

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpublique ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الدكتور الطاهر مولاي
سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de Sciences et Technologie



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Par : ZOUAIA Abyr et AGAG Khadidja

Sujet

Approche par optimisation pour la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux

Soutenue publiquement en 14/06/2026 devant le jury composé de :

MCA	AMARA Mohamed	Président
Professeur	LAKDJA Fatiha	Rapporteur
MCA	HAFFAF Aziz	Examineur

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Pr. LAKDJA Fatima, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce projet. Son encadrement a été déterminant dans l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail en acceptant de l'évaluer.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation, pour la qualité de leur enseignement et leur dévouement.

Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements et leurs sacrifices, ainsi qu'à nos frères et sœurs pour leur appui moral.

Dédicace

Je dédie ce travail, aboutissement de plusieurs années d'efforts et de persévérance :

*À mes très chers parents,
qui ont toujours été mon soutien le plus précieux et ma source de force.
Merci pour votre amour infini, votre patience et tous les sacrifices que vous
avez consentis pour mon éducation et ma réussite.
Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie pleine de santé et de
bonheur.*

*À ma sœur et à mes deux frères,
pour leur affection, leur soutien moral et leurs encouragements constants.
Votre présence à mes côtés m'a donné la motivation nécessaire pour
avancer et ne jamais abandonner.*

*À ma famille,
pour leur confiance et leur soutien tout au long de mon parcours.*

*À mon amie Amina,
pour sa présence, son soutien précieux dans les moments difficiles, et pour
tous les instants de joie que nous avons partagés.*

*À tous mes enseignants,
pour leur savoir, leur encadrement et leurs précieux conseils.*

*Enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce travail,
je vous adresse mes sincères remerciements.*

ZOUAIA Ahyr.



Dédicace

C'est avec une profonde gratitude et une grande fierté que je présente ce mémoire,

*À mes très chers parents,
en témoignage de ma profonde gratitude pour leur amour inconditionnel,
leurs sacrifices, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de
mon parcours académique.*

*À ma famille,
pour leur confiance, leurs encouragements permanents et leur présence
précieuse dans chaque étape de ma vie.*

*À mes enseignants et encadreur,
dont le savoir, les conseils avisés et le dévouement ont enrichi ma formation
et contribué à l'aboutissement de ce mémoire.*

*À toutes les personnes
qui m'ont soutenue de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

*Et à moi-même,
pour ma persévérance, ma patience et ma détermination face aux
difficultés, ainsi que pour tous les efforts accomplis afin d'atteindre cet
objectif.*

*Enfin,
je dédie ce mémoire à tous ceux qui considèrent la connaissance comme une
lumière guidant vers un avenir meilleur*



AGAG Khadidja.

TABLE DES MATIERES

Table des matieres	I
Liste des Figure	X
Liste des tableau	XIII
Acronymes	XIV
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Définir les micro-réseaux

1.1. Introduction.	3
1.2. Réseaux électriques traditionnels.	4
1.3. Problèmes liés aux réseaux actuels.	4
1.3.1. L'augmentation de la demande en énergie.	5
1.3.2. La préoccupation environnementale.	5
1.3.3. L'intégration des nouvelles sources décentralisées.	5
1.3.4. Le coût de l'énergie.	6
1.4. Structure d'un réseau électrique.	6
1.5. Réseau intelligent.	7
1.6. Vers un réseau électrique plus intelligent.	7
1.7. Définition du micro-réseau.	7
1.8. Historique.	8
1.9. Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents.	9
1.10. Avantages et les inconvénients de micro-réseau.	9
1.10.1. Avantages.	9
1.10.2. Inconvénients.	10
1.11. La différence entre le micro-réseau et le réseau intelligent.	10
1.12. Structure et composants d'un micro-réseau.	10
1.12.1. Sources de Production d'énergie.	11

TABLE DES MATIERES

1.12.1.1. Energie solaire.	11
1.12.1.2. Energie éolienne.	11
1.12.1.3. Générateurs Conventionnels.	12
1.12.2. Dispositifs de Stockage d'Énergie.	12
1.12.2.1. Batteries.	12
1.12.2.2. Supracondensateurs.	13
1.12.2.3. Pile à combustible.	13
1.12.3. Chargeurs et onduleurs.	13
1.12.3.1. Contrôle d'Énergie.	13
A. Le contrôle du micro-réseau comprend.	13
B. Contrôle hiérarchique du Micro-réseau.	14
1.12.4. Réseau de distribution.	14
1.12.5. Composants de communication.	14
1.12.6. Équipements de mesure.	15
1.12.7. Connexion au réseau principal.	15
1.13. Pourquoi les micro-réseaux ? .	15
1.14. Topologies de micro-réseau.	15
1.14.1. Architecture série.	15
1.14.1.1. Configuration du bus à courant continu (DC).	15
1.14.1.2. Configuration du bus à courant alternatif (AC).	16
1.14.2. Architecture parallèle.	16
1.15. Type des micro-réseaux.	16
1.15.1. Micro-réseaux Connectés au réseau (Grid-Tied).	16
1.15.2. Micro-réseaux îlotés.	17
1.16. Fonctionnement d'un micro-réseau.	17
1.16.1. Production d'énergie.	17
1.16.2. Gestion intelligente.	17

TABLE DES MATIERES

1.16.3. Distribution de l'énergie.	17
1.16.4. Stockage d'énergie.	17
1.16.5. Connectivité au réseau principal.	17
1.16.6. Redondance et résilience.	17
1.17. Protection du micro-réseau.	17
1.18. Problème dans un micro-réseau.	18
1.18.1. Complexité de la faille Chemin actuel.	18
1.18.2. Courant de défaut insuffisant avec les sources actuelles limitées.	18
1.18.3. Comportement de la tension et de la fréquence lors des défauts dans un micro-réseau insulaire.	19
1.19. Les projets des micro-réseaux.	19
1.19.1. En Etats-Unis.	19
1.19.1.1. Le projet RESCO (Renouvelable Energie Secure Communiâtes) États-Unis (Californie).	19
1.19.2. En Europe.	21
1.19.2.1. Analyse du marché des micro-réseaux connectes Europe Grid.	21
1.19.3. En Algérie.	22
1.19.3.1. Capacité dédiée aux Réseaux Isolés du Sud (RIS).	22
1.19.3.2. Énergies renouvelables au niveau national (incluant zones isolées).	23
1.19.3.3. Études des micro-réseaux.	23
1.20. Étude de cas : Application du contrôle hiérarchique pour la stabilité d'un micro-réseau.	23
1.20.1. Description du système étudié.	23
1.20.2. Problématique de stabilité.	24
1.20.3. Structure de contrôle hiérarchique proposée.	24
1.20.3.1. Contrôle primaire (Droop Control).	25
1.20.3.2. Contrôle secondaire.	25
1.20.3.3. Contrôle tertiaire.	25

TABLE DES MATIERES

1.20.4. Résultats et analyse.	25
1.20.5. Conclusion de l'étude de cas.	25
1.21. Conclusion.	25

Chapitre 2 : Gestion de l'énergie électrique

2.1. Introduction.	27
2.2. Historique.	27
2.3. Définition de la gestion de l'énergie électrique.	28
2.4. Définition de la gestion d'énergie dans les micro-réseaux.	29
2.5. Les avantages de la gestion de l'énergie.	29
2.5.1. Avantage économique.	29
2.5.2. Les avantages opérationnels.	29
2.5.2.1. Réduction des Coûts Opérationnels.	29
2.5.2.2. Amélioration de l'Efficacité.	29
2.5.3. Les avantages réglementaires et RSE.	30
2.6. Le rôle de la gestion d'énergie dans un micro-grid.	30
2.7. Système de gestion de l'énergie (EMS).	30
2.8. Architecture d'un SGE.	31
2.8.1. Unité de contrôle/supervision.	31
2.8.1.1. Automate programmable industriel.	31
2.8.1.2. Systèmes embarqués, tels que le Raspberry Pi ou l'Arduino.	32
2.8.1.3. Serveurs informatiques.	32
2.8.2. Capteurs et systèmes de mesure.	32
2.8.3. Algorithmes de gestion et de prise de décision.	32
2.8.3.1. Approche basée sur les techniques d'optimisation mathématique.	32
2.8.3.2. Approche basée sur des règles heuristiques.	33
2.8.3.3. Algorithmes d'apprentissage automatique.	33

TABLE DES MATIERES

2.9.	Structures de gestion d'énergie dans les micro-réseaux.	33
2.9.1.	Structure de contrôle centralisée.	33
2.9.2.	Structure de contrôle décentralisé.	34
2.9.3.	Structure de contrôle distribué.	35
2.10.	Concepts généraux de la gestion de l'énergie.	36
2.11.	La différence entre un contrôle centralisé, décentralisé et distribué.	36
2.12.	Stratégies de gestion d'énergie dans les micro-réseaux.	36
2.12.1.	Gestion de la demande d'énergie.	37
2.12.2.	Gestion Stockage d'énergie.	37
2.12.3.	Intégration des énergies renouvelables.	37
2.12.4.	Contrôle et automatisation.	37
2.12.5.	Gestion des charges.	38
2.12.6.	Intégration avec le réseau principal.	38
2.13.	Les systèmes de protection de la gestion d'énergie dans les micro-réseaux.	38
2.14.	Les étapes de gestion de l'énergie et des stratégies de contrôle.	39
2.14.1.	La prévision dans les micro-réseaux (Forecasting).	39
2.14.1.1.	Temps potentiel (Time horizon).	40
2.14.1.2.	Méthodes de la prévision dans les micro-réseaux.	40
2.14.1.3.	Indicateurs de précision.	42
2.14.2.	Optimisation de la gestion d'énergie (EM Optimisation).	44
2.14.2.1.	Objectifs de l'optimisation de gestion d'énergie.	44
2.14.2.2.	Méthodes de l'optimisation de gestion d'énergie.	45
2.14.2.3.	Contraintes.	45
2.14.3.	Contrôle à temps réel.	45
2.15.	Intelligence artificielle pour la gestion d'énergie dans les micro-réseaux.	46
2.15.1.	Prédiction de la demande énergétique.	46
2.15.2.	Optimisation de la production d'énergie.	46

TABLE DES MATIERES

2.15.3. Gestion du stockage d'énergie.	46
2.15.4. Planification de la maintenance.	47
2.15.5. Optimisation de la distribution d'énergie.	47
2.15.5.1. Optimisation de la consommation d'énergie.	47
2.15.5.2. Réduction des coûts.	47
2.15.5.3. Fiabilité du réseau.	47
2.15.5.4. Intégration des énergies renouvelables.	47
2.15.5.5. Durabilité environnementale.	47
2.16. Conclusion.	48

Chapitre 3 : Optimisation

3.1. Introduction.	49
3.2. Définition de l'optimisation.	50
3.3. Historiques.	51
3.4. L'optimisation de la gestion d'un réseau électrique.	51
3.5. La classification des problèmes d'optimisation.	51
3.5.1. La forme de la fonction objective.	51
3.5.1.1. Optimisation linéaire.	51
3.5.1.2. Optimisation non linéaire.	51
3.5.1.3. Optimisation quadratique.	52
3.5.2. Les contraintes.	52
3.5.2.1. Problèmes sans contraintes.	52
3.5.2.2. Problèmes avec contraintes.	52
3.5.3. L'objectif.	52
3.5.3.1. Problème mono-objectif.	52
3.5.3.2. Problème multi-objectif.	52
3.5.4. La nature des variables.	52

TABLE DES MATIERES

3.5.4.1. Variables continues.	52
3.5.4.2. Variables discrètes/binaires.	52
3.5.4.3. Optimisation mixte (PLM).	52
3.5.5. Le temps (dynamique / statique).	52
3.5.5.1. Optimisation statique.	52
3.5.5.2. Optimisation dynamique.	53
3.6. Problématique de l'optimisation énergétique dans les micro-réseaux.	53
3.7. Objectifs de l'optimisation de la gestion de l'énergie dans un micro-réseau.	53
3.8. Optimisation de l'efficacité énergétique via les micro-réseaux.	54
3.9. Pourquoi optimiser la gestion dans les micro-réseaux ?.	54
3.9.1. Intégrer efficacement les énergies renouvelables.	54
3.9.2. Réduire le coût de l'énergie.	55
3.9.3. Améliorer la fiabilité et la stabilité.	55
3.9.4. Réduire les pertes énergétiques.	55
3.9.5. Réduire les émissions de CO ₂ .	55
3.9.6. Gérer la demande intelligemment (demand-response).	55
3.9.7. Prolonger la durée de vie des équipements.	55
3.10. Méthodes d'optimisation appliquées à la gestion énergétique.	55
3.10.1. Méthodes déterministes.	56
3.10.1.1. Programmation Linéaire (LP).	56
3.10.1.2. Programmation linéaire en nombres entiers (PLNE).	56
3.10.1.3. Programmation non-linéaire.	57
3.10.2. Les méthodes heuristiques.	57
3.10.3. Approches métaheuristiques.	57
3.11. Modélisation du micro-réseau pour l'optimisation.	58
3.11.1. Modèle des sources de production.	58

TABLE DES MATIERES

3.11.1.1. Model du générateur solaire photovoltaïque.	58
3.11.1.2. Modélisation éolienne.	59
3.11.1.3. Modélisation des générateurs.	60
3.11.2. Modèle du système de stockage d'énergie (ESS).	61
3.11.3. Modèle de la charge.	61
3.11.3.1. Profils de Charge, Charges Critiques/Non-Critiques et Gestion de la Demande (Demand Réponse).	61
3.11.3.2. Modélisation d'une charge.	62
3.11.4. Échanges avec le réseau principal.	63
3.12. Optimisation de la gestion en mode connecté et en mode îloté.	63
3.12.1. Spécificités du mode connecté.	63
3.12.1.1. Échange bidirectionnel.	63
3.12.1.2. Objectif principal.	63
3.12.1.3. Flexibilité accrue.	63
3.12.2. Contraintes renforcées en mode îloté.	63
3.12.2.1. Aucune importation possible.	63
3.12.2.2. Contraintes plus strictes.	64
3.12.2.3. Objectif prioritaire.	64
3.12.3. Rôle du stockage et des générateurs pilotables.	64
3.12.3.1. Système de stockage (ESS).	64
3.12.3.2. Générateurs pilotables (Diesel, Micro-turbine).	64
3.13. Indicateurs de performance de la gestion optimisée.	64
3.13.1. Coût énergétique.	64
3.13.2. Taux de pénétration des énergies renouvelables.	65
3.13.3. Fiabilité et continuité de service.	65
3.13.4. Impact environnemental.	65
3.13.5. Performance globale du micro-réseau.	65

TABLE DES MATIERES

3.14. Conclusion.	65
-------------------	----

Chapitre 4 : Simulations

4.1. Introduction.	66
4.2. Description.	66
4.3. Description de l’affichage temporel dans Simulink.	67
4.4. Déplacement de la demande de pointe à l’aide du stockage d’énergie.	67
4.5. Prise en compte du coût variable de l’électricité.	68
4.6. Application du réseau test étudié.	69
4.6.1. Modes Opérationnels.	69
4.6.2. Mesures et Contrôles.	69
4.7. Application des scenarios étudiés.	70
4.7.1. Scenario 1 : Fonctionnement sans optimisation (heuristique).	70
4.7.1.1. Principe de fonctionnement.	70
4.7.1.2. Résultats et analyse.	71
A. Analyse technique.	71
B. Analyse économique.	75
4.7.2. Scenarios 2 : Fonctionnement avec optimisation (méthode LP).	77
4.7.2.1. Principe de fonctionnement.	77
4.7.2.2. Résultats et analyse.	78
A. Analyse technique.	78
B. Analyse économique.	81
4.8. Approches optimisée et heuristique dans un micro-réseau.	83
4.9. Conclusion.	84
Conclusion générale	86
Référence	88

Liste des Figures

Chapitre 1 : Définir les micro-réseaux

Figure (1.1) : Schéma du parcours de l'énergie.	4
Figure (1.2) : Emission mondiale du CO2 Année (2020).	5
Figure (1.3) : Transit de puissance sur le réseau avec et sans EnR.	6
Figure (1.4) : La structure générale du réseau électrique.	6
Figure (1.5) : Schéma d'un micro-réseau.	8
Figure (1.6) : Structure d'un micro-réseau.	10
Figure (1.7) : Energie solaire photovoltaïque.	11
Figure (1.8) : Un champ éolien.	11
Figure (1.9) : Générateur diesel.	12
Figure (1.10) : Une batterie plomb ouverte.	12
Figure (1.11) : Architecture système du stockage d'énergie magnétique supraconducteur.	13
Figure (1.12) : Pile à combustible.	13
Figure (1.13) : Structure de contrôle hiérarchique dans un micro-réseau.	14
Figure (1.14) : Micro-réseau avec bus DC.	15
Figure (1.15) : Micro-réseau avec bus AC.	16
Figure (1.16) : Micro-réseau avec bus (AC et DC).	16
Figure (1.17) : Branches à basse tension typiques (LV) dans un micro-réseau composé de DG et de charges.	19
Figure (1.18) : E.U. marche des micro-réseaux (taille par source d'énergie, 2020-2030(milliards de dollars américains)).	20
Figure (1.19) : E.U. marche des micro-réseaux (part de marche par utilisation finale, 2024(%)).	21
Figure (1.20) : Taille du marché des petits réseaux électriques européen, par type de réseaux, 2022-2032 (milliards de dollars US).	21
Figure (1.21) : Taille du marché des petits réseaux connectes au réseau électrique européen, par type de part de marche des moicro-reseaux connectes au réseau électrique en Europe, par source d'énergie, 2023 réseau, 2022-2032 (milliards de dollars US).	22

Liste des Figures

Figure (1.22) : Prévisions de développement en énergies renouvelables.	23
Figure (1.23) : Schéma du système global à énergies renouvelables.	24

Chapitre 2 : Gestion de l'énergie électrique

Figure (2.1) : Système de gestion d'énergie dans un micro-réseau.	30
Figure (2.2) : Architecture d'un SGE.	31
Figure (2.3) : Structure de contrôle centralisée.	34
Figure (2.4) : Structure de contrôle décentralisé.	35
Figure (2.5) : Structure de contrôle distribué.	35
Figure (2.6) : Types de problèmes résolus par le système de gestion d'énergie.	39
Figure (2.7): Les étapes de gestion de l'énergie et des stratégies de contrôle.	39

Chapitre 3 : Optimisation

Figure (3.1) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	58
Figure (3.2) : Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne	60
Figure (3.3) : Modélisation d'un générateur	60
Figure (3.4) : Fonctionnement du Système de Stockage d'Énergie (ESS)	61
Figure (3.5) : Modélisation d'une charge	62

Chapitre 4 : Simulations

Figure (4.1) : Gestion de l'énergie solaire photovoltaïque avec stockage et injection réseau.	67
Figure (4.2) : Répartition de la puissance du système de stockage d'énergie (ESS) au sein du micro-réseau selon les conditions de fonctionnement.	68
Figure (4.3) : Le système de test de micro-réseau proposé.	70
Figure (4.4) : La tension du micro-réseau (V_{rms}) en fonction du temps.	71

Liste des Figures

Figure (4.5) : Les puissances (kW) des différents éléments du micro-réseau en fonction du temps.	72
Figure (4.6) : Évolution de l'état de charge (SOC) du système de stockage d'énergie (ESS) en fonction du temps.	74
Figure (4.7) : Évolution du prix de l'électricité en fonction du temps (Centimes/kWh).	75
Figure (4.8) : Évolution du coût cumulé de la vente au détail de l'énergie (\$) en fonction du temps.	76
Figure (4.9) : La tension du micro-réseau (V_{rms}) en fonction du temps.	78
Figure (4.10) : Les puissances (kW) des différents éléments du micro-réseau en fonction du temps.	79
Figure (4.11) : Évolution de l'état de charge (SOC) du système de stockage d'énergie (ESS) en fonction du temps.	80
Figure (4.12) : Évolution du prix de l'électricité en fonction du temps (Centimes/kWh).	81
Figure (4.13) : : Évolution du coût cumulé de la vente au détail de l'énergie (\$) en fonction du temps.	82
Figure (4.14) : Approches optimisée et heuristique dans un micro-réseau.	83

Chapitre 1 : Définir les micro-réseaux

Tableau (1.1) : Comparaison : Réseau intelligent et réseau conventionnel.	9
---	---

Chapitre 2 : Gestion de l'énergie électrique

Tableau (2.1) : Principales caractéristiques, avantages et inconvénients de chaque type de contrôle dans les micro-réseaux.	36
---	----

Chapitre 3 : Optimisation

Tableau (3.1) : Objectifs de l'optimisation de la gestion de l'énergie dans un micro réseau.	53
Tableau (3.2): contribution des micro réseaux à l'optimisation de l'efficacité énergétique.	54
Tableau (3.3) : Modèle Complet Charge Micro-Réseaux.	62

Chapitre 4 : Simulations

Tableau (4.1) : Récapitulatif des mesures et blocs de contrôle du micro-réseau.	69
Tableau (4.2) : Légende des courbes du graphe de puissance.	72
Tableau (4.3) : Légende des courbes du graphe de puissance (kW).	79
Tableau (4.4) : Analyse comparative des approches optimisée et heuristique dans un micro-réseau.	84

Acronymes

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
DOE	U.S. Department of Energy
CRS	Congressional Research Service
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
CC	courant continu
AC	courant alternatif
MC	Micro-source Controllers
LC	Load Controllers
MGCC	MicroGrid Central Controller
WAP	Wide Area Protection (protection à large zone)
PCC	Point of Common Coupling (Point de Couplage Commun)
DG	Distributed Générations
LV	Low Voltage
TTC	Time-Trip Curve (courbe temps—courant ou courbe de déclenchement)
CEC	California Energy Commission
TCAC	Compound Annual Growth Rate
SGE	Système de Gestion de l'Énergie
API	Automate Programmable Industriel
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
EMS	Energy Management System
API	Automate Programmable Industriel
DSM	Demand SIDE Management

Acronymes

DR	Demand Réponse
MAE	Mean Absolut Error
MSE	Mean Squared Error
RMSE	Root Mean Squared Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
EM	Energy Management
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
VE	Véhicule Électrique
LP	Linear Programming
PLNE	Programmation linéaire en nombres entiers
NP	Nondeterministic Polynomial time
NLP	Non linear Programming
TSR	Tip Speed Ratio
HBC	Hysteresis Band Control
ESS	Energy Storage System
SoC	State of Charge
TS	Tabu Search
GA	Genetic Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
ANN	Artificial Neural Networks
PV	Photovoltaic
PN	Positive-Négative Junction

Acronymes

RS	Résistance série
RSH	Shunt résistance
EMS	Energy Management System
DR	Demand Réponse
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
ENS	Energy Not Supplied
ENN	Neural Network
MLP	Multi-Layer Perceptron
HIL	Hardware-In-the-Loop
SGE	Système de Gestion de l'Énergie
MPC	Model Predictive Control

Face aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels, les systèmes électriques connaissent aujourd'hui des évolutions importantes, visant à devenir plus durables et plus respectueux de l'environnement. En effet, la demande mondiale en électricité continue d'augmenter, alors que les ressources fossiles diminuent progressivement. Par ailleurs, les préoccupations liées au changement climatique incitent de plus en plus à repenser les modes de production et de consommation de l'énergie.

Dans ce contexte, le recours aux sources d'énergie renouvelables apparaît comme une solution incontournable. Parmi celles-ci, l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que l'énergie éolienne occupent une place de plus en plus importante dans le mix énergétique mondial. Leur développement permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais également de diversifier les sources d'approvisionnement énergétique [1]. Toutefois, leur caractère intermittent et dépendant des conditions climatiques pose de réels défis pour les réseaux électriques classiques, initialement conçus pour des sources de production centralisées et relativement stables [2].

Afin de répondre à ces contraintes, les micro-réseaux se présentent comme une solution adaptée pour intégrer efficacement les ressources énergétiques distribuées à l'échelle locale. Un micro-réseau regroupe différentes unités de production, notamment les systèmes photovoltaïques, les dispositifs de stockage ainsi que les charges électriques. Grâce à leur structure flexible, ces systèmes peuvent fonctionner soit en mode connecté au réseau principal, soit de manière autonome, ce qui permet d'améliorer la fiabilité et la continuité d'alimentation [2].

Cependant, cette flexibilité s'accompagne d'une complexité accrue dans la gestion du système. En effet, la production issue des sources renouvelables reste fortement liée aux conditions climatiques, tandis que la demande en électricité varie selon les besoins des utilisateurs. De plus, la variation des prix de l'électricité rend la gestion encore plus délicate. Dans ce cadre, une gestion efficace et intelligente des flux d'énergie devient indispensable [3].

C'est dans ce contexte que les systèmes de gestion de l'énergie, appelés EMS (Energy Management Systems), prennent toute leur importance. Ils permettent de superviser et de coordonner l'ensemble des ressources énergétiques afin d'assurer un équilibre entre production, consommation et stockage, tout en cherchant à minimiser les coûts et à améliorer les performances globales du système [4].

Par ailleurs, l'intégration des méthodes d'optimisation constitue une approche particulièrement intéressante pour améliorer le fonctionnement de ces systèmes. Ces méthodes permettent de déterminer les meilleures stratégies de gestion en tenant compte des différentes contraintes techniques et économiques [3]. Parmi les approches existantes, la programmation linéaire est souvent utilisée en raison de son efficacité dans la résolution des problèmes d'optimisation liés aux micro-réseaux [2].

Ainsi, l'optimisation de la gestion énergétique des micro-réseaux représente aujourd'hui un axe de recherche majeur dans le domaine des réseaux électriques intelligents. Elle vise à améliorer l'efficacité énergétique, à réduire les coûts d'exploitation et à faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes électriques modernes [2].

Ce travail de fin d'études est structuré autour de quatre chapitres principaux :

- ❖ Le premier chapitre présente les généralités ainsi que l'état de l'art concernant les micro-réseaux, les énergies renouvelables, les systèmes de stockage et la gestion de l'énergie.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du système de gestion de l'énergie (EMS) du micro-réseau, en décrivant son architecture, ses objectifs ainsi que ses contraintes de fonctionnement.
- ❖ Le troisième chapitre porte sur la méthode d'optimisation adoptée, en détaillant la formulation du problème ainsi que les critères de décision utilisés.
- ❖ Le quatrième chapitre présente les résultats des simulations réalisées, suivis de leur analyse et de leur interprétation, notamment en termes de flux de puissance, d'état de charge de la batterie, de tension du réseau et de coût énergétique.
- ❖ Enfin, une conclusion générale vient synthétiser les principaux résultats obtenus et proposer quelques perspectives pour des travaux futurs.

1.1. Introduction :

Au cours des dernières décennies, le secteur énergétique mondial a connu des transformations profondes sous l'effet conjugué de l'augmentation continue de la demande en électricité, de la transition énergétique vers des sources renouvelables et des préoccupations croissantes liées au changement climatique. Les réseaux électriques traditionnels, historiquement basés sur une production centralisée et un acheminement unidirectionnel de l'énergie, se trouvent aujourd'hui confrontés à de nouveaux défis techniques, économiques et environnementaux. L'intégration massive des énergies renouvelables intermittentes, la nécessité d'améliorer la qualité de service, ainsi que l'exigence d'une meilleure résilience face aux perturbations et aux pannes, imposent une évolution du modèle classique du réseau électrique.

Dans ce contexte, le concept de micro-réseau (Microgrid) apparaît comme une solution innovante et stratégique pour moderniser les infrastructures électriques. Un micro-réseau est un système énergétique local regroupant des sources de production distribuées, des dispositifs de stockage, des charges électriques et des systèmes de contrôle intelligents, capable de fonctionner soit en parallèle avec le réseau principal, soit en mode autonome (îloté). Cette double capacité de fonctionnement lui confère une grande flexibilité opérationnelle et une meilleure continuité d'alimentation, notamment dans les zones isolées ou lors de défaillances du réseau principal.

Les micro-réseaux s'inscrivent pleinement dans la logique des réseaux intelligents (Smart Grids), en intégrant les technologies de l'information et de la communication pour assurer une gestion optimisée et en temps réel des flux d'énergie. Ils permettent non seulement d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les pertes de transport, mais aussi de favoriser l'intégration des ressources énergétiques renouvelables telles que le solaire photovoltaïque et l'éolien. De plus, ils contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en diminuant la dépendance aux combustibles fossiles.

Sur le plan technique, le développement des micro-réseaux soulève plusieurs problématiques importantes, notamment en matière de contrôle hiérarchique, de gestion de l'énergie, de protection des équipements et de stabilité du système. L'interaction entre les différentes sources distribuées, la gestion des flux bidirectionnels de puissance et le maintien de la fréquence et de la tension constituent des enjeux majeurs pour garantir un fonctionnement fiable et sécurisé.

Dans le contexte Algérien, l'intérêt pour les micro-réseaux est particulièrement pertinent. En effet, certaines régions du pays, notamment dans le Grand Sud, sont éloignées du réseau électrique interconnecté et présentent des contraintes techniques et logistiques importantes. L'intégration de micro-réseaux hybrides combinant énergies renouvelables et sources conventionnelles représente ainsi une solution adaptée pour assurer une électrification durable, réduire les coûts de production et valoriser le fort potentiel solaire national.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter les fondements théoriques et techniques relatifs aux micro-réseaux. Nous commencerons par rappeler l'architecture des réseaux électriques traditionnels et leur évolution vers les réseaux intelligents. Ensuite, nous définirons le concept de micro-réseau, ses composants, ses structures de contrôle, ses modes de fonctionnement et ses différentes topologies. Enfin, nous aborderons les principaux avantages, inconvénients, défis techniques ainsi que quelques exemples de projets de micro-réseaux à l'échelle internationale et nationale.

