

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Énergie et Environnement

Présenté par :

BEN LAKEHAL Mohamed Amine

Thème

**Optimisation par essaim particulaire et
par algorithme génétique pour la
gestion intelligente des puissances
d'un micro-réseau**

Soutenu publiquement, le 09/09/2020, devant le jury composé de :

Dr ABDI Sidi Md EL Amine	MCB	ESSA Tlemcen	Président
Dr BOUKLI HACENE Fouad	MCA	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr KERBOUA Abdelfettah	MCB	ESSA Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Dr CHEMIDI Abdelkarim	MCB	ESSA Tlemcen	Examineur 1
Dr BOUSMAHA Imen	MCB	ESSA Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سنة ١٤٢٠ هـ

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, l'intelligence et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je remercie sincèrement Monsieur Fouad Boukli Hacene et Monsieur Kerboua Abdelfatah ; respectivement Encadreur et Co Encadreur de ce travail ; ils se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements aux membres du jury :

*Mrs ABDI Sidi Md El Amine pour l'honneur qu'il m'a fait de bien vouloir présider ce jury.
Mrs CHIMIDI Abdelkrim et Mme BOUSMAHA Imene qui ont accepté d'examiner mon travail.*

Merci à l'ensemble des enseignants du département électrotechnique qui ont veillé à ma formation durant mon parcours universitaire.

Dédicaces

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être,

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours,

Merci à vous deux encore mille fois. Que Dieu le plus puissant vous garde et vous procure la santé, le bonheur et la longue vie.

À ma chère sœur

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, te protège et te garde.

*À toute la famille **BEN LAKEHAL** et **SEDKAOUI***

*À mes amis de toujours **Fayçal, Hocine, Samy, Sarah, Abdeldjalil, Abderrahim***

Je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements

À tous ceux ou celles qui me sont chers et que j'ai omis involontairement de citer,

À ceux qui consacrent leur existence pour rendre ce monde meilleur.

Amine

Résumé

Une stratégie de gestion intelligente des flux énergétiques circulant dans les systèmes hybrides est nécessaire pour gérer économiquement la production tout en maintenant l'équilibre entre l'offre et la demande. Trouver les consignes de puissance des divers générateurs optimaux peut conduire à une utilisation modérée et judicieuse des puissances disponibles dans le micro-réseau. Ce mémoire vise à appliquer l'optimisation des essaims de particules (PSO) et l'algorithme génétique (AG) pour minimiser le coût d'exploitation de l'énergie consommée par la charge. Deux scénarios ont été élaborés pour trouver les consignes de fonctionnement optimales. Le premier scénario traite le problème d'optimisation sans injection du surplus énergétique issue des sources renouvelables (PV et éolienne) dans le réseau principal. Alors que le deuxième scénario injecte de l'énergie dans le réseau durant des heures précis là où la charge est énergétiquement satisfaite et un surplus d'énergie provenant des sources renouvelables est présent. Les résultats ont montré que les coûts d'exploitation pendant la journée étaient nettement réduits grâce à l'utilisation des points de consignes optimales des générateurs distribués, et cette réduction a été encore plus importante lors de l'injection et la vente du surplus énergétique au réseau. Pour conclure, les principaux avantages de la méthodologie proposée dans ce mémoire sont l'amélioration de l'efficacité énergétique locale du micro-réseau, la réduction des coûts de consommation d'énergie et la réduction notable des gaz à effet de serre dans l'air.

Mots clés :

Energies Renouvelables, Micro-réseau, Gestion d'énergie, Optimisation, Algorithme Génétique, Optimisation Par Essaim Particulier, Système d'Énergie Hybride, Injection

Abstract

An intelligent management strategy for the energy flows circulating in hybrid systems is necessary to economically manage production while maintaining the balance between supply and demand. Finding the optimum power setpoints for the various generators can lead to a moderate and judicious use of the powers available in the micro-grid. This thesis aims to apply Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA) to minimize the cost of operating the energy consumed by the load. Two scenarios have been developed to find the optimal operating instructions. The first scenario addresses the optimization problem without injecting excess energy from renewable sources (PV and wind) into the main grid. While the second scenario injects energy into the grid during specific hours where the load is energetically satisfied and excess energy from renewable sources is available. The results showed that daytime operating costs were significantly reduced through the use of the optimal set points of the distributed generators, and this reduction was even greater when injecting and selling the surplus energy to the network. To conclude, the main advantages of the methodology proposed in this thesis are the improvement of the local energy efficiency of the micro-grid, the reduction of the energy consumption costs and the notable reduction of greenhouse gases in the air.

Keywords :

Renewable Energies, Micro-grid, Energy Management, Optimization, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Hybrid Energy System, Injection

ملخص

تعد استراتيجية الإدارة الذكية لتدفقات الطاقة المتداولة في الأنظمة الهجينة ضرورية لإدارة الإنتاج اقتصادياً مع الحفاظ على التوازن بين الإنتاج والاستهلاك. يمكن أن يؤدي العثور على نقاط ضبط الطاقة المثلى لمختلف المولدات إلى استخدام معتدل وحكيم للقوى المتاحة في الشبكة الصغيرة. تهدف هذه الأطروحة إلى تطبيق تحسين سرب الجسيمات والخوارزمية الجينية لتقليل تكلفة تشغيل الطاقة التي يستهلكها الحمل. تم تطوير سيناريوهين للعثور على إرشادات التشغيل المثلى. يعالج السيناريو الأول مشكلة التحسين دون ضخ الطاقة الزائدة من المصادر المتجددة (الكهروضوئية والرياح) في الشبكة الرئيسية. بينما يوضح السيناريو الثاني الطاقة في الشبكة خلال ساعات محددة حيث يكون الحمل مرضياً بالطاقة وتوجد طاقة زائدة من المصادر المتجددة. أظهرت النتائج أن تكاليف التشغيل خلال النهار انخفضت بشكل كبير باستخدام نقاط المجموعة المثلى للمولدات الموزعة ، وكان هذا التخفيض أكبر عند حقن وبيع الطاقة الفائضة إلى الشبكة الرئيسية. في الختام ، تمثل المزايا الرئيسية للمنهجية المقترحة في هذه الأطروحة في تحسين كفاءة الطاقة المحلية للشبكة الصغيرة ، وخفض تكاليف استهلاك الطاقة ، والتقليل الملحوظ من غازات الاحتباس الحراري في هواء.

الكلمات المفتاحية : الطاقة المتجددة، نظام متعدد المصادر ، تصميم ، الخوارزمية الطاقات المتجددة ، الشبكة الصغيرة ، إدارة الطاقة ، التحسين ، الخوارزمية الجينية ، تحسين السرب الجسيمي ، نظام الطاقة الهجين ، الضخ.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	17
I Généralités sur les systèmes hybrides	21
I.1 Introduction	22
I.2 La problématique énergétique mondiale	22
I.3 La position mondiale actuelle envers les énergies renouvelables	24
I.4 Les systèmes hybrides	25
I.4.1 Classification des systèmes hybrides	26
I.4.1.1 Le régime de fonctionnement	26
I.4.1.2 la structure du système	26
I.4.1.3 la gamme de puissance	26
I.4.2 Schéma général d'un système hybride	27
I.4.3 La stratégie de gestion de l'énergie des systèmes hybrides	28
I.4.3.1 Gestion de stockage	28
I.4.3.2 Gestion de charge	28
I.4.4 Les différentes combinaisons majeures d'un système hybride	29
I.4.4.1 <i>Configuration en bus CC</i>	30
I.4.4.2 <i>Configuration en bus CA</i>	31
I.4.4.3 <i>Configuration en bus CA/CC</i>	31
I.4.5 Les micro-réseaux à générateurs distribués	32
I.5 La stratégie de gestion d'énergie	33
I.6 Conclusion	35
II Modélisation et formulation de la problématique	36
II.1 Introduction	37
II.2 L'architecture du micro-réseau	37
II.3 Elaboration des modèles de sources d'énergie	38
II.3.1 Modélisation de l'éolienne	38

II.3.2	Modélisation du générateur photovoltaïque	40
II.3.3	Modélisation des convertisseurs	41
II.3.4	Modélisation du système de stockage	41
II.3.5	Modélisation du réseau électrique	42
II.4	La formulation du problème	43
II.4.1	Minimisation du coût	44
II.4.2	Évaluation des émissions	44
II.5	Les contraintes	45
II.5.1	Contrainte liée à l'équilibre des puissances	45
II.5.2	Contraintes liées aux limites électriques des générateurs	45
II.5.3	Contraintes liées aux limites du système de stockage	46
II.6	Les méthodes d'optimisation	46
II.6.1	Les méthodes déterministes	46
II.6.2	Les méthodes stochastiques	47
II.6.2.1	Les algorithmes génétiques (AG)	47
II.6.2.2	L'optimisation par essais particuliers (PSO)	49
II.7	Conclusion	53
III	Résultats et discussions	54
III.1	Introduction	55
III.2	Présentation des données	55
III.3	Le système de gestion proposé	60
III.4	Résultats des deux programmes d'optimisation	62
III.4.1	Scénario 1 : Gestion optimale des sources sans injection dans le réseau	62
III.4.2	Scénario 2 : Gestion optimale des sources avec injection dans le réseau	67
III.5	Synthèse	72
III.6	Conclusion	75
Annexes		83
A	Les algorithmes	84

Table des figures

Table des figures

I.1	Capacité solaire photovoltaïque globale et ajouts annuels (2007-2017).	23
I.2	Capacité d'énergie éolienne globale et ajouts annuels (2007-2017).	23
I.3	Investissement global en énergies renouvelables (2007-2017).	24
I.4	Classification des systèmes hybrides.	26
I.5	Schéma général d'un système multi-sources.	27
I.6	Diagramme exemple de priorité des charges.	29
I.7	Architecture de la configuration à bus CC.	30
I.8	Architecture de la configuration à bus CA.	31
I.9	Architecture de la configuration à bus CC/CA.	32
II.1	Architecture du micro-réseau.	38
II.2	Modèle de la courbe de puissance.	40
II.3	Le croisement unitaire.	48
II.4	La mutation.	48
II.5	Organigramme de l'algorithme génétique.	49
II.6	Mécanisme de recherche du PSO dans l'espace multidimensionnel.	51
II.7	Organigramme du PSO.	52
III.1	Profil de la consommation journalière.	59
III.2	Puissance photovoltaïque journalière.	59
III.3	Puissance éolienne journalière.	59
III.4	Organigramme de la stratégie de gestion d'énergie.	61
III.5	Résultats de simulation sur Matlab.	64
III.6	Les consignes de puissance optimales obtenues au premier scénario	65
III.7	Les prix unitaires des puissances issues de la gestion optimale et le prix optimal de facturation.	65
III.8	l'échange énergétique des batteries avec le micro-réseau durant la journée.	66
III.9	État de charge du système de stockage.	66

III.10	Les émissions totales quotidiennes dues à l'utilisation des sources fossiles du micro-réseau.	67
III.11	Résultats de simulation sur Matlab.	69
III.12	Les consignes de puissance optimales obtenues au second scénario	70
III.13	Les prix unitaires des puissances issues de la planification optimale et le prix optimal de facturation du second scénario.	70
III.14	La puissance fournie par le réseau, la puissance injectée et la puissance payée durant une journée.	71
III.15	Les émissions totales quotidiennes dues à l'utilisation des sources fossiles du micro-réseau avec injection.	72
III.16	Comparaison des tarifs horaires quotidiennes avec et sans injection.	73
III.17	Comparaison des émissions de GES avec et sans injection à cotées de la puissance injectée dans le réseau.	74

Liste des tableaux

Liste des tableaux

I.1	Classification des systèmes hybrides selon la gamme des puissances.	27
III.1	Puissances des générateurs distribués.	56
III.2	Les limites de puissances des générateurs distribués, le système de stockage et le réseau principal.	57
III.3	Les principaux facteurs d'émissions des GES.	57
III.4	Les prix unitaires horaires des générateurs distribués, le système de stockage et réseau principal.	58
III.5	Résultats obtenus de la gestion optimale sans injection au réseau.	63
III.6	Les résultats obtenus du scénario 1.	63
III.7	Résultats obtenus de la gestion optimale avec injection.	68
III.8	Les résultats du second scénario.	69

Liste d'abréviation

Liste d'Abréviation

AG	Algorithme génétique
BFGS	La formule de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
CA	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
CO₂	Dioxyde de Carbone
DFP	La formule de Davidon-Fletcher-Powel
EDC	État De Charge
ER	Énergie Renouvelable
GES	Gaz à Effet de Serre
IEA	Agence Internationale de l'Énergie
MR	Micro-Réseau
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
NO_x	Oxydes d'Azote
PDD	Profondeur De Déchargement de la batterie
PSO	Optimisation par Essaims Particulaires
PV	Photovoltaïque
SEH	Système d'Énergie Hybride
SHSER	Système Hybride à Sources d'Énergie Renouvelables
SH	Système Hybride
SO₂	Dioxyde de Soufre

Nomenclature

Δ_t	Pas de simulation
η_{bat}	Rendement de la batterie
η_{ond}	Rendement de l'onduleur
η_r	Rendement de référence du module photovoltaïque
γ	Coefficient de température
$\overrightarrow{B_{xi}}$	Vecteur des prix horaires des puissances
$\overrightarrow{EF_{xi}}$	Vecteur des taux d'émissions
$\overrightarrow{G_{best}}$	Vecteur de la meilleure position des particules
$\overrightarrow{P_{besti}}$	Vecteur de la meilleure position d'une particule
$\overrightarrow{P_{xi}}$	Vecteur des puissances issues des différent générateurs
$\overrightarrow{v_i}$	Vecteur vitesse de la particule
$\overrightarrow{X_i}$	Vecteur position de la particule
EDC_{max}	Limite supérieure de chargement
EDC_{min}	Limite inférieure de déchargement
EDC_t	État De Charge instantanée de la batterie
G	Irradiation globale
G_{best}	Coût total
$Néo$	Nombre d'éoliennes
N_{pv}	Nombre de modules photovoltaïques
$Péo$	Puissance produite par l'éolienne
P_c	Puissance de la charge
P_{pv}	Puissance produite par un seul module photovoltaïque
P_r	Puissance échangée avec le réseau
S	Surface
T_0	La température standard

T_a	Température ambiante
T_c	Température du module photovoltaïque
v	Vitesse instantanée de l'éolienne
v_d	Vitesse de démarrage de l'éolienne
v_i	Vitesse de vent mesurée à $10m$
v_m	Vitesse de coupure de l'éolienne
v_n	Vitesse nominale de l'éolienne

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, l'intérêt des sources d'énergies renouvelables (SER) pour la production d'électricité gagne progressivement plus d'importance dans le monde entier en raison de l'épuisement des combustibles fossiles, l'augmentation de la demande en énergie et des préoccupations environnementales croissantes. Par conséquent, il existe à présent une grande tendance à utiliser les SER pour consolider la production d'électricité, en particulier pour les zones isolées ou éloignées. L'utilisation de différentes sources d'énergie renouvelables avec des unités de stockage et de secours pour former un système d'énergie renouvelable hybride, peut engendrer une source d'énergie plus économique et plus fiable [1]. Les micro-réseaux font partie des systèmes énergétiques hybrides, ils sont introduits comme un nouveau concept dans l'exploitation et la planification des systèmes électriques modernes. Ils dépendent principalement des ressources renouvelables et des infrastructures du réseau intelligent. Ils sont capables d'échanger de l'énergie avec le réseau principal ou avec d'autres micro-réseaux. De plus, l'utilisation de ressources de production décentralisées, en particulier les ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire, réduit fortement les émissions de gaz à effet de serre et les pertes dues au transport de l'énergie électrique [2]. En revanche ; la réponse non linéaire des composants du micro-réseau et la nature aléatoire des SER et du profil de charge, imposent une gestion de ces sources d'énergies qui s'adaptera et incorporera ces unités, afin de manipuler la puissance et de la distribuée à la charge aussi efficacement et économiquement possible [3].

L'un des problèmes les plus importants dans les études récentes est d'optimiser les composants du micro-réseau pour répondre aux exigences de la charge avec le coût minimum possible et une fiabilité maximale. Compte tenu de la complexité de l'optimisation du micro-réseau, il était impératif de découvrir des méthodes d'optimisation efficaces prêtes à obtenir des résultats d'optimisation précis. L'algorithme d'optimisation des essaims de particules (PSO) et l'algorithme génétique (AG) sont recommandés comme les méthodes les plus précieuses et les plus prometteuses pour optimiser la gestion d'énergie dans un micro-réseau en raison de l'utilisation de l'optimum global pour localiser la meilleure solution [4]. Bien que le PSO ait été utilisé

dans plusieurs études de gestions et donne des résultats prometteurs. La plupart de ces études se concentrent sur un seul problème tel que le dimensionnement, le contrôle des émissions, la fiabilité ou le coût uniquement.

Dans un micro-réseau contenant un système d'énergie hybride PV/éolienne/batterie/micro-turbine en plus de la charge, la stratégie de gestion est considérablement différente de celle des réseaux électriques conventionnels. De nombreuses recherches ont été développées dans le domaine de la gestion optimale du micro-réseau tant en mode connecté au réseau qu'en mode isolé. Dans ce mémoire, un algorithme de gestion économique des énergies fournies par chaque générateurs est développé en vue de satisfaire la demande du micro-réseau avec un coût d'exploitation optimal. La présentation de ce travail est scindée en trois chapitres.

Le premier chapitre analyse le contexte énergétique mondial, en évoquant sa position actuelle envers les énergies renouvelables. Nous définissons ainsi, les systèmes énergétiques hybrides en introduisant les différentes technologies actuelles et les techniques de gestion de ce dernier.

Le second chapitre mettra en évidence l'architecture du micro-réseau appuyé dans ce travail, il sera ensuite dédié à la modélisation des différents générateurs distribués, les convertisseurs et le système de stockage, et de mettre en évidence leurs modèles mathématiques utilisés tout au long de ce mémoire. Enfin, nous définissons et expliquons la problématique et le modèle utilisée en présentant la fonction objective et les contraintes qui lui obéissent, et on mentionne les différentes techniques d'optimisations responsables dans la gestion des systèmes énergétiques hybrides, tout en évoquant la stratégie de gestion adoptée.

Dans le troisième chapitre nous présenterons et analyserons le potentiel énergétique et les données utilisées dans cette étude. Ensuite, on élabore les algorithmes adéquats en leurs introduisant les données de puissances et les prix unitaires de ces dernières sous la plateforme de programmation Matlab. Enfin, une étude économique sera faite et les résultats de simulation seront présentés, analysés et discutés afin de montrer la fiabilité de notre travail.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes hybrides

I.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelables font l'objet d'un gain d'intérêt ces dernières années qui bénéficient de plusieurs avantages : elles sont gratuites, écologiques et disponibles. Dans le même cadre, on a la diminution des ressources énergétiques fossiles ; l'augmentation considérable des besoins en énergie, les difficultés d'approvisionnement, le poids du secteur énergétique dans l'industrie incitent de choisir des nouveaux modèles adéquats de production et de consommation d'énergie. L'exploitation des énergies renouvelables permet de fournir de l'électricité aux sites isolés et d'éviter la création de nouvelles lignes [5]. Ce sont les raisons pour lesquelles la plupart des états font des énergies renouvelables une priorité de leur politique énergétique. Dans ce premier chapitre on va donner un aperçu général sur la problématique mondiale d'énergie ainsi que sa position actuelle envers les énergies renouvelables. Nous évoquerons aussi les systèmes d'énergies hybrides, plus précisément les micro-réseaux en concrétisant les principales notions liées à la technologie actuellement utilisée dans ces derniers. Et nous concluons avec un aperçu sur la stratégie de gestion des micro-réseaux et leurs importances dans la gestion des différents éléments de ce dernier.

