements des micro réseaux [19]

2.2.2- Classification des micro réseaux intelligents

Les projets de micro réseaux électriques peuvent être classés en fonction de leur taille, mais également de leur utilité (fiabilité, résilience et efficacité des réseaux, difficulté d'accès à l'énergie, conditions météorologiques dégradées, émergence d'éco-quartiers, réflexion multi-énergie, économies d'énergie, etc.) en 5 grandes catégories :

- Micro réseaux des zones commerciales, artisanales ou industrielles : ces zones, fortement consommatrices d'électricité, regroupent entreprises et industries aux activités diverses, dont les besoins en énergie ne sont pas tous identiques. Il s'agit d'y optimiser la gestion de l'énergie pour qu'elles soient plus neutres vis-à-vis du réseau de distribution ;
- Micro réseaux de campus universitaire : l'enjeu est d'améliorer la gestion énergétique des campus dans un contexte où ceux-ci se doivent de réduire leur consommation d'énergie ;
- Micro réseaux alimentant des zones isolées car faiblement ou non raccordées aux réseaux électriques ou temporairement coupées du réseau pour cause d'intempéries : le déploiement des microgrids leur permet d'exploiter les ressources énergétiques renouvelables locales et de ne plus dépendre de groupes diesel polluants et coûteux. Les microgrids permettent également à des villes touchées par des intempéries d'éviter d'être totalement privées d'électricité ;
- Eco quartiers : ils fonctionnent peu ou prou sur le même modèle que les microgrids dans les zones commerciales ou industrielles ;
- Micro réseaux de « base vie » (camp militaire ou hôpital) : avec ses propres moyens de production et de stockage et ses propres infrastructures de distribution, le microgrid garantit une autonomie énergétique fournissant de l'électricité pendant les périodes de coupures de courant sur le réseau de distribution, atout essentiel pour les bases militaires ou les hôpitaux, qui ne

peuvent pas laisser des pannes d'électricité les empêcher de s'acquitter de leurs missions. [21]

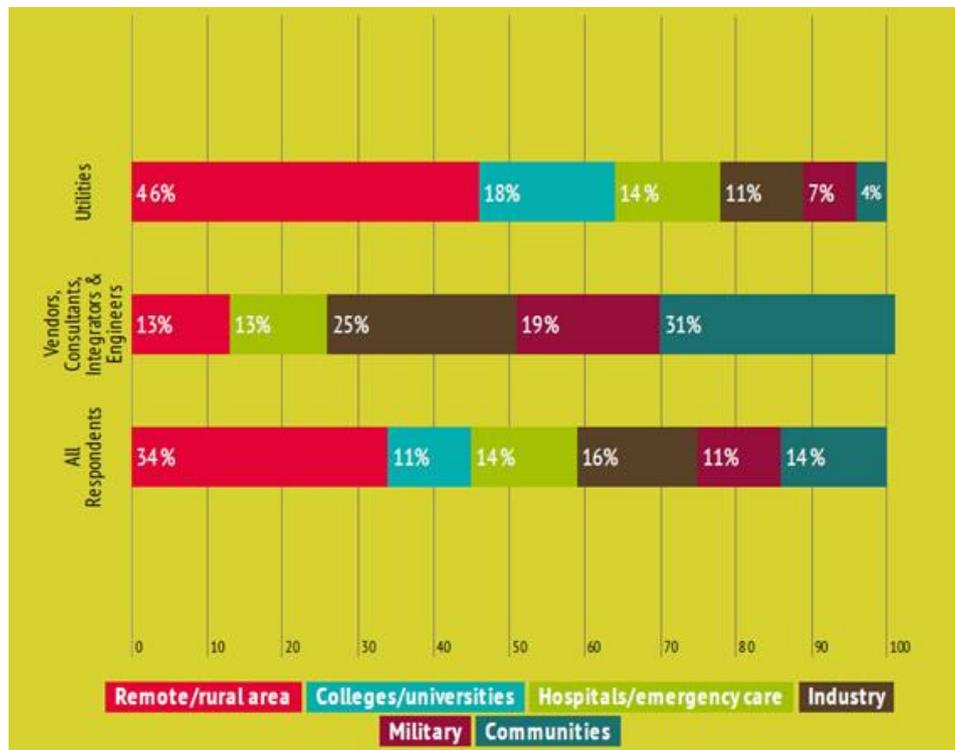


Figure 2.2 : Zones d'utilisation des micro réseaux [21]

2.2.3- Avantages du déploiement des micro réseaux intelligents

Les bénéfices de déploiement des micro réseaux sont nombreux :

- Côté technique, les micro réseaux permettent une gestion optimisée de la production d'électricité d'origine renouvelable à l'échelle locale. Ils peuvent apporter un service auxiliaire au réseau public de distribution, en l'aidant à maintenir la stabilité de la tension et en l'allégeant lorsqu'il est coupé du réseau de distribution.
- Côté sociétal, un micro réseaux fournit des réponses à l'évolution des besoins fondamentaux d'un territoire en énergie. Il offre notamment un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident (assurance de la fourniture en énergie même lors des pointes de consommation ou des black-outs). Puisqu'il s'agit d'un projet local, il facilite également la création d'initiatives et de nouveaux partenariats entre les acteurs locaux ;
- Côté économique, en fonction de sa taille, le micro réseaux peut être utilisé avec un rôle d'agrégateur, pour s'ajuster sur les marchés (marché spot, marché d'ajustement et marché de capacités). Les micro réseaux permettent également de réduire des transits sur les réseaux et donc engendrer des économies de coûts de réseaux, à court terme (s'agissant des pertes électriques du réseau) comme à plus long terme

(s'agissant des investissements sur les réseaux) et d'engendrer des économies de coûts de fourniture d'électricité (déplacement des charges au moment où l'électricité est moins chère à produire, optimisation de la fourniture d'électricité en fonction des prix de l'énergie sur les marchés et dans le micro réseaux).

- Côté environnemental, ils permettent de mieux intégrer les énergies de sources renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation de centrales thermiques en zones fragiles, réduction de la consommation de combustible fossile, réduction des pertes thermiques, etc..

En outre, les infrastructures nécessaires aux réseaux électriques intelligents étant complexes à mettre en place et pouvant prendre plusieurs années, les microgrids deviennent une alternative plus simple à mettre en œuvre et pourraient donc jouer un rôle moteur dans le déploiement des réseaux intelligents. [19]

2.2.4- Défis technico-économiques des micro réseaux

Le développement et l'exploitation des micro-réseaux induisent des défis techniques et technologiques de plusieurs ordres :

- Assurer la stabilité du microgrid en toutes circonstances, lorsque le microgrid est connecté au réseau principal ou lorsqu'il est déconnecté de celui-ci, lorsqu'il se connecte et se déconnecte : Un contrôleur du micro-réseau permet la connexion au réseau électrique intelligent et assure le contrôle de la tension, du flux d'énergie, le partage ou le délestage des charges, et prend en compte les contraintes du réseau public transmises par un bus de communication

- Assurer également la protection du micro-réseau en cas de défaillances ou de perturbations d'origines diverses sur le réseau principal : en cas de défaut, le micro-réseau doit être découplé rapidement du réseau principal pour protéger ses propres charges. Si la défaillance est imputable au micro-réseau, des fonctions de protection doivent pouvoir détecter les courants de court-circuit, afin d'isoler la partie critique du micro-réseau.

- Si l'électricité produite localement n'est pas consommée localement, elle est injectée sur le réseau amont qui devient un réseau de collecte, ce qui peut nécessiter le renforcement des réseaux amont. [13]

2.3- Intégration des énergies renouvelables

Le modèle actuel du système électrique est à l'aube d'une profonde remise en question. Le modèle économique, organisé autour de la production d'électricité centralisée, n'a de sens que si l'électricité peut être acheminée depuis les centrales jusqu'au consommateur par les réseaux électriques.

Or, le réseau public de transport ne pourra plus se développer comme avant. L'opposition locale aux nouveaux ouvrages de réseau public de transport d'électricité, tels que les files

de pylônes considérées comme peu esthétiques est de plus en plus forte, ce qui renchérit le coût de la construction des ouvrages ou en repousse la mise en service.

Le système électrique de demain pourrait être avant tout un modèle de proximité organisé autour de multiples micro réseaux, produire localement pour consommer localement, basé essentiellement sur la production décentralisée à base de source d'énergie renouvelable. [13]

2.3.1- Production décentralisée

Ensemble de technologies de production d'énergie à petite échelle situées à proximité de la charge desservie, capable de réduire les coûts, d'améliorer la fiabilité, de réduire les émissions et d'élargir les options énergétiques voir **figure 2.3**.

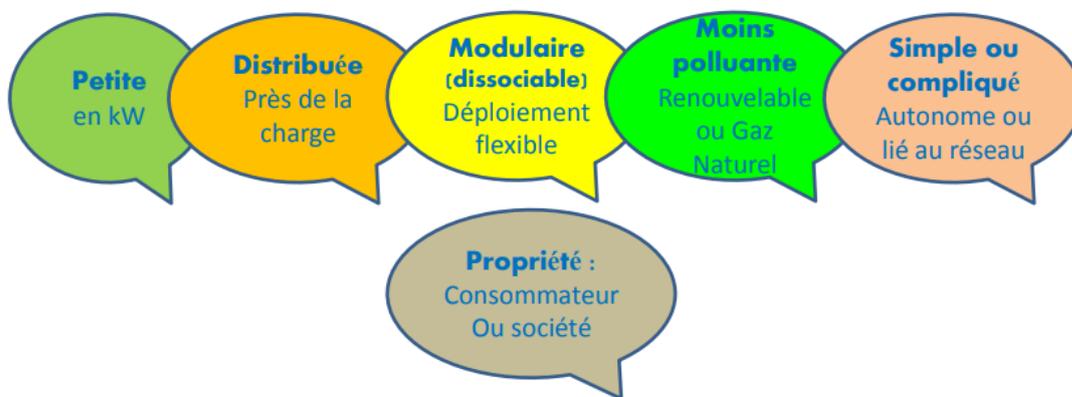


Figure 2.3: Caractéristiques de la production décentralisée [19]

2.3.2- Causes de l'intégration des énergies renouvelables

- Diminution des ressources énergétiques fossiles et la hausse durable de leur prix, Augmentation considérable des besoins en énergie,
- Difficultés d'approvisionnement (fourniture),
- Poids du secteur énergétique dans les émissions de CO2 et la lutte contre le changement climatique imposent d'adapter les modes de production et de consommation d'énergie.
- Parmi les caractéristiques principales de smart grid qui a été défini par AIE est qu'il soit capable d'accueillir tout type de technologie de production, notamment les nouveaux générateurs dispersés qui permettent de fournir de l'électricité aux sites isolés et d'éviter la création de nouvelles lignes. [22]

2.3.3- Différents types d'énergies renouvelables :

Le terme énergie renouvelable est employé pour désigner des énergies qui, à l'échelle humaine au moins, sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Il existe ainsi cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas (ou peu) produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique. [23]

2.3.3.1- Energie solaire photovoltaïque ou thermique

On appelle énergie solaire, l'énergie que l'on peut tirer du rayonnement du soleil.

Il faut distinguer l'énergie solaire photovoltaïque de l'énergie solaire thermique. L'énergie solaire photovoltaïque correspond à l'électricité produite par des cellules dites photovoltaïques comme montrée sur la figure 2.4. Ces cellules reçoivent la lumière du soleil et sont capables d'en transformer une partie en électricité. La modularité compte pour l'un de leurs avantages. En effet, des panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés aussi bien à des fins domestiques qu'à la production d'énergie à grande échelle.

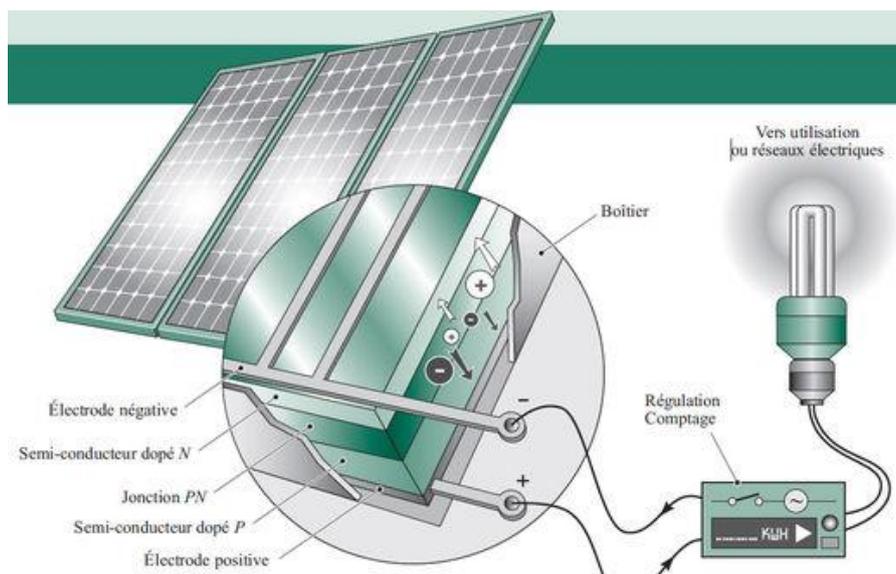


Figure 2.4 : Principe de fonctionnement du système photovoltaïque [23]

Dans un système à énergie solaire thermique ou thermodynamique, le rayonnement solaire est employé pour chauffer un fluide, de l'eau par exemple, comme dans certains chauffe-eau domestiques. Lorsqu'un système de concentration (un jeu de miroirs) y est ajouté comme montrée sur la figure 2.5, le soleil peut chauffer le fluide jusqu'à quelque 1.000 °C et la technologie devient exploitable pour la génération d'électricité. [23]

L'inconvénient de l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une énergie intermittente.

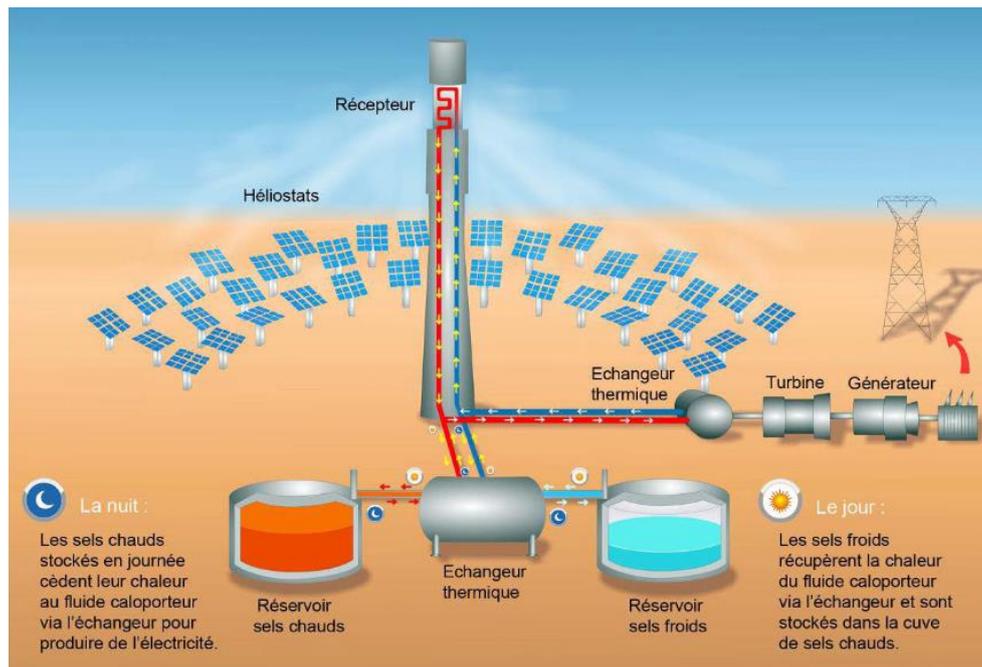


Figure 2.5 : Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique [23]

2.3.3.2- Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [24]. Une éolienne est composée de 4 parties comme montrée sur la figure 2.6 :

- Le mât
- L'hélice
- La nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau)

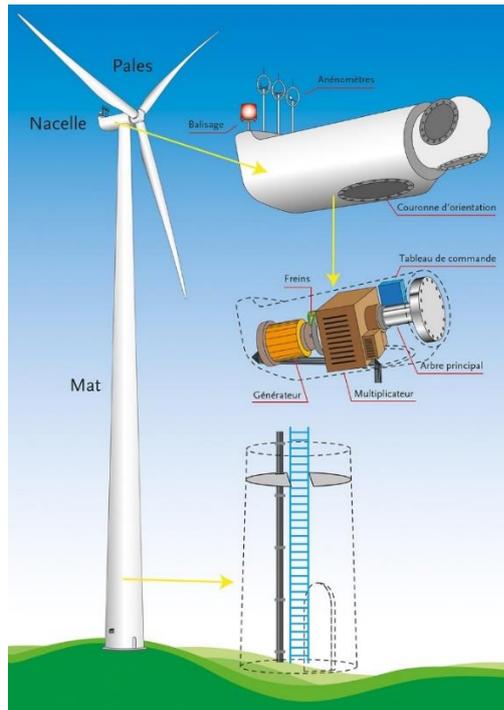


Figure 2.6 : Composantes d'une éolienne [24]

C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite [24].