1.2. Réseaux électriques traditionnels :

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. [12]



Figure (1.1) : Schéma du parcours de l'énergie. [12]

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 :

1.3.1. L'augmentation de la demande en énergie :

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. [12]

1.3.2. 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 (1.2). [12]

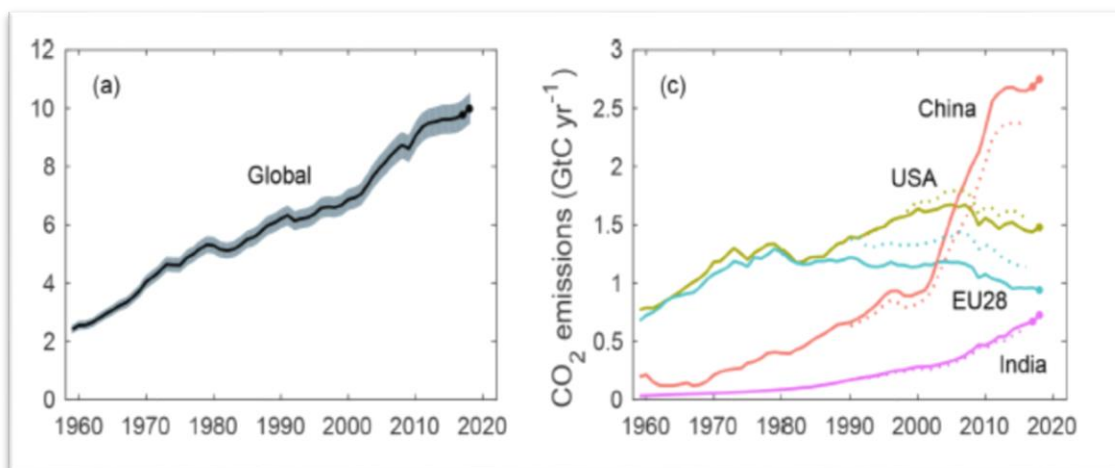


Figure (1.2) : Emission mondiale du CO₂ Année (2020). [12]

1.3.3. 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 (1.3).

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. [12]

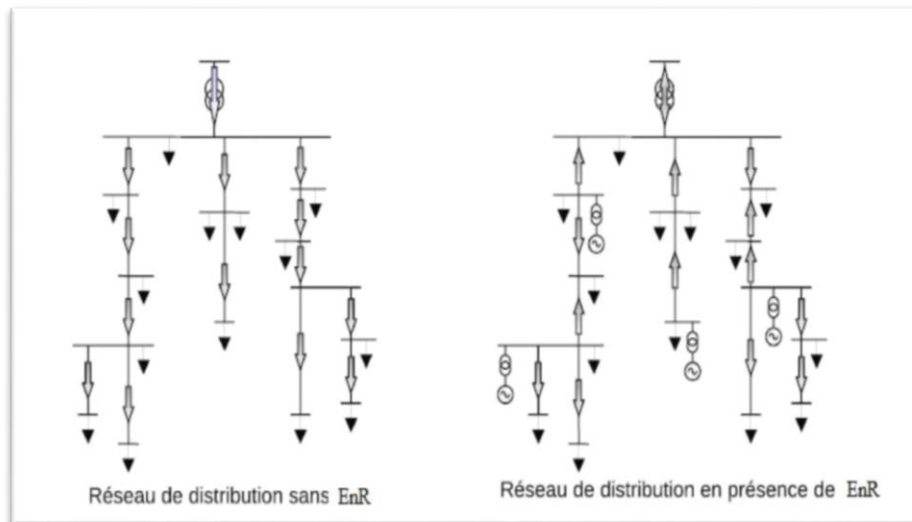


Figure (1.3) : Transit de puissance sur le réseau avec et sans EnR. [12]

1.3.4. Le coût de l'énergie :

L'épuisement prévisible des ressources en énergies fossiles due à la consommation excessive, ainsi que le début des démantèlements des centrales nucléaires va impliquer une augmentation du prix de l'énergie. [12]

1.4. Structure d'un réseau électrique:

Le réseau électrique joue un rôle essentiel en assurant le transfert efficace de l'électricité générée par diverses sources telles que les centrales nucléaires, thermiques et renouvelables. Ce transfert s'effectue depuis ces centres de production vers une multitude de destinations, notamment les secteurs industriels, les collectivités et les zones résidentielles.

La fonction principale du réseau électrique est de garantir une distribution équilibrée de l'électricité, en ajustant constamment la production pour répondre aux besoins de la consommation et ainsi maintenir la stabilité du système. [2]

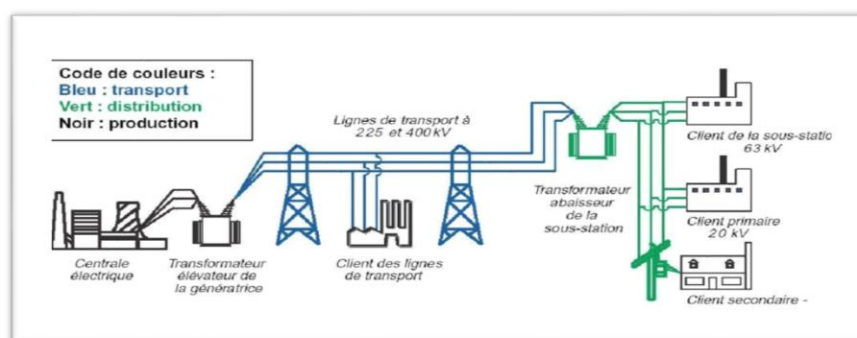


Figure (1.4) : la structure générale du réseau électrique. [12]

1.5. Réseau intelligent:

Le Smart Grid est un nouveau concept de réseaux électriques à travers l'Europe. L'initiative répond à la montée en puissance défis et opportunités, apportant avantages pour tous les utilisateurs et parties prenantes ainsi que pour les entreprises qui y opèrent. [2]

1.6. Vers un réseau électrique plus intelligent :

La modernisation des systèmes intelligents vers les Smart réseaux implique une transformation complexe, passant d'une approche unidirectionnelle à une structure interconnectée similaire à une toile d'araignée. Ces réseaux intelligents intègrent les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) à tous les niveaux, favorisant des flux bidirectionnels d'énergie et d'information entre les acteurs du système.

Les NTIC sont cruciales pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables en permettant une gestion réactive des réseaux. Ces technologies offrent des outils variés, du comptage communicant au stockage d'électricité, contribuant ainsi à optimiser les flux énergétiques, équilibrant l'offre et la demande tout en gérant l'intermittence des énergies renouvelables [2].

1.7. Définition du micro-réseau :

De nombreuses définitions de micro-réseaux ont été présentées dans des études publiées par des groupes de recherche du monde entier.

Voici quelques exemples :

- Le Département de l'Énergie des États-Unis (DOE) a publié une définition détaillée des micro-réseaux :

« A Microgrid, a local energy network, offers integration of distributed energy resources (DER) with local elastic loads, which can operate in parallel with the grid or in an intentional island mode to provide a customized level of high reliability and resilience to grid disturbances ». [6]

« Un micro-réseau, réseau énergétique local, permet l'intégration de ressources énergétiques distribuées (RED) avec des charges élastiques locales. Il peut fonctionner en parallèle avec le réseau ou en mode îloté intentionnel afin de fournir un niveau de fiabilité et de résilience élevé et personnalisé face aux perturbations du réseau. ».

- Le Service de recherche du Congrès (CRS) perçoit le terme « micro-réseau » ; il semble y avoir une légère diminution par rapport à la description mentionnée précédemment dans cette section :

« A Microgrid is any small or local electric power system that is independent of the bulk electric power network. For example, it can be a combined heat and power system based on a natural gas combustion engine (which cogenerates electricity and hot water or steam from

water used to cool the natural gas turbine), or diesel generators, renewable energy, or fuel cells. A Microgrid can be used to serve the electricity needs of data centers, colleges, hospitals, factories, military bases, or entire communities ». [6]

« Un micro-réseau est un système de production d'électricité de petite taille ou local, indépendant du réseau électrique principal. Par exemple, il peut s'agir d'un système de cogénération basé sur un moteur à combustion au gaz naturel (qui cogénère de l'électricité et de l'eau chaude ou de la vapeur à partir de l'eau utilisée pour refroidir la turbine à gaz naturel), ou sur des générateurs diesel, des énergies renouvelables ou des piles à combustible. Un micro-réseau peut être utilisé pour répondre aux besoins en électricité des centres de données, des universités, des hôpitaux, des usines, des bases militaires ou des collectivités entières ».

- Un micro-réseau est un réseau électrique de petite taille destiné à alimenter un petit nombre de consommateur (quartier, zone industrielle ou artisanales, village, etc.). Il est constitué de multiples charges interconnectées, des installations de production décentralisées qui sont généralement à base de ressources énergétiques renouvelables, des installations de stockage ainsi que des outils de supervision et de gestion de la demande. Il peut être raccordé au réseau principal comme il peut fonctionner seul. [10]

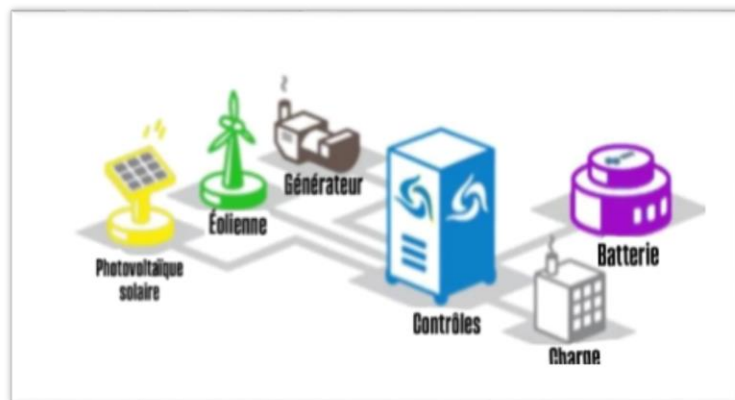


Figure (1.5) : Schéma d'un micro-réseau. [2]

1.8. Historique :

L'émergence des micro-réseaux est étroitement liée au développement des technologies de comptage et de communication.

- Dans les années 1980, l'introduction des compteurs automatiques a constitué une première étape vers la modernisation des réseaux électriques.
- Dans les années 1990, les compteurs communicants ont permis un meilleur suivi de la consommation électrique et une gestion plus précise de la demande.
- À partir des années 2000, plusieurs projets pilotes de télégestion et d'intégration des énergies renouvelables ont vu le jour.

- En 2005, la Commission Européenne a lancé la plateforme technologique « Smart Grids », accélérant le développement des réseaux intelligents et des micro-réseaux.

1.9. Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents :

Caractéristique	Réseau traditionnel	Réseau intelligent
Technologies	Electromécanique, état solide	numérique/Microprocesseur
Communication	Une seule direction et communication localisée.	Bidirectionnel, réseau de communication étendue.
Génération d'énergie	Génération d'énergie centralisée.	Adopte une génération distribuée et mixte (décentralisée).
Surveillance	Surveillance manuelle et localisée.	Surveillance automatisée, et à distance
Contrôle des défauts	Systèmes de contrôle des défauts Limités	Pénétration des systèmes de contrôle de défauts
Fiabilité	Fiabilité estimée.	Fiabilité prédictive du réseau, plus efficacement Améliorée
Gestion de la Charge	Besoin en réserve très limité	Permet la réponse de la Charge, et la Gestion du côté charge.

Tableau 1.1 : Comparaison : Réseau intelligent et réseau conventionnel [2]

1.10. Avantages et les inconvénients de micro-réseau :

1.10.1. Avantages :

Parmi les avantages que nous pouvons rencontrer, nous avons :

- Isolation de toute perturbation ou panne du réseau électrique.
- Amélioration de l'efficacité énergétique.
- Réduction des émissions de gaz qui peuvent aider à lutter contre le réchauffement climatique.
- Réduction de la distance physique et électrique entre les micro-sources et les charges ce qui contribue à la réduction des pertes.
- Atteindre l'équilibre offre-demande.
- Amélioration de la puissance et de la fiabilité.
- Faire face à la pollution environnementale. [10]

1.10.2. Inconvénients :

- Coûts élevés des installations ainsi que des ressources énergétiques décentralisées.
- Difficultés techniques liées au manque d'expérience technique.
- Absence de normes : puisque c'est un domaine relativement nouveau, les normes ne sont pas encore disponibles pour résoudre les problèmes de fonctionnement et de protection.
- Absence de lois ou règlement standardisé pour réguler le fonctionnement des micro-réseaux. [2]

1.11. La différence entre le micro-réseau et le réseau intelligent :

Un micro-réseau est un système électrique local comprenant plusieurs charges et des ressources énergétiques distribuées, capable de fonctionner en parallèle avec le réseau électrique public ou de manière autonome en tant que système d'alimentation indépendant. Il permet d'améliorer la fiabilité grâce à la production distribuée, d'augmenter l'efficacité en réduisant les longueurs de transmission, et de faciliter l'intégration des sources d'énergie renouvelables.

En revanche, un réseau intelligent (Smart Grid) est un réseau électrique modernisé à grande échelle qui intègre les technologies de l'information et de la communication afin de collecter, analyser et exploiter des données relatives à la production, au transport, à la distribution et à la consommation de l'électricité. Son objectif principal est d'améliorer l'efficacité, la fiabilité, la performance économique et la durabilité du système électrique, notamment grâce à des fonctions avancées de surveillance, de contrôle et de protection des opérations de transmission et de distribution. [25]

1.12. Structure et composants d'un micro-réseau :

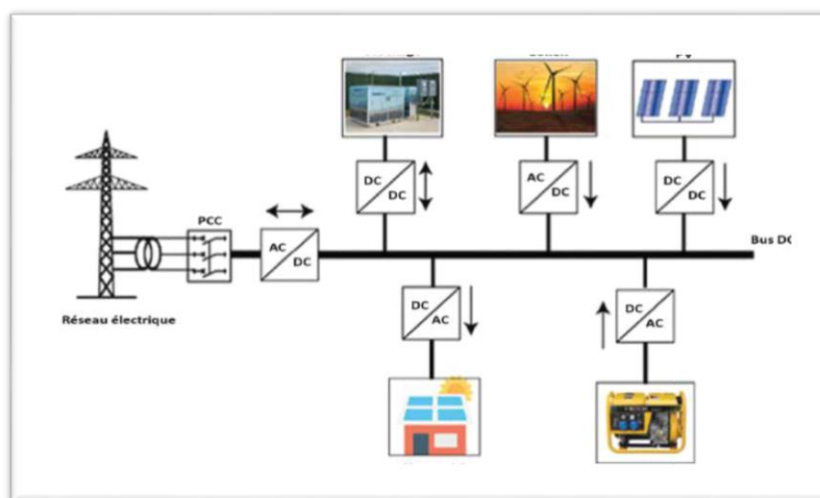


Figure (1.6) : Structure d'un micro-réseau. [8]

1.12.1. Sources de Production d'énergie :

La source d'énergie constitue un élément clé des micro-réseaux. Il existe différentes sources de production d'énergie qui peuvent être classées selon leur prédominance, appelées sources conventionnelles et non conventionnelles, ou selon le type de ressources utilisées, c'est-à-dire les sources renouvelables et non renouvelables.

Un système de micro-réseau traditionnel se compose généralement d'un ensemble d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques, de petites centrales hydroélectriques, de micro-turbines diesel.

1.12.1.1. Energie solaire : L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Elle est intermittente entre le jour et la nuit et elle est également diffuse. Aussi, elle est diluée. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. [1]



Figure (1.7) : Energie solaire photovoltaïque. [12]

1.12.1.2. Energie éolienne : L'énergie éolienne est une énergie extraite du vent. L'échauffement de la terre crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. Ces surpressions naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de produire de l'électricité dans des éoliennes, appelées aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [1]



Figure (1.8) : Un champ éolien. [12]

1.12.1.3. Générateurs Conventionnels : est un dispositif électrique qui produit de l'électricité en convertissant l'énergie mécanique générée par un moteur diesel en énergie électrique. Certains micro-réseaux incluent des générateurs diesel ou d'autres générateurs conventionnels pour garantir une alimentation constante, en particulier dans des situations où les énergies renouvelables peuvent être intermittentes. [2]



Figure (1.9) : Générateur diesel. [2]

1.12.2. Dispositifs de Stockage d'Énergie :

Sont des technologies qui stockent de l'énergie sous différentes formes pour une utilisation ultérieure afin de résoudre les défis liés à l'intermittence des sources d'énergie. On distingue quelques types de stockages : [2]

1.12.2.1. Batteries : Le stockage d'énergie au moyen de batteries est une option pour stocker l'énergie électrique. Une batterie est chargée en la connectant à une source de courant électrique continu et lorsqu'elle est déchargée, l'énergie chimique stockée est convertie en énergie électrique. Les applications potentielles des batteries sont l'utilisation de l'énergie en période creuse, le nivellement de la charge et le stockage de l'énergie électrique générée par les éoliennes ou les centrales photovoltaïques. Le type d'accumulateur le plus répandu est l'acide au plomb. [5]



Figure (1.10) : Une batterie plomb ouverte. [2]

1.12.2.2. Supracondensateurs : Les supraconducteurs sont utilisés pour le stockage d'énergie principalement via les systèmes SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), où l'énergie électrique est convertie en champ magnétique stocké dans une bobine supraconductrice sans pertes par résistance. Ce procédé, inventé en France dans les années 1970, permet un rendement élevé (jusqu'à 95-98%) et une restitution quasi-instantanée en millisecondes, idéal pour stabiliser les réseaux électriques. [3]

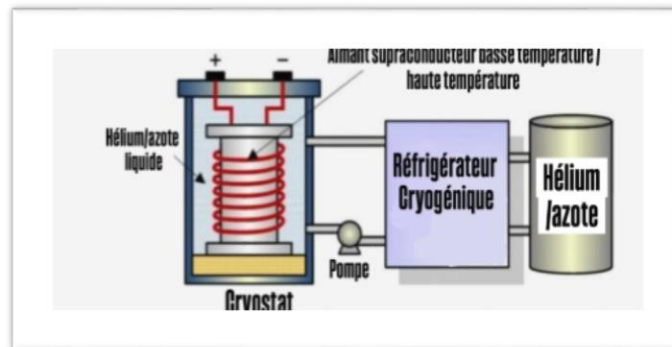


Figure (1.11) : Architecture d'un système de stockage d'énergie magnétique supraconducteur. [2]

1.12.2.3. Pile à combustible : Considérée comme un convertisseur d'énergie, elle transforme directement un combustible en énergie, fournissant ainsi de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. [7]



Figure (1.12) : Pile à combustible. [2]

1.12.3. Chargeurs et onduleurs :

Ces composants convertissent l'énergie produite par les sources du courant continu (CC) en courant alternatif (AC) pour l'alimentation des équipements électriques. [2]

1.12.3.1. Contrôle d'Énergie :

A. Le contrôle du micro-réseau comprend :

- Contrôleurs micro-sources (MC) et contrôleurs de charge (LC).
- Contrôleur central du système micro-réseau (MGCC).
- Système de gestion de la distribution (DMS). [25]

B. Contrôle hiérarchique du Micro-réseau :

Dans un micro-réseau, les performances dynamiques et statiques, ensemble avec certains aspects économiques, sont réglementées selon une structure hiérarchique.

Cette structure est composée de cinq niveaux conformes à la norme IEC/ SAC-62264, indiqués dans la Figure (1.13)

- Le niveau zéro est responsable des boucles de contrôle de la tension et du courant des onduleurs.
- Le premier niveau (appelé contrôle primaire) régule la fréquence et la tension, ainsi que la répartition de la charge entre les unités de production en maintenant la stabilité du micro-réseau.
- Le deuxième niveau (appelé contrôle secondaire) rétablit les valeurs nominales de la fréquence et de la tension, cela peut également inclure la synchronisation avec le réseau électrique afin de s'y connecter ou de s'en déconnecter.
- Le troisième niveau (appelé contrôle tertiaire) est en charge de la gestion de l'énergie électrique et de la régulation de l'écoulement de puissance entre le micro-réseau et le réseau principal.
- Le quatrième niveau correspond à la planification et à la logistique. [8]

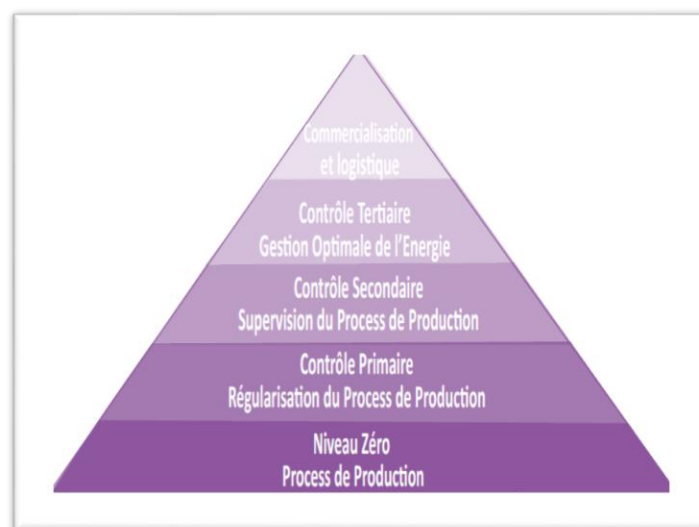


Figure (1.13) : Structure de contrôle hiérarchique dans un micro-réseau. [8]

1.12.4. Réseau de distribution :

Des câbles et des équipements de distribution acheminent l'électricité des sources vers les charges (appareils, éclairage, etc.) à l'intérieur du micro-réseau. [2]

1.12.5. Composants de communication :

Les technologies de communication facilitent la coordination entre les différentes parties du micro-réseau, permettant une gestion centralisée et des ajustements en temps réel. [2]

1.12.6. Équipements de mesure :

Des capteurs et des dispositifs de mesure collectent des données sur la production, la consommation et l'état du système pour une gestion précise. [2]

1.12.7. Connexion au réseau principal :

Permettant des échanges d'électricité en cas de besoin ou d'excédent. [2]

1.13. Pourquoi les micro-réseaux ?

Les micro-réseaux, développés dans des zones dotées d'infrastructures électriques existantes, sont façonnés par trois principaux facteurs : la sécurité énergétique, les avantages économiques et l'intégration des énergies propres.

- **Sécurité énergétique** : Les micro-réseaux renforcent la résilience et la fiabilité des installations critiques, offrant une source d'électricité stable et continue, notamment dans les régions sujettes aux phénomènes météorologiques violents.
- **Avantages économiques** : Ils présentent des avantages économiques en réduisant les coûts d'exploitation et en offrant des services auxiliaires, ce qui améliore leur rentabilité et leur attractivité.
- **Intégration des énergies propres** : Les micro-réseaux facilitent l'intégration de sources d'énergie propre dans le réseau, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique en réduisant les émissions de CO₂ et en favorisant le déploiement à grande échelle d'énergies renouvelables distribuées. [2]

1.14. Topologies de micro-réseau :

Après avoir présenté la structure générale du micro-réseau, il est nécessaire d'étudier sa topologie. Le choix de toute topologie de micro-réseau donnée ci-dessous dépend de facteurs techniques, géographiques et économiques à l'endroit d'installation. Selon le mode d'intégration des différentes parties constituant un micro-réseau, on distingue les topologies à bus DC (Figure 1.14), à bus AC (Figure 1.15) et à bus hybride (AC-DC) (Figure 1.16). [8]

1.14.1. Architecture série :

1.14.1.1. Configuration du bus à courant continu (DC) :

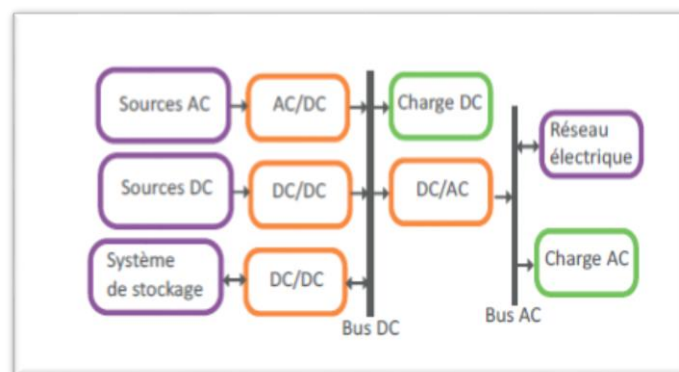


Figure (1.14) : Micro-réseau avec bus DC. [8]

1.14.1.2. Configuration du bus à courant alternatif (AC) :

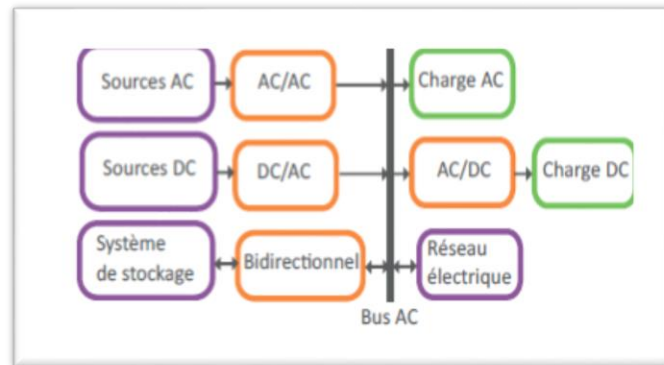


Figure (1.15) : micro-réseau avec bus AC. [8]

1.14.2. Architecture parallèle :

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus CC où sont connectées les sources à courant continu et un bus AC sur lequel sont connectées les sources alternatives. Les deux bus sont reliés à l'aide d'un onduleur bidirectionnel. [2]

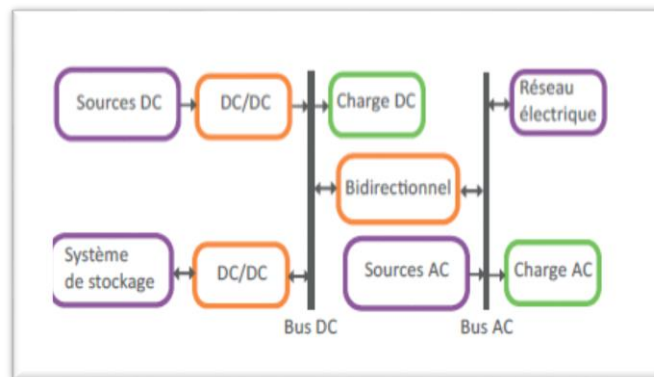


Figure (1.16) : Micro-réseau avec bus (AC et DC). [8]

1.15. Type des micro-réseaux :

La particularité qui fait du micro-réseau l'une des solutions les plus étudiées dans le domaine de l'énergie est sa capacité à s'iloter du réseau principal, soit pour des raisons économiques, soit pendant un blackout ou une perturbation. De cette définition naissent deux grandes familles de micro-réseaux avec des fonctionnements et des objectifs très différents les micro-réseaux connectés et les micro-réseaux îlotés : [8]

1.15.1. Micro-réseaux Connectés au réseau (Grid-Tied) :

Les micro-réseaux connectés au réseau électrique principal sont interconnectés avec le réseau électrique principal, leur permettant ainsi de fonctionner de manière coordonnée

et efficace avec ce réseau principal. Cette intégration leur offre plusieurs avantages, notamment la stabilité, le secours en cas de besoin et l'accès à une capacité supplémentaire.

Ces micro-réseaux peuvent ajuster leur production en fonction des besoins du réseau principal, optimisant ainsi la charge globale du réseau et favorisant l'intégration coordonnée des énergies renouvelables. En participant à des programmes de gestion de la demande, ils contribuent à améliorer l'efficacité globale du système électrique. [2]

1.15.2. Micro-réseaux îlotés :

Les micro-réseaux îlotés, comme leur nom l'indique, ne sont pas connectés à un réseau électrique. Ce mode de fonctionnement peut être temporaire, lorsque le micro-réseau s'est volontairement déconnecté du réseau principal. Il existe deux grandes familles de sources d'énergie, les sources dites « Grid-Tie » (GT) qui vont s'accrocher à une onde de tension et qui ne peuvent pas la former, et les sources dites « Grid-Forming » (GF) qui, au contraire, forment l'onde de tension. En mode îloté, au moins une des sources doit être de type GF pour créer l'onde de tension. [8]

1.16. Fonctionnement d'un micro-réseau :

Les principales étapes du fonctionnement d'un micro-réseau incluent :

- 1.16.1. Production d'énergie :** Les sources d'énergie, telles que les panneaux solaires et les éoliennes, génèrent de l'électricité.
- 1.16.2. Gestion intelligente :** Des technologies de gestion énergétique avancées surveillent la demande, la production et le stockage en temps réel, optimisant ainsi la répartition de l'énergie.
- 1.16.3. Distribution de l'énergie :** Un système de distribution interne achemine l'électricité produite vers les consommateurs locaux.
- 1.16.4. Stockage d'énergie :** L'énergie produite en excès est stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure lorsque la production est faible.
- 1.16.5. Connectivité au réseau principal :** Dans certains cas, le micro-réseau peut être connecté au réseau principal pour importer ou exporter de l'électricité en fonction des besoins.
- 1.16.6. Redondance et résilience :** Les micro-réseaux sont conçus pour être résilients, capables de fonctionner de manière indépendante en cas de défaillance du réseau principal [2].

1.17. Protection du micro-réseau :

Les systèmes de protection d'un micro-réseau sont complexes puisqu'il y a un flux bidirectionnel de puissance dans le système en cas de système d'alimentation en vrac, le flux d'énergie est unidirectionnel. Mais avec les sources DG, le flux d'énergie du réseau devient bidirectionnel ; de la sous-station utilitaire au stockage et à la charge d'énergie micro-réseau ou des sources locales de DG au réseau principal ou à d'autres micro-réseau, il y a donc un

flux inverse constant de courant de la production d'énergie maximale à la consommation élevée d'énergie [25].

Un réseau de communication numérique rapide est utilisé pour commander les disjoncteurs et les relais de protection de l'unité de contrôle central (MGCC). Les relais différentiels de courant numérique et la protection de la zone large (WAP) sont fiables et sélectifs pour la protection des micro-réseau lorsqu'ils sont utilisés avec la communication optique à base d'Ethernet, et des communications sans fil sont également possibles [25].

Pendant le fonctionnement normal en mode connecté au réseau, lorsqu'un défaut sur le réseau utilitaire se produit, la réponse doit être de ne pas trébucher les dispositifs de protection de l'individu DER (protection anti-île) avant le dispositif de protection à PCC voyages et, par conséquent, DER devrait continuer à fonctionner pendant la détection et la commutation du dispositif PCC [25].

Pour les micro-réseau fonctionnant en mode insulaire, il existe un problème important lié à la protection anti-île (ou perte de mains) de DER. La désactivation de la protection anti-terrestre est généralement nécessaire si la quantité de DER dans le micro-grid est très élevée. Si la protection anti-île est maintenue activée, en raison de son trébuchement rapide, elle peut causer des îles incontrôlées à l'intérieur du micro-réseau [25].