I.2 La problématique énergétique mondiale

En 2017, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) a déclaré que la production mondiale d'énergie a atteint les 14035 MTEP (millions de tonnes d'équivalent pétrole), dont 2652,615 MTEP correspondent à la production mondiale d'électricité [6]. Sachant que, 64% de l'électricité est produite par des ressources fossiles et environ 10% est d'origine nucléaire, tandis que 26% seulement est générée par des sources renouvelables dont ; l'hydroélectricité à 16%, l'éolien à 5%, la biomasse à 3% et le photovoltaïque à 2%. De cet effet, une prise de conscience doit être obligatoirement adoptée en raison du risque environnemental qui menace l'écosystème de la planète et qui pourrait conduire à une forte augmentation des catastrophes naturelles due au réchauffement climatique. Cela nécessite une limitation des gaz à effet de serre principalement causés par la combustion de ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon).

Afin de couvrir la demande croissante d'énergie, plusieurs solutions ont été proposées par la communauté mondiale [7]. La première consiste à rechercher de nouvelles sources de combustibles à extraire du sol, néanmoins, cette solution soulève de nombreuses questions écologiques et est en contradiction avec la recommandation de la transition énergétique, la seconde solution encourage l'investissement dans le nucléaire mais avant cela il faut se souvenir de la catastrophe

de FUKUSHIMA qui a causée des effets écologiques à long terme à travers les déchets radioactifs. Enfin, la dernière solution s'appuie sur l'orientation vers l'économie d'énergie et l'adoption d'énergies propres, cette solution est conforme aux recommandations d'efficacité énergétique et les énergies durables.

L'utilisation de sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et la géothermique est la meilleure solution pour la réduction des gaz responsables du réchauffement climatique. Bien que les énergies renouvelables ne représentent actuellement qu'une faible proportion du bilan énergétique mondial, un engouement pour ces technologies peut être observé ces dernières années. Les figures I.1 et I.2 représentent respectivement ; la capacité solaire photovoltaïque et éolienne globale et leurs ajouts annuels dans le monde.

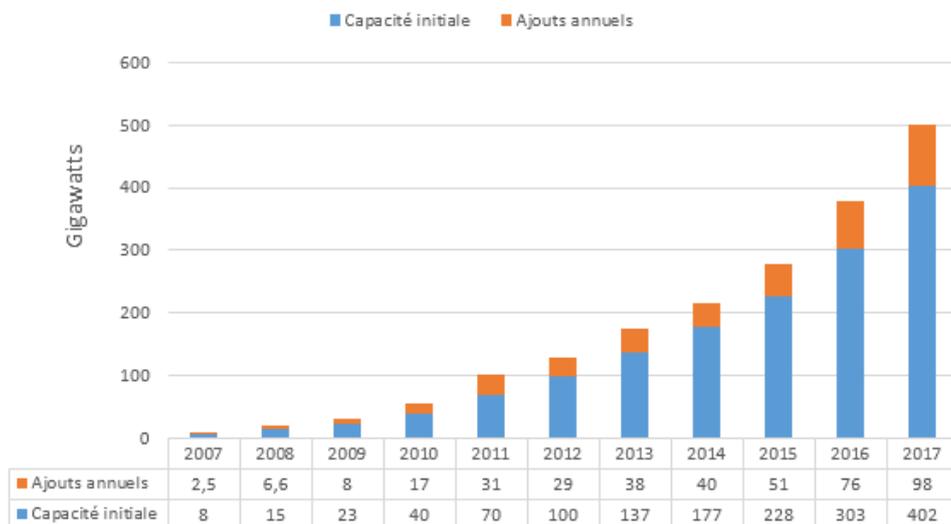


FIGURE I.1 – Capacité solaire photovoltaïque globale et ajouts annuels (2007-2017) [8].

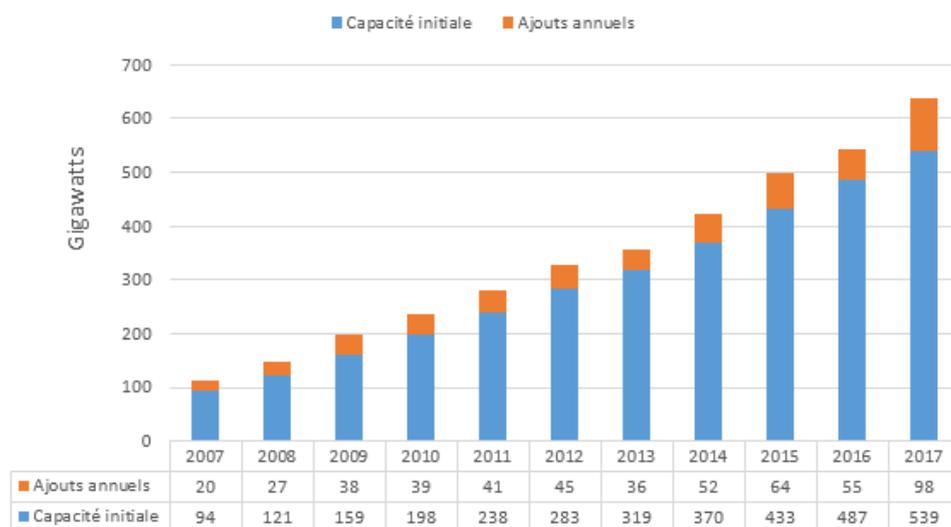


FIGURE I.2 – Capacité d'énergie éolienne globale et ajouts annuels (2007-2017) [8].

Globalement, des figures I.1 et I.2 on remarque une augmentation considérable dans la capacité additionnée des systèmes solaires PV et éoliennes en 2017 comparés en 2007. Sur la base du protocole de Kyoto [9], l'Union européenne impose une stratégie pour les états membres avec des objectifs devant être atteints d'ici 2020, nommée la stratégie 20/20/20. Elle consiste à une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, 20% de réduction de la consommation d'énergie en employant les bases de l'efficacité énergétique et une intégration de 20% des sources d'énergie renouvelables pour la satisfaction des besoins énergétique.

I.3 La position mondiale actuelle envers les énergies renouvelables

Les investissements mondiaux ont battu un nouveau record. Cette avancée a eu lieu malgré la chute des couts des combustibles fossiles, l'investissement global en énergie renouvelable est présenté dans la figure I.3. En termes d'investissements net dans les nouvelles capacités électriques, les énergies renouvelables ont dépassé les combustibles fossiles encore une fois [8]. L'investissement mondial dans les nouvelles capacités d'énergie renouvelable au cours de la décennie actuelle, de 2010 à 2020 compris, devrait atteindre 350 billions de dollars, comptant plus de gigawatts de capacité d'énergie solaire installée que toute autre technologie de production. Cette décennie d'investissement a permis la multiplication par quatre de la capacité d'ER passant de 414 GW à 1 650 GW. Ainsi, ces derniers ont généré 12,9% de l'électricité mondiale en 2018, évitant l'émission de 2 milliards de tonnes de CO₂ dans l'air.

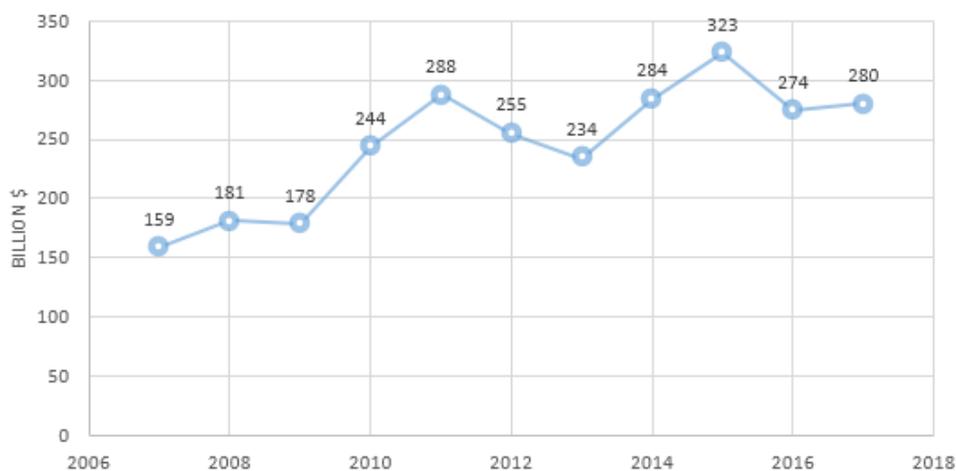


FIGURE I.3 – Investissement global en énergies renouvelables (2007-2017) [8].

Malgré l'avancement de la technologie et le développement mondial, les sources d'énergie renouvelables ne représentent pas une solution universelle pour tous les problèmes présents

d’approvisionnement en électricité. Cela revient à plusieurs raisons. Premièrement, la critique pour leur faible efficacité énergétique par rapport à la source conventionnelle, à court terme les énergies renouvelables entraînent un surcout, le retour sur investissement prend un temps considérable. Mais, le problème crucial reste l’absentéisme de puissance garantie provenant des générateurs, convertissant le potentiel énergétique primaire en électricité, ceci est dû au caractère stochastique des variations de la source originale solaire ou éolienne. Ces variations sont à l’origine causées par le cycle jour-nuit, des nuages dans le ciel ou autres obstacles entre le soleil et le module photovoltaïque. Ceci influera sur la régulation des réseaux électriques qui ne sont pas conçue pour supporter une production décentralisé brusquement variables, donc utilisé une seule source d’énergies renouvelables peut induire à une discontinuité de production de sorte à ne pas répondre aux besoins croissants de la charge. Néanmoins, il est décisif que nous aurons recours aux énergies renouvelables pour les raisons déjà citées auparavant, et afin de palier au problème d’intermittence des sources renouvelables, d’autres éléments sont associés à ces derniers notamment pour le stockage d’énergie. C’est ainsi que des systèmes hybrides couplant différentes sources et moyens de stockage sont créés.

I.4 Les systèmes hybrides

La production d’électricité décentralisée par sources d’énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d’approvisionnement des consommateurs tout en respectant l’environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d’établir des règles de dimensionnement et d’utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, les énergies (solaire et éolienne) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C’est pourquoi on propose souvent un système énergétique hybride composé de ces deux sources d’énergie, qui consiste en l’exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Lorsqu’une seule source d’énergie ne suffit pas à répondre au besoin de la charge et ne garantit pas une puissance fixe, il est possible de combiner deux ou plusieurs sources d’approvisionnement et la formation de ce système est dite hybride (SH) [10]. Un système hybride est un système électrique, comprenant plus d’une source d’énergie. Il est dit système hybride à sources d’énergie renouvelables (SHSER) lorsqu’une source au moins parmi les autres sources est renouvelable. Il peut éventuellement inclure un dispositif de stockage. Le rôle d’un système hybride est d’assurer la demande de charge et d’optimiser sa production afin de combler l’énergie demandée par la charge durant la période d’intermittence et tout en maintenant la qualité d’énergie fournie [11].

I.4.1 Classification des systèmes hybrides

On classe les systèmes multi-sources selon plusieurs critères. En ce qui suit, sont présentées les classifications les plus répandues.

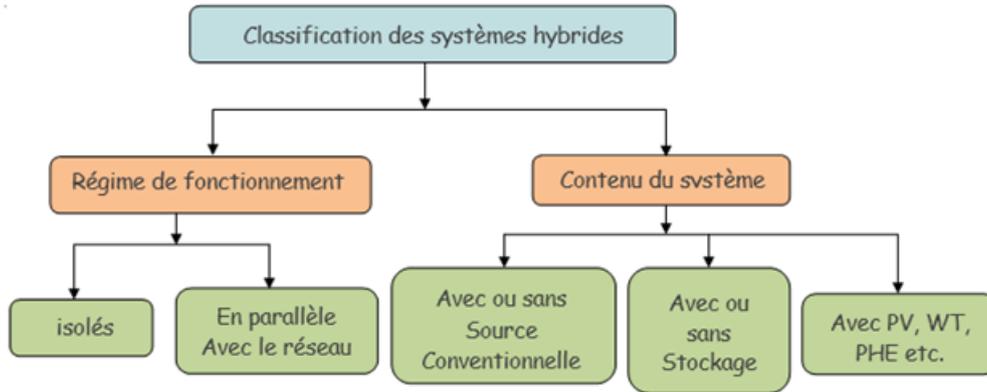


FIGURE I.4 – Classification des systèmes hybrides.

I.4.1.1 Le régime de fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent avoir deux régimes de fonctionnement. Le premier régime, consiste à faire fonctionner le système hybride en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ce régime contribue à satisfaire la charge du système électrique tout en ayant des échanges énergétiques avec le réseau principal (Injection ou/et exportation). Les systèmes hybrides du deuxième régime de fonctionnement en mode isolé ou autonome. Ils contribuent à satisfaire les besoins énergétiques des consommateurs situés dans des zones éloignées et privé du réseau électrique, et donc pas d'interaction avec ce dernier [10].

I.4.1.2 la structure du système

On trouve trois critères principaux responsables du classement des systèmes hybrides en fonction de la structure. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle, le deuxième est la présence ou non d'un dispositif de stockage, en dernier on trouve le critère relatif au type de sources d'énergie renouvelables utilisées [10].

I.4.1.3 la gamme de puissance

Le classement par gamme de puissance est représenté dans le tableau suivant :

TABLE I.1 – Classification des systèmes hybrides selon la gamme des puissances [10].

Puissance du système hybride (kW)	Applications
(Faible) < 10	Systèmes autonomes
$10 \leq$ (Moyenne) ≤ 250	Micro-réseaux isolés
(Grande) ≥ 500	Grands réseaux isolés

I.4.2 Schéma général d'un système hybride

Dans la figure I.5 ci-dessous est représenté le système hybride de façon générale. Un bus électrique commun est relié à tout les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés et classifiés selon leurs fonctions électriques [12].

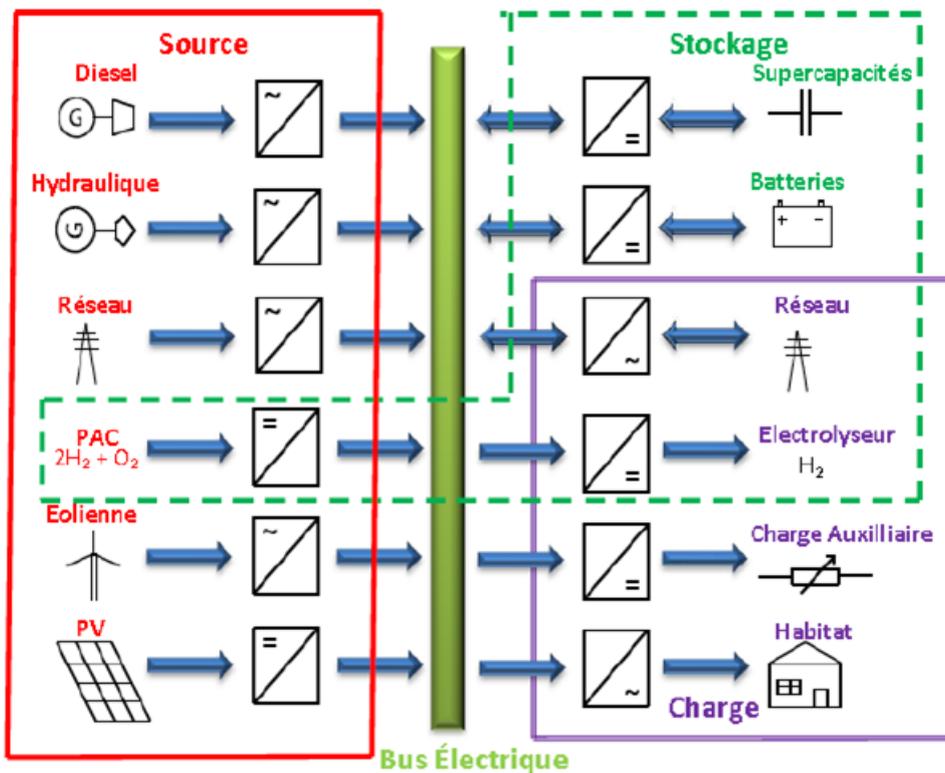


FIGURE I.5 – Schéma général d'un système multi-sources [12].

I.4.3 La stratégie de gestion de l'énergie des systèmes hybrides

I.4.3.1 Gestion de stockage

Afin d'obtenir une énergie optimale et un rendement maximum de l'installation hybride, mettre en place une gestion des transferts d'énergie est nécessaire. Cette dernière permet d'optimiser le fonctionnement de chaque composant du système tout en préservant les normes de leur plage de fonctionnement. On peut citer deux gestions principales dans les systèmes hybrides [13] :

1. **Stratégie de stockage à court terme** : « *Peak Shaving Strategy* », elle permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et de la charge. Lors de la présence d'un pic de consommation, la batterie intervient et couvre ce besoin. Cette stratégie contribue également à la réduction des cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels et donc augmente la durée de vie des générateur.
2. **Stratégie de stockage à long terme** : « *Cycle Charge Strategy* » est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue, notamment celles où le gisement est insuffisant. Dans ce cas, le générateur diesel est arrêté jusqu'à ce que l'état de charge des batteries atteigne le niveau minimal. Une fois ce seuil atteint, le générateur diesel redémarre et reste en fonctionnement jusqu'à ce que les batteries sont rechargées et atteignent le niveau maximal. Cette stratégie contribue également à la réduction des cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels et donc préserve la consommation de carburant. Néanmoins, cette stratégie épuise rapidement le cycle de vie charge/décharge des batteries.

I.4.3.2 Gestion de charge

La stratégie de gestion des charges appuie sur le principe d'utilisation des charges pour faire varier la demande d'énergie. De cette manière, les charges sont connectées et déconnectées par ordre de priorité [13]. La figure I.6 montre un exemple de priorité d'une charge donnée. Cette stratégie peut aussi être à court et à long terme.

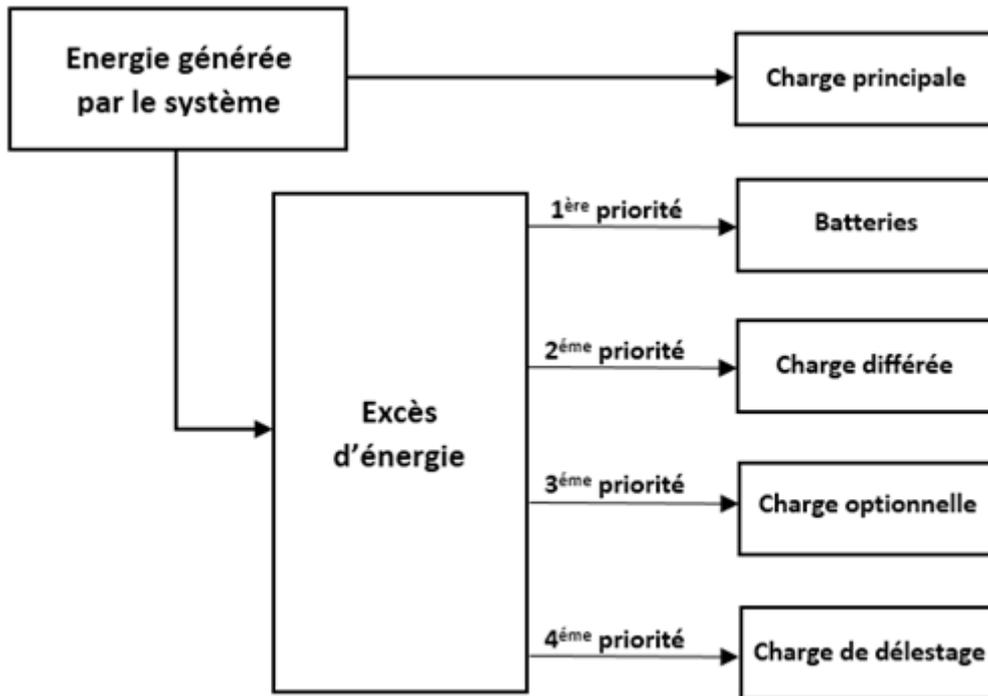


FIGURE I.6 – Diagramme exemple de priorité des charges.

1. **Stratégie de charge à court terme** : La stratégie de contrôle de charge à court terme connecte et déconnecte les charges du système en tenant compte des pics de certains seuils fixes pour la fréquence du bus électrique. Les charges sont donc connectées de manière progressive, selon les variations de fréquence. La charge de délestage a pour rôle de contribuer à régler la fréquence du réseau dans les cas d'un surplus d'énergie, en variant sa puissance en fonction de la déviation de la fréquence.
2. **Stratégie de charge à long terme** : La stratégie de contrôle de charge à long terme assure l'équilibre énergétique sur des intervalles de temps importants. Les charges doivent être connectées seulement quand leur régime de priorité est élevé. Par exemple, les charges différées et optionnelles ont en général une priorité réduite pendant une partie de la journée. Cette stratégie de gestion est aussi utilisée pour réduire les pertes énergétiques du générateur diesel.