2.3.3.3- L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique désigne l'énergie que les centrales hydrauliques arrivent à produire à partir de la force de l'eau. Basée sur le principe du barrage qui par sa construction va réussir à capter l'ensemble de la force produite par l'eau, l'énergie hydraulique ou hydroélectricité a des avantages certains, mais également quelques inconvénients comme notamment celui du coût de la construction d'une centrale.

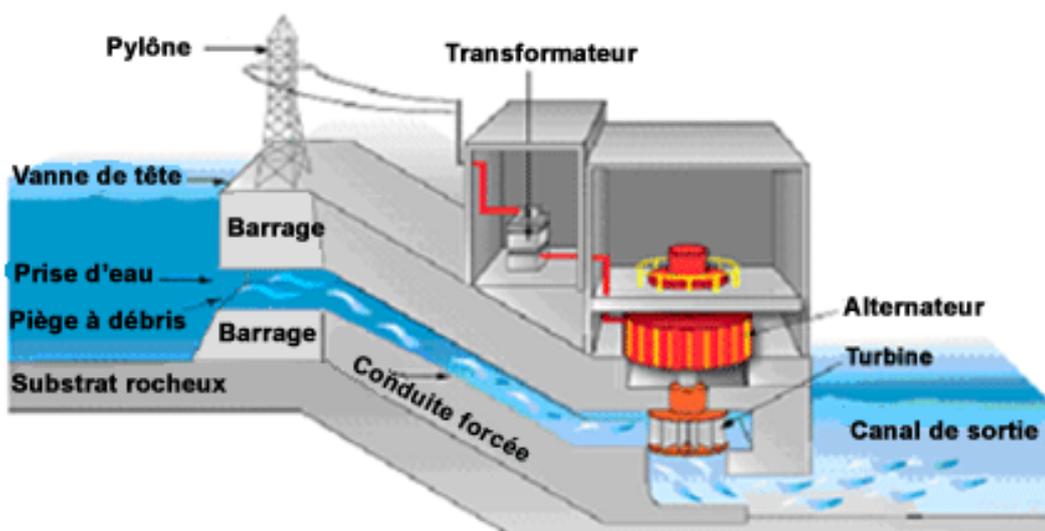


Figure 2.7 : Principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique [25]

Le principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique est basé sur des techniques ancestrales qui remontent aux origines de l'électricité. En effet, le moulin à eau de jadis fonctionnait sur le principe de se servir de la force intrinsèque de l'eau pour faire tourner des hélices et produire, grâce à ce mouvement une énergie exploitable.

Les centrales hydrauliques d'aujourd'hui sont construites sur le même système consistant à capter la force de l'eau pour faire tourner une turbine, qui elle-même entraîne un générateur électrique produisant de l'électricité injectable sur le réseau, voir la figure 2.7 ci-dessus.

La force de l'eau est une force importante, également exploitée par l'énergie houlomotrice. Cette force peut être générée par le courant naturel de l'eau, les marées, les vagues ou encore une chute d'eau importante comme c'est le cas dans les reliefs montagneux. Il s'agit donc d'une énergie cinétique liée au mouvement de l'eau, mouvement sans cesse reproduit. [25]

2.3.3.4- Biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale.

Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) voir figure 2.8 ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux. [26]

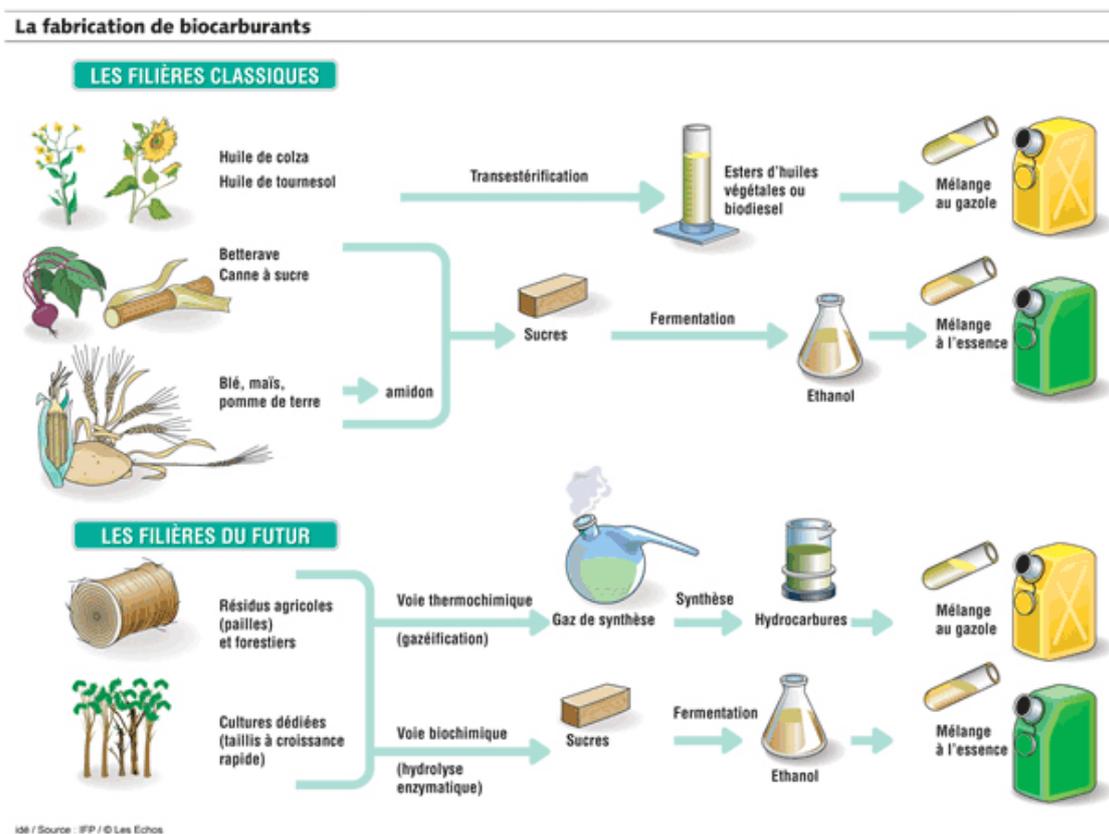


Figure 2.8 : Fabrication des biocarburants [26]

2.4- Stratégies de stockage de l'énergie électrique

Le stockage d'énergie répond à un besoin technique : c'est un atout indispensable à long terme pour permettre la décarbonation du mix électrique décidée par les politiques publiques, européennes notamment.

Le stockage d'énergie représente également un levier économique : c'est un moyen de tirer parti de la volatilité du marché de l'électricité pour générer des bénéfices, ou réduire les coûts induits par la consommation d'électricité. L'ensemble des acteurs ayant la possibilité de stocker de l'énergie (industriels, collectivités ou particuliers) peuvent tirer parti de cette opportunité. Cette dualité besoin technique / opportunité économique crée aujourd'hui un contexte particulièrement favorable au déploiement de solutions de stockage d'énergie. [27]

2.4.1- Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Une Step (station de transfert d'énergie par pompage) est un moyen de stocker l'électricité qui exploite la différence d'énergie potentielle entre deux bassins. Elle se compose de deux réservoirs d'eau séparés par un dénivelé. Lorsqu'il y a un surplus d'énergie, une pompe puise l'eau dans le bassin inférieur pour l'acheminer vers le bassin supérieur. Lors des pics de consommation, l'eau du bassin supérieur est relâchée vers le bassin inférieur et alimente une turbine qui produit de l'électricité, comme montrée sur la figure 2.9. [27]

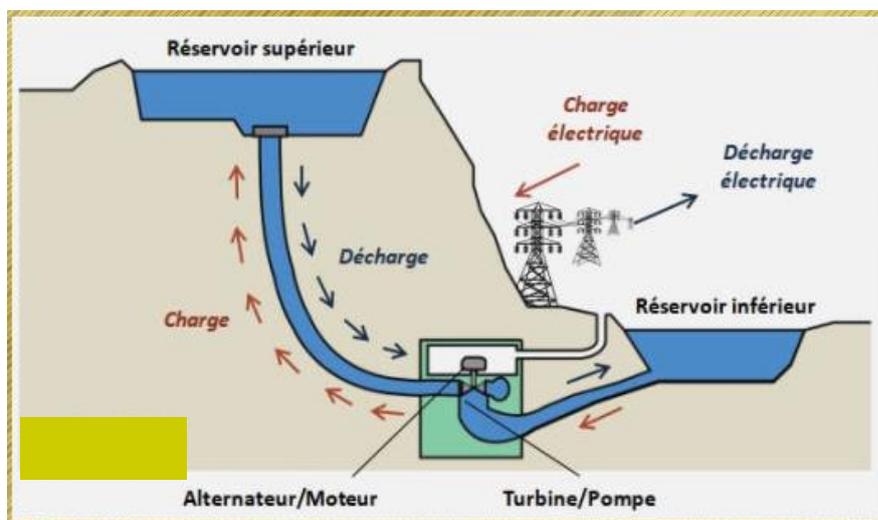


Figure 2.9 : Principe de fonctionnement de STEP [27]

2.4.2- Stockage d'énergie sous forme comprimée (CAES)

Le « CAES », (de l'anglais *Compressed Air Energy Storage*) est un mode de stockage d'énergie par air comprimé, c'est-à-dire d'énergie mécanique potentielle, qui se greffe sur des turbines à gaz.

Dans une turbine à gaz classique, de l'air ambiant est capté et comprimé dans un compresseur à très haute pression (100 à 300 bar). Cette compression de l'air s'accompagne d'un échauffement pouvant aller jusqu'à quelques centaines de degrés. L'air chaud comprimé

est injecté avec du gaz dans une chambre de combustion. Le mélange en sortie entraîne une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité, comme montrée sur la figure 2.10.

Le principe du CAES consiste à stocker l'air comprimé et ainsi à décorréliser la phase de compression de l'air du reste du processus. Pour se faire, un système de stockage de ce type est inséré entre le compresseur et la chambre de combustion. En phase de stockage, le compresseur utilise l'énergie disponible sur le réseau électrique pour comprimer de l'air. Cet air comprimé est ensuite acheminé puis stocké dans un réservoir adéquat. En phase de déstockage, l'air comprimé est extrait de son réservoir et envoyé dans la chambre de combustion qui précède la turbine. L'énergie produite est enfin restituée ou vendue au réseau. [28]

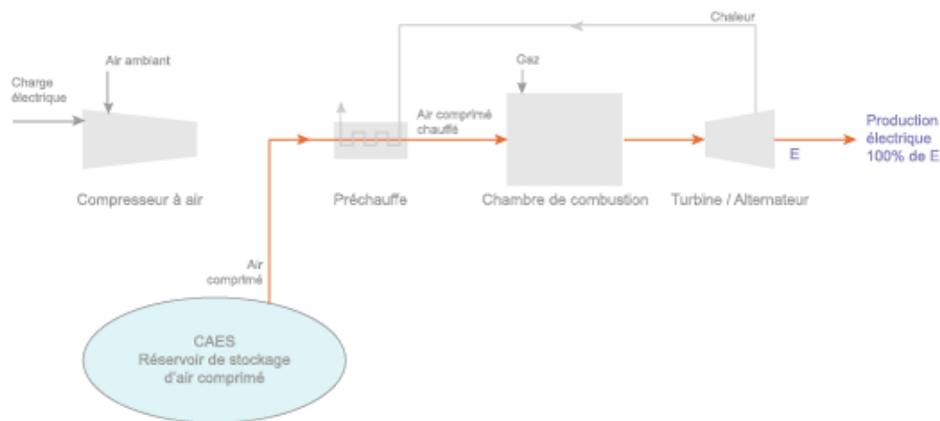


Figure 2.10 : Stockage sous forme comprimée [28]

2.4.3- Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké comme montrée sur la figure 2.11:

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz existant mais surtout être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité. [29]

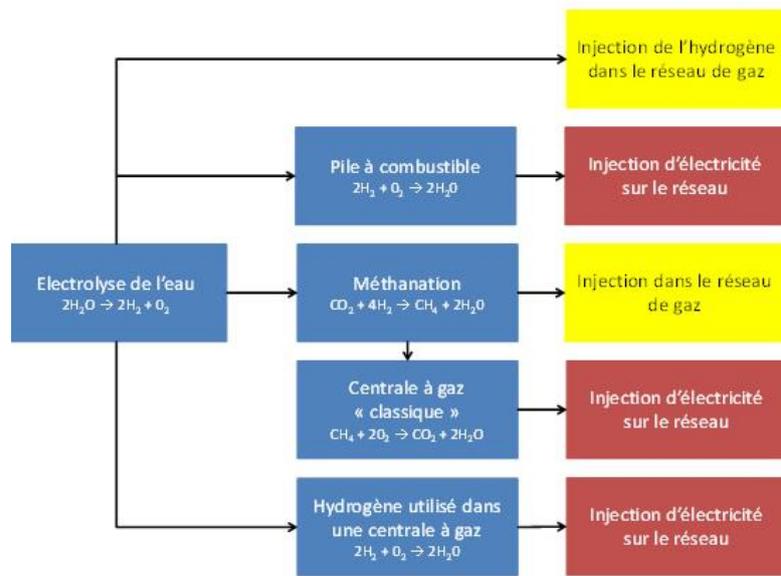


Figure 2.11 : Stockage grâce à l'hydrogène [29]

2.4.4- Batteries électrochimiques

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium (zebra), comme montrée sur la figure 2.12, leur rendement varie entre (60-90%) [29]

	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Ni-Zn	Zebra	LMP	Li-ion	Li-Po	LiFePo4	Li-air
Wh/kg	40	60	90	80	120	110	150	190	110	1000
Durée de vie (cycles)	500	2000	1500	nc	nc	1800	1000	2000	2000	nc

Figure 2.12 : Eléments chimiques des batteries avec leurs durée de vie [29]

2.5- Le système de comptage évolué (smart metering)

Un système de comptage évolué (intelligent) implique, d'une part, la mise en place de compteurs communicants (doté de capacités de communication bidirectionnelle) capables de stocker les informations résultant des mesures d'énergie.

D'autre part, l'établissement de systèmes de transmission de données (transmission et réception des informations) permettant la circulation rapide et fiable des informations contenues dans les compteurs entre les utilisateurs, les gestionnaires de réseaux et les fournisseurs. [30]

2.5.1- Caractéristique du smart metering

Deux niveaux de dispositifs de comptage évolués peuvent être distingués :

- **Automated Meter Reading (AMR) :**

Consiste en un télé-relevé automatisé. C'est un dispositif qui permet une remontée d'information du compteur vers l'opérateur du comptage ;

- **Automated Meter Management (AMM) :**

Correspond à un AMR complété de prestations complémentaires. Il consiste en l'automatisation des prestations techniques manuelles liées au comptage (mise en service, changement de puissance, etc.). C'est un dispositif qui permet une communication bidirectionnelle entre le compteur et l'opérateur de la solution de comptage.

L'Advanced Metering Infrastructure (AMI) n'est pas à mettre sur le même plan que l'AMR ou l'AMM. Elle désigne l'ensemble des composants et architecture technique du comptage évolués pour permettre le fonctionnement d'AMM. [30]

2.5.2- Présentation du système de comptage évolué

Le compteur est doté de capacités de communication bidirectionnelle (transmission et réception des informations) et permet la relève à distance ainsi que le pilotage de la fourniture d'énergie.

Comme le montre le schéma de la figure 2.13 ci-dessous, 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 Courant Porteur en Ligne (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. [31]

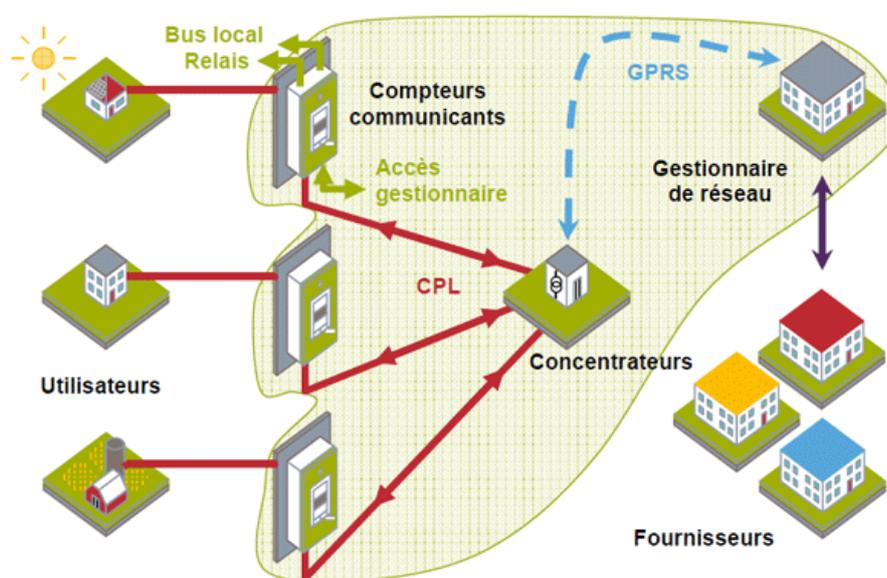


Figure 2.13 : Système de comptage évolué en électricité. [30]

2.5.3- Principe de fonctionnement du CPL

Le courant porteur en ligne permet la transmission de données numériques sur un réseau électrique. Sa structure ressemble à celle d'un réseau filaire Ethernet (RJ45) ou Wi-Fi. Dans le cas du CPL, c'est le réseau électrique qui est utilisé comme support des communications.