1.18. Problème dans un micro-réseau :

Les principaux problèmes rencontrés dans un micro-réseau sont les suivants :

1.18.1. Complexité de la faille Chemin actuel :

Une quantité importante de DG permet aux micro-réseau d'exporter de l'énergie vers le réseau principal et entraîne un flux d'énergie bidirectionnel dans le réseau de micro-réseau. Cela influence l'amplitude et la direction du courant de faille. [25]

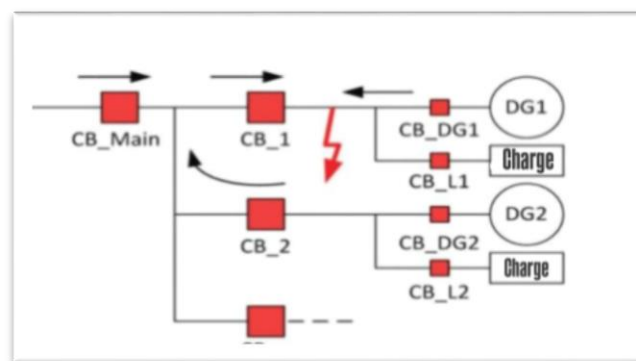


Figure (1.17) : Branches à basse tension typiques (LV) dans un micro-réseau composé de DG et de charges. [25]

1.18.2. Courant de défaut insuffisant avec les sources actuelles limitées :

Les dispositifs de protection sont généralement sélectionnés et configurés par courbe de temps de voyage (TTC) dans les systèmes de distribution. L'analyse de court-circuit fournit des indications pour sélectionner des dispositifs de protection avec des réglages

appropriés de courbe de voyage de sorte que le long voyage de retard, le voyage de court délai, et le voyage instantané puissent être conçus pour distinguer différents événements de défaut/sur courant. [25]

1.18.3. Comportement de la tension et de la fréquence lors des défauts dans un micro-réseau insulaire

Avec l'absence de générateurs rigides dans un micro-réseau insulaire, la tension et la fréquence transitoires pendant les défauts varient selon le type et l'emplacement des défauts, la configuration du micro-réseau et la capacité de courant court-circuit du système. [25]

Les problèmes de protection peuvent être énoncés comme suit :

- Protection aveuglante (sous-atteinte).
- Déclenchement intempestif
- Flux de courant bidirectionnel.
- Recul raté.
- Contribution courante insuffisante. [25]

1.19. Les projets des micro-réseaux :

1.19.1. En Etats-Unis :

1.19.1.1. Le projet RESCO (Renouvelable Energie Secure Communiâtes) États-Unis (Californie) :

Fondé en 2010 par la Californie Energy Commission (CEC), le micro-réseau du campus de l'université de San Diego a été lancé dans le but de tester l'intégration de la production locale d'énergie renouvelable ou non, d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire l'empreinte carbone de l'université et d'améliorer sa capacité à acheter et vendre l'électricité quand les prix sont les plus compétitifs.

Le micro-réseau dispose d'une puissance totale 42 MW : 2 turbines à gaz de 13,5 MW, une turbine à vapeur de 3 MW, des panneaux solaires photovoltaïques de 1,2 MW et d'une pile à combustible de 2,8 MW qui utilise le méthane issu de l'usine de traitement des déchets. Le micro-réseau dispose également de nombreuses installations de stockage : Différents types de batteries, un condensateur, et un stockage d'énergie thermique.

Alimentant plus de 45 000 personnes dans 450 bâtiments, ces installations permettent de couvrir 92 % des besoins annuels en électricité du campus (les 8 % restants étant achetés sur les marchés). L'université a indiqué que le micro-réseau lui permettait de faire des économies d'énergie d'un montant de près de 800 000 dollars par mois. Le projet RESCO est financé par une subvention d'un million de dollars de la Californie Energy Commission et d'un million de dollars conjointement par l'Université de Californie, l'université de l'État de Californie et le programme Investor Owned Utility Partnership.

Parmi les partenaires, on retrouve EDSA qui fournit le système de contrôle, CleanTech San Diego, OSIsoft, Viridity Energy qui fournit le logiciel d'optimisation et Power Analytics. [13]

La taille du marché des micro-réseaux aux États-Unis était estimée à 14,82 milliards de dollars américains en 2024 et devrait croître à un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 18,2 % entre 2025 et 2030. La croissance du marché est stimulée par l'augmentation des investissements dans la résilience des réseaux électriques, le besoin croissant de systèmes énergétiques localisés et la transition vers l'intégration des énergies renouvelables.

Les activités de recherche et développement se concentrent de plus en plus sur l'amélioration des systèmes de gestion de l'énergie, l'optimisation de la production distribuée et le développement de technologies de stockage évolutives. Le soutien fédéral, incluant des subventions du Département de l'Énergie ainsi que des mandats énergétiques propres au niveau des États, accélère l'innovation dans la conception et le déploiement des micro-réseaux, faisant de cette technologie un pilier essentiel d'une infrastructure électrique moderne et flexible. [13]

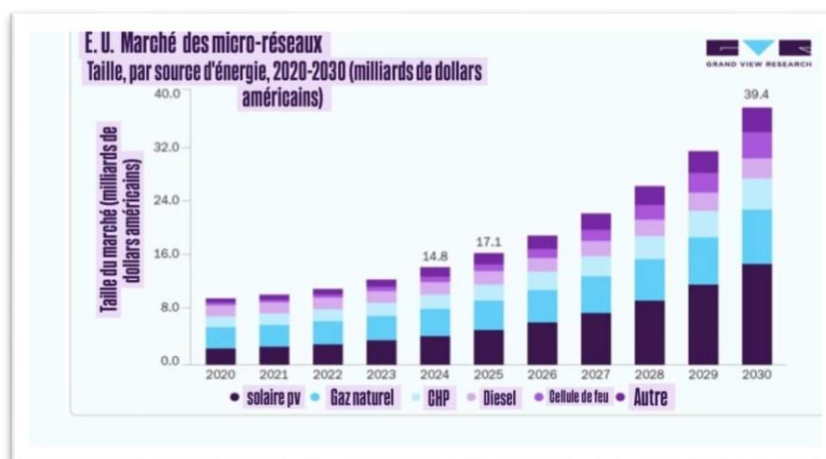


Figure (1.18) : E.U. marche des micro-réseaux (taille par source d'énergie, 2020-2030(milliards de dollars américains)). [13]

Le segment des services publics a dominé le marché avec la plus grande part de revenus, soit 27,79 % en 2024, en raison de la demande croissante de modernisation des réseaux électriques et de la nécessité d'améliorer la fiabilité et la résilience de l'approvisionnement en énergie. Les services publics déploient de plus en plus des micro-réseaux afin de gérer les ressources énergétiques distribuées, d'intégrer les énergies renouvelables et d'assurer une alimentation électrique ininterrompue en cas de coupure.

Ces systèmes contribuent également à l'équilibrage des charges et à l'écrêtage des pointes de consommation, permettant une distribution de l'électricité plus efficace et plus durable. Face au vieillissement des infrastructures de réseau et aux pressions croissantes

exercées par les événements climatiques extrêmes et les fluctuations de la demande, les services publics accordent une priorité accrue aux investissements dans les micro-réseaux afin de renforcer la stabilité du réseau et de satisfaire aux exigences réglementaires. [13]

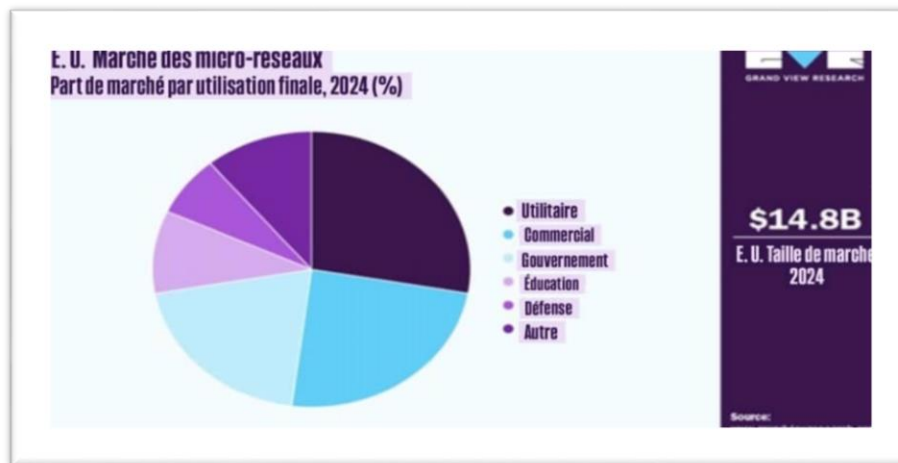


Figure (1.19) : E.U. marche des micro-réseaux (part de marché par utilisation finale, 2024(%)). [13]

1.19.2. En Europe :

1.19.2.1. Analyse du marché des micro-réseaux connectés Europe Grid

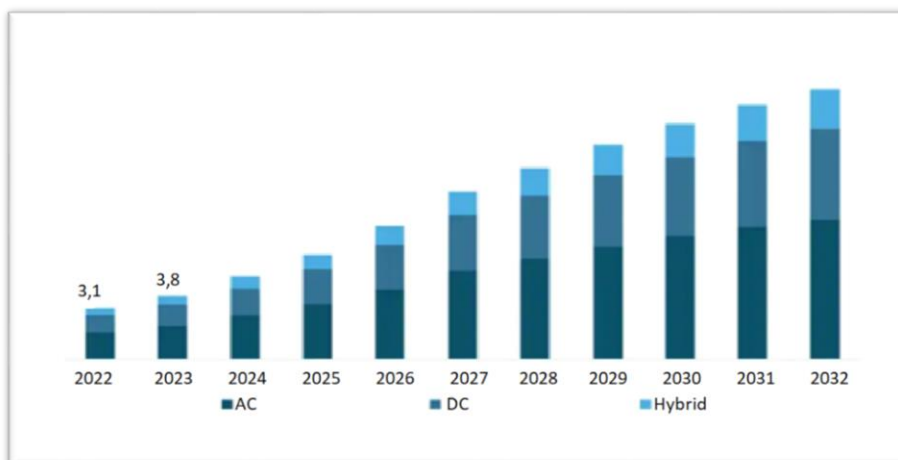


Figure (1.20) : taille du marché des petits réseaux électriques européen, par type de réseaux, 2022-2032 (milliards de dollars US). [14]

Selon le type de grille, le segment de la grille de courant alternatif devrait traverser plus de 8,5 milliards de dollars d'ici 2032. Ses caractéristiques d'interconnexion avec l'infrastructure existante du réseau, qui permettent le flux bidirectionnel d'électricité et facilitent l'échange d'électricité entre le micro-réseau et le réseau principal, sont un facteur important des perspectives d'affaires.

De plus, l'augmentation de la demande de réseaux avec évolutivité et flexibilité pour s'adapter à l'évolution des besoins énergétiques, optimiser la gestion de l'énergie et soutenir l'intégration des technologies émergentes augmentera le paysage industriel. [14]

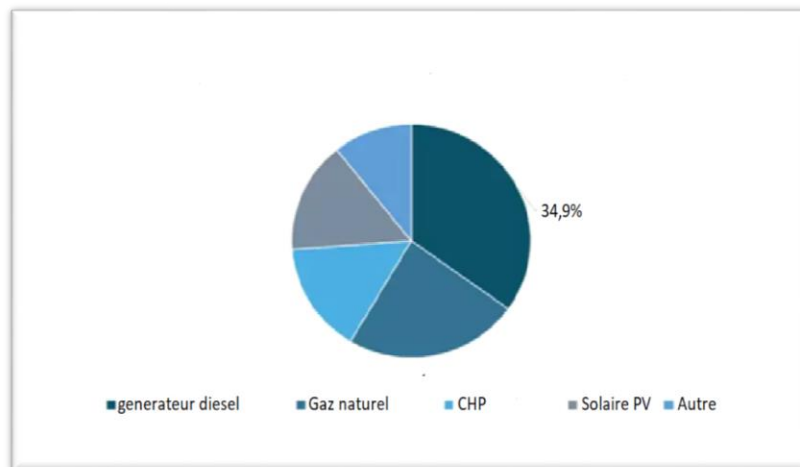


Figure (1.21) : taille du marché des petits réseaux connectés au réseau électrique européen, par type de part de marche des micro-réseaux connectés au réseau électrique en Europe, par source d'énergie, 2023 réseau, 2022-2032 (milliards de dollars US). [14]

1.19.3. En Algérie :

En Algérie, les localités du Grand Sud (oasis) sont éloignées du réseau électrique national auxquels une interconnexion à court et moyen terme n'est pas possible, compte tenu du niveau de la demande et de l'éloignement. Ces localités sont alimentées en énergie électrique à base de centrales à combustibles fossiles. Les distances et les contraintes liées à l'environnement (vents de sables, crues des oueds, pistes difficilement carrossables, etc.), les difficultés d'approvisionnement en combustibles, et la nécessité d'escorter le gasoil (Risque de détournement) dans certaines localités, engendrent des coûts de production supplémentaires. Pour parer à ces lacunes, plusieurs études ont été menées à Sonelgaz pour envisager l'intégration de l'énergie d'origine solaire, eu égard au potentiel important de cette énergie au niveau du Sud du pays. [15]

1.19.3.1. Capacité dédiée aux Réseaux Isolés du Sud (RIS) :

Dans le cadre du plan 2015-2025 :

- La capacité totale à installer pour les Réseaux Isolés du Sud (R.I.S.) est estimée à 760 MW.
- Dont 495 MW déjà décidés (comportant 153 MW diesel et 342 MW turbines à gaz) Et 265 MW en projets envisagés (200 MW turbines à gaz + 65 MW diesel). [16]

1.19.3.2. Énergies renouvelables au niveau national (incluant zones isolées) :

Sur la base du nouveau programme des énergies renouvelables adopté par le gouvernement, il est prévu la réalisation d'une capacité de 9 043 MW, répartie comme suit:

- Photovoltaïque : 5 443 MW sur la période 2016-2025.
- Eolien : 2 600 MW sur la période 2017-2025.
- CSP : 1 000 MW sur la période 2021- 2025. [16]

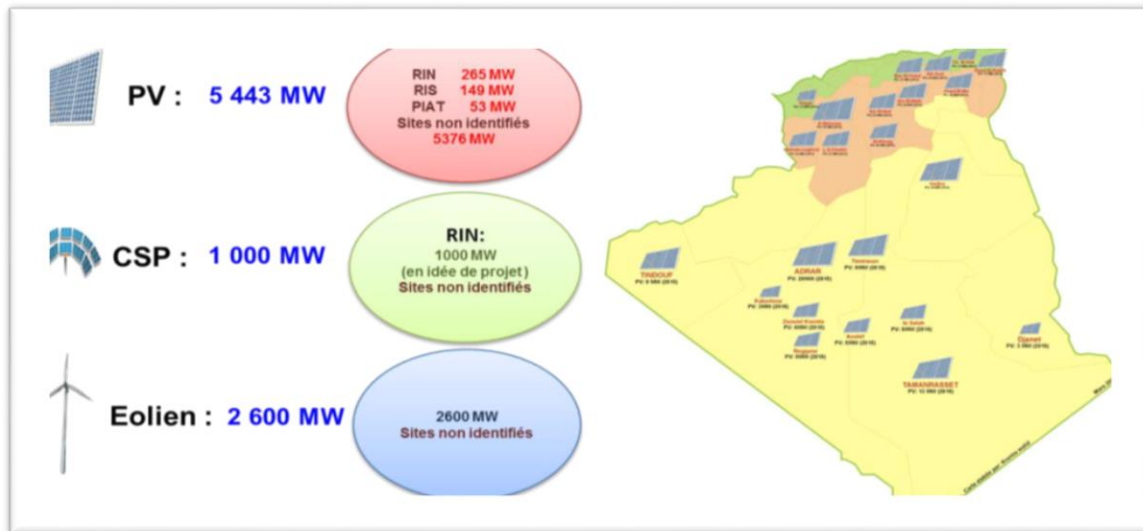


Figure (1.22) : Prévisions de développement en énergies renouvelables. [16]

1.19.3.3. Études de micro-réseaux :

- Stora (wilaya de Skikda) : étude d'un micro-réseau hybride (solaire + éolien + batteries + diesel) pour électrification rurale dans la région montagneuse. [17]
- Zaouiet Kounta (wilaya d'Adrar) : projet de micro-réseau hybride planifié pour une zone isolée du sud-ouest Algérien. [17]

1.20. Étude de cas : Application du contrôle hiérarchique pour la stabilité d'un micro-réseau :

Cette étude de cas est inspirée des travaux présentés dans [18], qui proposent une structure de contrôle hiérarchique appliquée à un micro-réseau AC afin d'améliorer la stabilité de tension et de fréquence, particulièrement en mode îloté.

1.20.1. Description du système étudié :

Le micro-réseau analysé est composé de plusieurs unités de production distribuée (Distributed Generators – DG) connectées via des convertisseurs électroniques de puissance.

Les éléments principaux sont :

- Sources d'énergie distribuées (PV, éolien ou générateurs).
- Onduleurs commandés par stratégie droop control.
- Charges locales variables.
- Système de communication pour le contrôle secondaire.

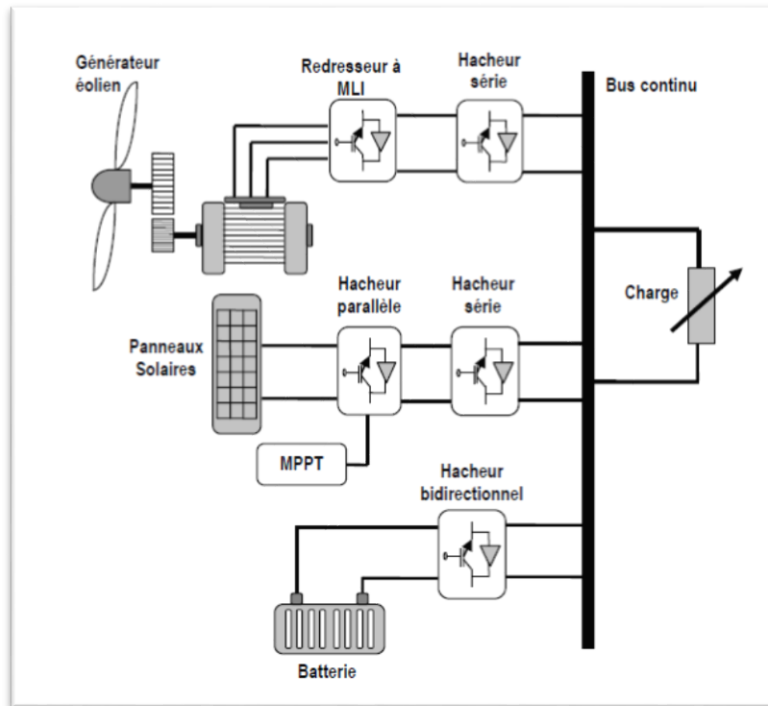


Figure (1.23) : Schéma du système global à énergies renouvelables. [18]

Le système fonctionne en mode îloté, ce qui signifie qu'il est découplé du réseau principal. Dans ce cas, le micro-réseau doit assurer seul l'équilibre entre production et consommation.

1.20.2. Problématique de stabilité :

En mode îloté, toute variation de charge entraîne :

- Une déviation de la fréquence.
- Une variation de la tension.
- Un déséquilibre du partage de puissance active et réactive.

Sans stratégie de contrôle appropriée, ces perturbations peuvent compromettre la stabilité du système.

1.20.3. Structure de contrôle hiérarchique proposée :

Selon [18], la stabilité est assurée par une architecture en trois niveaux :

1.20.3.1. Contrôle primaire (Droop Control) :

- Assure le partage de puissance entre les unités.
- Réagit rapidement aux variations.
- Introduit une légère déviation de fréquence.

1.20.3.2. Contrôle secondaire :

- Corrige les écarts de fréquence générés par le contrôle primaire.
- Restaure la tension nominale.
- Fonctionne via communication entre unités.

1.20.3.3. Contrôle tertiaire :

- Optimise le flux de puissance.
- Gère l'interaction avec le réseau principal (mode connecté).

1.20.4. Résultats et analyse :

Les résultats présentés par les auteurs montrent que :

- La fréquence revient à sa valeur nominale après l'activation du contrôle secondaire.
- Le partage de puissance active et réactive est équilibré.
- Le système reste stable malgré des variations importantes de charge.

Cette approche améliore donc :

- ✓ La stabilité dynamique.
- ✓ La robustesse du micro-réseau.
- ✓ La qualité de l'énergie fournie.

1.20.5. Conclusion de l'étude de cas :

L'étude démontre que l'application d'un contrôle hiérarchique constitue une solution efficace pour garantir la stabilité des micro-réseaux AC, notamment en mode îloté où le système est plus vulnérable aux perturbations.

Ainsi, l'architecture proposée par Guerrero et al. [18] représente une référence majeure dans la conception des systèmes de contrôle des micro-réseaux modernes.

1.21. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les bases théoriques et techniques des micro-réseaux en mettant en évidence leur rôle dans la modernisation des systèmes électriques. Après avoir analysé les limites des réseaux traditionnels et l'évolution vers les réseaux intelligents, nous avons défini le concept de micro-réseau, ses composants

principaux, ses différentes topologies ainsi que ses modes de fonctionnement en mode connecté et en mode îloté.

L'étude des structures de contrôle hiérarchique, des dispositifs de protection et des technologies de stockage a montré que le micro-réseau constitue un système énergétique complexe nécessitant une coordination précise entre production, stockage et consommation. Malgré les défis techniques et économiques liés à leur mise en œuvre, les micro-réseaux offrent des avantages considérables en termes de flexibilité, de résilience, d'intégration des énergies renouvelables et d'amélioration de la qualité de service.

Dans le contexte de la transition énergétique et particulièrement pour les zones isolées, comme celles du sud de l'Algérie, les micro-réseaux représentent une solution adaptée pour garantir une alimentation électrique fiable et durable.

Cependant, la simple présence des différentes composantes d'un micro-réseau ne suffit pas à assurer son fonctionnement optimal. La performance globale du système dépend fortement de la manière dont l'énergie est planifiée, répartie et contrôlée en temps réel. Il devient donc indispensable de mettre en place des stratégies efficaces de gestion de l'énergie afin d'optimiser les flux de puissance, réduire les coûts d'exploitation et garantir la stabilité du système.

2.1. Introduction :

La transition énergétique mondiale, marquée par l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, impose une transformation profonde des systèmes électriques traditionnels. Dans ce contexte, les micro-réseaux apparaissent comme une solution innovante permettant une production locale, flexible et intelligente de l'énergie, capable de fonctionner en mode connecté au réseau principal ou en mode isolé.

Toutefois, la diversité des sources d'énergie (solaire, éolien, générateurs conventionnels), la présence de systèmes de stockage, ainsi que la variabilité de la demande et des conditions climatiques rendent le pilotage des micro-réseaux particulièrement complexe. Cette complexité nécessite la mise en place d'un système de gestion de l'énergie (SGE) performant, capable de superviser, coordonner et optimiser en temps réel l'ensemble des flux énergétiques.

La gestion de l'énergie dans les micro-réseaux vise ainsi à assurer un équilibre permanent entre la production et la consommation, tout en respectant les contraintes techniques, économiques et environnementales. Elle repose sur plusieurs piliers fondamentaux, notamment les stratégies de contrôle, les méthodes de prévision, les techniques d'optimisation et l'intégration croissante de l'intelligence artificielle.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les concepts fondamentaux liés à la gestion de l'énergie électrique, en mettant l'accent sur son application dans les micro-réseaux. Nous aborderons d'abord les définitions générales et l'architecture des systèmes de gestion de l'énergie, puis les différentes structures de contrôle. Ensuite, les stratégies de gestion, les méthodes de prévision et les techniques d'optimisation seront analysées. Enfin, le rôle de l'intelligence artificielle dans l'amélioration des performances des micro-réseaux sera définie.

Ainsi, ce chapitre constitue une base théorique essentielle pour comprendre les approches d'optimisation et les solutions avancées qui seront développées dans la suite de ce travail.

2.2. Historique :

L'évolution des systèmes de gestion de l'énergie (SGE) s'inscrit dans une dynamique historique fortement liée aux mutations du secteur énergétique mondial. La crise pétrolière des années 1970 a constitué un tournant majeur, révélant la vulnérabilité des économies dépendantes des combustibles fossiles et initiant une réflexion structurée autour de l'efficacité énergétique.

Durant les décennies 1980–1990, l'intégration progressive des technologies de l'information, notamment les automates programmables industriels (API) et les systèmes SCADA, a permis une amélioration significative des capacités de supervision et de contrôle. Cette évolution technologique a marqué la transition d'une gestion énergétique essentiellement passive vers une approche plus dynamique et automatisée.

À partir des années 2000, l'émergence des réseaux électriques intelligents (smart grids) a profondément transformé le rôle des SGE. Ces derniers ne se limitent plus à la surveillance, mais intègrent désormais des fonctions avancées d'optimisation, de prévision et de coordination multi-sources. Depuis 2010, l'intégration de l'intelligence artificielle renforce davantage ces capacités, ouvrant la voie à une gestion prédictive et adaptative des systèmes énergétiques complexes [4].

2.3. Définition de la gestion de l'énergie électrique :

La gestion adéquate et durable des ressources énergétiques, combinée à la réduction des impacts environnementaux, constitue un levier essentiel du développement économique. Les projets de rénovation et de construction offrent de nombreuses opportunités pour la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique. Dans le cadre des projets de rénovation, plus les travaux envisagés sont importants et complexes, plus les possibilités d'amélioration de la performance énergétique sont élevées. En revanche, pour les projets de construction neuve, le champ des mesures d'économie d'énergie applicables est particulièrement vaste [19].

Il est essentiel que les gestionnaires d'installations adoptent une vision à long terme, dépassant la portée immédiate des projets, afin d'identifier des opportunités durables de réduction de la consommation énergétique. Lorsqu'une mesure d'économie d'énergie est mise en œuvre, l'objectif doit être non seulement de maximiser les économies attendues, mais également d'en assurer la pérennité tout au long du cycle de vie du projet. Toutefois, dans de nombreux cas, les économies d'énergie prévues ne sont pas atteintes en raison de pratiques d'exploitation et de maintenance inadéquates. À titre d'exemple, des équipements à haute efficacité énergétique installés lors de projets de rénovation peuvent être remplacés, en fin de vie, par des équipements moins performants. La mise en place d'un plan structuré de gestion de l'énergie, intégrant des lignes directrices claires, permet d'éviter ces dérives et de garantir une application continue des principes d'efficacité énergétique [19].

Un plan de gestion de l'énergie à long terme aide les gestionnaires à identifier et à planifier les actions d'économie d'énergie, tout en intégrant la performance énergétique dans les activités quotidiennes de l'organisation. Le regroupement et la priorisation des projets d'efficacité énergétique en vue de maximiser leur rentabilité constituent ainsi des éléments clés d'une gestion énergétique efficace [19].

2.4. Définition de la gestion d'énergie dans les micro-réseaux :

La gestion de l'énergie englobe un ensemble de procédures et de méthodes destinées à superviser, contrôler et optimiser l'utilisation des ressources énergétiques. Elle comprend la planification, la surveillance et la régulation des flux d'énergie dans le but d'assurer une efficacité maximale, répondre de manière durable aux besoins, et de réduire au minimum les impacts environnementaux [2].

La gestion d'énergie dans le contexte des micro-réseaux implique la planification, la coordination et la surveillance des flux énergétiques au sein d'un système énergétique localisé et autonome. Son objectif premier est d'optimiser la production, le stockage et la distribution d'énergie, en prenant en considération les sources d'énergie renouvelable variables et les fluctuations de la demande.

Dans les micro-réseaux, la gestion d'énergie revêt une importance particulière en garantissant une utilisation efficace des ressources, en assurant la stabilité du réseau, et en s'adaptant de manière flexible aux besoins énergétiques locaux [2].

2.5. Les avantages de la gestion de l'énergie :

2.5.1. Avantage économique :

Le premier levier de performance d'un système de gestion de l'énergie réside dans sa capacité à réduire les consommations énergétiques inutiles. En identifiant les gaspillages, le SGE facilite l'instauration d'une action immédiate sans attendre un audit complet ou des travaux plus conséquents.

À noter que les économies générées varient selon le niveau de performance énergétique initial du bâtiment. Quoi qu'il en soit, ce gain se traduit par une baisse du montant des factures énergétiques.

En ce sens, le retour sur investissement est souvent rapide, en particulier lorsque les mesures prises sont éligibles à un dispositif d'aide comme les certificats d'économies d'énergie (CEE) [22].

2.5.2. Les avantages opérationnels :

2.5.2.1. Réduction des Coûts Opérationnels :

En identifiant les pertes d'énergie et en automatisant le contrôle, la gestion énergétique diminue les dépenses liées à l'électricité, au chauffage ou à la ventilation. Les entreprises réalisent souvent des économies de 10 à 15% sur leurs factures [23].

2.5.2.2. Amélioration de l'Efficacité :

L'automatisation libère du temps des tâches manuelles, permettant aux équipes de se focaliser sur les objectifs stratégiques. Elle favorise également un entretien préventif, prolongeant la durée de vie des équipements [24].

2.5.3. Les avantages réglementaires et RSE :

Dans un contexte réglementaire contraignant, la gestion de l'énergie devient incontournable pour :

- Suivre les trajectoires de réduction des consommations imposées par le décret tertiaire.
- Répondre aux exigences des audits énergétiques réglementaires. Consolider les données pour les bilans carbone ou les reportings RSE/CSRD.

En fournissant des indicateurs fiables, un système de gestion de l'énergie renforce la crédibilité des engagements environnementaux de l'entreprise ou de la collectivité et assure la traçabilité des actions mises en œuvre [22].

2.6. Le rôle de la gestion d'énergie dans un micro-grid :

Les micro-réseaux, au cœur de la gestion d'énergie, assurent une optimisation minutieuse des ressources locales. En intégrant diverses sources d'énergie renouvelable, ils coordonnent la production selon les besoins, stockant l'excédent pour répondre aux pics de demande. La distribution équilibrée, associée à des mécanismes de gestion de la demande, garantit une utilisation efficiente. La flexibilité en cas de perturbations et la capacité à fonctionner de manière autonome accroissent la résilience. Les micro-réseaux contribuent ainsi à une gestion d'énergie locale, efficace et adaptative, minimisant les pertes et promouvant la durabilité énergétique [20].



Figure (2.1) : Système de gestion d'énergie dans un micro-réseau [20].