I.4.4 Les différentes combinaisons majeures d'un système hybride

Les générateurs électriques composant un système hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient purement basés sur les énergies renouvelables, purement conventionnelle ou mixte entre les deux. Trois configurations s'imposent :

I.4.4.1 Configuration en bus CC

Dans cette architecture les composants de production d'énergie électrique sont connectés au bus continu à travers des convertisseurs de puissances, les générateurs de production d'énergie à courant alternatif comme la micro-turbine ou l'éolienne sont d'abord connecté à un redresseur permettant la conversion alternatif/continu (figure I.7). Les batteries de stockages et les panneaux photovoltaïques sont reliés directement au bus CC, la protection des batteries contre les surcharges ou les décharges profondes se fait à travers un régulateur de charge. Les charges alternatives peuvent être alimentées à travers un onduleur, cependant les batteries et l'onduleur sont dimensionnés en fonction des valeurs de pics de charge, notamment dans les heures de pointes. Cette installation implique un faible rendement due à la quantité d'énergie perdue dans les convertisseurs, elle présente néanmoins d'autres avantages et inconvénients mentionnés ci-dessous :

— **Les avantages :**

1. Facilité du dimensionnement des micros-turbines et des générateurs diesels.
2. Facilité de la commande de l'installation due à la simplicité du schéma électrique.
3. L'onduleur permet une alimentation de la charge avec une tension réglable en amplitude et en fréquence.

— **Les inconvénients :**

1. La puissance fournie par les sources alternatives est convertie deux fois avant d'arriver aux consommateurs ce qui implique un rendement relativement faible.
2. Une coupure totale de l'installation en cas d'anomalie sur l'onduleur.
3. L'onduleur ne peut pas fonctionner en parallèle avec les sources alternative, d'où il devra être surdimensionné de manière à assurer la charge maximale possible.

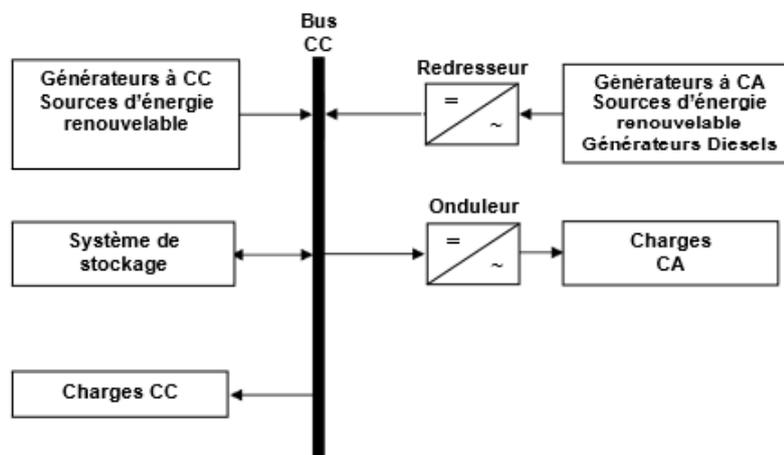


FIGURE I.7 – Architecture de la configuration à bus CC [14].

I.4.4.2 Configuration en bus CA

Cette configuration est caractérisée par la centralisation de la production d'électricité sur le bus CA, pour les micros-turbines, générateurs diesels et l'éolienne la liaison ce fait directement ou à travers des convertisseurs CA/CA. Les panneaux photovoltaïques sont connectés au bus par un onduleur, tandis que les batteries sont connectées par un convertisseur bidirectionnel.

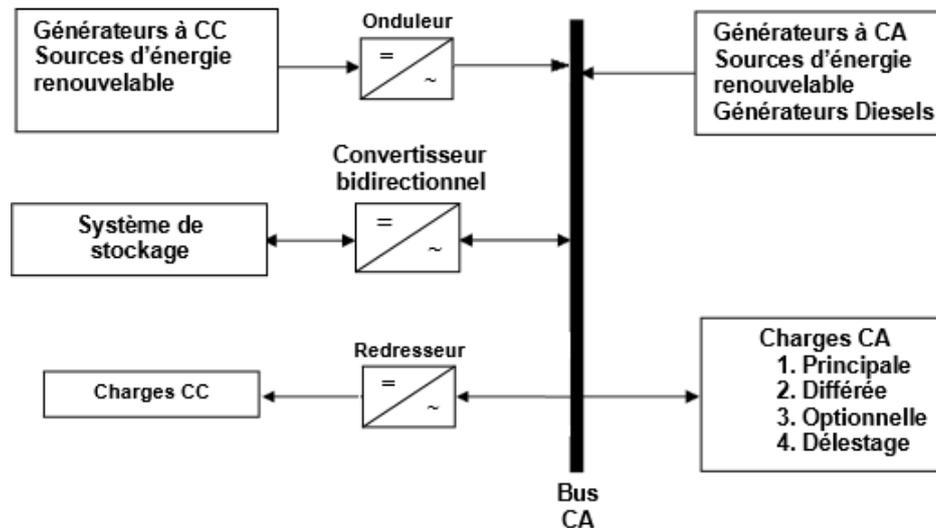


FIGURE I.8 – Architecture de la configuration à bus CA [14].

I.4.4.3 Configuration en bus CA/CC

Dans cette configuration, les sources alternatives sont interconnectées sur le bus CA tandis que les batteries et l'installation photovoltaïque sont reliées au bus CC (figure I.9). Les deux bus sont connectés entre eux à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel qui assure un fonctionnement redresseur lorsque le bus CA fournit de l'énergie à la charge et participe à la recharge des batteries, ou un fonctionnement onduleur lorsque les panneaux photovoltaïques et les batteries fournissent de l'énergie à la charge de manière totale ou partielle. Cette configuration permet d'assurer une alimentation simultanée par les deux bus.

— **Les avantages :**

1. Le dimensionnement de chaque composant ne doit pas se faire en tenant compte d'assurer la charge totale car les consommateurs peuvent être alimentés par les deux sources simultanément.
2. L'énergie des générateurs à CA n'est pas convertie dans la plus part des cas, ce qui assure un meilleur rendement due au fait que les sources fonctionnent avec une puissance proche de leurs puissance nominale.

3. Une anomalie sur le convertisseur n'entraîne pas une coupure de l'alimentation.
4. La réduction du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue les coûts de câblage et l'investissement initial pour la construction du système hybride.

— **Les inconvénients :**

1. Pour assurer un fonctionnement correct du système on doit avoir un control automatique.
2. La synchronisation entre les sources continues et alternatives exige une tension sinusoïdale de la part de l'onduleur.
3. Difficulté de contrôler le bus continue.
4. Vieillesse rapide de la batterie.

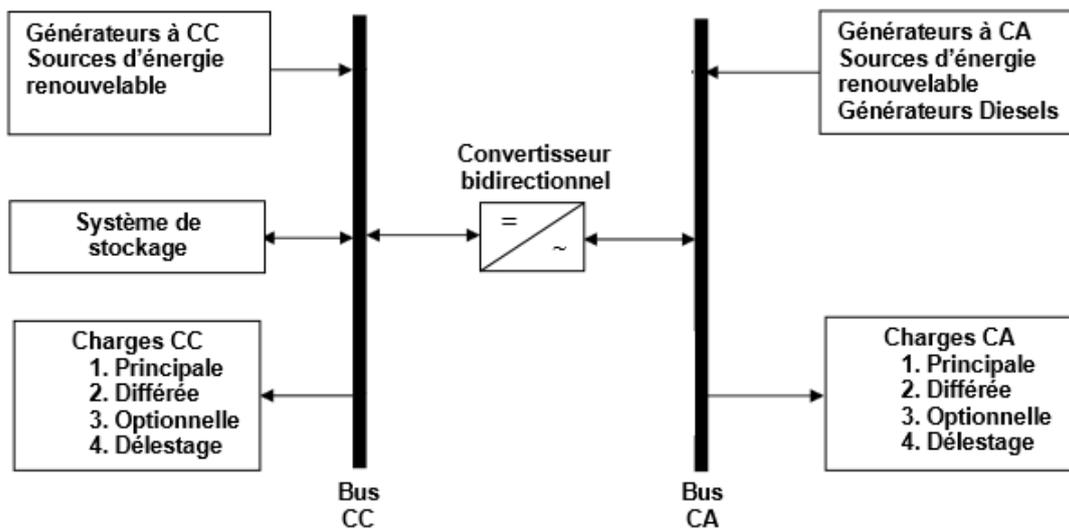


FIGURE I.9 – Architecture de la configuration à bus CC/CA [14].

I.4.5 Les micro-réseaux à générateurs distribués

Le micro-réseau (Microgrid) est la nouvelle tendance en électrification. Il permet d'atteindre les lieux les plus reculés, là où les grands réseaux ne peuvent pas se rendre, et d'offrir à une petite communauté un service plus fiable, plus propre et moins cher. A vrais dire c'est segmenter le réseau en petites parties capables de produire de l'électricité de manière indépendante (décentralisée) du réseau principal. Cela permet d'utiliser tous types de production d'électricité, mais les projets les plus récents privilégient généralement l'énergie propre, comme la production d'énergie solaire, éolienne et le stockage d'énergie. Le micro-réseau peut être connecté ou déconnecté du réseau principal selon la taille de ces générateurs et de la charge. La structure d'un

micro-réseau varie en fonction des contraintes de l'application. Néanmoins, quatre éléments sont souvent utilisés [15] :

- Les sources (renouvelables, batteries, générateur diesel, micro-turbine...);
- Les convertisseurs de puissance (permettant le contrôle et la gestion du système);
- Les filtres d'interconnexions (assurant la transmission d'une énergie de qualité);
- Les charges (statiques, ou dynamiques).

Les potentialités d'un micro-réseau sont évaluées suivant trois critères principaux [15] :

- L'autonomie;
- La qualité de l'énergie transitée;
- La stabilité.

En effet, un micro-réseau doit garantir la continuité de service en garantissant la qualité de l'énergie disponible, la stabilité du réseau et sa robustesse vis-à-vis des perturbations provenant [15].

I.5 La stratégie de gestion d'énergie

Afin de contrôler chacun des éléments constitutifs du système hybride, il faut mettre en place un système de gestion des flux d'énergie. D'une manière générale, une bonne gestion doit garantir que la charge est alimentée en permanence. D'autres objectifs peuvent être fixés à un stade ultérieur, par exemple; la tolérance aux pannes d'un composant, la maximisation de l'efficacité, la réduction du coût d'exploitation... etc. Mais la gestion de l'énergie ne pourra pas aller au-delà des limites physiques des éléments, si le dimensionnement du système a été mal fait, même une gestion efficace de l'énergie ne l'améliorera pas, donc la gestion de l'énergie doit être adaptée au système supervisé.

La stratégie de gestion d'énergie dans un micro-réseau dans notre cas se résume en une utilisation judicieuse et efficace de l'énergie afin minimiser les coûts et d'améliorer la position concurrentielle par rapport aux systèmes classiques. La gestion des unités nécessite un modèle économique précis pour décrire le coût d'exploitation en tenant compte de la puissance de sortie produite. Un tel modèle est naturellement discret et non linéaire, par conséquent, des outils d'optimisation et une modélisation des différents éléments sont nécessaires pour réduire les coûts

d'exploitation à un niveau minimum [16]-[17]. La gestion de l'unité d'un micro-réseau nécessite un algorithme précis pour identifier et exploiter la fonction coût d'exploitation en tenant compte de la demande d'énergie du consommateur. Les outils d'optimisation sont nécessaires pour optimiser l'utilisation des dispositifs individuels en réduisant les coûts d'exploitation en tenant compte des contraintes du système, et en évaluant le taux d'émission des GES dégagées durant le fonctionnement du micro-réseau [18].

I.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de façon globale de mettre en évidence la problématique mondiale d'énergie et le besoin crucial d'aborder de nouvelles alternatives à la production électrique face à l'augmentation rapide de la demande en énergie. Ainsi, nous avons donné un aperçu général sur la position mondiale envers les énergies renouvelables qui paraît prometteuse grâce à leurs interactions mutuelles qui donnent naissance à des systèmes plus fiables et compétents. De ce fait, nous avons évoqué les systèmes d'énergies hybrides, plus précisément les micro-réseaux en concrétisant les principales notions liées à la technologie actuellement utilisée dans ces derniers. Par conséquent, la suite de ce mémoire sera consacrée à l'étude de la gestion énergétique d'un micro-réseau. De ce fait, le chapitre 2 présentera l'architecture du système étudié, la modélisation mathématique de ces différents éléments ainsi que la reformulation mathématique de la problématique en évoquant la stratégie de gestion adoptée.

Chapitre II

Modélisation et formulation de la problématique

II.1 Introduction

L'objectif de ces travaux de mémoire est de proposer des solutions de gestion des ressources énergétiques dans un micro-réseau. Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons l'architecture du micro-réseau étudié ainsi que la modélisation mathématique des différents éléments associés à ce dernier. Cette partie est essentielle et nous permet par la suite de maîtriser les avantages réunis des générateurs et par conséquent, pouvoir optimiser leurs fonctionnements selon les critères imposés. Afin de tester en simulation la stratégie de gestion adoptée, il est nécessaire de se disposer d'une fonction objective qui reflète la problématique de ce travail. Ainsi, dans la deuxième partie, une reformulation mathématique de cette dernière sera développée, évoquant les principales contraintes et les outils d'optimisations utilisés dans ce mémoire.

II.2 L'architecture du micro-réseau

Le micro-réseau choisi se compose de deux sources renouvelables (PV et éolien), une source conventionnelle (micro-turbine) et un système de stockage en plus de la charge. Ces derniers sont interconnectés entre eux via deux bus (CC et CA) par l'intermédiaire des convertisseurs. Le système est connecté au réseau de distribution public. L'échange d'énergie entre le micro-réseau et le réseau public est mutuel, ce dernier fourni (vend) de l'énergie lorsque son prix unitaire est pas cher, et absorbe (achète) le surplus énergétique issues des générateurs renouvelables. La gestion d'énergie à temps réel de différents éléments du micro-réseau est principalement basée sur le coût unitaire du kWh, de sorte à respecter et satisfaire la contrainte d'équilibre de charge tout en minimisant le coût. La figure II.1 représente l'architecture du micro-réseau adoptée dans cette étude.

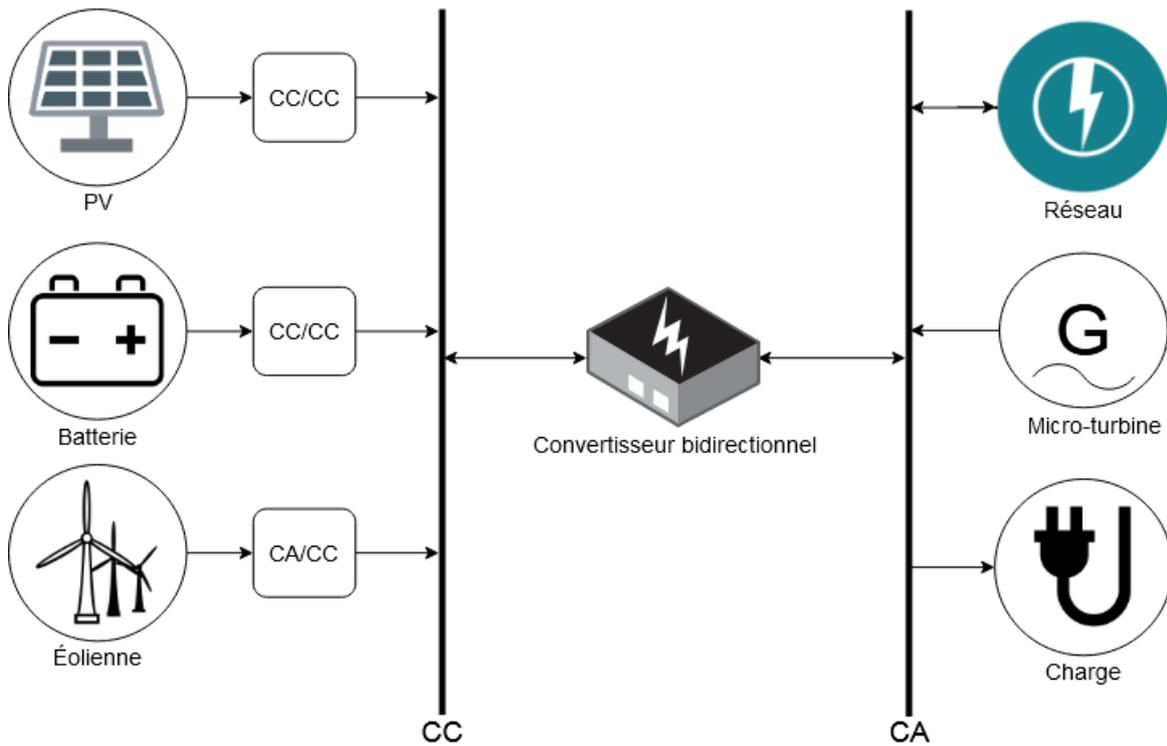


FIGURE II.1 – Architecture du micro-réseau.

II.3 Elaboration des modèles de sources d'énergie

Les systèmes hybrides peuvent être décentralisés et interconnectés au réseau public. Néanmoins, la manipulation et la gestion flexible nécessitent une modélisation bien déterminée en fonction des variables préalablement identifiées. La simulation d'un système d'énergie hybride est atteinte en modélisant précieusement l'ensemble de ses composants, pour but d'optimiser le fonctionnement. Dans ce qui suit, nous allons modéliser et évaluer les différentes sources utilisées dans ce travail.

II.3.1 Modélisation de l'éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie librement disponible. L'énergie électrique est produite par la conversion mécanique-électrique de la rotation des pales de l'éolienne qui sont placées sur une tour à une hauteur considérable. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors de la conception du modèle d'éolienne, tels que la courbe de puissance de l'éolienne, le rendement du générateur et l'efficacité de la transmission mécanique. D'autre part, le choix du modèle est fait en fonction de la répartition de la vitesse du vent sur le site choisi [19].

Le vent étant de nature stochastique, une éolienne n'a aucun contrôle sur la puissance qu'elle produit. Par conséquent, la production d'électricité par les éoliennes dépend uniquement de la disponibilité de la vitesse du vent et celle-ci varie en fonction de la hauteur. La vitesse du vent mesurée à la hauteur de l'anémomètre doit être convertie en hauteur du moyeu par l'équation suivante [19] :

$$\frac{v_z}{v_i} = \left(\frac{h}{h_i} \right)^x \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- v_z et v_i : Les vitesses du vent au moyeu et à la hauteur de référence Z et Z_i .
- x : Exposant de la loi de puissance depend de la rugosité du sol et égal à 1/7 pour un terrain ouvert.

La puissance produite par les éoliennes est en fonction de la vitesse du vent [20], on établit la relation entre la vitesse du vent et la puissance de sortie comme suit :

$$\begin{cases} P_{eo}(t) = 0 & v(t) < v_d \\ P_{eo}(t) = P_{eon} \left(\frac{v^3 - v_d^3}{v_n^3 - v_d^3} \right) & v_d \leq v(t) \leq v_n \\ P_{eo}(t) = P_{eon} & v_n \leq v(t) \leq v_m \\ P_{eo}(t) = 0 & v_m \leq v(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- P_{eon} : La puissance électrique nominale de l'éolienne (W).
- $v(t)$: La valeur de la vitesse du vent (m/s).
- v_n : la vitesse nominale de l'éolienne (m/s).
- v_m : la vitesse de coupure de l'éolienne (m/s).
- v_d : la vitesse de démarrage de l'éolienne (m/s).