Le courant qui passe sur les câbles électriques possède une fréquence de 50Hz. La technologie CPL superpose à ce signal un autre signal dont la fréquence est plus élevée (entre 1,6 et 30 MHz). Ce signal navigue donc sur le réseau électrique et peut être vu par tout récepteur se trouvant sur le même réseau électrique. [31]

2.5.4- Principales fonctionnalités des systèmes de comptages évolués

Les compteurs évolués doivent être capables d'assurer :

- La relève des données du compteur à intervalle régulier ;
- La télé relève des données du compteur à partir d'un système d'informations situé à distance ;
- La gestion de compteurs à distance (réduction de la puissance, coupure, gestion de la demande) 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 tels que les structures tarifaires, la puissance contractuelle, les intervalles de relève du compteur par les fournisseurs ;
- Le transfert à distance des messages des acteurs du marché pour le client (consommateur/producteur) comme, par exemple, les signaux tarifaires ;
- l'affichage des informations sur le compteur et/ou un téléreport à partir de la télé-information client (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 (y compris la continuité de l'approvisionnement et la qualité de tension). [32]

2.6- Applications du micro réseaux intelligents

2.6.1- Maison communicante et bâtiment intelligent

Le terme de **bâtiment intelligent** recouvre à la fois la notion de maison communicante individuelle (**Smart home**) et de bâtiment à énergie positive (**Smart building**).

Le caractère automatique est, en effet, la pierre angulaire du concept de bâtiment intelligent. Ainsi le mot domotique est formé du mot latin « *domus* », la maison, le bâtiment et du suffixe « *-tique* » pour automatique. Concept né dans les années 1980, la domotique consiste à mettre en réseau, à coordonner et à automatiser le fonctionnement des équipements électriques d'une maison ou d'un bâtiment, afin de permettre des économies d'énergie, d'améliorer le confort et la sécurité dans le bâtiment, voir figure 2.14. [33]

Les premiers signes visibles de cette évolution vers un bâtiment intelligent apparaissent trente ans plus tard, en raison du développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), du contexte réglementaire, des objectifs environnementaux et de l'apparition du compteur communicant, interface entre les réseaux publics d'électricité et le réseau privé du bâtiment, qui ouvre des perspectives d'innovations majeures en aval du compteur. [33]



Figure 2.14 : Système de comptage évolué en électricité. [33]

L'efficacité énergétique dépend des techniques de construction du bâtiment, de l'isolation par exemple. Le concept de bâtiment intelligent correspond à l'intégration de solutions de gestion énergétique dans l'habitat et les bâtiments d'entreprise, notamment pour parvenir à des bâtiments à énergie positive, voir figure 2.15. De nombreuses solutions existent et sont complémentaires :

- **une meilleure isolation des bâtiments** : elle constitue la méthode la plus efficace pour éviter le gaspillage thermique et permet de se passer de chauffage en dehors des périodes de grand froid (nombreux matériaux : laine de verre, chanvre ou paille) ;
- **de nouvelles techniques de génération d'énergie** : le bâtiment permet d'intégrer facilement les énergies de sources renouvelables. La toiture permet d'accueillir les panneaux photovoltaïques qui compensent voire dépassent les dépenses énergétiques des habitants ou les capteurs thermiques solaires qui chauffent l'eau pour le chauffage ou les sanitaires ;
- **le développement et le renforcement des systèmes de ventilation** afin d'éviter de perdre le bénéfice de l'isolation en ouvrant une fenêtre que ce soit en période de grand froid ou de forte chaleur (ventilation à double flux ou puits canadien) ;
- **des systèmes de chauffage et de climatisation plus vertueux** (poêle à bois, pompe à chaleur, géothermie) et d'autres systèmes permettant de mieux réguler la température (thermostat, chaudières performantes, etc.) ;

- **un choix plus réfléchi sur la localisation du bâtiment** en termes de terrain d'implantation et d'orientation afin de tirer le meilleur parti de l'isolation, des ouvertures et des panneaux photovoltaïques ; [34]

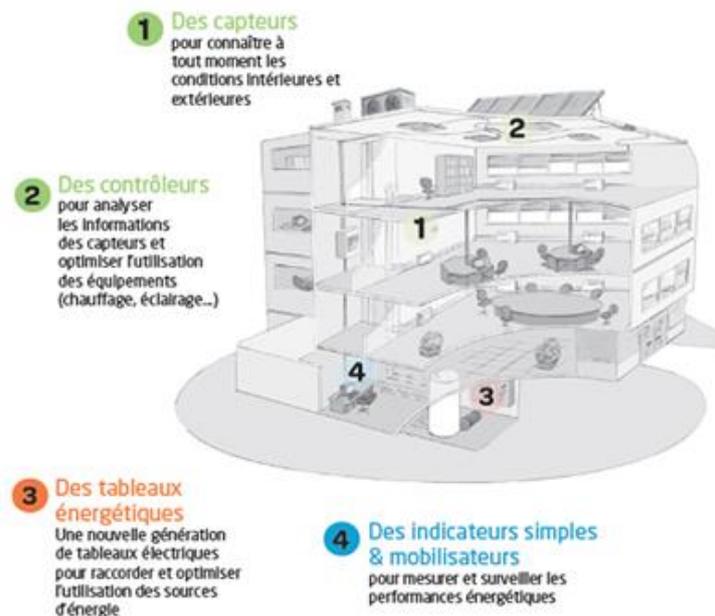


Figure 2.15: Bâtiment intelligent (Schneider Electric, Programme Homes) [34]

Le bâtiment intelligent se définit donc comme un bâtiment à haute efficacité énergétique, intégrant dans la gestion intelligente du bâtiment les équipements consommateurs, les équipements producteurs et les équipements de stockage de l'électricité, tels que les véhicules électriques.

L'efficacité énergétique dépend également des techniques de construction du bâtiment, de l'isolation par exemple. Le concept de bâtiment intelligent correspond à l'intégration de solutions de gestion énergétique dans l'habitat et les bâtiments d'entreprise, notamment pour parvenir à des bâtiments à énergie positive.

2.6.2- Ville intelligente (Smart-city)

À l'origine, une ville intelligente, traduction du concept anglo-saxon de smart city, 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.

Cette « intelligence » touche de nombreux domaines comme les transports (circulation, stationnement, etc.), l'approvisionnement en électricité, en eau, le ramassage des ordures, etc.

Pour les déchets par exemple, des bacs connectés mesurent le remplissage et déclenchent le signal de la collecte quand ils sont pleins. Cela permet d'optimiser le trafic des camions-poubelles (bruit, pollution, bouchons), d'éviter les dépôts au pied des bacs pleins mais aussi de mieux penser l'implantation des bacs en fonction des besoins. [35]

2.6.2.1- Contexte de la ville intelligente

La forte concentration en population : aujourd’hui, plus de la moitié de la population vit en ville, d’ici à 2050 cette proportion devrait s’élever à deux tiers.

Ensuite les villes sont énergivores, alors qu’elles ne représentent que 2 % de la surface planétaire, elles consomment 75 % de l’énergie produite et sont responsables de 80 % des émissions de CO₂.

La transition et la lutte contre le réchauffement climatique passeront donc, inévitablement, par une transformation des villes. Le principe de ville intelligente œuvre dans ce sens. [35]

2.6.2.2- Caractéristiques de la smart city

L’Union européenne s’inspire de la vision de Rudolf Giffinger, expert en recherche analytique sur le développement urbain et régional à l’université technologique de Vienne, et référent en la matière, dont les travaux indiquent que la ville intelligente doit être performante dans six domaines comme montré sur la figure 2.16.

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 ou encore l’intégration sur le marché national et international.

Des citoyens intelligents :

Autrement dit le capital humain et social de la ville. Il est question, 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 ou de la participation à la vie publique.

Une gouvernance intelligente :

C’est-à-dire un mode d’administration de la ville transparent, transversal et partagé, intégrant la participation du citoyen.

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, durables et sûrs.

Un environnement intelligent :

On parle ici d’écologie et de gestion des ressources. La ville intelligente doit favoriser un environnement de qualité (espaces verts, qualité de l’air), gérer de façon durable ses ressources et œuvrer à la protection de l’environnement. Les écoquartiers sont des exemples, localisés, d’un environnement géré intelligemment.

Un mode de vie intelligent :

Il regroupe des facteurs liés à la qualité de vie : culture, santé, sécurité, habitat, éducation, tourisme, cohésion sociale, etc.

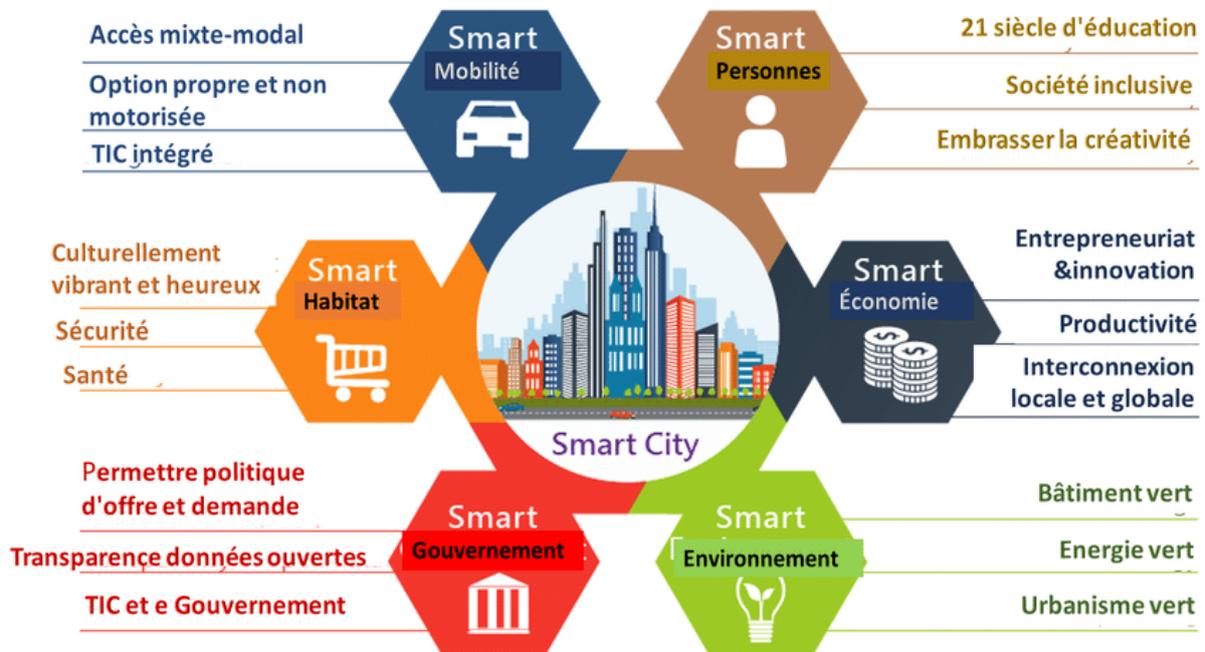


Figure 2.16: Schéma des leviers d'une ville intelligente [35]

2.6.2.3- L'Open Data au service des villes intelligentes

Collecter de nombreuses données partout dans la ville et dans tous les domaines c'est bien, pouvoir les croiser entre elles pour créer des services innovants c'est encore mieux.

L'Open Data en proposant des données accessibles, partageables et utilisables par tous, autorise l'interopérabilité, c'est-à-dire la possibilité, pour différents systèmes ou entreprises, de fonctionner ensemble en mixant leurs données.

C'est donc un principe, à l'opposé du fonctionnement en silo, essentiel au développement de la ville intelligente, qui bénéficie autant aux acteurs publics que privés, voir figure 2.17.

Dans le domaine de la mobilité par exemple, la mise à disposition de certaines données par les opérateurs de services de mobilité contribue à faciliter l'organisation de déplacements multimodaux. Ces données collectées offrent une vision claire de l'offre de transports disponible à un instant donné, avec l'objectif, pour les opérateurs concernés, de mieux répondre aux besoins des usagers. [35]



Figure 2.17: Open data au service des villes intelligentes [35]

2.6.3- Véhicules électriques

Les véhicules électriques ne datent pas d'hier, les toutes premières voitures à propulsion électrique voient le jour dans les années 1830, qui au fil de l'histoire, ont fait quelques brèves réapparitions.

Depuis quelques années, la voiture électrique réalise son grand retour, les prototypes se multiplient et les premiers modèles de production apparaissent dans les show-rooms. Les experts vantent l'efficacité et la propreté du moteur électrique. De toutes parts, des plans ambitieux voient le jour et augurent d'un bel avenir pour ces nouveaux véhicules [36]

2.6.3.1- Classification des véhicules électriques

Les voitures électriques sont généralement classées selon plusieurs types, leur autonomie, leur type de propulsion voire même leur taux d'intégration d'énergie électriques. Ici nous intéressons à la classification selon le taux d'intégration de l'Énergie électriques dans le fonctionnement. [36]

Il existe 3 grandes familles de véhicules électriques :

- Les véhicules 100% électriques : ils roulent uniquement à l'électricité ;
- Les véhicules hybrides classiques : ils combinent un moteur électrique et un moteur thermique classique (diesel ou essence)
- Les véhicules hybrides rechargeables : leurs batteries peuvent être rechargées à une simple prise de courant.

Plusieurs technologies existent en matière de véhicule électrique. Actuellement, ce sont les voitures hybrides qui sont les plus présentes sur les routes, même si le 100% électrique est

très en vue. L'hybride rechargeable, relativement récent, est un compromis qui pourrait séduire de nombreux automobilistes. [36]

2.6.3.2- Infrastructure de recharge

La charge et la décharge d'un véhicule électrique varie avec le type de la voiture, son utilisation, sa technologie et particulièrement avec les batteries qu'elle utilise.

- Recharge Normale :

La recharge normale prend entre 6 et 8 heures pour le chargement d'une batterie en entier, selon le modèle de véhicule. Ce type de charge est accessible à tous les véhicules. Il convient généralement aux longues périodes de pauses comme une nuit à domicile ou une journée de travail.

- Recharge Accélérée :

La charge accélérée est à 22 kVA, et le chargement prend entre 1 et 2 heures. ce type de charge se trouve dans les arrêts de type parkings, ou dans un centre commercial... [37]

- Recharge rapide :

La recharge rapide est une solution de confort qui peut être utile pour doter rapidement un véhicule, d'autonomie nécessaire pour effectuer ou poursuivre un long trajet ou encore lors d'un usage professionnel comme les taxis. Ce type de charge nécessite en moyenne 15 à 20 minutes. [37]

2.6.3.3- principe de fonctionnement

Le passage de la batterie au moteur se fait par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur permet de varier l'intensité du courant afin de varier la vitesse de rotation des roues, et le convertisseur transforme le courant continu en courant alternatif comme montré sur la **figure 2.18**.

Le système de convertisseur est bénéfique puisque les pièces du moteur ne doivent pas être changées aussi régulièrement que si le moteur était alimenté par un courant continu. En effet, le courant alternatif permet l'inversion du sens du courant dans le rotor à chaque demi-tour. [38]

De ce fait, le rotor poursuit sa rotation dans le même sens, comme dans un moteur à courant continu.