2.7. Système de gestion de l'énergie (EMS) :

Le Système de Gestion de l'Énergie (Energy Management System – EMS) constitue l'élément central chargé de la coordination énergétique du micro-réseau. Il collecte les données provenant des différentes unités (production, stockage, charges), traite les prévisions (demande, production renouvelable, prix de l'électricité) et génère des décisions de commande optimales.

Selon la littérature, l'EMS assure plusieurs fonctions clés : la planification de la production et du stockage, la gestion des échanges de puissance avec le réseau, la minimisation des coûts d'exploitation et le respect des contraintes opérationnelles et techniques. Les EMS basés sur l'optimisation sont particulièrement adaptés aux micro-réseaux intégrant des systèmes photovoltaïques et des batteries [28].

2.8. Architecture d'un SGE :

L'architecture d'un système de gestion d'énergie, c'est-à-dire sa structure générale, englobant ainsi les composants et dispositifs le constituant, est un élément essentiel à considérer pour assurer un fonctionnement correct, optimal et l'accomplissement idéal de son rôle. On y distingue trois parties principales résumées dans le schéma suivant :

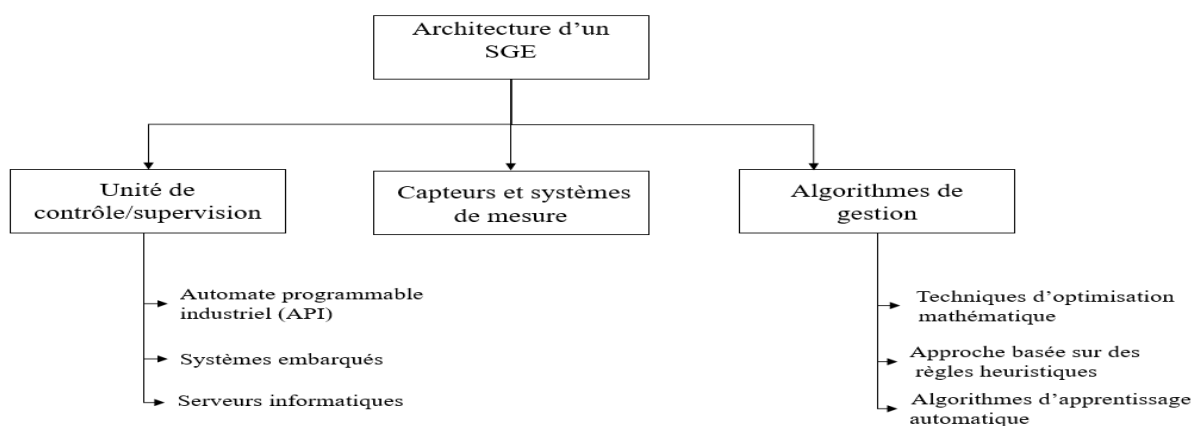


Figure (2.2) : Architecture d'un SGE [4].

Une compréhension approfondie de cette architecture permet de mieux appréhender les défis et les dysfonctionnements que l'on peut rencontrer dans ce genre de système, ainsi assurer des solutions efficaces pour y faire face [4].

2.8.1. Unité de contrôle/supervision :

Au cœur d'un SGE, on trouve l'unité de contrôle et de supervision, elle joue un rôle essentielle en étant responsable de la prise de décisions éclairées et à la gestion dynamique du système énergétique hybride. Cette unité assure le bon fonctionnement et vise à atteindre des objectifs bien définis. Elle peut prendre plusieurs formes en fonction des besoins spécifiques :

2.8.1.1. Automate programmable industriel : Il est conçu pour fonctionner dans des environnements complexes, son plus grand avantage est sa fiabilité et sa robustesse. Les multiples entrées et sorties de l'API lui permet de recevoir de diverses informations des capteurs et des actionneurs pour répondre aux exigences des systèmes de contrôle industriels avec assurance.

- 2.8.1.2. Systèmes embarqués, tels que le Raspberry Pi ou l'Arduino :** Ces dispositifs constituent des solutions adaptées aux applications de taille modeste. Ils offrent des réponses à la fois performantes, pratiques et fiables, convenant particulièrement bien aux projets de moindre envergure ne nécessitant pas des infrastructures trop conséquentes.
- 2.8.1.3. Serveurs informatiques :** Ils représentent une forme d'implémentation des unités de contrôle. Ils sont souvent utilisés pour les algorithmes complexes car leurs puissances de calcul sont d'analyse très élevée.

Peu importe le choix de l'implémentation matérielle, l'unité centrale de contrôle est programmée pour appliquer méticuleusement les algorithmes nécessaires à la gestion adéquate du système, ce qui permet d'optimiser les performances globales du système hybride [4].

2.8.2. Capteurs et systèmes de mesure :

Les capteurs et systèmes de mesure sont d'une importance cruciale dans chaque système de gestion d'énergie. Ils sont responsables de la collecte en temps réel des différentes données et grandeurs caractéristiques du système.

On distingue principalement quatre types de données :

- Données sur la production des sources d'énergie (puissance, tension, courant, etc.).
- Données sur l'état de charge et puissance des systèmes de stockage.
- Données sur la consommation des charges électriques.
- Données sur les différentes grandeurs du réseau telles que la tension, la fréquence et d'autres grandeurs.

Une fois obtenues, ces informations sont acheminées à l'unité de contrôle, assurant ainsi un contrôle et une régulation en temps réel des sorties du système. Les capteurs utilisent généralement des protocoles de communication standardisés (Modbus, CAN bus, etc.) pour transmettre les données [4].

2.8.3. Algorithmes de gestion et de prise de décision :

Si l'unité de contrôle est le cœur d'un SGE, les algorithmes de gestion sont son cerveau, leur rôle est de traiter et coordonner le fonctionnement du système d'énergie contrôlé par le SGE en fonction des objectifs définis au préalable. Ils peuvent inclure différentes approches, tel que :

- 2.8.3.1. Approche basée sur les techniques d'optimisation mathématique :** Cette approche utilise des méthodes d'optimisation mathématique avancées, telles que la programmation linéaire, quadratique, mixte en nombres entiers, etc.

Elle permet d'assurer un fonctionnement optimal du système électrique selon des consignes et objectifs prédéfinis, tout en prenant en compte les contraintes techniques du système.

2.8.3.2. Approche basée sur des règles heuristiques : C'est une approche algorithmique de gestion et de contrôle en temps réel des systèmes hybrides d'énergie. Elle se caractérise par l'utilisation d'un organigramme de décision dans lequel sont codifiées un ensemble de règles de fonctionnement prédéfinies.

2.8.3.3. Algorithmes d'apprentissage automatique : Les SGE peuvent également utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique avancés, tels que l'apprentissage par renforcement et les réseaux de neurones artificiels. Ces techniques permettent d'optimiser le fonctionnement du système de manière autonome, en apprenant des schémas récurrents dans les données de production, de consommation et de marché de l'électricité. Elles peuvent ainsi améliorer la prise de décision et l'adaptation du système aux conditions variables.

Ces algorithmes prennent en compte les données collectées par les capteurs, les prévisions disponibles (production, consommation, etc.) et les contraintes du système pour déterminer les consignes optimales à appliquer aux différents composants.

2.9. Structures de gestion d'énergie dans les micro-réseaux :

Le choix de la structure de contrôle constitue un élément déterminant dans la performance globale d'un micro-réseau.

Le contrôle centralisé offre une vision globale du système et facilite l'optimisation coordonnée des ressources. Toutefois, il introduit un point unique de défaillance et nécessite une infrastructure de communication robuste.

Le contrôle décentralisé améliore la résilience en distribuant la prise de décision, mais peut limiter l'optimalité globale en raison d'une coordination réduite entre les unités locales.

Le contrôle distribué représente un compromis entre ces deux approches. Il combine coordination globale et autonomie locale, ce qui le rend particulièrement adapté aux micro-réseaux de grande taille ou intégrant un nombre important de ressources distribuées.

Dans le contexte des stratégies d'optimisation avancées, les architectures distribuées sont de plus en plus privilégiées en raison de leur flexibilité et de leur adaptabilité face aux incertitudes opérationnelles.

2.9.1. Structure de contrôle centralisée :

Le contrôle centralisé, tel que son nom l'indique, implique un contrôleur principal qui recueille toutes les données (telles que le courant généré par chaque source renouvelable, données météorologiques ...) et gère les interfaces électroniques de puissance au niveau de chaque unité de source d'énergie en transmettant des paramètres de contrôle optimaux.

Cela assure l'équilibre de la puissance active et réactive en régime permanent, tandis que le contrôleur central peut également analyser la consommation énergétique de chaque utilisateur pour une planification optimale des ressources [2].

Cependant, il est essentiel d'établir un moyen de communication entre le contrôleur central et les contrôleurs locaux au sein des sources d'énergie distribuées. Cela constitue l'un des principaux inconvénients du système, car il crée un point de défaillance unique. En cas de déconnexion du contrôleur principal, les contrôleurs locaux perdent leur capacité à communiquer entre eux, compromettant ainsi l'ensemble du système [2].

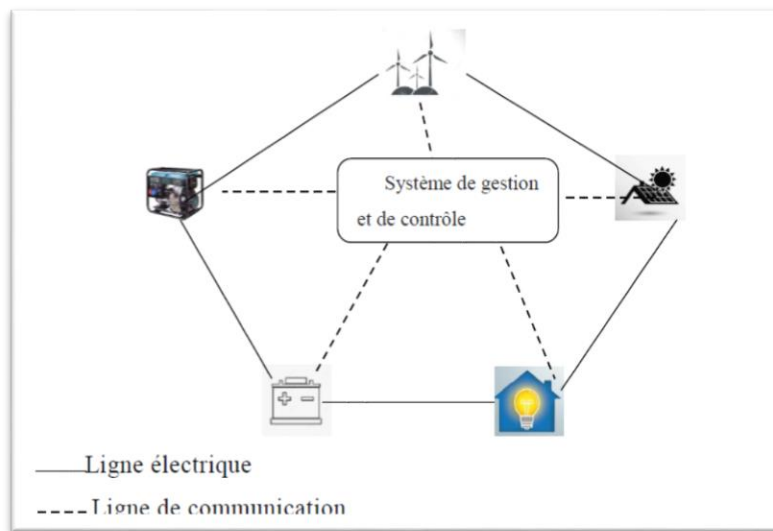


Figure (2.3) : Structure de contrôle centralisée [2].

2.9.2. Structure de contrôle décentralisé:

Contrairement à la centralisation du contrôle, un système décentralisé permet aux contrôleurs locaux de décider de manière autonome. Chaque contrôleur local établit ses paramètres optimaux, les transmet au contrôleur principal qui évalue la planification des ressources avant de la renvoyer aux contrôleurs locaux.

Ce processus de négociation persiste jusqu'à l'atteinte des objectifs locaux et globaux. En cas de défaillance du contrôleur principal, l'impact sur la performance globale du système est moins prononcé qu'avec une approche centralisée, renforçant ainsi la fiabilité du système. Un autre avantage est la possibilité d'ajouter ou de retirer des contrôleurs locaux sans notification au contrôleur central, bien que cela limite l'évolutivité en raison de l'absence de communication directe entre les contrôleurs locaux [2].

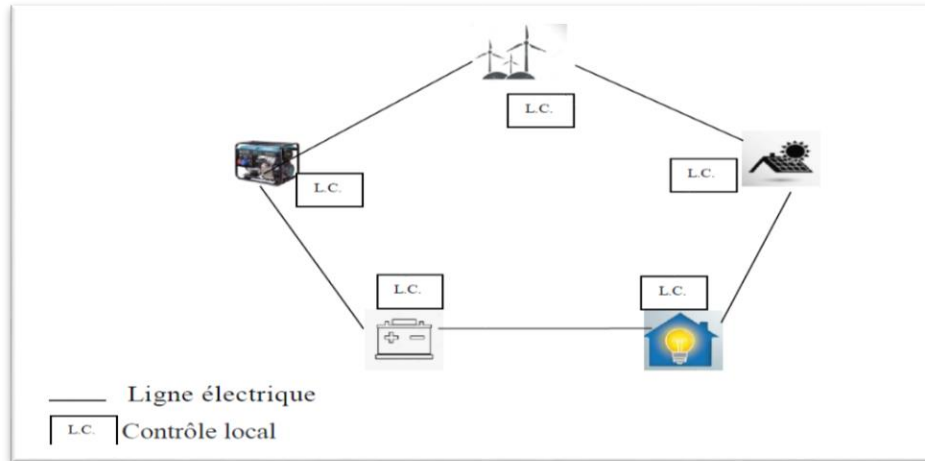


Figure (2.4) : Structure de contrôle décentralisé [2].

2.9.3. Structure de contrôle distribué:

Le contrôle distribué fusionne les approches centralisée et décentralisée. Les contrôleurs locaux sont regroupés, chaque groupe ayant son propre contrôleur central. Ces contrôleurs centraux interagissent pour obtenir l'état global du micro-réseau, assurant une communication rapide, particulièrement avantageuse dans des environnements étendus.

Du côté du contrôleur, cette stratégie déploie trois niveaux de contrôles primaire, secondaire et tertiaire instaurant ainsi trois boucles de contrôle. La boucle primaire gère la tension et facilite l'intégration plug-and-Play des sources d'énergie. La boucle secondaire compense les écarts de tension induits par la boucle primaire. La boucle tertiaire, facultative, optimise économiquement l'énergie et contrôle le flux de courant en présence d'un réseau principal [2].

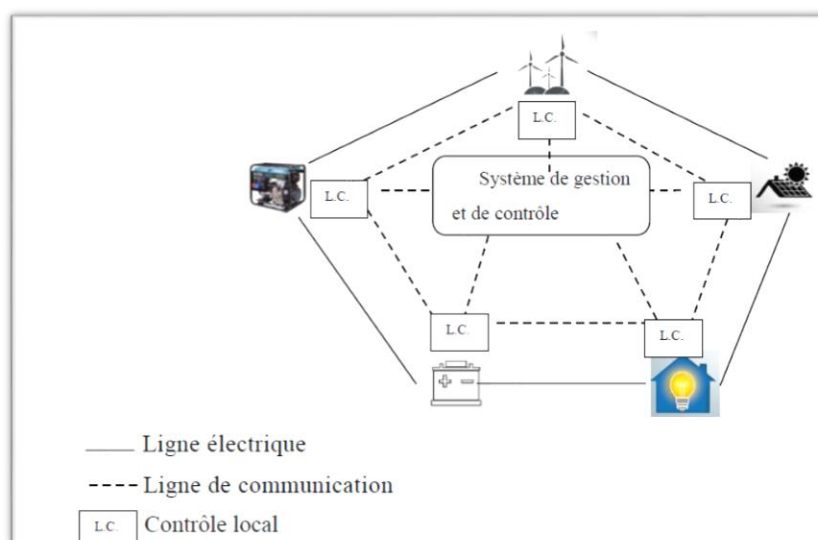


Figure (2.5) : Structure de contrôle distribué [2].

2.10. Concepts généraux de la gestion de l'énergie :

La gestion de l'énergie électrique vise à planifier, superviser et contrôler l'utilisation des ressources énergétiques disponibles afin de satisfaire la demande tout en respectant les contraintes techniques et économiques du système. Dans un micro-réseau, cette gestion concerne principalement :

- La production locale (sources renouvelables et générateurs pilotables),
- Le stockage de l'énergie, notamment par batteries,
- Les échanges d'énergie avec le réseau principal,
- La gestion et l'adaptation de la demande [21].

2.11. La différence entre un contrôle centralisé, décentralisé et distribué :

Tableau (2.1) : Principales caractéristiques, avantages et inconvénients de chaque type de contrôle dans les micro-réseaux [2].

Type de Contrôle	Description	Avantages	Inconvénients
Contrôle Centralisé	Un seul contrôleur central collecte toutes les données et prend les décisions, envoyant les commandes aux dispositifs locaux.	-Simplification de la gestion et de la maintenance -Simplification des algorithmes	-Gestion locale, plus flexible -Réaction rapide aux perturbations locales
Contrôle Décentralisé	Chaque unité de source d'énergie a son propre contrôleur local qui prend des décisions autonomes basées sur les données locales.	-Gestion locale, plus flexible -Réaction rapide aux perturbations locales	-Maintenance plus difficile à coordonner. -Algorithmes locaux plus sophistiqués nécessaires.
Contrôle Distribué	Plusieurs contrôleurs coopèrent pour prendre des décisions basées sur une combinaison de données locales et globales.	-Gestion locale, plus flexible -Réaction rapide aux perturbations locales.	-Complexité de mise en œuvre -Coût élevé pour l'infrastructure de communication.

2.12. Stratégies de gestion d'énergie dans les micro-réseaux :

Les stratégies de gestion d'énergie dans les micro-réseaux visent à optimiser l'utilisation et la distribution de l'énergie. Voici quelques stratégies courantes :

2.12.1. Gestion de la demande d'énergie :

Le concept de la gestion de la demande d'électricité est responsable de la planification, de la mise en œuvre et du contrôle de l'utilisation des installations destinées pour influencer la consommation d'électricité des clients de manière à produire les changements souhaités dans la forme de la charge des services publics, c'est-à-dire des changements dans la configuration temporelle et l'ampleur de la charge des services publics.

Les caractéristiques de base de DSM sont le programme de réponse à la demande (DR) ou changement de charge et l'efficacité énergétique. Par exemple, les utilisateurs résidentiels peuvent réduire leur consommation d'énergie en utilisant des équipements efficaces. La compagnie d'électricité peut fournir des incitations à la gestion des charges et contribuer à la reprise après sinistre. De plus, on peut réduire la consommation d'énergie, en éduquant les utilisateurs et en faisant connaître le marketing sur le sérieux problème posé les heures de pointe. Un programme DSM ne pas forcément garantit le fonctionnement limité des charges, il gère seulement et déplace la charge pour utiliser la même quantité d'énergie mais avec les paiements réduits dus à l'utilisation de centrales à faible coût par génération. Un tarif flexible peut également jouer un rôle plus important dans le DSM en assurant la communication de données en temps réel avec le réseau intelligent. Par exemple, aux États-Unis, un programme efficace de réponse à la demande après sinistre efficace a permis de réduire la demande de pointe de 20% dans certaines régions [20].

2.12.2. Gestion Stockage d'énergie :

La gestion du stockage d'énergie dans les micro-réseaux optimise l'utilisation des batteries pour répondre aux besoins du système électrique. Cela inclut le contrôle des moments de charge et de décharge selon les tarifs, les prévisions de production d'énergie renouvelable et la demande prévue. La gestion des cycles de charge prolonge la durée de vie des batteries. En réduisant les pics de charge, les batteries stabilisent le réseau. Une intégration transparente avec d'autres composants du système est essentielle pour un fonctionnement optimal [2].

2.12.3. Intégration des énergies renouvelables :

- Utilisation des sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, biomasse) pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles.
- Gestion des intermittences des énergies renouvelables à l'aide de systèmes de stockage (batteries, stockage thermique) [21].

2.12.4. Contrôle et automatisation :

- Utilisation des systèmes de gestion de l'énergie (EMS) pour surveiller et contrôler la production et la consommation d'électricité.
- Automatisation des processus pour améliorer la réactivité et la résilience du réseau [21].

2.12.5. Gestion des charges:

Dans un micro-réseau, la gestion des charges consiste à alimenter en priorité les équipements critiques, comme les dispositifs médicaux et les systèmes de sécurité, pour garantir leur fonctionnement continu. Les charges sensibles au temps, nécessaires au confort, reçoivent également une priorité élevée. Cette priorisation assure un approvisionnement énergétique fiable et efficace, minimise les interruptions de service et optimise l'utilisation des ressources disponibles [2].

2.12.6. Intégration avec le réseau principal :

L'intégration des micro-réseaux avec le réseau principal optimise la gestion de l'énergie, renforce la fiabilité et maximise l'utilisation des ressources distribuées. Grâce à des technologies avancées, les micro-réseaux échangent de l'énergie avec le réseau principal, s'adaptant aux fluctuations de la demande et réduisant les coûts de transmission, tout en améliorant la résilience des communautés et créant un système énergétique plus durable [2].

2.13. Les systèmes de protection de la gestion d'énergie dans les micro-réseaux :

La protection des micro-réseaux représente un défi majeur en raison de la présence de sources distribuées, de convertisseurs électroniques de puissance et du fonctionnement en mode connecté ou îloté. Contrairement aux réseaux traditionnels, les niveaux de courant de court-circuit dans un micro-réseau peuvent varier considérablement selon le mode de fonctionnement, ce qui complique la coordination des dispositifs de protection.

En mode îloté, les courants de défaut sont généralement plus faibles en raison de la limitation imposée par les convertisseurs, ce qui peut entraîner une défaillance des dispositifs de protection conventionnels basés uniquement sur le seuil de surintensité. Ainsi, des stratégies de protection adaptative, intégrant des relais intelligents et des systèmes de détection rapides, sont souvent nécessaires pour assurer la sélectivité et la fiabilité du système.

La coordination des protections doit également tenir compte des transitions entre les modes connecté et isolé, afin d'éviter les déclenchements intempestifs et de garantir la continuité d'alimentation des charges critiques. Selon Hatziargyriou (2014), l'intégration de systèmes de protection intelligents et communicants constitue une solution efficace pour améliorer la résilience et la sûreté des micro-réseaux [13].

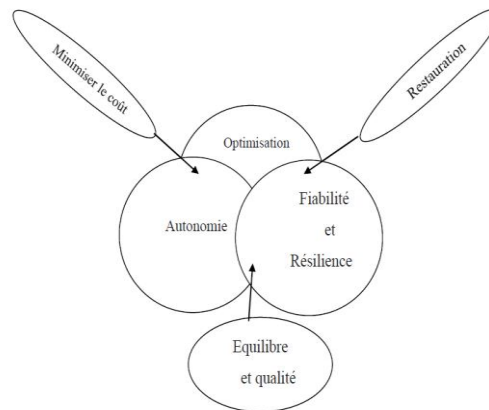


Figure (2.6) : Types de problèmes résolus par le système de gestion d'énergie [2].

2.14. Les étapes de gestion de l'énergie et des stratégies de contrôle :

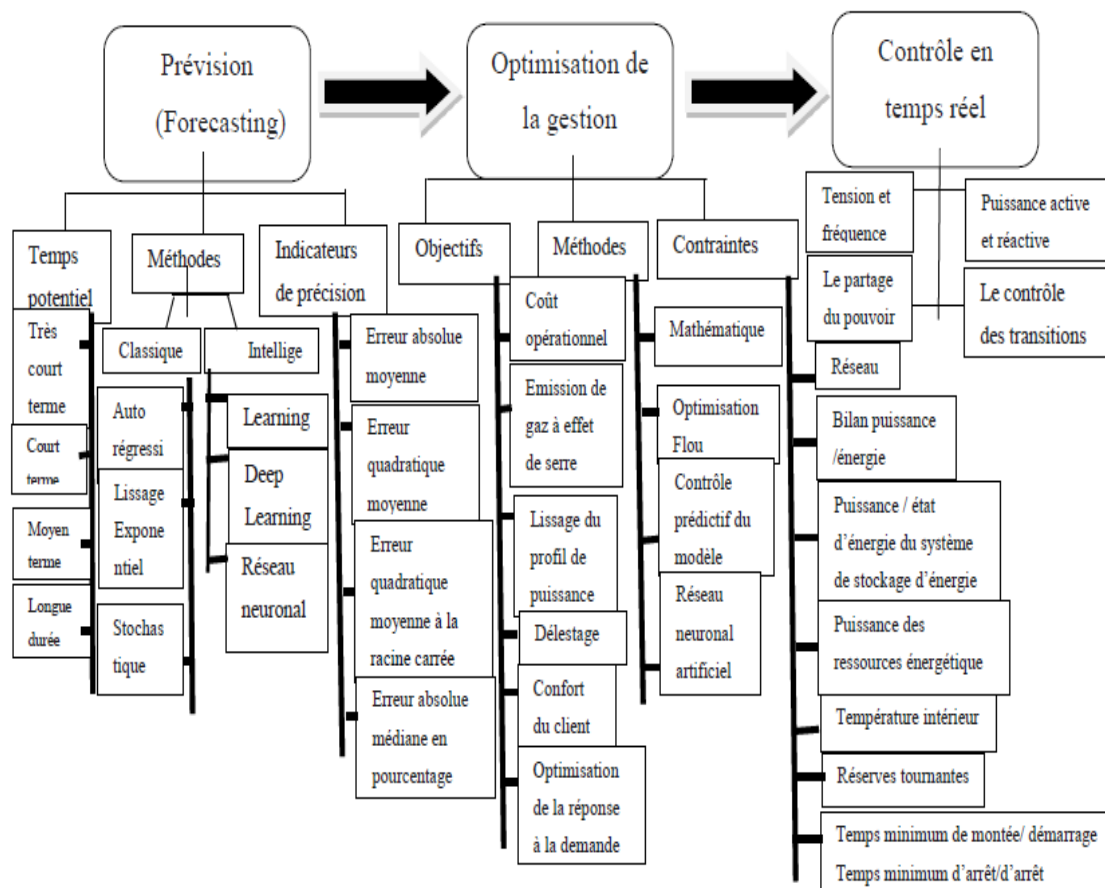


Figure (2.7) : Les étapes de gestion de l'énergie et des stratégies de contrôle [2].

2.14.1. La prévision dans les micro-réseaux (Forecasting) :

La prévision est une méthode permettant de faire des prédictions éclairées en utilisant des données historiques comme principale entrée pour déterminer l'évolution des tendances futures. Les entreprises utilisent les prévisions à de nombreuses fins différentes.

Les données utilisées pour les méthodes de prévision peuvent provenir soit de sources primaires, soit de sources secondaires [2].

Un système de gestion et de contrôle de l'énergie doit garantir que les ressources du micro-réseau sont utilisées de la manière la plus efficace et la plus rentable possible. Pour cela, il doit prévoir trois types de profils avec une précision raisonnable : la demande de charge, la production d'électricité et les prix de l'électricité du réseau. Un système de gestion et de contrôle de l'énergie devra prévoir la consommation de charge pour la journée à venir, analyser les conditions météorologiques prévues et la production ultérieure à partir de sources renouvelables, puis décider quand donner la priorité aux systèmes de stockage d'énergie et aux échanges avec le réseau principal. Cela se traduit par une meilleure stabilité et fiabilité, offrant des profils de puissance fluides [2].

2.14.1.1. Temps potentiel (Time horizon):

L'horizon de prévision d'un micro-réseau varie de quelques minutes à une semaine, selon la méthodologie du système de gestion d'énergie. De nombreux travaux utilisent des données météorologiques pour prévoir la production et la charge, influençant le système de gestion et de contrôle de l'énergie. La littérature existante est comparée et discutée en détail, avec une classification des articles selon les différents horizons de prévision.

- ❖ **Très court terme** (de quelques secondes à une demi-heure) : La prévision de la charge à très court terme est généralement utilisée par les gestionnaires de portefeuille, les négociants en énergie et les opérateurs de systèmes.
- ❖ **Court terme** (une demi-heure à 1h) : Les prévisions à court terme sont utilisées pour planifier le flux d'énergie entre les sources d'énergie, les charges et les dispositifs de stockage.
- ❖ **Moyen terme** (1h-24h) : Les prévisions à moyen et long terme sont respectivement responsables du règlement des prix, de la répartition des charges et de la planification de la maintenance.
- ❖ **Long terme** (1j - 1 semaine) : L'horizon d'investissement à long terme concerne les investissements que l'on s'attend à conserver. Les investisseurs à long terme sont généralement prêts à prendre des risques plus importants en échange de récompenses plus importantes [26].

2.14.1.2. Méthodes de la prévision dans les micro-réseaux :

La prévision est essentielle pour la gestion efficace de l'énergie dans les micro-réseaux, permettant d'anticiper la demande et la production. Les méthodes de prévision, qui estiment les valeurs futures d'une variable à partir de données passées et présentes, sont cruciales pour la prise de décision. Elles se divisent en deux catégories principales : les méthodes classiques et intelligentes, chacune avec ses avantages et inconvénients selon le contexte et les données disponibles.

❖ Méthodes classiques:

En gestion d'énergie des micro-réseaux, les méthodes classiques de prévision utilisent des modèles mathématiques et statistiques, comme les séries temporelles et le lissage, pour estimer les valeurs futures.

Bien que moins flexibles que les méthodes intelligentes, elles sont largement utilisées pour leur simplicité et leur efficacité, permettant des décisions éclairées basées sur des analyses statistiques et des tendances historiques

❖ Méthodes intelligentes :

Dans un environnement commercial incertain, les prévisions sont souvent basées sur le jugement humain et des outils statistiques. Cela a conduit au développement de nombreuses méthodes de prévision au fil des décennies. L'intelligence artificielle intervient pour améliorer la fiabilité des prévisions en utilisant des algorithmes pour analyser les données de l'entreprise et externes, afin d'anticiper les risques potentiels. Cette automatisation des prévisions permet de gagner du temps et de se concentrer sur des tâches à plus forte valeur ajoutée.

Les méthodes intelligentes les plus couramment utilisées dans la prévision :

a) Apprentissage automatique (Machine Learning):

Le Machine Learning, une branche de l'intelligence artificielle, permet aux programmes informatiques d'apprendre et de s'améliorer automatiquement à partir des données qu'ils traitent, sans être explicitement programmés. Dans la prévision, le Machine Learning utilise des techniques statistiques et informatiques pour développer des modèles capables de faire des prédictions précises basées sur des données historiques. Ces modèles sont cruciaux pour la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux, optimisant ainsi l'utilisation des ressources et permettant des décisions éclairées pour assurer un approvisionnement énergétique fiable et efficient [2].

b) L'apprentissage en profondeur (Deep Learning) :

Le Deep Learning est une forme d'intelligence artificielle qui utilise des réseaux de neurones profonds pour modéliser et comprendre des données complexes. Dans la prévision, le Deep Learning peut être utilisé pour analyser des séries temporelles et faire des prédictions précises sur des événements futurs. Cette approche est particulièrement efficace pour la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux, car elle permet d'optimiser l'utilisation des ressources et de prendre des décisions éclairées pour garantir un approvisionnement énergétique fiable et efficace [2].

c) Réseau neuronal artificiel:

Les réseaux neuronaux artificiels, inspirés du cerveau humain, sont utilisés en intelligence artificielle pour prédire des séries temporelles et effectuer des tâches de classification. Ils sont utiles dans la gestion de l'énergie des micro-réseaux pour prédire les valeurs futures en apprenant des données passées [2].