La courbe de puissance d'un générateur éolien est illustrée dans la figure II.2, dans laquelle la production d'électricité commence à la vitesse v_D et s'arrête à v_M . La puissance de sortie augmente de manière non linéaire entre v_D et v_N et reste au niveau de la production nominale jusqu'à ce que la vitesse du vent atteigne v_M . Pour des raisons de sécurité, l'éolienne ne produit plus d'électricité après la vitesse de coupure de l'éolienne.

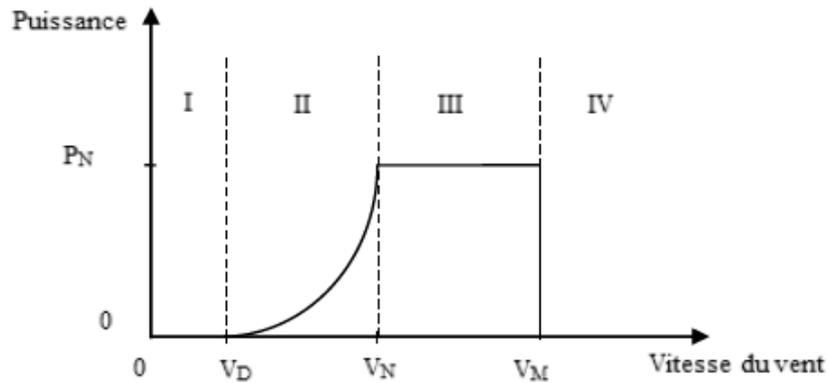


FIGURE II.2 – Modèle de la courbe de puissance [21].

La puissance de sortie totale pour un certain nombre d'éoliennes peut être exprimée comme suit :

$$P_{eot} = N_{eo} \times P_{eo} \quad (\text{II.3})$$

Où : N_{eo} est le nombre de générateurs éoliens.

II.3.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques à partir de rayonnement solaire est connue sous le nom d'énergie solaire. Dans les panneaux photovoltaïques, la lumière du soleil est convertie en électricité en courant continu. L'irradiation solaire est de l'ordre de kW/m^2 , elle varie d'un endroit à l'autre. Pour obtenir un transfert d'énergie efficace, les panneaux PV doivent fonctionner en mode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) . La puissance de sortie des panneaux PV dépend de leur taille et de leur efficacité, et peut être calculée en fonction de l'irradiation solaire, de la température ambiante et des données du fabricant du panneau photovoltaïque comme suit [22] :

$$P_{pv}(t) = \eta_r \left(1 - \gamma \left(\left[T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) G \right] - T_0 \right) \right) S.G \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- η_r : Le rendement instantané du module photovoltaïque.
- S : La surface du module photovoltaïque (m^2).
- G : L'irradiation globale sur un plan incliné (W/m^2).
- γ : Coefficient de température ($^{\circ}\text{C}$) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de 1°C de la température de la cellule. Il varie entre 0.004 et 0.006 ($^{\circ}\text{C}$).

- $NOCT$: La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating Cell Temperature) ($^{\circ}C$).
- T_0 : La température standard ($^{\circ}C$).
- T_a : La température ambiante ($^{\circ}C$).

Pour un certain nombre de générateurs solaires, la puissance de sortie totale peut être exprimée comme suit :

$$P_{pv_t} = N_{pv} \times P_{pv} \quad (\text{II.5})$$

Où : N_{pv} est le nombre de générateurs photovoltaïques.

II.3.3 Modélisation des convertisseurs

Dans un système de production multi-sources, les convertisseurs ont diverses fonctions telles que la possibilité de se synchroniser avec le réseau, le contrôle du courant du réseau, le contrôle MPPT et la détection de situation d'îlotage. Afin de modéliser cette conversion, deux approches existent : l'approche européenne [23] et l'approche américaine [24].

$$\eta_{EU} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.10\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.20\eta_{100\%} \quad (\text{II.6})$$

$$\eta_{USA} = 0.04\eta_{10\%} + 0.05\eta_{20\%} + 0.12\eta_{30\%} + 0.21\eta_{50\%} + 0.53\eta_{75\%} + 0.05\eta_{100\%} \quad (\text{II.7})$$

Où : $\eta_{(5\%,10\%...100\%)}$ est le rendement à une puissance de sortie spécifiée du convertisseur P_{conv} , donné en pourcentage de la puissance nominale P_n , comme suit :

$$\eta_{\%} = \frac{P_{conv}}{P_n} \times 100 \quad (\text{II.8})$$

II.3.4 Modélisation du système de stockage

Pour optimiser la planification des activités d'un micro-réseau, un modèle approprié doit être développé pour le système de stockage d'énergie [25]. Plusieurs types de système de stockage existent, telles que les super-condensateurs, les batteries électrochimiques, le stockage d'énergie magnétique supraconducteur, le stockage d'énergie par air comprimé et le stockage d'énergie par volant d'inertie. Ces dispositifs ont des caractéristiques différentes, notamment des temps de réponse, des capacités de stockage et des capacités de courant de pointe, qui sont abordées à des applications différentes et des échelles de temps disjointes. Les batteries électrochimiques

sont sélectionnées dans cette étude en raison de leur faible prix et de leur capacité à stocker l'énergie électrique pendant une longue période.

Le système de stockage utilisé dans les micro-réseaux est constitué d'une multitude de batteries identiques, connectées en série pour augmenter le niveau de tension et en parallèle pour augmenter le niveau de courant. L'énergie stockée dans le parc de batteries est utilisée comme variable d'état par le système de gestion. Dans la modélisation de la batterie, plusieurs facteurs sont nécessaires pour décrire son comportement tels que la capacité et le taux de charge/décharge. Afin d'augmenter la durée de vie du système de stockage, nous évitons les décharges profondes. Les batteries sont donc délimitées par leur capacité minimale E_{min} et maximale E_{max} avec [26] :

$$\begin{cases} E(t) = E(t-1) - \Delta t \cdot P_c(t) \cdot \eta_c & \text{Chargement} \\ E(t) = E(t-1) - \frac{\Delta t \cdot P_d(t)}{\eta_d} & \text{Déchargement} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- $P_c(t)$ et $P_d(t)$: Sont respectivement les puissances de charge et de décharge de la batterie à l'instant (t) en (W)
- η_c et η_d : Sont respectivement les rendements de charge et de décharge.
- $E(t)$: L'énergie stockée dans la batterie à l'instant (t) en (W).
- Δt : L'intervalle de temps (h).

II.3.5 Modélisation du réseau électrique

L'une des fonctionnalités du micro-réseau consiste à acheter de l'électricité et à la revendre au réseau public. Pour simplifier la procédure, les prix d'achat et de vente de l'électricité sont identiques et déterminés en temps réel et sont désignés par le vecteur B_r (€/kWh). Dans la tarification en temps réel, le tarif de l'énergie issue du réseau varie selon les prix de vente du marché qui sont modifiés en fonction de la demande d'électricité. En effet les tarifs élevés indiquent un taux élevé de consommation d'électricité [27].

La puissance importée et exportée au moment t est exprimée par P_g en kW, avec l'interprétation suivante :

- $P_r(t) > 0$ Si l'énergie est importée du réseau.
- $P_r(t) < 0$ Si l'énergie est exportée vers le réseau.

II.4 La formulation du problème

Dans cette partie, nous présenterons le modèle d'optimisation du système de gestion d'énergie adopté pour notre micro-réseau. Les variables d'état à optimiser dans ce cas sont les puissances de sorties des différents générateurs, du système de stockage et du réseau principal. Le but est donc de déterminer les consignes de puissances de tous les générateurs du micro-réseau à l'aide des algorithmes évolutionnaire PSO et AG, de tel sorte à obéir aux contraintes énergétiques et assurer une tarification économique et optimale. De plus ; on évaluera les émissions des GES libérées durant une journée opérationnelle.

Le choix de la fonction objective est la décision la plus importante à prendre. En effet, plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature, comme celui proposé dans les références [2]-[26] où le coût total de fonctionnement des ressources énergétiques distribuées ainsi que le coût de vente/achat de l'énergie fournie par ou injectée dans le réseau sont considérés comme dynamiques. Cette fonction prend aussi en compte le coût de la cogénération, le coût de démarrage de la pile à combustible et le coût de charge/décharge des batteries de stockage. L'objectif principal de la fonction objective dans notre cas, est de fournir les besoins de la charge pendant la journée de manière économique, de telles sortes à calculer les puissances qui doivent être fournies par chaque générateur à la charge selon le prix offert. Dans notre cas, la formulation de la problématique n'est pas si différente de celle en [25]. La formulation mathématique du problème doit prendre en compte plusieurs aspects, tels que l'échange d'énergie entre le micro-réseau et le réseau principal ainsi que le choix des contraintes sur les générateurs du micro-réseau et du système de stockage.

En effet ; notre but est de gérer ce système hybride afin de trouver les profils journaliers optimaux pour chaque source du micro-réseau qui vont nous permettre d'obtenir une tarification quotidienne d'énergie la plus basse possible, la gestion sera basée principalement sur trois facteurs essentiels :

1. la puissance nominale horaire $P_x(t)$ disponible dans chaque source (renouvelable ou conventionnelle).
2. Le prix unitaire horaire $B_x(t)$ de chaque source du système hybride.
3. L'état de la charge $EDC(t)$ du système de stockage.

Le but du système de gestion d'énergie proposé est de trouver les points de consigne optimaux des générateurs distribués, du système de stockage et également de la quantité d'énergie échangée avec le réseau électrique en tenant compte des contraintes économiques et environnementales.

II.4.1 Minimisation du coût

La fonction objective dépend de plusieurs paramètres, principalement du type d'architecture du micro-réseau. Plusieurs fonctions ont déjà été présentées dans la littérature, parfois le coût d'exploitation des différents générateurs et du système de stockage était considéré comme étant constant pendant la journée, le prix d'achat et de vente de la puissance issue du réseau principal néanmoins, variée selon la demande énergétique de la charge. En revanche, dans les références ; [2] et [26], le coût des puissances issues des différents générateurs, du système de stockage et le coût de la vente et de l'achat de l'énergie fournie par le réseau étaient considérés comme étant dynamique tout au long de la journée. L'objectif principal de la fonction objective est de satisfaire la demande de la charge au cours de la journée de la manière la plus économique possible. Ainsi, pour chaque heure (t), le coût peut être calculé comme suit [17] :

$$C(t) = \sum_{i=1}^{N_g} U_i(t)P_{Gi}(t)B_{Gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_s} U_j(t)P_{Sj}(t)B_{Sj}(t) + P_r(t)B_r(t) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- N_g et N_s : Sont respectivement le nombre total des différents générateurs et des batteries constituant le système de stockage.
- $B_{Gi}(t)$, $B_{Sj}(t)$ et $B_r(t)$: Sont respectivement les prix unitaires horaires de la puissance des différents générateurs, du système de stockage et du réseau principal (€/kWh).
- $P_{Gi}(t)$ et $P_{Sj}(t)$: Sont respectivement les puissances horaires issues des différents générateurs et du système de stockage (kW).
- $P_r(t)$: La puissance échangée importée ou exportée avec le réseau principal (kW).
- $U_i(t)$ et $U_j(t)$: Sont respectivement le mode de fonctionnement des différents générateurs et du système de stockage (ON ou OFF).

Le problème de l'optimisation peut s'écrire comme suit :

$$\min(C^t) = \min \left(\sum_{t=1}^{24} C(t) \right) \quad (\text{II.11})$$

II.4.2 Évaluation des émissions

En plus du coût de fonctionnement, l'aspect écologique concernant les émissions de gaz à effet de serre est évalué à coté de l'optimisation. La fonction objective d'émission comprend les polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NO_X), le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde de carbone (CO_2) issus principalement de la turbine à gaz et des centrales électriques

thermiques du réseau principal. La formulation mathématique de l'émission totale des polluants en (kg) peut être exprimée comme suit [17] :

$$EM(t) = \sum_{i=1}^{N_g} U_i(t)P_{DG_i}(t)EF_{DG_i}(t) + \sum_{j=1}^{N_s} U_j(t)P_{SD_j}(t)EF_{SD_j}(t) + P_g(t)EF_g(t) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- $EF_{G_i}(t)$, $EF_{S_j}(t)$ et $EF_r(t)$: Sont les facteurs d'émissions qui décrivent la quantité de polluants émis en (kg/kWh) pour chaque générateur, dispositif de stockage et réseau public à l'heure (t).

Chaque valeur (EF_x) considère la somme de la quantité de polluants, à savoir le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote. La quantité totale d'émissions en (kg) peut être déterminée au moyen de la fonction suivante :

$$EM = \sum_{t=1}^{24} EM(t) \quad (\text{II.13})$$

II.5 Les contraintes

II.5.1 Contrainte liée à l'équilibre des puissances

La production totale d'électricité issue des divers générateurs du micro-réseau et du réseau principal doit couvrir et satisfaire la puissance de la charge totale de consommation. Les pertes de transmission sont numériquement faibles et n'ont donc pas été prises en compte dans cette étude.

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{G_i}(t) + \sum_{j=1}^{N_s} P_{S_j}(t) + P_r(t) = P_c(t) \quad (\text{II.14})$$

Où : $P_c(t)$ La puissance totale de la charge à l'heure (t).

II.5.2 Contraintes liées aux limites électriques des générateurs

Pour un fonctionnement stable selon les normes physiques de construction, la puissance active de chaque générateur du micro-réseau est limitée par des valeurs inférieures et supérieures comme suit [17] :

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi}^{max} \quad (\text{II.15})$$

$$P_{Sj}^{min} \leq P_{Sj}(t) \leq P_{Sj}^{max} \quad (\text{II.16})$$

$$P_r^{min} \leq P_r(t) \leq P_r^{max} \quad (\text{II.17})$$

Où : $P_{G,S,r}^{min}(t)$ and $P_{G,S,r}^{max}(t)$ sont respectivement les puissances minimales et maximales des générateurs distribués, dispositif de stockage et du réseau principal.

II.5.3 Contraintes liées aux limites du système de stockage

La batterie doit rester dans les limites de son état de charge, et la quantité d'énergie produite ou absorbée est limitée par un taux appelé ; taux de décharge/charge qui ne doit pas être dépassé.

$$EDC^{min} \leq E(t) \leq EDC^{max} \quad (\text{II.18})$$

Les limites de la puissance de charge et de décharge de la batterie sont indiquées ci-dessous [17] :

$$\begin{cases} -P_c(t) \cdot \eta_c \leq P_c^{max} & \text{Charge} & (P_c(t) < 0) \\ P_d(t) / \eta_d \leq P_d^{max} & \text{Décharge} & (P_d(t) > 0) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

- P_c^{max} : Est la puissance de charge maximal.
- P_d^{max} : Est la puissance de décharge maximal.

II.6 Les méthodes d'optimisation

Afin d'optimiser le fonctionnement d'un micro-réseau, il faut d'abord déterminer les paramètres de gestion en fonction de la variable à minimiser. Généralement ce dernier est le critère économique, ainsi ; on cherche alors à minimiser le coût économique du système tout en préservant certains critères de qualités imposés par le consommateur. Cette optimisation peut être réalisée selon deux classes de méthodes : Les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

II.6.1 Les méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont des méthodes qui convergent toujours vers le même optimum à partir d'un point de départ initial pour un problème quelconque. Ces méthodes peuvent

être séparées en deux groupes : Les méthodes gradient et les méthodes géométrique ou heuristique. Parmi les méthodes gradient on trouve la technique de la plus grande pente, les méthodes de Newton (BFGS ou DFP) et aussi la méthode de Lavenberg-Marquardt[28] . Le principe de ces méthodes réside dans le calcul des dérivées partielles de la fonction objective afin d'atteindre l'optimum assez rapidement. A côté, on trouve les méthodes géométriques ou heuristiques, parmi ces dernières on repère particulièrement les algorithmes gloutons [29]. Ce type de méthodes exploitent les valeurs de la fonction objective afin d'explorer l'espace des solutions à travers des essais successifs cherchant les directions avantageux pour arriver à l'optimum.

Les méthodes de résolution déterministes ne sont pas adéquates à toutes les problématiques car certains problèmes sont assez complexes. Parmi ces problématiques, on cite la présence de discontinuités, la non-dérivabilité, l'absentéisme de convexité ou encore la difficulté analytique pour déterminer la fonction objective. On peut aussi ajouter le problème de temps de résolution qui est considéré trop long chez les méthodes déterministes. Il est donc nécessaire de faire appel aux méthodes stochastiques [30].

II.6.2 Les méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques sont basées sur une prospection aléatoire de l'espace des solutions à l'aide des règles de transition de probabilités [31]. Ceci dit, le trajet vers l'optimum est donc différent [32]. Parmi les algorithmes stochastiques les plus populaires on trouve : les algorithmes génétiques [33] et l'optimisation par essais particuliers (PSO) [34].

II.6.2.1 Les algorithmes génétiques (AG)

Un algorithme génétique (AG) est une métaheuristique qui manœuvre une population de solutions potentielles à la fois. Son mode de fonctionnement est basé sur les principes biologiques de la sélection naturelle qui orchestrent la survie des échantillons les mieux adaptés à leurs environnement [35]. L'AG débute d'un ensemble de solutions initialisé aléatoirement dans l'espace. Les individus ici sont représentés par leurs variables de conception, ils sont considérés comme étant des chromosomes. Les chromosomes de la population initiale sont utilisés pour produire une nouvelle population, en passant par les différents opérateurs génétiques, principalement : le croisement, la mutation et la sélection. Ceci est motivé par l'espoir que la nouvelle population soit meilleure que la précédente.

Pour résumer, le croisement agit sur les deux chromosomes parents pour en produire deux autres chromosomes enfants, en souhaitant que les deux nouveaux chromosomes soient meilleurs

que les précédents, ceci se réalise si les bons gènes de ces derniers sont ceux qui sont combinés. La figure II.3 résume la procédure du croisement, dans ce cas c'est un croisement unitaire.

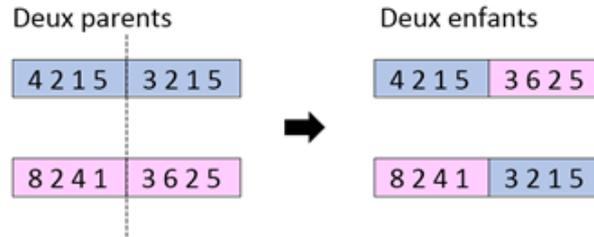


FIGURE II.3 – Le croisement unitaire.

En outre, la mutation est un opérateur génétique qui permet d'offrir de nouvelles caractéristiques génétiques au chromosome de façon direct en mutant un ou plusieurs de ses gènes (voir figure II.4 Elle est généralement utilisée après le croisement.

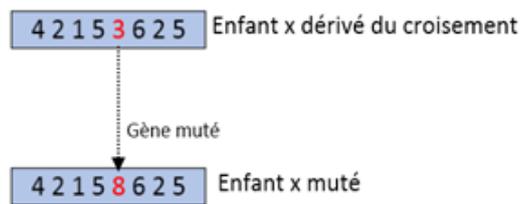


FIGURE II.4 – La mutation.

Cet algorithme démarre avec une population générée de manière aléatoire, chaque vecteur d'individu (chromosome) représente une solution au problème. La reproduction se fait après chaque itération, cette dernière engendre une population enfant dont les meilleurs individus sont sélectionnés pour prendre le relais des parents. Ensuite, deux sont choisis de façon aléatoire à l'aide de la fonction roulette, à qui on appliquera les opérateurs croisement et mutation afin de créer une diversification dans la population.

Les AG sont basées sur le concept de " l'élitisme ", qui consiste à préserver un aperçu des gènes des meilleurs individus pour se précautionner contre toute décadence que pourrait être produite du croisement ou de la mutation, La figure II.5 ci-dessous représente l'organigramme d'évolution de l'algorithme génétique (Annexe A.2).