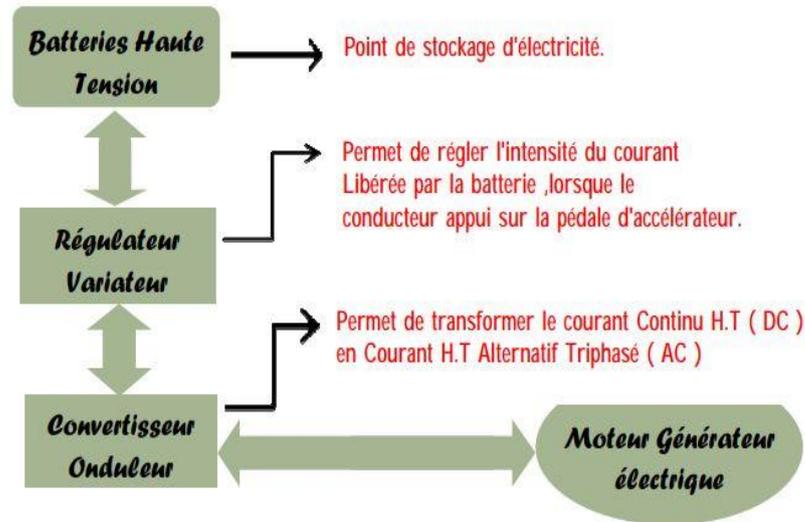


Figure 2.18: Fonctionnement d'un véhicule électrique [38]

2.6.3.4- Technologie V2G

La transition énergétique place les fournisseurs d'énergie dans un double défi d'un côté, il faut réussir d'intégrer les sources d'énergie renouvelables et de l'autre, il faut réussir à garantir la stabilité du réseau et la capacité suffisante afin de répondre à la demande des consommateurs.

La solution pour ce double défi se résume dans le principe du V2G « véhicule to grid »

2.6.3.4.a- Objectif de la technologie V2G :

Grâce à sa recharge bidirectionnelle, la batterie V2G devient une extension du réseau électrique, voir figure 2.19, capable de stocker de l'énergie produite aux heures où la demande est plus faible et de la réinjecter lorsque la demande est plus forte. On imagine les atouts de cette technologie dans un contexte de généralisation du véhicule électrique. Grâce à la technologie *Vehicle to Grid (V2G)*, un véhicule électrique pourra massivement contribuer à un monde sans émissions et intégrant très largement les énergies renouvelables. [36]

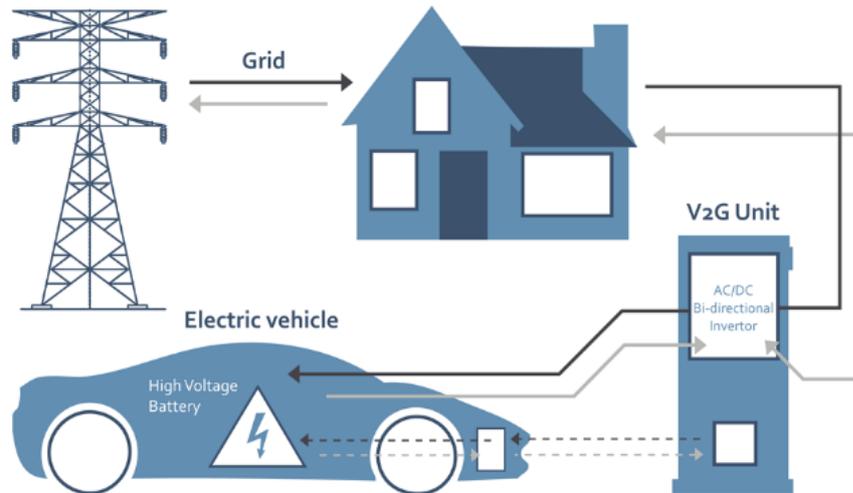


Figure 2.19: Contribution du VE à la chaîne électrique [36]

2.6.3.4.b- Utilisation du véhicule électrique comme moyen de stockage :

L'arrivée des véhicules électriques est un élément clé dans la gestion du réseau électrique. Une voiture est inutilisée 95 % de son temps de vie et l'utilisation moyenne d'un véhicule électrique nécessitera moins de 80 % de la capacité de la batterie pour les trajets quotidiens.

Il sera donc possible pendant les périodes où le véhicule sera branché au réseau électrique d'utiliser l'électricité stockée pour l'injecter sur le réseau en période de forte demande ou, inversement, de charger la batterie du véhicule en heures creuses. Il s'agit du concept du « véhicule-to-grid », ou V2G, qui consiste à utiliser les batteries des véhicules électriques comme une capacité de stockage mobile.

Les véhicules électriques pourraient donc représenter une capacité additionnelle de stockage d'énergie, sous réserve que cet usage soit technologiquement et économiquement pertinent voir figure 2.20.

Contrairement au stockage de masse de l'énergie, cet usage de la batterie nécessite des cycles de charge et décharge très rapides et nombreux, ainsi qu'une très forte densité d'énergie ;

Par ailleurs, l'état du système électrique devra être pris en compte lors de la charge ou de la décharge du véhicule. [39]

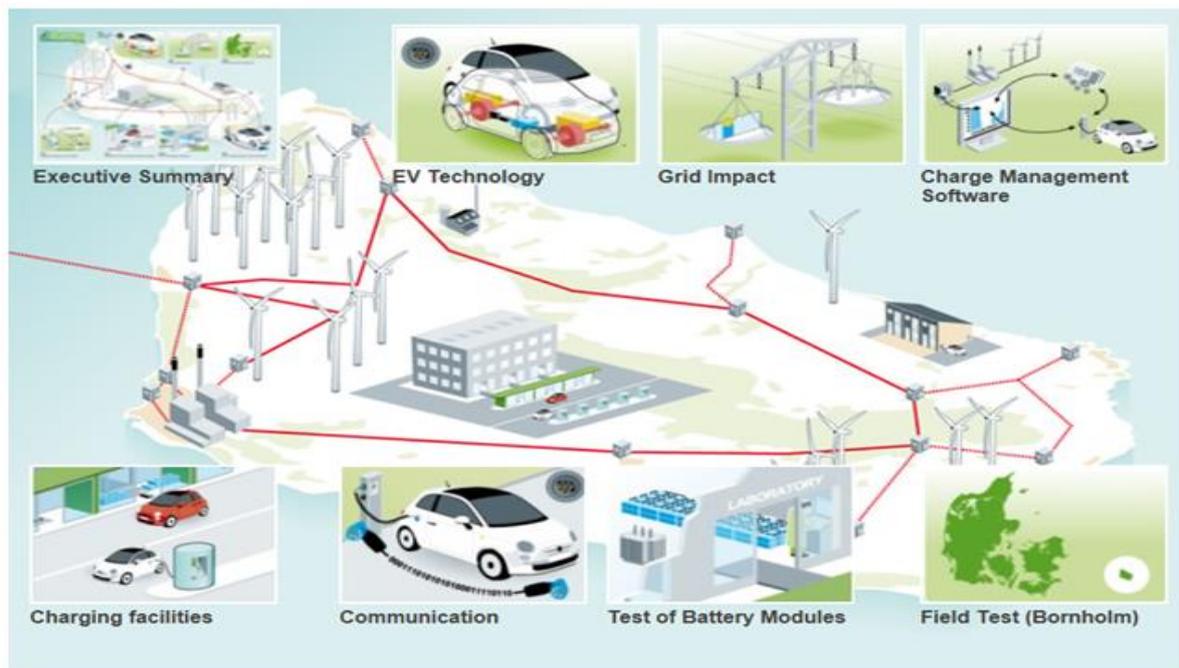


Figure 2.20: Utilisation du véhicule électrique comme moyen de stockage [39]

Pour un parc d'un million de voitures électriques branchées (le plan véhicules électriques du gouvernement français prévoit un total de 2 millions de VE à l'horizon 2020), la capacité de stockage pourrait atteindre 10 GWh. Cette capacité de stockage pourrait s'avérer précieuse en période de pointe mais elle suppose que les consommateurs aient adopté le VE et le bon comportement lorsqu'il s'agit de recharger son véhicule. [39]

2.7- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu voir les différents aspects des micro réseaux intelligents, qui constituent la solution de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution d'électricité. Ces derniers nécessitent une infrastructure communicative et une gestion des ressources plus étendue permettant d'équilibrer la demande à la production centralisée et décentralisée.

Les grandes centrales continueront d'assurer l'approvisionnement de base, mais il y aura également des sources d'énergie renouvelables, provoquant des fluctuations dans le réseau. Dans un avenir pas trop lointain, un stockage intermédiaire flexible de la puissance excédentaire temporaire dans le réseau sera possible en utilisant des véhicules électriques et des unités de stockage stationnaires. Des capteurs et des compteurs intelligents allumeront ou éteindront ces unités, garantissant une gestion efficace de la charge.

CHAPITRE 3:
Simulation et interprétation
des résultats

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous intéressons au mécanisme d'échange d'énergie entre les différentes sources et la charge. Nous proposons un modèle d'une simulation dans « MATLAB » en analysant le côté échange de puissance par les différentes sources. Nous allons présenter les simulations d'un réseau intelligent (microgrid), intégrant des sources d'énergies renouvelables, fermes éoliennes (4,5 MW) et panneaux solaires (8 MW), véhicules électriques (4 MW), comportant une centaine de véhicules, en plus d'une charge variable (10 MW), qui est composé d'une charge résidentielle et d'une machine asynchrone, ainsi qu'un générateur diesel qui assure la régulation, la production et la consommation. Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Le but était d'analyser le fonctionnement d'un mini-réseau intelligent et d'apprécier les performances apportées par ce type de réseaux.

3.2. Description du Microgrid

Le Microgrid, est composé de quatre parties importantes : Un générateur diesel agissant comme générateur de puissance de base, une ferme photovoltaïque combinée à un parc éolien afin de produire une énergie à base de sources renouvelables, et une station de véhicule électrique de 100 véhicules équipé de la technologie V2G. L'énergie totale produite est acheminé vers une charge résidentielle (nombres importants de maison) et d'une machine asynchrone utilisée pour représenter l'impact d'une charge inductive industrielle, qui consomment une puissance de 10MW à travers un transformateur abaisseur 25KV/600V. (Fig. 3.1).

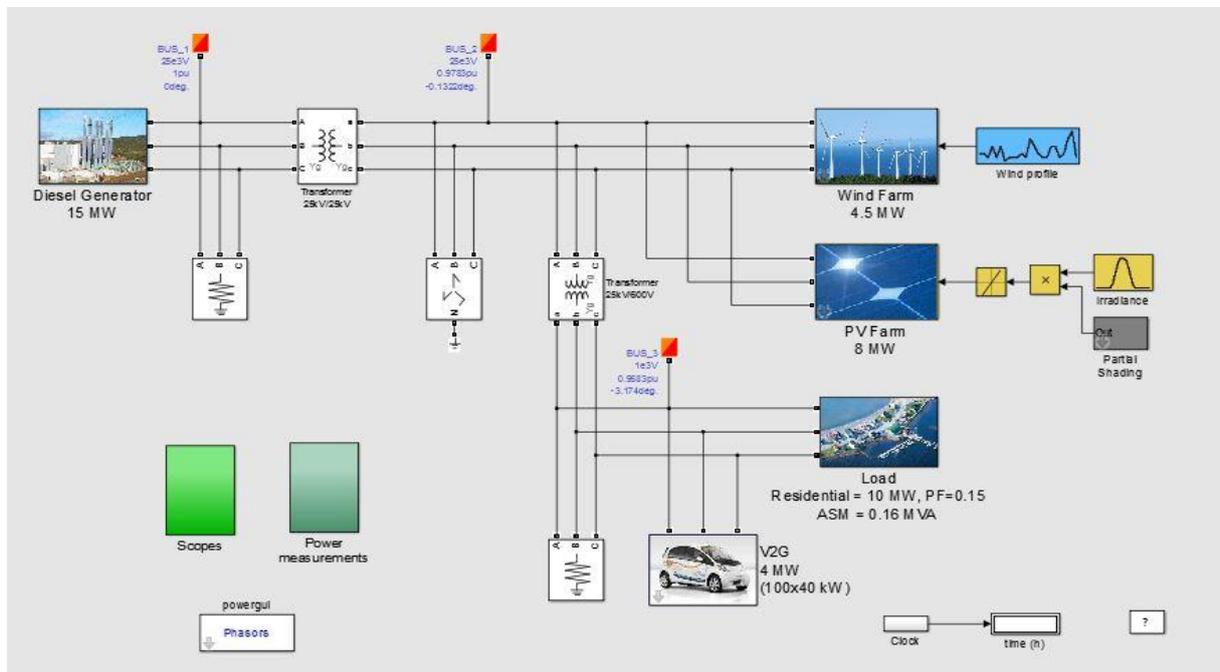


Figure 3.1 : Schéma de simulation d'un Micro-grid sur (Matlab/Simulink 2016 A).

3.2.1. Générateur diesel

Le rôle du générateur diesel est d'équilibrer la puissance produite à la puissance demandée afin de maintenir la fréquence constante.

3.2.2. Énergie renouvelable

Il existe deux sources d'énergie renouvelable dans ce Microgrid. Tout d'abord, une ferme PV qui produit de l'énergie proportionnelle à trois facteurs :

- La taille de la zone couverte par la ferme photovoltaïque ;
- L'efficacité des panneaux solaires ;
- Les données d'irradiation.

Deuxièmement, un modèle simplifié d'un parc éolien qui produit de l'énergie électrique suite à une relation linéaire avec le vent. Lorsque le vent atteint une valeur nominale, le parc éolien produit une puissance nominale. Le parc éolien se déconnecte automatiquement du réseau lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur maximale souscrite par le constructeur, jusqu'à ce que le vent revienne à cette valeur.

3.2.3. Véhicule to grid (V2G)

Le "V2G", a deux fonctions principales : Contrôler la charge des batteries connectées et utiliser l'alimentation disponible pour régler le réseau, lorsqu'un événement se produit pendant la journée comme par exemple les moments de pic d'énergie. Le bloc V2G, comporte cinq profils d'utilisateurs de voitures différents :

Profil 01 : Prenons un lieu de travail où l'on peut charger sa voiture. On y compte 35 employés possédant tous des véhicules électriques.

Ces 35 employés mettent 02 h au trajet maison-travail, le matin de 06 h à 08 h, et l'après-midi de 16 h à 18 h. Durant ce temps le niveau de tension est en dessous du Zéro car chaque voiture est en marche, par ailleurs, en dehors des heures de déplacement chaque voiture se voit connectée à la borne de recharge (voir Fig.3.2).

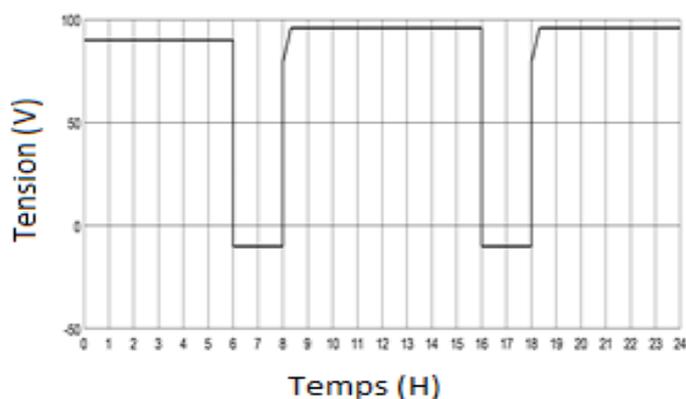


Figure 3.2 : Profil 01.

Profil 02 : Les personnes n'ont pas la possibilité de charger leurs voitures au travail. Dix employés sont véhiculés mais n'ont l'aptitude à recharger leurs voitures qu'une fois rentrés chez eux. Ces personnes mettent le même temps au trajet maison-travail cité auparavant. Cela signifie que chaque voiture reste en marche de 06 h à 18h et donc que le niveau de tension se trouve en dessous du Zéro (voir Fig.3.3).

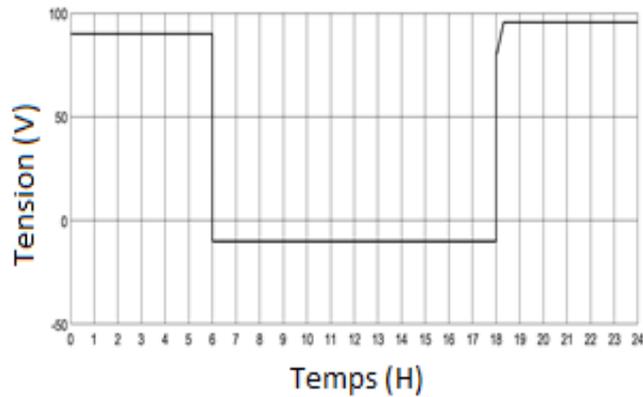


Figure 3.3 : Profil 02.

Profil 03 : Dans ce profil, 25 employés possèdent des véhicules électriques qu'ils rechargent à proximité de leur lieu du travail. En plus des heures du trajet maison-travail qui sont de 02 h matin et soir, ils mettent en plus une heure supplémentaire à chaque déplacement pour se rendre là où ils peuvent connecter leurs voitures à une borne de charge. Soit de 05 h à 08 h le matin et 16 h à 19 h l'après-midi. Durant ces deux intervalles de temps le niveau de tension est en dessous du zéro ce qui signifie que chaque voiture est en marche, dans le cas contraire chaque voiture est connectée à la borne de recharge (voir Fig.3.4).