2.14.1.3. Indicateurs de précision:

La précision des prévisions est cruciale pour la prise de décision dans divers secteurs comme les entreprises, l'économie et la finance. Elle permet aux organisations d'utiliser efficacement leurs ressources. Mesurant l'écart entre les valeurs prévues et les résultats réels, la précision évalue la fiabilité des prévisions. Les indicateurs de précision, tels que l'erreur moyenne, aident à évaluer la performance des modèles de prévision et à identifier les domaines à améliorer.

❖ Erreur absolue moyenne (MAE):

L'erreur absolue moyenne est une mesure largement utilisée pour quantifier la précision des prévisions. Elle mesure l'ampleur moyenne des erreurs dans un ensemble de prévisions, fournissant une valeur numérique qui représente l'écart entre les prévisions et les valeurs réelles. L'erreur absolue moyenne est calculée en additionnant les différences absolues entre les valeurs prédites et les valeurs réelles et en divisant par le nombre d'observations.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.1)$$

MAE : l'erreur absolue moyenne.

n : le nombre total des observations ou des échantillons.

y_i : la valeur réelle.

i : l'indice de l'observation.

$\hat{y}_i$: la valeur prédite.

❖ Erreur quadratique moyenne (MSE):

L'erreur quadratique moyenne mesure la dispersion des prédictions par rapport aux valeurs réelles, indiquant une moindre précision si elle est élevée. Calculée en moyennant les carrés des écarts entre les valeurs prédites et réelles, elle est plus sensible aux valeurs aberrantes en raison du carré dans le calcul.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.2)$$

MSE : Erreur quadratique moyenne.

n : le nombre total des observations ou des échantillons.

y_i : la valeur réelle.

i : l'indice de l'observation.

$\hat{Y}_i$: la valeur prédite.

❖ Erreur quadratique moyenne à la racine carrée (RMSE) :

RMSE est une mesure couramment utilisée pour évaluer la précision d'un modèle de prévision ou de prédiction. Elle est calculée en prenant la racine carrée de la moyenne des écarts au carré entre les valeurs réelles et les valeurs prédites. Cela donne une mesure de l'écart moyen entre les valeurs réelles et les valeurs prédites, exprimée dans les mêmes unités que les données originales. En d'autres termes, La RMSE donne une indication de la dispersion des erreurs de prédiction autour de la ligne de régression. Plus la valeur de RMSE est faible, plus le modèle est précis.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.3)$$

❖ Erreur absolue médiane en pourcentage (MAPE) :

L'Erreur Absolue Médiane en Pourcentage est une métrique de précision qui indique la médiane des erreurs absolues en pourcentage des prévisions par rapport aux valeurs réelles. Elle est calculée en prenant la médiane des erreurs en pourcentage de chaque paire de valeurs réelles et prédites, offrant ainsi une mesure robuste et interprétable de l'erreur de prévision.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (2.4)$$

❖ Coefficient de détermination (R^2):

Le coefficient de détermination R^2 est une mesure importante de la qualité de l'ajustement d'un modèle de régression aux données observées. Il fournit des informations sur la proportion de la variance de la variable dépendante qui est expliquée par les variables indépendantes du modèle. Un R^2 élevé indique un bon ajustement du modèle, tandis qu'un R^2 faible indique que le modèle n'explique pas bien la variation de la variable dépendante.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.5)$$

Où :

y_i : est la valeur réelle

$\hat{y}_i$: est la valeur prédite

n : est le nombre d'observations.

$\bar{Y}$: est la moyenne des valeurs réelles.

2.14.2. Optimisation de la gestion d'énergie (EM Optimisation) :

Les micro-réseaux sont constitués de différentes sources de production d'énergie, chacune ayant des coûts et des limitations techniques variables. Pour assurer un approvisionnement continu et une rentabilité, il est essentiel d'exploiter efficacement ces ressources. En mode connecté au réseau, l'objectif est souvent de maximiser les profits en échangeant de l'énergie avec le réseau. En mode îloté, l'objectif peut être l'autonomie maximale sans recourir au réseau. Pour cela, un système de gestion de l'énergie utilise des algorithmes d'optimisation pour planifier l'utilisation des ressources en fonction des objectifs prédéfinis

2.14.2.1. Objectifs de l'optimisation de gestion d'énergie :

L'optimisation de la gestion d'énergie peut impliquer plusieurs objectifs simultanément qui peuvent parfois être contradictoires [2].

a) Coût opérationnel :

Les coûts opérationnels en optimisation de la gestion de l'énergie désignent les dépenses pour l'exploitation et la maintenance des systèmes énergétiques, incluant les coûts de production, distribution et gestion de l'énergie. L'objectif est de les minimiser tout en assurant un niveau de service et de performance satisfaisant.

b) Emissions de gaz à effet de serre :

La réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cela implique généralement l'optimisation de l'utilisation des ressources énergétiques pour minimiser les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre associés à la production et à la consommation d'énergie. L'objectif est de contribuer à la lutte contre le changement climatique en réduisant l'empreinte carbone des activités énergétiques.

c) Lissage du profil de puissance :

Le lissage du profil de puissance vise à réduire les fluctuations de la puissance électrique générée ou consommée sur une période donnée. Cela implique d'ajuster la production ou la consommation d'énergie pour maintenir un niveau de puissance plus constant, contribuant ainsi à stabiliser le réseau électrique. En utilisant des techniques telles que le stockage d'énergie, la planification de la charge et la gestion active des sources de production, le lissage du profil de puissance peut aider à atténuer les pointes et les creux de puissance, réduisant ainsi les coûts d'exploitation, améliorant l'efficacité énergétique et assurant la stabilité du réseau.

d) Délestage :

Le délestage est une pratique de gestion de l'énergie utilisée pour réduire la charge sur un réseau électrique lorsque celui-ci est surchargé ou confronté à des contraintes techniques. Les opérateurs peuvent déconnecter temporairement certains consommateurs ou réduire leur consommation pour rétablir l'équilibre entre l'offre et la demande. Cette mesure est utilisée en dernier recours pour éviter les pannes généralisées et garantir la stabilité du système électrique.

e) Confort du client :

Le "confort du client" concerne la satisfaction et le bien-être des clients en matière d'utilisation de l'énergie. En optimisant la gestion de l'énergie, cela signifie fournir un approvisionnement fiable pour répondre aux besoins tout en maintenant des conditions de confort adéquates, comme la température et l'éclairage. Cela peut impliquer la régulation de la température, la gestion de l'éclairage et des appareils électriques, tout en fournissant de l'énergie de manière fiable et efficace. L'objectif est d'assurer un confort optimal tout en minimisant les coûts et l'impact environnemental.

2.14.2.2. Méthodes de l'optimisation de gestion d'énergie :

Les méthodes d'optimisation de la gestion d'énergie comprennent diverses approches pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes énergétiques. La méthode mathématique utilise des modèles mathématiques pour résoudre les problèmes d'allocation et d'utilisation des ressources énergétiques. L'optimisation floue gère les variables imprécises en offrant des solutions flexibles. Les réseaux neuronaux artificiels prédisent la demande future en analysant les données historiques, tandis que le système multi-agent décentralise la prise de décision pour une gestion énergétique plus adaptative et efficace [2].

2.14.2.3. Contraintes :

Les contraintes de l'optimisation de la gestion d'énergie sont des limitations influençant l'utilisation efficace des ressources énergétiques. Elles comprennent les contraintes liées au réseau, le bilan puissance/énergie, la puissance des systèmes de stockage d'énergie et des ressources énergétiques distribuées, la température intérieure, les temps minimums de montée/démarrage et d'arrêt, ainsi que la disponibilité des véhicules électriques. En tenant compte de ces contraintes, il est possible d'optimiser les systèmes énergétiques pour répondre aux besoins tout en maximisant l'utilisation des ressources disponibles [2].

2.14.3. Contrôle à temps réel :

Le contrôle en temps réel des micro-réseaux est crucial pour maintenir leur stabilité, régulant la tension, la fréquence et la puissance selon des valeurs prédéfinies. Il peut être effectué par le système de contrôle des ressources distribuées (DER) ou de manière centralisée, englobant des aspects tels que le contrôle de la tension et de la fréquence, la gestion de la puissance des DER, le partage d'énergie et la gestion des transitions du micro-réseau.

La tension et la fréquence sont des paramètres essentiels pour la stabilité du réseau électrique, tandis que la puissance active représente l'énergie réellement utilisée et la puissance réactive est nécessaire pour maintenir la tension. Le partage de puissance optimise l'allocation des ressources, et le contrôle des transitions assure une transition fluide entre les modes de fonctionnement du système énergétique, garantissant une performance sûre et efficace [2].

2.15. Intelligence artificielle pour la gestion d'énergie dans les micro-réseaux :

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la gestion des micro-réseaux représente une évolution majeure vers des systèmes énergétiques autonomes et adaptatifs. Contrairement aux approches déterministes classiques, les méthodes basées sur l'IA sont capables d'apprendre à partir des données historiques et de s'adapter aux variations imprévisibles de l'environnement.

Les techniques telles que les réseaux neuronaux artificiels, l'apprentissage profond et l'apprentissage par renforcement permettent d'améliorer significativement la précision des prévisions et l'efficacité des décisions opérationnelles.

Toutefois, ces approches présentent également certaines limites, notamment en termes de complexité computationnelle, de besoin en données massives et d'interprétabilité des modèles, ce qui nécessite une analyse rigoureuse avant leur intégration dans un cadre réel [2].

2.15.1. Prédiction de la demande énergétique :

L'intelligence artificielle peut analyser les données historiques de consommation pour prédire les besoins énergétiques futurs, aidant ainsi à planifier la production et le stockage d'énergie.

2.15.2. Optimisation de la production d'énergie :

En fonction des prévisions de demande et des conditions météorologiques, l'intelligence artificielle peut ajuster la production d'énergie des sources renouvelables telles que le solaire et l'éolien pour maximiser l'efficacité.

2.15.3. Gestion du stockage d'énergie :

L'intelligence artificielle peut décider du moment optimal pour stocker ou décharger de l'énergie dans les batteries, en tenant compte des coûts d'électricité, des conditions du marché et des besoins du réseau.

2.15.4. Planification de la maintenance :

En surveillant les performances des équipements et en détectant les signes de défaillance potentielle, l'intelligence artificielle peut recommander des interventions de maintenance préventive pour minimiser les temps d'arrêt non planifiés.

2.15.5. Optimisation de la distribution d'énergie :

En analysant les modèles de consommation en temps réel, l'intelligence artificielle peut optimiser la distribution d'énergie dans le micro-grid pour éviter les congestions et réduire les pertes.

L'objectif principal de l'intelligence artificielle est de créer des systèmes informatiques capables de réaliser des tâches qui nécessitent normalement l'intelligence humaine. Cela inclut des capacités telles que la perception, la compréhension, l'apprentissage, la prise de décision et la résolution de problèmes.

L'intelligence artificielle dans la gestion d'énergie dans les micro-réseaux vise à optimiser l'utilisation des ressources énergétiques disponibles afin de garantir une alimentation électrique fiable, efficace et économique [27].

2.15.5.1. Optimisation de la consommation d'énergie :

Maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelables et minimiser la dépendance aux combustibles fossiles en ajustant la production et la consommation d'énergie en temps réel.

2.15.5.2. Réduction des coûts :

Réduire les coûts d'exploitation en optimisant l'utilisation des ressources énergétiques disponibles, en minimisant les pertes et en évitant les pics de demande coûteux.

2.15.5.3. Fiabilité du réseau :

Assurer une alimentation électrique continue en anticipant les pannes potentielles, en optimisant la distribution d'énergie et en planifiant la maintenance des équipements de manière proactive.

2.15.5.4. Intégration des énergies renouvelables :

Faciliter l'intégration en douceur des sources d'énergie renouvelables variables telles que l'énergie solaire et éolienne dans le réseau, en optimisant leur utilisation et leur stockage.

2.15.5.5. Durabilité environnementale :

Réduire l'empreinte carbone en favorisant l'utilisation de sources d'énergie propres et en optimisant l'efficacité énergétique du micro-réseau [27].

2.16. Conclusion :

La gestion de l'énergie électrique constitue un élément central dans le fonctionnement efficace et fiable des micro-réseaux. Face à la variabilité des sources renouvelables, à la fluctuation de la demande et aux contraintes techniques du système, la mise en place d'un système de gestion de l'énergie performant s'avère indispensable pour assurer l'équilibre entre production et consommation.

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les fondements théoriques de la gestion énergétique, en abordant son évolution historique, ses définitions générales ainsi que son architecture fonctionnelle. Les différentes structures de contrôle — centralisée, décentralisée et distribuée — ont été analysées afin de mettre en évidence leurs avantages et leurs limites dans le contexte des micro-réseaux. Nous avons également étudié les principales stratégies de gestion, notamment la gestion de la demande, le stockage d'énergie, l'intégration des énergies renouvelables et les mécanismes de protection.

Par ailleurs, l'importance de la prévision dans les micro-réseaux a été mise en évidence, en présentant les différents horizons temporels ainsi que les méthodes classiques et intelligentes utilisées pour améliorer la précision des prédictions.

Enfin, les techniques d'optimisation et l'apport de l'intelligence artificielle ont été introduits comme des outils essentiels pour améliorer la performance économique, technique et environnementale des systèmes énergétiques modernes.

Ainsi, la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux ne se limite pas à un simple contrôle opérationnel, mais constitue un processus décisionnel complexe intégrant prévision, optimisation et adaptation en temps réel.

Dans le chapitre suivant, nous approfondirons l'aspect optimisation de la gestion de l'énergie, en développant les modèles mathématiques et les techniques algorithmiques permettant d'atteindre des objectifs spécifiques tels que la minimisation des coûts, la réduction des émissions et l'amélioration de la stabilité du système.

3.1. Introduction :

Dans un contexte mondial caractérisé par une transition énergétique accélérée, la décarbonation progressive des systèmes électriques et l'intégration massive des énergies renouvelables, les réseaux électriques traditionnels connaissent une transformation structurelle profonde. La dépendance croissante aux sources d'énergie intermittentes, telles que le solaire photovoltaïque et l'éolien, modifie considérablement les schémas classiques de production centralisée et impose de nouveaux défis techniques et économiques.

Dans cette dynamique, les micro-réseaux (Microgrids) se présentent comme une solution innovante et flexible permettant d'intégrer efficacement les ressources énergétiques distribuées. Un micro-réseau est un système électrique local capable de fonctionner de manière connectée au réseau principal ou en mode îloté, assurant ainsi une continuité d'alimentation même en cas de perturbations externes. Cette architecture offre des avantages significatifs en termes de résilience, de fiabilité, de réduction des pertes et d'amélioration de l'autoconsommation locale.

Cependant, malgré ces avantages, la gestion énergétique d'un micro-réseau demeure un problème complexe. La variabilité et l'incertitude associées aux sources renouvelables entraînent des fluctuations imprévisibles de la production, qui ne coïncident pas toujours avec la demande instantanée des charges. Par ailleurs, les systèmes de stockage d'énergie, bien qu'essentiels pour compenser ces déséquilibres, sont soumis à des contraintes opérationnelles strictes, notamment les limites d'état de charge, les rendements de conversion et la dégradation liée aux cycles charge/décharge. À cela s'ajoutent les contraintes économiques (coût d'achat et de vente d'électricité, coût du carburant des générateurs diesel) ainsi que les exigences environnementales visant à réduire les émissions de CO₂.

Face à ces multiples contraintes, les stratégies classiques basées sur des règles fixes ou des seuils prédéfinis apparaissent insuffisantes pour garantir une exploitation optimale du système. C'est dans ce cadre que l'optimisation mathématique devient un outil central de la gestion énergétique moderne. Elle permet de formaliser le fonctionnement du micro-réseau sous la forme d'un problème mathématique structuré, comprenant une fonction objective (minimisation du coût total, des pertes énergétiques ou des émissions, maximisation de la pénétration renouvelable) et un ensemble de contraintes techniques (équilibre de puissance, limites de tension et de fréquence, contraintes des équipements).

L'optimisation offre ainsi la possibilité de déterminer, sur un horizon temporel donné, la meilleure stratégie de répartition de puissance entre les différentes sources de production, le stockage et les charges.

Cette approche peut être appliquée aussi bien en mode connecté — où le réseau principal agit comme source d'appoint et moyen d'échange énergétique — qu'en mode îloté, où la fiabilité et la stabilité du système deviennent prioritaires. Dans ce dernier cas, l'optimisation doit assurer en permanence l'équilibre production-consommation en s'appuyant exclusivement sur les ressources locales disponibles.

De plus, les avancées récentes en méthodes d'optimisation — qu'elles soient déterministes, heuristiques ou métaheuristiques — permettent aujourd'hui d'intégrer des modèles prédictifs, des scénarios d'incertitude et des stratégies de gestion dynamique telles que le contrôle prédictif (Model Predictive Control). Ces approches améliorent considérablement la performance globale du micro-réseau, tant sur le plan économique qu'environnemental.

Ainsi, l'optimisation de la gestion énergétique constitue un levier stratégique pour le développement de micro-réseaux intelligents, durables et performants, notamment dans les régions à fort potentiel solaire et éolien. Elle permet non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi de contribuer activement aux objectifs de transition énergétique et de réduction des émissions.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter de manière structurée les fondements théoriques de l'optimisation appliquée aux micro-réseaux. Il introduit les concepts généraux de l'optimisation, les différentes classifications des problèmes, les principales méthodes utilisées dans la littérature ainsi que la modélisation mathématique des composants du micro-réseau. Cette base théorique constitue une étape essentielle avant l'implémentation pratique des algorithmes d'optimisation et l'analyse des résultats qui seront développées dans le chapitre suivant.

3.2. Définition de l'optimisation :

L'optimisation est une discipline des mathématiques appliquées qui vise à déterminer la meilleure solution parmi un ensemble de solutions admissibles, en minimisant ou en maximisant une fonction objective, sous un ensemble de contraintes définissant le domaine de faisabilité. Elle repose sur la modélisation mathématique d'un problème réel, consistant à représenter les variables de décision, les relations fonctionnelles et les limitations techniques ou physiques du système étudié.

De manière formelle, un problème d'optimisation consiste à rechercher un vecteur de variables de décision appartenant à un espace admissible, tel que la fonction objectif représentant par exemple un coût, une perte énergétique, un rendement ou une performance atteigne une valeur optimale (minimum ou maximum). L'ensemble des contraintes peut inclure des égalités, des inégalités, des bornes sur les variables ou des conditions structurelles spécifiques.

L'optimisation joue un rôle fondamental dans de nombreux domaines scientifiques et industriels, notamment en ingénierie des systèmes électriques, en économie, en logistique et en recherche opérationnelle. Le choix de la méthode de résolution dépend fortement de la nature du problème considéré : linéaire ou non linéaire, convexe ou non convexe, continu ou discret, mono-objectif ou multi-objectif. Pour les problèmes de grande dimension ou appartenant à la classe des problèmes NP-difficiles, il n'existe généralement pas d'algorithme universel garantissant une solution optimale en temps polynomial.

Dans ces cas, des approches approximatives, heuristiques ou métaheuristiques sont souvent employées afin d'obtenir des solutions quasi-optimales dans un temps de calcul raisonnable [29].

3.3. Historiques:

Apparue au cours du XXe siècle avec le développement des sciences industrielles, de la planification et des technologies émergentes, l'optimisation a connu une évolution significative grâce aux progrès de l'informatique, qui ont permis la mise en œuvre efficace de méthodes algorithmiques performantes. Aujourd'hui, elle occupe une place fondamentale dans de nombreux domaines, notamment en ingénierie, où elle est largement utilisée pour l'optimisation des ressources, des coûts et des performances des systèmes complexes. Le choix de la méthode d'optimisation dépend étroitement de la nature et du degré de complexité du problème à traiter, en particulier pour les problèmes de grande dimension ou de type NP-difficile, pour lesquels il n'existe pas de solution universelle [30].

3.4. L'optimisation de la gestion d'un réseau électrique :

Consiste à déterminer, à l'aide de méthodes mathématiques et numériques, la meilleure configuration de fonctionnement du système (production, transport, distribution, gestion de la charge) afin de minimiser ou maximiser un ou plusieurs critères (coût, pertes de puissance, qualité de tension, fiabilité, émissions, etc.), tout en respectant les contraintes techniques, physiques et de sécurité du réseau [31].

3.5. La classification des problèmes d'optimisation :

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés selon :

3.5.1. La forme de la fonction objective :

❖ Optimisation linéaire :

La fonction objective et les contraintes linéaire.

- Optimisation linéaire (LP).
- Optimisation non linéaire (NLP).
- Optimisation quadratique.

❖ Optimisation non linéaire :

Au moins l'objectif ou une contrainte est non linéaire (minimisation de pertes, rendement, etc.).

- Variables continues.
- Variables discrètes/binaires.
- Optimisation mixte (MILP).

❖ Optimisation quadratique :

Un cas particulier de non linéaire où l'objectif est quadratique et les contraintes linéaires.

3.5.2. Les contraintes :

❖ Problèmes sans contraintes :

Seules les variables sont libres, on cherche un minimum ou un maximum local/globale.

❖ Problèmes avec contraintes :

- Contraintes d'égalité (ex : bilan de puissance).
- Contraintes d'inégalité (ex : bornes de tension, puissance maximale).
- Éventuellement contraintes mixtes.

3.5.3. L'objectif :

❖ Problème mono-objectif :

Une seule fonction à optimiser (ex : coût uniquement, pertes uniquement).

❖ Problème multi-objectif :

Plusieurs objectifs conflictuels (ex : minimiser coût et minimiser émissions), ce qui donne un ensemble de solutions optimales non dominées plutôt qu'une solution unique.

3.5.4. La nature des variables :

❖ Variables continues :

Intervalles continus (ex : puissance, tension, fréquence).

❖ Variables discrètes/binaires :

Choix de topologie, états On/Off, nombre d'un équipement ; on parle alors d'optimisation discrète ou combinatoire.

❖ Optimisation mixte (PLM) :

Mélange de variables continues et discrètes.

3.5.5. Le temps (dynamique / statique) :

❖ Optimisation statique :

On cherche un réglage ou une configuration unique pour un instant donné.

❖ Optimisation dynamique :

On optimise un profil sur un horizon de temps (ex : EMP, gestion prédictive sur 24 h) [32].

3.6. Problématique de l'optimisation énergétique dans les micro-réseaux :

L'intégration croissante des énergies renouvelables intermittentes (solaire, éolien) dans les micro-réseaux rend la gestion de l'énergie plus complexe, car la production ne suit plus un schéma prévisible et mal synchronisé avec la demande.

Par ailleurs, la gestion classique basée sur des règles fixes (logique de type "on-off" ou seuils simples) ne permet pas d'exploiter au mieux les ressources (génération, stockage, charge flexible) ni de répondre dynamiquement aux variations de production et de charge. Les défis principaux sont [8].

- ✓ Variabilité de la production.
- ✓ Incertitude de la demande.
- ✓ Contraintes techniques des batteries.
- ✓ Coût énergétique variable.

3.7. Objectifs de l'optimisation de la gestion de l'énergie dans un micro-réseau :

L'optimisation de la gestion de l'énergie dans un micro-réseau vise à atteindre plusieurs objectifs simultanés, notamment la minimisation du coût d'exploitation, la réduction des pertes et des émissions de CO₂, la maximisation de l'utilisation des énergies renouvelables, l'amélioration de la fiabilité et de la stabilité du système, ainsi que la prolongation de la durée de vie des batteries de stockage [33].

Tableau (3.1) : Objectifs de l'optimisation de la gestion de l'énergie dans un micro-réseau [34].

Objectif d'optimisation	Description succincte
Minimisation du coût total d'exploitation	Réduction des coûts d'énergie, de carburant et de gestion des pics
Réduction des pertes énergétiques	Diminution des pertes sur lignes, équipements et convertisseurs
Maximisation de l'utilisation des énergies renouvelables	Augmentation de l'auto-consommations solaire/éolien et réduction des rejets.
Réduction des émissions de CO ₂	Limitation des générateurs fossiles et amélioration du mix énergétique.
Amélioration de la fiabilité et de la stabilité	Garantie de continuité de service, qualité de tension/fréquence, fonctionnement en îlot.
Prolongation de la durée de vie des batteries	Optimisation des cycles charge/décharge pour limiter l'usure.

3.8. Optimisation de l'efficacité énergétique via les micro-réseaux :

Le tableau ci-dessous synthétise les principaux leviers par lesquels les micro-réseaux contribuent à l'optimisation de l'efficacité énergétique, en intégrant les aspects techniques, économiques et environnementaux.

Tableau (3.2) : contribution des micro-réseaux à l'optimisation de l'efficacité énergétique [34].

Aspect de l'efficacité énergétique	Rôle du micro-réseau	Impact sur l'optimisation
Intégration des énergies renouvelables	Agrège les sources solaires, éoliennes et autres renouvelables près de la charge, réduisant les pertes de transport.	Maximise l'auto-consommations locale et limite les rejets, améliorant le rendement global du système.
Gestion optimisée de la production	Coordonne production, stockage et charge via dispatching, MPC, optimisation robuste,	Réduit coût, pertes et émissions tout en respectant les contraintes techniques et de fiabilité.
Stockage et arbitrage énergétique	Utilise batteries et stockage pour lisser la production et éviter les pics.	Diminue gaspillage et transfère l'énergie aux périodes de forte demande ou de prix élevé
Gestion de la demande (demand-response)	Ajuste ou déplace les charges flexibles selon production, prix et état du réseau	Réduit les pics de puissance, améliore l'utilisation des équipements et la stabilité.
Réduction de la dépendance aux énergies fossiles	Limite le recours aux groupes diesel et au réseau fossile.	Diminue coût de combustible, émissions de CO ₂ et dépendance énergétique.
Outils d'optimisation avancés	Utilise PL, PLM, MPC, optimisation multi-objectif, essaims de particules, etc.	Permet des décisions optimales en temps réel ou sur horizon de planification, sous contraintes et incertitudes.

3.9. Pourquoi optimiser la gestion dans les micro-réseaux ?

3.9.1. Intégrer efficacement les énergies renouvelables :

Les micro-réseaux exploitent de plus en plus de sources solaires et éoliennes, fortement intermittentes, dont la production ne suit pas toujours la demande [35].

3.9.2. Réduire le coût de l'énergie :

Un micro-réseau peut s'alimenter depuis le réseau principal, des groupes diesel, ou des sources locales + stockage. Des méthodes d'optimisation (dispatching, gestion prédictive, MPC, etc.) permettent de minimiser le coût global d'exploitation en choisissant intelligemment la source et en gérant stockage et charge [35].

3.9.3. Améliorer la fiabilité et la stabilité :

Le micro-réseau doit rester stable en modes connecté et îloté, avec des contraintes fortes de tension, fréquence et continuité d'alimentation [35].

3.9.4. Réduire les pertes énergétiques :

Les pertes actives augmentent sur les lignes, les convertisseurs, les batteries et les équipements de puissance si la gestion n'est pas coordonnée. L'optimisation de la répartition de puissance, de la tension et de l'utilisation des équipements permet de limiter ces pertes et d'améliorer le rendement global du micro-réseau [35].

3.9.5. Réduire les émissions de CO₂ :

L'objectif environnemental est de limiter la part des générateurs fossiles dans le mix de production, tout en maintenant la sécurité d'approvisionnement [35].

L'optimisation de la gestion énergétique (priorisation des renouvelables, stockage, gestion de la demande) aide à réduire les émissions de CO₂ et à contribuer aux engagements de transition énergétique [35].

3.9.6. Gérer la demande intelligemment (Demand-Response) :

Une partie des charges peut être flexible (HVAC, batteries de VE, certains équipements industriels), et donc déplacée dans le temps. L'optimisation de la gestion de la demande permet de lisser les pics de puissance, d'améliorer l'utilisation des équipements et de renforcer la stabilité du micro-réseau [35].

3.9.7. Prolonger la durée de vie des équipements :

Les batteries et les groupes diesel vieillissent plus vite en cas de cycles de charge/décharge mal dimensionnés ou sous profondes décharges [35].

3.10. Méthodes d'optimisation appliquées à la gestion énergétique :

L'optimisation de la gestion énergétique dans les micro-réseaux peut être réalisée à l'aide de différentes techniques mathématiques, déterministes ou heuristiques, selon la nature du problème et le niveau de complexité du système étudié. Le choix de la méthode dépend généralement de la structure de la fonction objectif, du type de contraintes et du degré d'incertitude associé à la production renouvelable et à la demande [33].

3.10.1. Méthodes déterministes :

3.10.1.1. Programmation Linéaire (LP) :

La programmation linéaire (Linear Program – LP), qui constitue une classe de problèmes d'optimisation convexe, forme la base des formulations d'optimisation présentées dans ce travail. La fonction objective ainsi que les contraintes dans un problème de programmation linéaire prennent la forme de fonctions linéaires ou affines.

Un problème typique de programmation linéaire comportant n variables de décision peut s'écrire sous la forme suivante :

$$C^t x \quad \min x \quad (3.1)$$

Sous les contraintes :

$$b \geq Ax \quad (3.2)$$

$$beq = Aeqx \quad (3.3)$$

Où :

- $C \in R^n$: Le vecteur des coefficients de la fonction coût linéaire
- $x \in R^n$: Est le vecteur des variables d'optimisation
- $A \in R^{p \times n}$: Est la matrice des coefficients associée aux p contraintes linéaires d'inégalité
- $b \in R^p$: Est le vecteur du second membre des p contraintes d'inégalité
- $Aeq \in R^{q \times n}$: Est la matrice des coefficients associée aux q contraintes linéaires d'égalité
- $beq \in R^q$: Est le vecteur du second membre des q contraintes d'égalité

Les solveurs de programmation linéaire utilisent généralement l'algorithme du simplexe ou les méthodes à points intérieurs (Interior-Point Methods) afin de résoudre des problèmes de la forme présentée en (3.1).

3.10.1.2. Programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) :

La programmation linéaire en nombres entiers étudie les programmes linéaires dans lesquels certaines ou toutes les variables sont contraintes à prendre des valeurs entières. Ces problèmes peuvent être résolus par différentes méthodes : séparation et évaluation, plans sécants.

La PLNE est un problème NP-complet car de nombreux problèmes NP-complets peuvent être exprimés comme des PLNE (par exemple trouver un stable dans un graphe $G = (V, E)$ revient à trouver un vecteur $x \in \{0, 1\}^E$ satisfaisant $x_u + x_v \leq 1$ pour tout arête $(u, v) \in E$. Bien entendu, les algorithmes décrits ci-dessus pour la PL ne résolvent pas les problèmes de PLNE.