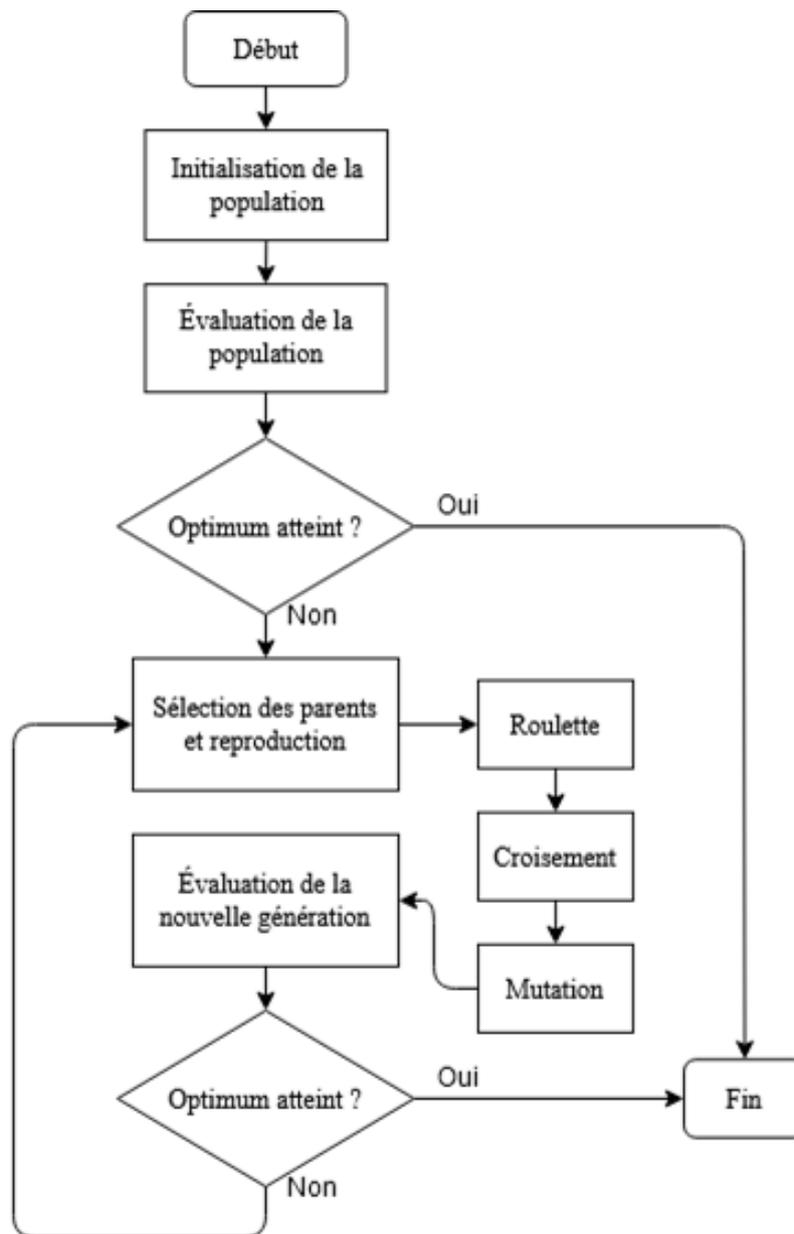


FIGURE II.5 – Organigramme de l'algorithme génétique.

II.6.2.2 L'optimisation par essais particuliers (PSO)

La théorie du PSO s'inspire de la dynamique des animaux déplaçant en groupes compacts, par exemple : les essaims d'abeilles, les vols groupés d'oiseaux et les mouvements de groupes de poissons. Le PSO dépend d'une population d'agents simples appelés particules, chaque particule est considérée comme une solution potentielle au problème, et possède une position (vecteur de position), une vitesse (vecteur de vitesse) et une mémoire lui permettant de se souvenir de

ses performances (en position et en vitesse) et des meilleures performances réalisées par les particules adjacentes (informateur), chaque particule a un groupe d'informateurs, appelé son voisinage.

Les particules communiquent entre elles dans tout l'espace de recherche afin de construire une solution au problème posé et en tirant parti de leur expérience collective. Au début, les particules ne connaissent pas l'emplacement de l'optimum, elles doivent donc survoler tout l'espace de recherche, le mécanisme de recherche est basé sur deux principes [25] :

1. **La loi de la communication** : Il s'agit d'informer la mesure élaborée par chaque particule à tout autre agent présent dans l'essaim.
2. **La loi de l'apprentissage** : Lorsque les particules échangent leur valeur, elles peuvent coopérer et apprendre que la localisation d'une particule quelconque est meilleure et donc trouver la meilleure valeur de tout l'essaim (appelée minimum global).

Sur la base de ces deux principes, la solution du problème d'optimisation peut être obtenue en utilisant l'intelligence de l'essaim

Construction de l'essaim et principe de fonctionnement :

Chaque particule est un candidat pour résoudre le problème lié à l'optimisation que nous voulons résoudre. L'ensemble des particules constitue l'essaim et l'espace de recherche est l'espace de toutes les solutions possibles du problème d'optimisation, sachant que nous recherchons la meilleure solution parmi les solutions possibles de cet espace. Comme indiqué ci-dessus, chaque particule est définie par une position et une vitesse qui dépend principalement de la taille de l'espace de recherche, c'est-à-dire, si l'espace de recherche a une dimension n , chacun des vecteurs de position et de vitesse aura la même dimension n . Ainsi, dans l'espace de recherche, la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur de position ayant la même dimension que l'essaim n : $X_i(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ et son vecteur de vitesse : $V_i(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t))$.

Cette particule i n'est pas seule, elle est membre de l'essaim, les particules s'interconnectent et apprennent les unes des autres par le principe de communication et d'apprentissage en respectant les contraintes d'optimisation. A l'ajout de la position et de la vitesse, chacune des particules possède une mémoire de sa meilleure position ou expérience, elle est dite meilleure personnelle, nous avons aussi la meilleure expérience de tout l'essaim, elle appartient à toutes les particules qui sont dans l'essaim, elle est dite meilleure globale (meilleure expérience de toutes les particules de l'essaim).

Le modèle mathématique standard du PSO :

$$\begin{cases} \vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \\ \vec{v}_i(t+1) = C_0 \cdot \vec{v}_i(t) + C_1 \cdot r_1 \cdot (\vec{P}_{besti}(t) - \vec{x}_i(t)) + C_2 r_2 (\vec{G}_{best}(t) - \vec{P}_{besti}(t)) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Ou : C_0 est une constante positive de la pondération de la vitesse, C_1 est une constante positive de la pondération dite d'accélération de la composante cognitive et C_2 c'est une constante d'accélération de la composante sociale. r_1 et r_2 sont des valeurs aléatoires entre (0 1) pour apporter un caractère stochastique l'algorithme.

Le mouvement de la particule est influencé par les 3 composantes suivantes :

- **Composante d'inertie** : la particule a tendance à suivre sa direction de mouvement actuelle.
- **Composante cognitive** : la particule a tendance à se déplacer vers la meilleure position par laquelle elle est déjà passée.
- **Composante sociale** : la particule tend à suivre la direction de la meilleure valeur atteinte par l'ensemble de l'essaim.

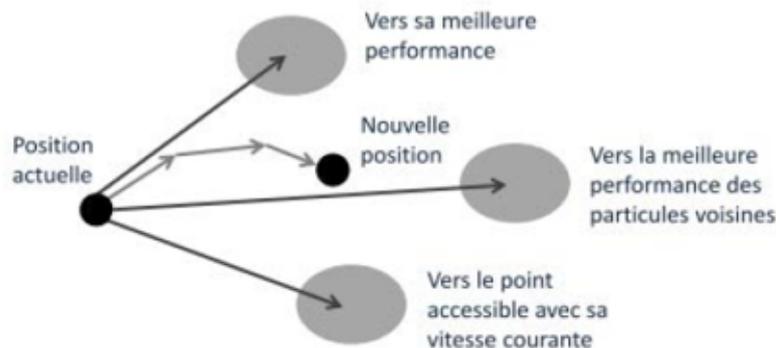


FIGURE II.6 – Mécanisme de recherche du PSO dans l'espace multidimensionnel [36].

Les deux valeurs P_{besti} et G_{best} , sont mises à jour à chaque itération jusqu'à ce que le minimum global soit atteint. La meilleure position personnelle, $P_{besti}(t)$, associée à la particule i est la meilleure position que la particule a visitée depuis le début de l'évolution. Compte tenu de la fonction de minimisation $f(x)$, la meilleure position personnelle à l'instant $(t + 1)$ est calculée comme suit :

$$\begin{cases} \vec{P}_{besti}(t+1) = \vec{P}_{besti}(t) & \text{Si } f(\vec{X}_i(t+1)) \geq f(\vec{X}_i(t)) \\ \vec{P}_{besti}(t+1) = \vec{P}_{besti}(t+1) & \text{Si } f(\vec{X}_i(t+1)) < f(\vec{X}_i(t)) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

La meilleure position globale au moment (t), est définie comme suit :

$$G_{best}(t+1) = \min([P_{besti}(t+1)]) \quad (\text{II.22})$$

La figure II.7 ci-dessous représente l'organigramme d'évolution du PSO (Annexe A.1).

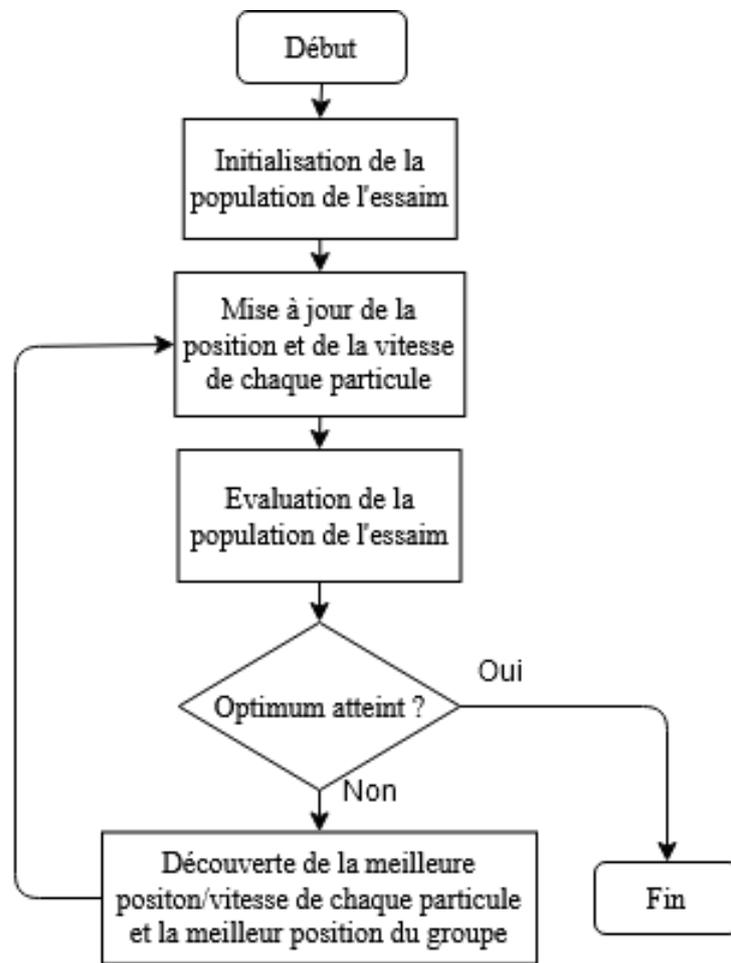


FIGURE II.7 – Organigramme du PSO.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons élaboré et modélisé les différentes sources constituant notre micro-réseau. Cette modélisation sera la clef fondamentale dans la suite de notre étude. Aussi, la formulation du problème en modèle mathématique nous permettra de pouvoir manipuler ses paramètres en agissant sur les variables décisives qui auront rôle dans l'amélioration de la productivité du micro-réseau tout en tenant compte des contraintes économiques et en évaluant le coté écologique. En effet, ce travail est une image théorique et un prérequis essentiel vers l'application de ce dernier sur le terrain d'étude qui sera dédié dans le chapitre qui suit. La plateforme de programmation Matlab est choisie pour la simulation de ce problème, les résultats de cette dernière seront présentés et discutés suivant divers scénarios.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre par l'application des algorithmes évolutionnaires, afin d'optimiser la gestion d'énergie du micro-réseau. On présentera l'étude et l'analyse des données sur la plateforme de programmation Matlab. L'application des algorithmes d'optimisations sera l'atout vers l'obtention des solutions optimales. Ces dernières seront ensuite le sujet d'une étude économique et écologique comparative qui concerne l'impact de l'injection d'énergie verte dans le réseau. A cet effet ; la finalité de notre travail est d'identifier le bénéfice réalisé ainsi que la fiabilité du projet et la nécessité d'avoir un système de gestion pour une installation d'un micro-réseau.

III.2 Présentation des données

Le micro-réseau proposé dans cette étude est constitué de deux sources renouvelables (photovoltaïque et éolienne), une micro-turbine, un système de stockage et le réseau principal. Les données sont principalement prises d'un profil similaire à celui utilisé par [26]. Le système de gestion fonctionnera selon les puissances disponibles illustrées dans le tableau III.1 dans le micro-réseau. Les limites des puissances des différents générateurs sont représentées dans le tableau III.2. Les prix horaires dynamiques de la puissance de chacune des sources sont présentées dans le tableau III.4. L'intégralité de ces données sera le carburant essentiel pour la mise en marche de la gestion d'optimisation, qui permettra ensuite d'obtenir la meilleure gestion de puissance journalière avec une facture d'énergie la plus bas possible. En outre, l'évaluation des émissions des GES qui suit la gestion optimale des sources est assurée par la fonction (II.12) qui utilise en entrée : les facteurs d'émissions présentés dans le tableau III.3 et les valeurs de puissances optimales planifiées obtenues à partir de la gestion effectuée.

TABLE III.1 – Puissances des générateurs distribués [26].

Heures (h)	Puissance PV (kW)	Puissance Éol (kW)	Consommation (kW)
01 :00	0	16,0133	52
02 :00	0	16,0800	50
03 :00	0	16,1600	50
04 :00	0	16,1733	51
05 :00	0	17,6800	56
06 :00	0	16,1733	63
07 :00	0	14,7333	70
08 :00	0,1	14,5600	75
09 :00	0,59	14,6533	76
10 :00	1,98	13,1600	80
11 :00	7,75	11,6667	78
12 :00	9,8	10,1467	74
13 :00	10,65	11,6667	72
14 :00	9,7	10,1460	72
15 :00	8,12	14,7467	76
16 :00	4,95	16,2133	80
17 :00	1,1	16,1467	85
18 :00	0,1	19,1333	88
19 :00	0	17,5333	90
20 :00	0	18,9467	87
21 :00	0	19,0400	78
22 :00	0	19,1067	71
23 :00	0	19,9333	65
24 :00	0	19,1467	56

TABLE III.2 – Les limites de puissances des générateurs distribués, le système de stockage et le réseau principal [26].

Générateur	Puissance minimale (kW)	Puissance maximale (kW)
PV	0	15
Éolienne	0	20
Micro-turbine	6	30
Réseau principale	0	90
Système de stockage	-30	25

TABLE III.3 – Les principaux facteurs d'émissions des GES [26].

Facteurs d'émissions	Micro-turbine (kg/MWh)	Réseau principal (kg/MWh)
CO_2	724	922
NO_x	0,2	2,295
SO_2	0,00136	3,583

TABLE III.4 – Les prix unitaires horaires des générateurs distribués, le système de stockage et réseau principal [26].

Heures (h)	PV (€/kWh)	Éolien (€/kWh)	MT (€/kWh)	Batterie (€/kWh)	Réseau (€/kWh)
01 :00	0	0.021	0.0823	0.1192	0.033
02 :00	0	0.017	0.0823	0.1192	0.027
03 :00	0	0.0125	0.0831	0.1269	0.020
04 :00	0	0.011	0.0831	0.1346	0.017
05 :00	0	0.051	0.0838	0.1423	0.017
06 :00	0	0.085	0.0838	0.15	0.029
07 :00	0	0.091	0.0846	0.1577	0.033
08 :00	0.0646	0.110	0.0854	0.1608	0.054
09 :00	0.0654	0.140	0.0862	0.1662	0.215
10 :00	0.0662	0.143	0.0862	0.1677	0.572
11 :00	0.0669	0.150	0.0892	0.1731	0.572
12 :00	0.0677	0.155	0.09	0.1769	0.572
13 :00	0.0662	0.137	0.0885	0.1692	0.215
14 :00	0.0654	0.135	0.0885	0.16	0.572
15 :00	0.0646	0.132	0.0885	0.1538	0.286
16 :00	0.0638	0.114	0.09	0.15	0.279
17 :00	0.0654	0.110	0.0908	0.1523	0.086
18 :00	0.0662	0.0925	0.0915	0.15	0.059
19 :00	0	0.091	0.0908	0.1462	0.050
20 :00	0	0.083	0.0885	0.1462	0.061
21 :00	0	0.033	0.0862	0.1431	0.181
22 :00	0	0.025	0.0846	0.1385	0.077
23 :00	0	0.021	0.0838	0.1346	0.043
24 :00	0	0.017	0.0831	0.1269	0.037

Les figures ci-dessous (III.1, III.2, III.3) représente le tracé des puissances photovoltaïques, éoliennes et le profil de consommation journalier.

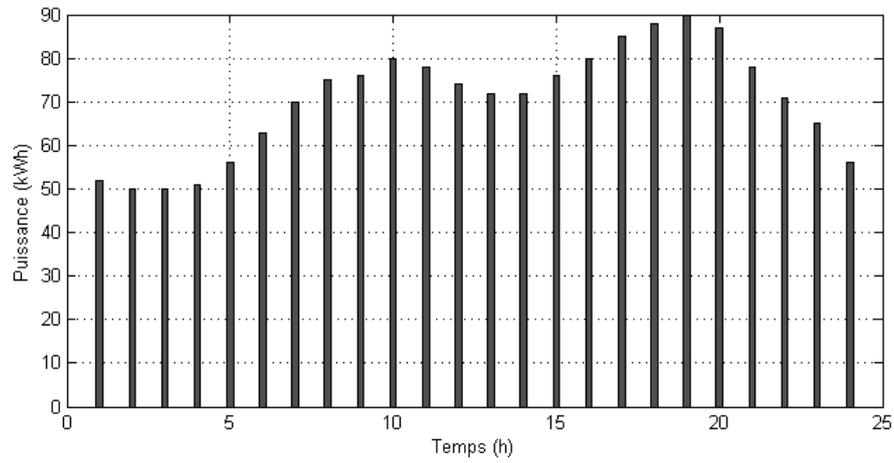


FIGURE III.1 – Profil de la consommation journalière.

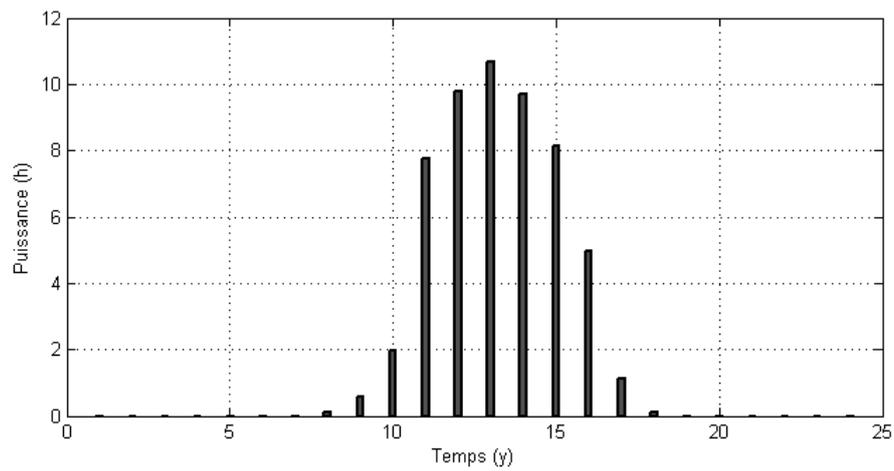


FIGURE III.2 – Puissance photovoltaïque journalière.