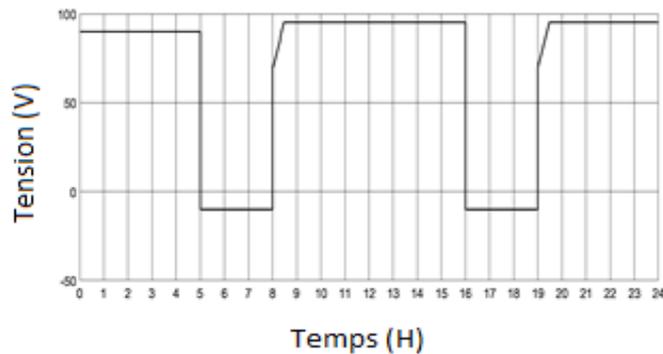


Figure 3.4 : Profil 03.

Profil 04 : Personnes qui restent à la maison. Le cas comporte 20 personnes qui possèdent des voitures électriques mais qui restent chez eux toute la journée. Vu que personne ne sort de chez soi chaque voiture se retrouve connectée toute la journée à la borne de charge (voir Fig.3.5).

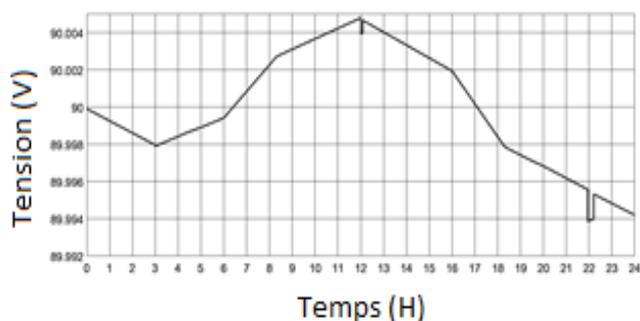


Figure 3.5: Profil 04.

Profil 05 : Les personnes qui travaillent durant la journée. Cette catégorie compte un ensemble de 10 véhicules électriques. Ces personnes n'ont pas la possibilité de charger leurs voitures ni au travail ni chez eux.

La recharge se fait de 20h à 21h via une borne de recharge accélérée (voir Fig.3.6).

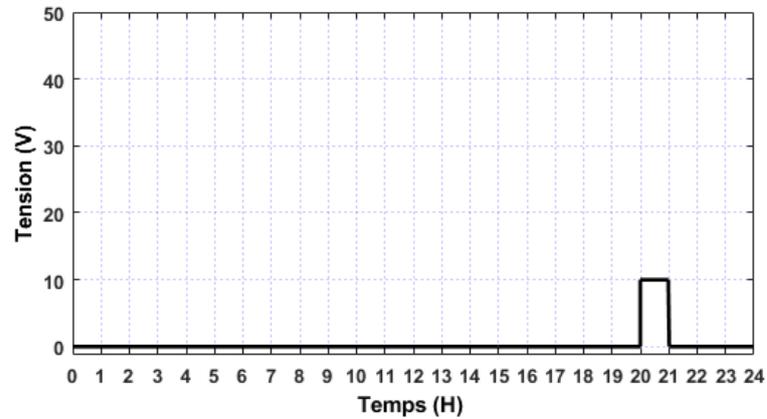


Figure 3.6 : Profil 05.

L'ensemble des profils est représenté à la figure 3.7.

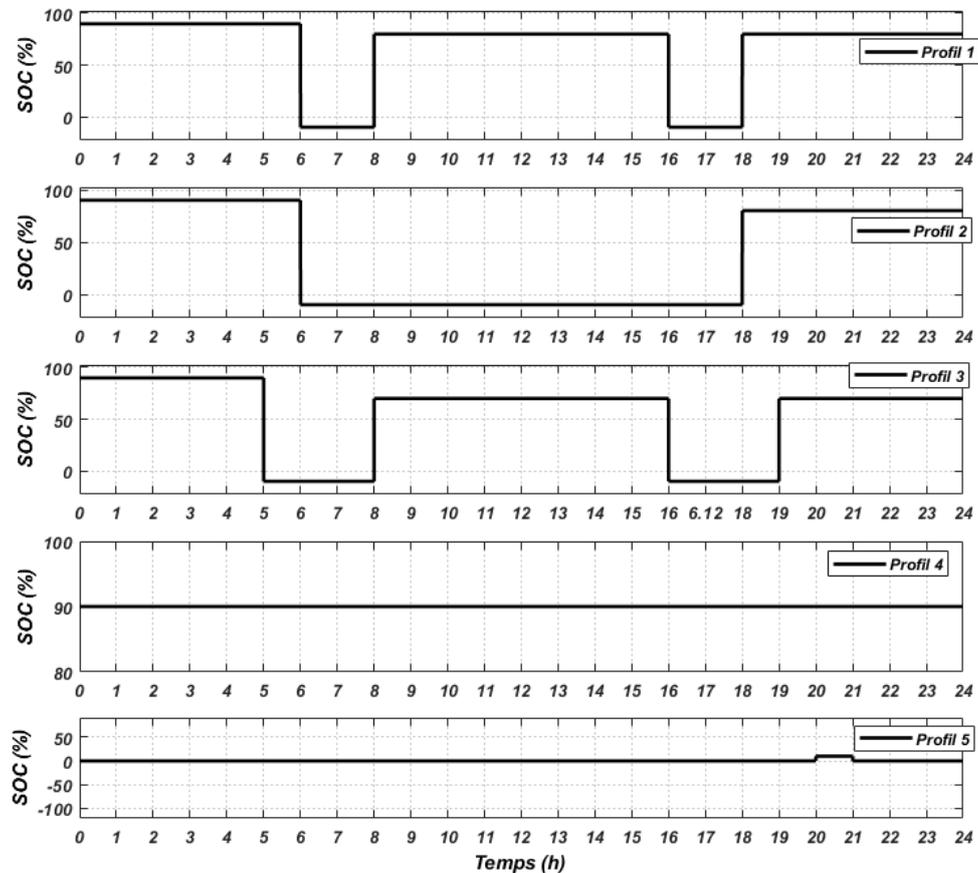


Figure 3.7 : Profils de recharge des véhicules électriques.

3.2.4. La charge

La clientèle du microgrid se compose d'une charge résidentielle et d'une machine asynchrone utilisée pour représenter l'impact d'une charge inductive industrielle (comme un système de ventilation) sur le Microgrid. La charge résidentielle suit un profil de consommation avec un facteur de puissance donné.

Le but est d'analyser le fonctionnement d'un mini-réseau intelligent et d'apprécier les performances apportées par ce type de réseaux.

Le Microgrid est composé d'un générateur Diesel de puissance 15MW fonctionne comme un générateur de base.

3.3- Scénarios proposés

La simulation prend une durée de 03 minutes, équivalente à 24 heures du temps réel. L'intensité solaire suit une distribution normale où la plus haute valeur est atteinte à midi. Le vent varie pendant la journée formant de multiples pics et creux. La charge résidentielle suit un modèle typique semblable à une consommation normale des ménages. La consommation est faible pendant la journée et augmente le soir jusqu'à atteindre un pic puis diminue lentement pendant la nuit.

Différents scénarios opérationnels sont mis en œuvre durant une journée pour voir le comportement du système de gestion dans le partage de puissance entre les sources et la charge.

3.3.1 Scénario 1 : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des EnR (10h pour le PV).
- 4-Absence de source éolienne (WT)

3.3.2 Scénario 2 : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des énergies renouvelables (à 20h pour les éoliennes et à 10h pour le PV).
- 4- Absence des véhicules électriques

3.3.3 Scénario 3 : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des énergies renouvelables (20h pour les éoliennes et 9h pour le PV).
- 4- Variation de la charge avec un pic à 19h

3.3.4 Scénario 4 : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des énergies renouvelables (20h pour les éoliennes et de 9h à 14h pour le PV).

3.3.5 Scénario 5 : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des énergies renouvelables (9h pour le PV).
- 4- Absence des sources EV-WT

3.3.6 Scénario 6 : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 3h du matin.
- 3-Fluctuation des énergies renouvelables (22h pour les éoliennes et 12h pour le PV).

3.4. Organigramme

Pour le modèle étudié, la gestion des ressources d'énergie est faite selon l'organigramme illustré à la figure 3.8.

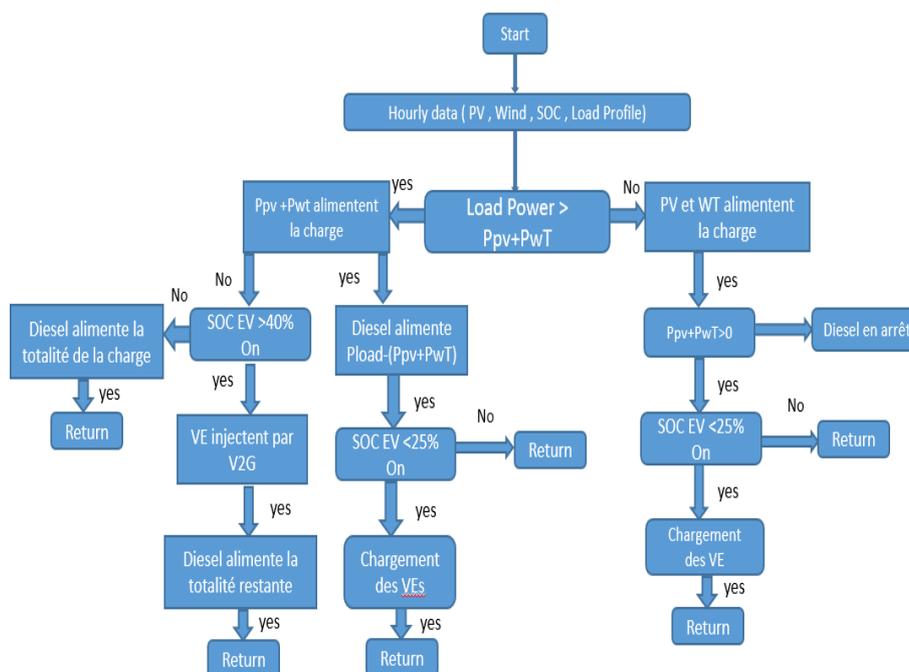


Figure 3.8 : Organigramme de gestion

3.5. Résultats de simulation

En lançant la simulation à partir de Simulink, nous pouvons observer différents signaux dans les champs du modèle ainsi que le comportement de la vitesse du rotor.

En cliquant sur le sous-système Scopes et mesures de puissance, il est possible d'accéder aux informations provenant de différents nœuds. L'état de charge de chaque profil de voiture est également disponible dans ce sous-système. Une valeur négative de l'état de charge signifie que la voiture est sur la route ou non connectée.

3.5.1. Scénario -1- : Fonctionnement du Microgrid en présence du (PV –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des EnR (10h pour le PV).
- 4-Absence de source WT.

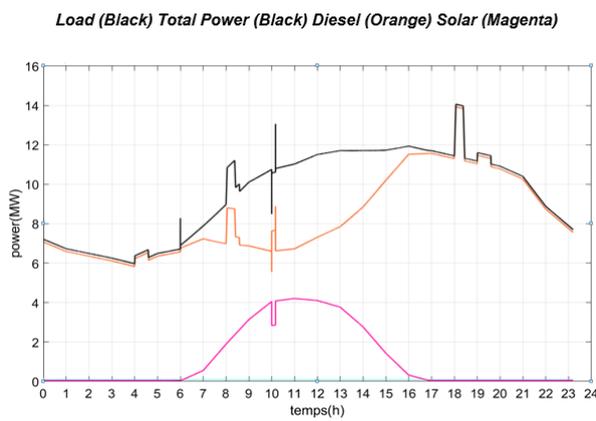


Figure3.9 : Variation de la puissance produite et consommée

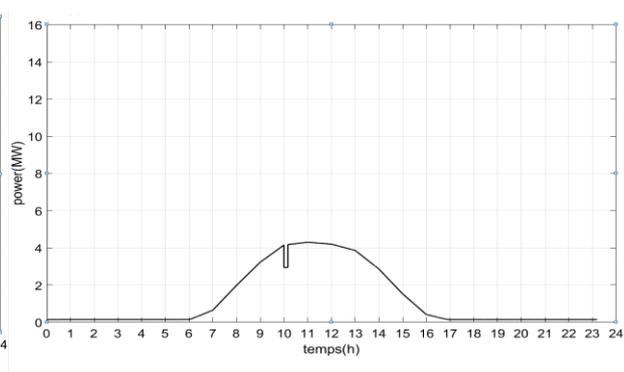


Figure3.10 : Production renouvelable (PV) Durant la journée

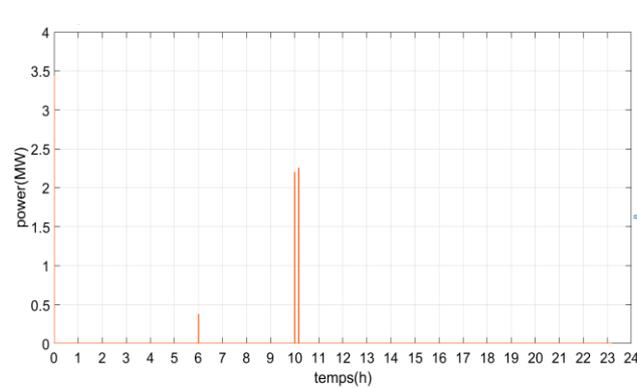


Figure3.11 : L'injection de puissance de VE (V2G)

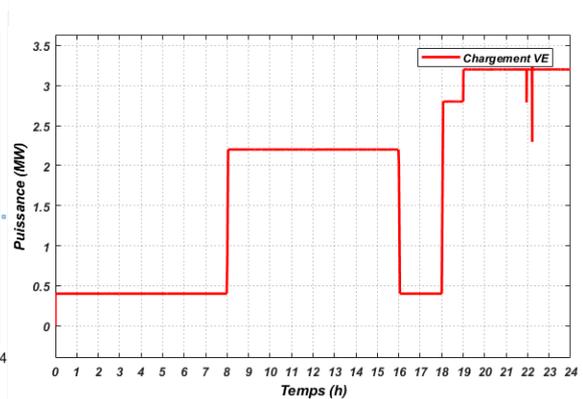


Figure3.12 : Chargement des VE durant la journée

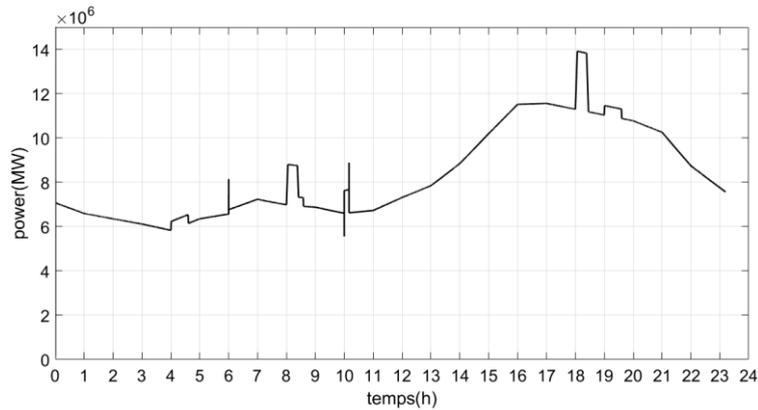


Figure3.13 : Production du générateur diesel durant la journée

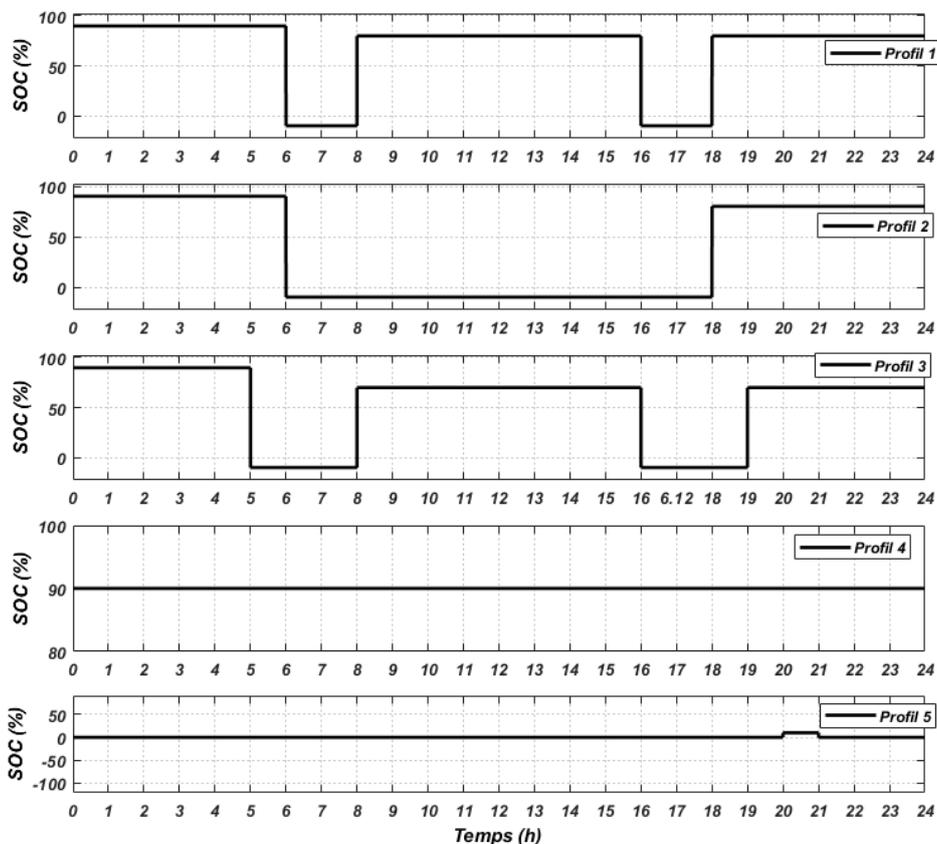


Figure3.14 : Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge SOC durant la journée

Après simulation on obtient les résultats des puissances générées par le générateur diesel, et le champ photovoltaïque (**Fig.3.9**).