Algorithmiquement donc, la résolution d'un PLNE est autrement plus difficile celle d'un PL qui joue pourtant un rôle crucial quant à leur résolution, principalement pour deux raisons. Premièrement, la relaxation continue d'un PLNE (c'est le PLNE sans les contraintes d'intégrité) est un PL qui peut être résolu efficacement et fournir ainsi une borne relaxation (dans le sens non-réalisable). Les algorithmes de résolution de PLNE, tels que les algorithmes par séparation et évaluation se basent sur cette relaxation continue pour diminuer au maximum l'énumération des solutions.

Deuxièmement, le théorème Optimisation/Séparation de Grötschel, Lovasz *et* Schrijver permet de résoudre en pratique par la PL les problèmes entiers dont on connaît une bonne description polyédrale (c'est-à-dire dont on peut séparer les contraintes en temps polynomial). C'est le principe de fonctionnement des algorithmes de plans sécants [37].

3.10.1.3. Programmation non-linéaire :

La programmation non-linéaire (ou NLP) est une méthode permettant de résoudre de nombreuses équations et inéquations dépendant d'un ensemble de paramètres - on parle de « contraintes » sous la forme d'une fonction à maximiser ou à minimiser. Cette fonction ou l'ensemble de ses paramètres peuvent être non-linéaires.

Formulation mathématique

On a une fonction $f : X \rightarrow R$, avec $X \subseteq R^n$. L'objectif est de déterminer le réel X défini par :

$$x \in X; f(x) = \min_{x \in X} f(x) \quad (3.4)$$

De façon équivalente, on peut rechercher la valeur pour laquelle f est maximale [37].

$$x \in X; f(x) = \max_{x \in X} f(x) \quad (3.5)$$

3.10.2. Les méthodes heuristiques :

Les méthodes heuristiques : utilisent des règles simples pour gérer l'énergie dans le micro-réseau. Elles sont caractérisées par leur simplicité, fiabilité et efficacité computationnelle, ce qui les rend adaptées aux petits micro-réseaux et au contrôle en temps réel. Un exemple typique est le contrôle par bande d'hystérésis (HBC) pour les systèmes de stockage d'énergie (ESS), qui régule le fonctionnement en fonction de l'état de charge (SoC) et permet de compenser rapidement le déséquilibre entre production et demande. Toutefois, l'ajout de plusieurs ESS et de règles complexes peut augmenter la complexité et rendre la solution sous-optimale en termes de coûts [38].

3.10.3. Approches métaheuristiques :

Les métaheuristiques sont des méthodes qui combinent différentes techniques heuristiques pour approximer la solution optimale à un problème complexe d'optimisation, en s'inspirant de l'évolution biologique, des algorithmes génétiques ou de mécanismes statistiques. Elles sont particulièrement adaptées aux problèmes non convexes ou comportant un grand nombre de variables et de contraintes, où les méthodes classiques deviennent inefficaces.

Dans le domaine des micro-réseaux, plusieurs métaheuristiques sont couramment utilisées : Tabu Search (TS), Algorithmes génétiques (GA), Optimisation par essaim particulaire (PSO) et Réseaux de neurones artificiels (ANN).

Par exemple, la PSO a été appliquée pour gérer en temps réel un micro-réseau hybride en mode îloté, permettant de minimiser le coût de production, d'améliorer l'efficacité des micro-turbines et de réduire les émissions polluantes.

Cependant, ces méthodes présentent des limites : elles ne garantissent pas l'optimalité globale, peuvent nécessiter un temps de calcul important, avoir une formulation complexe et produire des résultats variables à chaque exécution en raison de leur nature stochastique [38].

3.11. Modélisation du micro-réseau pour l'optimisation :

3.11.1. Modèle des sources de production :

3.11.1.1. Model du générateur solaire photovoltaïque :

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} , tel que le montre le schéma électrique équivalent de la figure (3.1).

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [38].

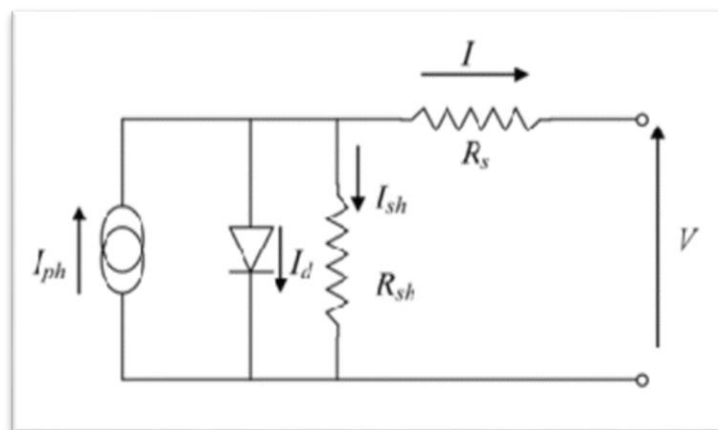


Figure (3.1) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [39].

D'où on peut écrire l'équation suivant :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (3.6)$$

Avec :

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{V+I R_s}{n K T}} - 1 \right] \quad (3.7)$$

$$I_r = \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (3.8)$$

Donc

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+I R_s}{n K T}} - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (3.9)$$

Avec I est le courant de sortie de la cellule photovoltaïque, V est la tension de sortie de la cellule photovoltaïque, I_{sh} est le photo-courant produit, I_0 est le courant de saturation de la diode d , n sont les facteurs de pureté de la diode, R_s et R_{sh} sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle, T est la température absolue en Kelvin, q est la charge élémentaire constante et k est la constante de Boltzmann [37].

3.11.1.2. Modélisation éolienne :

La production d'énergie éolienne dépend de l'interaction entre le rotor et la vitesse du vent. La puissance extraite par les pales peut être calculée par l'équation (3.9) telle qu'elle est couramment exprimée dans la littérature.

$$\rho_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V v^3 \quad (3.10)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air (1,22 Kg/m en conditions normales), R_t est la longueur des pales et V_v est la vitesse du vent. Dans un système éolien, en raison de diverses pertes, la puissance extraite de la turbine est inférieure à la puissance cinétique du vent. Elle est exprimée par :

$$\rho_t = \frac{1}{2} \rho \pi R_t C_p(\lambda, \beta) V v^3 \quad (3.11)$$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est fonction du rapport de vitesse optimal (TSR) λ et l'orientation des pales β , il exprime l'efficacité aérodynamique de la turbine et définit comme étant le rapport entre la puissance captée par la turbine et la puissance du vent, il est donné par l'équation suivante [10] :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (3.12)$$

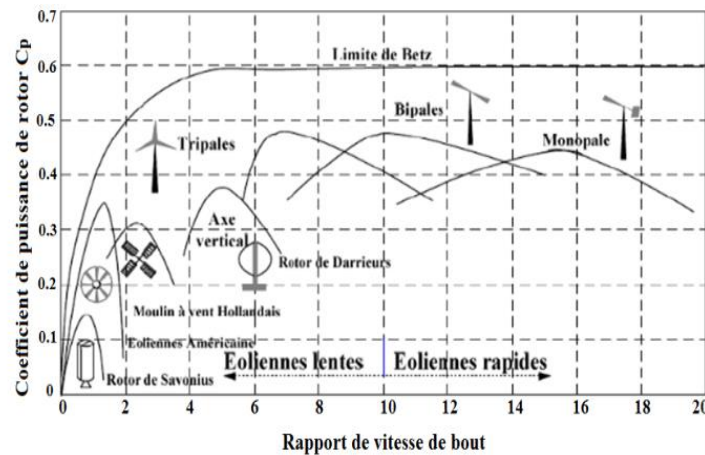


Figure (3.2) : Coefficient de puissance pour différents types d'éolienne [37].

3.11.1.3. Modélisation des générateurs :

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion de l'énergie (Mécanique, photonique, chimique...) vers une forme électrique.

Ils peuvent fournir, ou consommer, de l'énergie active ou réactive et ils peuvent maintenir un niveau de tension désirée.

Un générateur est représenté par une source de tension constante montré par la figure (3.3) ci-dessous : [37]

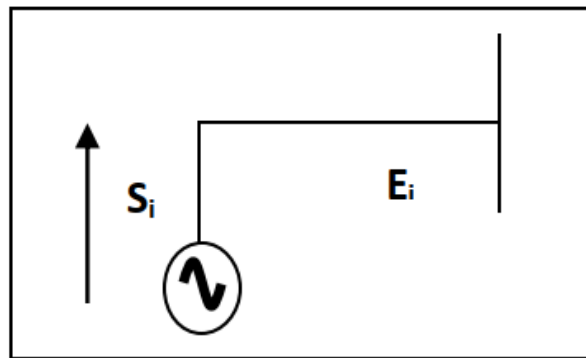


Figure (3.3) : Modélisation d'un générateur [37].

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (3.13)$$

$$V_i = |V_i| e (j \delta i) \quad (3.14)$$

S_i : la puissance apparente délivrée par le générateur.

V_i : la tension simple entre phase et neutre du générateur.

3.11.2. Modèle du système de stockage d'énergie (ESS) :

Le système de stockage d'énergie est modélisé pour gérer les cycles de charge et de décharge de la batterie, assurant un stockage et une récupération efficaces de l'énergie.

Le modèle de la batterie inclut des paramètres tels que l'état de charge (SoC), les limites maximales et minimales de charge, ainsi que l'efficacité de charge/décharge.

L'état de charge de la batterie est mis à jour selon l'équation suivante :

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t-1) + \frac{P_{\text{bat}}(t) \times \eta_{\text{bat}}}{E_{\text{bat}}} \quad (3.15)$$

Où :

- $P_{\text{bat}}(t)$: Est la puissance entrant ou sortant de la batterie.
- η_{bat} : Est l'efficacité de la batterie.
- E_{bat} : Est la capacité totale d'énergie de la batterie. [40]

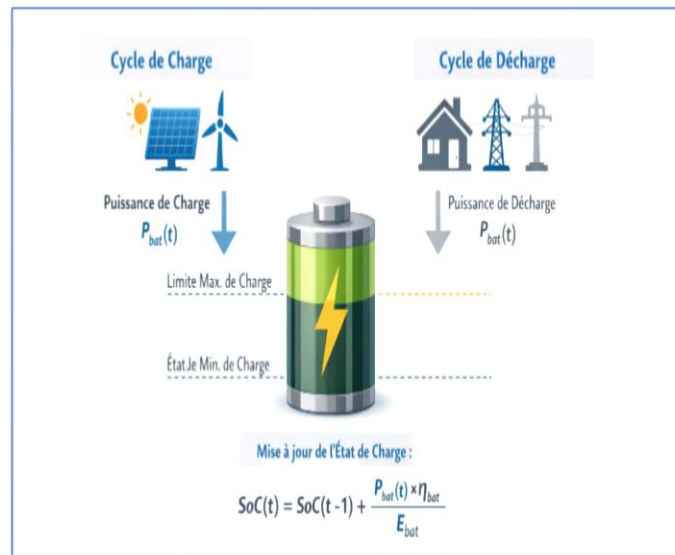


Figure (3.4) : Fonctionnement du Système de Stockage d'Énergie (ESS) [10].

3.11.3. Modèle de la charge :

3.11.3.1. Profils de Charge, Charges Critiques/Non-Critiques et Gestion de la Demande (Demand Réponse) :

Dans les micro-réseaux, la charge représente la demande finale que doit couvrir l'ensemble des sources (renouvelables, diesel, stockage). Sa modélisation est cruciale pour l'optimisation EMS car elle détermine :

- ✓ Les profils temporels (24h/7j) selon usage.
- ✓ La classification prioritaire (critique/flexible).
- ✓ Les stratégies DR (délestage sélectif).

Tableau (3.3) : Modèle Complet Charge Micro-Réseaux [41].

Aspect	Description	Modélisation	Exemples	Total %
Profils de Charge	Résidentiel (pic 18h), industriel continu	$P_{load}(t)=P_{base}+P_{pic}\cdot\alpha(t)$	1.8kW/maison, 90kW total	100%
Charges Critiques	Jamais délestées	$P_{critique}(t) (u=1)$	Hôpitaux, pompes (25kW)	30%
Charges Non-Critiques	Délestage programmable	$P_{flex}\cdot u_{flex}(t)$	Clima, EV, chauffe-eau (65kW)	70%
Gestion DR	EMS	$P_{crit}+p_{flex} u_{flex}$	N1 : Diésel N2 : Déstager flex	MILP

3.11.3.2. Modélisation d'une charge :

Il existe plusieurs modèles qui peuvent représenter une charge, le plus utilisée est le modèle suivant. [11]

$$Y_{ci} = \frac{(P_i - jQ_i)}{(V_i^2)} \quad (3.16)$$

Y_{ci} : Admittance de la charge au nœud i

P_{ci} : Puissance active injectée au nœud i

Q_{ci} : Puissance réactive injectée au nœud i

E_i : Module de la tension au nœud i

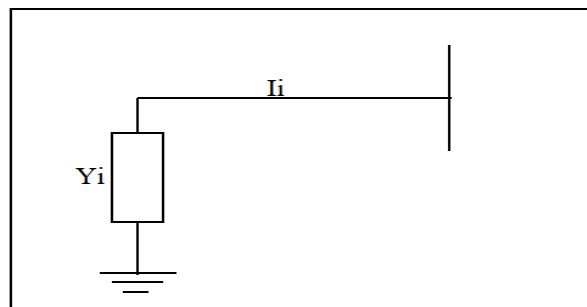


Figure (3.5) : Modélisation d'une charge [38].

3.11.4. Échanges avec le réseau principal :

Dans un micro-réseau connecté au réseau principal, les échanges d'énergie constituent un levier essentiel pour l'optimisation de la gestion énergétique. Le micro-réseau peut importer de l'électricité lorsque la production locale est insuffisante ou exporter l'énergie excédentaire issue des sources renouvelables. La modélisation repose sur une variable de puissance échangée avec le réseau principal, intégrée dans l'équation d'équilibre de puissance. Cette variable permet d'assurer la continuité de l'alimentation, de réduire les coûts d'exploitation et d'améliorer la fiabilité du système [42].

$$PPV(t) + PWT(t) + PDG(t) + PESS(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) \quad (3.17)$$

Où :

- ✓ $P_{PV}(t)$: Puissance produite par le système photovoltaïque.
- ✓ $P_{WT}(t)$: Puissance produite par l'éolien.
- ✓ $P_{DG}(t)$: Puissance du générateur diesel.
- ✓ $P_{ESS}(t)$: Puissance du système de stockage (charge/décharge).
- ✓ $P_{grid}(t)$: Puissance échangée avec le réseau principal.
- ✓ $P_{load}(t)$: Puissance demandée par la charge.

3.12. Optimisation de la gestion en mode connecté et en mode îloté :

3.12.1. Spécificités du mode connecté :

En mode connecté au réseau principal :

3.12.1.1. Échange bidirectionnel :

C'est l'énergie (import/export) en fonction de l'équilibre entre la production et la demande.

3.12.1.2. Objectif principal :

Minimisation du coût d'exploitation (achat/vente d'électricité, coût carburant, dégradation batterie).

3.12.1.3. Flexibilité accrue :

Le réseau principal agit comme un tampon énergétique permettant de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie.

3.12.2. Contraintes renforcées en mode îloté :

En mode îloté (déconnecté du réseau principal) :

3.12.2.1. $P_{Grid}(t)=0 \rightarrow$ Aucune importation possible :

L'équilibre du système doit être garanti uniquement par les ressources locales du micro-réseau [37].

3.12.2.2. Contraintes plus strictes :

- ✓ Maintien de la fréquence et de la tension.
- ✓ Réserve tournante obligatoire.
- ✓ Limitation du délestage (Load Shedding).

3.12.2.3. Objectif prioritaire :

Fiabilité et continuité de service plutôt que coût minimal [37].

3.12.3. Rôle du stockage et des générateurs pilotables :

Ils assurent l'équilibre entre la production et la demande et garantissent la stabilité du micro-réseau.

3.12.3.1. Système de stockage (ESS)

- ✓ Stabilisation de la fréquence.
- ✓ Compensation des fluctuations renouvelables.
- ✓ Réduction des démarrages du générateur diesel.
- ✓ Optimisation via la gestion du **State of Charge (SoC)** [37].

3.12.3.2. Générateurs pilotables (Diesel, Micro-turbine)

- ✓ Assurent la sécurité énergétique en mode îloté.
- ✓ Fournissent la réserve de puissance.
- ✓ Permettent la gestion dynamique de la charge [37].

3.13. Indicateurs de performance de la gestion optimisée :

Les indicateurs de performance pour une gestion optimisée des micro-réseaux incluent des métriques clés liées au coût, à la pénétration renouvelable, à la fiabilité, à l'impact environnemental et à la performance globale.

Ces indicateurs permettent d'évaluer l'efficacité des systèmes, particulièrement dans des contextes comme l'Algérie avec une forte intégration des énergies renouvelables.

3.13.1. Coût énergétique :

Le coût nivelé de l'énergie (LCOE) intègre CAPEX, OPEX et rendement, souvent optimisé à moins de 0,10 €/kWh via algorithmes prédictifs. Les stratégies basées sur réseaux de neurones réduisent les pics de consommation de 15-25%. Cela inclut l'optimisation des factures par modélisation des besoins en stockage [43].

3.13.2. Taux de pénétration des énergies renouvelables :

Mesuré en % de la production renouvelable (solaire/éolien) sur la demande totale, il vise 70-90% avec gestion de l'incertitude via prévisions avancées. Les micro-réseaux intègrent flexibilité (VÉ, charges déformables) pour maximiser ce taux sans écrêtement excessif. En Algérie, des études cibles >60% d'ici 2030 [2].

3.13.3. Fiabilité et continuité de service :

Évaluée par SAIDI (<5 min/an), SAIFI et énergie non fournie (ENS <1%), avec contrôle ENN surpassant MLP pour la stabilité en mode îlot. Les simulations HIL valident la résilience aux transitoires rapides [44].

3.13.4. Impact environnemental :

Quantifié en kg CO₂eq/kWh réduit (jusqu'à 80% vs diesel) et empreinte eau/ressources, via optimisation multicritère. Les micro-réseaux verts minimisent émissions par auto-correction dynamique [39].

3.13.5. Performance globale du micro-réseau :

Indice composite (ex. : efficacité énergétique pondérée) via SGE Stateflow ou MPC, avec gains de 20% en stabilité et coût. Suivi post-déploiement inclut qualité d'énergie et cycles de batterie [44].

3.14. Conclusion :

Le chapitre 3 a mis en évidence l'importance de l'**optimisation de la gestion énergétique dans les micro-réseaux**, face aux limites des méthodes classiques et aux défis posés par l'intermittence des énergies renouvelables et les contraintes économiques et environnementales.

La modélisation intégrée des sources de production, du système de stockage et des profils de charge, combinée aux échanges avec le réseau principal, a permis de formaliser le problème d'optimisation.

Les différentes méthodes déterministes, stochastiques, métaheuristiques et hybrides offrent des solutions adaptées selon les contraintes et objectifs : réduction des coûts, maximisation des renouvelables, amélioration de la fiabilité et prolongation de la durée de vie des batteries.

L'analyse des modes connecté et îloté a montré l'importance de la flexibilité du micro-réseau et du rôle central du stockage et des générateurs pilotables pour assurer continuité et stabilité du service. Les indicateurs de performance définis fournissent des critères concrets pour évaluer l'efficacité des stratégies optimisées.

En conclusion, l'optimisation énergétique apparaît comme un **levier clé pour un micro-réseau durable, fiable et économique**, préparant ainsi le terrain pour la mise en œuvre des algorithmes et l'analyse des résultats dans le chapitre suivant.

4.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre des simulations et à l'analyse des performances du système de gestion de l'énergie développé pour le micro-réseau étudié. L'objectif principal est d'évaluer le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement, en tenant compte de la variabilité de la production photovoltaïque, de la demande énergétique ainsi que des fluctuations du prix de l'électricité.

Afin d'analyser ces aspects, un modèle du micro-réseau a été développé sous l'environnement MATLAB/Simulink, intégrant les principaux composants du système, notamment la source photovoltaïque, le système de stockage par batterie, le réseau principal, ainsi que les charges résidentielles et industrielles. Ce modèle permet de reproduire des scénarios réalistes de production et de consommation d'énergie [36].

Dans ce cadre, deux stratégies de gestion de l'énergie sont implémentées et comparées. La première repose sur une approche heuristique basée sur une machine à états, caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et sa rapidité de décision. La seconde est fondée sur une méthode d'optimisation utilisant la programmation linéaire, permettant d'améliorer la gestion énergétique en intégrant des données prévisionnelles telles que la charge, la production photovoltaïque et le prix de l'électricité [36].

Les simulations étudiées permettent ainsi d'évaluer les performances de ces deux approches en termes de gestion du stockage, de réduction des échanges avec le réseau principal et d'optimisation des coûts énergétiques. Les résultats obtenus sont ensuite comparés et interprétés afin de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque stratégie dans le contexte des micro-réseaux.

4.2. Description :

Le micro-réseau test à étudier, représenté dans le schéma fourni, est structuré en plusieurs composants interconnectés pour une gestion hybride de l'énergie. Il se divise en trois parties principales : le réseau électrique principal agissant comme source de puissance de base ; des systèmes photovoltaïques (PV) et de stockage par batteries pour produire et stocker l'énergie renouvelable ; ainsi qu'un circuit de distribution alimentant divers types de charges.

La taille du micro-réseau correspond approximativement à une petite communauté résidentielle et industrielle lors d'une journée de consommation modérée au printemps ou en automne. Les charges incluent des habitations résidentielles et des installations industrielles, connectées en parallèle après le transformateur et le disjoncteur de circuit.

Ce scénario illustre une configuration réaliste pour une intégration future des énergies renouvelables en milieu urbain ou périurbain [36].

Contrairement à certains travaux qui se concentrent principalement sur la fréquence, notre étude s'est orientée vers la tension, car elle constitue un paramètre essentiel pour analyser la stabilité du réseau, notamment dans un micro-réseau intégrant des sources photovoltaïques et des systèmes de stockage par batteries.

4.3. Description de l'affichage temporel dans Simulink :

Lors de la simulation sous Simulink, l'axe du temps affiche parfois des valeurs sous la forme 10^4 . Cette écriture correspond à la notation scientifique utilisée automatiquement par le logiciel afin de simplifier la représentation des grandes valeurs numériques et d'améliorer la lisibilité du graphique.

Par exemple :

- $2 \times 10^4 = 20\,000$ Secondes.
- $8 \times 10^4 = 80\,000$ Secondes.

Après conversion :

- $20000\text{ s} \approx 5,56$ heures.
- $80000\text{ s} \approx 22,22$ heures.

Ainsi, le temps affiché dans la simulation est correctement converti des secondes vers les heures.

4.4. Déplacement de la demande de pointe à l'aide du stockage d'énergie :

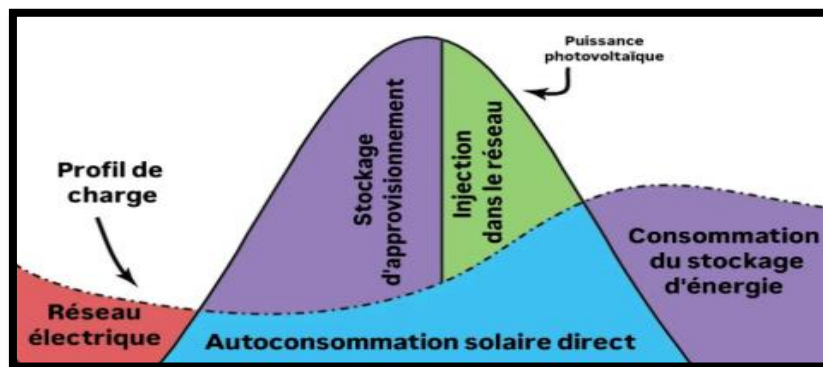


Figure (4.1) : Gestion de l'énergie solaire photovoltaïque avec stockage et injection réseau [36].

La Figure (4.1) illustre la répartition de la puissance photovoltaïque au sein d'un système énergétique connecté au réseau et équipé d'un stockage.

Elle met en évidence la comparaison entre le profil de charge et la production solaire, ainsi que la manière dont l'énergie est gérée selon les conditions de fonctionnement.

Lorsque la production photovoltaïque est supérieure à la demande, l'excédent est réparti entre le stockage d'énergie et l'injection dans le réseau électrique.

Le stockage permet de conserver l'énergie pour une utilisation ultérieure, notamment pendant les périodes de faible production solaire, tandis que l'injection dans le réseau représente la valorisation directe du surplus. Par ailleurs, la part d'autoconsommation directe constitue l'énergie consommée instantanément par la charge sans conversion ni stockage, ce qui représente le mode de fonctionnement le plus efficace. Ainsi, cette répartition permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, de réduire la dépendance au réseau et d'améliorer la flexibilité et la stabilité du système énergétique global.

4.5. Prise en compte du coût variable de l'électricité :

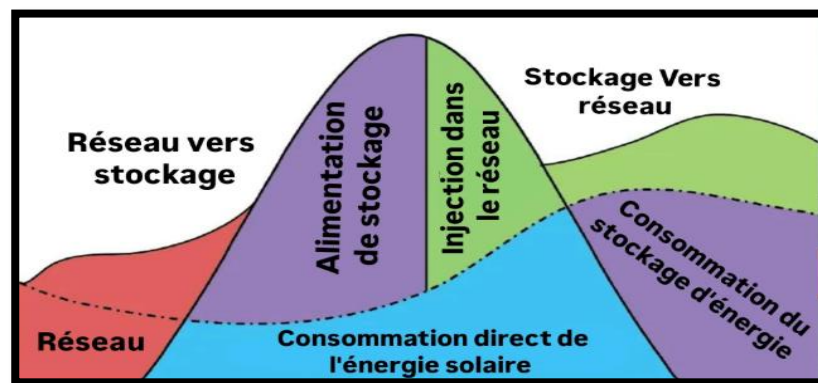


Figure (4.2) : Répartition de la puissance du système de stockage d'énergie (ESS) au sein du micro-réseau selon les conditions de fonctionnement [36].

La Figure (4.2) illustre l'évolution de l'état de charge (SOC) du système de stockage d'énergie (ESS) au sein du micro-réseau en fonction du temps. Elle met en évidence les différentes phases de fonctionnement de la batterie selon les conditions de production photovoltaïque et de demande de la charge.

Lorsque la production solaire est excédentaire par rapport à la consommation, l'énergie surplus est acheminée vers le système de stockage, provoquant une augmentation progressive du SOC jusqu'à atteindre la limite supérieure fixée à 80%. Ce seuil est imposé par le gestionnaire d'énergie afin de préserver la durée de vie de la batterie et d'éviter tout risque de surcharge.

En revanche, durant les périodes de faible production photovoltaïque ou de forte demande, la batterie passe en mode décharge, fournissant l'énergie nécessaire pour compenser le déficit et assurer la continuité de l'alimentation.

Le SOC diminue alors progressivement jusqu'à atteindre la limite inférieure de **20%**, correspondant à la profondeur de décharge maximale autorisée (DOD), en dessous de laquelle la batterie ne doit pas descendre pour éviter une dégradation irréversible.

Par ailleurs, les phases de stabilisation du SOC à 50% en début de simulation, ainsi que les paliers observés aux niveaux 80% et 20%, témoignent de l'efficacité de la stratégie de contrôle adoptée pour maintenir la batterie dans sa plage de fonctionnement optimale.

Ainsi, la gestion intelligente du système de stockage permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, de réduire les appels au réseau principal et d'améliorer la flexibilité, la stabilité et la résilience du micro-réseau dans toutes les conditions de fonctionnement.

4.6. Application du réseau test étudié :

Dans cette étude, le réseau électrique est modélisé sous forme d'un micro-réseau (micro-grid) hybride connecté au réseau électrique principal, en utilisant MATLAB/Simulink pour simuler l'intégration des énergies renouvelables, du stockage d'énergie et de la gestion énergétique.

Principes des Composants : Le système inclut un réseau utilitaire connecté au point de connexion commune un panneau solaire, un système de stockage d'énergie avec batterie, courant et tension mesurée, une charge variable à 3500 W, et un système de gestion énergétique (EMS).

Les mesures synchronisées à 60 Hz capturent les tensions (V_{abc}), les courants (I_{abc}), la puissance (P, Q) pour le micro-réseau et le réseau principal.

Un analyseur de séquence traite les données pour la stabilité.

4.6.1. Modes Opérationnels :

- Réseau connecter : Le micro-réseau échange avec le réseau principal, utilisant les prix du réseau et les données de coût temporel.
- Mode d'ilotage : Déconnexion automatique pour fonctionnement autonome, avec EMS assurant la gestion des références de puissance (P_{ref}, Q_{ref}) et modes de stockage.
- L'EMS optimise la dispatché en donnant la priorité au solaire, puis à la batterie, puis au réseau.

4.6.2. Mesures et Contrôles :

Tableau (4.1) : Récapitulatif des mesures et blocs de contrôle du micro-réseau.