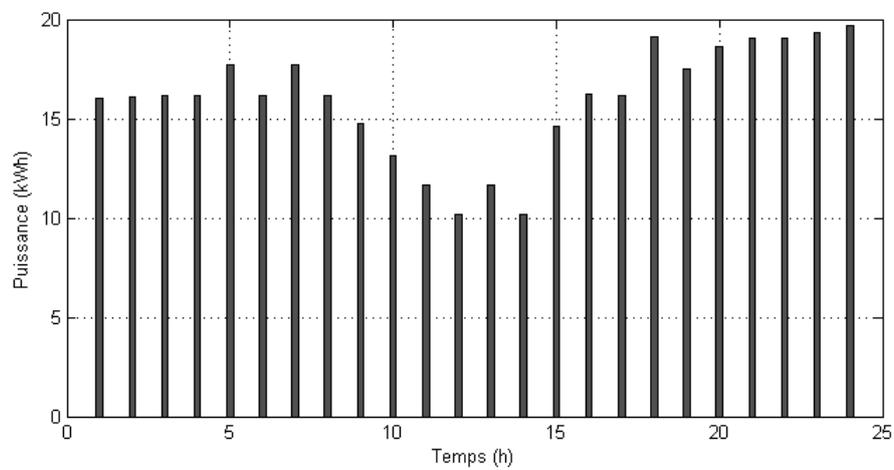


FIGURE III.3 – Puissance éolienne journalière.

III.3 Le système de gestion proposé

Plusieurs systèmes de gestions ont été présentés dans la littérature, [37] ont proposés une stratégie opérationnelle multi-objectifs d'un micro-réseau pour une application résidentielle. À cet égard, l'aspect économique et écologique ont été formulés comme un problème multi-objectif à contrainte non linéaire. A cet effet ; les termes du coût d'exploitation, de maintenance, le coût de démarrage et le coût des émissions CO₂, SO₂, NOX sont pris en compte. Dans notre étude, nous travaillerons avec un problème mono-objectif dont le but essentiel est d'optimiser l'aspect économique. Le cotée écologique néanmoins, sera évalué mais sans être pris en considération dans l'optimisation. De ce fait, le but est de sélectionner les puissances les moins chers en une heure donnée et de les attribuées à la charge en assurant l'équilibre énergétique requis par le consommateur. De telle sorte à obtenir une facture énergétique journalière la moins chère possible. Durant ce processus, le système de stockage obéi à une gestion détaillée comme suit :

- **Dans le cas où ($E(t) = E^{max}$)** : Le système de stockage sera considéré comme une source principale avec les quatre autres sources (PV, éolienne, micro-turbine et réseau), sa fourniture d'énergie sera opérationnelle selon la quantité d'énergie demandée et de son prix unitaire à l'heure de demande. il faut noter que le débit de déchargement est limité par une quantité maximale qui ne doit pas être dépassée selon les contraintes présentées auparavant.
- **Dans le cas où ($E(t) = E^{min}$)** : Le système de stockage nécessitera une certaine quantité d'énergie pour se recharger provenant des sources les moins chères du micro-réseau à une heure donnée. Dans cette situation, le système de stockage sera considéré comme une charge par le micro-réseau. Si tous les prix unitaires de la puissance des différents générateurs sont assez élevés, et la charge est satisfaite, le rechargement du système de stockage n'aura pas lieu en cette heure, et attendra l'heure où le prix des puissances est assez bas.
- **Dans le cas où ($E^{min} < E(t) < E^{max}$)** : Selon le tarif du système de stockage, deux cas peuvent se produire :
 - Dans le cas où le prix de la puissance du système de stockage est le plus cher et que l'énergie demandée par les consommateurs du micro-réseau peut être largement satisfaite par les autres sources, le système de stockage continuera son chargement et son

énergie ne participera pas dans l'alimentation de la charge. Mais, si l'énergie fournie par les différents générateurs est insuffisante, l'énergie du système de stockage sera utilisée comme source d'énergie de compensation pour satisfaire la contrainte d'équilibre énergétique.

- En outre, si le prix de l'énergie délivrée par le système de stockage est moins cher par rapport aux autres sources, ce dernier participera dans l'alimentation de la charge et fourni une énergie maximale égale à la limite de sa puissance de déchargement.

La figure III.4 représente l'organigramme de la stratégie de gestion adoptée dans cette étude.

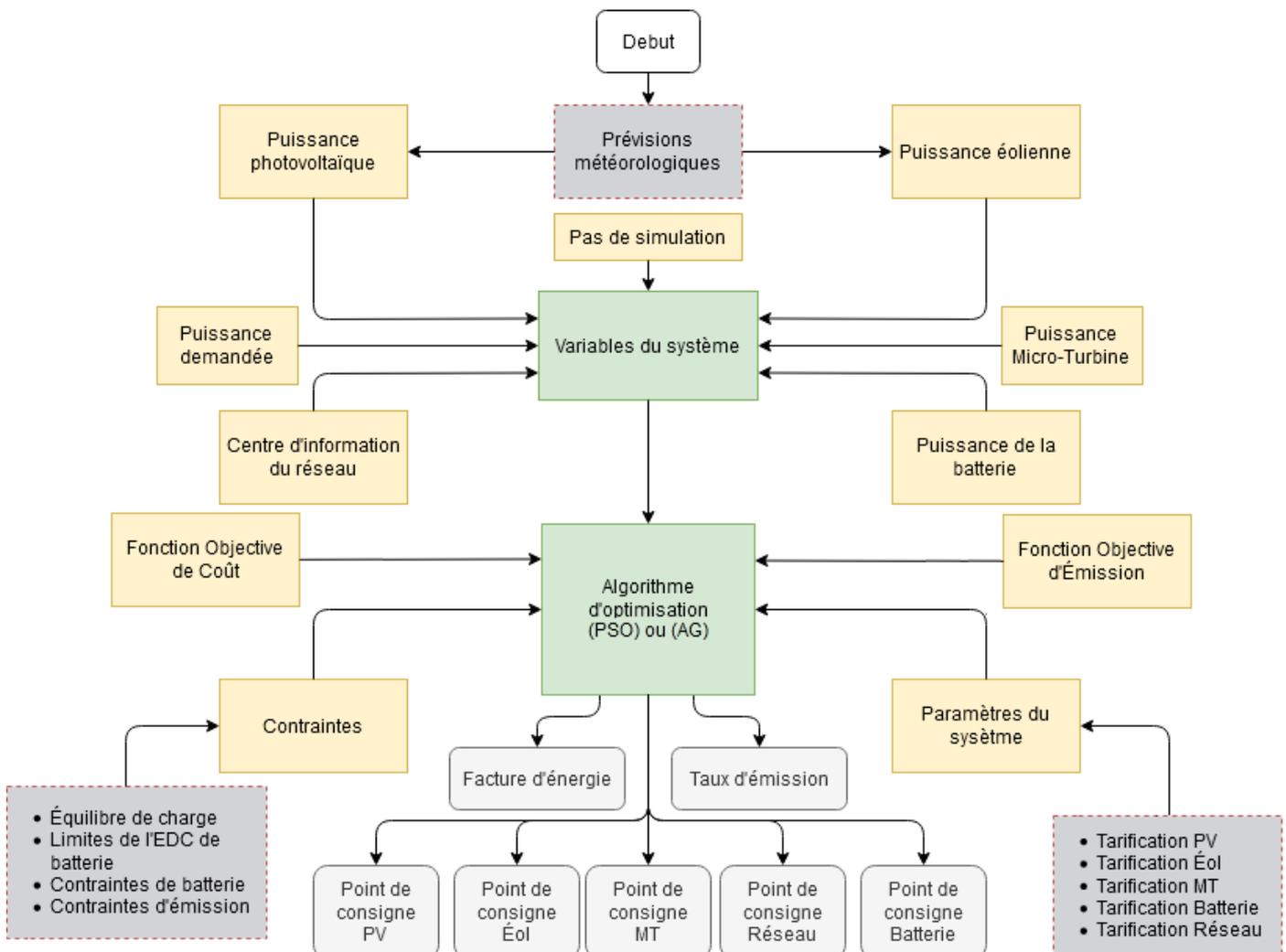


FIGURE III.4 – Organigramme de la stratégie de gestion d'énergie.

III.4 Résultats des deux programmes d'optimisation

Le système de gestion a pour objectif de réduire la facture énergétique sur une journée de 24 heures, le point cible dans ce cas d'étude est la détermination des consignes de puissance calculés par les deux programmes de gestion (PSO et l'AG) et de souligner l'impact de l'échange d'énergie entre le micro-réseau et le réseau principal (injection et extraction). Les énergies renouvelables restantes non utilisées pour alimenter les consommateurs du micro-réseau et pour recharger le système de stockage des batteries seront envoyées au réseau principal.

III.4.1 Scénario 1 : Gestion optimale des sources sans injection dans le réseau

Dans ce cas d'étude, le surplus d'énergie issu des différentes sources énergétiques est utilisé pour couvrir les besoins énergétique du système de stockage et de le charger, tout en préservant l'aspect économique en choisissant les heures où le prix est le moins cher possible. Cependant, si les batteries s'avèrent complètement charger, le surplus d'énergie dans ce cas, sera perdu et sera considéré comme perte (délestage). Durant cette gestion, on notera le prix optimal retenu de l'optimisation ainsi que le taux d'émission des GES conséquents des opérations énergétiques effectuées par le micro-réseau.

Les deux programmes d'optimisation développés convergent vers les mêmes résultats car le critère d'arrêt est pris le même pour les deux techniques. Le tableau III.5 représente la répartition optimale des puissances des sources du micro-réseau sans injection, issues de l'exécution de nos programmes sur Matlab.

TABLE III.5 – Résultats obtenus de la gestion optimale sans injection au réseau.

Heures (h)	PV (kW)	Éolien (kW)	MT (kW)	Batterie (kW)	Réseau (kW)	Consommation (kW)
01 :00	0	16.0133	6	-33.3333	63.32	52
02 :00	0	16.08	6	-33.3333	61.2533	50
03 :00	0	16.16	6	-33.3333	61.1733	50
04 :00	0	16.1733	6	-33.3333	62.16	50
05 :00	0	0	6	-8.8889	58.8889	51
06 :00	0	0	6	0	57	63
07 :00	0	0	6	0	64	70
08 :00	0	0	6	0	69	75
09 :00	0.59	14.7333	30	22.5	8.1767	76
10 :00	1.9800	13.16	30	22.5	12.36	80
11 :00	7.7500	11.6667	30	22.5	6.0833	78
12 :00	9.8	10.1468	30	22.5	1.5532	74
13 :00	10.65	11.6667	30	19.6833	0	72
14 :00	9.7	10.146	30	22.1540	0	72
15 :00	8.12	14.6467	30	12.1627	11.0706	76
16 :00	4.9500	16.2133	30	0	28.8367	80
17 :00	1.1	0	27.2333	-33.3333	90	85
18 :00	0.1	1.2333	30	-33.3333	90	88
19 :00	0	3.3333	30	-33.3333	90	90
20 :00	0	18.6493	11.6840	-33.3333	90	87
21 :00	0	19.04	30	22.5	6.46	78
22 :00	0	19.03	6	-33.3333	79.3033	71
23 :00	0	19.3330	6	-33.3333	73.0003	65
24 :00	0	19.6900	6	-5.5556	35.8656	56

Le prix optimal de la facture quotidienne durant 24h de fonctionnement obtenu de ce scénario s'est évaluer à 143,0492 €, avec un taux d'émission de 1353,7329 kg de GES (tableau III.6).

TABLE III.6 – Les résultats obtenus du scénario 1.

Prix opérationnel (€)	Quantité totale d'émission (kg)
143,0492	1353,7329

La figure III.5 représente les résultats obtenus de la simulation des deux algorithmes d'optimisation sur Matlab. On remarque bien que les résultats obtenus sont identiques, cela confirme la fiabilité et l'efficacité des deux programmes. Néanmoins, on constate que la vitesse de convergence du PSO est presque 100 fois plus rapide que l'AG.

<pre> Le_Prix_Total_Selon_PSO = 143.0492 Les_Emissions_Totales_Selon_PSO = 1.3537e+03 Elapsed time is <u>0.115394</u> seconds. >> </pre>	<pre> Le_Prix_Total_Selon_GA = 143.0492 Les_Emissions_Totales_Selon_GA = 1.3537e+03 Elapsed time is <u>11.246377</u> seconds. >> </pre>
--	---

FIGURE III.5 – Résultats de simulation sur Matlab.

Les résultats obtenus dans le tableau III.5 sont les consignes optimales de la puissance des différentes sources énergétiques du micro-réseau, on remarque bien que la somme de ces valeurs dans une heure donnée (t) égale à la valeur de puissance de la charge pour la même heure (t). On constate aussi que la source la moins chère dans une heure donnée possède le point de consigne le plus important sans dépasser ces limites de puissance. S'additionne à elle la deuxième source la moins chère et ainsi de suite jusqu'à ce que la contrainte d'équilibre de puissance soit vérifiée. Ainsi, le coût de fonctionnement est réduit au minimum et les émissions sont évaluées. On remarque que le chargement du système de stockage est assuré pendant la partie de la journée où la consommation est faible et caractérisée par des coûts énergétiques unitaires réduits. Sinon, la batterie fournit de l'énergie pour compenser le déficit pendant la journée. Dans ce cas d'étude, l'énergie provenant du réseau est fournie de manière unidirectionnelle, c'est-à-dire que l'énergie est vendue à partir du réseau et livrée au micro-réseau uniquement et que le fonctionnement inverse n'est pas autorisé. Pour des raisons de maintenance et de sécurité, la micro-turbine est présente toute la journée soit par sa puissance minimale de 6KW, soit par sa puissance délivrée pour compenser le déficit d'énergie qui devrait être fournie aux consommateurs du micro-réseau.

La figure III.6 représente le tracé des puissances issues de la gestion optimale des différentes sources du micro-réseau ainsi que le profil de consommation. On observe que la somme des différentes puissances est égale à la valeur de la puissance de la charge pour chaque heure, ce qui approuve la fiabilité du système de gestion adopté.

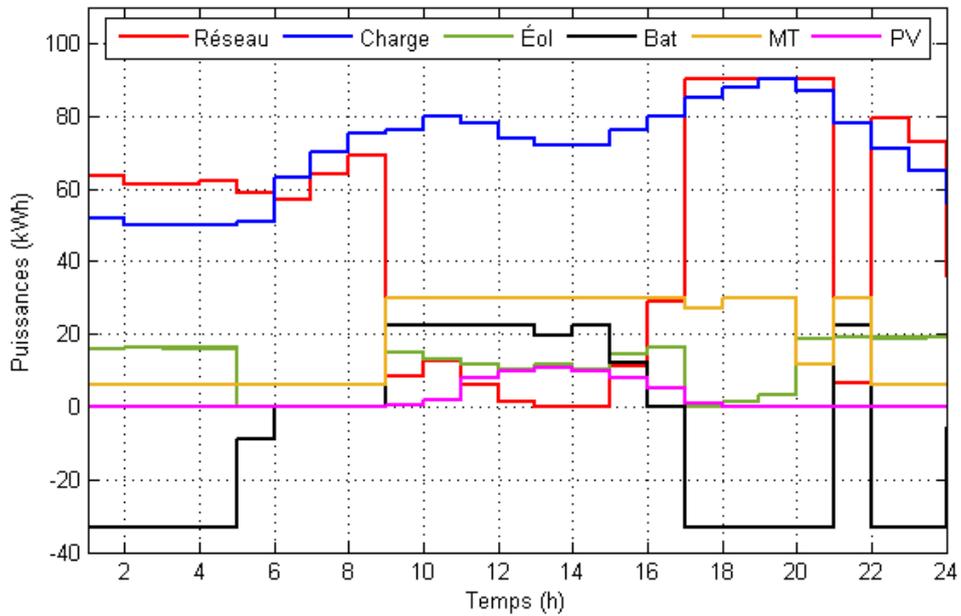


FIGURE III.6 – Les consignes de puissance optimales obtenues au premier scénario

La figure III.7 représente les prix unitaires horaires des flux énergétiques optimaux des diverses sources et le prix optimal obtenu par les algorithmes d'optimisation en fonction des heures de fonctionnement durant la journée.

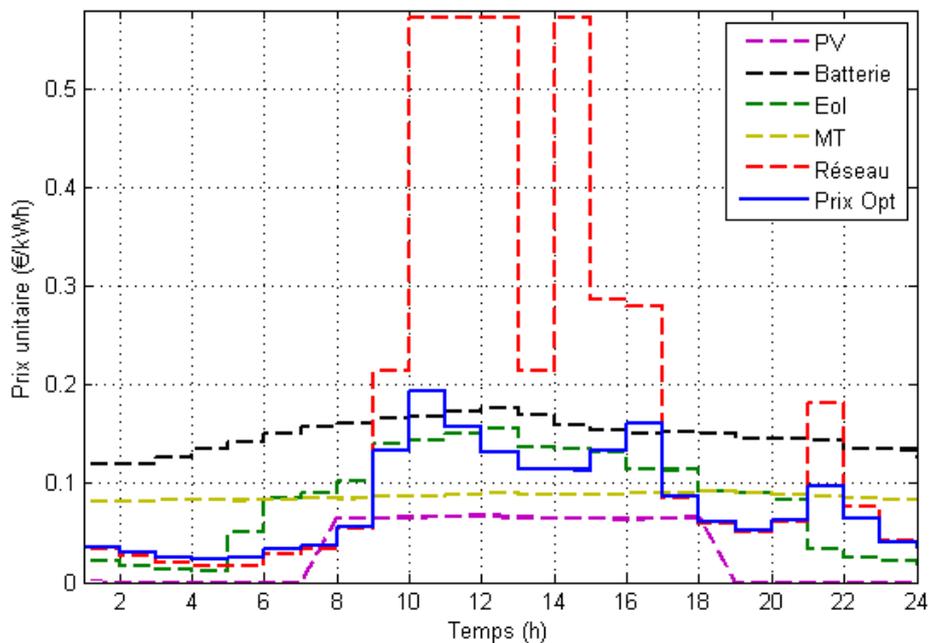


FIGURE III.7 – Les prix unitaires des puissances issues de la gestion optimale et le prix optimal de facturation.

Il est remarquable que la source photovoltaïque soit pleinement exploitée pendant la journée en raison de son prix bas par rapport aux quatre autres sources, la source éolienne est largement exploitée durant la nuit en raison de son prix réduit également. Cependant, durant les heures de pointes, le prix du réseau est très élevé, dans ce cas, l'utilisation du système de stockage permet de compenser le déficit d'énergie et d'atténuer la dépendance au réseau principal. C'est pourquoi l'utilisation de la batterie est significative pendant la journée lorsque le prix du réseau est élevé. Le système de stockage en soi, suit son processus de chargement durant la nuit lorsque la consommation du micro-réseau est moins élevée et le prix unitaire de la puissance est faible. La figure III.8 illustre l'échange énergétique quotidien des batteries avec le micro-réseau.

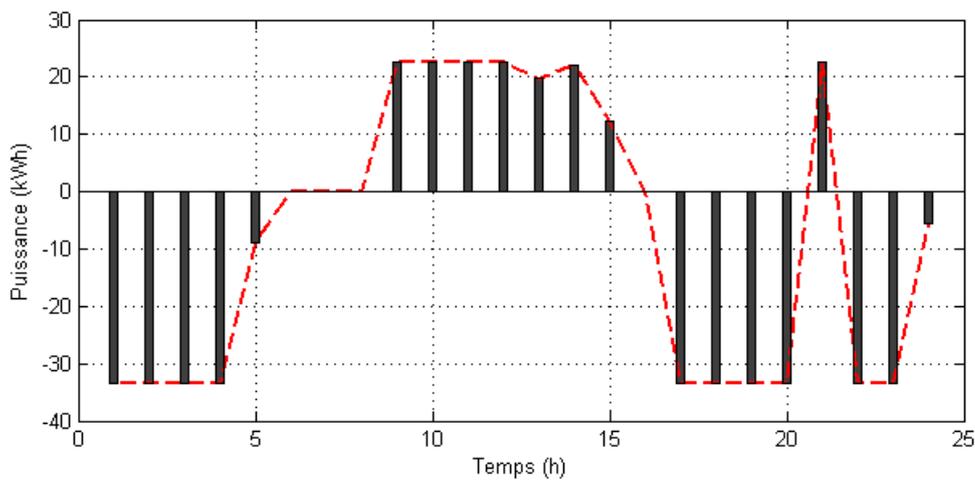


FIGURE III.8 – l'échange énergétique des batteries avec le micro-réseau durant la journée.