Les résultats montrent les variations faibles des puissances générées par les différentes sources pendant les deux premières heures de la journée jusqu'à **6h**, ou on remarque un pic de production du générateur diesel qui est dû à une grande consommation liée au démarrage du moteur asynchrone (**Fig 3.13**).

A partir de **6h**, le soleil se lève et la production du champ photovoltaïque augmente progressivement ainsi que la consommation des habitations.

De 08 h à 09 h du matin, nous remarquons un pic de production qui est dû à une consommation élevée des habitants. À dix heures du matin, un nuage partiel affecte la production de l'énergie solaire en provoquant un creux dans sa production ce qui engendre un pic de production du générateur diesel ainsi qu'une injection de puissance dans le Microgrid de la part des voitures électriques.

On remarque une diminution dans la production photovoltaïque à 17 h, cela est dû au coucher du soleil. Cette diminution provoque une grande augmentation de la production du générateur diesel.

De 18h à 19h, un pic de consommation de la charge surgit provoquant l'augmentation rapide de la production pour satisfaire les besoins des habitations. A partir de 19 h, il y a une diminution remarquable dans la production due à la baisse de la consommation.

On constate en premier temps le démarrage du moteur asynchrone à 6 h du matin, où les profils (1,2,4) des utilisateurs des VE vont injecter de l'énergie dans le Microgrid afin d'équilibrer les puissances, Deuxième moment critique : Le passage des nuages qui ont perturbé la production d'énergie solaire photovoltaïque, afin de remédier à ce problème les profils (1,3,4) entrent en jeu, et comme vu précédemment l'injection d'une puissance va stabiliser le réseau (**Fig.3.11**).

3.5.2. Scénario -2- : fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-Fluctuation des EnR (à 20h pour les éoliennes et à 10h pour le PV).
- 4- Absence de EV.

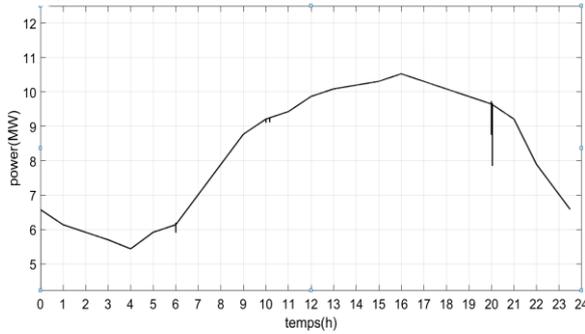


Figure3.15 : Variation de la charge résidentielle durant la journée

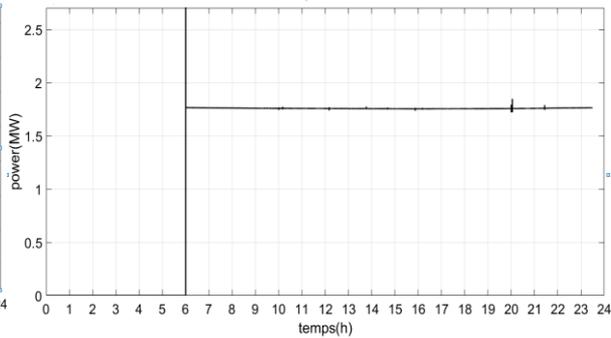


Figure3.16 : Variation de la charge industrielle durant la journée

Load (Black) Total Power (Black) Diesel (Orange) Solar (Magenta) Wind Power (Blue)

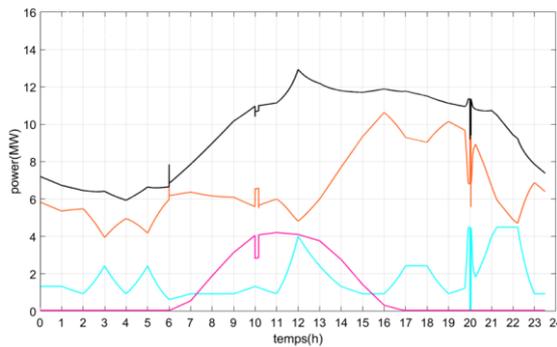


Figure3.17 : Variation de la puissance produite et demandée

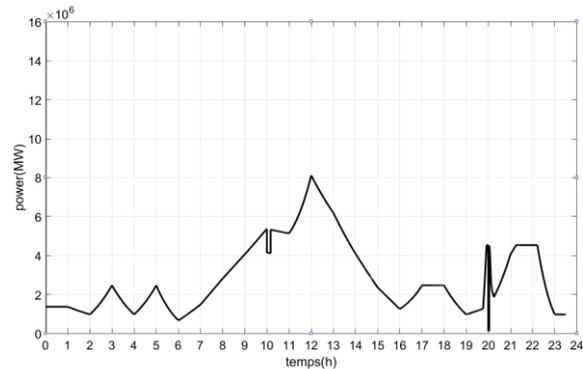


Figure3.18 : Production renouvelable (PV+WT) durant la journée

Les résultats montrent les variations faibles des puissances générées par les différentes sources pendant les premières heures de la journée jusqu'à 6h heure, ou on remarque un pic de production qui est dû à une grande consommation liée au démarrage du moteur asynchrone (Fig.3.17).

A partir de 6h, le soleil se lève et la production du champ photovoltaïque augmente progressivement ainsi que la consommation des habitations.

De 08 h à 09 h du matin, nous remarquons un pic de production qui est dû à une consommation élevée des habitants. À 10h un nuage partiel affecte la production de l'énergie solaire en provoquant un creux dans sa production ce qui engendre un pic de production du générateur diesel.

On remarque une diminution dans la production photovoltaïque à 16 h (Fig.3.18), cela est dû au coucher du soleil. Cette diminution provoque une grande augmentation de la production du générateur diesel.

De 18 h à 19 h, un pic de consommation de la charge surgit provoquant l'augmentation rapide de la production pour satisfaire les besoins des habitations. A partir du pic de 19 h, il y a une diminution remarquable dans la production due à la baisse de la consommation. L'arrêt du parc éolien à 20 h lorsque le vent dépasse la vitesse maximale autorisée, engendrera un pic dans la production des générateurs diesel.

3.5.3. Scénario -3- : fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-fluctuation des EnR (20h pour les éoliennes et 9h pour le PV).
- 4- Variation de la charge pic à 19h.

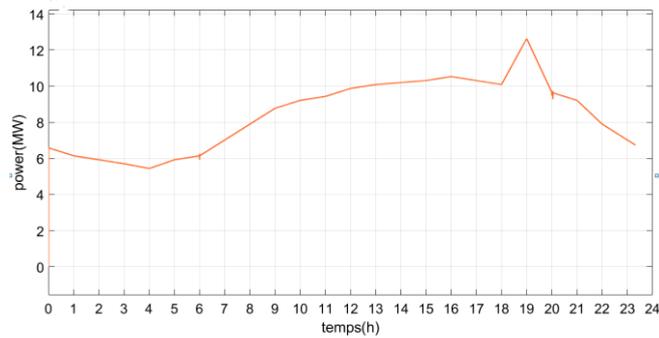


Figure3.19 : Variation de la charge résidentielle durant la journée

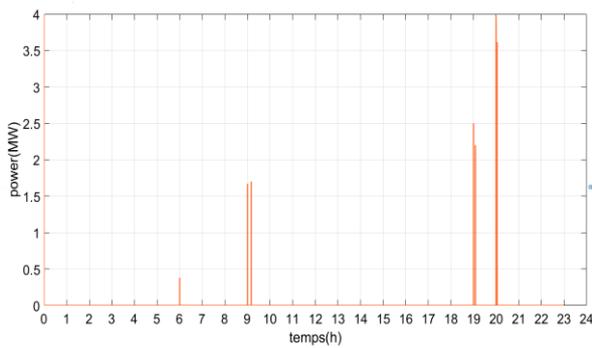


Figure3.20 : L'injection de puissance de VE (V2G)

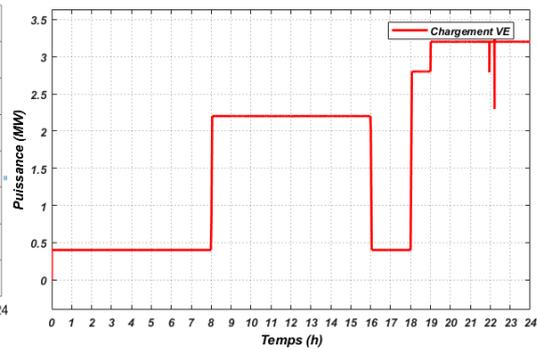


Figure3.21 : Chargement des VE durant la journée

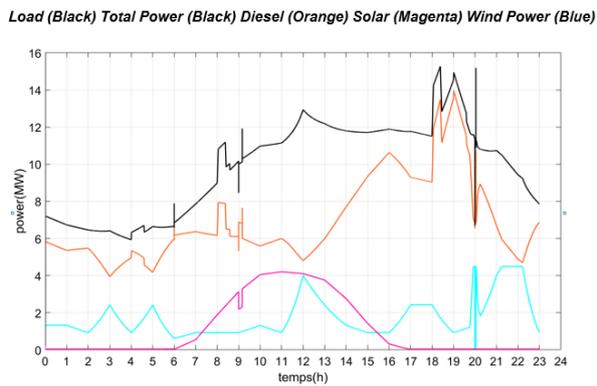


Figure3.22 : Variation de la puissance produite et demandée journée.

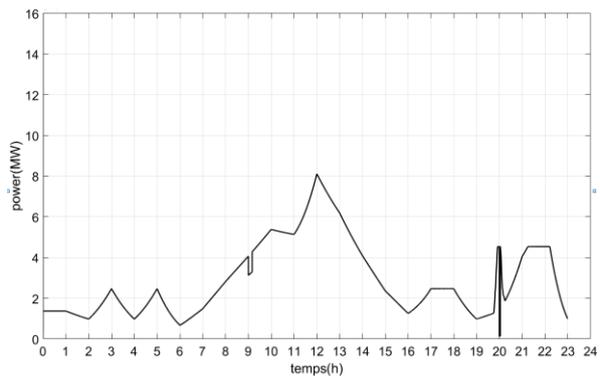


Figure3.23 : Production renouvelable durant la journée

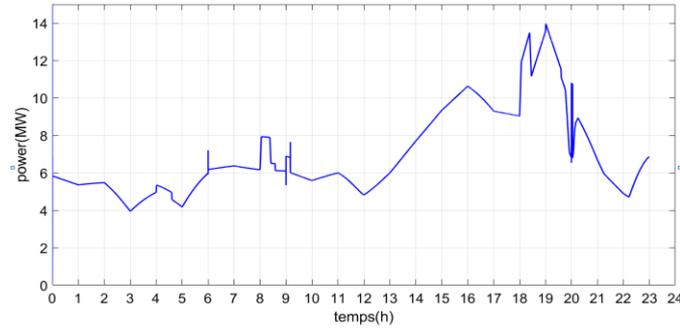


Figure3.24 : Production du générateur diesel durant la journée

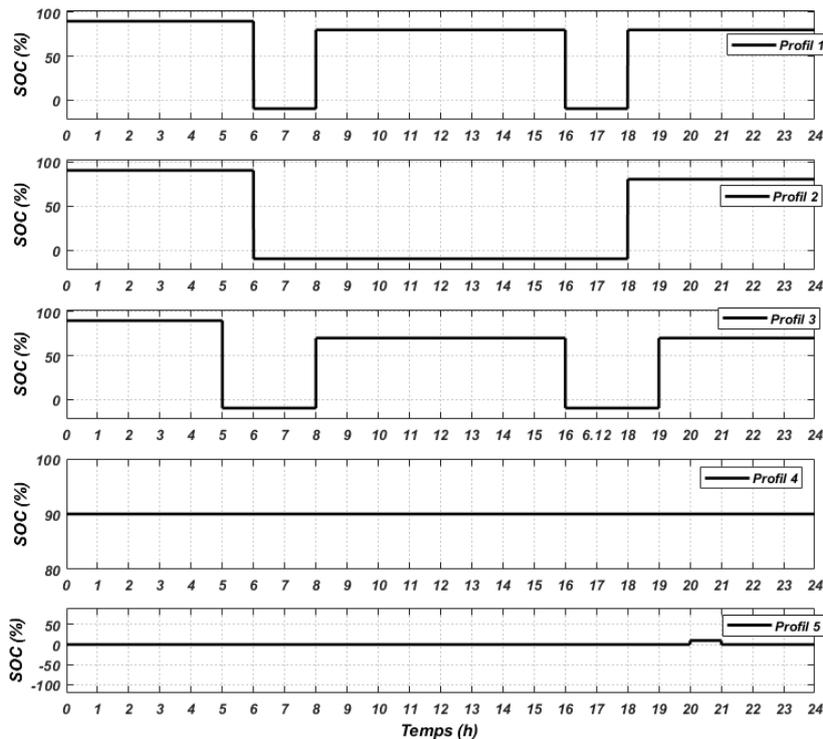


Figure3.25 : Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge SOC durant la journée

Après simulation on obtient les résultats des puissances générées par le générateur diesel, et les deux champs (éolien, photovoltaïque) (Fig.3.22).

De 08 h à 09 h du matin, nous remarquons un pic de production qui est dû à une consommation élevée des habitants. À 09 h un nuage partiel affecte la production de l'énergie solaire en provoquant un creux dans sa production ce qui engendre un pic de production du générateur diesel ainsi qu'une injection de puissance dans le Microgrid de la part des voitures électriques.

A midi une augmentation de la production renouvelable engendre la diminution de l'injection du générateur diesel.

On remarque une diminution dans la production photovoltaïque à 16 h, cela est dû au coucher du soleil. Cette diminution provoque une grande augmentation de la production du générateur diesel.

De 18 h à 19 h, un pic de consommation de la charge surgit provoquant l'augmentation rapide de la production pour satisfaire les besoins des habitations.

A partir du pic de 19 h, il y a une diminution remarquable dans la production due à la baisse de la consommation. L'arrêt du parc éolien à 20 h lorsque le vent dépasse la vitesse maximale autorisée, engendrera un pic dans la production des générateurs diesel plus une autre injection de puissance dans le Microgrid de la part des voitures électriques afin d'assurer la régulation du réseau.

L'opérateur ne participera pas à tous les appels de transfert. Nous avons remarqué que chaque fois où le réseau avait besoin d'une puissance d'énergie électrique dans un moment de surcharge critique il prélevait automatiquement cette puissance des batteries des véhicules électriques. Nous avons défini quatre périodes principales où l'utilisation de la technologie 'V2G', a joué un rôle important (**Fig. 3.20**).

On constate en premier temps le démarrage du moteur asynchrone à 6 h du matin, où les profils (1,3,4) vont injecter de la puissance dans le Microgrid afin d'équilibrer les puissances.

Deuxième moment critique : Le passage des nuages à 9h qui ont perturbé la production d'énergie solaire photovoltaïque, afin de remédier à ce problème les profils (1, ,3,4) entre en jeux, troisième moment critique, un pic de consommation de la charge a 19h (**Fig.3.19**) et finalement le dernier moment de la journée à 20h où le vent a dépassé la vitesse maximale admise, mettant ainsi les éoliennes à l'arrêt, et comme vu précédemment l'injection d'une puissance va stabiliser le réseau.

3.5.4. Scénario -4- : fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

1- Présence du générateur diesel.

2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.

3-Fluctuation des EnR (à 20h pour les éoliennes et de 9h à 14h pour le PV).