Mesure	Description	Bloc Associé
V_{grids}, V_{abc}	Tension réseau/micro-réseau	Phaseur 60 Hz
Puissance (P/Q kW/kVAR)	Puissance active/réactive	Analyseur de séquences
ESS SOC	État de charge de la batterie	Stockage d'énergie
P_vM, P_vP	Puissance solaire	Profils de panneaux solaires

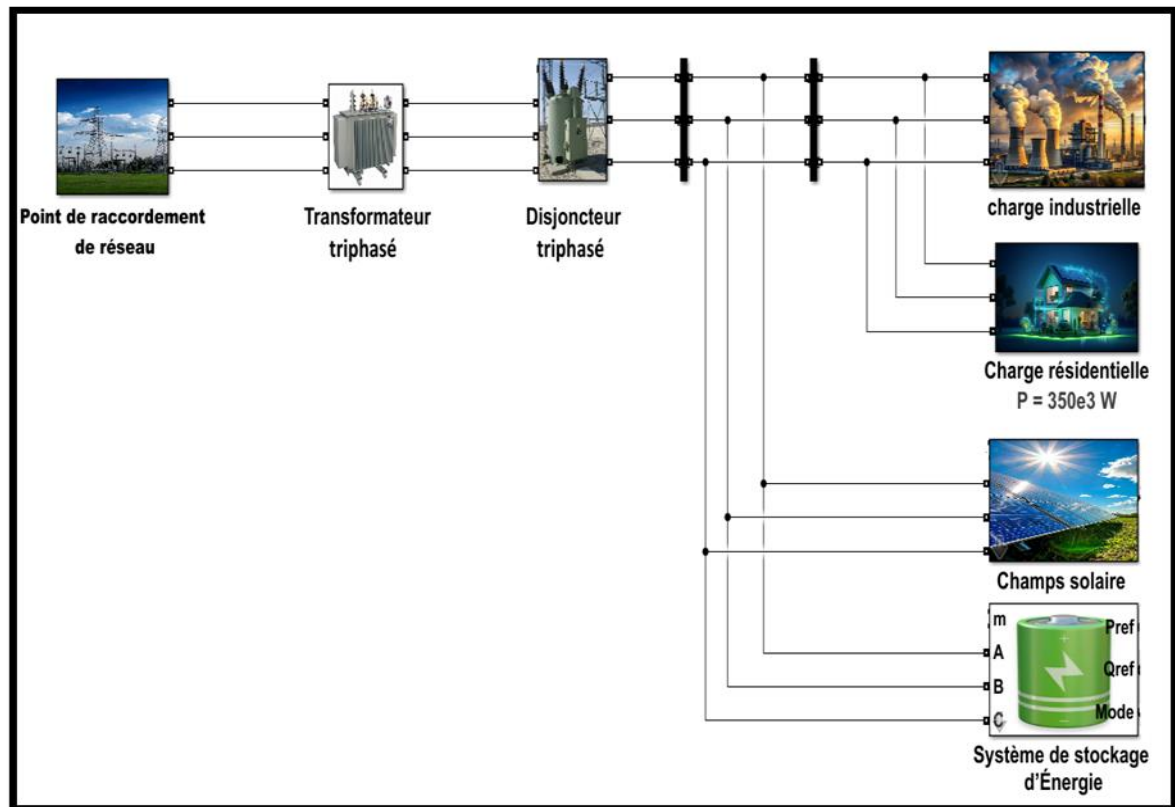


Figure (4.3) : Le système de test de micro-réseau étudié [36].

4.7. Application des scenarios étudiés :

4.7.1. Scenario 1 : Fonctionnement sans optimisation (heuristique) :

Dans ce cas, il n'y a aucune stratégie intelligente (EMS) pour gérer l'énergie. Le système fonctionne de manière directe :

4.7.1.1. Principe de fonctionnement :

- L'énergie photovoltaïque alimente directement les charges.
- Si la production PV est insuffisante → le réseau compense.
- Si la production PV est excédentaire → elle peut être injectée dans le réseau ou dissipée.
- La batterie :
 - ✓ Se charge si surplus
 - ✓ Se décharge si manque. Mais sans stratégie optimale (juste réaction simple).

4.7.1.2. Résultats et analyse :

A. Analyse technique :

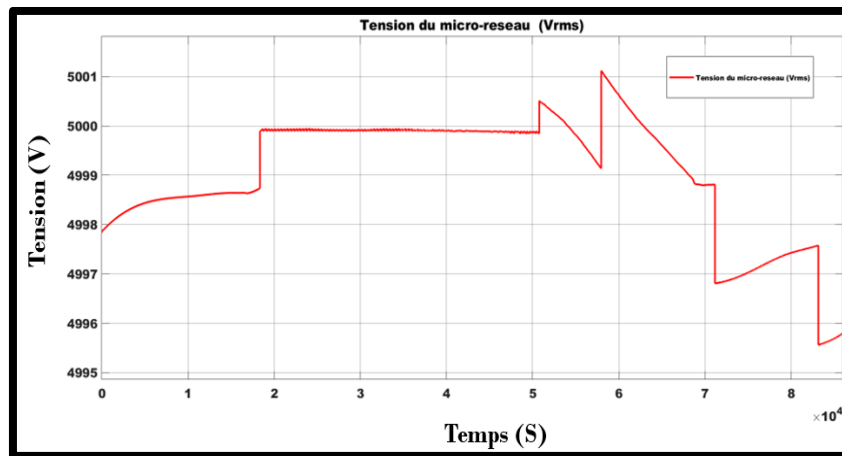


Figure (4.4) : La tension du micro-réseau (Vrms) en fonction du temps(S).

Le graphe représente l'évolution de la tension efficace (Vrms) d'un micro-réseau en fonction du temps (exprimé en unités de 10^4), avec une plage de tension comprise entre 4995 V et 5001 V autour d'une valeur nominale de 5000 V.

➤ Phase 1 — Démarrage ($t = 0$ s à $t \approx 2 \times 10^4$ s)

La tension démarre à environ 4998 V, légèrement en dessous de la valeur nominale.

On observe une montée progressive vers 5000 V, typique d'une phase de régulation transitoire au démarrage du système.

➤ Phase 2 — Régime stable ($t \approx 2 \times 10^4$ s à $t \approx 5 \times 10^4$ s)

La tension se stabilise autour de 5000 V avec de très faibles oscillations.

Cette phase représente le régime permanent nominal, où le contrôleur maintient correctement la tension de référence.

➤ Phase 3 — Perturbation ($t \approx 5 \times 10^4$ s à $t \approx 6 \times 10^4$ s)

On constate une perturbation notable : la tension monte brusquement jusqu'à 5001 V puis chute à environ 4995 V.

Cela peut être dû à une variation soudaine de charge ou à une fluctuation de la source d'énergie (ex. : variation d'irradiation solaire ou déconnexion d'un générateur).

➤ Phase 4 — Instabilité et dégradation ($t \approx 6 \times 10^4$ s à $t \approx 8.5 \times 10^4$ s)

La tension présente des chutes et variations brusques, passant par des valeurs de 4997 V, 4999 V, puis 4996 V.

Ces variations traduisent une perte partielle de régulation, probablement liée à des changements de mode de fonctionnement (passage réseau connecté / îloté) ou à des défauts dans le système de contrôle.

➤ Phase 5 — Chute finale ($t \approx 8 \times 10^4$ s à $t \approx 8.5 \times 10^4$ s)

La tension chute à environ 4995.5 V, la valeur la plus basse enregistrée.

Cela peut signaler une surcharge du micro-réseau ou un défaut non compensé par le régulateur.

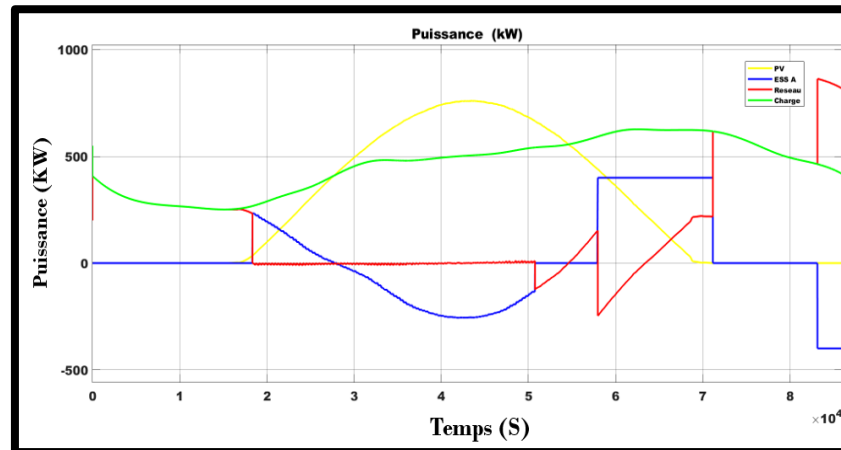


Figure (4.5) : Les puissances (kW) des différents éléments du micro-réseau en fonction du temps.

Le graphe illustre l'évolution temporelle de quatre grandeurs de puissance au sein d'un micro-réseau, sur un intervalle de temps allant de 0 à 8×10^4 secondes

Tableau (4.2) : Légende des courbes du graphe de puissance

Courbe	Couleur	Signification
PV	Jaune	Puissance générée par les panneaux solaires
ESS A	Bleu	Puissance du système de stockage d'énergie (batterie)
Réseau	Rouge	Puissance échangée avec le réseau principal
Charge	Vert	Puissance consommée par la charge

○ Puissance PV (Jaune) — Source solaire

- $T = 0 \times 10^4$ s à $t \approx 4 \times 10^4$ s : La puissance PV augmente progressivement de ~ 300 kW jusqu'à un pic d'environ 800 kW, simulant un ensoleillement croissant (montée du soleil).
- $T \approx 4 \times 10^4$ s à $t \approx 8 \times 10^4$ s : La puissance redescend progressivement vers ~ 400 kW, représentant la diminution de l'irradiation en fin de journée.

Cette courbe suit un profil typique d'une journée ensoleillée (courbe en cloche).

○ **Puissance Charge (Vert) — Consommation**

- La charge reste relativement stable entre 400 et 600 kW sur toute la simulation.
- On note une légère augmentation entre $t = 5 \times 10^4$ s et $t = 7 \times 10^4$ s, puis une stabilisation.

Cette allure représente un profil de consommation réaliste d'un site industriel ou d'un quartier résidentiel.

○ **Puissance ESS A (Bleu) — Stockage batteries**

- $T = 0$ s à $t \approx 2 \times 10^4$ s : La batterie fonctionne en mode décharge (puissance positive ~ 0 kW), en soutien à la charge.
- $T \approx 2 \times 10^4$ s à $t \approx 5 \times 10^4$ s : La puissance devient négative (jusqu'à -400 kW), ce qui signifie que la batterie est en mode charge — elle absorbe l'excédent de production PV.
- $T \approx 5 \times 10^4$ s à $t \approx 8 \times 10^4$ s : La puissance remonte vers 0 kW, indiquant un retour à l'équilibre ou une gestion intelligente du SOC (State of Charge).

○ **Puissance Réseau (Rouge) — Échange avec le réseau**

- $T \approx 0$ à $t \approx 2 \times 10^4$ s la puissance réseau est positive, ce qui indique que le micro-réseau échange de l'énergie avec le réseau principal pour assurer l'alimentation de la charge.
- $T \approx 2 \times 10^4$ à $t \approx 5 \times 10^4$ s La puissance réseau est proche de zéro, le micro-réseau est quasi-autonome grâce au PV et à la batterie.
- $T \approx 5 \times 10^4$ s à $t \approx 6 \times 10^4$ s : Un appel de puissance net depuis le réseau est observé (~ 400 kW), indiquant un déficit énergétique local.
- $T \approx 6 \times 10^4$ s à $t \approx 7 \times 10^4$ s : La puissance réseau fluctue fortement, signe d'une instabilité ou d'un changement de mode (passage îloté/connecté).
- $T \approx 7 \times 10^4$ à $t \approx 8 \times 10^4$ s : Retour à une valeur plus stable, mais non nulle.

Ce graphe (4.5) démontre que le système de gestion d'énergie (EMS) du micro-réseau fonctionne avec une grande efficacité en exploitant de manière optimale la production des panneaux photovoltaïques.

En effet, il stocke l'excédent d'énergie produit dans les batteries durant les périodes de forte production, ce qui réduit considérablement le recours au réseau électrique principal et renforce l'autonomie du micro-réseau.

Cependant, les perturbations et fluctuations observées dans la seconde partie de la simulation, notamment lors de la baisse de production solaire combinée à une demande croissante de la charge, révèlent la nécessité d'améliorer et de renforcer les algorithmes de contrôle afin de garantir une transition fluide et stable entre les différents modes de fonctionnement du micro-réseau, que ce soit en mode îloté ou en mode connecté au réseau principal.

En définitive, les résultats obtenus confirment l'efficacité globale du système proposé pour assurer l'équilibre énergétique et la continuité de l'alimentation électrique, tout en mettant en lumière des perspectives d'amélioration futures qui nécessitent des recherches et

des développements supplémentaires afin d'optimiser les performances du micro-réseau dans toutes les conditions de fonctionnement.

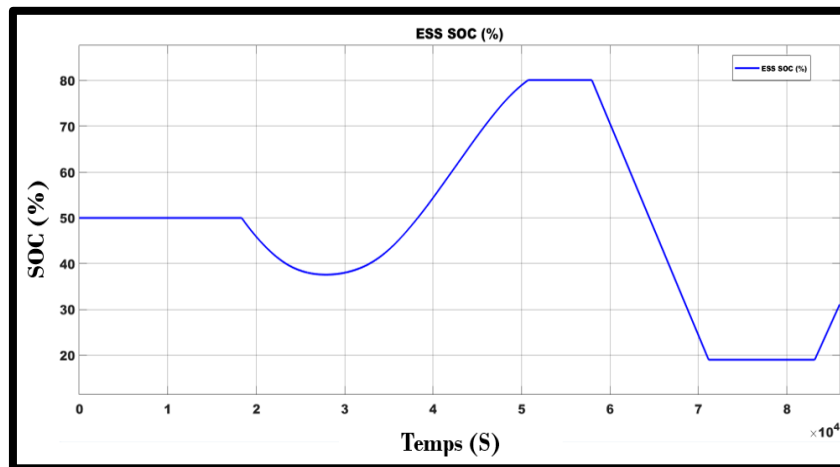


Figure (4.6) : Évolution de l'état de charge (SOC) du système de stockage d'énergie (ESS) en fonction du temps(S).

➤ Le graphe (4.6) représente l'évolution du État de Charge (SOC) du système de stockage d'énergie (ESS), exprimé en pourcentage (%), en fonction du temps (de 0 s à 8×10^4 s). Le SOC reflète directement le niveau de charge de la batterie à chaque instant de la simulation.

➤ **Phase 1 → Stabilité initiale ($t = 0$ s à $t \approx 2 \times 10^4$ s)**

- Le SOC reste constant à 50%, ce qui correspond à l'état initial de la batterie fixé comme condition de départ de la simulation.
- La batterie n'est ni en charge ni en décharge significative durant cette période.

➤ **Phase 2 → Décharge ($t \approx 2 \times 10^4$ s à $t \approx 3 \times 10^4$ s)**

- Le SOC diminue progressivement de 50% jusqu'à environ 35~40%.
- Cette baisse indique que la batterie est en mode décharge, elle fournit de l'énergie pour compenser un déficit entre la production PV et la demande de la charge.
- Ce comportement est cohérent avec la courbe de puissance ESS observée précédemment (puissance négative).

➤ **Phase 3 → Recharge ($t \approx 3 \times 10^4$ s à $t \approx 5 \times 10^4$ s)**

- Le SOC augmente rapidement de ~40% jusqu'à un maximum de 80%.
- Cette phase correspond à la période de forte production solaire (pic PV), où l'excédent d'énergie est injecté dans la batterie.
- La montée est régulière, ce qui traduit une charge contrôlée et bien gérée par l'algorithme de commande.

- **Phase 4 → Palier de charge maximale ($t \approx 5 \times 10^4$ s à $t \approx 6 \times 10^4$ s)**
 - Le SOC se stabilise à 80%, ce qui correspond probablement à la limite supérieure de charge imposée par le système de gestion pour protéger la durée de vie de la batterie.
 - Ce palier démontre l'efficacité de la stratégie de limitation du SOC maximal.
- **Phase 5 → Décharge profonde ($t \approx 6 \times 10^4$ s à $t \approx 7.5 \times 10^4$ s)**
 - Le SOC chute brutalement de 80% à environ 20%.
 - Cette décharge rapide est due à une forte demande énergétique non couverte par le PV (baisse d'irradiation + charge élevée), forçant la batterie à fournir une grande quantité d'énergie.
 - Ce phénomène correspond aux fluctuations de puissance réseau observées sur le graphe précédent.
- **Phase 6 → Palier de décharge minimale ($t \approx 7.5 \times 10^4$ s à $t \approx 8 \times 10^4$ s).**
 - Le SOC se stabilise à 20%, représentant la limite inférieure de décharge (DOD) fixée par le gestionnaire d'énergie.
 - Ce seuil protège la batterie contre une sur-décharge qui pourrait l'endommager irréremédiablement.

B. Analyse économique :

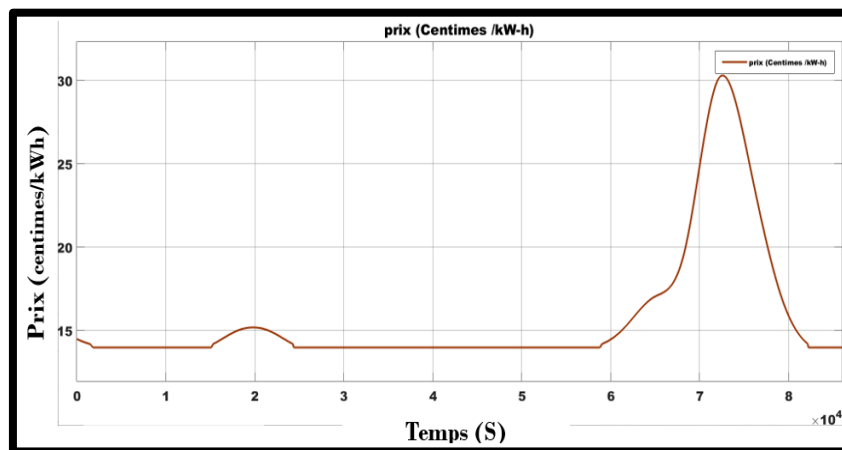


Figure (4.7) : Évolution du prix de l'électricité en fonction du temps (Centimes/kWh).

- **Phase 1 : Période de base et creux matinal (0 s à 1.5×10^4 s).**
 - Prix stable autour de 14 centimes/kWh, correspondant à une faible demande sur le réseau principal.
 - Le micro-réseau consomme principalement l'énergie du réseau national à bas coût.
 - En absence d'optimisation, la gestion du stockage n'est pas forcément anticipative pour les périodes futures.

- **Phase 2 : Première augmentation transitoire (1.5×10^4 s à 2.5×10^4 s)**
 - Légère hausse du prix jusqu'à environ 15 centimes/kWh.
 - Début de l'activité journalière avec augmentation progressive des charges.
 - Augmentation du coût d'achat de l'énergie pour le micro-réseau.
- **Phase 3 : Plateau de journée et production photovoltaïque (2.5×10^4 s à 6×10^4 s)**
 - Stabilisation du prix autour de 14 centimes/kWh.
 - Contribution importante de la production photovoltaïque.
 - Réduction de la dépendance au réseau principal.
 - Le surplus énergétique n'est pas totalement optimisé pour une valorisation économique.
- **Phase 4 : Pic de pointe critique (6×10^4 s à 8×10^4 s)**
 - Forte augmentation du prix dépassant 30 centimes/kWh.
 - Correspond aux heures de forte demande du soir.
 - Absence de production PV et forte sollicitation des charges.
 - Sans optimisation, le coût d'achat devient très élevé et le stockage peut être insuffisant.
- **Phase 5 : Retour au calme (8×10^4 s à la fin)**
 - Chute du prix vers 14 centimes/kWh.
 - Diminution progressive de la demande.
 - Retour à un fonctionnement dépendant du réseau principal.

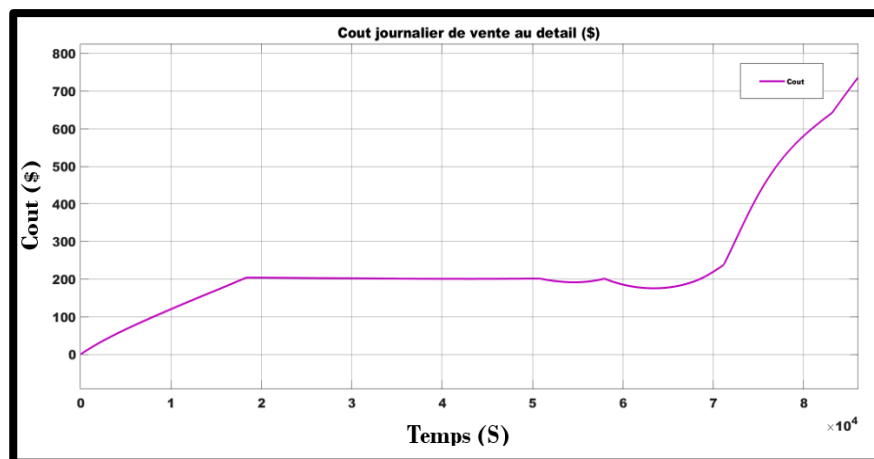


Figure (4.8) : Évolution du coût cumulé de l'achat au détail de l'énergie (\$) en fonction du temps(S).

- **Phase 1 : Accumulation Initiale (0×10^4 s à 2×10^4 s)**
 - Le coût augmente de façon linéaire pour atteindre environ 200 \$=26600DA. Durant cette période matinale, le micro-réseau dépend entièrement de l'achat d'énergie sur

le réseau principal pour satisfaire ses charges industrielles et résidentielles, car la production photovoltaïque est encore nulle ou insuffisante.

➤ Phase 2 : Stabilisation par l'Autoconsommation (2×10^4 s à 6×10^4 s)

- La courbe devient quasiment horizontale, se maintenant autour de 200 \$=26600DA. L'ensoleillement maximal permet au champ solaire de couvrir la totalité de la demande du micro-réseau. En l'absence d'optimisation, le surplus d'énergie n'est pas valorisé de manière stratégique, mais il permet au moins de stopper l'augmentation des dépenses d'achat.

➤ Phase 3 : Explosion des Coûts en Période de Pointe (6×10^4 s à 8×10^4 s)

- On observe une accélération brutale de la pente, le coût total passant de 200 \$=26600DA à plus de 700 \$=93 000 DA. Cette phase critique combine l'arrêt de la production solaire et l'augmentation des tarifs d'achat (heures de pointe). Sans système d'optimisation, le réseau subit de plein fouet les prix élevés du marché sans utiliser ses batteries pour amortir la facture.

➤ Phase 4 : Transition de Fin de Cycle (8×10^4 s à la fin)

- La progression du coût se poursuit à un rythme soutenu. Le micro-réseau termine sa journée dans une dépendance totale vis-à-vis du fournisseur externe. Le coût final élevé démontre l'inefficacité économique d'une gestion non optimisée, où le stockage n'est pas utilisé pour réduire les dépenses durant les heures les plus chères.

4.7.2. Scenarios 2 : Fonctionnement avec optimisation (méthode LP) :

Dans ce cas, une stratégie intelligente basée sur une méthode d'optimisation linéaire (LP) est utilisée pour gérer efficacement les flux d'énergie.

Le système ne fonctionne plus de manière directe, mais selon une logique d'optimisation visant à minimiser les coûts, réduire les pertes et améliorer l'utilisation de l'énergie photovoltaïque.

4.7.2.1. Principe de fonctionnement :

- L'énergie photovoltaïque est prioritairement utilisée pour alimenter les charges.
- La batterie est gérée de manière optimale :
 - ✓ Elle se charge en cas de surplus d'énergie photovoltaïque selon une stratégie optimisée.
 - ✓ Elle se décharge en cas de déficit afin de limiter l'utilisation du réseau.
- Le recours au réseau est optimisé :
- L'importation d'énergie se fait uniquement si nécessaire et de manière minimisée.
- L'injection dans le réseau est contrôlée afin de maximiser le bénéfice ou éviter les pertes.
- La gestion énergétique est basée sur une planification :
 - ✓ Les décisions (charge/décharge, import/export) sont prises en fonction de critères optimisés (coût, disponibilité, demande).

4.7.2.2. Résultats et analyse :

A. Analyse technique :

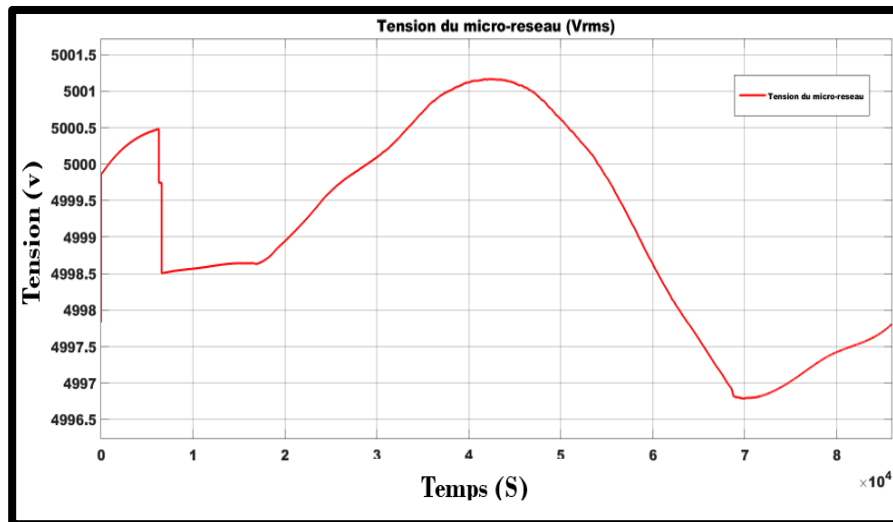


Figure (4.9) : La tension du micro-réseau (Vrms) en fonction du temps.

À partir des résultats présentés dans la figure ci-dessus, nous pouvons remarquer que :

Phase 1 : Démarrage et stabilisation du système :

- Au début de la simulation, La tension du micro-réseau reste globalement stable autour de 5000 Vrms, ce qui indique une bonne stabilité du système électrique.
- Une légère variation de la tension est observée au démarrage de la simulation, due à l'ajustement initial entre les sources d'énergie (PV, batterie et réseau principal) et les charges connectées, avant la stabilisation du système.

Phase 2 : Augmentation de la tension :

- Entre 3×10^4 S et 5×10^4 S, la tension augmente légèrement. Cela peut être expliqué par une production photovoltaïque plus importante ou par l'apport du système de stockage.

Phase 3 : Diminution de la tension :

- Vers 7×10^4 S, on remarque une diminution de la tension, ce qui peut être lié à une augmentation de la consommation des charges résidentielles et industrielles.

Phase 4 : Réajustement final :

- À la fin de la simulation, la tension remonte légèrement, ce qui montre que le système d'optimisation ajuste la contribution des différentes sources d'énergie afin de maintenir l'équilibre du micro-réseau.
- Ces résultats montrent que la stratégie d'optimisation permet de maintenir la stabilité de la tension et d'assurer une gestion efficace de l'énergie dans le micro-réseau.

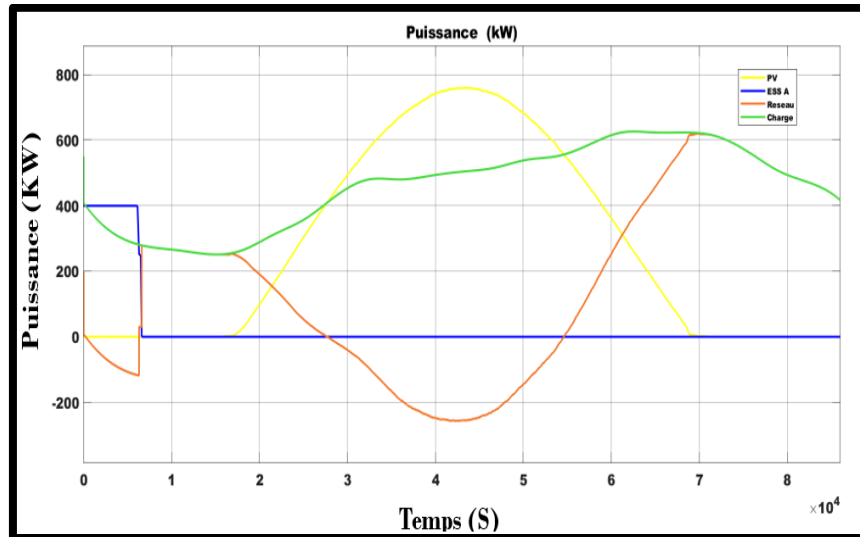


Figure (4.10) : Les puissances (kW) des différents éléments du micro-réseau en fonction du temps (s)

Axe des abscisses (x) : représente le temps (s) du fonctionnement du micro-réseau.

Axe des ordonnées (y) : représente la puissance (kW) des différents éléments du système (PV, batterie, charge, réseau).

Tableau (4.3) : Légende des courbes du graphe de puissance (kW)

Courbe	Couleur	Signification
PV	Jaune	Puissance générée par les panneaux solaires
ESS A	Bleu	Puissance du système de stockage d'énergie (batterie)
Réseau	Rouge	Puissance échangée avec le réseau principal
Charge	Vert	Puissance consommée par la charge

➤ Phase 1 : Utilisation prioritaire de la batterie (nuit / début de journée)

- Au début de l'intervalle de temps, la courbe de la batterie (bleu) présente une puissance élevée (~400 kW), tandis que la production PV (jaune) est nulle. Cela indique que la batterie alimente directement les charges (vert).
- Lorsque $t \approx 0.6 \times 10^4 \text{ s}$, la courbe de la batterie chute vers zéro. Cela correspond à l'atteinte du SOC minimum (limite de décharge), et la courbe du réseau (orange) augmente pour couvrir la demande.

- **Phase 2 : Production solaire excédentaire et injection réseau (milieu de journée)**
 - À partir de $t \approx 2 \times 10^4$ s la courbe PV (jaune) dépasse la courbe des charges (vert), ce qui montre une production supérieure à la demande.
 - Sur le graphe du réseau (orange), la puissance devient négative (jusqu'à environ -250 kW), ce qui signifie une injection d'énergie vers le réseau principal (export du surplus PV).
- **Phase 3 : Reprise du réseau (fin de journée / soirée)**
 - En fin de journée (augmentation du temps (s)), la courbe PV diminue progressivement jusqu'à devenir faible ou nulle.
 - La courbe du réseau (orange) suit alors la courbe des charges (vert), ce qui montre que le réseau devient la source principale d'alimentation.
 - La courbe de la batterie reste inactive dans cette phase finale, ce qui indique qu'elle n'est pas sollicitée ou non rechargée dans ce scénario.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité de la stratégie d'optimisation adoptée, qui contribue à améliorer la stabilité globale du système et à assurer un bon équilibre entre la production et la consommation, tout en favorisant une meilleure exploitation de l'énergie solaire et en réduisant la dépendance au réseau principal.