La figure III.9 représente l'histogramme de la variation de l'état de charge du système de stockage. En reliant avec la figure III.8, on observe bien que lorsque les batteries demandent de l'énergie, l'EDC augmente et lorsqu'elles fournissent de l'énergie l'EDC diminue.

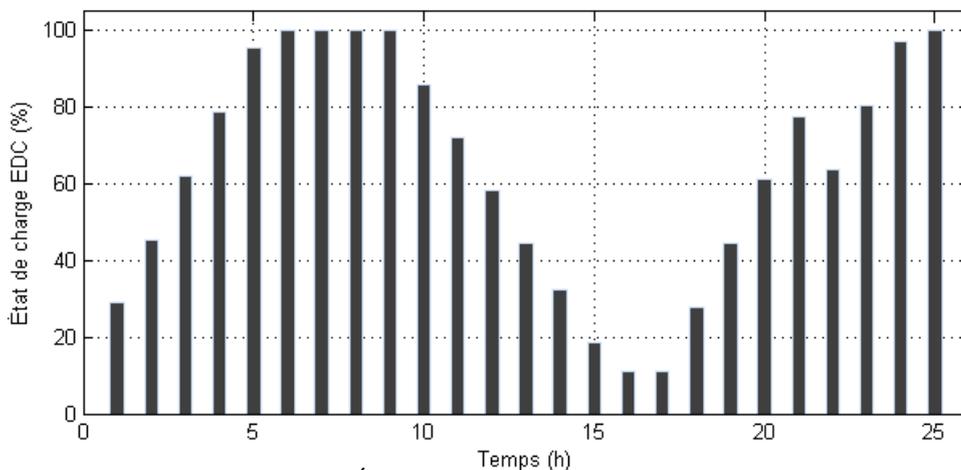


FIGURE III.9 – État de charge du système de stockage.

La quantité d'émissions est directement liée aux deux sources : le réseau principal et la micro-turbine, responsables des émissions de gaz à effet de serre. Selon la figure III.10, il est clair que les émissions sont plus importantes durant la nuit en raison des prix unitaires réduits du réseau et donc l'exploitation primordiale de ce dernier par le micro-réseau, en profitant ainsi, pour recharger le système de stockage.

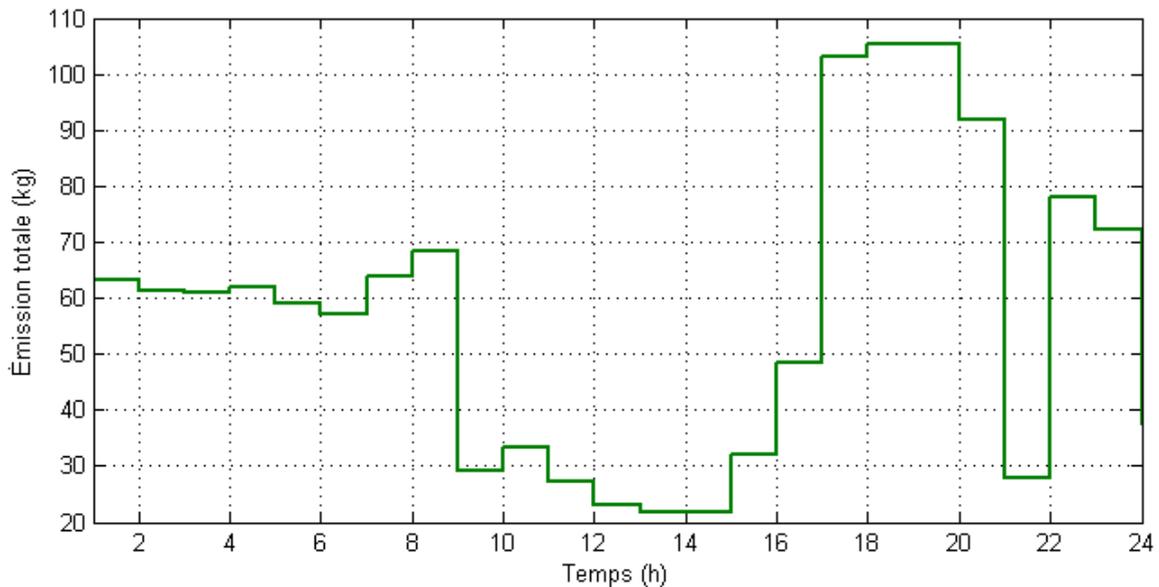


FIGURE III.10 – Les émissions totales quotidiennes dues à l'utilisation des sources fossiles du micro-réseau.

III.4.2 Scénario 2 : Gestion optimale des sources avec injection dans le réseau

Dans ce cas d'étude, l'énergie issue des différentes sources énergétiques est utilisée pour couvrir les besoins énergétiques du système de stockage et de le charger, tout en préservant l'aspect économique en choisissant les heures où le prix est le moins cher possible. Cependant, si les batteries s'avèrent complètement chargées, le surplus d'énergie issu des sources renouvelables dans ce cas, sera distribué et vendu au réseau avec les mêmes prix d'achats de ce dernier. Durant cette gestion, on notera le prix optimal retenu de l'optimisation ainsi que le taux d'émissions des GES consécutifs des opérations énergétiques effectuées par le micro-réseau. En ajout, la puissance des générateurs d'énergies renouvelables (PV et éolien) dans ce cas est pleinement exploitée, afin, de mettre en évidence l'impact de l'injection au réseau principal et ses conséquences environnementales.

Le tableau III.7 représente la répartition optimale des puissances des sources du micro-réseau avec injection, issues de l'exécution de nos programmes d'optimisation sur Matlab.

TABLE III.7 – Résultats obtenus de la gestion optimale avec injection.

Heures (h)	PV (kW)	Éolien (kW)	MT (kW)	Batterie (kW)	Réseau (kW)	Consommation (kW)
01 :00	0	16.0133	6	-33.3333	63.32	52
02 :00	0	16.0800	6	-33.3333	61.2533	50
03 :00	0	16.1600	6	-33.3333	61.1733	50
04 :00	0	16.1733	6	-33.3333	62.16	50
05 :00	0	17.6800	6	-8.8889	41.2089	51
06 :00	0	16.1733	6	0	40.8267	63
07 :00	0	17.6800	6	0	46.3200	70
08 :00	0.1	16.1733	6	0	52.7267	75
09 :00	0.59	14.7333	30	22.5	8.1767	76
10 :00	1.9800	13.1600	30	22.5	12.36	80
11 :00	7.7500	11.6667	30	22.5	6.0833	78
12 :00	9.8	10.1468	30	22.5	1.5532	74
13 :00	10.65	11.6667	30	19.6833	0	72
14 :00	9.7	10.1460	30	22.1540	0	72
15 :00	8.12	14.6467	30	12.1627	11.0706	76
16 :00	4.9500	16.2133	30	0	28.8367	80
17 :00	1.1	16.1467	27.2333	-33.3333	73.8533	85
18 :00	0.1	19.1330	30	-33.3333	72.1003	88
19 :00	0	17.5333	30	-33.3333	75.8000	90
20 :00	0	18.6493	11.6840	-33.3333	90	87
21 :00	0	19.0400	30	22.5	6.46	78
22 :00	0	19.0300	6	-33.3333	79.3033	71
23 :00	0	19.3330	6	-33.3333	73.0003	65
24 :00	0	19.6900	6	-5.5556	35.8656	56

D'après les résultats obtenus, on constate que les sources renouvelables sont pleinement exploitées, aucune perte de puissance n'est causée. L'excès d'énergie après avoir répondu aux besoins locaux du micro-réseau, a permis d'assurer le chargement du système de stockage avec

succès de telle sorte qu'en fin de journée, la batterie était totalement chargée. En outre, une quantité de 116.0529 kW a également été livrée au réseau principal, cela a permis de réduire la facture énergétique totale journalière du micro-réseau à 137,6627 €, et de réduire les émissions des GES à 1246,1 kg.

Cette réduction d'émissions est obtenue après avoir injecté de l'énergie verte issue des sources renouvelables dans le réseau, de tel sorte que l'énergie extraite des centrales fossiles sera réduite, et donc les émissions causées par ces dernières seront également réduites. Cette approche a permis d'illustrer l'impact économique de l'injection d'énergie verte dans le réseau principale, et c'est aussi une approche de sensibilisation en raison de la contribution à la réduction des gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique, le tableau III.8 montre les résultats de cette approche.

TABLE III.8 – Les résultats du second scénario.

Prix opérationnel (€)	Quantité totale d'émission (kg)
137,6627	1246,1

La figure III.11 représente les résultats obtenus de la simulation des deux algorithmes d'optimisation sur Matlab. On remarque bien que les résultats obtenus sont identiques, cela confirme la fiabilité et l'efficacité des deux programmes. Néanmoins, on constate que la vitesse de convergence du PSO est presque 100 fois plus rapide que l'AG.

```

Le_Prix_Total_Avec_Injection_Selon_PSO =
    137.6627

Les_Emissions_Totales_Avec_Injection_Selon_PSO =
    1.2461e+03

Elapsed time is 0.117495 seconds.
>>

Le_Prix_Total_Avec_Injection_Selon_AG =
    137.6627

Les_Emissions_Totales_Avec_Injection_Selon_AG =
    1.2461e+03

Elapsed time is 13.750034 seconds.
>>

```

FIGURE III.11 – Résultats de simulation sur Matlab.

Similairement au premier cas, on observe que la somme des différentes puissances est égale à la valeur de puissance de la charge pour chaque heure (figure III.12), et donc la contrainte d'équilibre de puissance est vérifiée.

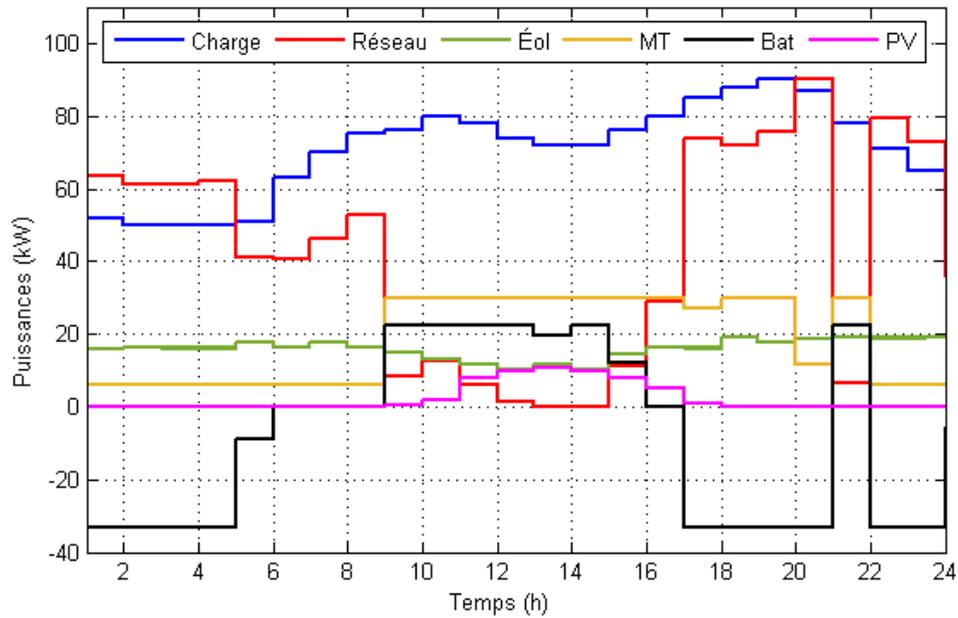


FIGURE III.12 – Les consignes de puissance optimales obtenues au second scénario

La figure III.13 représente les prix unitaires horaires des flux énergétiques optimales des diverses sources et le prix optimal obtenus par les deux algorithmes d'optimisation pour chaque heures de fonctionnement durant la journée, avec la possibilité d'injection du surplus du micro-réseau dans le réseau principale.

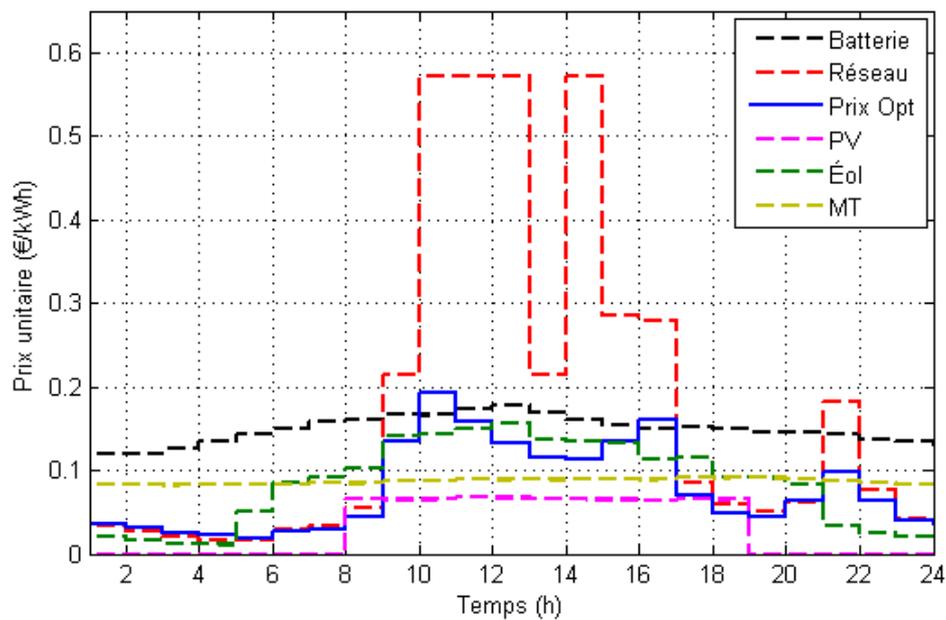


FIGURE III.13 – Les prix unitaires des puissances issues de la planification optimale et le prix optimal de facturation du second scénario.

Il est remarquable que la source photovoltaïque et éolienne soient pleinement exploitées pendant la journée, afin de pouvoir profiter de l'intérêt de l'injection d'énergie verte dans le réseau principal d'où la réduction de la facture énergétique et le taux d'émission des GES. La gestion de puissance des autres sources semble identique au premier scénario, sauf le réseau principal qui subit des changements dus à son prix qui reste fortement élevé durant la journée par rapport à la micro-turbine et au système de stockage.

Le réseau en soi fournit une énergie précise pour répondre aux exigences de la charge. Néanmoins, cette énergie n'est pas totalement dénombrable dans la facture d'énergie, or, la puissance injectée durant des heures données est soustraite et compense l'énergie qui est censé être fournie par le réseau. De cette façon durant la facturation, il n'y aura que la puissance payée qui sera prise en compte. La figure III.14 représente la puissance fournie par le réseau, la puissance injectée, ainsi que la puissance payée ou prise en compte dans la facturation

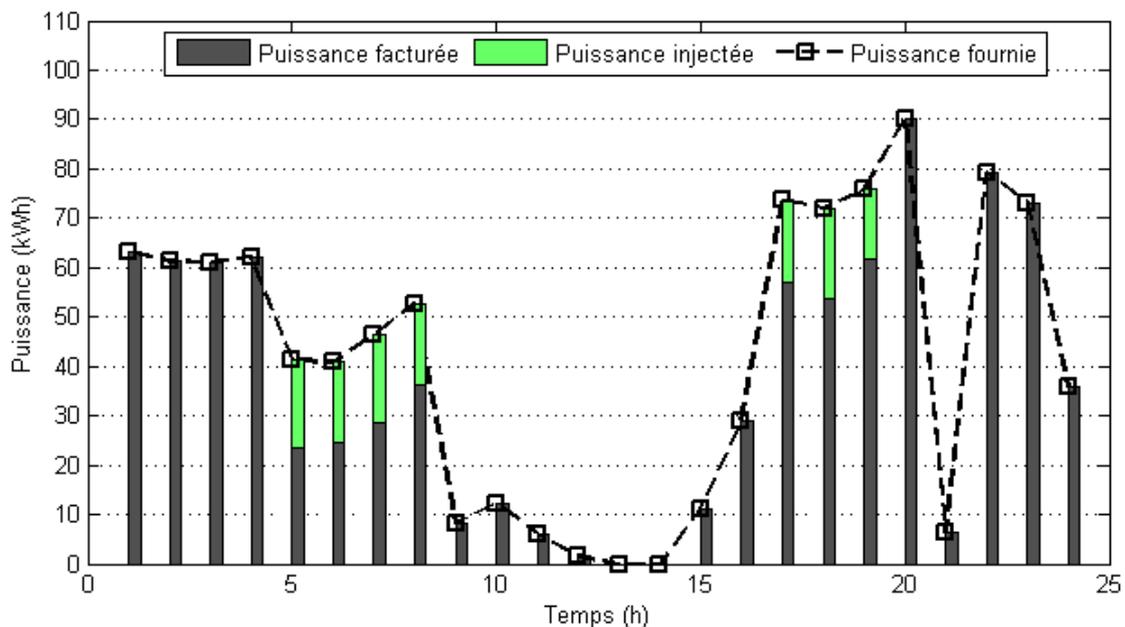


FIGURE III.14 – La puissance fournie par le réseau, la puissance injectée et la puissance payée durant une journée.

La quantité d'émissions est directement liée aux deux sources : le réseau principal et la micro-turbine, responsables des émissions de gaz à effet de serre. Selon la figure III.15, il est clair que les émissions sont plus importantes durant la nuit en raison des prix unitaires réduits du réseau et donc l'exploitation primordiale de ce dernier par le micro-réseau, en profitant ainsi, pour recharger le système de stockage. Le taux d'émission dans ce cas, reste plus faible que le

premier cas où il n'y avait pas d'injection d'énergie.

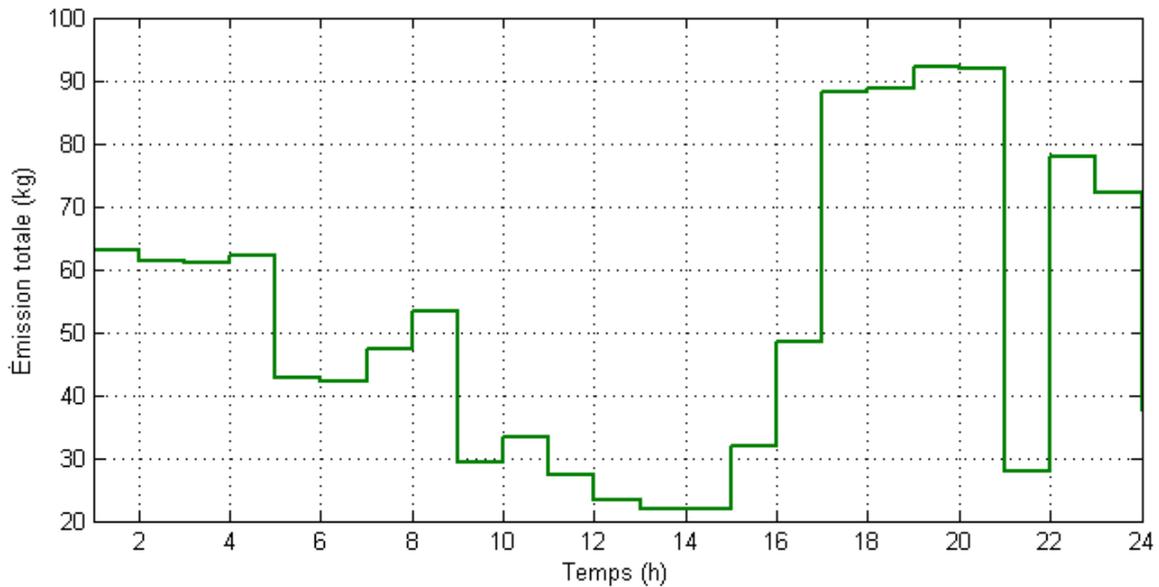


FIGURE III.15 – Les émissions totales quotidiennes dues à l'utilisation des sources fossiles du micro-réseau avec injection.