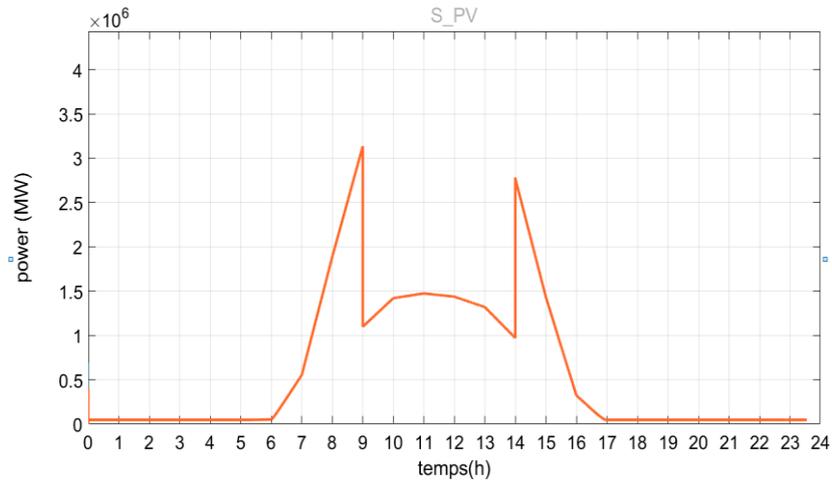


Figure3.26 : Variation de la production PV durant la journée

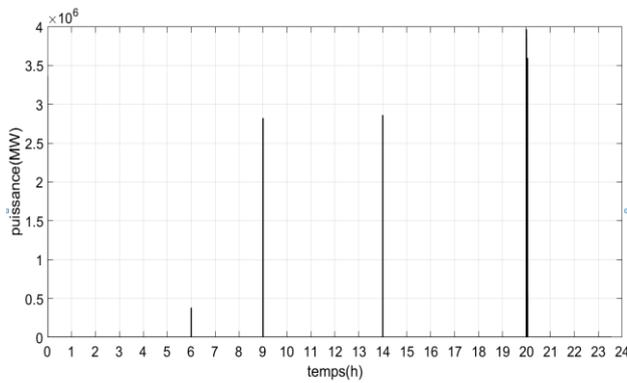


Figure3.27 : L'injection de puissance de VE (V2G)

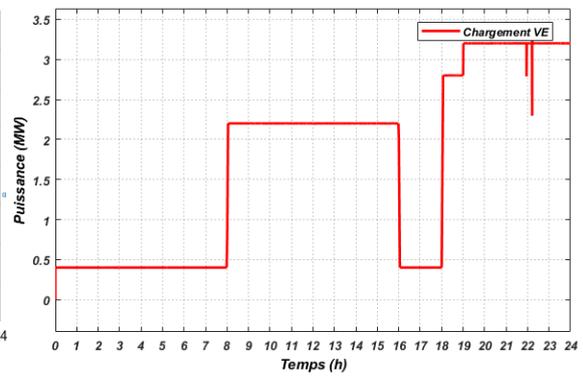


Figure3.28 : Chargement des VE durant la journée

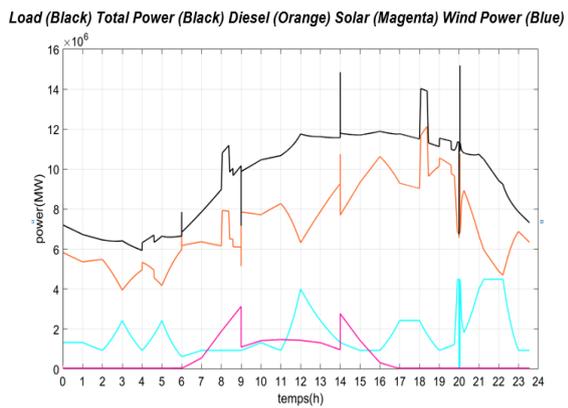


Figure3.29 : Variation de la puissance produite et demandée

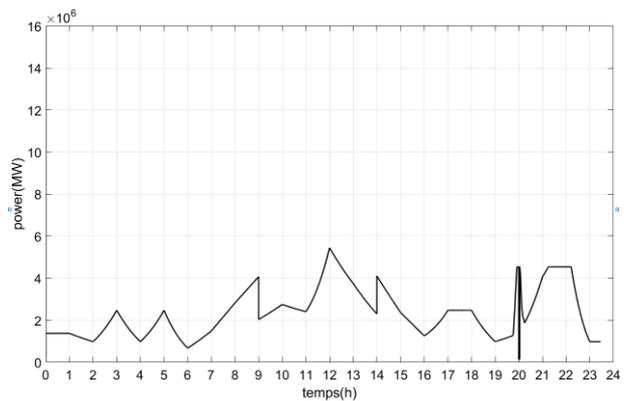


Figure3.30 : Production renouvelable durant la journée

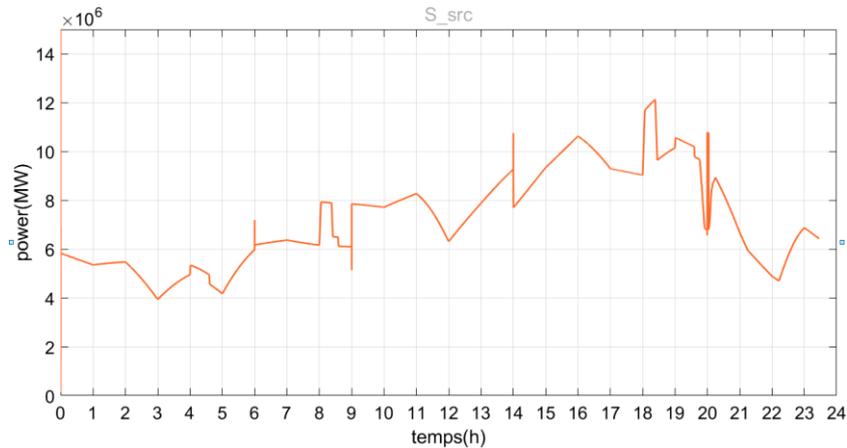


Figure3.31 : Production du générateur diesel durant la journée

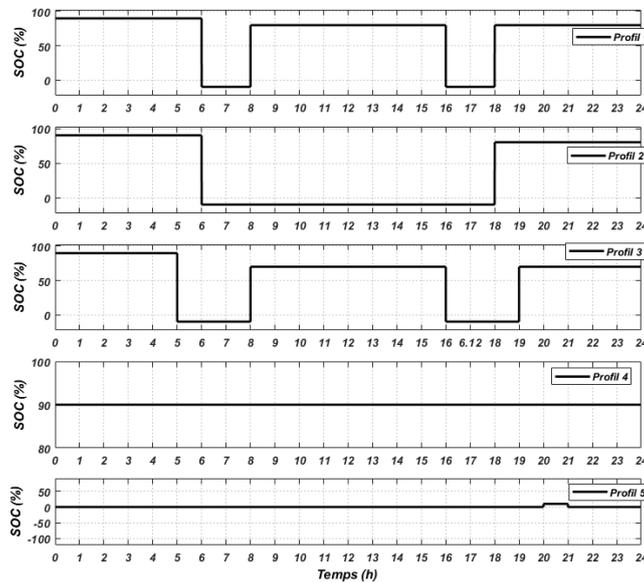


Figure3.32 : Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge SOC durant la journée

Après simulation on obtient les résultats des puissances générées par le générateur diesel, et les deux champs (éolien, photovoltaïque) (Fig. 3.29).

A partir de 6h, le soleil se lève et la production du champ photovoltaïque augmente progressivement ainsi que la consommation des habitations.

De 08 h à 09 h du matin, nous remarquons un pic de production qui est dû à une consommation élevée des habitants. À 9h un nuage partiel affecte la production de l'énergie solaire en provoquant un creux dans sa production pendant 5heures (jusqu'à 14h) (Fig. 3.26) ce qui engendre une augmentation de production du générateur diesel (Fig. 3.31). Ainsi qu'une injection de puissance dans le Microgrid de la part des voitures électriques.

Nous avons défini quatre périodes principales où l'utilisation de la technologie 'V2G' a joué un rôle important (**Fig. 3.27**).

3.5.5. Scénario -5- : fonctionnement du Microgrid en présence du (PV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 6h du matin.
- 3-fluctuation des EnR (9h pour le PV).
- 4- absence des sources EV-WT.

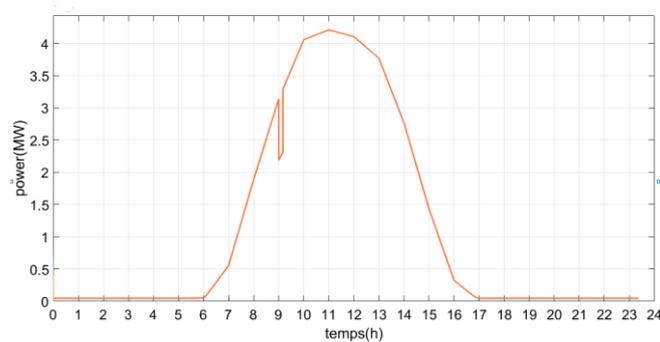


Figure3.33 : Variation de la production PV durant la journée

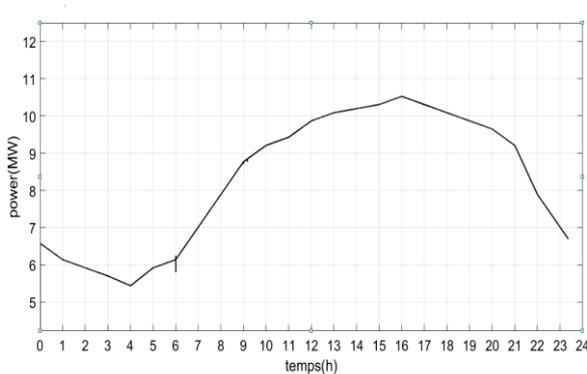


Figure3.34 : Variation de la charge résidentielle durant la journée

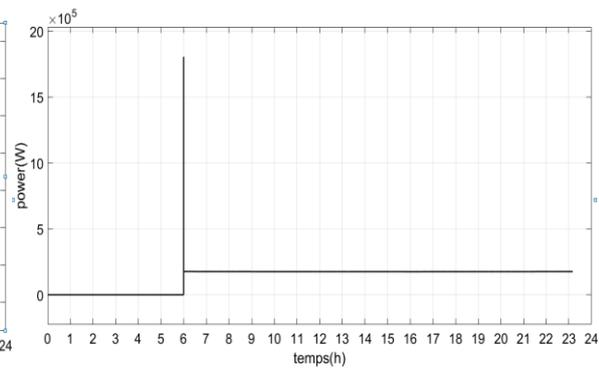


Figure3.35 : Variation de la charge industrielle durant la journée

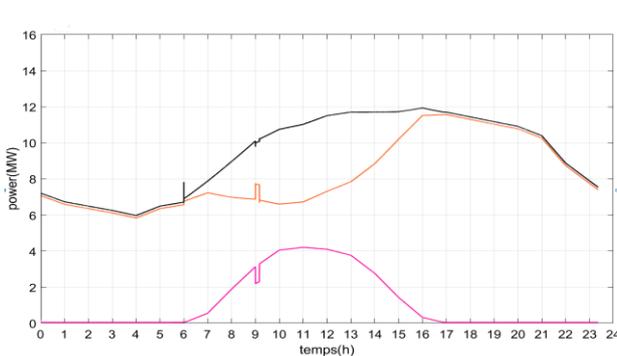


Figure3.36 : Variation de la puissance produite et demandée

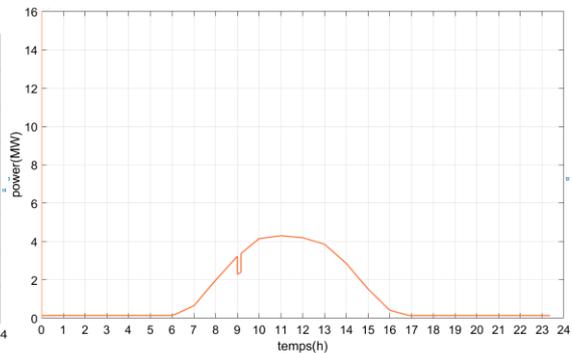


Figure3.37 : Production renouvelable(PV) durant la

journée

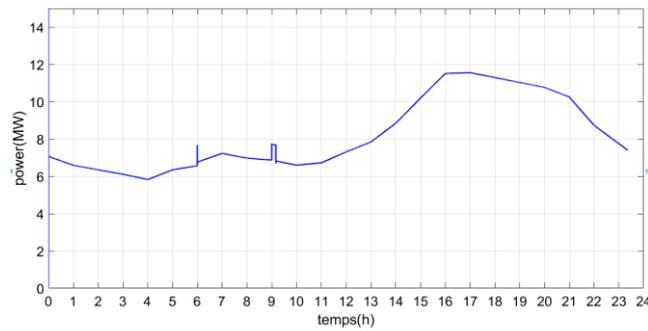


Figure3.38 : Production du générateur diesel durant la journée

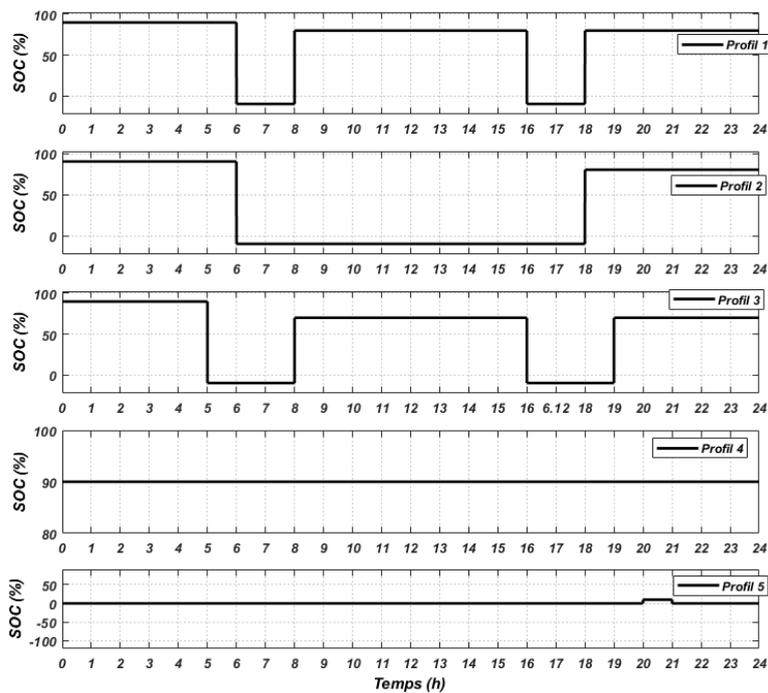


Figure3.39 : Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge SOC durant la journée

Après simulation on obtient les résultats des puissances générées par le générateur diesel, et les deux champs (éolien, photovoltaïque), ainsi que la consommation de la charge, (Fig. 3.36).

À 9h un nuage partiel affecte la production de l'énergie solaire en provoquant un creux dans sa production pendant **10 minutes** (Fig. 3.37).

Nous observons à 16h un pic de production qui est dû à une consommation élevée des habitants.

L'absence des sources renouvelables (éolienne et V2G) engendre des pics ainsi une augmentation de production du générateur diesel (**Fig. 3.38**).

3.5.6. Scénario -6- : fonctionnement du Microgrid en présence du (PV – WT –EV)

- 1- Présence du générateur diesel.
- 2-Démarrage du site industriel à 3h du matin.
- 3-fluctuation des EnR (22h pour les éoliennes et 12h pour le PV).