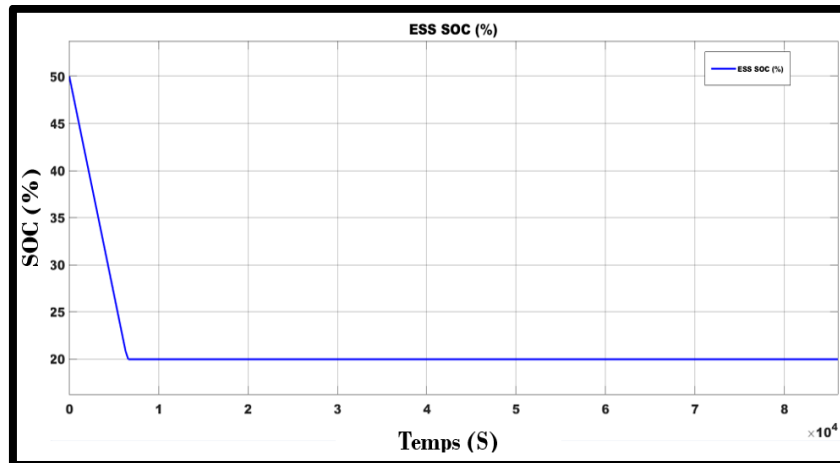


Figure (4.11) : Évolution de l'état de charge (SOC) du système de stockage d'énergie (ESS) en fonction du temps (s).

La courbe (4.11) représente l'état de charge de notre batterie tout au long de la simulation. Elle confirme directement les décisions prises par notre algorithme d'optimisation.

- **La phase de décharge rapide (Le matin) :**
 - **Observation :** Au début ($t=0$ s), la batterie est chargée à 50%. On voit une ligne droite qui descend rapidement jusqu'à 20%.

- **L'explication :** "Dès le démarrage, l'optimiseur décide d'utiliser l'énergie stockée pour alimenter la charge puisque le soleil ne brille pas encore. C'est une phase de décharge active pour éviter de consommer sur le réseau."
- **Le palier de sécurité (Le reste de la journée) :**
 - **Observation :** À partir de $t \approx 0.6 \times 10^4 \text{ s}$, la courbe devient parfaitement plate à 20%.
 - **L'explication :** "Ici, on voit que la batterie a atteint sa limite de sécurité (SOC min) définie à 20%. L'optimiseur arrête de vider la batterie pour protéger sa durée de vie. C'est ce qui explique pourquoi, sur le graphique précédent, le réseau prenait soudainement le relais."

B. Analyse économique :

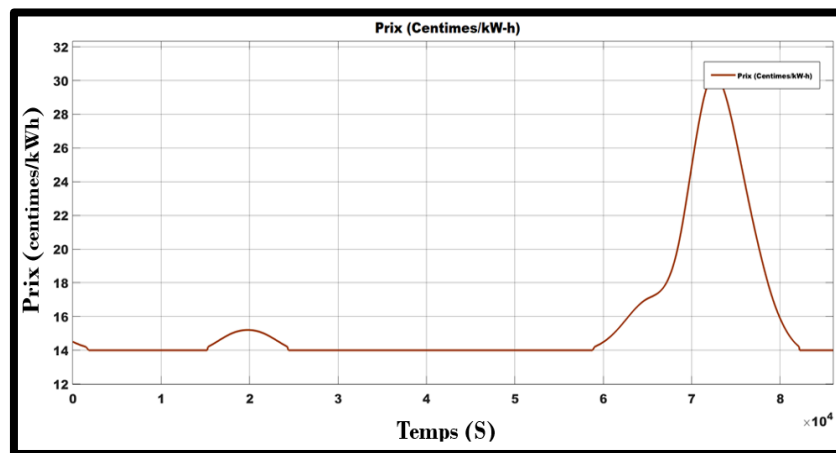


Figure (4.12) : Évolution du prix de l'électricité en fonction du temps (Centimes/kWh).

- **Phase 1 : Période de base et charge stratégique (0 s à $1.5 \times 10^4 \text{ s}$)**
 - Prix stable au niveau minimal (~ 14 centimes/kWh).
 - Faible demande nocturne sur le réseau principal.
 - Le système d'optimisation exploite le coût bas pour alimenter les charges.
 - Possibilité de recharge du système de stockage en préparation des périodes coûteuses.
- **Phase 2 : Gestion de la transition matinale ($1.5 \times 10^4 \text{ s}$ à $2.5 \times 10^4 \text{ s}$) :**
 - Légère augmentation du prix jusqu'à ~ 15 centimes/kWh.
 - Début progressif des activités de consommation.
 - L'optimiseur ajuste l'appel de puissance au réseau et introduit les premières contributions renouvelables.
 - Impact économique limité grâce à la régulation du système.
- **Phase 3 : Maximisation de l'autoconsommation ($2.5 \times 10^4 \text{ s}$ à $6 \times 10^4 \text{ s}$) :**
 - Stabilisation du prix autour de 14 centimes/kWh.
 - Forte contribution de la production photovoltaïque.
 - Réduction de la dépendance au réseau principal.
 - Gestion efficace du surplus énergétique pour couvrir la demande locale.

- Optimisation du coût global d'exploitation.
-
- **Phase 4 : Écrêtage du pic et soutien par le stockage (6×10^4 s à 8×10^4 s) :**
 - Hausse importante du prix atteignant ~ 30 centimes/kWh.
 - Période de forte demande (peak load du soir).
 - Déploiement du stockage pour assurer le "l'écrêtage des pics de consommation".
 - Réduction de l'achat d'énergie coûteuse via le réseau.
 - Protection du micro-réseau contre les coûts élevés.
- **Phase 5 : Stabilisation et fin de cycle (8×10^4 s à la fin) :**
 - Retour du prix à son niveau de base (~ 14 centimes/kWh).
 - Diminution progressive de la demande.
 - Transition fluide vers un mode de fonctionnement nocturne.
 - Utilisation optimisée des réserves d'énergie.
 - Maintien de la continuité de service et de la stabilité globale du système.

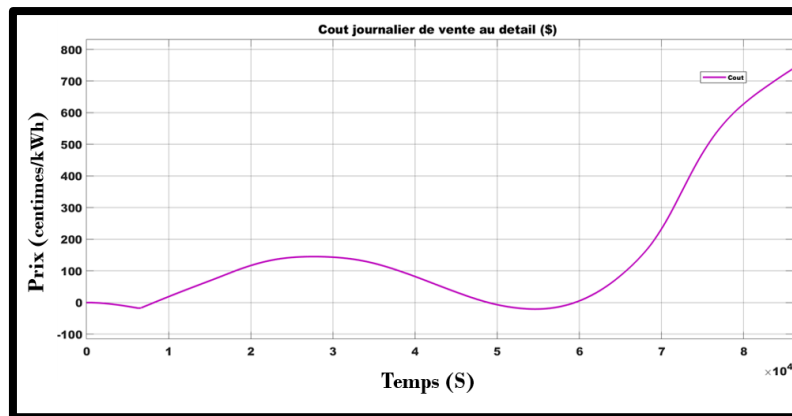


Figure (4.13) : : Évolution du coût cumulé de la vente au détail de l'énergie (\$) en fonction du temps (s).

- **Phase 1 : Injection initiale et revenus précoces (0 s à 0.6×10^4 s) :**
 - La courbe passe légèrement en dessous de zéro (valeurs négatives).
 - Injection d'énergie vers le réseau principal via la production initiale ou le stockage.
 - Génération de revenus dès le début du cycle.
 - Réduction immédiate des coûts grâce à la stratégie d'optimisation.
- **Phase 2 : Gestion de la charge matinale (0.6×10^4 s à 3×10^4 s) :**
 - Augmentation progressive du coût jusqu'à environ 140(\$)=18 600 DA.
 - Arbitrage entre achat d'énergie et préparation du stockage.
 - Contrôle de la pente de croissance des coûts.
 - Meilleure gestion de la demande par rapport à un système non optimisé.

- **Phase 3 : Maximisation du profit photovoltaïque (3×10^4 s à 5.5×10^4 s) :**
 - Forte diminution du coût total, proche de 0 (\$) = 0 DA voire négatif.
 - Utilisation optimale de la production photovoltaïque.
 - Couverture des charges locales et export du surplus vers le réseau.
 - Compensation des dépenses précédentes grâce à la vente d'énergie.
- **Phase 4 : Soutien stratégique du pic de soirée (6×10^4 s à 8×10^4 s) :**
 - Remontée du coût due à la baisse de production solaire et aux tarifs élevés.
 - Utilisation du stockage pour limiter l'achat d'énergie chère.
 - Écrêtage des coûts par la stratégie de décharge des batteries.
 - Coût final maintenu bien inférieur à un système non optimisé.
- **Phase 5 : Finalisation du cycle économique (8×10^4 s à la fin) :**
 - Stabilisation de la courbe en fin de simulation.
 - Optimisation globale des dépenses sur 24 heures.
 - Compensation entre périodes de production élevée et de forte consommation.
 - Amélioration significative de la rentabilité du micro-réseau.

4.8. Approches optimisée et heuristique dans un micro-réseau :

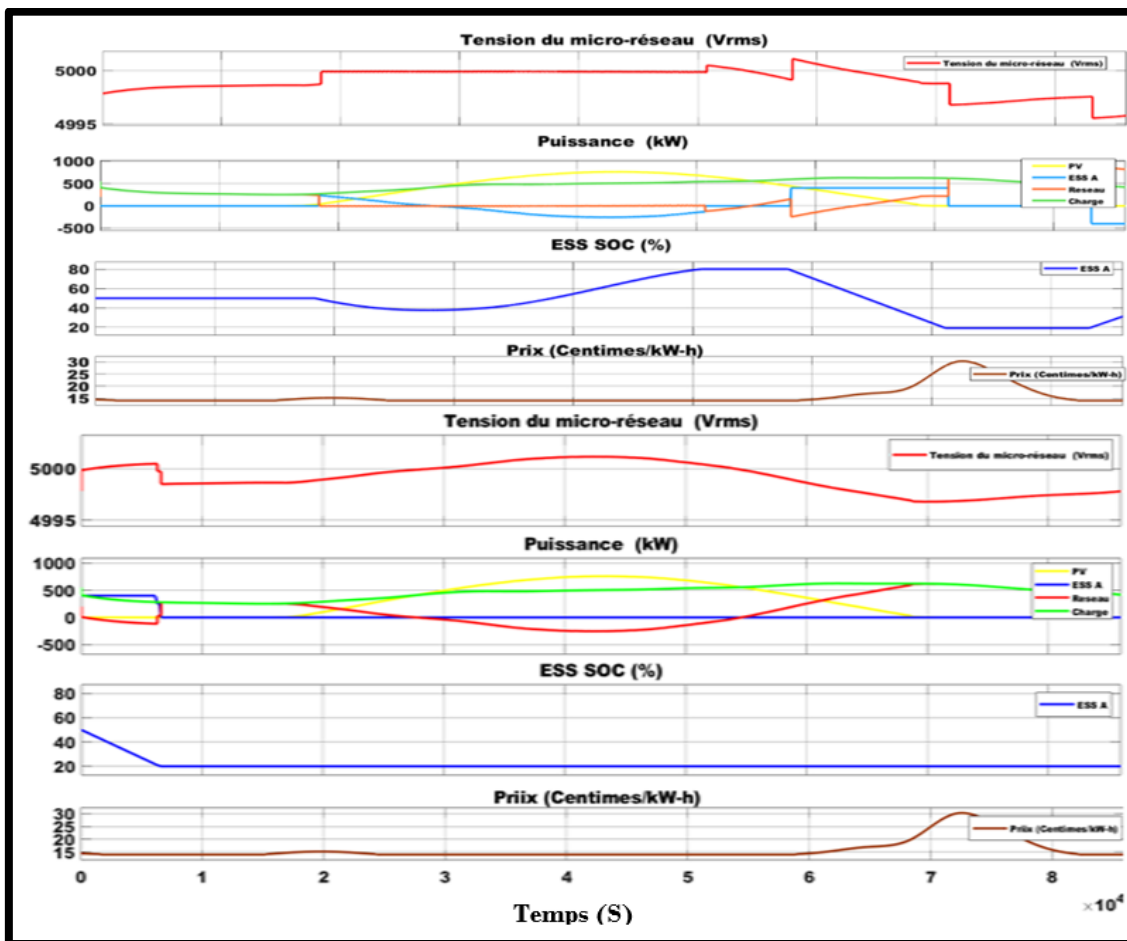


Figure (4.14) : Approches optimisée et heuristique dans un micro-réseau.

Tableau (4.4) : Analyse comparative des approches optimisée et heuristique dans un micro-réseau.

Critère	Méthode optimisée	Méthode heuristique
Principe	Basée sur une optimisation globale (EMS)	Basée sur des règles simples/fixes
Prise de décision	Intelligente et adaptative	Limitée et non adaptative
Coût énergétique	Minimisé	Non optimisé (coût plus élevé)
Gestion du stockage	Stratégique et efficace	Peu efficace, parfois non adaptée
Utilisation de l'énergie PV	Maximisée (autoconsommation optimisée)	Non optimale
Stabilité du système	Améliorée (moins de fluctuations)	Moins stable
Réactivité aux variations	Élevée (prix, charge, production)	Faible
Complexité	Élevée (calculs, algorithmes)	Faible (facile à implémenter)
Performance globale	Élevée	Moyenne à faible

La méthode optimisée est plus performante, plus intelligente et économiquement avantageuse, tandis que la méthode heuristique reste simple mais limitée et moins efficace pour un système énergétique complexe comme un micro-réseau.

4.9. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la simulation et à l'évaluation des performances du système de gestion de l'énergie appliqué à un micro-réseau hybride, composé d'une source photovoltaïque, d'un système de stockage par batteries et d'une connexion au réseau électrique principal. Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont permis de tester et de comparer deux stratégies de gestion énergétique dans des conditions de fonctionnement réalistes, en tenant compte de la variabilité de la production solaire, de la demande des charges et des fluctuations du prix de l'électricité.

Le premier scénario, basé sur une approche heuristique à machine à états, a démontré une certaine efficacité dans la gestion de base du stockage et des flux d'énergie. Cependant, ses limites sont apparues clairement lors des périodes de forte demande et de faible production solaire, où l'absence de planification anticipative a conduit à une dépendance accrue au réseau principal et à des coûts d'exploitation élevés, atteignant plus de 700 \$ =93100 DZD en fin de journée.

Le second scénario, fondé sur une méthode d'optimisation par programmation linéaire, a mis en évidence des performances nettement supérieures. Grâce à une prise de décision intelligente et adaptative intégrant les prévisions de production, de charge et de prix, cette approche a permis de maximiser l'autoconsommation photovoltaïque, de gérer stratégiquement le stockage et de réduire significativement le recours au réseau lors des heures de pointe.

L'analyse économique a confirmé cet avantage, avec un coût cumulé final bien inférieur à celui obtenu par la méthode heuristique, grâce notamment à l'injection du surplus énergétique dans le réseau durant les périodes favorables.

En définitive, les résultats obtenus confirment que l'intégration d'une stratégie d'optimisation dans le système de gestion d'énergie constitue un levier essentiel pour améliorer la performance, la stabilité et la rentabilité des micro-réseaux modernes. Ces travaux ouvrent la voie à des perspectives d'amélioration futures, notamment l'intégration de techniques de prévision avancées, l'application d'algorithmes d'optimisation non linéaires ou basés sur l'intelligence artificielle, ainsi que l'extension du modèle à des configurations de micro-réseaux plus complexes et plus représentatives des systèmes énergétiques réels.

Ce mémoire a été consacré à l'étude, à la modélisation et à l'optimisation de la gestion énergétique dans les micro-réseaux hybrides, dans un contexte marqué par la transition énergétique mondiale et l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables dans les systèmes électriques. Face aux limites des réseaux traditionnels et aux défis liés à l'intermittence des ressources renouvelables, les micro-réseaux apparaissent aujourd'hui comme une solution innovante permettant d'améliorer la flexibilité, la résilience et l'efficacité énergétique des systèmes de production et de distribution de l'électricité.

Dans un premier temps, une analyse approfondie des fondements théoriques des micro-réseaux a permis de mettre en évidence leur architecture, leurs composants essentiels ainsi que leurs modes de fonctionnement en mode connecté et en mode îloté. Cette étude a montré que les micro-réseaux constituent une évolution importante vers des réseaux électriques plus intelligents, capables d'intégrer efficacement les sources d'énergie renouvelables, les systèmes de stockage et les charges locales, tout en améliorant la qualité et la continuité de l'alimentation électrique.

Par la suite, l'accent a été mis sur la gestion de l'énergie, considérée comme un élément central dans le fonctionnement optimal des micro-réseaux. L'étude des différentes architectures de contrôle et des stratégies de gestion énergétique a permis de mettre en évidence l'importance d'une coordination efficace entre les différentes sources de production, les dispositifs de stockage et les profils de consommation. Dans ce cadre, les techniques de prévision et les méthodes d'optimisation ont été présentées comme des outils essentiels pour assurer un équilibre dynamique entre l'offre et la demande énergétique.

Le troisième volet de ce travail a été consacré à l'analyse des méthodes d'optimisation appliquées à la gestion énergétique. La modélisation mathématique du problème d'optimisation a permis d'intégrer les contraintes techniques du système ainsi que les objectifs économiques et opérationnels, tels que la minimisation des coûts d'exploitation, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la maximisation de l'utilisation des sources renouvelables.

Enfin, la phase de simulation simulée sous l'environnement MATLAB/Simulink a permis de valider les approches théoriques développées. Les résultats obtenus ont démontré que l'utilisation d'une stratégie d'optimisation basée sur la programmation linéaire permet d'améliorer significativement les performances du système par rapport à une approche heuristique classique. Cette stratégie permet notamment de mieux exploiter l'énergie photovoltaïque produite, d'optimiser l'utilisation du système de stockage et de réduire la dépendance au réseau principal, contribuant ainsi à une réduction notable des coûts d'exploitation.

En définitive, les résultats obtenus confirment que l'optimisation de la gestion énergétique constitue un levier fondamental pour garantir le fonctionnement efficace, fiable et économique des micro-réseaux hybrides.

Dans le contexte énergétique actuel, et particulièrement pour les régions isolées ou faiblement interconnectées, ces systèmes représentent une solution prometteuse pour favoriser l'intégration des énergies renouvelables et renforcer la durabilité des infrastructures électriques.

Dans une perspective future, l'intégration de techniques avancées de prévision basées sur l'intelligence artificielle, l'utilisation d'algorithmes d'optimisation hybrides ainsi que l'extension du modèle à des micro-réseaux multi-sources plus complexes pourraient permettre d'améliorer davantage la performance et l'intelligence des systèmes énergétiques de nouvelle génération.

- [1] BABASACI Anfel, BOUGUE NARA Ines, CHAOUCHE Abderahman ; « Etude de la performance d'un échangeur de chaleur air - sol couplé avec la cheminée solaire pour des applications de chauffage et de refroidissement dans les régions arides » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique ; Filière : Génie mécanique ; UNIVERSITÉ KASDI MERBAH ; OUARGLA ; Année universitaire 2021/ 2022.
- [2] AMMOUR Hassina ; « Techniques de prédiction d'énergie par apprentissage automatique pour une gestion optimisée de l'énergie dans un micro-réseau » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Energie renouvelable ; Filière : Électrotechnique ; UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI ; TIZI-OUZOU ; Soutenu le 02 / 07 / 2024
- [3] ADA ; « Stockage de l'énergie magnétique supraconductrice- principes, application et perspectives » ; Article ; publié par TYCORUN ; France ; 7/10/2024.
- [4] BOUKHEDIMI Dahmane, DAOUI Yahia ; « Étude d'un système de gestion de l'énergie pour une source électrique hybride » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Energie renouvelable ; Filière : Électrotechnique ; UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI ; TIZI-OUZOU ; Soutenu le 24/ 06/ 2024.
- [5] BENSLIMANE Fatah, BENATIA El Mahdi ; « Étude de stockage d'énergie thermique par sorption solide-gaz Application aux bâtiments à basse consommation » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Génie Mécanique ; UNIVERSITÉ KASDI MERBAH ; OUARGLA ; Année universitaire 2018/2019.
- [6] BENHAMOU Aziza, MESKINE Cherif Nasr Eddine ; « Management of a smart Microgrid in Adrar region » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Energies renouvelables en Electrotechnique ; Filière : Electrotechnique industrielle ; UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS ; MOSTAGANEM ; Soutenu le 14 / 07 / 2021.
- [7] RENAULT GROUP ; « Tout savoir sur la pile à combustible à hydrogène » ; article ; Renault Group ; France ;15/02/2023.
- [8] BENHACINE Tarek ; « Micro-réseaux pour la production d'électricité à partir des énergies renouvelables » ; Article ; publié par Bulletin des Energies Renouvelables N° 53 CDER ; Algérie.
- [9] IBARRA Mateo Espitia-, DUQUE Pablo Maya et DUQUE Álvaro Jaramillo; « Design and Development of a Management System for Energy Micro-Grids Using Linear Programming »; Article; publié par applied sciences 12, n°8, 2022.

- [10] BENOTMANE Sara, MOUALEK Farida ; « Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un Microgrid » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Réseaux électriques et Réseaux électriques intelligents ; Filière : Electrotechnique ; UNIVERSITÉ ABOUBAKAR BELKAID ; TLEMCEN ; soutenu le 12/06/2016.
- [11] BACHIRI Nariman, AINANA Achouak ; « Simulation de dispatching combine économique/environnemental (CEED) en présence d'une source a énergie renouvelable (SER) » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Energies Renouvelables en Electrotechnique ; UNIVERSITÉ DE SALHI AHMED ; NAAMA : soutenu le 24/06/2020.
- [12] BENSAOUDI Mohamed Samir, ARAR Salah Eddine ; « Etude et simulation d'un micro réseau intelligent (microgrid) » ; Mémoire de fin d'étude ; Spécialité : Energie et environnement ; Filière : Electrotechnique ; École Supérieure Des Sciences Appliquées ; TLEMCEN ; soutenu le 10/2020.
- [13] GRAND VIEW RESEARCH, Inc; « U.S. Microgrid Market Size & Share, Industry Report,2030; GVR-4-68040-600-3; 2025.
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/us-microgrid-market-report>
- [14] GUPTA, ANKIT, et SHUKLA Pooja ; « Taille du marché européen des micro-réseaux connectés au réseau : par type de réseau (CA, CC, hybride), par source d'énergie (générateurs diesel, gaz naturel, solaire photovoltaïque, cogénération), par dispositif de stockage, par application, perspectives et prévisions régionales, 2024-2032 ; Rapport ID GMI9447 ; mai 2024. Disponible sur :
<https://www.gminsights.com/fr/industry-analysis/europe-grid-connected-microgrid-market>
- [15] DAHMANI Sourial, KREMIA Walid, MOUHOUBI Moussa et MOUHOUBI Aissa ; « La production de l'énergie électrique dans les zones isolée-Le cas du Grand Sud de l'Algérie » ; Article ; publie par Journal Of North African Economies ; Algérie ; 11/11/2022.
- [16] SONELGAZ ; « Plan de développement 2015–2025 » ; Groupe Sonelgaz ; Algérie ; juin 2015.
- [17] BOUCHAALA1 Abdel Djabar, BOUKADOUM Ahcene, A Ahmed, DIAB Zaki, ALDAKHEEL Eman Abdullah, KHAFAGA Doaa Sami et BENHEMINE Asma; « Optimal sizing and rule-based management of hybrid microgrids using SSA for rural electrification »; Article; publié par nature portfolio; 2026.

- [18] ROUAS M. Rabah ; « Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque » ; thèse de DOCTORAT ; Spécialité : Electrotechnique ; UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI ; TIZI-OUZOU ; 2018.
- [19] OPAL-RT TECHNOLOGIES ; « Des approches efficace pour gérer l'Energie dans un micro-réseau » ; Article ; France ; 30/11/2025.
- [20] SAMMA Yosra, TAIB Samraà ; « Gestion de l'énergie dans les micro-réseaux (Smart home) en utilisant une technique d'optimisation intelligente » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : réseau électrique ; Filière : Électrotechnique ; UNIVERSITÉ AKLI MOHAND OULHADJ ; BOUIRA ; 2019.
- [21] MOKHTARI Yanis ; « Les stratégies de gestion d'énergie dans les micro-réseaux électriques » ; Les stratégies de gestion d'énergie dans les micro-réseaux électriques ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Energie renouvelable ; Filière : Électrotechnique ; UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI ; TIZI-OUZOU ; 2024/2025.
- [22] STOECKLIN Alexandra ; « Système de management de l'énergie : objectif, avantages et mise en œuvre » ; Article ; publie OPERA énergie ; France ; 01 /12/ 2025.
- [23] ÉDITORIAL TEAM ; « les 6 principaux avantages de la gestion énergétique des actifs » ; Article ; Publie par Biblus ; France ;16/7/2023.
- [24] VERSAUD Céline ; « quelles sont les avantages de l'énergie management » ; Article ; Publie par teaby epsa ; France ; 21/05/2024.
- [25] GUELLAADEM Abdelhadi, BOUAMER Mohammed Taha ; « Analyse et exploitation d'un micro-grid » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique ; Filière : Energies Renouvelables ; UNIVERSITÉ DE GHARDAIA ; GHARDAIA ; Soutenu le 30/9/2020.
- [26] JAMES Chen ; « Comprendre les horizons temporels d'investissement : stratégies à court, moyen et long terme ». ; Article ; publie par Investopedia ; 4/9/2025.
- [27] RUSSELL. S, NORVIG. P. ; « Intelligence artificielle : Fondements et applications » ; livre ; Pearson Education ; France. ; 2010.
- [28] ALESSIO La Bella; « Optimization-based control of microgrids for ancillary services provision and islanded operation»; Thèse de DOCTORAT; POLITECNICO; MILANO; 2019.
- [29] MEFTI Soria, GHERIB Saliha ;« L'utilisation de l'algorithme d'optimisation essaim de particule (OEP) pour résoudre le problème de dispatching économique

- basé sur l'énergie renouvelable en Algérie, Une étude de cas : site de Naama » ; MEMOIRE en vue de l'obtention du diplôme de Master ; Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique ; INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE ; NAAMA ; 07/07/2020.
- [30] BOUHAMIDA Bachir ; « OPTION : Énergétique, installation Énergétique, Construction et Fabrication » ; Polycopie de Cours et Exercices Optimisation ; Spécialité : Génie Mécanique ; Faculté de Génie Mécanique ; UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES – MOHAMED BOUDIAF ; ORAN ; 2023-2024.
- [31] DEBBOUZ Brahim, DADDIOUAMER Illyés ; « Aller aux réseaux intelligents » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : Énergies Renouvelables en Électrotechnique ; Filière : Énergies Renouvelables ; UNIVERSITÉ DE GHARDAIA ; GHARDAIA ; 17/06/2021.
- [32] AJZOUL Taib ; « Optimisation des systèmes énergétiques » ; chapitre I : Optimisation linéaire a plusieurs variables ; Faculté des Sciences de Tétouan ; UNIVERSITÉ ABDELMALEK ESSAADI ; Maroc.
- [33] OPAL-RT ; «9Des approches efficaces pour gérer l'Énergie dans un micro-réseau» ; Article; publie par OPAL-RT; 30/11/2025.
- [34] BOUTROS Fouad, DOUMIATI Moustapha, JEAN Christophe Olivier, MOUGHARBEL Imad, KANAAN Hadi ; « Optimisation multi objective d'un micro-réseau basée sur une nouvelle approche de modélisation avec un système de gestion d'énergie à temps réel » ; Article ; publie par SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE ; LILLE, France ; 7 / 07 / 2023.
- [35] HLEIHEL Elie ; « Optimisation multi-objectif d'un micro-réseau DC » ; Thèse de DOCTORAT ; UNIVERSITÉ SAINT-JOSEPH ; Liban ; 28/11/2023.
- [36] REAGAN Jean Jacques Molu, SERGE Raoul Dzone Naoussi, PATRICE Wira, WULFRAN Fendzi Mbasso, SAATONG Tsobze Kenfack, SALAH Kamel; «Optimization-based energy management system for grid-connected photovoltaic/battery microgrids under uncertainty »; Article; publie par ELSEVIER; 2023.
- [37] MOSTEFAOUI Abdelkader ; « Étude de la répartition optimale des puissances dans un réseau électrique par la Programmation non linéaire » ; MEMOIRE DE MAGISTER ; Spécialité : Réseaux Électriques ; UNIVERSITÉ HASSIBA BENBOUALI ; CHLEF ; 14 / 10 / 2008.

- [38] SYNNOVE Hovden ; « An Optimal Model Prédictive Control-Based Energy Management System for Microgrids » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Faculté des technologies de l'information et du génie électrique ; UNIVERSITÉ NORVEGIENNE DE SCIENCE ET DE TECHNOLOGIE ; NORVEGE ; 06/2024.
- [38] AGAG Khadidja, ZOUAIA Abyr ; « Définir le réseau électrique d'aujourd'hui et de demain » ; Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de Licence (LMD) ; Spécialité : ELECTROTECHNIQUE ; Filière : ELECTROTECHNIQUE ; UNIVERSITÉ DR. TAHAR MOULAY ; SAIDA ; 05/06/2024.
- [39] ACHOURI Mohamed Cherif ; « Modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Domaine : Sciences et Technologie ; Filière : Automatique ; UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ; ANNABA ; année 2021.
- [40] SUBHASIS Panda, Pravat Kumar ROUT, Binod Kumar SAHU1, Wulfran FENDZI, Mbasso PRADEEP et Jangir Ali ELRASHIDI; «Optimization-Based Energy Management for Grid-Connected Photovoltaic–Battery Systems in Smart Grids Using Demand Response and Particle Swarm Optimization»; Article; publié par Engineering Reports; 10 /07/2025.
- [41] OLFA Gama; « Optimisation multicritère du dimensionnement d'un micro- réseau électrique urbain à base des énergies renouvelables » MEMOIRE présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie; UNIVERSITÉ DU QUEBEC EN ABITIBI-TEMISCAMINGUE; CANADA; 06/2024.
- [42] RASOAVONJY Pauli Simone ; « Modélisation stochastique et optimisation d'un micro-réseau autonome » ; Thèse de DOCTORAT ; UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION ; France ; 15 /06/2025.
- [43] DJEDAIET Kaputar, HAMIDA Isaak ; « Contrôle des micro-réseaux par le biais de méthodes basées sur l'apprentissage automatique (machine Learning) » ; Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER ; Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLES ; UNIVERSITÉ ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI ; TEBESSA, 2023/2024.
- [44] BOUALEM Sassia ; « Optimisation d'un micro réseau intelligent vert éolienne/PV/batteries/groupe électrogène connecté au réseau »; Thèse présentée en vue de l'obtention Du Diplôme de Doctorat; Spécialité: ENERGIES RENOUVELABLES; UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER ; BISKRA; 11/05/2023.