III.5 Synthèse

Les deux approches ont été adoptées afin d'approuver l'importance de la gestion d'énergie dans les installations micro-réseaux et en la renforçant en démontrant l'impact de l'injection d'énergie verte dans le réseau public de distribution. Les résultats obtenus de la simulation ont clairement illustrés cette importance, la stratégie de gestion a permis de sélectionner les meilleurs consignes pour les générateurs distribués de manière à ce que la puissance horaire demandée par la communauté soit assurée au coût le plus bas. Et par conséquent, la courbe de variation du coût de fonctionnement énergétique obtenue au cours de la journée est remarquablement réduite lors des pics de consommation.

Les résultats obtenus de la simulation des deux scénarios ont clairement montrés l'impact de l'injection suivant deux critères essentiels : économiques et écologiques. On observe bien que durant les heures d'injection, une réduction au niveau de la facturation et des émissions de GES a été enregistrée. En effet, cette réduction est due au fait d'injecter le surplus d'énergie verte dans le réseau, qui de base utilise de l'énergie provenant principalement des centrales fossiles. Donc, le fait de lui approvisionner une partie d'énergie issue des générateurs à ER pour couvrir

son seuil énergétique, au lieu d'avoir recours aux autres centrales fossile, réduira forcément les émissions de GES dégagés dans l'atmosphère. Similairement pour la facture quotidienne, l'échange énergétique entre le réseau et le micro-réseau fait en sorte que l'énergie fournie au réseau sera automatiquement retrancher de la facture durant les heures d'injection, ce qui mine de rien réduit lisiblement le coût de la facture journalière. La figure III.16 représente la comparaison des tarifs horaires dans le cas d'injection et sans injection.

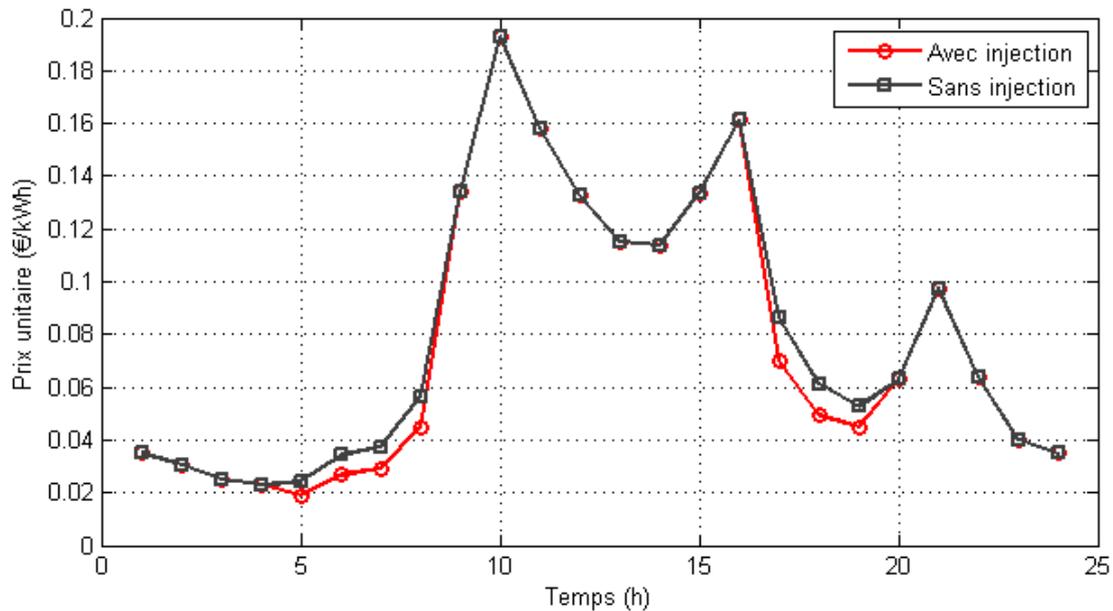


FIGURE III.16 – Comparaison des tarifs horaires quotidiennes avec et sans injection.

On remarque clairement que durant les heures d'injections, les tarifs diminuent en coût due à la procédure de vente d'énergie au réseau de distribution, et donc le prix de cette dernière est retrancher des tarifs horaires à payer lors des heures d'injections. Ce qui mène à une réduction nette dans la facture totale quotidienne d'électricité.

La figure III.17 représente la comparaison des émissions de GES avec et sans injection à cotées de la puissance injectée dans le réseau.

Comme mentionner en amont, la réduction se produit principalement durant les heures d'injections, la figure illustre nettement ça en comparant la différence d'émissions dégagées à cotée de la puissance injectée durant la journée.

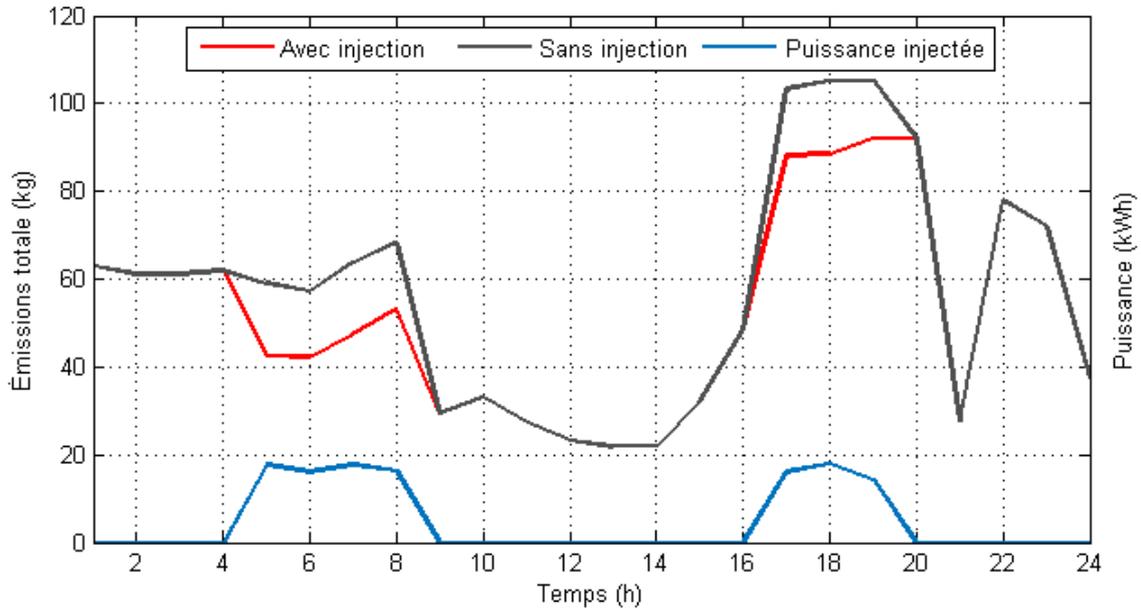


FIGURE III.17 – Comparaison des émissions de GES avec et sans injection à cotées de la puissance injectée dans le réseau.

Le but de ce mémoire était de démontrer l'importance de la gestion des flux énergétiques dans les installations hybrides, en réduisant de manière tact et optimale les tarifs horaires de la facture d'électricité quotidienne. Les résultats ont montré ostensiblement des avantages économiques plus adéquats et pertinents par rapport à un système classique.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la stratégie de gestion des ressources énergétiques proposée a été appliquée au modèle de micro-réseau présenté au chapitre 2. Ce dernier se compose de générateurs renouvelables, d'une micro-turbine et d'un système de stockage. La simulation nous a permis de mettre en évidence qu'il était possible de satisfaire la consommation d'énergie en manipulant le flux d'énergie issue de chaque source. En effet, ceci a permis de réduire de façon significative le prix horaire de l'énergie payée et de pouvoir gérer les quantités d'énergies provenant de diverses sources qui circulent dans le micro-réseau. Et par conséquent la facture électrique enregistrée était la valeur minimum que le consommateur doit payer. Ces résultats renforcent la conviction de l'obligation de mettre en place un système de gestion pour les installations micro-réseaux ou hybride tout court. L'étude des différentes approches a clairement démontrée l'impact économique et écologique de l'injection d'énergie verte dans le réseau de distribution. Son importance ne se résume pas seulement ici, mais est aussi une notion très importante envers l'adoption des réseaux intelligents (Smartgrid). Les techniques PSO et AG ont été mises en œuvre dans ce mémoire pour porter sur le processus d'optimisation. Les résultats de la simulation ont confirmé que le PSO est la technique d'optimisation prometteuse en raison de sa capacité à atteindre l'optimum global avec une simplicité relative et sa grande vitesse de convergence.

*Conclusion générale
et perspectives*

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons proposé une stratégie de gestion utilisant le PSO et l'AG pour un fonctionnement optimal des générateurs distribués du micro-réseau et une planification optimale de la consommation d'énergie de la charge tout en évaluant le coté écologique de ces opérations. De cette manière le prix de tarification d'énergie horaire diminue jusqu'à l'obtention de la facture énergétique la moins cher possible.

A cet effet, deux scénarios sont appliqués pour renforcer plus cette étude. Le premier représente l'optimisation d'un micro-réseau sans injection dans le réseau. Ce dernier cherche les meilleures consignes pour les générateurs distribués de manière à ce que la puissance horaire demandée par la communauté soit assurée au coût le plus bas. La courbe de variation du coût de fonctionnement énergétique obtenue au cours de la journée est remarquablement réduite surtout lors des pics de consommation. Néanmoins, le surplus énergétique issue des générateurs renouvelables est perdu par le délestage.

Le deuxième scénario permet de minimiser encore plus la facture énergétique quotidienne en injectant le surplus d'énergie verte issue des générateurs renouvelables dans le réseau principal. L'étude de ce scénario a permis d'illustrer l'impact économique et écologique de l'échange énergétique mutuel entre les micro-réseaux et les réseaux publics sans affecter le confort des consommateurs. En plus, elle a justifié la forte nécessité de la mise en œuvre des stratégies de gestions optimales dans les micro-réseaux. La comparaison des résultats des deux scénarios montre une réduction des factures d'électricité journalière, une amélioration notable de la production renouvelable et une réduction importante de l'émission des GES dans l'air. La comparaison entre les techniques PSO et AG a confirmé que le PSO est la technique d'optimisation prometteuse en raison de sa capacité à atteindre l'optimum global avec une simplicité relative et sa grande vitesse de convergence.

Perspectives

L'amélioration qui peut être apportée à ce travail, serait d'inclure une stratégie de gestion d'optimisation dont la fonction est multi-objective de telle sorte qu'en plus du coût d'exploitation, les émissions de gaz à effet de serre des générateurs à combustibles fossiles soient simultanément minimisées. De cette manière, l'étude sera plus généralisée et touchera les aspects fondamentaux des micro-réseaux et des énergies renouvelables. On peut aussi ajouter la stratégie de planification en priorisant les différentes charges. Cette stratégie permet une gestion plus fiable et plus souple de la consommation énergétique, sans forcément influencer le confort des consommateurs. Et par conséquent, la facture énergétique diminue par la suite.

*Références
bibliographiques*

Bibliographie

- [1] Stefan WEITEMEYER, David KLEINHANS, Thomas VOGT et Carsten AGERT : Integration of renewable energy sources in future power systems : The role of storage. *Renewable Energy*, 75:14–20, 2015.
- [2] Abdelfettah KERBOUA, Fouad BOUKLI-HACENE, Khaldoun A MOURAD *et al.* : Particle swarm optimization for micro-grid power management and load scheduling. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(2):71–80, 2020.
- [3] Mohamed A MOHAMED, Ali M ELTAMALY et Abdulrahman I ALOLAH : Pso-based smart grid application for sizing and optimization of hybrid renewable energy systems. *PloS one*, 11(8):312–351, 2016.
- [4] M FADAEI et MAM RADZI : Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms : A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5):3364–3369, 2012.
- [5] Sandra YALEKO KONGO : *Logistique de l'installation et de l'exploitation des énergies renouvelables en site isolé nordique*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, 2016.
- [6] IEA – international energy agency. [Siteweb], consulté le : Juillet 2020. URL : <https://www.iea.org/>.
- [7] WEC – le conseil mondial de l'énergie. [Siteweb], consulté le : Juillet 2020. URL : <https://www.worldenergy.org/>.
- [8] REN21 – ren21 renewables now. [Siteweb], consulté le : Juillet 2020. URL : <https://www.ren21.net/>.
- [9] Nations UNIES : Protocole de kyoto la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques. *Kyoto, Japon*, 1998.
- [10] L. STOYANOV : *Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelables*. Thèse de doctorat, Université Technique de Sofia, 2018.

-
- [11] H. ADEL : *Stratégie de gestion multi énergie dans un systém hybride éolien-diesel-dispositif de stockage*. Thèse de doctorat, Université de Quebec a Trois-rivières, 2018.
- [12] L. CHALAL : *Coordination de systèmes multisources pour favoriser la production d'énergie électrique Renouvelable*. Thèse de doctorat, Université Lille 1, 2013.
- [13] Ludmil STOYANOV : *Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables*. Thèse de doctorat, Université De Corse Pasquale Paoli, 2011.
- [14] B. SAMER : *Optimisation de dimensionnement d'un système hybride eolien/diesel autonome*. Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougraa de Boumerdes, 2015.
- [15] Azeddine HOUARI : *Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [16] Xiandong MA, Yifei WANG et Jianrong QIN : Generic model of a community-based microgrid integrating wind turbines, photovoltaics and chp generations. *Applied energy*, 112:1475–1482, 2013.
- [17] Moataz ELSIED, Amrane OUKAOUR, Hamid GUALOUS et Radwan HASSAN : Gestion de l'énergie et optimisation du système multisources basée sur l'algorithme génétique. 2014.
- [18] Aqeel Ahmed BAZMI et Gholamreza ZAHEDI : Sustainable energy systems : Role of optimization modeling techniques in power generation and supply—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8):3480–3500, 2011.
- [19] CG JUSTUS : Wind energy statistics for large arrays of wind turbines (new england and central us regions). *Solar Energy*, 20(5):379–386, 1978.
- [20] Bogdan S BOROWY et Ziyad M SALAMEH : Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/pv system. *IEEE Transactions on energy conversion*, 9(3):482–488, 1994.
- [21] Hanieh BORHANAZAD, Saad MEKHILEF, Velappa Gounder GANAPATHY, Mostafa MODIRI-DELSHAD et Ali MIRTAHERI : Optimization of micro-grid system using mopso. *Renewable Energy*, 71:295–306, 2014.
- [22] Said DIAF, Djamila DIAF, Mayouf BELHAMEL, Mourad HADDADI et Alain LOUCHE : A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid pv/wind system. *Energy policy*, 35(11):5708–5718, 2007.
- [23] Yu ZHANG, Nikolaos GATSIS et Georgios B GIANNAKIS : Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables. *IEEE transactions on sustainable energy*, 4(4):944–953, 2013.
- [24] Jeremy LAGORCE : Modeling, design and optimization of power systems for decentralized renewable energy-implementation of multi-agent systems for energy management. 2009.

- [25] Changsong CHEN, Shanxu DUAN, Tong CAI, Bangyin LIU et Gangwei HU : Smart energy management system for optimal microgrid economic operation. *renewable power generation*, 5(3):258–267, 2011.
- [26] Mehdi MOTEVASEL et Ali Reza SEIFI : Expert energy management of a micro-grid considering wind energy uncertainty. *Energy Conversion and Management*, 83:58–72, 2014.
- [27] Marcos G JUDEWICZ, Juan F MARTÍNEZ, Jonatan R FISCHER, Sergio A GONZÁLEZ et Daniel O CARRICA : Linear programming based mpc of a grid-connected vsi. *In 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [28] Abdenour ABDELLI : *Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2007.
- [29] Ronald A DEVORE et Vladimir N TEMLYAKOV : Some remarks on greedy algorithms. *Advances in computational Mathematics*, 5(1):173–187, 1996.
- [30] Frédéric WURTZ : *Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1996.
- [31] Abdelhak BEN JEMAA : *Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride*. Thèse de doctorat, Reims, 2015.
- [32] Duy Long HA : *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation*. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [33] Rodolfo DUFO-LÓPEZ et José L BERNAL-AGUSTÍN : Design and control strategies of pv-diesel systems using genetic algorithms. *Solar energy*, 79(1):33–46, 2005.
- [34] H Hameed ABDUL-MATEEN, Mohsen Taha ELHAGRI, Adel A SHALTOUT et Mohamed M Abdel AZIZ : Optimum sizing of hybrid wt/pv systems via open-space particle swarm optimization. *In 2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, pages 55–60. IEEE, 2012.
- [35] Charles DARWIN : *L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature*. C. Reinwald, 1887.
- [36] Mahamad Nabab ALAM : Particle swarm optimization : Algorithm and its codes in matlab. *ResearchGate*, 8:1–10, 2016.
- [37] Faisal A MOHAMED et Heikki N KOIVO : Online management genetic algorithms of microgrid for residential application. *Energy Conversion and Management*, 64:562–568, 2012.

Annexes

Annexe A

Les algorithmes

A.1 Algorithme PSO

Algorithm 1: PSO

Input : $N_j, P_{load}, B_{pv}, B_{eo}, B_{bat}, B_r, EF(t) f(P_{pv}, P_{eo}, P_{bat}, P_r)$

Output: $P_{pv}, P_{eo}, P_{bat}, P_r, EM(t), C(t)$

1 **Initialisation** : $n_{pop}, n_{it}, n_{var}, c_1, c_2, \omega, lb, ub$

2 PSO;

3 **for** $i \leftarrow 1$ **to** n_{it} **do**

4 **Initialisation** : $\vec{x}_i(t), \vec{x}_{Best}, \vec{v}_i(t), \vec{G}_{best}(t)$

5 **for** $j \leftarrow 1$ **to** n_{pop} **do**

6 $\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1)$

7 $\vec{v}_i(t+1) = c_0 \cdot \vec{v}_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot \vec{P}_i(t) - \vec{x}_i(t) + c_2 r_2 (\vec{G}_{best}(t) - \vec{P}_i(t))$

8 **if** $f(\vec{x}_i(t)) < f(\vec{x}_{Best}(t))$ **then**

9 $\vec{x}_i(t) = f(\vec{x}_{Best}(t))$ // Evaluation de la position

10 **if** $f(\vec{x}_{Best}(t)) < f(\vec{G}_{Best})$ **then**

11 $f(\vec{G}_{best}) = f(\vec{x}_{Best}(t))$ // Evaluation du meilleur global

12 **else**

13 **return**

14 **end if**

15 **else**

16 **return** $j = j + 1$

17 **end if**

18 **end for**

19 $G_{solution} = f(\vec{G}_{best})$ // Meilleure solution de l'itération i

20 **end for**

21 **return** $i = i + 1$

A.2 Algorithme génétique

Algorithm 2: Algorithme génétique**Input** : $N_j, P_{load}, B_{pv}, B_{eo}, B_{bat}, B_r, EF(t) f(P_{pv}, P_{eo}, P_{bat}, P_r)$ **Output:** $P_{pv}, P_{eo}, P_{bat}, P_r, EM(t), C(t)$

```

1 Initialisation :  $n_{pop}, n_{generation}, n_{it}, n_{var}, \eta_{croisement}, \eta_{mutation}, \beta, \gamma, \sigma, lb, ub$ 
2 AG;
3 for  $i \leftarrow 1$  to  $n_{it}$  do
4   Initialisation :  $\vec{x}_i(t)$  // Initialisation des chromosomes parents
5   for  $j \leftarrow 1$  to  $n_{pop}$  do
6     Selection;
7      $C_{Prob} = \exp(-\beta * c)$ 
8     Croisement;
9     for  $k \leftarrow 1$  to  $n_{generation}/2$  do
10       $P_1 = Roulette(C_{Prob})$ 
11       $P_2 = Roulette(C_{Prob})$ 
12       $(x_{k1}, x_{k2}) = Croisement(P_1, P_2)$ 
13    end for
14    Mutation;
15    for  $l \leftarrow 1$  to  $n_{generation}$  do
16       $x_l = Mutation(x_k)$ 
17      if  $f(x_l) < f(x_{Best})$  then
18         $x_{solution} = x_l$  // Meilleure solution de l'itération l
19      else
20        return
21      end if
22    end for
23     $n_{pop} = n_{generation}$ 
24  end for
25   $C_{ost} = f(x_{solution})$  // Meilleure prix de la meilleure solution
26 end for
27 return  $i = i + 1$ 

```