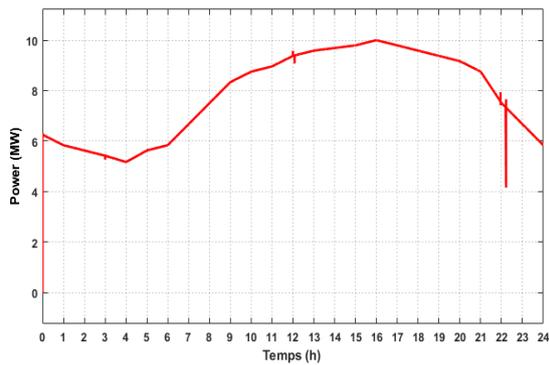


Figure3.40 : Variation de la charge résidentielle durant la journée

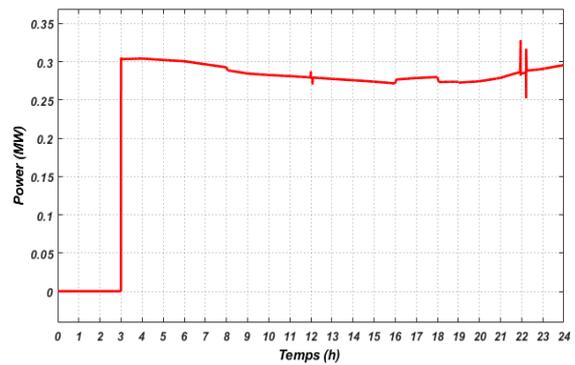


Figure3.41 : Variation de la charge industrielle durant la journée

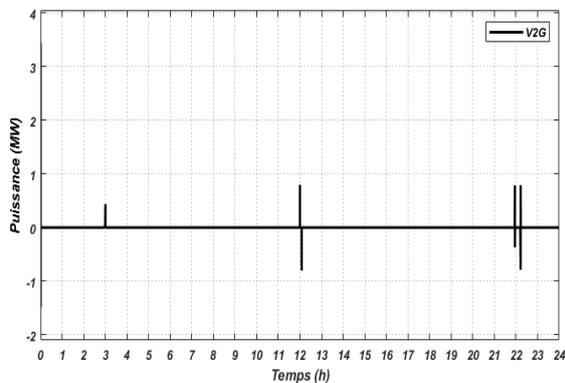


Figure3.42 :L'injection de puissance de VE (V2G)

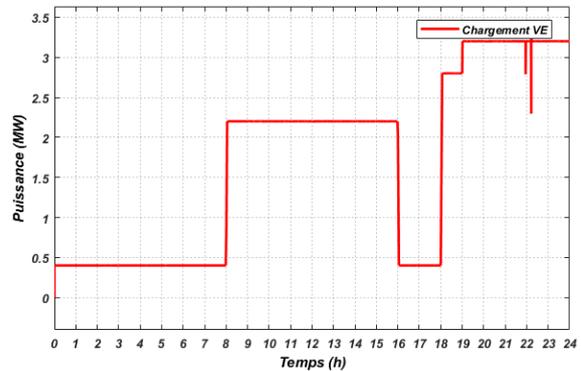


Figure3.43 : Chargement des VE durant la journée

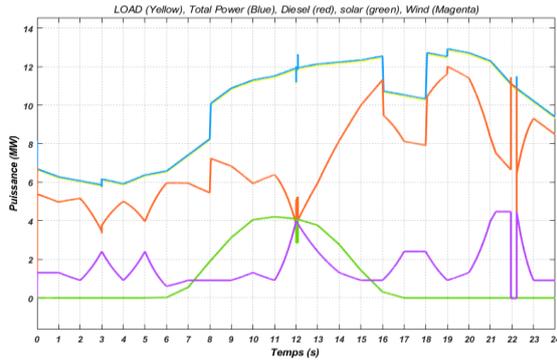


Figure 3.44 : Variation de la puissance produite et demandée

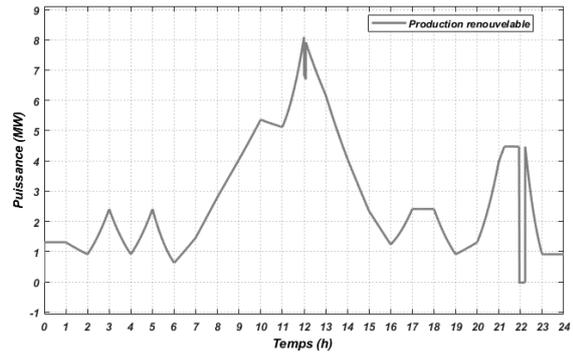


Figure 3.45 : Production renouvelable durant la journée

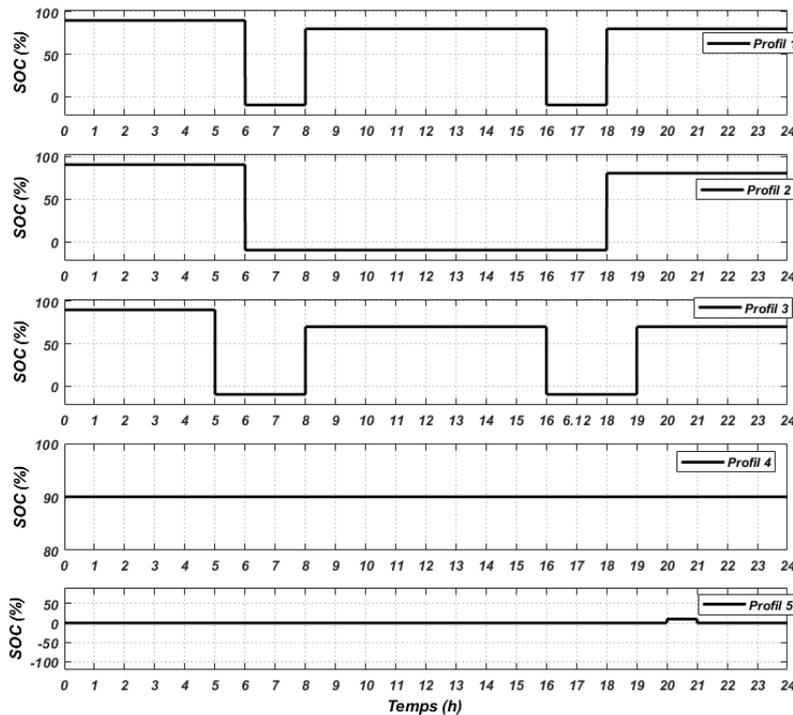


Figure 3.46 : Profils d'utilisateurs des VE et leurs états de charge SOC durant la journée

Après simulation on obtient les résultats des puissances générées par le générateur diesel, et les deux champs (éolien, photovoltaïque), ainsi que la consommation de la charge, (Fig.3.44).

Les résultats montrent les variations faibles des puissances générées par les différentes sources pendant les premières heures de la journée jusqu'à la troisième heure, ou on remarque un pic de production qui est dû à une consommation liée au démarrage du moteur asynchrone, avec une variation importante dans la production du champ éolien (Fig.3.45).

A partir de la sixième heure, le soleil se lève et la production du champ photovoltaïque augmente progressivement ainsi que la consommation des habitations.

De 08 h à 09 h du matin, nous remarquons un pic de production qui est dû à une consommation élevée des habitants. À midi un nuage partiel affecte la production de l'énergie

solaire en provoquant un creux dans sa production ce qui engendre un pic de production du générateur diesel ainsi qu'une injection de puissance dans le Microgrid de la part des voitures électriques (**Fig.3.42**).

On remarque une diminution dans la production photovoltaïque à 17 h, cela est dû au coucher du soleil (**Fig.3.45**). Cette diminution provoque une grande augmentation de la production du générateur diesel.

De 18 h à 19 h, un pic de consommation de la charge surgit provoquant l'augmentation rapide de la production pour satisfaire les besoins des habitations. A partir du pic de 19 h, il y a une diminution remarquable dans la production due à la baisse de la consommation. L'arrêt du parc éolien à 22 h lorsque le vent dépasse la vitesse maximale autorisée, engendrera un pic dans la production des générateurs diesel plus une autre injection de puissance dans le Microgrid de la part des voitures électriques afin d'assurer la régulation du réseau.

L'opérateur ne participera pas à tous les appels de transfert. Nous avons remarqué que chaque fois où le réseau avait besoin d'une puissance d'énergie électrique dans un moment de surcharge critique il prélevait automatiquement cette puissance des batteries des véhicules électriques. Nous avons défini trois périodes principales où l'utilisation de la technologie 'V2G', a joué un rôle important (**Fig.3.42**).

On constate en premier temps le démarrage du moteur asynchrone à 3 h du matin, où les profils (1,2,3,4) vont injecter de la puissance dans le Microgrid afin d'équilibrer les puissances, Deuxième moment critique : Le passage des nuages à 12h qui ont perturbé la production d'énergie solaire photovoltaïque, afin de remédier à ce problème les profils (1,3,4) entre en jeu, et finalement le dernier moment de la journée où le vent a dépassé la vitesse maximale admise à 22h, mettant ainsi les éoliennes à l'arrêt, et comme vu précédemment l'injection d'une puissance va stabiliser le réseau (**Fig.3.46**).

A l'aide de logiciel Matlab Simulink on a simulé plusieurs scénarios de déploiement de la technologie 'V2G' dans le cadre d'un programme journalier de répartition de puissance.

Différentes caractéristiques du système de stockage d'énergie des batteries des VE et des scénarios de test peuvent être définies par l'utilisateur.

On peut voir que le système de gestion d'énergie implémenté dans ce Microgrid réalise un partage de puissance optimal entre les sources d'énergies distribuées, la charge et les véhicules électriques dans les différents événements survenus de fluctuations imprévues.

Les résultats des simulations montrent le rôle de la technologie 'V2G', dans la régulation du Microgrid ainsi que dans la variation de puissance produite et consommée.

3.6. Conclusion

Dans les simulations réalisées, nous avons fait une analyse sur le mécanisme d'échange d'énergie entre la charge et les différentes sources et démontrer les performances fournies par les réseaux intelligents dans la gestion optimale des micro-réseaux.

Nous avons également analysé plusieurs points et aspects liés aux réseaux intelligents. Nous avons traité le problème de l'efficacité énergétique dans un contexte "Vehicle-to-grid" (V2G). L'idée était d'utiliser les batteries présentes dans les véhicules électriques pour stocker l'énergie. L'objectif était de décider si, lorsqu'un véhicule est connecté au réseau intelligent, sa batterie sera chargée ou déchargée pour contribuer à la production d'électricité. Ainsi, un lissage de la courbe de production d'énergie est possible et permet de limiter l'utilisation de centrales thermiques très polluantes en CO₂. De plus, cette approche est consolidée par le fait qu'un véhicule est au ralenti 96% du temps en moyenne.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cœur des enjeux de transition énergétique, les micro-Grids jouent le rôle pivot dans l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique.

Ces réseaux électriques intelligents assureront la sécurité de l'approvisionnement en énergie via un pilotage optimisé de la production et de la consommation rendu possible par de nouvelles formes de communication. Cela suppose de passer d'un modèle de distribution d'énergie centralisé, donc unidirectionnel, à un modèle multidirectionnel.

La production d'énergie renouvelable n'étant plus centralisée, elle peut être réinjectée et redistribuée à tout endroit du réseau, même depuis la batterie d'une voiture électrique branchée sur sa borne de recharge (Véhicule to Grid ou V2G).

Le travail effectué dans ce mémoire a permis d'analyser plusieurs aspects liés aux réseaux électriques intelligents.

L'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans les réseaux électriques, peut y contribuer en créant des réseaux encore plus intelligents. Cette innovation permet notamment une meilleure mesure de la consommation et rend les réseaux davantage adaptables. Les réseaux intelligents contribuent à maintenir l'électricité à un prix bas en permettant aux producteurs d'électricité d'adapter au plus juste les besoins d'investissement aux nouveaux usages d'une part, et aux consommateurs d'autre part, particuliers comme entreprises, en leur permettant de suivre en temps réel leur consommation et de l'anticiper pour mieux la contrôler. Les réseaux électriques intelligents permettent aux consommateurs de devenir acteurs de leurs usages et de leur consommation d'électricité.

A titre de perspective nous pouvons proposer la continuité des études suivantes :

- ❖ **Améliorer les réseaux intelligents en vue de la cybersécurité.**
- ❖ **Etudes des systèmes de supervision (WAMS) Wide Area Monitoring system.**
- ❖ **Etude et simulation d'un Microgrid en utilisant d'autres systèmes de stockage**
- ❖ **Introduire le prix d'électricité dans la gestion d'énergie électrique pour apporter un aspect économique au système.**
- ❖ **Introduire les algorithmes d'intelligence artificielle dans le partage de puissance**

Références Bibliographiques

- [1] R. RIGO-MARIANI, «Méthodes de conception intégrée" dimensionnement-gestion" par optimisation d'un micro-réseau avec stockage,» Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2014.
- [2] A. e. H. C. GHOUARI, «Étude théorique et expérimentale des réseaux intelligents appliqués dans la gestion d'énergie des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique,» Thèse de doctorat, Université de Batna (05/2017), 2017.
- [3] M. R. S. R. A. e. a. MOURSHED, «Smart grid futures: Perspectives on the integration of energy and ICT services,» *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1132-1137, 2015.
- [4] G. BASSO, «Approche à base d'agents pour l'ingénierie et le contrôle de micro-réseaux,» Thèse de doctorat, 2013.
- [5] I. statistics, «Data and statistics,» 2018. [En ligne]. Available: <https://www.iea.org/topics/system-integration-of-renewables>. [Accès le 13 09 2020].
- [6] P. F. e. a. :. G. C. B. 2019, « Global Carbon Budget,» 2019.
- [7] encyclopedie-energie., «Des réseaux électriques aux smart grids,» janvier 2010. [En ligne]. Available: <https://www.encyclopedie-energie.org/des-reseaux-electriques-aux-smartgrids/>.
- [8] BP statistical of world energy, «connaissance des energies,» [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/la-transition-bas-carbone-dans-le-monde-une-destination-tres-lointaine-190612>.
- [9] «Memento de la sureté électrique,» chez *Réseau de transport électrique*, 2004.
- [10] E. e. A. F. NIESTEN, «How is value created and captured in smart grids? A review of the literature and an analysis of pilot projects,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 629-638, 2016.
- [11] E. R. M. F. A. e. a. CRISOSTOMI, «The smart gas grid: State of the art and perspectives,» *IEEE PES ISGT Europe 2013*, pp. 1-5.
- [12] J. d. Rosnay, «agoravox,» 04 29 2011. [En ligne]. Available: <https://www.agoravox.fr/actualites/technologies/article/la-smart-grid-reseau-intelligent-92990>.
- [13] «microgrids,» [En ligne]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=microgrids>. [Accès le 02 09 2020].
- [14] «consumer energy report,» [En ligne]. Available: <http://www.consumerenergyreport.com/smart-grid/>. [Accès le 2020 09 02].

- [15] FRAMEWORK, N. I. S. T, «Roadmap for smart grid interoperability standards,» National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [16] M. L. e. A. M. L. TUBALLA, «A review of the development of Smart Grid technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 710-725, 2016.
- [17] SCE-Cisco-IBM-SGRA Team, «Smart Grid Reference Architecture volume 1:Using information and communication services to suport a Smarter Grid”, Cisco System, International Business Machines,» Southern California Edison Company, 2011.
- [18] R. CAIRE, «Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution,» Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004.
- [19] S. FERAHTIA, Contrôle de la mise en parallèle des batteries dans un micro réseau, Msila: Thèse de doctorat., 2018.
- [20] J. DESMET, «Status and insights on microgrids: from pilot to commercial deployment-GSGF report-,» GSGF report, 2017.
- [21] A. D. H. B. S. K. C. S. D. A. B. F. Benoît Robyns, Stockage d'énergie électrique pour les bâtiments au sein de réseaux intelligents, LONDON: ISTE Edition, 2019.
- [22] A. e. J. H. BORDE, «Le recours au marché dans les politiques de lutte contre le changement climatique,» *Revue internationale et stratégique*, n° %103, pp. 53-66, 2007.
- [23] H. BAYEM, «apport des méthodes probabilistes aux études d'insertion des énergies renouvelables dans les systèmes électriques,» Thèse de doctorat, Paris, 2009.
- [24] M. T. e. G. BELHADJ KACEM, « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne,» Thèse de doctorat..
- [25] A. M, « Conversion de l'Énergie et ses Répercussions sur l'Environnement,» vol. 180, n° %1839, pp. 1-21, 22 11 2018.
- [26] G. CLAUDET, «biomasse,» L'ÉNERGIE DE DEMAIN, 13-LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE.
- [27] L. Bridier, «Modélisation et optimisation d'un système de stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente,» thèse doctorat, 2017.
- [28] T. BASBOUS, «système hybride éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé,» Université du Québec à Chicoutimi, 2013.
- [29] «Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité,» [En ligne]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-technologies>. [Accès le 26 08 2020].
- [30] L. KAMEL, «Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable,» UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE., 2016.
- [31] S. S. e. A. Y. HOUTI, «Réseau intelligent de distribution d'électricité,» Thèse de doctorat.

- [32] F. e. W. KLOPFERT, «Les «compteurs intelligents» sont-ils conçus pour économiser de l'énergie?,» Terminal. Technologie de l'information, culture & société, 2010.
- [33] A. D. K. e. B. S. E. MEGHEHOUT, « Apport du bâtiment intelligent dans la gestion de l'énergie,» Thèse de doctorat, 2019.
- [34] B. Abderrahmane, «ETUDE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE D'UN BATIMENT D'HABITATION,» mémoire master, 2013.
- [35] J. G. DUQUETTE, «CE QUE DIT LA «VILLE INTELLIGENTE» SUR LA DÉMOCRATIE: ANALYSE DISCURSIVE DE LA «VILLE INTELLIGENTE ET NUMÉRIQUE»,» MONTREAL, 2017.
- [36] H. TURKER, «Véhicules électriques Hybrides Rechargeables: évaluation des Impacts sur le Réseau électrique et Stratégies Optimales de recharge,» Thèse de doctorat, 2012.
- [37] T. GASPOZ, «Influence de la mobilité électrique sur les réseaux.,» Thèse de doctorat. Haute Ecole d'Ingénierie., 2018.
- [38] S. LACROIX, «Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries,» Thèse de doctorat, PARIS, 2013.
- [39] Y. ., C. B. e. B. A. HERMANS, «Modèle d'optimisation basé sur le Vehicle-to-grid pour limiter l'impact des pics de consommation électrique sur la production,» 2018.